Библиотека СОК

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

AIDE-MÉMOIRE
DE
L'INDUSTRIE DU GAZ

Quatrième édition (1990)

ASSOCIATION TECHNIQUE
DE L'INDUSTRIE DU GAZ EN FRANCE

62, rue de Courcelles, 75008 Paris

ISBN № 2-86655-050-1

Ассоциация не ответственна за мнение своих членов, даже этого издания.
Никто не имеет права на это издание без разрешения Французской газовой ассоциации
(Статья 5 устава, дополненная статьей 11 внутренних правил)

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

4-е издание (1990)

Перевод с французского:
канд. техн. наук А.М. ЗУЕВ, д-р эконом. наук К.Н. МИЛОВИДОВ,
канд. техн. наук. Л.И. ГРИГОРЬЕВ, д-р техн. наук М.Б. ПАНФИЛОВ,
канд. техн. наук В.Н. ПЕТРОВ, д-р техн. наук Г.Д. РОЗЕНБЕРГ,
канд. техн. наук В.Ф. СТАРШОВ, д-р техн. наук В.Т. ХАРИН

под редакцией академика, д-ра техн. наук, проф. К.С. БАСНИЕВА

Координатор перевода и издания:
канд. геол.-минер. наук В.А.ТИМОФЕЕВ

Москва,
Акционерное общество "ТВАНТ"
1994

ББК 33.36
Э.68
УДК 622.279:622.691(031)

Издание на русском языке финансировалось
Российским акционерным обществом "ГАЗПРОМ"
и Акционерным обществом "ТВАНТ"

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. 4-е изд. Пер. с франц.;
Э.68 Ред. пер. К.С.Басниев.–М.: Акционерное общество "ТВАНТ",
1994.–884 с.: нл.
ISBN 5–2–Ш–9–(03)

Энциклопедия, являющаяся комплексным справочно-информационным пособием в области фундаментальных знаний, технологии и техники газовой промышленности, рассматривает широкий круг вопросов добычи, подготовки, подземного хранения, транспорта и переработки природных и попутных нефтяных газов, их рапределения и рационального использования. Она в значительной мере базируется на международных и французских нормах, правилах и законодательстве во всех областях, связанных с газовой промышленностью.

Книга содержит большое количество справочных данных, схем, рисунков, таблиц, графиков, необходимых для проектирования и анализа различных технологических процессов газовой промышленности. Инциклопедия предназначается для инженерно-технических работников, студентов и аспирантов, специализирующихся в области газовой промышленности.

Э $\frac{2503010000-01}{ЛР\ 062952-94}$ без объявл. ББК 33.36

ISBN 5–2–Ш–9–(03)

ISBN 2–86655–050–1

© Association teehnique de l'industrie du gaz en Prance, 1990

© Перевод на русский язык: Акционерное общество "ТВАНТ"

ПРЕДИСЛОВИЕ К ИЗДАНИЮ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Французская газовая ассоциация, основанная в 1874 г., только в 1936 г. решила собрать все знания, необходимые инженеру газовику, в единый труд под названием "Справочник газовой промышленности". На эту трудоемкую работу было затрачено четыре года. В итоге пришел ожидаемый успех: все французские и говорящие по-французски специалисты газовой промышленности пожелали иметь это издание в своей библиотеке в качестве настольной книги.

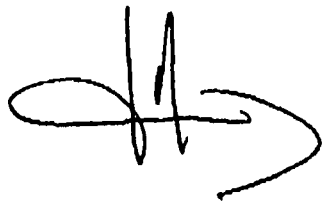
В дальнейшем технический прогресс обусловил подготовку второго издания, вышедшего в 1953 г. и затем – третьего, вышедшего в 1972 г.. Оба издания имели такой же успех среди специалистов.

В 1983 г. Французская газовая ассоциация решила подготовить четвертое издание, целью которого было не просто пересмотреть этот труд, но по сути составить его заново как по форме, так и по содержанию, чтобы учесть огромную революцию, происшедшую во французской газовой промышленности при замене использования искусственного газа природным.

Более двухсот экспертов под руководством господина Ш.-Б. РУ взялись за работу по составлению четвертого издания, в котором планировалось показать самые последние достижения техники и технологии. Эта работа завершилась в 1990 г.

Когда в 1992 г. наши русские коллеги Государственной академии нефти и газа им. И.М.Губкина просили руководство Французской газовой ассоциации дать разрешение сделать перевод Справочника газовой промышленности и издать его на русском языке, мы были рады тому, что известность этой работы перешла границы. Более того, мы также рады тому обстоятельству, что благодаря этому труду французские и русские газовики смогут говорить на одинаковом техническом языке и еще лучше работать вместе.

Я выражаю свою благодарность господам К.Басниеву и В.Тимофееву,а также всем их сотрудникам которые довели до конца эту большую переводческую работу. Я желаю, чтобы издание Энциклопедии газовой промышленности на русском языке было полезным в развитии российской газовой промышленности.



ЖАК МЭР
Президент Французской
Технической Газовой Ассоциации

К ЧИТАТЕЛЮ

Вышло четвертое издание энциклопедического справочника по газовой промышленности. Для Президента Французской газовой ассоциации приятная миссия его представить. Даже если это издание занимает место в ряду изданий, которые уже были опубликованы под этим же названием в 1940, 1953 и в 1972 годах и которые имели большую известность среди газовиков, оно полностью пересмотрено по содержанию и форме таким образом, чтобы стать действительной энциклопедией сегодняшней газовой промышленности: в ней показана наиболее современная техника и технология газовой промышленности. Конечно, чтобы отвечать полностью названию, как и в предыдущих изданиях, большое место в ней отведено общетехнологическим фундаментальным вопросам. Это позволяет читателю избегать обращения к многочисленным учебным пособиям для углубления знаний по тому или иному вопросу.

Выпуску этого издания предшествовала поистине гигантская многолетняя работа. Начатая в 1983 году г-ном Генри Вейссером, в то время президентом комиссии по образованию и документам нашей ассоциации, она была продолжена г-ном Шарлем-Бернаром Ру, который собрал вокруг себя лучших специалистов.

Я их всех благодарю от имени нашей ассоциации, от имени французской газовой промышленности и от собственного имени. Эти инженеры добровольно посвятили драгоценные часы своего собственного рабочего времени, и часто времени своего отдыха, чтобы редактировать, исправлять, переправлять и закончить это издание. Я также благодарю их предприятия, которые позволили посвящать время решению этой задачи.

Эта работа делает честь нашей промышленности и показывает профессиональный уровень ее работников, способных довести до конца такое большое дело.

И. КОСТ
Президент Французской газовой ассоциации.

К ЧИТАТЕЛЯМ

Предлагаемое вниманию специалистов газовой промышленности переводное издание "Энциклопедия газовой промышленности" представляет собой концентрированное изложение основных справочно-информационных данных, правил и технологии газовой промышленности во всей системе от добычи газа до его рационального использования. Она отражает знания, информацию и опыт газовой промышленности Франции и других зарубежных стран.

Энциклопедия, подготовленная большой группой ведущих специалистов газовой промышленности Франции, выходит на русском языке своевременно, в период интенсивного научно-технического и экономического сотрудничества в области газа между нашими странами. Ознакомление с энциклопедией и ее практическое использование российскими специалистами и русскоговорящими специалистами других стран СНГ поможет лучшему взаимопониманию и обмену научно-техническим опытом газовиков различных стран.

Материал книги подобран таким образом, что она является настольным справочным материалом для широкого круга научно-технических работников газовой, нефтяной и нефтегазоперерабатывающей промышленности, а также хорошим учебным пособием для студентов и аспирантов.

Значительная часть приведенного в книге материала публикуется на русском языке впервые.

РАО "ГАЗПРОМ" поддержало издание в России перевода "Энциклопедии газовой промышленности" и считает, что она найдет заметное место в Справочно-информационном обеспечении специалистов газовой промышленности.

Мы благодарны руководству Французской ассоциации за благожелательное сотрудничество в подготовке к изданию на русском языке четвертого издания "Энциклопедия газовой промышленности".

Академик Международной и Российской
инженерной академии



Р.И. Вяхирев

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Предлагаемая вниманию читателей в переводе с французского на русский язык "Энциклопедия газовой промышленности" подготовлена большой группой ведущих специалистов – членов Французской газовой ассоциации под общим руководством председателя комиссии по образованию и технической документации господина Шарля-Бернара Ру.

Русскоязычному читателю предлагается четвертое издание, вышедшее в 1990 году. Предыдущие издания выходили в свет соответственно в 1940, 1953 и 1972 годах с тем же названием. Однако, круг рассматриваемых вопросов и глубина представления справочного материала непрерывно расширялись и совершенствовались в соответствии с научно-техническим прогрессом во всех направлениях газовой промышленности во Франции и во всем мире.

Последнее, четвертое издание представляет собой наиболее полное справочное руководство, охватывающее все современные направления развития газовой промышленности. В нем представлены сведения по добыче и подготовке газа к транспорту, подземному хранению, сжиженному природному и попутному газу, трубопроводному транспорту, распределению и использованию газа. Ознакомившись с подробным оглавлением, помещенным в конце книги, читатель увидит весь обширный круг специальных вопросов в каждом из рассматриваемых направлений.

Учитывая это, мы обратились к авторам и Французской газовой ассоциации с предложением выпустить русское издание "Справочник работника газовой промышленности" под названием "Энциклопедия газовой промышленности". Это правильно, так как в предлагаемой вниманию специалистов книге методически излагаются результаты и принципы, лежащие в основе газовой промышленности фундаментальных и прикладных наук, технологий и техники, общие знания и разнообразный справочный материал, необходимый для решения инженерных и технических задач.

С любезного согласия руководства Французской газовой ассоциации данная книга на русском языке выходит под названием "Энциклопедия газовой промышленности".

Из предшествующих книг справочного характера, опубликованных ранее в нашей стране, следует отметить "Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа", написанное под общим руководством проф. Д. Катца, вышедшее в издательстве "Недра" в 1965 году[1]. Это руководство имело большое значение для ознакомления отечественных специалистов с вопросами добычи, транспорта и переработки природного газа за рубежом и отражало, в основном, состояние газовой промышленности США примерно 30 лет тому назад. С тех пор, справочных руководств по газовой промышленности, отражающих достаточно полно состояние газовой науки, технологий и техники за рубежом, на русском языке практически не выпускалось. Да и отечественной справочной литературы по газовой промышленности тоже явно недостаточно.

Предлагаемая вниманию специалистов "Энциклопедия газовой промышленности" в значительной мере устраняет этот пробел. Газовая промышленность России, развивающаяся быстрыми темпами благодаря огромным ресурсам газа и потребностям его использования внутри страны и за

[1] См. Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа. Авт. Д.Л. Картц, Д. Корнелл, Р. Кобаяши и др. Перевод с английского под общей редакцией Ю.П. Коротаева и Г.В. Пономарева, М., Недра, 1965, 676 стр.

рубежом, все больше интегрируется с газовой промышленностью всего мира. В связи с этим ускоренно развивается взаимовыгодная научно-техническое и экономическое сотрудничество различных стран в области природного газа. Большое значение в этих условиях имеет взаимный обмен информацией, опытом, новыми технологиями и техникой. Разнообразное западное газовое оборудование и технологии используются в России и в странах СНГ. Ознакомление русскоязычных специалистов этих стран с газовой наукой, техникой и технологиями по материалам предлагаемой энциклопедии будет несомненно содействовать повышению квалификации специалистов, их информированности, росту эффективности использования газа. С другой стороны, значительные количества газа из России и других стран СНГ экспортируется в европейские страны. Повышение эффективности его доставки и использования в этих странах также зависит от опыта и квалификации работников газовой промышленности, знаний и возможностей газового оборудования и технологий. В реализации совместных международных проектов, осуществляемых специалистами различных стран, важно обеспечить общее понимание многих научных, технических и экономических проблем, чему в немалой степени будет способствовать использование энциклопедии.

Российско-французское сотрудничество в области газа продолжается многие годы. Оно особенно эффективно развивалось в период освоения серогазоконденсатных месторождений Прикаспия: Оренбургского, Астраханского, Карачаганак и др., реализации проектов доставки российского газа в Европу, в многочисленных проектах по рациональному использованию природного газа. Газовая промышленность Франции имеет огромные достижения и свои специфические особенности, связанные с ограниченностью запасов газа, необходимостью доставки его значительных количеств из-за рубежа. Поэтому, в газовой промышленности получили большое развитие некоторые направления, которые в России, в силу ее условий, еще не получили столь большого развития.

Это относится прежде всего к большим достижениям Франции в развитии науки и технологии сжиженного природного газа, в технологии и технике рационального использования природного газа, в создании и эксплуатации сети подземных хранилищ газа и др. Использование этих достижений французских специалистов, результаты которых излагаются в энциклопедии будет весьма полезным для развития газовой промышленности различных стран.

Предлагаемая энцикопедия представляет собой полный перевод, без каких-либо купюр, всего текста оригинала книги. Несмотря на то, что некоторые разделы книги читателю покажутся излишними или ненужными нашим специалистам. По нашему мнению, абсолютное большинство рассматриваемых в энциклопедии вопросов будет интересно специалистам Российской газовой промышленности.

В энциклопедии даются достаточно полные сведения об экономических вопросах, нормах и правилах, законодательстве по различным направлениям газовой промышленности. Несмотря на то, что эта информация не может быть использована непосредственно в российских условиях, ознакомление с ней поможет специалистам ознакомиться с зарубежным опытом и учесть его в своей работе.

Энциклопедия состоит из восьми частей.

В первой части, занимающей 30% объема книги, приводятся общие сведения из фундаментальных и прикладных наук, необходимые специалисту газовой промышленности для понимания всех остальных частей практически без использования дополнительной литературы.

Здесь имеются необходимые сведения из элементарной математики, статистики, информатики и вычислительной техники, механики и сопротивления материалов, электричества. Затем рассматриваются термодинамические вопросы, важные для природных газов: законы термодинамики и термодинамические циклы, свойства газов, влагосодержания природных газов и гидраты природных газов. Приводятся необходимые данные из различных разделов химии, важные для газовой промышленности. Даются понятия о строении вещества, основные положения химической термодинамики, понятия о свойствах смесей газов, растворах, электролитах. Излагаются методы химического анализа вод, газов, в том числе продуктов сгорания; методы отбора проб. Раздел по теплопередаче излагается также применительно к газам и газовым смесям. В разделе "Материалы" приводятся справочные данные о стальных, чугунных, медных, алюминиевых и полиэтиленовых трубах, применяющихся в газовой промышленности.

В разделе "Течение флюидов" приводятся основные сведения из технической гидромеханики и прикладной газовой динамики, необходимые для расчета движения газов и жидкостей в трубопроводах и различных аппаратах.

В разделе "Метрология" приводятся необходимые сведения по методам и технике измерения температур, давлений, расходов, плотности, шума. Затем дается раздел "Экономика", где рассматриваются экономические вопросы производства, инвестиций, внешней торговли, занятости населения, жилищного строительства, ценообразования и финансов. Этот раздел, возможно не обычный для пособий рассматриваемого типа, является, тем не менее, весьма важным для специалистов газовой промышленности. Он будет интересен также и для рассийских специалистов, несмотря на существенную разницу экономических систем.

В конце первой части даются обширные таблицы с указанием основных физических и химических констант многих веществ и характеристики различных газов.

Во втором разделе излагаются основные вопросы добычи и подготовки природного газа, включая физические методы переработки, в том числе сероводородсодержащих природных газов.

Рассматриваются вопросы образования и предупреждения кристаллогидратов, методы ингибирования и осушки газа. Затем приводятся методы извлечения этана, пропана и бутана из газов. Приводятся методы извлечения ртути из природных газов. В этой части рассматривается производство искусственных газов путем газификации угля из нефтепродуктов, производство водорода и биогаза. Большое внимание уделено подземному хранению газов в пористых коллекторах и соляных куполах.

В четвертой части энциклопедии рассматривается малоосвещенный в отечественной литературе вопрос о сжиженных природных газах /СПГ/. Здесь приводится достаточно полное описание, включая термодинамические основы, технологию сжижения, транспортировки, регазификации и использования СПГ. Следует отметить, что за последние 25 лет проблема СПГ в мире решалась настолько успешно, что доля СПГ в мировой торговле природным газом составила около 30%. При этом пришлось решить много новых научно-технических задач термодинамики и криогенной техники, материаловедения, морской транспортировки и т.д.

Следующая пятая часть посвящена сжиженным нефяным газам /СНГ/. Специалисты могут познакомиться с полным циклом, начиная от сжижения, хранения и транспортировки до использования и техники безопасности.

В шестой части рассматривается трубопроводный транспорт газа. Здесь читатель может познакомиться как с теоретическими основами, так и с технологией, техникой и материалами для транспорта газа. Рассматриваются также работы по прокладке газопроводов, производству сварных работ, защите трубопроводов от коррозии. Большое внимание уделено компрессорам и компрессорным станциям магистральных газопроводов и подземных газохранилищ.

Седьмая часть посвящена решению вопросов распределения газа. Дается подробное изложение вопросов неравномерностей газопотребления, а также метода расчета и строительства газораспределительных сетей. Большое внимание уделено выполнению строительно-монтажных работ, применяемому при этом оборудованию и материалам. Вопросы обслуживания и ремонта газораспределительных сетей рассмотрены весьма подробно.

Наконец, последняя, восьмая часть посвящена использованию газа в промышленном и коммунально-бытовом секторе. Вначале авторы рассмотрели основы горения и методы его регулирования, различные типы нагревателей. Затем приводится многообразие различных газоиспользующих установок в быту и промышленности, для подогрева технической воды и обогрева зданий, приготовления пищи. Большое внимание уделено использованию газа в сельском хозяйстве и промышленности, на транспорте. Небольшой раздел посвящен также и химическому использованию газа. Специальный раздел посвящен изложению вопросов нормализации и стандартизации в газовой промышленности.

Перевод книги осуществлен группой высококвалифицированных специалистов Государственной Академии нефти и газа им. И.М. Губкина (ГАНГ им. И.М. Губкина) и Института проблем нефти и газа РАН и Госкомвуза России, имеющих значительный опыт преподавания соответствующих разделов на французском языке. Это сочетание, на наш взгляд, обеспечило высокое качество перевода.

Перевод разделов 1.1. - 1.6, 1.6.4 осуществлен доктором технических наук, профессором Хариным В.Т., разделов 1.6.5. - 1.9.5; 1.11.3 - 1.11.6 – доктором технических наук Панфиловым М.Б., разделов 1.10, 4 - 5 – кандидатом технических наук, доцентом Петровым В.Н., разделов 1.11.1, 1.11.2, 1.12, 2.3, 2.3.4., 2.5., 2.6 – доктором технических наук, профессором Розенбергом Г.Д., раздела 1.13 – доктором экономических наук, профессором Миловидовым К.Н., разделов 1.14, 1.15, 2.1, 2.2, 2.3.5, 2.4., 3 – кандидатом технических наук, доцентом Старшовым В.Ф.; разделов 6.1 - 6.8, 6.10, 7, 8 – кандидатом технических наук, доцентом Зуевым А.М., раздела 6.8 – кандидатом технических наук, доцентом Григорьевым Л.И.

Научное редактирование текста проведено совместно с кандидатом технических наук Кульпиной Н.М., ведущим редактором Тарусовой Н.А.

Действительный член Академии естественных наук
Российской Федерации,
доктор технических наук,
профессор Басниев К.С.

БЛАГОДАРНОСТИ

После многих лет усилий, наконец, наступила компенсация – появление четвертого издания Энциклопеди газовой промышленности – и благодарность всем, кто в нем принимал участие.

Я выражаю сначала мою признательность г-ну Генри Вейссеру, бывшему президенту комиссии по образованию и документам нашей ассоциации, который начал эту работу и который меня поддерживал в течение всех лет работы. Я выражаю также благодарность последующим президентам ФГА г-дам Jacquemier Sens, Gaussens, Clavel и Coste, которые в течение всего периода работы нас поддерживали. Но, конечно, моя признательность идет прежде всего особенно всем, кто редактировал, перечитывал, корректировал, проверял и завершал это огромное.

Речь идет о: Ancel, Anlré, Arnoux, Avallet, Bachman, Baradat, Bellus, Ben Hadid, Benzoni, Bernardet, Bitoun, Blondin, Bodard, Borgard, Boucher, Bouleuc, Mme Bresard, MM. Bresson, Breuil, Buis, Cabot, Cadronnet, Carrière, Caron, Cavaciuti, Cénac, Chambon, Charles, Charron, Chauveau, Chevallier, Chillet, J. Colonna, J.-L. Colonna, Conturie, Corgier, Coulaud, Darrigrand, David, Dedeystère, Delezay, Deneuve, Dessassy, Deschamps, Dewerdt, Di Giovanni, Dillon-Corneck, Doré, Douspis, Drain, Dreyer, Dubois, Dumay, Duremberg, Ertlen, Fasanino, Fauveau, Fellous, Flesch, Fleury, Fournol, François, Frochen, Garat, Geney, George, Mme Giordani, MM. Gras, Grenier, Guichard, Guyon, Guyot, Hervé, Hua, Hugo, Hugout, Ingrain, Jamin, Jean-Elie, Jolibois, Jollivet, Jougneau, Joutard, Junet, Mme Kermanac'h, MM. Kervevan, Kuehl, Kuhn, Lasneret, Lauprêtre, Laurent, Le Bras, Le Diraison, Le Jan, Le Morlec, Le Strat, Leblanc, Lecoanet, Legros, Leguilette, Lejeune, Léraillé, Leray, Loison, Maeder, Mahuzier, Marcel, Marchin, Marcus, Marmeys, Marque, Mme Martin, MM. Martin, Melquiond, Meyer, Mmes Meyneng, Michelier, MM. Millet, Molinard, Moriceau, Morillon, Mousset, Nedelka, Nicolas, Nussbaum, Olivet, Mme Paisant, MM. Parisot, Pauvarel, Peaudecerf, Peignelin, Pelloux-Prayer, Petit, Pettavino, Piboubès, Picard, Pichambert, Pichot, Pietrzak, Pigeon, Pistien, Plumejeaud, Portrait, Pottier, Przydrozny, Rebois, Ricart,

Rideau,Riu, Rosseel, Rottenberg, Rousset, Roux, Roze, Mme Saad, MM. Salfati, Sallée, Salvadori, Mme Savy, MM. Tournier-Lasserve, Tronc, Urban, Verdier, Vernet, Viel, Watrin, Weiss, Mme Wendling, MM. Weulersse, Yax.

Если я кого-то пропустил, прошу меня извинить. Пусть они знают, что они имеют право, как и другие, на мою благодарность, на благодарность нашей комиссии и ФГА и всей французской газовой промышленности.

Ш.-Б. РУ
Президент комиссии по образованию
и документам

СОДЕРЖАНИЕ

К читателю

Благодарности

Глава 1. Общие сведения....1

Глава 2. Добыча и переработка....299

Глава 3. Подземное хранение....381

Глава 4. Сжиженный природный газ (СПГ)....429

Глава 5. Сжиженные нефтяные газы (СНГ)....509

Глава 6. Транспорт по трубопроводам....535

Глава 7. Распределение....595

Глава 8. Использование газа....673

Оглавление (подробное)....827

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Обозначения и единицы измерения

1.1.1. Обозначения

Все обозначения и термины, с помощью которых определяются связи между величинами и способы записи равенств, подчинены определенным стандартам. Сошлемся на следующие нормы Афнор [1]:

— NF X 02 - 201 для единиц измерения пространства и времени,
— NF X 02 - 202 для единиц измерения периодических и взаимосвязанных явлений,
— NF X 02 - 203 для механических единиц,
— NF X 02 - 204 для термических единиц,
— NF X 02 - 205 для электрических и магнитных единиц,
— NF X 02 - 206 для единиц измерения электромагнитного и оптического излучения.

1.1.2. Единицы измерения

Они определены Международной системой единиц (СИ), которая обязательна во Франции (декрет 75.1200 от 4 декабря 1975 г.) и во многих других странах.

Международная система единиц (СИ) базируется на семи основных единицах.

Производные единицы алгебраически выражаются через основные и дополнительные единицы. Некоторые из них имеют специальные названия.

Радиан и стерадиан не являются ни основными, ни производными единицами; их называют *дополнительными единицами.*

Для формирования названий и обозначений *кратных* единиц СИ используют приставки СИ. Напомним в этой связи, что приставка возводится *в ту же степень, что и единица измерения*; так, 10^6 м^3 = 1 гм^3 (но не 1 Мм^3); 10^9 м^3 = 1 км^3 (но не 1 Гм^3).

Для записи больших чисел также рекомендуется использовать степени числа 10. Названия этих последних формируются следующим образом:

Пример:

10^6 = миллион

10^{12} = биллион

10^{18} = триллион

10^{24} = квадриллион

[1] См. ссылку на с. 16 в конце алфавитного перечня единиц измерения. (Прим. перев.)

Величина	Единица измерения	Обозначение	Размерность
Длина	метр	м	L
Масса	килограмм	кг	M
Время	секунда	с	T
Сила электрического тока	ампер	А	I
Термодинамическая температура	кельвин	К	θ
Количество вещества	моль	моль	N
Сила света	кандела	кд	J

Основные единицы.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Величина	Единица измерения	Обозначение	Размерность
Плоский угол	радиан	рад	нет
Телесный угол	стерадиан	ср	нет

Дополнительные единицы.

Внимание:

В некоторых странах, в частности в США[1], действует другое правило, выраженное формулой

$$10^{3N} = (N - 1)\text{ллион}$$

Пример:

10^9 = биллион

10^{12} = триллион

10^{15} = квадриллион

С использованием приставок также может возникнуть путаница. В некоторых странах, в частности в США, встречаем:

— приставку М для множителя 10^3
— приставку ММ для множителя 10^6
— приставку В для множителя 10^9

Немцы применяют Mio вместо Millionen.

[1] И в России. Кроме того, в России биллион = миллиард. (Прим. перев.)

Множитель, на который умножается единица измерения			Приставка к названию единицы	Сокращенное обозначение приставки
10^{18}	или	1 000 000 000 000 000 000	экза	Е
10^{15}	или	1 000 000 000 000 000	пета	Р
10^{12}	или	1 000 000 000 000	тера	Т
10^9	или	1 000 000 000	гига	Г
10^6	или	1 000 000	мега	М
10^3	или	1 000	кило	к
10^2	или	100	гекто	г
10^1	или	10	дека	да
10^{-1}	или	0.1	деци	д
10^{-2}	или	0.01	санти	с
10^{-3}	или	0.001	милли	м
10^{-6}	или	0.000 001	микро	мк
10^{-9}	или	0.000 000 001	нано	н
10^{-12}	или	0.000 000 000 001	пико	п
10^{-15}	или	0.000 000 000 000 001	фемто	ф
10^{-18}	или	0.000 000 000 000 000 001	атто	а

Приставки для образования кратных и дольных единиц.

Величина	Единица СИ			
	Название	Обозначение	Выражение в других единицах СИ	Выражение в основных единицах СИ
Частота	герц	Гц		$с^{-1}$
Сила	ньютон	Н		$м \cdot кг \cdot с^{-2}$
Давление, напряжение	паскаль	Па	$Н \cdot м^{-2}$	$м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж	$Н \cdot м$	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	$Дж \cdot с^{-1}$	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}$
Количество электричества, электрический заряд	кулон	Кл		$с \cdot А$
Электрический потенциал, электрическое напряжение, электродвижущая сила	вольт	В	$Вт \cdot А^{-1}$	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}$
Электрическая емкость	фарада	Ф	$Кл \cdot В^{-1}$	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^4 \cdot А^2$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$В \cdot А^{-1}$	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}$
Электрическая проводимость	сименс	С	$А \cdot В^{-1}$	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^3 \cdot А^2$
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	$В \cdot с$	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	Т	$Вб \cdot м^{-2}$	$кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Индуктивность	генри	Г	$Вб \cdot А^{-1}$	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-2}$
Температура по Цельсию	градус Цельсия	°С		К
Световой поток	люмен	лм		$кд \cdot ср$
Освещенность	люкс	лк	$лм \cdot м^{-2}$	$м^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активность изотопа	беккерель, распад в секунду	Бк, расп/с		$с^{-1}$
Поглощенная доза излучения, массовая плотность поглощенной энергии излучения, керма	грей	Гр	$Дж \cdot кг^{-1}$	$м^2 \cdot с^{-2}$
Эквивалент дозы	зиверт	Зв	$Дж \cdot кг^{-1}$	$м^2 \cdot с^{-2}$

— В настоящее время существуют 19 производных единиц, имеющих специальные названия и обозначения. Они могут быть, в свою очередь, использованы, чтобы выражать через них другие производные единицы, получая более простые выражения, чем через основные единицы.

— См. M. Moureau. — *Guide pratique pour le système international d'unités.* Ed. Technip, Paris (1980).

Производные единицы СИ, имеющие специальные названия.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Название единицы	Обозначение	Величина	Размерность	Перевод в единицу СИ		
				Чтобы перевести в	Надо умножить на	Точное значение 0
Акр	–	площадь	L^2	$м^2$	$4{,}04686 \times 10^3$	
Ампер	А	электрический ток	I	Основная единица		
Ангстрем *	Å	длина	L	м	10^{-10}	0
Ар	а	площадь	L^2	$м^2$	10^2	0
Арпант (Квебек)	–	площадь	L^2	$м^2$	3 418,894	
Атмосфера (техническая) * = 1 кгс · · $см^{-2}$	ат	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	$0{,}980\,665 \times 10^5$	0
Атмосфера (физическая) *	атм	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	$1{,}013\,25 \times 10^5$	0
Бар	бар	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	10^5	
Бари *	–	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	10^{-1}	0
Баррель американский = бариль нефтяной = 42 галлона	–	объем	L^3	$м^3$	0,158 987	
Био	Би	электрический ток	I	А	10	
Бо	–	количество информации, передаваемой в единицу времени	T^{-1}	$с^{-1}$	1	
Британская тепловая единица = Бте						
Бте ИТ (международная таблица)	Бте	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$1{,}055\,056 \times 10^3$	
Бте (средняя)	Бте	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$1{,}055\,87 \times 10^3$	
Бте (термохимическая)	Бте	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$1{,}054\,35 \times 10^3$	
Бте (39°F)	Бте	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$1{,}059\,67 \times 10^3$	
Бте (60°F)	Бте	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$1{,}054\,68 \times 10^3$	
Ватт	Вт	мощность	L^2MT^{-3}	Дж · $с^{-1}$	1	
Вебер	Вб	магнитный поток	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	В · с	1	
Верж (= 1 ярд)	яр	длина	L	М	0,9144	0
Вольт	В	электрический потенциал	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	Вт · $А^{-1}$	1	
Галлон (американский)	гал (U.S)	объем	L^3	$м^3$	$3{,}78\,541 \times 10^{-3}$	
Галлон (английский)	гал (U.K)	объем	L^3	$м^3$	$4{,}54\,609 \times 10^{-3}$	
Гамма *	γ	магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	Т (Вб · $м^{-2}$)	10^{-9}	0
Гамма *	γ	масса	M	кг	10^{-9}	
Гаусс *	Гс	магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	Т	10^{-4}	0
Гектар	га	площадь	L^2	$м^2$	10^4	
Генри	Г	индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	В · с · $А^{-1}$	1	
Генри в степени минус единица	$Г^{-1}$	магнитное сопротивление	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	$м^{-2}$ · $кг^{-1}$ · с · $А^2$	1	
Генри на метр	Г · $м^{-1}$	магнитная проницаемость	$LMT^{-2}I^{-2}$	м · кг · $с^{-2}$ · $А^{-2}$	1	
Герц	Гц	частота	T^{-1}	$с^{-1}$	1	
Гильберт	Гб	магнитодвижущая сила	I	А	0,79 577	
Град	гр, гон или г	плоский угол	нет	рад	$2\pi/400 = 1{,}570 \times 10^{-2}$	
Градус	°	угол	нет	рад	$2\pi/360 = 1{,}745 \times 10^{-2}$	
Градус Рэнкина	°R	температура	θ	К	$\left[T_K = \frac{5}{9}(T_{°R})\right]$	0
Градус Фаренгейта	°F	температура	θ	К	$T_K = \frac{5}{9}(T_{°F} + 459{,}67)$	0
				°С	$\left[T_{°C} = \frac{5}{9}(T_{°F} - 32)\right]$	0
Градус Цельсия	°С	температура	θ	К	$(T_K = T_{°C} + 273{,}15)$	0
Гран	гр	масса	M	кг	6,479 891	0
Грей	Гр	поглощенная доза (ионизирующее излучение)	L^2T^{-2}	Дж · $кг^{-1}$	1	

Алфавитный перечень единиц и их перевод в единицы СИ. Узаконенные единицы даны курсивом. Единицы, употребление которых запрещено, отмечены звездочкой (*).

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Название единицы	Обозначение	Величина	Размерность	Перевод в единицу СИ		
				Чтобы перевести в	Надо умножить на	Точное значение 0
Дарси	–	проницаемость	L^2	$м^2$	$9{,}869 \times 10^{-13}$	
Децибел	дБ	разность уровней в десятичной логарифмической шкале	нет	–	–	
Джоуль	Дж	энергия	L^2MT^{-2}	Н · м	1	
Джоуль на биквадратный метр	Дж · $м^{-4}$	лучистая энергия	$L^{-2}MT^{-2}$	$м^{-2} \cdot кг \cdot с^{-2}$	1	
Джоуль на квадратный метр-секунду в степени половина-кельвин	Дж · $м^{-2}$ · $\cdot с^{-1/2} \cdot К^{-1}$	эффузивность	$MT^{-5/2}\Theta^{-1}$	$кг \cdot с^{-5/2} \cdot К^{-1}$	1	
Джоуль на кельвин	Дж · $К^{-1}$	теплоемкость, энтропия	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot К^{-1}$	1	
Джоуль на килограмм	Дж · $кг^{-1}$	массовая плотность энтальпии	L^2T^{-2}	$м^2 \cdot с^{-2}$	1	
Джоуль на килограмм-кельвин	Дж · $кг^{-1}$ · $\cdot К^{-1}$	массовая плотность энтропии	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$	$м^2 \cdot с^{-2} \cdot К^{-1}$	1	
Джоуль на кубометр	Дж · $м^{-3}$	плотность электромагнитной энергии	$L^{-1}MT^{-2}$	$м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-2}$	1	
Джоуль на моль	Дж · $моль^{-1}$	молярная энергия, молярная энтальпия	$L^2MT^{-2}N^{-1}$			
Джоуль на моль-кельвин	Дж · $моль^{-1}$ · $\cdot К^{-1}$	молярная газовая постоянная, молярная термическая постоянная, молярная энтропия	$L^2MT^{-2}N^{-1}\Theta^{-1}$			
Дина *	дин	сила	LMT^{-2}	Н	10^{-5}	0
Длинная тонна (американская)	–	масса	M	кг	$1{,}016\,047 \times 10^3$	
Дюйм	–	длина	L	м	$2{,}54 \times 10^{-2}$	0
Дюйм водяного столба (39,2°F)	–	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	$2{,}49\,082 \times 10^2$	
Дюйм квадратный	–	площадь	L^2	$м^2$	$6{,}4\,516 \times 10^{-4}$	0
Дюйм ртутного столба (32°F)	–	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	$3{,}38\,639 \times 10^3$	
Зиверт	Зв	эквивалент дозы	L^2T^{-2}	Дж · кг	1	
Калория (диетическая) *	кал	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	4,1855	
Калория ИТ (международная)	$кал_{ит}$	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	4,186 800	0
Калория (средняя)	кал	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	4,190 02	
Калория (термохимическая)	–	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	4,184 000	0
Калория (15°C) *	$кал_{15}$	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	4,185 80	
Калория (20°C) *	$кал_{20}$	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	4,181 90	
Кандела	кд	сила света	J	основная единица		
Карно	–	энтропия	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$	Дж · $К^{-1}$	1	0
Квинтал *	кв	масса	M	кг	10^2	
Квинтал англосаксонский (= 100 англ. фунтов)	–	масса	M	кг	45,359 240	0
Кельвин	К	температура	Θ	основная единица		
Киловатт-час	кВт · ч	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$3{,}6 \times 10^6$	0
Килограмм	кг	масса	M	основная единица		
Килограмм-метр в секунду	кг · м · $с^{-1}$	количество движения	LMT^{-1}			
Килограмм-метр квадратный в секунду	кг · $м^2$ · $с^{-1}$	кинетический момент	L^2MT^{-1}			
Килограмм на квадратный метр	кг · $м^{-2}$	поверхностная плотность массы	$L^{-2}M$			
Килограмм на литр	кг · $л^{-1}$	объемная плотность массы	$L^{-3}M$			
Килограмм на метр	кг · $м^{-1}$	линейная плотность массы	$L^{-1}M$			
Килограммометр *	кгм	работа или энергия	L^2MT^{-2}	Дж	9,806 65	0
Килограмм-сила *	кгс	сила	LMT^{-2}	Н	9,806 65	0
Короткая тонна	–	масса	M	кг	$9{,}071\,85 \times 10^2$	
Кулон	Кл	количество электричества	TI	А · с	1	

Таблица (продолжение)

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Название единицы	Обозначение	Величина	Размерность	Перевод в единицу СИ		
				Чтобы перевести в	Надо умножить на	Точное значение 0
Ламбер	Л	светимость	$L^{-2}J$	кд · м$^{-2}$	$3{,}183 \times 10^{3}$	
Ленц	–	магнитное поле	$L^{-1}I$	А · м$^{-1}$	1	
Лошадиная сила (английская)	hp	мощность	$L^{2}MT^{-3}$	Вт	745.7	
Лошадиная сила (метрическая) *	лс	мощность	$L^{2}MT^{-3}$	Вт	735,499	
Лошадиная сила (тепловая)	–	мощность	$L^{2}MT^{-3}$	Вт	9 809,6	
Лошадиная сила (электрическая)	–	мощность	$L^{2}MT^{-3}$	Вт	746	0
Люкс	лк	освещенность	$L^{-2}J$	кд · ср · м$^{-2}$	1	
Люмен	лм	световой поток	J	кд · ср	1	
Люсек	–	расход	$L^{3}T^{-1}$	м^{3} · с$^{-1}$	10^{-3}	
Лямбда	λ	объем	L^{3}	м^{3}	10^{-9}	0
Максвелл *	М	поток магнитной индукции	$L^{2}MT^{-2}I^{-2}$	В · с = Вб	10^{-8}	
Месяц (средний)	–	время	T	с	$2{,}628 \times 10^{6}$	0
Месяц (30 суток)	–	время	T	с	$2{,}592 \times 10^{6}$	0
Метр	м	длина	L	основная единица		
Микрон	мкм, *дм*	длина	L	м	10^{-6}	
Миллиметр водяного столба (условный) *	мм H_2O	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	9,806 65	0
Миллиметр ртутного столба (условный) *	мм Hg	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	133,322 4	
Миля (международная)	–	длина	L	м	1 609,344	0
Миля морская	–	длина	L	м	1 852	0
Минута (время)	мин	время	T	с	60	0
Минута (звездная)	–	время	T	с	59,836 17	
Минута (угловая)		угол	нет	рад	$2{,}908\,882 \times 10^{-4}$	
Мо (сименс)	–	проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^{3}I^{2}$	С	1	
Моль	моль	количество вещества	N	основная единица		
Непер	Нп	разность уровней в натуральной логарифм. шкале (уровень амплитуды)	нет	связь непера с децибелом требует, чтобы отношение амплитуд равнялось корню квадратному из отношения мощностей, 1 Нп = 8,685 890 дБ		
Нит	нт	светимость	$L^{-2}J$	кд · м$^{-2}$	1	
Ньютон	Н	сила	LMT^{-2}	кг · м · с$^{-2}$	1	
Октав	–	логарифмический интервал между двумя частотами	нет	савар	301	
Ом	Ом	электрическое сопротивление	$L^{2}MT^{-3}I^{-2}$	В · А$^{-1}$	1	
Паскаль	Па	давление, напряжение	$L^{-1}MT^{-2}$	Н · м$^{-2}$	1	
Перм	–	проницаемость	L^{2}	м^{2}	10^{-4}	
Пика	–	длина (полиграфия)	L	м	$4{,}217\,5 \times 10^{-3}$	
Пинта (английская)	пт	объем	L^{3}	м^{3}	$5{,}682\,61 \times 10^{-4}$	
Пуаз	П	динамическая вязкость	$L^{-1}MT^{-1}$	Па · с	10^{-1}	
Пункт		длина (полиграфия)	L	м	$3{,}987\,7 \times 10^{-4}$	
Пьез *	пз	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	10^{3}	
Рад	рад, рд	поглощенная доза (ионизирующее излучение)	$L^{2}T^{-2}$	Дж · кг$^{-1}$	10^{2}	
Радиан	рад	плоский угол	нет	дополнительная единица		
Рем	рем	эквивалентная поглощенная доза	нет			
Рентген	Р	экспозиционная доза ионизирующего излучения	$M^{-1}TI$	Кл · кг$^{-1}$	$2{,}58 \cdot 10^{-4}$	
Савар	–	логарифмический интервал между двумя частотами	нет	октав	1/301	
Сантиметр водяного столба (4°С)	–	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	98,063 8	
Сантиметр ртутного столба (0°С)	–	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	$1{,}333\,22 \times 10^{3}$	
Световой год	св. год	длина	L	м	$9{,}460\,53 \times 10^{15}$	

Таблица (продолжение).

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Название единицы	Обозначение	Величина	Размерность	Перевод в единицу СИ		
				Чтобы перевести в	Надо умножить на	Точное значение 0
Секунда (время)	с	время	T	основная единица		
Секунда (угол)	"	угол	нет	рад	$4{,}848\,137 \times 10^{-6}$	
Секция (квадратная миля)	–	площадь	L^2	$м^2$	$2{,}589\,99 \times 10^{6}$	
Сименс (мо)	С	проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^{3}I^{2}$	$А \cdot В^{-1}$	1	
Спат	сп	телесный угол	нет	ср	4π	
Стер (дрова) = кубометр	–	объем	L^3	$м^3$	1	
Стерадиан	ср	телесный угол	нет			
Стильб	сб	светимость, яркость	$L^{-2}J$	$кд \cdot м^{-2}$	10^{4}	
Стокс	Ст	кинематическая вязкость	L^2T^{-1}	$м^2 \cdot с^{-1}$	10^{-4}	
Стоун	ст	масса	M	кг	6,350 3	
Стэн	ст	сила	LMT^{-2}	Н	10^{3}	
Сутки (звездные)	–	время	T	с	86 162,09	
Сутки (средние солнечные)	сут	время	T	с	$8{,}64 \times 10^{4}$	0
Терм (10^5 Бте)	–	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$1{,}055\,056 \times 10^{8}$	
Термия *	–	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$4{,}185\,5 \times 10^{6}$	
Тесла	Т	магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	$Вб \cdot м^{-2}$	1	
Тонна	т	масса	M	кг	10^{3}	0
Тонна (американская "длинная" тонна)	тон	масса	M	кг	$1{,}016\,05 \times 10^{3}$	
Тонна объемная (= регистровая тонна)	–	объем	L^3	$м^3$	2,83	
Торр *	торр	давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	$1{,}333\,224 \times \times 10^{2}$ = 1 мм Hg	
Узел	уз	скорость	LT^{-1}	$м \cdot с^{-1}$	0,514 773	
Узел (международный)	уз	скорость	LT^{-1}	$м \cdot с^{-1}$	0,514 444	
Унция	–	масса	M	кг	$2{,}834\,95 \times 10^{-2}$	
Фарада	Ф	электрическая емкость	$L^2M^{-1}T^{4}I^{2}$	$Кл \cdot В^{-1}$	1	
Фарадей	–	количество электричества	TI	Кл	$9{,}648\,70 \times 10^{4}$	
Франклин	Фр	количество электричества	TI	Кл	$3{,}335\,64 \times 10^{-10}$	
Фригория *	фг	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$4{,}186 \times 10^{3}$	
Фунт		масса	M	кг	0,453 592 4	0
Фунт на галлон (американский)		концентрация	$L^{-3}M$	$кг \cdot м^{-3}$	119,826 4	
Фунт на галлон (английский)		концентрация	$L^{-3}M$	$кг \cdot м^{-3}$	99,776 37	
Фунт - сила		сила	LMT^{-2}	Н	4,448 222	
Фунт - сила на квадратный дюйм		давление	$L^{-1}MT^{-2}$	Па	$6{,}894\,76 \times 10^{3}$	
Фут	фт	длина	L	м	0,304 8	0
Фут квадратный	кв. фт	площадь	L^2	$м^2$	$9{,}290\,304 \times 10^{-2}$	0
Фут кубический	куб. фт	объем	L^3	$дм^3$	28,316 85	
Час (звездный)	–	время	T	с	3 590,17	
Час (солнечный средний)	ч	время	T	с	3 600	
Электронвольт	эВ	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	$1{,}060\,219 \times 10^{-19}$	
Эрг *	эрг	энергия	L^2MT^{-2}	Дж	10^{-7}	
Эрстед	Э	магнитное поле	$L^{-1}I$	$А \cdot м^{-1}$	79,577 47	
Ярд	яр	длина	L	м	0,914 4	0

R. Quatremer, J. - P. Trotignon. – Precis: Unitér et grandeurs, système international (SI), symboles et normalisation. Ed. Afnor et Nathan, Paris (1985).

Таблица (продолжение).

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1.3. Соотношения между различными видами энергии

Единица	кВт · ч	МДж	ММБтe	Терм	Термия	ТНЭ	м³ натурального газа	кВт · ч электрический
кВт · ч	1	3.6	$3{,}412 \times 10^{-2}$	$3{,}412 \times 10^{-3}$	0,86	$\mathbf{0{,}08 \times 10^{-3}}$	**0,09**	**0,39**
МДж = 10^6 · Дж	0,278	1	$0{,}948 \times 10^{-3}$	948×10^{-5}	0,24	$\mathbf{22{,}4 \times 10^{-6}}$	**0,025**	**0,11**
10^8Бте = ММБтe	293	1 055	1	10	252	**0,024**	**26,5**	**114**
Терм	29,3	105,5	10^{-1}	1	25,2	$\mathbf{2{,}4 \times 10^{-3}}$	**2,65**	**11,4**
Термия	1,16	4.18	$3{,}96 \times 10^{-3}$	$39{,}6 \times 10^{-3}$	1	$\mathbf{93 \times 10^{-6}}$	**0,105**	**0,45**
ТНЭ	**12 400**	$\mathbf{44{,}6 \times 10^3}$	**42,3**	**423**	$\mathbf{10.7 \times 10^3}$	1	**1 120**	**4 800**
м³ натурального газа	**11**	**40**	$\mathbf{38 \times 10^{-3}}$	**0,30**	**9,5**	$\mathbf{0{,}9 \times 10^{-3}}$	1	**4,3**
кВт · ч электрический	**2.58**	**9.3**	$\mathbf{88 \times 10^{-3}}$	$\mathbf{8{,}8 \times 10^{-3}}$	**2,22**	$\mathbf{0{,}2 \times 10^{-3}}$	**0,23**	1

Жирные цифры – это **условные значения**, которые могут меняться в зависимости от эпохи или страны.

Перевод единиц энергии.

В приведенной таблице даны удобные переводные коэффициенты, связывающие между собой различные единицы, применяемые в энергетике: джоуль, киловатт-час, термия, Бте и т.д.; все они относятся к измерению энергии, какова бы ни была ее форма.

Занимаясь статистическими расчетами энергетических балансов, экономическими сравнениями крупных предприятий, регионов, стран, необходимо устанавливать "эквивалентности" между различными формами энергии: твердым, жидким, газообразным топливом и электричеством, первичным или нет, откуда и возникают такие единицы, как тнэ (тонна нефтяного эквивалента) и туэ (тонна угольного эквивалента).

Разумеется, речь идет об оценочных, средних величинах, которые могут меняться в зависимости от страны и эпохи.

Приведенная таблица дает значения, официально принятые во Франции. Отметим специально две величины:

— электричество: 10^3 кВт· ч эквивалентны 0,222 тнэ,

— природный газ: 10^3 кВт· ч P.C.S.[1] эквивалентны 0,077 тнэ.

Эти значения используются ОЭСР[2]; зато ООН считает 10^3 кВтч эквивалентными 0.085 тнэ. Первое значение (0,222 тнэ) соответствует современному термическому использованию, второе (0,085 тнэ) – старому равенству 1 калория = 4,18 Джоулей. Эти два значения показывают, что при сравнениях надо быть внимательным, чтобы различать первичную энергию и вторичную энергию.

[1] P.C.S. (pouvoir calorifique supérieur) – теплота сгорания по верхнему пределу, в отличие от P.C.I (pouvoir calorifique inférieur) – теплота сгорания по нижнему пределу. (Прим. перев.)

[2] ОЭСР – Организация экономического сотрудничества и развития. (Прим. перев.)

Энергия	Физическая единица	Гигаджоуль (ГДж) (P.C.I)	тнэ (P.C.I.)
Уголь:			
— каменный уголь	1 т	26	26/42 = 0,619
— каменноугольный кокс	1 т	28	28/42 = 0,667
— агломерат и брикеты бурого угля	1 т	32	32/42 = 0,762
— бурый уголь и вторичные зольные продукты	1 т	17	17/42 = 0,405
Нефтепродукты:			
— *сырая нефть*			
— дизтопливо/мазут	1 т	42	1
Продукты неэнергетического употребления:			
— G.P.L.	1 т	46	46/42 = 1,095
— бензины для двигателей	1 т	44	44/42 = 1,048
— тяжелые мазуты	1 т	40	40/42 = 0,952
— нефтяной кокс	1 т	32	32/42 = 0,762
Электричество	1 МВт · ч	9,33	9,33/42 = 0,222
Природный газ	1 МВт · ч P. C. S.	3,24	3,24/42 = 0,077

Источник: D.G.E.M.P. – *Observatoire de L'énergie. – Les chiffres - clés de L'énergie.* Editions Dunod, Paris (1988).

Эквивалентность первичных энергий.

1.2. МАТЕМАТИКА

1.2.1. Арифметика

1.2.1.1. Прогрессии

a – первый член

l – последний член

n – число членов

r – разность (для арифметической прогрессии) или знаменатель (для геометрической прогрессии)

S – сумма членов

Арифметическая прогрессия:

$$a,\ a+r,\ a+2r,\ \ldots,\ a+(n-1)\cdot r$$

$$l = a+(n-1)\cdot r$$

$$S = \frac{(a+l)\cdot n}{2} = n\cdot a + \frac{n\cdot(n-1)\cdot r}{2}$$

Геометрическая прогрессия:

$$a,\ a\cdot r,\ a\cdot r^2,\ \ldots,\ a\cdot r^{(n-1)}$$

$$l = a\cdot r^{(n-1)}$$

$$S = \frac{a\cdot(r^n-1)}{r-1}$$

1.2.1.2. Логарифмы

Логарифм y по основанию a числа x:

$$y = \log_a x, \text{ если } a^y = x$$

Используемые обычно основания:

10 и $e = 2{,}718\,28\ldots$

Десятичные логарифмы: $\log_{10} x$ записывается как $\lg x$.

Натуральные логарифмы: $\log_e x$ записывается как $\ln x$.

Важные соотношения:

$$\begin{cases} \lg 1 = 0 & \ln 1 = 0 \\ \lg 10 = 1 & \ln 10 = 2{,}30\,258\ldots \\ \lg e = 0{,}43\,429\ldots & \ln e = 1 \\ \lg x \approx 0{,}43\,429\ln x & \ln x \approx 2{,}30\,258\lg x \end{cases}$$

1.2.1.3. Средние значения

Для последовательности n значений переменной x: $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ определены:

среднее арифметическое:

$$\frac{x_1+x_2+\ldots+x_n}{n}$$

среднее взвешенное:

$$\frac{x_1p_1+x_2p_2+\ldots+x_np_n}{p_1+p_2+\ldots+p_n}$$

среднее геометрическое:

$$\sqrt[n]{x_1\cdot x_2\cdot\ldots\cdot x_n}$$

среднее гармоническое:

$$\frac{n}{\frac{1}{x_1}+\frac{1}{x_2}+\ldots+\frac{1}{x_n}}$$

1.2.1.4. Комбинаторика

Число размещений из m объектов по n:

$$A_m^n = m(m-1)\ldots(m-n+1)$$

Число перестановок из m объектов:

$$P_m = m!$$

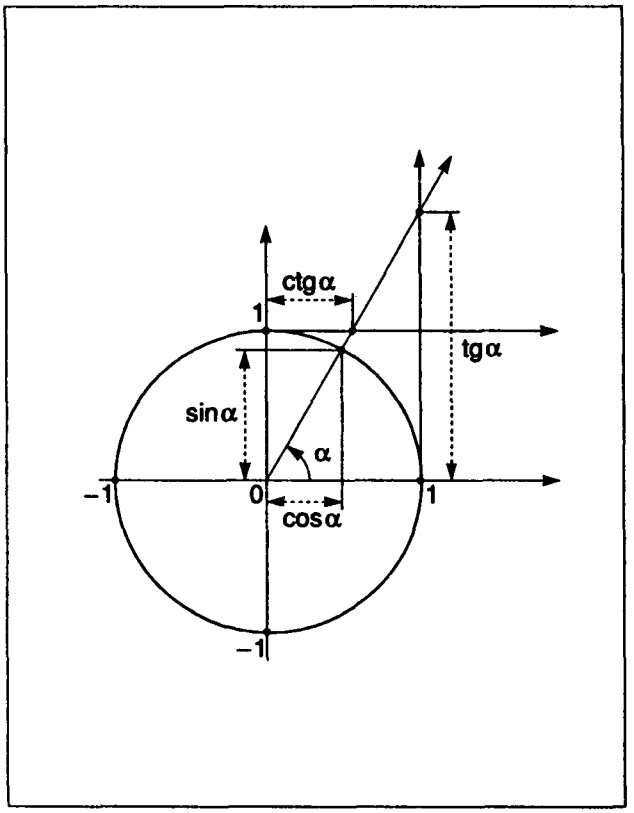
Число сочетаний из m объектов по n:

$$C_m^n = \frac{A_m^n}{P_n} = \frac{m(m-1)\ldots(m-n+1)}{n!}$$

$$C_{m+n-1}^n = \frac{A_{m+n-1}^n}{P_n} = \frac{(m+n-1)\ldots m}{n!}$$

1.2.2. Тригонометрия

1.2.2.1. Тригонометрические функции некоторых углов



Значения α			Значения тригонометрических функций			
Радианы	Градусы	Грады	sin	cos	tg	ctg
0	0	0	0	1	0	∞
$\frac{\pi}{6}$	30	33,33	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	$\sqrt{3}$
$\frac{\pi}{4}$	45	50	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	1	1
$\frac{\pi}{3}$	60	66,67	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\sqrt{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
$\frac{\pi}{2}$	90	100	1	0	∞	0
π	180	200	0	−1	0	−∞
$\frac{3\pi}{2}$	270	300	−1	0	−∞	0
2π	360	400	0	1	0	∞

1.2.2.2. Основные тригонометрические формулы

$$\sin^2\alpha+\cos^2\alpha=1\quad \operatorname{tg}\alpha=\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$$

$$1+\operatorname{tg}^2\alpha=\frac{1}{\cos^2\alpha}$$

$$\operatorname{ctg}\alpha=\frac{\cos\alpha}{\sin\alpha}=\frac{1}{\operatorname{tg}\alpha}$$

$$\sin\alpha=\pm\sqrt{1-\cos^2\alpha}=\frac{\pm\operatorname{tg}\alpha}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha}}$$

$$\cos\alpha=\pm\sqrt{1-\sin^2\alpha}=\frac{\pm1}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha}}$$

$$\sin(\alpha\pm\beta)=\sin\alpha\cdot\cos\beta\pm\cos\alpha\cdot\sin\beta$$

$$\cos(\alpha\pm\beta)=\cos\alpha\cdot\cos\beta\mp\sin\alpha\cdot\sin\beta$$

$$\operatorname{tg}(\alpha\pm\beta)=\frac{\operatorname{tg}\alpha\pm\operatorname{tg}\beta}{1\mp\operatorname{tg}\alpha\cdot\operatorname{tg}\beta}$$

$$\sin\alpha+\sin\beta=2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cdot\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\sin\alpha-\sin\beta=2\sin\frac{\alpha-\beta}{2}\cdot\cos\frac{\alpha+\beta}{2}$$

$$\operatorname{tg}\alpha\pm\operatorname{tg}\beta=\frac{\sin(\alpha\pm\beta)}{\cos\alpha\cdot\cos\beta}$$

$$\cos\alpha+\cos\beta=2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cdot\cos\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\cos\alpha-\cos\beta=-2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cdot\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\sin2\alpha=2\sin\alpha\cdot\cos\alpha=\frac{2\operatorname{tg}\alpha}{1+\operatorname{tg}^2\alpha}$$

$$\sin3\alpha=3\sin\alpha-4\sin^3\alpha$$

$$\cos2\alpha=\cos^2\alpha+\sin^2\alpha=\frac{1-\operatorname{tg}^2\alpha}{1+\operatorname{tg}^2\alpha}$$

$$\cos3\alpha=4\cos^3\alpha-3\cos\alpha$$

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}=\frac{\sin\alpha}{1+\cos\alpha}=\frac{1-\cos\alpha}{\sin\alpha}$$

$$\operatorname{tg}2\alpha=\frac{2\operatorname{tg}\alpha}{1-\operatorname{tg}^2\alpha}$$

$$\operatorname{tg} 3\alpha = \frac{3\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}^3\alpha}{1 - 3\operatorname{tg}^2\alpha}$$

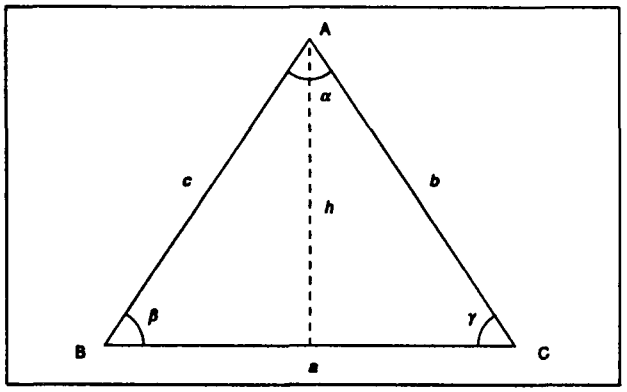
$$\sin n\alpha =$$
$$= C_n^1 \cdot \cos^{n-1}\alpha \cdot \sin\alpha - C_n^3 \cdot \cos^{n-3}\alpha \cdot \sin^3\alpha + \ldots$$

$$\cos n\alpha = \cos^n\alpha - C_n^2 \cdot \cos^{n-2}\alpha \cdot \sin^2\alpha +$$
$$+ C_n^4 \cdot \cos^{n-4}\alpha \cdot \sin^4\alpha + \ldots$$

$$\operatorname{tg} n\alpha = \frac{n\operatorname{tg}\alpha - C_n^3 \cdot \operatorname{tg}^3\alpha + \ldots}{1 - C_n^2 \cdot \operatorname{tg}^2\alpha + \ldots}$$

1.2.2.3. Тригонометрические формулы, относящиеся к треугольникам

Пусть a, b, c – стороны, α, β, γ – углы, h – высота, перпендикулярная стороне a, p – полупериметр и S – площадь какого-нибудь треугольника:



Произвольный треугольник.

$$a = b \cdot \cos\gamma + c \cdot \cos\beta \qquad a^2 = b^2 + c^2 - 2b \cdot c \cdot \cos\alpha$$

$$b = a \cdot \cos\gamma + c \cdot \cos\alpha \qquad b^2 = c^2 + a^2 - 2a \cdot c \cdot \cos\beta$$

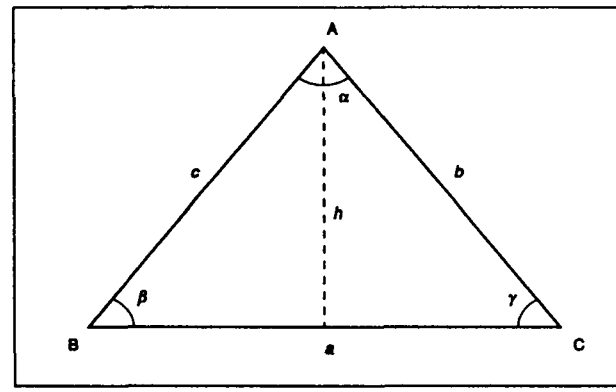
$$c = a \cdot \cos\beta + b \cdot \cos\alpha \qquad c^2 = a^2 + b^2 - 2a \cdot b \cdot \cos\gamma$$

$$h = b \cdot \sin\gamma = c \cdot \sin\beta = \frac{b \cdot c}{a} \cdot \sin\alpha$$

$$S = \frac{1}{2}a \cdot h = \frac{1}{2}a \cdot b \cdot \sin\gamma =$$
$$= \frac{1}{2}a \cdot c \cdot \sin\beta = \frac{1}{2}b \cdot c \cdot \sin\alpha$$

$$S = \sqrt{p \cdot (p-a) \cdot (p-b) \cdot (p-c)}$$

Если треугольник прямоугольный, с углом $\alpha = 90°$:



Прямоугольный треугольник, $\alpha = 90°$.

$$a = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\cos\beta}$$

$$h = \frac{a \cdot \sin 2\beta}{2} = \frac{a \cdot \sin 2\gamma}{2} = \frac{b \cdot c}{a}$$

1.2.3. Алгебра и анализ

1.2.3.1. Алгебраические символы

См. таблицу на с. 11.

1.2.3.2. Гиперболические функции

$$\operatorname{ch}\varphi + \operatorname{sh}\varphi = e^{\varphi} \qquad \operatorname{ch}\varphi - \operatorname{sh}\varphi = e^{-\varphi}$$

$$\operatorname{ch}^2\varphi - \operatorname{sh}^2\varphi = 1$$

$$\operatorname{sh}(\varphi \pm \theta) = \operatorname{sh}\varphi \cdot \operatorname{ch}\theta \pm \operatorname{ch}\varphi \cdot \operatorname{sh}\theta$$

$$\operatorname{ch}(\varphi \pm \theta) = \operatorname{ch}\varphi \cdot \operatorname{ch}\theta \pm \operatorname{sh}\varphi \cdot \operatorname{sh}\theta$$

$$\operatorname{th}(\varphi \pm \theta) = \frac{\operatorname{th}\varphi \pm \operatorname{th}\theta}{1 \pm \operatorname{th}\varphi \cdot \operatorname{th}\theta}$$

1.2.3.3. Производные основных функций

Если f есть функция переменной u, которая сама является функцией x, то:

$$\frac{df}{dx} = \frac{df}{du} \cdot \frac{du}{dx}$$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Символ	Читается	Определение. Примеры
+	плюс	$a + b$
−	минус	$a - b$
±	плюс или минус, плюс-минус	в физике 15 ± 1 означает "от 14 до 16"
× или ·	умножить на	$a \cdot b = 3 \times 4$ технический комитет ISO/TC/12 рекомендует употреблять точку между буквами (на половине их высоты) и крест между цифрами.
−или/или:	делить на	$\frac{1}{25}$ или 1/25 или 1 : 25
=	равно	$a + b = c + d$
≠	не равно	$a \neq b$
≡	тождественно равно	$(a + b)^2 \equiv a^2 + 2ab + b^2$
≙	соответствует	на карте масштаба 1/200000 1 см ≙ 2 км
≈	примерно равно	$\frac{1}{3} \approx 0{,}33$
≃	асимптотически равно	разделяет два выражения, отношение которых стремится к единице при указанных условиях пример: когда x (число или угол, выраженный в радианах) стремится к нулю, $\sin x \simeq x$.
~	1) эквивалентно	то же определение, что и для ≃
	2) пропорционально	$\sim a$
<	меньше	$a < b$
>	больше	$a > b$
≪	много меньше	$\ll a$
≫	много больше	$\gg a$
≤	меньше или равно	$\leq a$
≥	больше или равно	$\geq a$
↗	возрастает	применяется при изучении изменения функции
↘	убывает	
$\lim x$	предел x	$\lim x = a$ эквивалентно $x \to a$ (x стремится к a)
C^{te} или const	константа	
$\lvert a \rvert$	абсолютное значение a или модуль a	
$\bar{a}$ или $\langle a \rangle$	среднее значение a	
a^n	a в степени n	
$a^{\frac{1}{n}}$ или $\sqrt[n]{a}$	a в степени $\frac{1}{n}$ или корень степени n из a	a – неотрицательное действительное число

Символ	Читается	Определение. Примеры
$n!$	факториал n или n факториал	$n! = 1 \times 2 \times 3 \times \ldots \times n$ (n – целое положительное число)
P_n	P с индексом n или P из n	число перестановок из n объектов: $P_n = n \cdot (n-1) \ldots 2 \times 1 = n!$
A_n^p	A из n по p	число размещений без повторений из n объектов по p: $A_n^p = n(n-1)\ldots(n-p+1)$
C_n^p или $\left(\frac{n}{p}\right)$	C из n по p	число сочетаний без повторений из n объектов по p: $C_n^p = \frac{n(n-1)\ldots(n-p+1)}{p!} = \frac{n!}{p!(n-p)!} = \frac{A_n^p}{P_n}$
$\sum_{n=a}^{b} X(n)$	сумма $X(n)$ от $n = a$ до $n = b$	сумма конечной последовательности количеств $X(n)$ при n, принимающем целые значения от a до b включительно
$\int f(x)\,dx$	интеграл $f(x)dx$	неопределенный интеграл (совокупность первообразных функций).
$\int_a^b f(x)\,dx$	интеграл $f(x)dx$ от a до b	определенный интеграл функции $f(x)$ в пределах от $x = a$ до $x = b$
$\exp x$	экспонента x	$\exp x = e^x$
$\ln x$ или $\log_e x$	натуральный логарифм x	
$\lg x$ или $\log_{10} x$	десятичный логарифм x	
$\operatorname{colg} x$	кологарифм десятичный x	десятичный логарифм с противоположным знаком
M		модуль системы десятичных логарифмов по отношению к системе с основанием e. $M = \lg e = 0{,}43429$
$\operatorname{sh} x$	синус гиперболический x	$\frac{e^x - e^{-x}}{2}$
$\operatorname{ch} x$	косинус гиперболический x	$\frac{e^x + e^{-x}}{2}$
$\operatorname{th} x$	тангенс гиперболический x	$\frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$
$\operatorname{cth} x$	котангенс гиперболический x	$\frac{1}{\operatorname{th} x}$
$\operatorname{argsh} x$	ареасинус x	функции, обратные гиперболическим функциям
$\operatorname{argch} x$	ареакосинус x	
$\operatorname{argth} x$	ареатангенс x	
$\operatorname{argcth} x$	ареакотангенс x	

Алгебраические символы.

Функции	Производные
$y = u \cdot v \cdot w \ldots$	$y' = u \cdot v \cdot w \cdot \left(\frac{u'}{u} + \frac{v'}{v} + \frac{w'}{w} + \ldots\right)$
$y = \frac{u}{v}$	$y' = \frac{v \cdot u' - u \cdot v'}{v^2}$
$y = x^n$	$y' = n \cdot x^{n-1}$
$y = \sqrt{x}$	$y' = \frac{1}{2\sqrt{x}}$
$y = u^n$	$y' = n \cdot u^{n-1} \cdot u'$
$y = \sqrt{u}$	$y' = \frac{u'}{2\sqrt{u}}$
$y = a^x$	$y' = a^x \ln a$
$y = e^x$	$y' = e^x$
$y = \lg x$	$y' = \frac{0,434\ 29\ldots}{x} = \frac{M}{x}$
$y = \ln x$	$y' = \frac{1}{x}$
$y = \sin x$	$y' = \cos x$
$y = \cos x$	$y' = -\sin x$
$y = \operatorname{tg} x$	$y' = 1 + \operatorname{tg}^2 x$
$y = \operatorname{ctg} x$	$y' = -(1 + \operatorname{ctg}^2 x)$
$y = \arcsin x$	$y' = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$
$y = \arccos x$	$y' = -\frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$
$y = \operatorname{arctg} x$	$y' = \frac{1}{1 + x^2}$
$y = \operatorname{arcctg} x$	$y' = -\frac{1}{1 + x^2}$
$y = \operatorname{sh} x$	$y' = \operatorname{ch} x$
$y = \operatorname{ch} x$	$y' = \operatorname{sh} x$
$y = \operatorname{th} x$	$y' = 1 - \operatorname{th}^2 x$
$y = \operatorname{cth} x$	$y' = 1 - \operatorname{cth}^2 x$
$y = \operatorname{arsh} x$	$y' = \frac{1}{\sqrt{x^2 + 1}}$
$y = \operatorname{arch} x$	$y' = -\frac{1}{\sqrt{x^2 - 1}}$
$y = \operatorname{arth} x$	$y' = \frac{1}{1 - x^2}$
$y = \operatorname{arcth} x$	$y' = \frac{1}{1 - x^2}$

1.2.3.4. Интегралы основных функций

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C \quad (n \neq -1)$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|Cx|$$

$$\int e^x dx = e^x + C$$

$$\int \ln x dx = x \cdot \ln x - x + C = x \cdot \ln(x-1) + C$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + C$$

$$\int \operatorname{tg} x dx = -\ln|\cos x| + C$$

$$\int \frac{dx}{\sin x} = \ln\left|\operatorname{tg}\frac{x}{2}\right| + C$$

$$\int \frac{dx}{\sin^2 x} = \operatorname{ctg} x + C$$

$$\int \operatorname{sh} x dx = \operatorname{ch} x + C$$

$$\int \operatorname{th} x dx = \ln|\operatorname{ch} x| + C$$

$$\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \cdot \operatorname{arctg}\frac{x}{a} + C$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \operatorname{arsh}\frac{x}{a} + C$$

$$\int (a \cdot x + b)^n dx = \frac{(a \cdot x + b)^{n+1}}{a \cdot (n+1)} + C$$

$$\int \frac{dx}{a \cdot x + b} = \frac{1}{a} \cdot \ln|C \cdot (a \cdot x + b)|$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C$$

$$\int \lg x dx = x \cdot \lg x - 0,43\ 429x + C$$

$$\int \cos x dx = \sin x + C$$

$$\int \operatorname{ctg} x dx = \ln|\sin x| + C$$

$$\int \frac{dx}{\cos x} = \ln\left|\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{x}{2}\right)\right| + C$$

$$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C$$

$$\int \operatorname{ch} x dx = \operatorname{sh} x + C$$

$$\int \operatorname{cth} x dx = \ln|\operatorname{sh} x| + C$$

$$\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \cdot \ln\left|\frac{x-a}{x+a}\right| + C$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \arcsin\frac{x}{a} + C$$

1.2.3.5. Разложения в ряды

$$f(x+h) = f(h) + f'(h)x + f''(h)\frac{x^2}{2!} + \ldots$$

$$\ldots + f^{(n)}(h)\frac{x^n}{n!} \ldots = f(x) + f'(x)h + f''(x)\frac{h^2}{2!} + \ldots$$

$$\ldots + f^{(n)}(x)\frac{h^n}{n!} + \ldots$$

$$f(x) = f(0) + f'(0)x + f''(0)\frac{x^2}{2!} + \ldots + f^{(n)}(0)\frac{x^n}{n!} + \ldots$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \ldots + \frac{x^n}{n!} + \ldots$$

$$a^x = 1 + x\ln a + \frac{(x\ln a)^2}{2!} + \ldots + \frac{(x\ln a)^n}{n!} + \ldots$$

$$(1+x)^p = 1 + px + \frac{p(p-1)x^2}{2!} + \ldots$$

$$\ldots + \frac{p(p-1)\ldots(p-n+1)x^n}{n!} + \ldots$$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots$$

$$\operatorname{tg} x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \frac{17x^7}{315} + \frac{62x^9}{2835} + \ldots$$

$$\lg(1+x) \approx 0{,}43\ 429\left(x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \ldots\right)$$

$$\lg(1-x) \approx -0{,}43\ 429\left(x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \frac{x^4}{4} + \ldots\right)$$

$$\lg x \approx 0{,}43\ 429\left[(x-1) - \frac{(x-1)^2}{2} + \frac{(x-1)^3}{3} - \right.$$
$$\left. - \frac{(x-1)^4}{4} + \ldots\right]$$

$$n! = n^n \cdot e^{-n}\sqrt{2\pi n}\left(1 + \frac{1}{12n} + \frac{1}{288n^2} + \ldots\right)$$

1.2.3.6. Асимптотические разложения

Функция f допускает асимптотическое разложение порядка n в окрестности x_0, если $f(x)$ можно записать в виде:

$$f(x) =$$
$$= a_0 + a_1(x-x_0) + \ldots + a_n(x-x_0)^n + \varepsilon(x)(x-x_0)^n,$$

где $\varepsilon(x)$ стремится к нулю при x, стремящемся к x_0.

Функция f допускает асимптотическое разложение порядка n в окрестности бесконечности, если $f(x)$ можно записать в виде:

$$f(x) = a_0 + \frac{a_1}{x} + \ldots + \frac{a_n}{x^n} + \frac{\varepsilon(x)}{x^n},$$

где $\varepsilon(x)$ стремится к нулю, когда x стремится к бесконечности.

Пусть f и g – две функции, допускающие асимптотические разложения порядка n в окрестности x_0:

$$f(x) = a_0 + a_1(x-x_0) + \ldots + a_n(x-x_0)^n + \varepsilon(x)(x-x_0)^n$$

$$g(x) = b_0 + b_1(x-x_0) + \ldots + b_n(x-x_0)^n + \eta(x)(x-x_0)^n.$$

Тогда справедливы следующие результаты:

— функция $f+g$ допускает асимптотическое разложение порядка n в окрестности x_0:

$$(f+g)(x) = c_0 + c_1(x-x_0) + \ldots + c_n(x-x_0)^n + \xi(x)(x-x_0)^n,$$

где $c_i = a_i + b_i$,

— функция $f \cdot g$ допускает асимптотическое разложение порядка n в окрестности x_0:

$$(f\cdot g)(x) = c_0 + c_1(x-x_0) + \ldots + c_n(x-x_0)^n + \xi(x)(x-x_0)^n,$$

где c_i есть коэффициент при $(x-x_0)^i$ в произведении

$$[a_0 + a_1(x-x_0) + \ldots + a_n(x-x_0)^n] \times$$
$$\times [b_0 + b_1(x-x_0) + \ldots + b_n(x-x_0)^n]$$

— если, к тому же, $b_0 \neq 0$, то $\frac{f}{g}$ допускает асимптотическое разложение порядка n в окрестности x_0:

$$\left(\frac{f}{g}\right)(x) = c_0 + c_1(x-x_0) + \ldots + c_n(x-x_0)^n + \xi(x)(x-x_0)^n,$$

причем c_i есть коэффициент при $(x-x_0)^i$ в частном от деления

$a_0 + a_1(x-x_0) + \ldots + a_n(x-x_0)^{in}$

на $b_0 + b_1(x-x_0) + \ldots + b_n(x-x_0)^{in}$.

Аналогичные результаты имеют место, если f и g допускают асимптотические разложения порядка n в окрестности бесконечности.

1.2.3.7. Наиболее употребительные асимптотические разложения

В окрестности нуля:

$$(1 \pm x)^m = \underset{(m>0)}{} = 1 \pm mx + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 \pm \frac{m(m-1)(m-2)}{3!}x^3 + \ldots + (\pm 1)^n \frac{m(m-1)\ldots(m-n+1)}{n!}x^n + \varepsilon(x)x^n$$

$$(1 \pm x)^{-m} = \underset{(m>0)}{} = 1 \mp mx + \frac{m(m+1)}{2!}x^2 \mp \frac{m(m+1)(m+2)}{3!}x^3 + \ldots + (\mp 1)^n \frac{m(m+1)\ldots(m+n-1)}{n!}x^n + \varepsilon(x)x^n$$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \ldots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \varepsilon(x)x^{2n+2}$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \ldots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \varepsilon(x)x^{2n+1}$$

$$\operatorname{tg} x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2}{15}x^5 + \frac{17}{315}x^7 + \frac{62}{2835}x^9 + \varepsilon(x)x^{10}$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots + \frac{x^n}{n!} + \varepsilon(x)x^n$$

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \ldots + (-1)^{n+1}\frac{x^n}{n} + \varepsilon(x)x^n$$

$$\operatorname{sh} x = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \ldots + \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \varepsilon(x)x^{2n+2}$$

$$\operatorname{ch} x = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \ldots + \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \varepsilon(x)x^{2n+1}$$

$$\operatorname{th} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{2}{15}x^5 - \frac{17}{315}x^7 + \frac{62}{2835}x^9 + \varepsilon(x)x^{10}$$

1.2.4. Матрицы

1.2.4.1. Определение

Матрица вида $n \times m$ есть система $n \times m$ чисел, расположенных в виде прямоугольной таблицы из n строк и m столбцов:

$$A = \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1m} \\ a_1 & a_{22} & \ldots & a_{2m} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & a_{nm} \end{Vmatrix} = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}$$

1.2.4.2. Частные случаи

Если $n = 1$, получается матрица-строка или вектор-строка:

$$X = \| x_1, \ldots, x_m \|$$

Если $m = 1$, имеем матрицу-столбец или вектор-столбец:

$$x = \begin{Vmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{Vmatrix}$$

Если $m = n$, получаем квадратную матрицу:

$$A = \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & a_{nn} \end{Vmatrix} = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,n}}$$

Различают несколько специальных типов квадратных матриц:

— квадратная матрица A симметрична, если $a_{ij} = a_{ji}$ для любых i и j, $1 \le i \le n$, $1 \le j \le n$;

— квадратная матрица A диагональна, если $a_{ij} = 0$ при $i \ne j$:

$$A = \begin{Vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & a_{nn} \end{Vmatrix}$$

Если, к тому же, $a_{11} = a_{22} = \ldots = a_{nn} = 1$, получается единичная или тождественная матрица:

— квадратная матрица A называется верхней треугольной, если $a_{ij} = 0$ при $i > j$,

— квадратная матрица A называется нижней треугольной, если $a_{ij} = 0$ при $i < j$.

1.2.4.3. Транспонированная матрица

По определению, транспонированной по отношению к матрице

$$A = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}$$

вида $n \times m$ называется матрица

$$t_A = \| a_{ji} \|_{\substack{j=1,m \\ i=1,n}}$$

вида $m \times n$ (строки матрицы A становятся столбцами матрицы t_A).

Квадратная матрица A симметрична в том и только в том случае, когда $t_A = A$.

1.2.4.4. Сумма двух матриц

Пусть $A = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}$, $B = \| b_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}$ – две матрицы одинаковой формы. Их сумма $C = A + B$ – это матрица

$$C = \| c_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}},$$

определенная равенствами

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}.$$

1.2.4.5. Произведение двух матриц

Чтобы произведение AB двух матриц A и B имело смысл, требуется совпадение числа столбцов первой матрицы A с числом строк второй матрицы B.

Пусть $A = \| a_{ik} \|_{\substack{i=1,n \\ k=1,m}}$, $B = \| b_{kj} \|_{\substack{k=1,m \\ j=1,p}}$

Произведение $C = AB$ есть матрица вида $n \times p$:

$$C = \| c_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,p}}$$

определенная соотношениями

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^{m} a_{ik} b_{kj} = a_{i1} b_{1j} + \ldots + a_{im} b_{mj}$$

(c_{ij} – это скалярное произведение i-ой строки A на j-ый столбец B).

Важное замечание:

Может случиться, что произведение AB определено, а произведение BA – нет. Более того, даже если существуют оба произведения одновременно, они вообще говоря, не равны: $AB \neq BA$.

1.2.4.6. Произведение матрицы на действительное число

Пусть даны матрица $A = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}$ и действительное число λ.

Произведение $B = \lambda A$ есть матрица

$$B = \| b_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}$$

определенная равенствами $b_{ij} = \lambda a_{ij}$.

1.2.4.7. Система линейных уравнений. Линейное преобразование

Линейная система n уравнений с n неизвестными:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n = y_1 \\ \ldots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots + a_{nn}x_n = y_n \end{cases}$$

отождествляется с матричным уравнением $AX = Y$, где

$$A = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,n}}$$

есть матрица системы,

$$X = \begin{Vmatrix} x_1 \\ \ldots \\ x_n \end{Vmatrix}$$ – вектор-столбец неизвестных,

$$Y = \begin{Vmatrix} y_1 \\ \ldots \\ y_n \end{Vmatrix}$$ – вектор-столбец правых частей

Матрицу A можно также рассматривать как матрицу линейного преобразования, переводящего вектор X в вектор Y в векторном пространстве размерности n.

1.2.4.8. Обратная матрица

Пусть $A = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,n}}$ – квадратная матрица порядка n, а

$$I = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 1 & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & \ldots & 1 \end{Vmatrix}$$ – единичная матрица порядка n.

Обратной по отношению к матрице A называется такая матрица порядка n, которая обозначается A^{-1} и удовлетворяет соотношениям $AA^{-1} = A^{-1}A = I$.

Матрица A, для которой обратная матрица не существует, называется особой (или вырожденной).

Рассмотрим линейную систему с матрицей A:

— если A обратима (т.е. имеет обратную матрицу), то система $AX = Y$ допускает единственное решение $X = A^{-1}Y$,

— если A – особая, то система не имеет решений или имеет их неограниченное количество.

1.2.4.9. Определитель матрицы

Пусть $A = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,n}}$ – квадратная матрица порядка n.

Определителем D матрицы A называют число, равное

$$\sum_{1}^{n!} (-1)^k a_{1\alpha} a_{2\beta} \ldots a_{n\omega}$$

и обозначаемое

$$D = \det A = \begin{vmatrix} a_{11} & \ldots & a_{1n} \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n1} & \ldots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

При этом:

наборы $\alpha, \beta, \ldots, \omega$ пробегают множество всех $n!$ перестановок из чисел $1, 2, \ldots, n$; k – это число инверсий (т.е. нарушений естественного порядка в парах чисел) в каждой перестановке (например, член $a_{13}a_{21}a_{34}a_{42}$ определителя 4-го порядка берется со знаком минус, поскольку перестановка (3, 1, 4, 2) вторых индексов при буквах получается тремя последовательными инверсиями: (3, 1), (4, 2) и (3, 2).

В частности:

$$\det \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{Vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$

$$\det \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{Vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} +$$

$$+ a_{13}a_{21}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33}.$$

Доказывается, что матрица A обратима тогда и только тогда, когда $\det A \neq 0$.

1.2.4.10. Решение системы линейных уравнений

Пусть требуется решить линейную систему порядка n: $AX = Y$.

Если $D = \det A \neq 0$, система имеет единственное решение:

$$x_1 = \frac{D_1}{D}, \ldots, x_n = \frac{D_n}{D},$$

где D_i – определитель матрицы, полученной из матрицы A заменой ее i-го столбца столбцом Y.

Если $D = 0$ и не все D_i равны нулю, система не имеет решений.

Если $D = 0$ и все D_i – нули, система либо имеет бесконечное множество решений, либо ни одного, в зависимости от случая.

1.2.4.11. Ранг матрицы

Пусть $A = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}$ – матрица вида $n \times m$.

Минором порядка k этой матрицы называется определитель матрицы, полученной из A сохранением в ней только k^2 элементов, расположенных на пересечениях k строк и k столбцов.

Ранг матрицы A есть наибольшее число k такое, что в A существует хотя бы один ненулевой минор порядка k.

1.2.4.12. Общий случай системы, когда число уравнений не совпадает с числом неизвестных

Рассмотрим систему n уравнений с m неизвестными:

$$a_{11}x_1 + \ldots + a_{1m}x_m = b_1$$

$$\ldots$$

$$a_{n1}x_1 + \ldots + a_{nm}x_m = b_n.$$

Пусть $A = \| a_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}$ – матрица системы, и

$B = \| b_{ij} \|_{\substack{i=1,n \\ j=1,m+1}}$ – матрица вида $n \times (m + 1)$, полученная добавлением к A столбца правых частей:

$$A = \begin{Vmatrix} a_{11} & \ldots & a_{1m} & b_1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n1} & \ldots & a_{nm} & b_n \end{Vmatrix}.$$

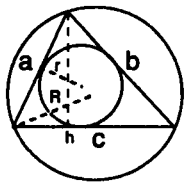
Тогда система имеет по меньшей мере одно решение (является совместной) в том, и только в том случае, если A и B имеют одинаковый ранг.

1.2.5. Геометрия

1.2.5.1. Соотношения между элементами правильных многоугольников

Правильные выпуклые многоугольники	R – радиус описанной окружности	r – радиус вписанной окружности	c – сторона		S – площадь многоугольника	
Треугольник	0,577 c	0,289 c	1,732 R	3,463 r	0,433 c^2	1,299 R^2
Квадрат	0,707 c	0,5 c	1,414 R	2,000 r	c^2	2 R^2
Пятиугольник	0,851 c	0,688 c	1,176 R	1,453 r	1,721 c^2	2,378 R^2
Шестиугольник	c	0,866 c	R	1,155 r	2,598 c^2	2,598 R^2
Семиугольник	1,152 c	1,038 c	0,868 R	0,963 r	3,634 c^2	2,736 R^2
Восьмиугольник	1,307 c	1,207 c	0,765 R	0,828 r	4,828 c^2	2,828 R^2
Десятиугольник	1,618 c	1,540 c	0,618 R	0,649 r	7,694 c^2	2,939 R^2
Двенадцатиугольник	1,932 c	1,866 c	0,518 R	0,536 r	11,196 c^2	3 R^2

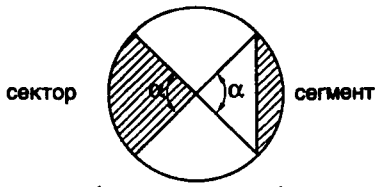
1.2.5.2. Различные формулы



Треугольник

Полупериметр $p = \frac{a+b+c}{2}$

Площадь $S = \frac{abc}{4R} = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$

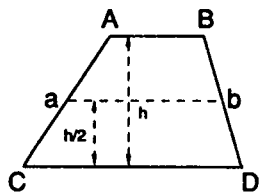


(угол α в градусах)

Круг $S = \pi R^2$

Сектор $S = \frac{\pi R^2 \alpha}{360}$

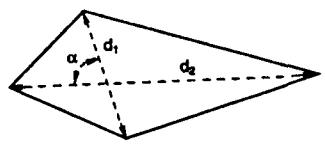
Сегмент $S = \frac{R^2}{2}\left(\frac{\alpha\pi}{180} - \sin\alpha\right)$



Трапеция

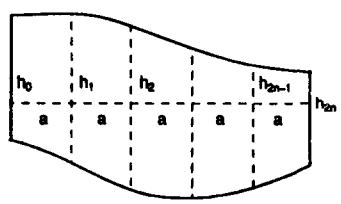
Площадь $S = \frac{AB+CD}{2} \times h$

Площадь $S = ab \times h$



Произвольный четырехугольник

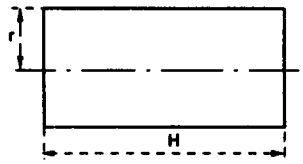
Площадь $S = \frac{1}{2} d_1 d_2 \sin\alpha$



Произвольная фигура (формула Симпсона)

Площадь ≈

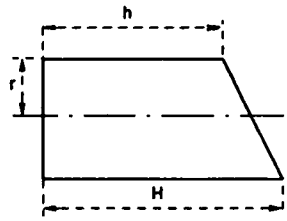
$$\approx \frac{a}{3}[h_0 + h_{2n} + 4(h_1 + h_3 + \ldots h_{2n-1}) + 2(h_2 + h_4 + \ldots + h_{2n-2})]$$



Цилиндр

Боковая поверхность $S = 2\pi rH$

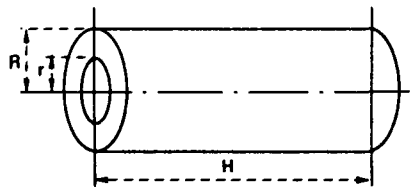
Объем $V = \pi r^2 H$



Усеченный цилиндр

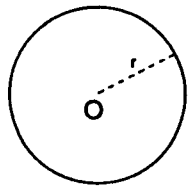
Боковая поверхность $S = \pi r(H + h)$

Объем $V = \frac{\pi r^2 (H+h)}{2}$



Цилиндрическая труба

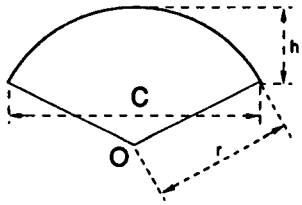
Объем $V = \pi H(R^2 - r^2)$



Шар

Площадь поверхности $= 4\pi r^2$

Объем $= \frac{4}{3}\pi r^3$

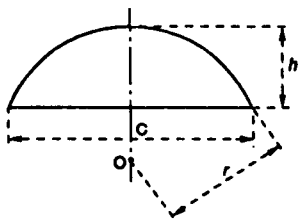


Сферический сектор

Полная поверхности $= \frac{\pi r}{2}(4h + c)$

Объем $= \frac{2}{3}\pi r^2 h$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

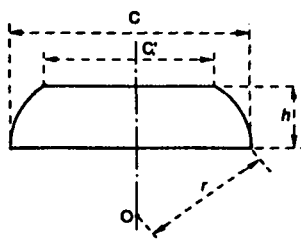


Шаровой сегмент

Площадь сферической части поверхности =

$$= 2\pi rh = \pi\left(\frac{c^2}{4} + h^2\right)$$

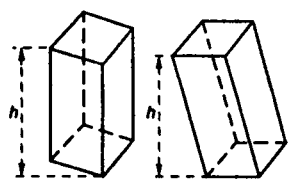
$$\text{Объем} = \pi h^2\left(r - \frac{h}{3}\right) = \pi h\left(\frac{c^2}{8} + \frac{h^2}{6}\right)$$



Шаровой пояс

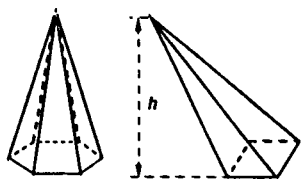
Боковая поверхность $= 2\pi rh$

$$\text{Объем} = \frac{1}{6}\pi h\left(\frac{3c^2}{4} + \frac{3c'^2}{4} + h^2\right)$$



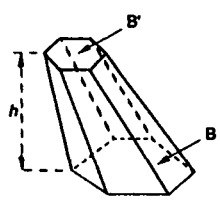
Призма

Объем = основание × высота



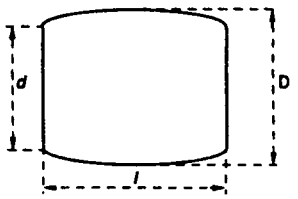
Пирамида

$$\text{Объем} = \frac{1}{3}\ \text{основание} \times \text{высота}$$



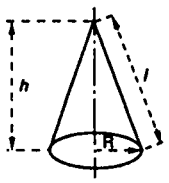
Усеченная пирамида

$$\text{Объем} = \frac{1}{3}h\left(B + B' + \sqrt{BB'}\right)$$



Бочонок

$$\text{Объем} = \frac{\pi l}{60}\left(8D^2 + 4Dd + 3d^2\right)$$

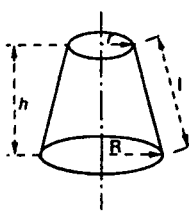


Конус

Боковая поверхность $= \pi Rl$

Полная поверхность $= \pi R(R + l)$

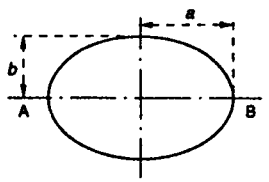
$$\text{Объем} = \frac{\pi R^2 h}{3}$$



Усеченный конус

Боковая поверхность $= \pi l(r + R)$

$$\text{Объем} = \frac{(R^2 + r^2 + Rr)\pi h}{3}$$

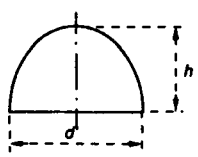


Эллипс

$S = \pi ab$

Эллипсоид вращения (с осью AB)

$$\text{Объем} = \frac{4}{3}\pi ab^2$$



Параболоид вращения

$$\text{Объем} = \frac{\pi d^2 h}{8}$$

1.2.6. Численные методы

Некоторые вычисления не могут быть выполнены с абсолютной точностью. Поэтому для решения соответствующих задач необходимо применять численные методы, которые реализуются с помощью программ для ЭВМ. Ниже описываются некоторые основные численные методы.

1.2.6.1. Численное интегрирование

Чтобы вычислить $\int_a^b f(x)dx$, делим интервал $[a, b]$ на $2n$ равных интервалов, получая точки деления

$$x_0 = a, x_1 = a + h, \ldots, x_{2n} = a + 2nh = b.$$

Формула Симпсона (точность которой возрастает с ростом n):

$$\int_a^b f(x)dx \simeq$$

$$\simeq \frac{h}{3}\left[f(x_0) + f(x_{2n}) + 4\sum_{i=1}^{n} f(x_{2i-1}) + 2\sum_{i=1}^{n} f(x_{2i})\right].$$

1.2.6.2. Решение системы линейных уравнений

Пусть требуется решить систему

$$a_{11}x_1 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$\ldots$$

$$a_{n1}x_1 + \ldots + a_{nn}x_n = b_n.$$

Опишем метод исключения Гаусса.

Предполагая, что $a_{11} \neq 0$, заменим исходную систему эквивалентной системой

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{22}^{(1)}x_2 + \ldots + a_{2n}^{(1)}x_n = b_2^{(1)}$$

$$\ldots$$

$$a_{n2}^{(1)}x_2 + \ldots + a_{nn}^{(1)}x_n = b_n^{(1)}$$

с $a_{ij}^{(1)} = a_{ij} - \frac{a_{i1}a_{1j}}{a_{11}}$ и $b_i^{(1)} = b_i - \frac{a_{i1}b_1}{a_{11}}$, полученной исключением неизвестного x_1 из уравнений с номерами от 2 до n.

Повторяя эту процедуру $n - 1$ раз, придем к эквивалентной треугольной системе

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{22}^{(1)}x_2 + \ldots + a_{2n}^{(1)}x_n = b_2^{(1)}$$

$$\ldots$$

$$a_{nn}^{(n-1)}x_n = b_n^{(n-1)},$$

в которой коэффициенты даются реккурентными формулами:

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} - \frac{a_{ik}^{(k-1)}a_{kj}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}}$$

и

$$b_i^{(k)} = b_i^{(k-1)} - \frac{a_{ik}^{(k-1)}b_k^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}}$$

для $i = k + 1, \ldots, n$ и $j = k + 1, \ldots, n$.

Затем решаем треугольную систему, рассматривая последовательно уравнения от последнего к первому, что дает:

$$x_n, x_{n-1}, \ldots, x_1.$$

Числа a_{11}, $a_{22}^{(1)}$, $a_{33}^{(2)}$, ... фигурирующие в реккурентных формулах, называются ведущими элементами. Они предполагаются отличными от нуля: если по ходу решения возникает нулевой ведущий элемент, то соответствующее уравнение меняют местами с одним из следующих так, чтобы получить ведущий элемент, не равный нулю.

1.2.6.3. Решение системы нелинейных уравнений

Пусть требуется решить систему нелинейных уравнений

$$f_1(x_1, \ldots, x_n) = 0$$

$$\ldots$$

$$f_n(x_1, \ldots, x_n) = 0,$$

которую мы запишем в виде $F(x) = 0$ с $X = \begin{Vmatrix} x_1 \\ \ldots \\ x_n \end{Vmatrix}$.

Метод Ньютона–Рафсона состоит в последовательном вычислении, исходя из некоторого начального вектора

$$X^0 = \begin{Vmatrix} x_1^0 \\ \ldots \\ x_n^0 \end{Vmatrix}$$

векторов

$$X^1, X^2, \ldots X^m = \begin{Vmatrix} x_1^m \\ \ldots \\ x_n^m \end{Vmatrix}$$

определяемых реккурентным соотношением

$$J(X^m)(X^{m+1} - X^m) = -F(X^m),$$

где $J(X^m)$ есть якобиан F в точке X^m:

$$J(X^m) = \begin{Vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \ldots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \ldots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{Vmatrix}.$$

Этот алгоритм сходится, т.е. X^m стремится к решению системы при m, стремящемся к бесконечности, если только X^0 есть "не слишком плохое" приближение решения.

1.3. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1.3.1. Элементы описательной статистики

1.3.1.1. Выборка

При описании популяции из N индивидуумов рассматривают переменную величину X, называемую *признаком*. Значения, принимаемые переменной X, обозначаются x_i и называются *реализациями*, а всякое подмножество значений x_i есть *выборка*.

1.3.1.1.1. Графическое описание выборки

1.3.1.1.1.1. Диаграмма частот

Когда X принимает p целых различных значений $x_1^*, x_2^*, \ldots, x_p^*$, причем каждое значение x_j^* наблюдается n_j раз (частота), диаграмма частот представляет собой график n_j как функции x_j^*

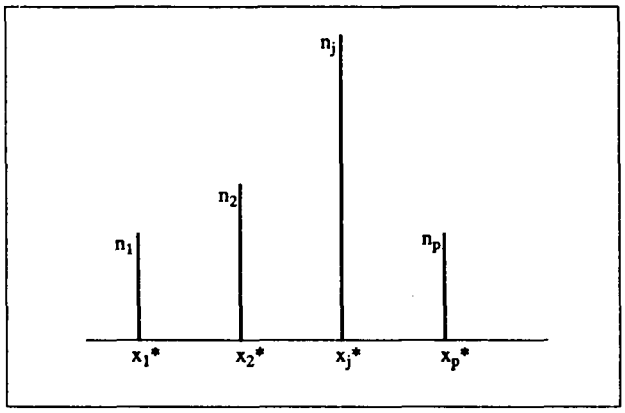
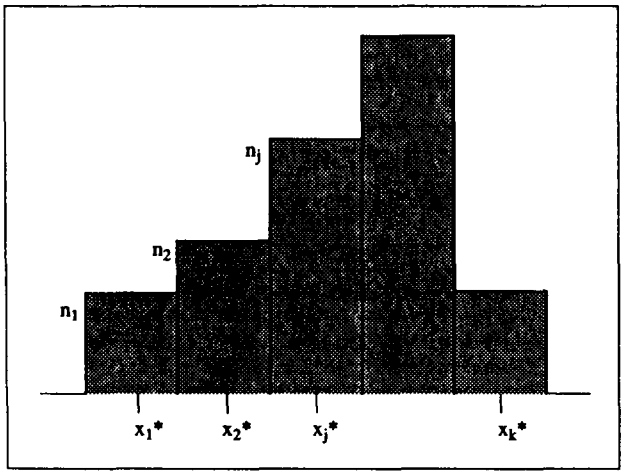


Диаграмма частот.



Гистограмма.

1.3.1.1.1.2. Гистограмма

Когда X принимает значения на некотором интервале, этот интервал делят на k равных интервалов, называемых классовыми или групповыми интервалами и имеющих центры в точках $x_1^*, \ldots, x_j^*, \ldots, x_k^*$. Если n_j есть сумма частот значений величины X в j-м классовом интервале, то гистограмма – это совокупность прямоугольников, основаниями которых служат классовые интервалы, а высотами – соответствующие значения n_j.

1.3.1.1.2. Численное описание

$$p_j = \frac{n_j}{\sum_j n_j}$$

есть относительная частота значения x_j^*.

1.3.1.1.2.1. Характеристики центра

Среднее значение: $m_x = \sum p_j x_j^*$.

Мода: $\mathfrak{M}_x$ = значение x_j^*, которому соответствует наибольшее n_j.

Медиана: M_x = такое значение x_j^*, что сумма относительных частот для $x_i^* \le M_x$ равна сумме относительных частот для $x_i^* \ge M_x$.

1.3.1.1.2.2. Характеристики рассеяния

Дисперсия: $\mathrm{Var}\ X = \sum_j p_j (x_j^* - m_x)^2$.

Среднее квадратичное отклонение: $\sigma_x = \sqrt{\mathrm{Var}\ X}$.

1.3.1.1.3. Индексы

Можно рассматривать значения, принимаемые переменной X в различных ситуациях: x_0 – в некоторой ситуации, выбранной в качестве отсчетной, x_k – в некоторой ситуации k. Индекс X в ситуации k относительно отсчетной ситуации – это:

$$I_{k/0} = 100\frac{x_k}{x_0}.$$

Отсчетная ситуация определяет базу индекса.

Если интерес представляют сразу несколько величин $X^1, X^2, \ldots, X^l$, то вводится составной индекс, полученный комбинацией индексов, построенных для каждой величины. Чаще всего употребляют составные индексы Ласпейров, Пааске и Фишера.

1.3.1.1.4. Оценки

Параметры, характеризующие распределение переменной X, обычно бывают неизвестны. Их стараются оценить с помощью функций элементов x_i выборки. Подобные оценки называются *статистиками*.

Так, математическое ожидание E(X) оценивается средним значением $m_x = \sum p_i x_i^*$.

1.3.1.2. Двумерная выборка

Чтобы изучить связь между переменными X и Y, рекомендуется изобразить на плоскости точки (x_i, y_i). Если полученное таким образом облако точек имеет удлиненную форму, следует вычислить коэффициент линейной корреляции:

$$\rho(X, Y) = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y},$$

где

$$COV(X, Y) = \frac{1}{\sum n_{ij}} \sum n_{ij} (x_i - m_x)\ (y_j - m_y)$$

– ковариация X и Y,

n_{ij} – число точек с координатами (x_i, y_j).

Если связь между X и Y линейна, то $|\rho| = 1$. Вычисленное значение ρ – это показатель тесноты связи между X и Y, но интерпретация этого значения часто бывает затруднена, поскольку указанная связь возмущается связями между последовательными значениями x_i или значениями y_j, когда приходится иметь дело с временными рядами.

1.3.1.3. Случай временных рядов

Так называются числовые последовательности наблюдений $x(t)$, упорядоченные во времени, при $t = 1, 2, \ldots, T$.

Временной ряд обладает памятью, которая характеризуется последовательностью коэффициентов автокорреляции порядка $\tau = 1, 2, \ldots$

$$\rho(\tau) = \frac{COV(x(t), x(t+\tau))}{\sigma_x(t)\sigma_x(t+\tau)}.$$

График функции $\rho(\tau)$ представляет собой коррелограмму.

1.3.1.4. Исследование числовых таблиц: многомерный анализ

Таблица из n строк и p столбцов объединяет значения p признаков, наблюденные на n индивидуумах. Существуют два больших семейства методов анализа этих таблиц.

1.3.1.4.1. Факторные методы

В этих методах выявляются соотношения близости между индивидуумами, которые распределяются по классам соседних элементов. Для описания числовых таблиц используется анализ главных компонент. Анализ соответствий позволяет описывать зависимость между двумя качественными признаками.

1.3.1.4.2. Классификационные методы

В этих методах используются различные алгоритмы построения классов или путем последовательных объединений (восходящие алгоритмы) или путем разделений (нисходящие алгоритмы).

1.3.2. Статистические решения

1.3.2.1. Случайная величина

Всякая мера величины, значения которой зависят от случая, есть случайная величина. Случайная величина называется дискретной, если она имеет конечное или бесконечное, но счетное количество возможных значений. Если множество ее возможных значений есть интервал, то говорят, что случайная величина непрерывна.

Случайная величина X определяется своей функцией распределения $F(x) = P(X \le x)$ (вероятность того, что X принимает значения, меньшие x). Если $F(x)$ непрерывна и дифференцируема, плотностью распределения вероятностей называют производную $f(x)$ функции $F(x)$.

1.3.2.1.1. Примеры дискретных случайных величин

1.3.2.1.1.1. Величина B, распределенная по биномиальному закону

Для индивидуума популяции имеются две возможности A и $\overline{A}$, вероятности которых p и $1 - p$ постоянны в серии из n независимых испытаний (выбор с возвращением).

1.3.2.1.1.2. Величина H, распределенная по гипергеометрическому закону

В популяции из N индивидуумов имеются две возможности A и $\overline{A}$, вероятности которых меняются в зависимости от испытания в серии из n последовательных испытаний (выбор с возвращением).

1.3.2.1.1.3. Величина P, распределенная по закону Пуассона

В данной популяции признак A появляется с малой вероятностью p. Реализуется большое число n независимых испытаний, так что $np = m$.

1.3.2.1.2. Пример непрерывной случайной величины

Величина N, распределенная по нормальному закону (закону Лапласа-Гаусса).

Изучаемая величина	Закон распределения вероятностей	E(X)	Var(X)
B(*n*, *p*)	$P(X = x) = C_n^x p^x (1-p)^{n-x}$	np	np(1 – *p*)
H(N, *n*, *p*)	$P(X = x) = \frac{C_{Np}^x C_{N(1-p)}^{n-x}}{C_N^n}$	np	np(1 – *p*)
P(*m*)	$P(X = x) = e^{-m}\frac{m^x}{x!}$	*m*	*m*
N(*m*, σ)	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-m}{\sigma})^2}$	*m*	σ^2

Основные случайные величины.

Изучаемая величина	Условия приближения	Приближение
H(N, *n*, *p*)	N ⩾ *n*	B(*n*, *p*)
B(*n*, *p*)	np ≤ 5	P(*m* = np)
B(*n*, *p*)	np(1 – *p*) ≥ 18	N
P(*m*)	*m* ≥ 18	N

Приближение случайных величин.

1.3.2.2. Критерий согласия χ^2 (хи-квадрат) между законом распределения вероятностей P и выборкой

Вычисляется количество

$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i},$$

n – объем выборки,

k – число классовых интервалов,

p_i – вероятность попадания в интервал (*i*) в соответствии с распределением вероятностей P,

n_i – число элементов выборки, попадающих в интервал (*i*).

Вычисленное значение D сравнивают с величиной, называемой χ^2 и соответствующей той малой вероятности, которая не должна быть превышена. Решающее правило таково:

если $D \le \chi^2$, принимается гипотеза о том, что изучаемое явление согласуется с законом распределения вероятностей P;

если $D > \chi^2$, эта гипотеза о согласовании изучаемого явления с законом распределения вероятностей P отбрасывается.

1.3.2.3. Параметрические статистические критерии

Формулируются две альтернативные гипотезы H_0 и H_1 по поводу закона распределения вероятностей P. Исследование выборки позволяет сделать выбор между двумя гипотезами, правда, с риском ошибиться. Возможны следующие ситуации:

		Реальное положение вещей: H_0 верно	Реальное положение вещей: H_1 верно
Заключение критерия	Принятие H_0	Заключение правильное	Заключение ложное, ошибка β второго рода
	Отбрасывание H_0	Заключение ложное, ошибка α первого рода	Заключение правильное

α фиксировано, а β вычисляется в предположении H_1.

Вероятность отбросить H_0, когда H_0 ложно, определяет мощность критерия: 1 – β.

1.3.2.4. Непараметрические критерии

Эти критерии не относятся к какому-либо параметру закона распределения вероятностей. Они касаются, обычно, знаков или рангов разностей между последовательными значениями. Гипотеза H_0 соответствует чисто случайному распределению. Наиболее популярными непараметрическими критериями являются критерии Фишера, Уилкоксона, ранговый критерий.

1.3.3. Экспликативные детерминистские модели

1.3.3.1. Схема разложения временного ряда

Y(*t*) – изучаемый ряд,

C(*t*) – тенденция,

S(*t*) – сезонная компонента,

ε(*t*) – случайный член.

Аддитивная схема: представляет периодическое явление с флуктуациями постоянной амплитуды:

$$Y(t) = C(t) + S(t) + \varepsilon(t).$$

Мультипликативная схема: хорошо представляет колебательное явление взрывного или затухающего характера:

$$Y(t) = C(t)[1 + S(t)] + \varepsilon(t).$$

1.3.3.2. Методы оценки тенденции

1.3.3.2.1. Метод скользящего среднего

Формируют новый ряд *z*(*t*), беря суммы взвешенных последовательных значений *y*(*t*):

$$z(t) = \sum_{i=-k}^{+k} \alpha_i y(t+i).$$

Часто скользящие средние являются центрированными ($k = k'$) и равновзвешенными ($\alpha_i = \frac{1}{k'+k+1}\ \forall i$). Метод дает лишь довольно грубые оценки тенденции. Он полезен для сглаживания кратковременных флуктуаций.

1.3.3.2.2. Метод экспоненциального сглаживания

Реализованные значения $y(t)$ взвешиваются с коэффициентами, составляющими геометрическую прогрессию со знаменателем β:

$$z(t) = (1-\beta)\sum_{i=0}^{\tau}\beta^i y(t-i).$$

Параметр β оценивается минимизацией суммы квадратов остатков модели. Обычно $\beta \approx 0.7$. Эта модель может быть использована для прогнозирования, когда ряд хорошо укладывается вокруг горизонтальной прямой.

1.3.3.3. Связи между двумя рядами

Когда знание реализаций переменной X дает информацию о возможных значениях другой переменной Y, говорят, что переменные X и Y связаны. Обозначим $E(Y/x)$ математическое ожидание Y при условии, что X принимает значение x; линия, состоящая из точек $(x, E(Y(x))$, называется линией регрессии. Среди всех линий, сглаживающих облако точек (x, y), она является наилучшей (обладает минимальной остаточной дисперсией). Если линия регрессии – прямая, ее параметры оцениваются методом наименьших квадратов:

$$Y = aX + b,$$

где

$$a = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_x^2} \text{ и } b = m_y - am_x$$

Использование линейной модели распространяется на случай нескольких переменных $X_1, X_2, \ldots, X_i$; именно:

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \ldots + a_iX_i + b$$

Замечание 1. Оценка a может быть определена лишь в случаях, когда $X_1, X_2, \ldots, X_i$ не связаны линейной зависимостью.

Замечание 2. Введение дополнительных переменных $X_{i+1}, \ldots$ может сопровождаться уменьшением остаточной дисперсии, даже если эти новые переменные в действительности не существенны для объяснения поведения переменной Y.

Замечание 3. В случае линейной модели с несколькими переменными оценки a_k смещены, если реализации одной из переменных $X_1, \ldots, X_i$ автокоррелированы.

1.3.3.4. Эконометрика

Эконометрическая модель служит для количественного изучения соотношений, постулируемых экономической теорией.

Спецификация состоит в том, чтобы выразить теорию в математической форме. Для этого используются эндогенные переменные, которые вводятся при моделировании, и экзогенные переменные, определяемые вне моделирования. Часто дело сводится к нескольким уравнениям при отсутствии однозначного разделения на объясняющие и объясняемые, результирующие переменные. В процессе *идентификации* анализируются соотношения между решением (приведенной формой) модели и ее спецификацией (структурной формой). Оценка параметров производится методом наименьших квадратов или двухшаговым методом наименьших квадратов, если обнаружены мешающие корреляции.

Иногда эконометрические модели приводят к рассмотрению логарифмов переменных $Y, X_1, \ldots, X_k$.

Коэффициенты $a_1, \ldots, a_k$ модели являются показателями упругости Y по отношению к каждой из переменных $X_1, \ldots, X_k$:

$$e^Y_{X_k} = \frac{X_k}{Y}\frac{\partial Y}{\partial X_k}$$

– упругость Y по отношению к X_k.

1.3.4. Стохастические модели

1.3.4.1. Модель для одной переменной

Имеется только один ряд $X(t)$.

1.3.4.1.1. Стационарность

Ряд $X(t)$ "стационарен", если:

$$\left.\begin{aligned} &E(X(t)) = m \\ &Var(X(t)) = \sigma^2 \\ &COV(X(t), X(t+h)) = \gamma(h) \end{aligned}\right\} \text{не зависят от времени.}$$

Примеры:

1) Белый шум $\varepsilon(t)$ получается при

$$E(\varepsilon(t)) = 0$$
$$VAR(\varepsilon(t)) = \sigma^2$$
$$COV(\varepsilon(t), \varepsilon(t+h)) = 0 \quad \forall h \neq 0.$$

2) Скользящее среднее MA(q) – это линейная комбинация белых шумов

$$X(t) = \varepsilon(t) - \theta_1\varepsilon(t-1) - \ldots - \theta_q\varepsilon(t-q)$$

3) Авторегрессия

Значения $X(t)$ – линейные комбинации значений $X(t-1), X(t-2), \ldots, X(t-p)$. Процесс стационарен для некоторых значений весовых коэффициентов.

4) Авторегрессия со скользящим средним ARMA (p, q):

$$Y_t - \varphi_1Y_{t-1} - \ldots - \varphi_pY_{t-p} =$$
$$= \theta_0 + \varepsilon_1 - \theta_1\varepsilon_{t-1} - \ldots - \theta_q\varepsilon_{t-q}$$

Можно показать, что всякий стационарный процесс записывается в форме ARMA.

1.3.4.1.2. Практика моделирования

Обычно встречающиеся ряды редко оказываются стационарными, но с помощью некоторых математических преобразований их можно привести к стационарному виду. В этом смысле полезен разностный оператор порядка n такой, что

$$\Delta_n X(t) = X(t) - X(t-n).$$

Для случая суточных поступлений газа применение этого оператора порядка 1, а затем его же – порядка 7, делает процесс стационарным. Модель принимает вид:

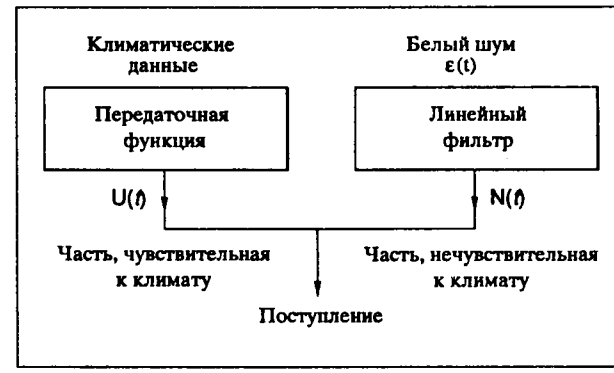
$$\Delta\Delta_7 E(t) = \varepsilon(t) - a\varepsilon(t-1) - b\varepsilon(t-7).$$

Параметры a и b оцениваются методом наименьших квадратов.

1.3.4.2. Моделирование нескольких рядов

В случае, когда флуктуации X влекут за собой изменения переменной Y, стараются представить $Y(t)$ в виде линейной комбинации величин $X_i(t-h)$.

После моделирования каждого ряда в отдельности используют технику "отбеливания", позволяющую избавиться от автокорреляций. Переменная $Y(t)$ представляется в виде суммы двух независимых составляющих: передаточной функции и шума. Постоянное слежение за остаточным членом показывает, что вся полезная информация принята во внимание. Этот метод дает прогнозы, сопровождаемые доверительными интервалами.



Случай поступления газа.

Напоминание:

Линейный фильтр – есть преобразование, которое ставит в соответствие входной величине X_t выходную величину Y_t, являющуюся линейной комбинацией последовательных значений X_t, взятых в моменты времени t, $t-1$, $t-2$, ...

Пример:

X_t – белый шум ε_t:

$$\varepsilon_t \rightarrow \boxed{\text{Линейный фильтр}} \rightarrow Y_t = p_0\varepsilon_t + p_1\varepsilon_{t-1} + \ldots + p_n\varepsilon_{t-n}$$

Если изучаемая переменная Y_t может быть записана в виде линейной комбинации переменных X_t, X_{t-1},..., то говорят, что получаемый таким образом линейный фильтр $Y_t = v_0X_t + v_1X_{t-1} + \ldots$ имеет *передаточную функцию* $v(B) = v_0 + v_1B + v_2B^2 + \ldots$

1.4. ИНФОРМАТИКА

Со времен "Рассуждения о методе" традиционная сознательная поступь научной мысли человека, которая проявляется в многочисленных областях и направляет развитие промышленности, состоит в построении, исходя из частных и простейших понятий, более сложных и более общих систем, синтез которых воспринимается как приближение к знанию, как двигатель неосознанных исследований Непознанного.

Парадоксально, но с точки зрения пользователя создается впечатление, что эволюция информатики до настоящего времени следовала противоположным путем.

На смену медленному и скучному программированию, практиковавшемуся на заре информатики, пришел жизнерадостный "диалог человек–машина", основанный на использовании развитых языков и ведущий, по мере успехов исследований по синтезу и распознаванию слов, к системам, управляемым голосом.

Точно так же, если понятия "баз данных" и "информационной системы" остаются фундаментальными для приложений информатики, то способы их использования становятся более простыми благодаря развитию "программных средств", "методов анализа" и применению "проблемных пакетов".

Наконец, тяжелое и громоздкое оборудование, вынуждавшее пользователей заниматься трудным и стесняющим дележом имеющихся ресурсов, уступило место индивидуальным системам, обладающим собственной вычислительной мощностью и в то же время сохраняющим глобальное единство благодаря совершенствованию "передачи данных"между отдельными системами.

Быстрота и неизбежность этой тройной эволюции объясняются одним исключительным явлением в истории современной техники. В самом деле, повышение возможностей электронных систем, как по объемам обрабатываемой информации, так и по скорости обработки, непосредственно связанное с уменьшением размеров их частей, резко понизило стоимость этих систем.

Финальная стадия этой эволюции состоит, просто-напросто, в моделировании поведения человека, что составляет ныне объект исследований по искусственному интеллекту. На первом этапе это моделирование привело к построению "экспертных систем".

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В таком меняющемся мире все же остается по меньшей мере один инвариант: понятие "безопасности" – безопасности в широком смысле слова, который охватывает и заботу о физической сохранности эксплуатируемой системы, и надежность функционирования, и конфиденциальность информации.

1.4.1. Диалог человек–машина

Речь идет об изучении возможностей общения между человеком и созданным им инструментом – компьютером.

Человек общается посредством:

— языка, т.е. распознавания и выражения звуков, составляющих языки,
— письма, представляющего собой гармоническую композицию знаков, выражающих язык,
— сигналов, которые поначалу были всего лишь жестами, но становились благодаря инструментам все более быстрыми и легко понимаемыми: там-там, дым, семафор, телеграф, телефон, телекс, радио, электронные сети и т.д.

Машина, компьютер, «понимает» только двоичный код (ток есть, или тока нет). Комбинирование проводников и переключателей дает возможность превратить обмен посланиями, приказами в настоящий язык. Чем более развит язык, тем ближе он к человеческому языку. Существует много языков общения с машиной, начиная с Кобола, Фортрана, PL, Бэйсика, Паскаля и т.д. Они классифицируются по поколениям и становятся все более сложными системами.

Средства диалога с компьютером подразделяются на физические и логические. Вслед за перфокартой магнитная лента, кассета, дискета, магнитный диск, магнитный барабан и т.д. дают возможность записывать и хранить данные. Чтобы получать доступ к этим данным, комбинировать их, объединять, языки эволюционируют в сторону образования языков запроса, табличных языков, языков программирования прикладных программ – вплоть до экспертных систем и все более и более развитых методов анализа и программирования.

Эти средства объединяются, чтобы помочь человеку, сидящему перед машиной, сейчас это значит – перед клавиатурой и экраном, на котором высвечивается диалог в виде записей, изображений (чертежи, таблицы) в цвете или без. Чтобы сохранить следы диалога, печатающие устройства становятся все более совершенными и быстродействующими: лазерные принтеры – до 120 страниц в минуту. Распознавание голоса, искусственный интеллект еще более облегчают диалог пользователя с компьютером.

Результаты такого диалога человек–машина составляют целые "дисциплины", помогающие человеку. От компьютерного проектирования, через компьютерное рисование к компьютерному преподаванию компьютер-инструмент призван к тому, и только к тому, чтобы служить человеку.

Соответственно этому и *поведение* человека, завязывающего диалог с машиной, имеет разнообразные аспекты, изучаемые эргономикой, включая физический (поза, расположение перед компьютером и т.д.). Эти аспекты порождают настолько же разнообразные проблемы: социальные (занятость, освобождение от работы, досуг), связанные с безопасностью (физической, защитой программ, защитой данных и т.д.), политические (комиссия по информатике и свободе).

1.4.2. Что такое информационная система?

Помимо слов и некоторой теории (системотехники), которая дает лишь базовый набор терминов и общие идеи о системах как «множествах элементов, находящихся в динамическом взаимодействии и организованных для достижения некоторой цели», понятие информационной системы позволяет обозначить множество, составленное:

— объемами информации, структурированными или нет, материализованными и не улетучивающимися. Эти объемы составляют *память* системы и являются ее непременной составляющей.
— *процессами*, осуществляемыми автоматически или человеком, которые могут комбинироваться между собой, включаться автоматически или нет, и которые позволяют либо изменить содержимое или структуру памяти системы, может быть в зависимости от внешней информации, либо передать за пределы системы содержимое памяти или его часть. Ясно, что любая вычислительная система (материальная и программная) полностью соответствует этому определению: всякий компьютер содержит (в принципе) память и процессор, и всякая программа действует на данные.

Однако информационная система не сводится к собственно автоматизированной или вычислительной системе, но включает в себя элементы автоматической, интерактивной и даже исключительно ручной обработки.

Изучение сложных информационных систем требует привлечения значительных методологических ресурсов.

1.4.3. Базы данных

1.4.3.1. Определения

Классический каталог: множество записей фиксированной или переменной структуры.

Запись выполняет роль связи между своими составляющими.

База данных: множество элементов информации, исчерпывающих и не избыточных, структурированное с целью одновременного удовлетворения нескольких пользователей избирательным образом, с прямым доступом и в надлежащее время.

1.4.3.1.1. Уровень представления

Внутренний уровень – тот, который виден ответственному за сохранение целостности базы данных. Этот уровень прозрачен для пользователя.

Внешний уровень соответствует различным группам пользователей. Эти последние работают через посредство системы управления базой данных, которая с помощью словаря данных преобразует требования в приказы, исполняемые системой.

1.4.3.1.2. Структура баз данных

Зависит от природы связей между элементами информации.

1.4.3.1.2.1. Иерархическая модель

Эта модель обладает структурой дерева, в которой узлы называются сегментами. Вершина дерева – это сегмент-корень. За исключением его, любой сегмент существует лишь в зависимости от своего иерархически старшего сегмента и доступен только при проходе через таковой.

1.4.3.1.2.2. Сетевая модель

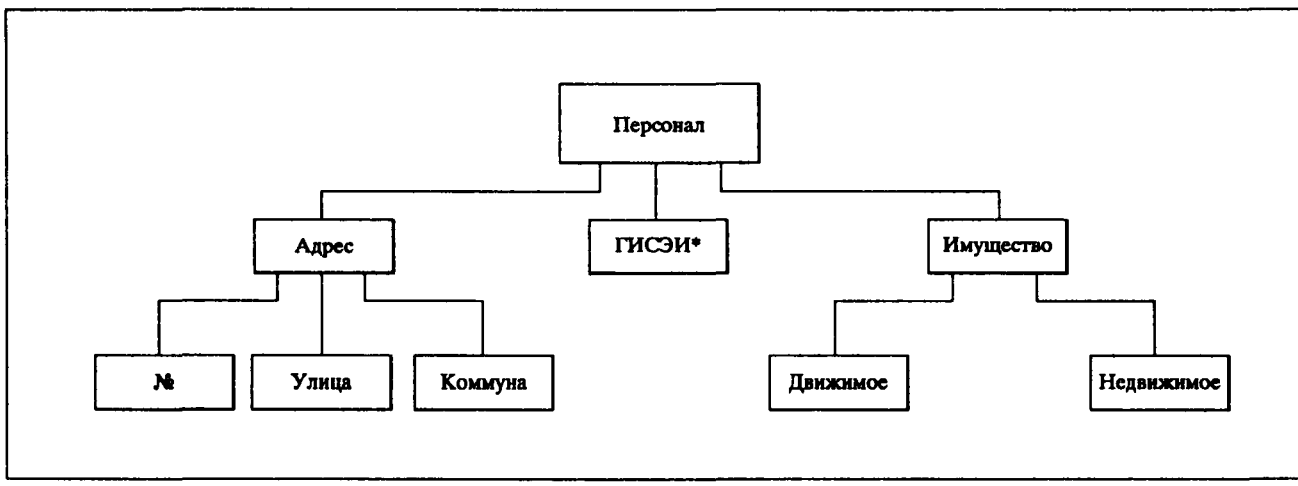
Сетевая модель основана на структуре *графа*, представляющего множество сегментов, связанных между собой и не обязательно находящихся в иерархическом подчинении друг другу.

Сетевая модель может быть получена из иерархической добавлением понятия отсылки, позволяющего связать два дерева, не обязательно подчиненные одно другому иерархически. Она допускает возможность нескольких входов.

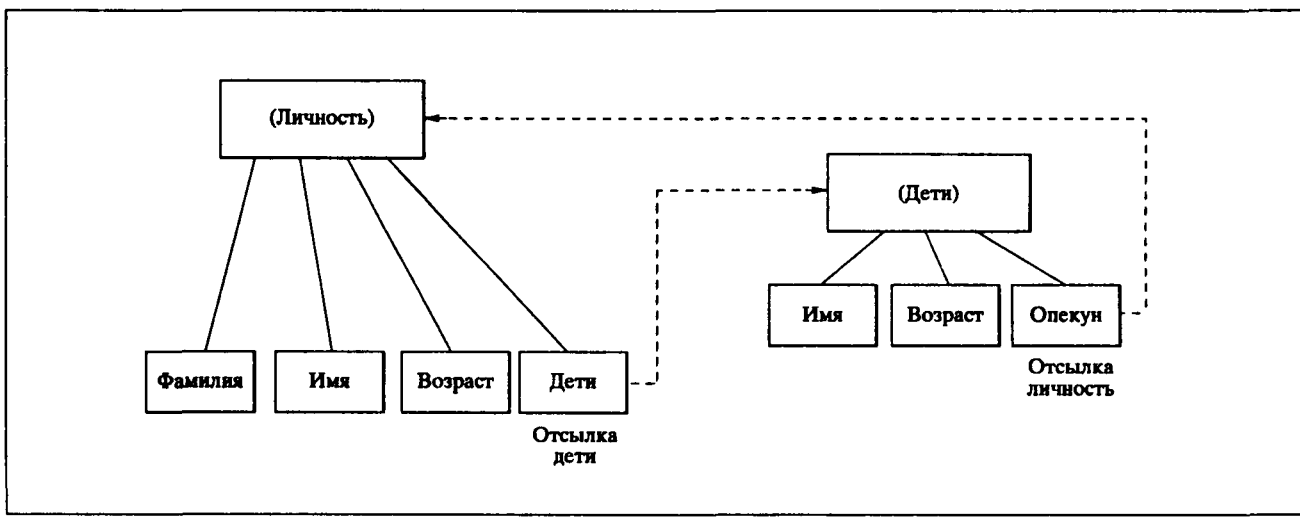
1.4.3.1.2.3. Реляционная модель

В реляционной модели множество данных рассматривается как множество таблиц или *отношений*. Каждая таблица имеет имя и состоит из столбцов, называемых *доменами отношения*. Наличие *общих доменов* существенно. Совокупность таблиц представляет собой базу данных.

Преимуществами реляционной модели являются ее простота и независимость данных по отношению к программам; однако ее возможности пока еще в некоторых случаях скромны в связи с ее молодостью сравнительно с иерархической моделью. Она включает в себя язык S. Q. L. (язык структурированных запросов).



Древообразная структура.



Сетевая модель.

*ГИСЭИ – Государственный институт статистики и экономических исследований (Фр.).

1.4.4. Методы анализа

Чтобы дать методологию создания какого-либо продукта в области информатики, опишем этапы анализа его приложений по последовательному методу (цикл развития).

Заметим кратко, что существует совсем другой метод, называемый макетированием, который исключает, в случае небольших проектов, трудную, длительную и тщательную работу, предусмотренную последовательным методом. Этот метод состоит в конструировании, с самого начала, приближенной версии, макета продукта. Макет развивается до полного готового продукта постепенно, в процессе постоянной связи с пользователем или пользователями.

Ниже будет описан только *последовательный метод*.

1.4.4.1. Предварительное изучение

Речь идет о фундаментальном этапе. От его результатов зависит решение продолжить или прекратить разработку проекта.

Предварительное изучение содержит следующие элементы.

1.4.4.1.1. Определение задания

Определение поля исследований.

Уточнение фиксированных элементов деятельности и целей работы.

Отдельные стороны работы:

— формирование исследовательской группы,
— определение сроков по этапам,
— средства, бюджет.

1.4.4.1.2. Изучение и критическая оценка состояния дел

Эта часть дела включает в себя исследование:

— позиций органиграммы и распределения ответственности,
— потоков информации,
— элементов информации, находящихся в памяти (каталогов),
— имеющихся в организации документов, результатов и т.д.
— обработки имеющихся данных,
— затрат.

Она заканчивается критическим анализом положения дел, имеющим целью дать ему оценку. Для получения такой оценки следует начать со списка всех обнаруженных аномалий и затем попытаться найти их причины.

1.4.4.1.3. Выработка новых решений

Она содержит этапы:

— определения целей новых решений и ограничений, которые на них накладываются,
— поиски новых решений: модификация ручных процедур или автоматизация без изменения организации, или автоматизация с реорганизацией структур и процедур,
— изучение для каждого из предполагаемых решений возможностей:
  · кадровых,
  · материальных,
  · временных,
  · финансовых.

Чтобы продемонстрировать выполнимость некоторых операций или оживить взаимоотношения с заказчиками, можно с выгодой построить демонстрационные макеты, не сохраняя их после использования.

1.4.4.1.4. Заключительный документ

Этот итог – результаты и заключения по этапу предварительного изучения. Он вручается и поясняется лицу, решающему судьбу проекта для выбора из возможных продолжений:

— отказ от любых модификаций и прекращение работ,
— переход к детальной проработке,
— продолжение предварительного изучения для выработки новых, не рассматривавшихся ранее, решений.

1.4.4.2. Детальная (или функциональная) проработка

Этот этап заканчивается составлением детальных внешних спецификаций.

Детальная проработка содержит следующие части:

— определение некоторых составляющих будущей работы:
  · формирование команды,
  · назначение руководителя проекта,
  · предположительный календарь работы,
— изучение обработки информации,
— изучение данных, требующих запоминания,
— изучение выходов,
— изучение входов и контроля за поступающими данными,
— изучение рабочих мест,
— оценка средств и затрат,
— составление комплекта детальных спецификаций.

Результаты детальной проработки собираются в досье с целью:

· получить согласие пользователей,
· получить согласие решающего лица,
· реализовать последовательность работ.

1.4.4.3. Реализация

Этот этап включает:

— физическую организацию данных (каталоги, базы данных),

— физическую организацию обработки:
  · архитектура цепи обработки,
  · разбивка на программы и определение роли каждой из них,
— составление программ, затем тест и окончательная доводка каждой,
— объединение программ и утверждение всей системы. Согласие пользователей.

1.4.4.4. Запуск

— *Выпуск и распространение* текстов программ и сопутствующей документации, приспособленной для различных категорий пользователей.
— *Эксплуатация*:
  · запуск системы в ее операционном окружении,
  · учет замечаний о неполадках,
  · исправление ошибок.

1.4.5. Проблемные пакеты

Проблемный пакет есть совокупность программ, приобретаемая готовой к употреблению, образующая единое целое и позволяющая решать задачи определенного типа. Таким образом, данный проблемный пакет адресован широкому кругу пользователей, которые могут принадлежать к различным предприятиям, но заинтересованы в решении проблем одного и того же типа и не желают сами прилагать особых усилий для выработок методов их решения. Проблемный пакет, в отличие от библиотеки программ, есть полный и автономный продукт, позволяющий пользователю формулировать свои требования непосредственно машине.

Будучи готовым к употреблению продуктом, проблемный пакет может не полностью соответствовать желаниям требовательного пользователя, который предпочтет сам создать матобеспечение для своих нужд. Чтобы избавиться от такого неудобства, многие проблемные пакеты имеют свой собственный командный язык или персональные модули, что позволяет удовлетворить запросы пользователя, даже если он не информатик.

Можно различать два типа проблемных пакетов:

— пакеты общего назначения: обработка текстов, графическая или статистическая обработка, система управления базой данных и т.д.,
— пакеты, предназначенные для применения в конкретных областях: управление, помощь в принятии решений, моделирование, преподавание, рисование, дизайны, издательское дело и т.д.

В последнем случае, особенности области приложения (химия, медицина, производство автомобилей и т.д.) принимаются в расчет, что позволяет пользователю рассматривать довольно тонкие вопросы. Специфичность каждого пользователя может часто быть учтена с помощью персональных модулей.

Пакеты для проектирования, преподавания, рисования, издательства и т.д. основаны на довольно широком взаимодействии человека и машины, включающем часто графику, видео и т.д., они позволяют пользователю продвигаться в своей работе, тогда как программа играет роль распорядителя, регулировщика.

Возможности проблемного пакета и его соответствие своему назначению зависят от совместимости техники (процессора), системы эксплуатации, установленной на процессоре и языков, используемых для реализации программ пакета. Пакет может функционировать на различных машинах даже не будучи совместимым со всеми; это тот случай, когда имеются несколько версий одного пакета, приспособленных к разной технике. Совместимость пакета – это важное качество, ибо срок жизни пакета зачастую превосходит срок жизни техники. Она позволяет также применять один и тот же пакет на разной технике.

1.4.6. Передача данных

1.4.6.1. Введение и общие положения

Возрастающие возможности стандартных решений вопросов о материальной базе, матобеспечении и создании сетей определяют эволюцию техники передачи данных. Здесь первая задача состоит в понимании терминологии. Речь идет о таких терминах, как:

— бод, скорость передачи информации – бит в секунду,
— растры, пакеты, сообщения,
— протоколы и сети,
— техника передачи данных,
— терминалы, главная ЭВМ, модем,
— локальные и глобальные сети,
— интегрированная система связи.

Передача информации между системами осуществляется с помощью физических средств соединения или средств телекоммуникации. Применение средств коммуникации требует, следовательно, такого представления информации, чтобы ее семантическое содержание сохранялось.

1.4.6.2. Принципы передачи данных

1.4.6.2.1. Носители передачи

Они включают в себя: обычный кабель, коаксиальный кабель, оптический кабель, пучок электромагнитного излучения, спутник.

Скорость передачи информации есть функция полосы передаваемых частот (формула Шеннона). Поскольку практическая скорость явно ниже теоретической, связь характеризуется своим процентом ошибок. Передача данных чувствительна к искажению фазы.

1.4.6.2.2. Эксплуатация

Канал связи эксплуатируется в режимах "simplex" или "в одном направлении", "half duplex" или "в двух направлениях одновременно" ("alternate"), "full duplex" или "в двух направлениях одновременно". Передача данных бывает асинхронной (с символами "старт", "стоп") или синхронной (на каждом конце синхронизированные часы).

1.4.6.2.3. Терминалы и передача данных

Терминал – это источник или приемник данных, т.е. символов, передаваемых по каналу, на каждом конце которого имеется устройство контроля связи и соединение с модемом физической связи с телекоммуникационной сетью.

Модуляция в модеме может быть разнообразной (P. S. K. (Pulse Shift Keying), F. S. K. (Frequency Shift Keying), и т.д.). Модемы интеллектуальны. Они отвечают нормам, предписанным Международным консультативным комитетом по телеграфии и телефонии (C. C. I. T. T.).

Передача серии данных может быть асинхронной или синхронной, биты, составляющие символ, могут быть кодированы в NRZ ("nonreturn to zero" – без возвращения к нулю) или, предпочтительно, в манчестерском коде и дополнены кодами распознавания и исправления ошибок кодирования символа.

1.4.6.3. Принципы сетей

Сформировать сеть означает выбрать оптимальную топологию носителей информационных потоков и узлов концентрации с целью обеспечить движение потоков между терминалами так, чтобы были удовлетворены ограничения на время ответа и безопасность сети.

1.4.6.3.1. Нормы, модели O. S. I.

Поскольку техника, производимая промышленностью для нужд информатики, разнообразна, модель O. S. I. (Open Systems Interconnection) определяет архитектуру "открытых" систем, допускающих обмен информацией. Архитектура взаимосвязи систем использует различные функции, четко разделяемые слоистой структурой. Эта последняя обеспечивает совместимость связей; были выделены семь уровней. В рамках этой архитектуры заданы определенные нормы (примеры: C. C. I. T. T. V24, C. C. I. T. T. X 25, ISO 8802.3).

Поставщики техники предлагают сети взаимосвязей между своими системами.

1.4.6.3.2. Топология сетей, возможности

Она рассматривает два типа сетей – централизованные и распределенные – в последнем случае вместе с разложением на сеть доступа и сеть взаимосвязи. Конфигурации сети могут быть в виде петли, звезды, дерева, сетки и т.д.

Концентрация терминалов приводит к проблемам размещения концентраторов, выбора носителей информации, оптимизации топологии.

Необходимы методы решения задачи о локализации концентраторов (эвристический, релаксации по Лагранжу и т.д.), чтобы облегчить перестройку конфигурации. Критериями выбора носителей информации являются параметры информационных потоков, уязвимость носителей, скорость передачи, стоимость.

1.4.6.3.3. Коммутирование пакетов

Информация делится на пакеты, передающиеся по сети, узлы которой, в частности, узлы концентрации, осуществляют коммутирование пакетов, их распределение по нужным маршрутам передачи. Сборка пакетов (и наоборот, их разборка) производится с помощью P. A. D. (Packet Assembly Disassembly).

1.4.6.4. Протоколы и сети

1.4.6.4.1. Функции протоколов передачи данных

В слоистой архитектуре, такой, как в модели O. S. I., связь осуществляется между соответствующими, т.е. расположенными на одном уровне, слоями. Следовательно, надо иметь семь протоколов для управления обменом между семью парами слоев. При выдаче информации каждый протокол управляет своим слоем, принимает данные с верхнего слоя, добавляет контрольные элементы и передает все вместе в нижний слой.

Интерфейс между двумя слоями определяет, какими средствами следует пользоваться для передачи информации и служебных данных данного слоя.

Каждая сущность (например, прикладная процедура) локализуется своим адресом.

Протоколы должны учитывать возможные скорости передачи. Должен быть предусмотрен контроль за потоками.

Разделение на пакеты облегчает транспортировку информации и защиту от ошибок с помощью добавления избыточных битов.

Защита от ошибок учитывает четыре класса ошибок. Каждая задача должна решаться с помощью соответствующей процедуры восстановления. Говоря о защите информации, надо иметь в виду и конфиденциальность передаваемых сообщений.

1.4.6.4.2. Слои модели O. S. I.

1.4.6.4.2.1. Физический слой или уровень 1

Он предоставляет физические, электрические, функциональные и процедурные средства для введения в действие, работы и остановки физических соединений, обеспечивающих передачу битов между элементами непосредственно следующего верхнего уровня. Здесь действуют нормы C. C. I. T. T. V 24, X21 и т.д.

1.4.6.4.2.2. Связь данных или уровень 2

Вводимые протоколы ориентированы на октеты или биты (H. D. L. C. – High Level Data Link Control, S.D.L.C. – Synchronous Data Link Control). К этому добавляется защита от ошибок, основанная на избыточности. Построенная таким образом последовательность битов называется растром. Здесь мы находим протоколы C. S. M. A. (норма I.S.O. 8802.3) и связи C. C. I. T. T. X25.

1.4.6.4.2.3. Сетевой слой или уровень 3

Он дает средства для установления, поддержки и окончания связей через сеть. Этот уровень знает топографию сети и осуществляет нужные пересылки в промежуточных узлах. Она способен пользоваться услугами публичной сети связи для коммутации пакетов. Он дает команды, позволяющие контролировать переключения (или узлы) контуров, разборку и сборку пакетов. Он контролирует потоки с целью недопущения заторов или пустот, определяет вспомогательные механизмы (возобновление, инициализация).

Информационные пакеты могут следовать все по одному пути (виртуальный канал) или по разным путям (дейтаграмма), что требует приведения их в порядок по прибытии. Здесь мы находим норму C. C. I. T. T. X25 для пакетного протокола.

1.4.6.4.2.4. Верхние слои

Слой "транспорт" – это служба "из конца в конец", обеспечивающая прозрачную передачу данных независимо от используемых физических средств. Он включает в себя:

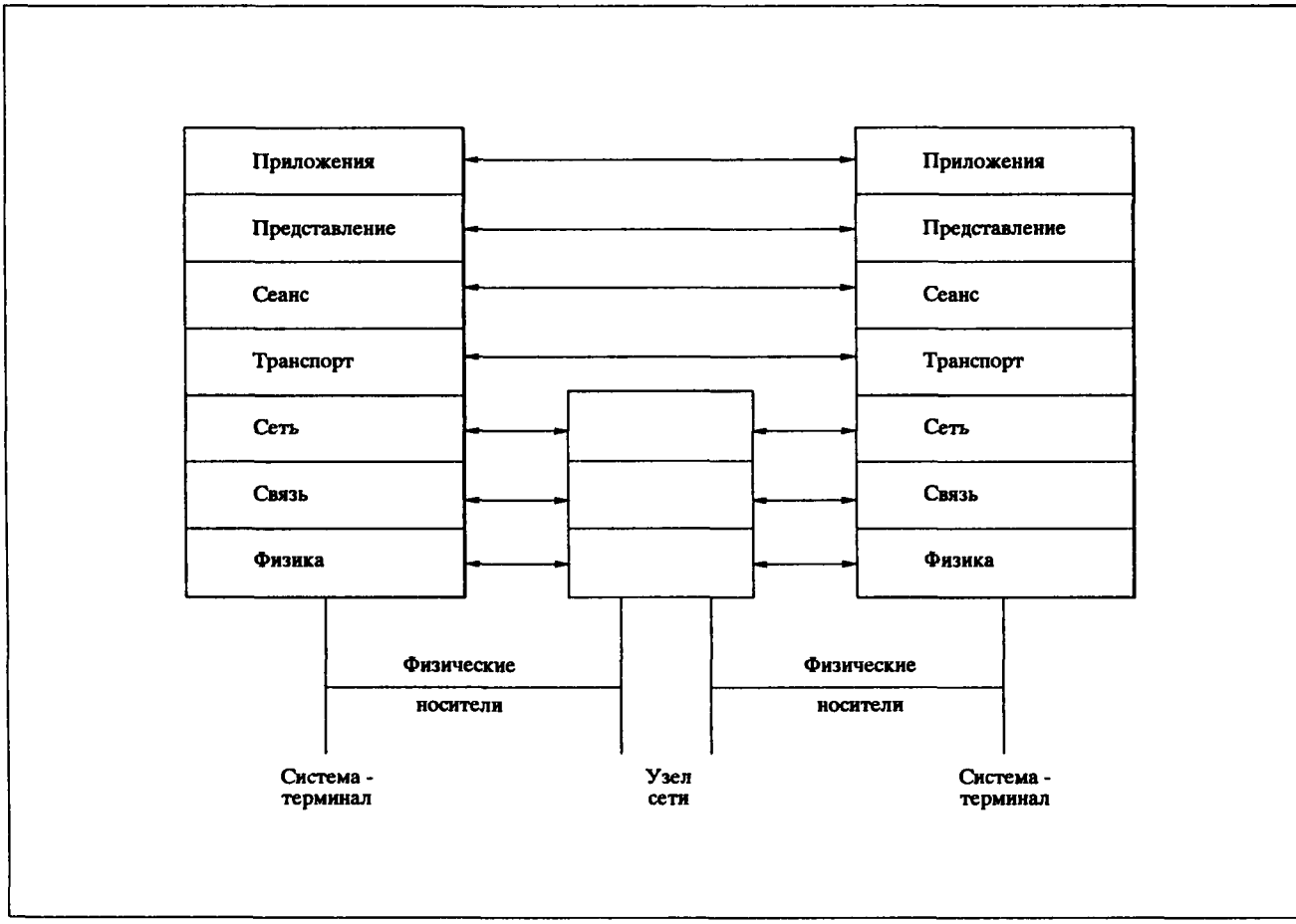
уровень "сеанс", обеспечивающий поставку элементам уровня "представление" средств связи, организацию и синхронизацию диалога;

уровень "представление" поставляет информацию уровню "приложения", решая вопросы синтаксического различия при сохранении семантического содержания;

уровень "приложения" обеспечивает пользователям услуги по предоставлению обмена данными и семантической интерпретации обмениваемых данных.

1.4.6.5. Сети дополнительной ценности

Государственные или частные предприятия стараются связать или объединить свои информационные системы в сети с тем, чтобы воспользоваться таким образом прикладными программами и информацией, имеющими реальную дополнительную ценность. Такие сети позволяют получить доступ как к государственным (Телетекс, Атлас 400 и т.д.), так и к частным (базы данных, профессиональное обслуживание и т.д.) службам.



Функциональные слои модели O. S. I.

1.4.7. Экспертные системы

Искусственный интеллект имеет целью анализ и моделирование поведения человека. Экспертные системы представляют собой один из конкретных аспектов работ, предпринимаемых в этом направлении. Можно также назвать:

— робототехнику,
— автоматический перевод,
— распознавание образов,
— понимание естественного языка.

1.4.7.1. Функциональность экспертных систем

Они являются инструментами, помогающими "переводу экспертизы". В них запоминается часть знаний эксперта, работающего в некоторой четко определенной области, и затем моделируются его рассуждения в самых простых и распространенных случаях.

1.4.7.2. Общая структура

Экспертная система состоит из двух основных составляющих:

— *базы знаний*, в которой запоминаются элементы, данные экспертом,
— программные средства, называемые *механизмом выводов*, которые позволяют соединять указанные экспертом правила так, чтобы получилось логическое рассуждение, автоматически моделирующее консультацию эксперта.

Выгода такого разделения состоит в том, что один и тот же механизм выводов можно использовать для различных приложений, меняя лишь базу знаний.

1.4.7.3. Общие характеристики

Элементы базы знаний формулируются явным образом (на квазиестественном языке). В нее входят:

— *факты*, например, сахар растворяется в кофе;
— *правила*, называемые "правилами вывода", например: если кофе не сладкий, добавить сахара;
— *мета-правила*, т.е. правила использования правил, например, если вы желаете позавтракать, смотрите правила, касающиеся кофе, чая и хлеба.

Рассуждение, проводимое системой с эксплуатацией знаний, должно быть обосновано, например с помощью визуализации используемых правил экспертизы.

Экспертные системы должны позволять работать в областях, мало или плохо поддающихся традиционной информатике, таких как:

— задачи без алгоритмического решения,
— обработка недостаточно надежной информации с помощью присваивания *коэффициента доверия* каждому правилу,
— использование знаний даже в тех случаях, когда данные ненадежны.

Условия, необходимые для построения системы

Они таковы:

— область экспертизы должна быть ограничена,
— должна существовать возможность правильного проведения экспертизы,
— эксперт должен быть полностью в распоряжении создателей системы во время составления базы знаний,
— должна быть обеспечена рентабельность.

Области приложений

Если предварительные условия выполнены, то системы приложений заранее не ограничиваются.

Можно указать:

— помощь в диагностике (в частности, медицинской),
— создание каналов связи,
— прогнозирование,
— планирование, обеспечение и выдача заказов.

1.4.8. Информационная безопасность

В наше время вопросы информационной безопасности касаются большинства предприятий. В самом деле, все возрастающая сложность систем и программных средств, многочисленные возможности доступа, изменения многих каталогов путем единственной операции над данными, все большая зависимость предприятий от их информационных систем привлекают внимание к уязвимости этих систем и заставляют анализировать риск, которому эти системы подвергаются.

Риск может быть вызван самыми различными естественными или искусственными причинами: пожар, сырость, электромагнетизм, отключение электроэнергии, климатизация, случайные или преднамеренные ошибки, злая воля, мошенничество и т.д.

Установка компьютера и его матобеспечения требует, какими бы ни были его параметры, соблюдения ряда правил и внимания к вопросам безопасности.

Задачи, связанные с обеспечением безопасности, можно коротко определить следующим образом.

1.4.8.1. Обеспечить долговременную работу компьютера

Обеспечить долгую жизнь компьютера и, особенно, продолжительность его работы на благо предприятия с помощью мер физической, технической и предусмотренной контрактом безопасности, учитывая следующие пункты.

1.4.8.1.1. Пожар

Использование CO_2 и газа галон, который действует, отделяя кислород от горючего. Галон безвреден для человека, и его свойства пожалуй лучше всего подходят для случая информационных систем.

1.4.8.1.2. Климатизация

Рекомендуемые температура от 18 до 20°C, влажность от 40 до 60%.

1.4.8.1.3. Электричество

Обычный ток не всегда обладает характеристиками, нужными для нормального функционирования информационных систем (колебания напряжения, микропрерывания, отключение, паразитные токи). Если требуется, надо предусмотреть инвертор и вспомогательный генератор.

1.4.8.1.4. Электромагнетизм

Убедиться в отсутствии магнитных полей вблизи установки.

1.4.8.1.5. Защита от воды

Если возможно, предусмотреть легкий наклон пола со стоком.

1.4.8.1.6. План действий и инструкции по безопасности

Существование службы безопасности.

Срочные меры должны касаться защиты персонала и функционирования предприятия.

Определить задачи контроля за безопасностью.

Периодически проверять соблюдение предусмотренных правил.

1.4.8.1.7. Страхование

Выявить риск, не учтенный страхованием.

Этот риск оценивается детальным анализом статей страховых полисов:

— риск, касающийся обрабатываемых материалов,
— затраты на восстановление носителей данных,
— косвенные потери: контракты и рынки, эксплуатация, кражи, хищения, мошенничество.

1.4.8.1.8. Контракты обслуживания

Они касаются информатического оборудования, эксплуатационного матобеспечения, проблемных пакетов, приобретенных в фирмах информатического обслуживания.

Требовать поставки типовых контрактов (обычно контракты стандартны).

Проверять ремонтные процедуры.

Проверять времена ответа.

Предприятие может пожелать иметь свой специфический контракт, составляемый с помощью дополнения к стандартному контракту.

Обслуживание проблемных пакетов: будучи однажды купленным, пакет становится частью матобслуживания, принадлежащего предприятию.

Предусмотреть согласие двух сторон по условиям адаптации и совершенствования прикладного пакета, его обслуживания, неизбежного исправления ошибок, обучения пользователей.

1.4.8.2. Обеспечить наиболее дешевое функционирование и совершенствование системы

Обеспечить наиболее дешевое функционирование системы, предусматривая возможности улучшения ее продуктивности с помощью мер безопасности и охраны.

1.4.8.2.1. Безопасность программ и документации

Картотеки программ и процедур эксплуатации должны быть изолированы в специальных библиотеках.

Для обслуживания и развития приложений должны использоваться другие библиотеки.

Документация должна создаваться по мере развития проекта, возможно с помощью специального матобеспечения.

1.4.8.2.2. Безопасность на уровне приложений

Прикладной продукт должен удовлетворять потребностям, работать безотказно, быть снабженным контролирующими материалами, выполнять обработку в приемлемое время, сопровождаться необходимой документацией, допускать возможность совершенствования, должна быть предложена помощь по его внедрению и освоению.

1.4.8.2.3. Безопасность процедур

Внедрение обработки данных в эксплуатацию должно происходить в наилучших условиях безопасности с помощью процедур, абсолютно ясных пользователю. Меры обслуживания должны подвергаться процедуре проверки с целью анализа сравнительной важности и установления приоритетов.

1.4.8.2.4. Возможности доступа к системе и время ответа

Анализ степени загруженности системы, полученной как отношение реальной продолжительности ее использования, т.е. продолжительности производительной работы + служебных издержек (обслуживание, тесты и т.д.), к времени работы центра.

Измерить времена ответа на различные запросы на интерактивные работы.

1.4.8.2.5. План защиты

1.4.8.2.5.1. План быстрого возобновления работ

Речь идет о последствиях различных инцидентов (авария с компьютером, кондиционированием, отключением электричества, разрушением каталога). Процедуры этого плана позволяют быстро возобновить эксплуатацию.

Копии на магнитных носителях должны храниться в несгораемом шкафу, выдерживающем несколько часов температуру 900°С.

Кроме того, рекомендуется хранить другой экземпляр копий в отдельном помещении.

1.4.8.2.5.2. План "Back up"

Несколько решений:

— соглашение о безопасности между двумя предприятиями,
— контракт с поставщиком "информационной энергии",
— группа "информационной энергии" пользователей,
— компьютер, расположенный в другом помещении, если его можно использовать для решения остановленной из-за действия задачи.

1.4.8.3. Сохранить информацию

Сохранить информацию в активе предприятия, защитив ее от всякого искажения, изменения, неразрешенного извлечения, обеспечить ее конфиденциальность и защиту от любого злого умысла или мошенничества с помощью мер безопасности, связанных с системой эксплуатации и администрацией.

1.4.8.3.1. Надежность системы

Соответствие матобеспечения поставленным целям.

1.4.8.3.2. Нарушение безопасности данных

Безопасность информации до, во время и после обработки (вставки, изменения, разрушение, разглашение данных).

Тестирование на специальных тестовых программах, прежде чем перейти к эксплуатации на реальных данных.

Не использовать легко угадываемых паролей, часто менять их. Регламентировать допуск к документации.

1.4.8.3.3. Безопасность терминалов и оборудования связи

Контроль доступа к терминалу с помощью таких способов как ключи, идентификационные карточки, программы.

Неразрешенное использование терминала в не отведенные для этого часы.

Обнаружение ошибок с помощью контроля четности, избыточности блоков и т.д.

1.4.8.3.4. Меры безопасности, связанные с системой эксплуатации

Широкое применение компьютеров привело к разработке весьма сложных систем эксплуатации, использующих ряд фундаментальных механизмов (мультипрограммирование, мультиобработка, разделение времени, управление работами, управление сетями и т.д.).

Эволюция систем эксплуатации характеризуется в различных работающих сейчас версиях введением все более полных функций безопасности. Защита сети – это дополнение к защите доступов, реализованной в модуле безопасности системы эксплуатации. Эта система отвечает следующим принципиальным критериям.

1.4.8.3.4.1. Произвольно регулируемый доступ

Пользователь определяет права доступа к принадлежащим ему объектам другим указанным им лицам.

1.4.8.3.4.2. Идентификация

Доступ разрешается в зависимости от личности. Идентификация производится с помощью паролей, откуда вытекает важность хорошо управляемой системы паролей.

1.4.8.3.4.3. Система контроля

Она должна записывать все операции, касающиеся данных, подлежащих защите, и позволять выходить на источники этих действий. Эти записи должны быть защищены от попыток изменения и разрушения направленных на сокрытие недозволенных действий.

Управление системой позволяет отобрать и воспроизвести информацию в журнале, включая дату, время, пользователя, тип события, успех или неудачу попытки. Система позволяет установить на каждом файле сигнал тревоги, указывающий файл, к которому кто-либо пытался или имел доступ, способ доступа, использованную привилегию, и то же самое для попыток изменить права доступа к сети.

Сами механизмы защиты должны быть защищены.

Регулярно проверять состояние защитных кодов, используя команды проверки, имеющиеся в системе эксплуатации.

1.4.8.3.4.4. Защита с помощью ограничения привилегий

Привилегии даются пользователям для выполнения их заданий. Они обеспечивают доступ к некоторым командам системы; некоторые привилегии разрешают полный доступ к системе.

1.4.8.3.4.5. Защита сети

Использовать функции, разрешающие доступ к различным узлам сети, таким образом, чтобы пользователю для уменьшения риска перехвата не нужно было проводить свой пароль через сеть.

Установка системы контроля доступа, предусмотренной в системе эксплуатации.

Установка системы шифровки, если необходимо.

1.4.8.3.5. Меры безопасности, связанные с администрацией

1.4.8.3.5.1. Общая организация и информационная политика

Информатика должна внести вклад в достижение целей предприятия людскими и техническими ресурсами, предлагая при этом необходимые меры контроля.

1.4.8.3.5.2. Внутренняя и внешняя проверка безопасности

Эта проверка может иметь несколько форм:

— финансовая проверка информатической функции,
— проверка общей безопасности,
— проверка эксплуатации,
— проверка приложений,
— проверка проектов,
— проверка обслуживания.

1.4.8.3.5.3. Доступ к информационному центру

Доступ в зал информатики возможен только для лиц, которым он разрешен. Используются различные системы, такие как: магнитные идентификационные карточки, электронная логика, клавиатура, на которой набирается персональный код, распознавание голоса или отпечатков. Сигнал в случае попытки вторжения.

1.4.8.3.5.4. Безопасность, связанная с персоналом

Потеря сведений из-за большой текучести персонала.

Контроль за важными печатными материалами.

Предусмотреть беседы между руководителями-информатиками и руководителями кадров.

Проверить наличие данных о *предыдущей деятельности* каждого работника.

До найма на работу проверить предоставленные кандидатом сведения о *предыдущей деятельности.*

1.5. МЕХАНИКА И СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

1.5.1. Введение

Механика изучает поведение материи, движущейся в пространстве и во времени. Основанная Ньютоном классическая механика объединяет фундаментальные физические принципы, на которых покоится теоретическая механика, построенная как множество теорем (подлежащих испытанию опытом).

Механика сплошных сред изучает более специальную проблему влияния сил на материальные деформируемые системы.

1.5.1.1. Классическая механика

1.5.1.1.1. Статика

Тело, рассматриваемое в трехосной системе отсчета, находится в равновесии, если силы являются скользящими векторами, такими, что:

— результирующая множества внешних сил равна нулю: $\sum \vec{F}_i = 0$,
— результирующий момент этих же сил относительно любой точки 0 равен нулю: $\Sigma \vec{\mathfrak{M}}_0(\vec{F}_i) = 0$.

1.5.1.1.2. Кинематика

Одновременность событий, происходящих в каких-либо двух точках A и B, не зависит от системы отсчета, в которой находится наблюдатель: время универсально (принципы относительности Ньютона); это значит, что движущиеся друг относительно друга наблюдатели имеют одинаковое мнение по поводу одновременности событий.

1.5.1.1.3. Динамика

На материальную точку, которая неподвижна или движется прямолинейно и равномерно относительно галилеевой системы координат, не действует никакая сила (принцип относительности Галилея).

Материальная точка массы m движется с ускорением, если на нее действует сила $\vec{F}$:

$$\vec{F} = m\vec{\gamma},$$

$\vec{\gamma}$ – ускорение, и масса точки не зависит от ее движения.

Пусть A и B – две точки во взаимодействии, $\vec{F}_{AB}$ – сила, с которой A действует на B:

$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$ (закон действия и противодействия).

1.5.1.1.4. Экспериментальная идентификация сил

1.5.1.1.4.1. Дистанционные силы

Всемирное тяготение, магнитные и электрические силы.

1.5.1.1.4.2. Контактные силы

Мускульная сила, воздействие инструмента: интуитивное осознание понятия силы.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Силы связи, трение, напряжения, удары, капиллярность и т.д.: объективное познание = экспериментальная наука.

1.5.1.2. Механика сплошных сред

Для каждого изучаемого тела основные законы физики определяют величины, позволяющие выразить деформации и скорости деформаций через напряжения, время и температуру.

Они позволяют выделить несколько областей механики, опираясь на классификацию тел по их свойствам:

— механика жидкостей: несжимаемых (гидродинамика) или сжимаемых; давление, вязкость,турбулентные явления, ударные волны,
— сопротивление материалов: изучение напряженного состояния твердых тел, изотропных или нет, упругих или нет,
— механика грунтов,
— реология: сложные среды.

1.5.2. Векторная геометрия

В декартовой системе отсчета точка M задается вектором $\overrightarrow{OM}$ с координатами X, Y, Z. Начало координат есть O, базис $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$. Скорость точки M – это:

$$\vec{V} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}.$$

1.5.2.1. Скалярное произведение двух векторов (число)

$$\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{MN} = |\overrightarrow{AB}| \cdot |\overrightarrow{MN}| \cdot \cos(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{MN}).$$

Примеры:

— работа силы $\vec{F}$ на перемещении $\overrightarrow{MN}$ есть $\vec{F} \cdot \overrightarrow{MN}$.

Если $\overrightarrow{MN} \perp \vec{F}$, работа силы $\vec{F}$ равна нулю;

— мощность: $P = \vec{F} \cdot \vec{V}(M)$;
— циркуляция скорости $\vec{V}$: $\mathscr{C} = \vec{V} \cdot \overrightarrow{MN}$;
— поток вектора через поверхность S с единичной нормалью $\vec{n}$:

$$\Phi = \vec{V} \cdot (S\vec{n}).$$

Плотность потока: $\varphi = \vec{V} \cdot \vec{n}$.

Это может быть расход жидкости через участок плоскости площади S (в $м^3 \cdot с^{-1}$).

1.5.2.2. Векторное произведение двух векторов

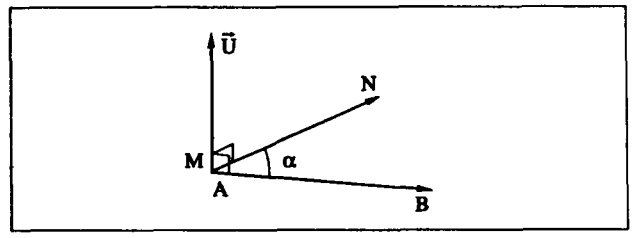
$$\vec{U} = \overrightarrow{AB} \wedge \overrightarrow{MN},$$

$\vec{U}$ есть свободный вектор, перпендикулярный $\overrightarrow{AB}$ и $\overrightarrow{MN}$.

Тройка векторов $(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{MN}, \vec{U})$ – правая, как пальцы правой руки (большой, указательный, средний):

$$|\vec{U}| = |\overrightarrow{AB}| \cdot |\overrightarrow{MN}| \cdot \sin(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{MN})$$

$$\vec{U} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a & b & c \\ m & n & p \end{vmatrix}$$



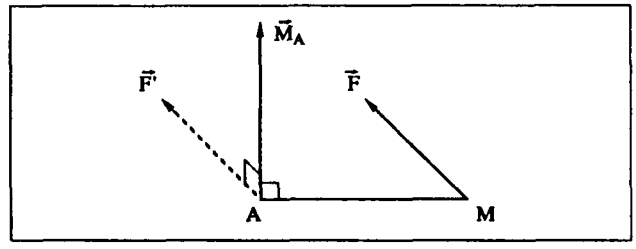
Примеры::

— момент силы $\vec{F}$, проходящей через точку M, относительно точки A:

$$\vec{\mathfrak{M}}_A = \overrightarrow{AM} \wedge \vec{F}.$$

Замечание: относительно точки B:

$$\vec{\mathfrak{M}}_B = \overrightarrow{BA} \wedge \vec{F} + \vec{\mathfrak{M}}_A.$$



— кинетический момент относительно точки O:

$$\vec{\sigma}_O = \overrightarrow{OM} \wedge (m\vec{V}) = m(\overrightarrow{OM} \wedge \vec{V})$$

($m\vec{V}$ называется количеством движения);

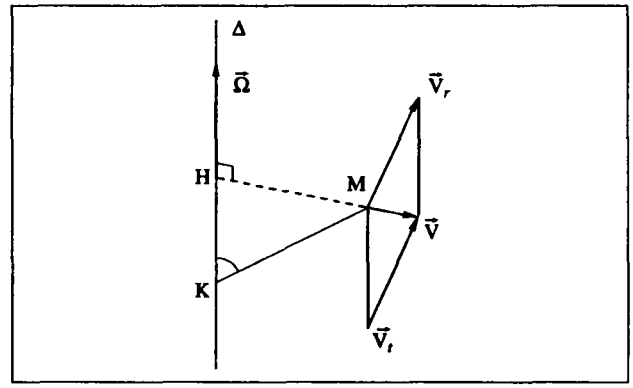
— вращательная составляющая $\vec{V}_r$ скорости подвижной точки M относительно оси Δ:

$$\vec{V}_r = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{HM},$$

$\vec{\Omega}$ – вектор угловой скорости вращения.

Отметьте, что $\forall K \in \Delta$:

$$\vec{V}_r = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{KM}.$$



1.5.2.3. Поля

1.5.2.3.1. Скалярное поле

Примеры: давление, температура, масса, потенциальная энергия.

1.5.2.3.2. Векторное поле

В каждой точке M пространства, заданной координатами (X, Y, Z), существует вектор $\vec{A}$, возможно зависящий от времени.

1.5.2.3.3. Силовое поле

Пример: силы $\vec{F}_i$, с которыми море действует на берег.

1.5.2.3.4. Поле скоростей

Примеры:

— скорости каждой капельки моря,

— скорости каждой частицы газа.

Поле обозначается $\vec{A}$, имея в виду $\vec{A}(x, y, z, t)$.

На практике часто говорят просто о векторе $\vec{A}$, для упрощения.

1.5.2.4. Торсор

Пример: силы.

Два закона статики постулируют существование сил $\vec{F}$, представимых скользящими векторами, образующими торсор (динамический винт).

Скорости, ускорения и т.д. – торсоры, определяемые в кинематике. В этом смысле материальная система описывается шестью уравнениями:

$$[\mathfrak{T}] \begin{cases} \vec{R} - \text{результирующая торсора} \\ \mathfrak{M}_O - \text{результирующий момент торсора относительно точки O.} \end{cases}$$

Торсор $[\mathfrak{T}]$ эквивалентен своей результирующей $\vec{R}$ и результирующей своих моментов $\mathfrak{M}_O$.

1.5.3. Теоретическая механика

1.5.3.1. Материальная точка

Это маленькая материальная частица, которая не ориентирована.

1.5.3.1.1. Траектория

Элементарная криволинейная координата $\vec{ds}$ определяется соотношением:

$$m\frac{\vec{d^2s}}{dt^2} = \vec{F}$$

или

$$m\vec{\gamma} = \vec{F};$$

прямолинейное движение, $m\frac{d^2x}{dt^2} = F_x$,

плоское движение: $\begin{cases} m\frac{d^2x}{dt^2} = F_x \\ m\frac{d^2y}{dt^2} = F_y \end{cases}$

Ускорение $\vec{\gamma}$ разлагается на:

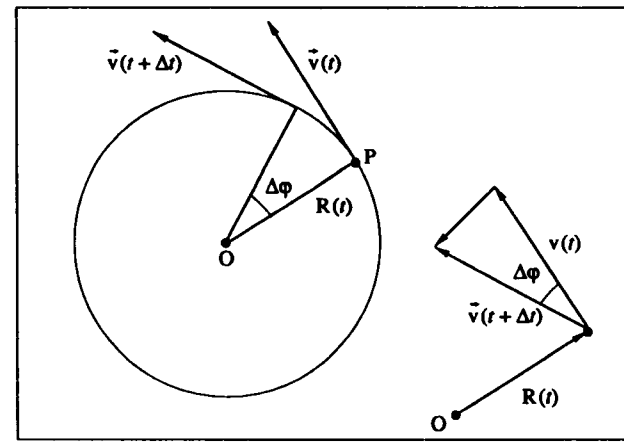
— тангенциальное (касательное к траектории) ускорение:

$$\gamma_t = \frac{d}{dt}V = \frac{d^2s}{dt^2}$$

— нормальное центростремительное ускорение:

$$\gamma_n = \frac{V^2}{R},$$

где R – радиус кривизны соприкасающейся к траектории окружности (траектория, вообще говоря, пространственная), γ_n направлено к центру кривизны.

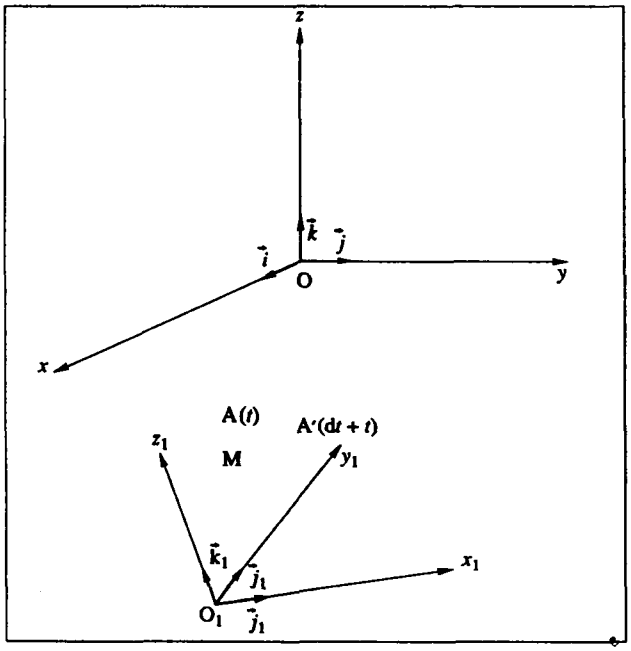


Центростремительное ускорение.

Центростремительная сила $m\frac{V^2}{R} = F_n$ – это воздействие внешней среды на движущуюся точку (которое позволяет ей вращаться).

Центробежная сила есть сила, которую ощущает наблюдатель, например, в автомобиле при вираже, согласно принципу Даламбера, ее называют силой инерции: $\vec{F}_c = -\vec{F}_n$.

1.5.3.1.2. Относительное движение



Очевидность только кажущаяся. На самом деле, следующие ниже теоремы вытекают из принципа универсальности времени, примененного к различным системам отсчета.

Система отсчета O предполагается неподвижной, а система отсчета O_1 – подвижной.

Пример: парковый аттракцион, состоящий из вращающейся платформы и подвижных стрел, на концах которых закреплено по самолету.

$Oxyz$ – площадь в парке,

$O_1x_1y_1z_1$ – платформа, она вращается (скорость переменная),

A – ребенок, сидящий в самолете (круговое переменное движение).

Будем рассматривать:

— точку пространства M, фиксированную относительно $O_1x_1y_1z_1$ и совпадающую с A только в момент t,
— вектор $\overrightarrow{O_1M}$ фиксированной длины (на твердой платформе)
— и $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OO_1} + \overrightarrow{O_1M}$.

1.5.3.1.2.1. Анализ скоростей

1.5.3.1.2.1.1. Переносная скорость

(скорость платформы относительно земли)

$$\vec{V}_e = \left(\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\right)_O = \frac{d\overrightarrow{OO_1}}{dt} + \frac{d\overrightarrow{O_1M}}{dt}.$$

Замечание:

Платформа вращается. O_1 – какая-либо фиксированная точка на оси вращения:

$\frac{d\overrightarrow{O_1M}}{dt}$ – вращательная составляющая M;

$$\frac{d\overrightarrow{O_1M}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O_1M} = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O_1A}$$

Ω – угловая скорость вращения любой точки платформы.

Платформа не совершает поступательного движения и

$$\frac{d\overrightarrow{OO_1}}{dt} = 0,$$

но в общем случае:

$\frac{d\overrightarrow{OO_1}}{dt}$ есть скорость поступательного движения (система отсчета перемещается параллельно сама себе); кроме того, в общем случае $\vec{\Omega}$ не имеет постоянного направления.

1.5.3.1.2.1.2. Относительная скорость

Скорость самолета относительно платформы:

$$\vec{V}_r = \left(\frac{d\overrightarrow{O_1A}}{dt}\right)_{O_1} \text{ в системе } O_1x_1y_1z_1$$

$$= \frac{\overrightarrow{AA'}}{dt} = \frac{\overrightarrow{MA'} - \overrightarrow{MA}}{dt} = \frac{d\overrightarrow{MA}}{dt}.$$

Вектор $\overrightarrow{AA'}$ не зависит от системы отсчета.

1.5.3.1.2.1.3. Абсолютная скорость (относительно земли)

$$\overrightarrow{OA} = \overrightarrow{OO_1} + \overrightarrow{O_1M} + \overrightarrow{MA}$$

$$\vec{V}_a = \frac{d\overrightarrow{OA}}{dt} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} + \frac{d\overrightarrow{MA}}{dt}.$$

Теорема сложения скоростей:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_e + \vec{V}_r$$

1.5.3.1.2.2. Произвольный вектор $\overrightarrow{AB}$

"Относительная" производная вектора

Неважно, что представляет вектор $\overrightarrow{AB}$ (сила и т.д.):

$$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{OB} - \overrightarrow{OA}$$

С другой стороны,

$$\left(\frac{d\overrightarrow{OA}}{dt}\right)_O = \left(\frac{d\overrightarrow{OO_1}}{dt}\right)_O + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O_1A} + \left(\frac{d\overrightarrow{O_1A}}{dt}\right)_{O_1}$$

и так же для $\overrightarrow{OB}$.

Отсюда теоремы:

$$\left(\frac{d\overrightarrow{AB}}{dt}\right)_O = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{AB} + \left(\frac{d\overrightarrow{AB}}{dt}\right)_{O_1},$$

в частности

$$\left(\frac{d\vec{\Omega}}{dt}\right)_O = \left(\frac{d\vec{\Omega}}{dt}\right)_{O_1}.$$

1.5.3.1.2.3. Разложение ускорений

Для правильной идентификации слагаемых в сложном выражении, которое будет выписано ниже, заметим, что относительное ускорение – это, очевидно,

$$\vec{\gamma}_r = \left(\frac{d^2\overrightarrow{MA}}{dt^2}\right)_{O_1} = \left(\frac{d^2\overrightarrow{O_1A}}{dt^2}\right)_{O_1}$$

и что в случае, когда оно и относительная скорость обращаются в ноль, остается только переносное движение.

Отделяя поступательную часть переносного движения (скорость $(\frac{d\overrightarrow{OO_1}}{dt})_O$) в выражении для абсолютной скорости, получим:

$$\vec{V}_a = (\frac{d\overrightarrow{OO_1}}{dt})_O + \left[\vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O_1A} + (\frac{d\overrightarrow{O_1A}}{dt})_{O_1}\right].$$

С помощью предшествующих теорем находим далее:

$$\vec{\gamma}_a = (\frac{d\vec{V}_a}{dt})_O = \left(\frac{d^2\overrightarrow{OO_1}}{dt^2}\right)_O + \left[\frac{d}{dt}(\vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O_1A})_{O_1} +$$

$$+ \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O_1A})\right] + \left[\left(\frac{d^2\overrightarrow{O_1A}}{dt^2}\right)_{O_1} + \vec{\Omega} \wedge \left(\frac{d^2\overrightarrow{O_1A}}{dt}\right)_{O_1}\right],$$

т.е.

$$\vec{\gamma}_a = \left[\left(\frac{d^2\overrightarrow{OO_1}}{dt^2}\right)_O + (\frac{d\vec{\Omega}}{dt})_O \wedge \overrightarrow{O_1A} + \right.$$

$$\left. + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O_1A})\right] + \vec{\gamma}_r + 2\vec{\Omega} \wedge \vec{V}_r.$$

Теорема ускорений:

$$\vec{\gamma}_a = \vec{\gamma}_e + \vec{\gamma}_r + \vec{\gamma}_c,$$

где $\vec{\gamma}_c = 2\vec{\Omega} \wedge \vec{V}_r$ есть ускорение Кориолиса.

1.5.3.1.2.4. Основной принцип динамики в произвольной системе отсчета

Если система отсчета $Oxyz$ инерциальна, то для наблюдателя, находящегося в системе $O_1x_1y_1z_1$, закон динамики принимает вид

$$\vec{F} - m\vec{\gamma}_e - m\vec{\gamma}_c = m\vec{\gamma}_r,$$

где $-m\vec{\gamma}_e$ – переносная сила инерции,

$-m\vec{\gamma}_c$ – кориолисова сила инерции.

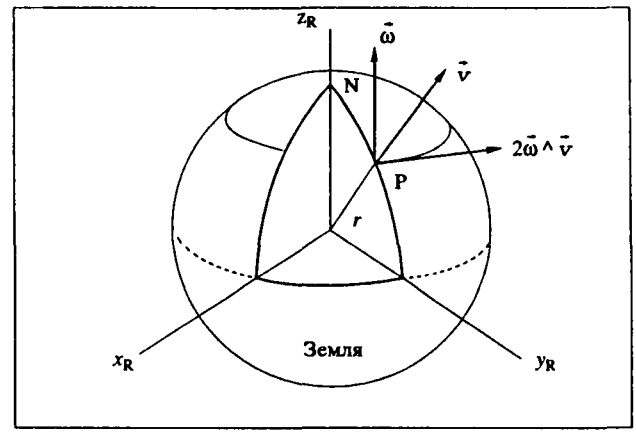
Замечание:

Можно рассматривать $-m\vec{\gamma}_r$ как силу инерции в системе O_1 (принцип Даламбера).

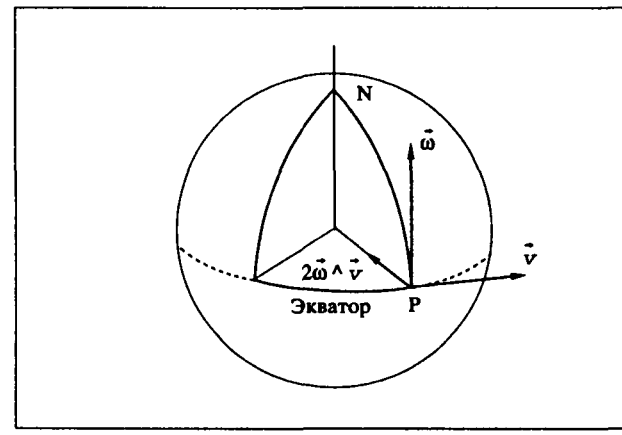
1.5.3.1.3. Другие записи закона для материальной точки

1.5.3.1.3.1. Количество движения

Если обозначить $m\vec{v} = \vec{p}$ количество движения, то $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ (в инерциальной системе отсчета), $\vec{F}dt$ называется импульсом (элементарным).



Пример кориолисова ускорения во вращающейся системе координат: вращающаяся система ($x_Ry_Rz_R$) фиксирована на Земле; $\vec{\omega}$ параллельно z_R. Предмет, брошенный вертикально вверх из точки P на поверхности Земли, имеет начальную скорость $\vec{v}$. Кориолисово ускорение $2\vec{\omega} \wedge \vec{v}$ направлено по касательной к параллели, как показано на рисунке; N – северный полюс. Если бы предмет свободно падал с некоторой высоты над поверхностью Земли, кориолисово ускорение имело бы противоположное направление.



Другой пример кориолисова ускорения: если предмет P, находящийся на экваторе, имеет скорость v (относительно поверхности Земли), направленную по касательной к экватору, то, в дополнение к ускорению силы тяжести, он будет испытывать направленное к центру Земли ускорение величины $2\omega v$.

1.5.3.1.3.2. Кинетический момент

Пусть O – фиксированная точка, M – материальная точка. Обозначим $\overrightarrow{OM} \wedge \vec{p} = \vec{\sigma}_0$ кинетический момент; имеем:

$$\overrightarrow{OM} \wedge \vec{F} = \frac{d\vec{\sigma}_0}{dt} = \vec{\mathfrak{M}}_0(\vec{F}).$$

1.5.3.1.3.3. Кинетическая энергия

Если M смещается на $\vec{v}dt$, то:

$$\vec{F} \cdot \vec{v}dt = m\frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \vec{v}dt = d(\frac{1}{2}mv^2) = dE_c = d\mathcal{E}_F,$$

увеличение кинетической энергии равно работе силы $\vec{F}$.

1.5.3.2. Материальная система

Из принципа действия и противодействия $[\vec{F}_i] = 0$ вытекает, что торсор внутренних сил системы равен нулю.

1.5.3.2.1. Центр тяжести, или центр инерции, или барицентр

G таково, что $\sum m_i \overrightarrow{GM}_i = 0$

или $\overrightarrow{MOG} = \sum m_i \overrightarrow{OM}_i$, $\forall O$,

где $M = \sum m_i$ = полная масса системы.

1.5.3.2.2. Теорема о движении центра инерции

Дифференцируя, имеем: $\overrightarrow{MV}_G = \sum m_i \vec{v}_i$

и

$$M\frac{d\vec{V}_G}{dt} = \sum \frac{d\vec{P}_i}{dt},$$

откуда:

$$\frac{d\vec{P}_G}{dt} = \sum \vec{F}_{i\ внеш} = M\frac{d\vec{V}_G}{dt}.$$

Центр инерции системы движется так, как движется точка, имеющая полную массу системы, под действием результирующей внешних сил.

1.5.3.2.3. Теорема о кинетическом моменте

$$\vec{\sigma}_0 = \sum \overrightarrow{OM}_i \wedge m_i \vec{v}_i,$$

где O фиксировано в инерциальной системе, следовательно:

$$\frac{d\vec{\sigma}_0}{dt} = \sum \overrightarrow{OM}_i \wedge m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum \vec{\mathfrak{M}}_0(\vec{F}_{i\ внеш}).$$

Эта теорема касается "вращательного" аспекта движения системы.

1.5.3.2.4. Теорема о кинетическом моменте относительно G

$$\vec{\sigma}_0 = \sum \overrightarrow{OG} \wedge m_i \vec{v}_i + \sum \overrightarrow{GM}_i \wedge m_i \vec{v}_i.$$

$\vec{\sigma}_0 = \overrightarrow{MOG} \wedge \vec{V}_G + \vec{\sigma}_G$ – 1-ая теорема Кенига.

Но

$$\sum \overrightarrow{OM}_i \wedge \vec{F}_i = \sum \overrightarrow{OG} \wedge \vec{F}_i + \sum \overrightarrow{GM}_i \wedge \vec{F}_i$$

и

$$\frac{d\vec{\sigma}_0}{dt} = \overrightarrow{OG} \wedge M\frac{d\vec{V}_G}{dt} + \frac{d\vec{\sigma}_G}{dt},$$

откуда

$$\frac{d\vec{\sigma}_G}{dt} = \sum \vec{\mathfrak{M}}_G(\vec{F}_{i\ внеш}).$$

Эта теорема характеризует движение вокруг центра тяжести, т.е. по отношению к барицентрической неинерциальной системе отсчета: оси проходят через G и остаются параллельными самим себе.

1.5.3.2.5. Теорема кинетической энергии

$$d\mathcal{E}_i = \vec{F}_i \vec{v}_i dt = m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} \cdot \vec{v}_i dt = d\left(\frac{1}{2} m_i v_i^2\right),$$

откуда:

$$\Delta E_к = \mathcal{E}_{внеш} + \mathcal{E}_{внутр} + \mathcal{E}_{связей}$$

Увеличение кинетической энергии системы равно сумме работ внешних и внутренних сил (всех сил, приложенных к системе).

В неинерциальной системе (скорости $\vec{v}_i$ вычислены в неинерциальной системе) надо учитывать работу переносных сил инерции; кориолисова сила инерции $-2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_r$ всегда перпендикулярная движению, не работает; поэтому для каждой точки имеем:

$$\vec{F}_i = m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = m_i\vec{\gamma}_e + m_i\vec{\gamma}_r + m_i\vec{\gamma}_c$$

$$\vec{F}_i - \vec{F}_{ie} - \vec{F}_{ic} = m_i \frac{d\vec{V}_r}{dt}$$

$$(\vec{F} - \vec{F}_{ie}) \cdot \vec{V}_r dt = m_i \vec{V}_r \cdot d\vec{V}_r$$

$$d\mathcal{E}_{ir} + d\mathcal{E}_{ie} = d\left(\frac{1}{2} m_i V_i^2\right),$$

что следует просуммировать по всем точкам, полагая $d\mathcal{E}_{ie} = -\vec{F}_{ie}\vec{V}_r dt$ – работа переносных сил инерции.

Различают работу обратимых внутренних сил и работу внутренних сил трения, т.к. последние всегда направлены противоположно создающему их движению. Эта работа отрицательна; она рассеивается в тепло.

1.5.3.2.6. 2-ая теорема Кенига

Если подвижная система отсчета барицентрична (движется поступательно, оси проходят через G), то:

$$E_k = \frac{1}{2} M V_G^2 + \sum \frac{1}{2} m_i V_{ir}^2$$

Кинетическая энергия системы равна кинетической энергии поступательного движения полной массы, увеличенной на кинетическую энергию движения вокруг центра массы.

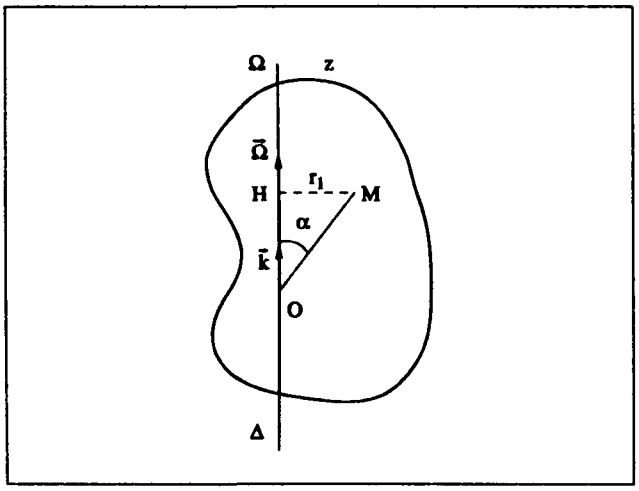
1.5.3.2.7. Теорема мощностей

Мощность определяется как $W = \frac{d\mathcal{E}}{dt}$ (работа в единицу времени), поэтому

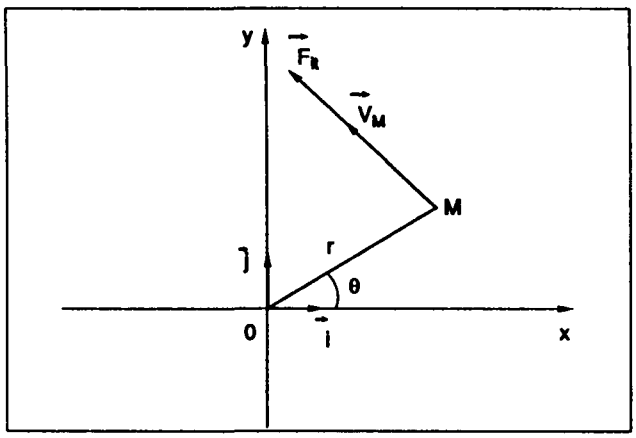
$$W_k = W_{внеш} + W_{внут} + W_{связей} =$$

= кинетическая мощность.

1.5.3.3. Вращение твердого тела вокруг оси



Вид в плоскости zOM.



Вид сверху.

$\vec{k}$ – единичный вектор на прямой Δ; $\vec{\Omega} = \Omega\vec{k}$.

$$\vec{V}_M = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{OM} = \Omega(\vec{k} \wedge \overrightarrow{OM}) = \Omega(\vec{k} \wedge \overrightarrow{HM}) |\vec{k} \wedge \overrightarrow{OM}| = OM,$$

$$\sin\alpha = HM = r_i,$$

$$V_M = r_i\Omega = r_i\frac{d\theta}{dt}.$$

1.5.3.3.1. Момент инерции вращения

Для "точки" M массы m_i:

$$\vec{\sigma}_{0i} = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{V}_M m_i = (\overrightarrow{OH} \wedge \vec{V}_M + \overrightarrow{HM} \wedge \vec{V}_M) m_i.$$

Рассмотрим проекцию этого вектора на ось $\overrightarrow{Oz}$:

$$\vec{\sigma}_{\Delta i} = \vec{k} \cdot \vec{\sigma}_{0i} = \vec{k} \cdot (\overrightarrow{HM} \wedge \vec{V}_M) m_i = m_i r_i V_M = m_i \Omega r_i^2$$

– кинетический момент относительно Δ.

Для всего твердого тела:

$$\sigma_\Delta = J_\Delta\Omega, \text{ где } J_\Delta = \sum m_i r_i^2 = \iiint_R r^2 dm$$

J_Δ – момент инерции относительно Δ.

1.5.3.3.2. Пара вращения

Если вместо $\vec{V}_M$ рассмотреть $\vec{F}_M$, получим аналогично составляющую $\vec{\mathfrak{M}}_0$ на $\overrightarrow{Oz}$ (или Δ):

$$\sum \vec{k} \cdot \vec{\mathfrak{M}}_0(\vec{F}_M) = \sum \mathfrak{M}_\Delta(\vec{F}_M),$$

где сумма распространена на все твердое тело. Момент относительно Δ, или пара, это:

$$\mathfrak{M}_\Delta = \sum r_i F_{t_i},$$

$\vec{F}_{t_i}$ – составляющая, параллельная $\vec{V}_M$ (касательная), откуда

$$\mathfrak{M}_\Delta = J_\Delta\frac{d\Omega}{dt} = J_\Delta\frac{d^2\theta}{dt^2} \text{ – пара вращения.}$$

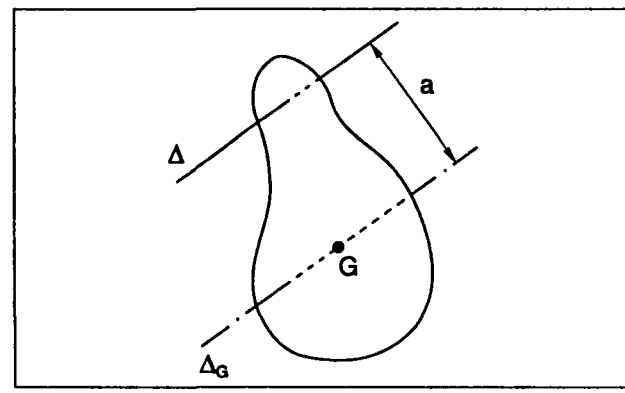
Следствие: если пара вращения равна нулю, тело находится в равномерном вращательном движении.

$$\mathfrak{M}_\Delta = \vec{k} \cdot \vec{\mathfrak{M}}_0$$

также называется динамическим моментом.

1.5.3.3.3. Теорема Гюйгенса

Пусть Δ_G – ось, параллельная оси Δ и проходящая через центр тяжести G на расстоянии *a* от нее. Тогда $J_\Delta = J_G + Ma^2$. Следовательно, J_G минимально.



1.5.3.3.4. Количество движения

$$\sum \vec{F}_i = \sum m_i\frac{d\vec{V}_M}{dt} = \sum m_i\left[\frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \overrightarrow{OM} + \vec{\Omega} \wedge \vec{V}_M\right].$$

Если скорость вращения постоянна, то

$$\sum \vec{F}_i = \sum m_i(\vec{\Omega} \wedge \vec{V}_M) = -\Omega^2 \sum m_i \vec{r}_i.$$

Результирующая центробежных сил есть вектор $\Omega^2 \sum m_i \vec{r}_i$.

При уравновешивании ротора, коленчатого вала:

— статическое уравновешивание (без вынужденного вращения) позволяет определить значение массы m, которую следует поместить на некотором расстоянии r от оси и найти плоскость, проходящую через Δ, в которой лежит вектор $\Omega^2\sum m_i\vec{r}_i$ (черновое уравновешивание);

— динамическое уравновешивание позволяет определить перпендикулярную оси Δ плоскость, содержащую вектор $\Omega^2\sum m_i\vec{r}_i$, зная два вектора реакции на подшипники уравновешивающего механизма; оно позволяет также уточнить массу m в силу высокой чувствительности метода (Ω^2).

1.5.3.3.5. Кинетическая энергия вращения

$$dE_c = \sum m_i d\vec{V}_M \cdot \vec{V}_M = \sum m_i\vec{\gamma}_i \cdot \vec{V}_M dt =$$

$$= \sum m_i r_i^2 d\Omega \cdot \Omega = d\left(\frac{1}{2}J_\Delta\Omega^2\right).$$

1.5.3.3.6. Работа сил, действующих на твердое тело

$$\delta\mathscr{E} = \sum\vec{F}_M \cdot \vec{V}_M dt$$

или, для любой другой точки P тела:

$$\vec{V}_M = \vec{V}_p + \vec{\Omega}\wedge\overrightarrow{PM},$$

$$\delta\mathscr{E} = \sum\vec{F}_M \cdot (\vec{V}_p + \vec{\Omega}\wedge\overrightarrow{PM})\,dt =$$

$$= \vec{V}_p \cdot \sum\vec{F}_M dt + \vec{\Omega} \cdot \sum(\overrightarrow{PM}\wedge\vec{F}_M)\,dt,$$

и, по свойствам смешанного произведения:

$$\delta\mathscr{E} = (\vec{V}_p \cdot \vec{R} + \vec{\Omega} \cdot \vec{\mathfrak{M}}_p)dt.$$

Торсор внутренних сил равен нулю: он не работает в твердом теле.

Если торсор сил сводится к паре, $\vec{R} = 0$ и:

$$\delta\mathscr{E} = \vec{\Omega} \cdot \vec{\mathfrak{M}}dt = \mathfrak{M}_\Delta d\theta,$$

$$\delta\mathscr{E} = C d\theta$$

и мощность

$$\mathscr{P} = C\Omega$$

1.5.3.4. Потенциальная энергия и механическая энергия

Когда работа силы $\vec{F}$ между двумя удаленными моментами времени t_1 и t_2 зависит только от состояний в точках $A(t_1)$ и $B(t_2)$, говорят, что поле $\vec{F}$ потенциально.

Таким образом:

$$\delta\mathscr{E} = \vec{F} \cdot \vec{v}dt = F_x dx + F_y dy + F_z dz = d\mathscr{E} = -dU$$

– полный дифференциал функции $U(x, y, z)$, который не должен зависеть от времени.

$$\vec{F} = -\operatorname{grad} U = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z}\vec{k}\right),$$

и:

$$\mathscr{E}_A^B = U_A - U_B.$$

В частности, работа вдоль замкнутого контура равна нулю:

$$\int\vec{F} \cdot d\vec{M} = 0$$

(не так, как в случае сил трения).

Чтобы это было верно, должно выполняться условие $\operatorname{rot}\vec{F} = 0$.

1.5.3.4.1. Потенциальная энергия системы

Пусть дана система, в которой внутренние силы потенциальны:

$$d\mathscr{E}_{внут} = -dU = -dE_p,$$

$E_p = U + \text{const}$ – потенциальная энергия.

1.5.3.4.2. Обратимое преобразование

Скорости весьма малы, внутренние силы потенциальны, каждое промежуточное состояние есть равновесие. Тогда, рассматривая силы связи как внешние силы, имеем:

$\vec{f}_{внут} + \vec{f}_{внеш} = 0$ для всякой точки M,

откуда $d\mathscr{E}_{внеш} = dE_p$: работа внешних сил полностью "восстановима".

Примеры:

— пружина $E_p = \frac{1}{2}kx^2$,,

x – удлинение, k – жесткость;

— пружина, работающая на кручение: $E_p = \frac{1}{2}C\theta^2$;

— сила тяжести: $E_p = mgz + \text{const}$;

— центральная сила: $\vec{F}$ проходит через фиксированную точку,

$$|\vec{F}| = f(r) \quad \text{и} \quad E_p = \int f(r)dr.$$

1.5.3.4.3. Механическая энергия системы

$$dE_c = d\mathscr{E}_{внут} + d\mathscr{E}_{внеш}$$

$$d(E_c + E_p) = d\mathscr{E}_{внеш}$$

$E = E_c + E_p$ – механическая энергия.

Если система изолирована: $E = \text{const}$; потенциальные силы называются *консервативными*.

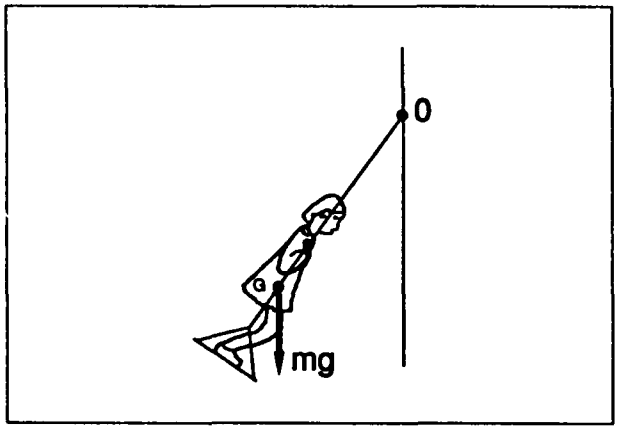
1.5.3.4.4. Потенциал, зависящий от времени

Пример: ребенок на качелях (маятник). Трением пренебрегаем:

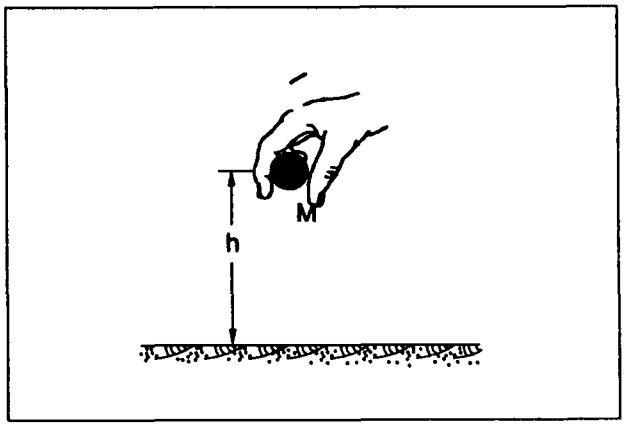
$E_p = mga(1 - \cos\theta)$, $a = OG$;

если $OG = \text{const}$, колебания периодичны, но меняя OG (a – переменно), можно изменять колебания.

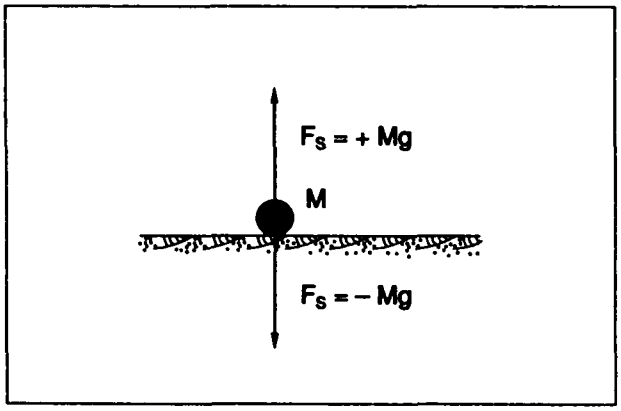
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



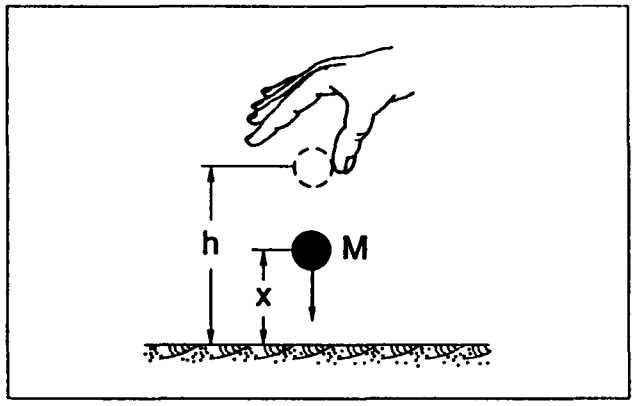
Маятник.



Работа, затраченная на поднятие M на высоту h, есть: W = = F · h = +Mgh. Потенциальная энергия массы M увеличилась поэтому на Mgh.



На массу M, находящуюся в покое на поверхности земли, действуют две равные и противоположные силы: F_G – гравитационная притягивающая сила, F_s – сила воздействия на M поверхности земли.



Если отпустить массу, потенциальная энергия U уменьшится, а кинетическая энергия увеличится, но их сумма останется постоянной на высоте x:

$$U(x) = Mgx$$

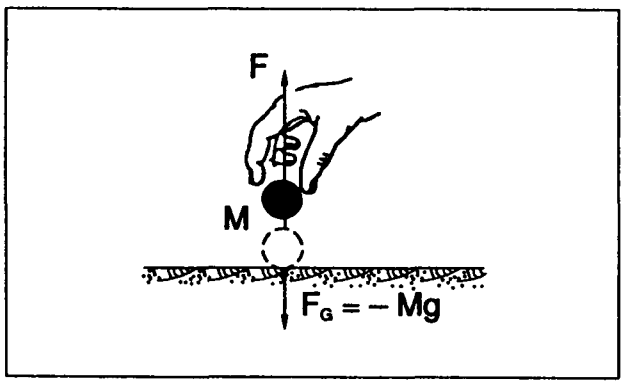
и

$$K(x) = \frac{1}{2}Mv^2(x) = Mg(h-x),$$

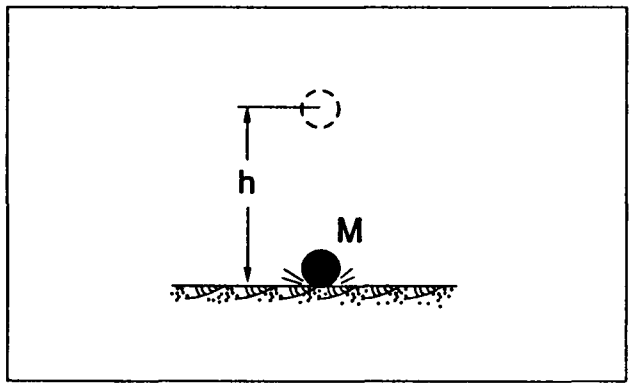
$$v(x) = \sqrt{2g(h-x)},$$

а на земле:

$$x = 0,\ v = \sqrt{2gh}.$$



Чтобы поднять M с постоянной скоростью, надо приложить силу F = +Mg.



Непосредственно перед касанием массы с землей вся потенциальная энергия, которую масса имела на высоте h, превратилась в кинетическую энергию.

1.5.3.4.5. Устойчивое равновесие

Устойчивое положение равновесия соответствует минимуму потенциальной энергии.

1.5.3.4.6. Первый интеграл движения

В случае наличия потенциала, можно сказать, что имеется первое интегрирование (ср. § 1.5.3.4).

1.5.3.5. Изолированные системы

Внешние силы отсутствуют.

1.5.3.5.1. Сохранение количества движения

$$M\vec{V}_g = \sum m_i \vec{V}_i = \text{const}.$$

Пример: отдача огнестрельного оружия

$\vec{V}_1$ – оружие

$\vec{V}_2$ – снаряд

$$M_1\vec{V}_1 + M_2\vec{V}_2 = 0.$$

Ракета:

В момент t ракета массы m движется со скоростью $\vec{V}$ в течение интервала времени dt, происходит истечение массы dm газа со скоростью $\vec{V}_2$, оставшаяся часть массы $(m - dm)$ движется со скоростью $\vec{V} + d\vec{V}$:

$$(m - dm)(\vec{V} + d\vec{V}) + dm \cdot \vec{V}_2 = m\vec{V},$$

откуда

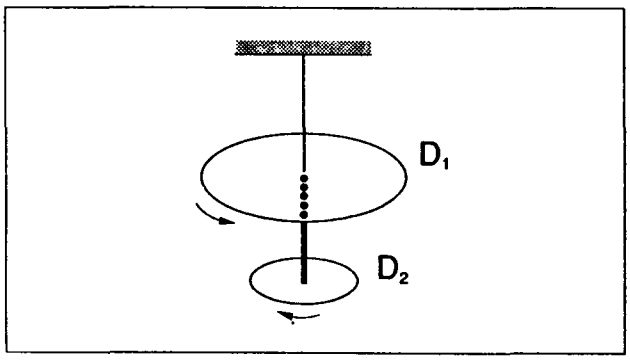
$$md\vec{V} = (\vec{V} - \vec{V}_2)dm.$$

1.5.3.5.2. Сохранение кинетического момента

Изолированная система состоит из вращающихся (под действием внутренних сил) частиц, и $\sum J_i\Omega_i = \text{const}$ относительно одной и той же оси.

Пример: два диска связаны упругой лентой, и все это вместе подвешено на нити без кручения. Лента предварительно закручена. Как только диски освобождены:

$$\vec{\Omega}_1 = -\frac{J_2}{J_1}\Omega_2.$$

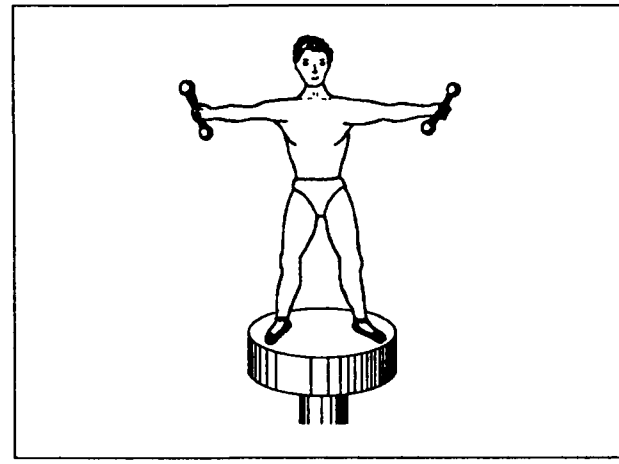


В системе с переменной геометрией, вращающейся вокруг фиксированной оси, имеем:

$$J\vec{\Omega} = \text{const}.$$

Пример: конькобежец-фигурист вращается вокруг своей оси с разведенными в стороны руками. Если он вытянет руки вдоль тела, скорость его вращения увеличится и наоборот:

$$J_2\vec{\Omega}_2 = J_1\Omega_1.$$



Пример: введем в соприкосновение два параллельных диска, один из которых покоится (№ 2), а второй вращается с угловой скоростью $\vec{\Omega}_0$. Получим:

$$(J_1 + J_2)\vec{\Omega} = J_1\vec{\Omega}_0.$$

1.5.3.5.3. Удары

Пусть две массы с центрами тяжести A и B имеют скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ до удара, $\vec{v}_1'$ и $\vec{v}_2'$ после удара. Пусть G – центр тяжести системы из этих двух масс; имеем:

$$m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2' = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{V}_G$$

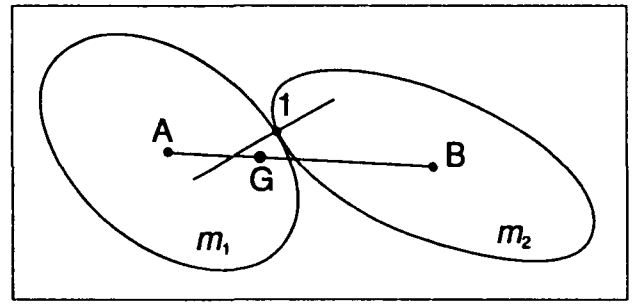
для количеств движения.

Имеем также:

$$m_1\overrightarrow{GA} \wedge (\vec{v}_1' - \vec{v}_1) + m_2\overrightarrow{GB} \wedge (\vec{v}_2' - \vec{v}_2) +$$

$$+ J_1(\vec{\Omega}_1' - \vec{\Omega}_1) + J_2(\vec{\Omega}_2' - \vec{\Omega}_2) = 0$$

для кинетического момента системы, вращения рассматриваются по отношению к центрам тяжести A и B.



В два уравнения входят четыре неизвестных вектора. Следовательно, надо уточнить, как именно происходит удар.

1.5.3.6. Удар двух тел

1.5.3.6.1. Импульс силы

Пусть $\vec{F}(t)$ – контактная сила, с которой тело B действует на тело A, другие силы пренебрежимы.

$$\int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(t)\,dt = \vec{P} \text{ – импульс силы.}$$

Имеем

$$\vec{P} = m_1(\vec{v}_1' - \vec{v}_1)$$

и

$$\Delta\vec{\mathfrak{M}}_0(\vec{P}) = \Delta\vec{\sigma}_0 = \overrightarrow{OA} \wedge (\vec{v}_1' - \vec{v}_1) + J_1(\vec{\Omega}_1' - \vec{\Omega}_1).$$

1.5.3.6.2. Абсолютно неупругий удар

Оба тела остаются соединенными вместе после удара. Сохраняются: количество движения

$$(m_1 + m_2)\vec{V}_G = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2,$$

кинетический момент

$$J\vec{\Omega}_G = m_1\overrightarrow{GA} \wedge \vec{v}_1 + m_1\overrightarrow{GA} \wedge \vec{v}_2 + J_1\vec{\Omega}_1 + J_2\vec{\Omega}_2.$$

J – момент инерции совокупности двух тел по отношению к ее центру тяжести.

Не сохраняется кинетическая энергия:

$$\Delta E_c = \left[\frac{1}{2}(m_1 + m_2)V_G^2 + \frac{1}{2}J\Omega_G^2\right] - \left[\frac{1}{2}(m_1v_1^2 + m_2v_2^2) + \frac{1}{2}(J_1\Omega_1^2 + J_2\Omega_2^2)\right].$$

Если нет вращения, потеря кинетической энергии равна

$$\frac{1}{2}\frac{m_1m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)^2.$$

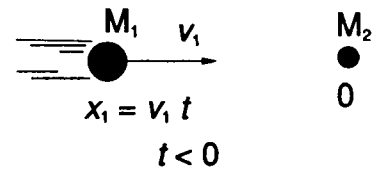
Она переходит в тепло.

Пример: свинцовая пуля расплющивается о стену ($m_2 = \infty$, $v_2 = 0$). Энергия пули $\frac{1}{2}m_1v_1^2$ теряется и превращается в тепло. Пуля плавится.

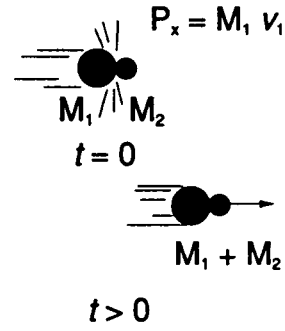
1.5.3.6.3. Абсолютно упругий удар

$\vec{P}$ производит работу по деформированию A, равную потенциальной энергии, которая восстанавливается из кинетической энергии:

$$m_1(v_1'^2 - v_1^2) + m_2(v_2'^2 - v_2^2) + J_1(\Omega_1'^2 - \Omega_1^2) + J_2(\Omega_2'^2 - \Omega_2^2) = 0.$$

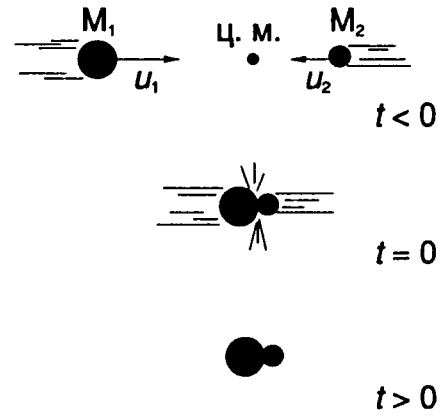


Даже при неупругом столкновении количество движения должно сохраняться. Рассмотрим столкновение, в котором частицы остаются соединенными.
До удара
$p_x = M_1v_1$



После удара:
$p_x = M_1v_1 = (M_1 + M_2)v$
или

$$v = \frac{M_1v_1}{M_1 + M_2} < v_1$$



В системе отсчета центра масс, скорости M_1 и M_2 до столкновения – это u_1 и u_2. После столкновения (M_1 + + M_2) находится в покое.

1.5.3.6.3.1. Удар двух частиц или "фронтальный" удар

Имеем:

$$\begin{cases} m_1(v_1' - v_1) + m_2(v_2' - v_2) = 0 \\ m_1(v_1'^2 - v_1^2) + m_2(v_2'^2 - v_2^2) = 0, \end{cases}$$

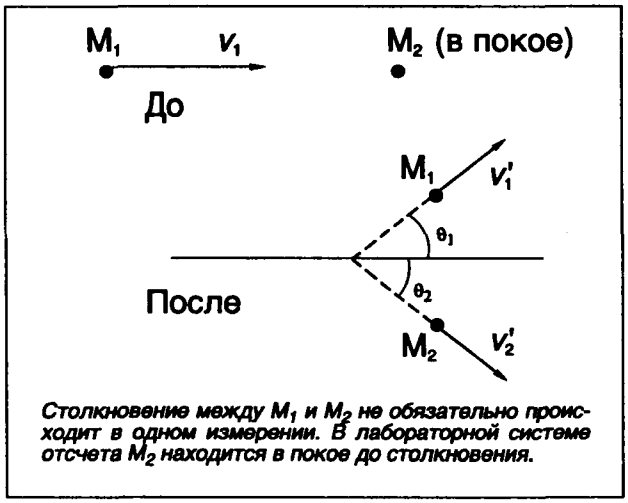
откуда

$$v_1' + v_1 = v_2' + v_2.$$

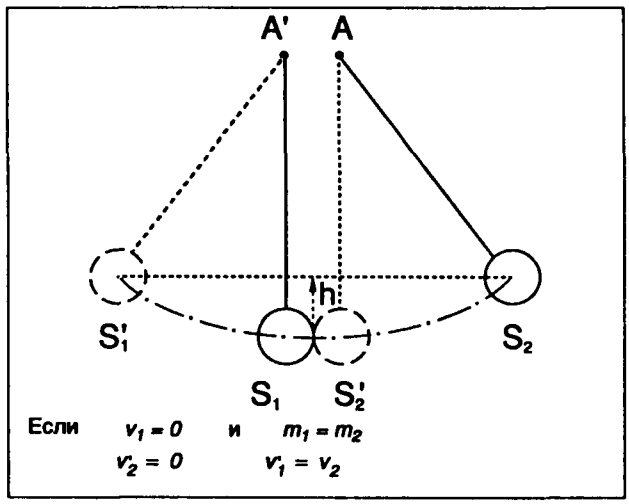
1.5.3.6.3.2. Закон упругого отражения:

$$v_1' - v_2' = -(v_1 - v_2).$$

Относительная скорость после удара равна по модулю и противоположна по знаку относительной скорости до удара.

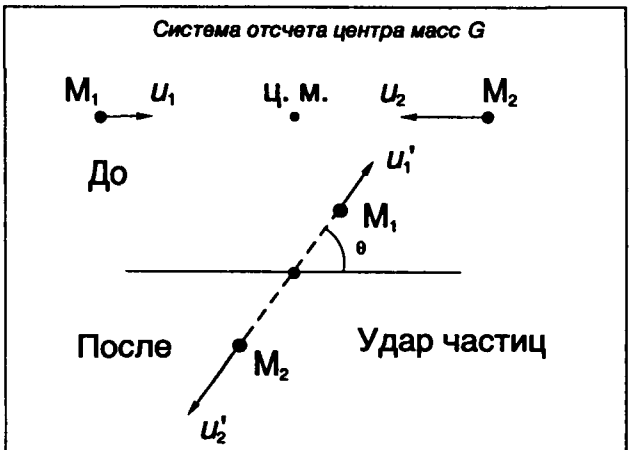


Столкновение между M_1 и M_2 не обязательно происходит в одном измерении. В лабораторной системе отсчета M_2 находится в покое до столкновения.

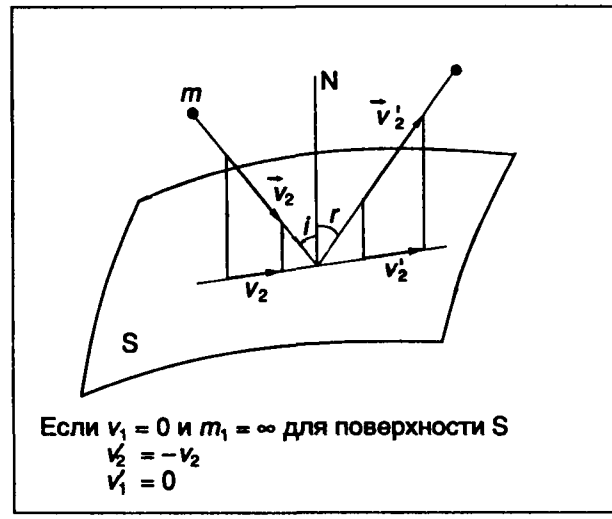


Если $v_1 = 0$ и $m_1 = m_2$
$v_2' = 0$ $v_1' = v_2$

Система отсчета центра масс G



В системе отсчета центра масс M_1 и M_2 должны после столкновения разлетаться в противоположные стороны. Все углы $0 \le \theta \le \pi$ возможны, и $|u_1'| = |u_1|$, $|u_2'| = |u_2|$.



Если $v_1 = 0$ и $m_1 = \infty$ для поверхности S
$v_2' = -v_2$
$v_1' = 0$

$\vec{v}_1' - \vec{v}_G = -(\vec{v}_1 - \vec{v}_G)$: барицентрическая система отсчета,

$\vec{v}_2' - \vec{v}_G = -(\vec{v}_2 - \vec{v}_G)$: относительные скорости противоположны,

$$\vec{v}_G = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

и

$$\vec{v}_1' - \vec{v}_2' = -(\vec{v}_1 - \vec{v}_2).$$

1.5.3.6.3.3. Удар сфер, без трения

Удар сферы B о сферу A создает в точке контакта I импульс $\vec{P}$. Удар A о B дает $-\vec{P}$ (см. рис. на с. 46).

$\vec{P} = m_1(\vec{v}_1' - \vec{v}_1)$, $\vec{P}$ разлагается на составляющие P_n по нормали к сферам и $P_t = 0$ – по касательной. Проектируя скорости на оси системы Gxy, где Gx нормально к сферам, имеем

$$P_n = m_1(w_1' - w_1) \quad \text{и} \quad -P_n = m_2(w_2' - w_2),$$

$$P_t = 0 = m_1(u_1' - u_1) \quad \text{и} \quad -P_t = 0 = m_2(u_2' - u_2),$$

причем

$$m_1(v_1'^2 - v_1^2) + m_2(v_2'^2 - v_2^2) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_1(w_1'^2 - w_1^2) + m_2(w_2'^2 - w_2^2) = 0,$$

поэтому:

$$w_1' + w_1 = w_2' + w_2$$

упругое отражение на G$\vec{x}$,

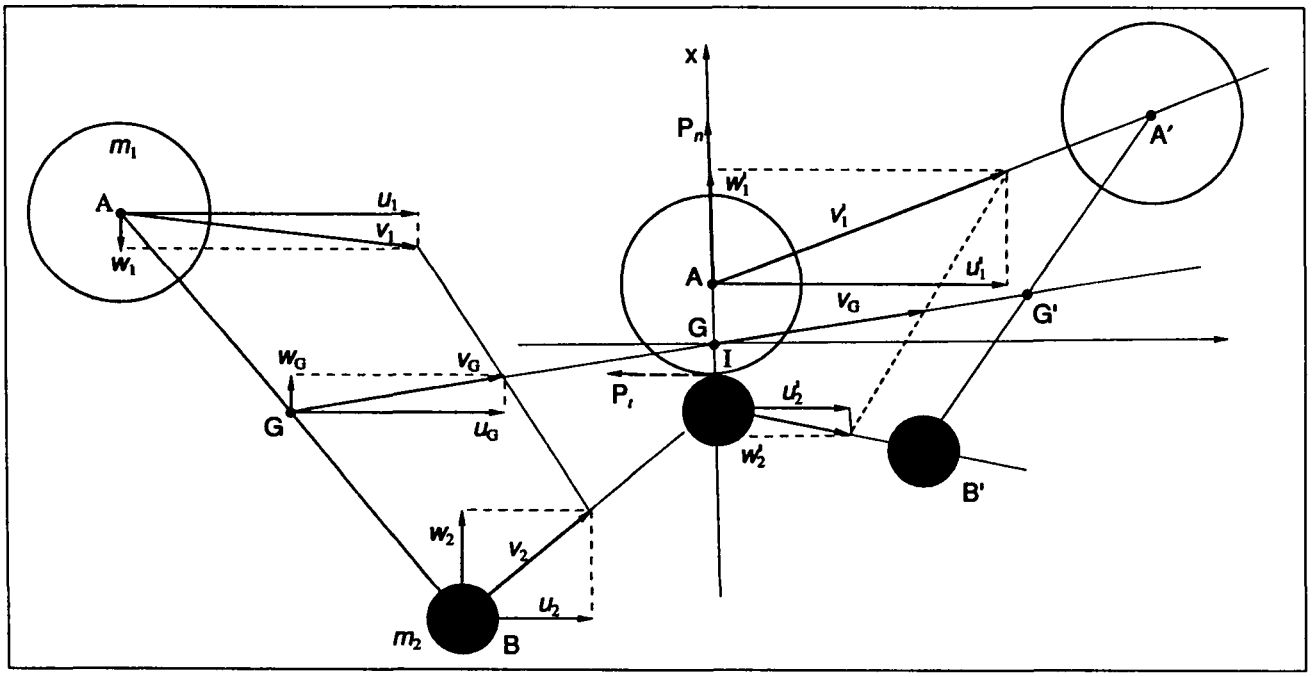
$$u_1' = u_1, \quad u_2' = u_2,$$

$$w_1' - w_G = -(w_2 - w_G).$$

Замечание:

Любая вертикальная составляющая скоростей сохраняется после удара. Если сферы вращаются вокруг себя, то в отсутствие трения импульс вращающей силы не возникает. Векторы вращения сфер $\vec{\Omega}_1$ и $\vec{\Omega}_2$ не меняются.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



Удар сфер без трения.

1.5.3.6.3.4. Удар произвольных тел с центрами тяжести A и B без трения

Предположим для простоты, что A неподвижно, а B совершает поступательное движение, I_y – плоскость, касательная в точке удара.

Результирующий импульс для малых сфер I_1 и I_2 в окрестности I расположен на $\overrightarrow{Ix}$; следовательно, закон отражения имеет вид

$$\vec{w}_{I_1}' + \vec{w}_{I_1} = \vec{w}_{I_2}' + \vec{w}_{I_2},$$

где

$$\vec{w}_{I_1}' = \vec{w}_{I_1}' + \vec{\Omega}_1' \wedge \overrightarrow{AI},$$

$$\begin{cases} \vec{w}_{I_2}' = w_1' + \Omega_1' a \\ \vec{w}_{I_2}' = w_2' + \Omega_2' b \end{cases}$$

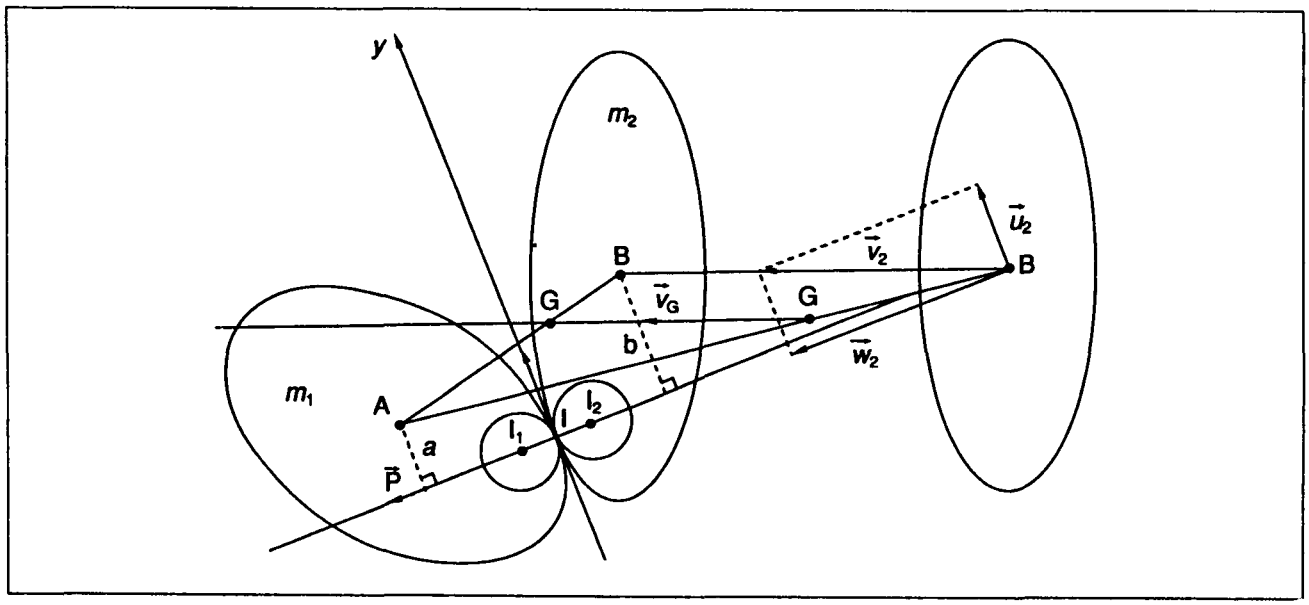
Тела начнут совершать вращательные движения:

$$P_n = m_1 w_1' = -m_2 (w_2' - w_2),$$

$$m_1 u_1' = m_2 (u_2' - u_2) = P_t = 0,$$

$$J_1 \Omega_1' = aP_n, \quad J_2 \Omega_2' = -bP_n,$$

$$\frac{1}{2}(m_1 v_1'^2 + J_1 \Omega_1'^2) + \frac{1}{2}\left[m_2 (v_2'^2 - v_2^2) + J_2 \Omega_2'^2\right] = 0$$



Удар произвольных тел без трения.

1.5.3.6.4. Реальные удары

1.5.3.6.4.1. Энергия деформации не полностью восстанавливается за время $t_2 - t_1$.

Частичное отражение, коэффициент восстановления η:

$$w'_{t_1} - w'_{t_2} = -\eta\,(w_{t_2} - w_{t_1}).$$

1.5.3.6.4.2. Касательный импульс есть

P_t, если $\dfrac{P_t}{P_n} \le \operatorname{tg}\varphi$, φ – угол трения,

$P_t = P_n \operatorname{tg}\varphi$, как только $\dfrac{P_t}{P_n} = \operatorname{tg}\alpha$, $\alpha \ge \varphi$.

1.5.3.7. Осцилляторы

Примеры:

— масса, подвешенная на пружине,

период: $T_0 = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$,

k – жесткость пружины (элементарный коэффициент удлинения, деленный на элементарную силу);

— крутильный маятник: тело вращения, подвешенное на упругой нити: $T_0 = 2\pi\sqrt{\dfrac{J}{C}}$,

C – постоянная кручения (отношение элементарного угла к элементарной паре);

— физический маятник массы M:

· малые колебания:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{Mga}}, \quad a = OG,$$

· большие колебания:

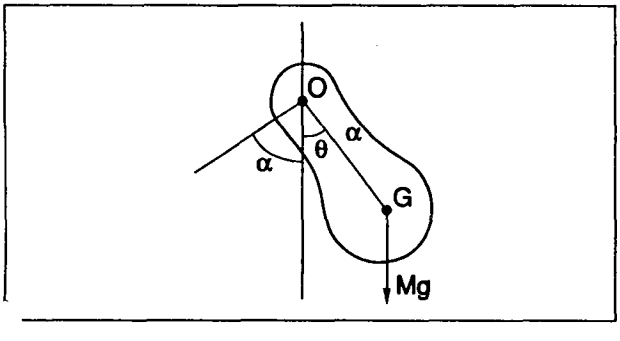
$$T'_0 = \frac{2}{\pi} T_0 \int_c^{\pi} \frac{d\varphi}{\left(1 - \sin^2\frac{\alpha}{2}\sin^2\varphi\right)^{1/2}},$$

$$x = \theta_{max},$$

· средние колебания:

$$T'_0 = T_0\left(1 + \frac{\alpha^2}{16} + \ldots\right),$$

для $\alpha = \dfrac{\pi}{2}$ имеем $T'_0 = 1{,}23\,T_0$



— математический маятник (материальная точка, подвешенная на нити):

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{a}{g}}.$$

1.5.3.7.1. Осциллятор с вязким трением

Пример: масса, подвешенная на пружине с гидравлическим амортизатором f:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + f\frac{dx}{dt} + kx = 0.$$

Обозначим:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad \text{и} \quad \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2},$$

тогда:

$$\ddot{x} + 2\zeta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0,$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_0.$$

ω_0 – циклическая частота осциллятора или собственная циклическая частота, T_0 – собственный период, f_0 – собственная частота, $\zeta = \dfrac{f}{2m}$ – коэффициент затухания (в c^{-1}), $x = 0$ – положение равновесия.

— *псевдопериодический режим*:

$$\zeta^2 - \omega_0^2 < 0,$$

$$x = Ae^{-\zeta t}\cos(wt + \varphi),$$

затухающие колебания около положения равновесия:

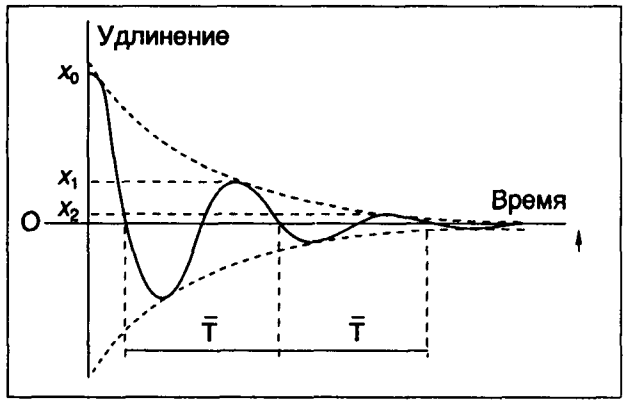
псевдопериод:

$$\bar{T} = \frac{2\pi}{w} = T_0\left(1 - \frac{\zeta^2}{\omega_0^2}\right)^{-1/2} > T_0,$$

для $t = 0$:

$$x = x_0 \quad \text{и} \quad y_0 = 0:$$

$$x = x_0 e^{-\zeta t}\left(\cos wt + \frac{\zeta}{w}\sin wt\right)$$



Затухающее колебательное движение

— критический режим:

$$\zeta^2 - \omega_0^2 = 0, \quad \zeta_c = \omega_0,$$

$x = (At + B)\, e^{-\omega_0 t}$ — апериодическое движение. Этот случай важен для амортизации колебаний в измерительных приборах;

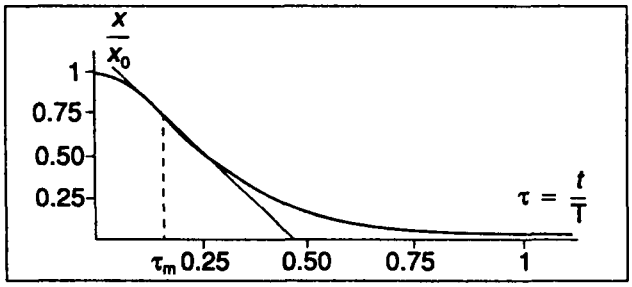
при $t = 0$

$$x = x_0 \quad \text{и} \quad v_0 = 0: \quad x = x_0 \left(\frac{2\pi t}{T_0} + 1\right) e^{\frac{2\pi t}{T_0}},$$

в момент $t = T_0$:

$$x = 0{,}0136 x_0 \simeq 0,$$

т.е. близко к положению равновесия:



— апериодический режим:

$$\zeta^2 - \omega_0^2 > 0,$$

решение вида

$$x = Be^{-\beta t} + Ce^{-\gamma t},$$

"возвращение" в положение равновесия более длительно.

1.5.3.7.2. Вынужденные колебания

$$F_{внеш} = F \cos \omega t,$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F}{m} \cos \omega t.$$

Затухающие колебания со временем исчезают, после чего остается:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi),$$

$$A = \frac{F}{m\omega_0^2} \frac{1}{\left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\frac{\zeta^2}{\omega_0^2}\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right]^{1/2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\zeta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}.$$

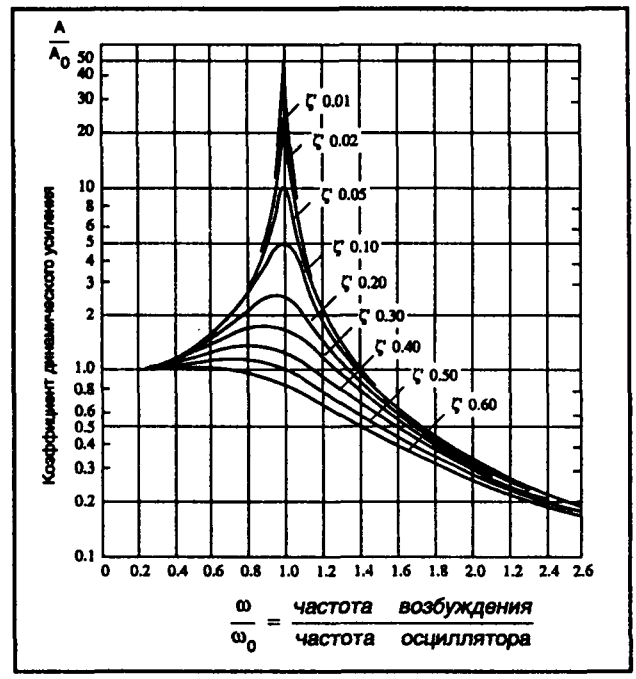
Если $\zeta = 0{,}5\zeta_0$, $A_{max} = 1{,}15A_0$ (A_0 при $\omega = 0$), получается амортизация автомобилей:

$$\zeta_0 = \omega_0, \quad A_0 = \frac{F}{m\omega_0^2};$$

если $\zeta \ll \zeta_0$ (ζ мало), имеется резонансный пик амплитуды:

$$A = \frac{F}{m}\frac{1}{2\zeta\omega_0} \quad \text{или} \quad \frac{A}{A_0} = \frac{\omega_0}{2\zeta}.$$

Следует избегать возбуждения механической системы со слабым затуханием частотами, близкими к собственной частоте колебаний.



Коэффициент динамического усиления $\frac{A}{A_0}$

$$\zeta' = \frac{\zeta}{\omega_0} = \frac{\zeta}{\zeta_0}.$$

1.5.3.8. Моменты инерции твердого тела

1.5.3.8.1. В системе координат Oxyz

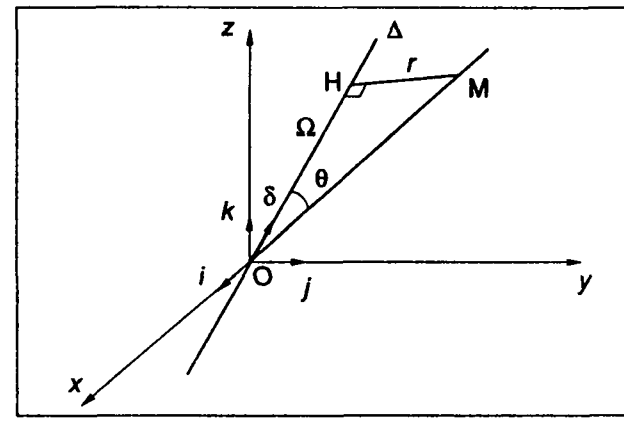
Ось вращения Δ с единичным вектором

$$\vec{\delta} = (\alpha, \beta, \gamma)$$

$$|\vec{\delta} \wedge \overrightarrow{OM}| = OM \sin\theta = r$$

$$r^2 = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \alpha & \beta & \gamma \\ x & y & z \end{vmatrix}^2 = (\beta z - \gamma y)^2 + (\gamma x - \alpha z)^2 + (\alpha y - \beta x)^2$$

$$r^2 = \alpha^2(y^2 + z^2) + \beta^2(z^2 + x^2) + \gamma^2(x^2 + y^2) - 2\beta\gamma yz - 2\gamma\alpha zx - 2\alpha\beta xy$$



Момент инерции твердого тела.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Момент инерции относительно Δ:

$$J_\Delta = \sum m_i r_i^2 = \alpha^2 I_{xx} + \beta^2 I_{yy} + \gamma^2 I_{zz} - 2\beta\gamma I_{yz} - 2\gamma\alpha I_{zx} - 2\alpha\beta I_{xy},$$

где

$I_{xx} = \sum m_i (y^2 + z^2)$ – момент инерции относительно $\overrightarrow{Ox}$,

$I_{yz} = \sum m_i yz$ – произведение инерции.

1.5.3.8.2. Эллипсоид инерции в точке O твердого тела

Конец вектора $\frac{\vec{\delta}}{\sqrt{J_\Delta}} = (X, Y, Z)$ пробегает поверхность с уравнением

$$I_{xx}X^2 + I_{yy}Y^2 + I_{zz}Z^2 - 2I_{yz}YZ - 2I_{zx}ZX - 2I_{xy}XY = 1.$$

Это эллипсоид с центром O, имеющий три оси симметрии, называемые главными осями инерции в точке O:

$$\overrightarrow{Ox_1}, \overrightarrow{Oy_1}, \overrightarrow{Oz_1}.$$

В системе $Ox_1y_1z_1$ эллипсоид имеет уравнение:

$$AX_1^2 + BY_1^2 + CZ_1^2 = 1.$$

Произведения инерции равны нулю.

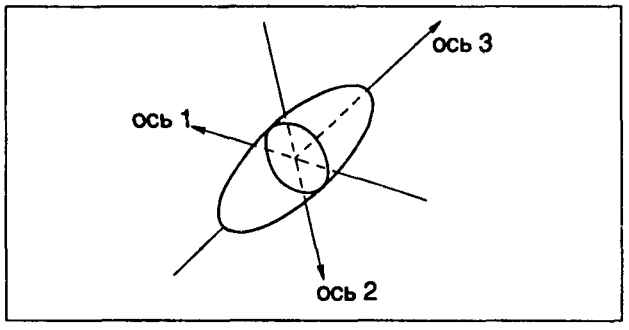
A, B, C – главные моменты инерции.

$$\vec{\delta} = \alpha_1\vec{i}_1 + \beta_1\vec{j}_1 + \gamma_1\vec{k}_1,$$

$$\vec{\Omega} = \Omega\vec{\delta} = (p, q, r),$$

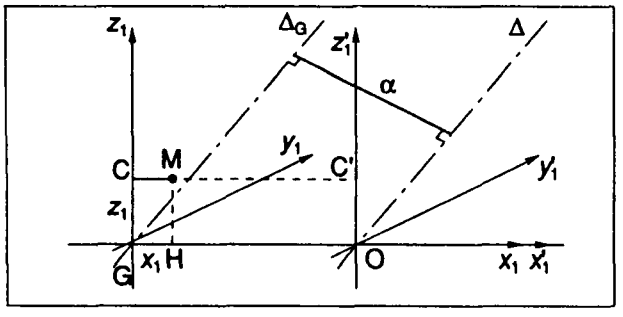
$$J_\Delta = A\alpha_1^2 + B\beta_1^2 + C\gamma_1^2,$$

$$J_\Delta\Omega^2 = Ap^2 + Bq^2 + Cr^2.$$



1.5.3.8.3. Центральный эллипсоид инерции – в центре тяжести G

Главные оси инерции часто удобно находить из соображений симметрии.



С другой стороны, в точке O, расположенной на одной из этих осей:

$$I_{x_1z_1} = \sum m_i x_1' z_1' = \sum m_i c' M z_1 =$$

$$= \sum m_i (cc' + x_1) z_1 = c' c z_G + I_{x_1z_1} = 0,$$

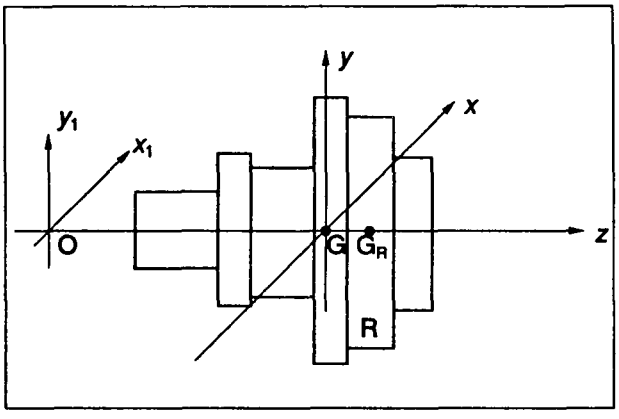
$$GH = x_1, \quad OH = x_1'.$$

Если O лежит на центральной главной оси, две другие главные оси в O параллельны центральным главным осям и

$$J_\Delta = J_{\Delta_0} + Ma^2.$$

1.5.3.8.4. Центральный эллипсоид – эллипсоид вращения. Примеры семейств твердых тел

Твердое тело есть "стопка ломтиков", центры тяжести которых расположены на оси $\overrightarrow{Gz}$.

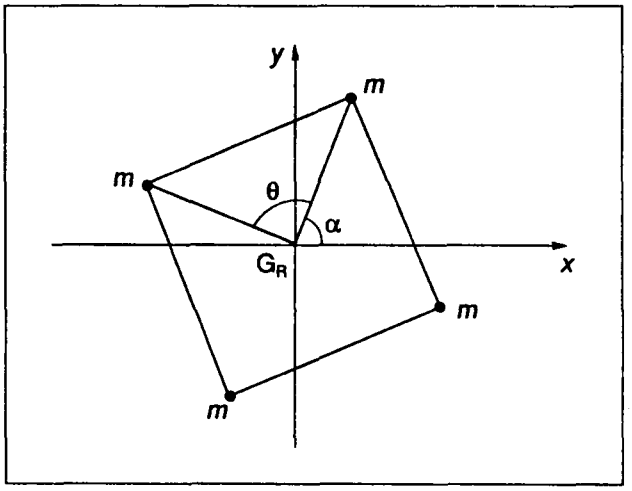


Для "ломтика" R:

$$\sum y_i z m_i = z \sum m_i y_i = 0,$$

т.е. $\overrightarrow{Gz}$ – главная ось.

1.5.3.8.4.1. Каждый ломтик – это фигура, для которой G_R является центром симметрии порядка $n \geq 3$



Ломтик – совокупность материальных точек, расположенных в вершинах правильного многоугольника с $\theta = \frac{2\pi}{n}$:

$$I_{xx} = \sum my^2 = mr^2 \sum_{k=0}^{n-1} \cos^2(\alpha + k\theta),$$

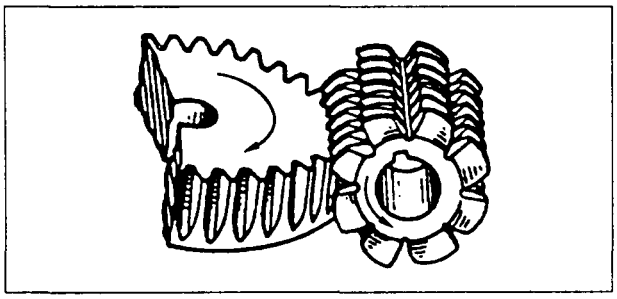
$$I_{yy} = \sum mx^2 = mr^2 \sum_{k=0}^{n-1} \sin^2(\alpha + k\theta),$$

но

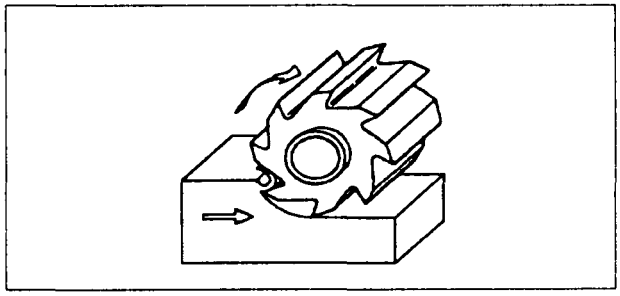
$$I_{xx} - I_{yy} = mr^2 \sum_{k=0}^{n-1} \cos 2(\alpha + k\theta) = 0$$

при любой ориентации α.

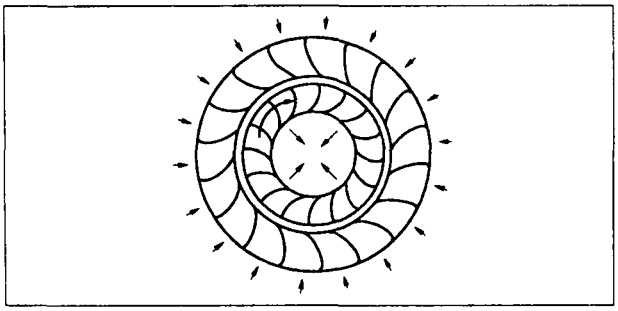
$$I_{xy} = mr^2 \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{2} \sin 2(\alpha + k\theta) = 0.$$



Зубчатая передача.



Фреза.

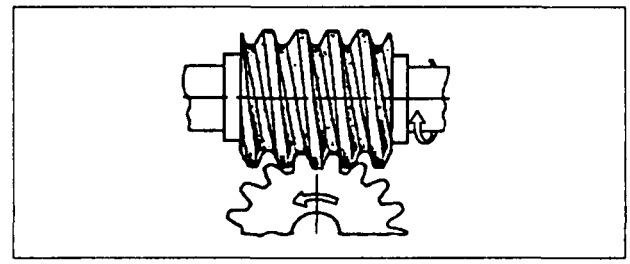


Турбина.

1.5.3.8.4.2. Каждый ломтик – это один или несколько витков винта

Данному y соответствует один $x > 0$ и один $x < 0$. $I_{xy} = 0$.

Точно так же в 0, только момент инерции C выделяется, A = B. Частный случай – тело вращения.



Червячная передача с двойной нарезкой.

1.5.3.9. Движение твердого тела с одной неподвижной точкой O. Общие уравнения

1.5.3.9.1. Кинетический момент относительно O

Система отсчета, составленная главными осями инерции, есть $Ox_1y_1z_1$. Тогда

$$v_M = \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{OM} = \begin{vmatrix} \vec{i}_1 & \vec{j}_1 & \vec{k}_1 \\ p & q & r \\ x_1 & y_1 & z_1 \end{vmatrix},$$

где

$$\vec{\Omega} = p\vec{i}_1 + q\vec{j}_1 + r\vec{k}_1,$$

$$\vec{v}_M = (qz_1 - ry_1)\vec{i}_1 + (rx_1 - pz_1)\vec{j}_1 + (py_1 - qx_1)\vec{k}_1 = (u_1, v_1, w_1),$$

$$\overrightarrow{OM} \wedge \vec{v}_M = \begin{vmatrix} \vec{i}_1 & \vec{j}_1 & \vec{k}_1 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ u_1 & v_1 & w_1 \end{vmatrix} = \begin{cases} p(y_1^2 + z_1^2) - qx_1y_1 - rx_1z_1 \\ q(z_1^2 + x_1^2) - ry_1z_1 - py_1x_1 \\ r(x_1^2 + y_1^2) - pz_1x_1 - qz_1y_1 \end{cases}$$

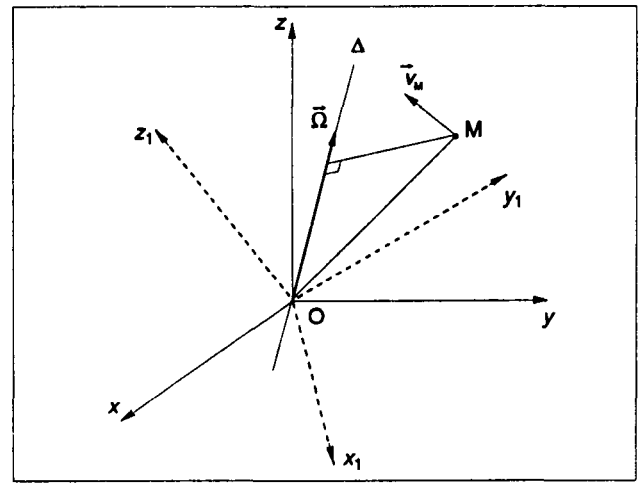
Кинетический момент:

$$\vec{\sigma}_0 = \sum m_i \overrightarrow{OM} \wedge \vec{v}_M = Ap\vec{i}_1 + Bq\vec{j}_1 + Cr\vec{k}_1,$$

поскольку произведения инерции, такие как $\sum m_i x_1 z_1$ равны нулю.

Замечание:

Точка O может быть центром тяжести.



Движение твердого тела с неподвижной точкой O.

1.5.3.9.2. Теорема о кинетическом моменте

$$\left(\frac{d\vec{\sigma}_0}{dt}\right)_{Oxyz} = \vec{\mathfrak{M}}_0(\vec{F}_{внеш.}) = \left(\frac{d\vec{\sigma}_0}{dt}\right)_{Ox_1y_1z_1} + \vec{\Omega} \wedge \vec{\sigma}_0 =$$

$$= A\dot{p}\vec{i}_1 + B\dot{q}\vec{j}_1 + C\dot{r}\vec{k}_1 + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ Ap & Bq & Cr \end{vmatrix}.$$

Уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} A\dot{p} + (C - B)\,qr = \vec{\mathfrak{M}}_0 \cdot \vec{i}_1 = L, \\ B\dot{q} + (A - C)\,rp = \vec{\mathfrak{M}}_0 \cdot \vec{j}_1 = M, \\ C\dot{r} + (B - A)\,pq = \vec{\mathfrak{M}}_0 \cdot \vec{k}_1 = N. \end{cases}$$

1.5.3.9.3. Кинетическая энергия

$$E_c = \sum \frac{1}{2} m_i \vec{v}_M^2 = \frac{1}{2} \sum m_i \vec{v}_M \cdot (\vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{OM}) =$$

$$= \frac{1}{2}\vec{\Omega} \cdot \sum m_i \overrightarrow{OM} \wedge \vec{v}_M = \frac{1}{2}\vec{\Omega} \cdot \vec{\sigma}_0.$$

$$E_c = \frac{1}{2}(Ap^2 + Bq^2 + Cr^2) = \frac{1}{2} J_\Delta \Omega^2.$$

1.5.3.10. Свободное движение или движение Пуансо

Случай, в котором $\vec{\mathfrak{M}}_0(\vec{F}_{внеш.}) = 0$, и внешние силы проходят через O.

Замечание:

O может быть центром тяжести: свободное вращение тела вокруг центра тяжести.

Тогда:

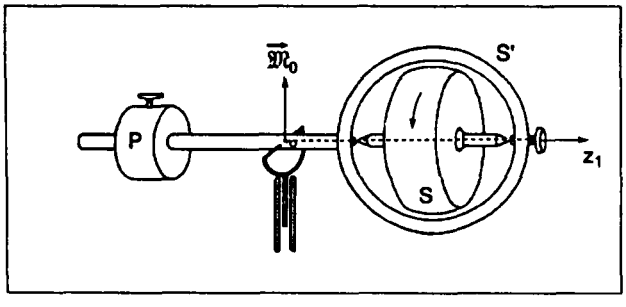
$$\vec{\sigma}_0 = \text{const}$$

и

$$E_c = \frac{1}{2}\vec{\Omega} \cdot \vec{\sigma}_0 = \text{const}.$$

1.5.3.10.1. Тело, приведенное во вращение вокруг главной оси инерции

$p = q = 0$ и $r = \text{const}$: вращение продолжается равномерно (вокруг главной оси Oz).



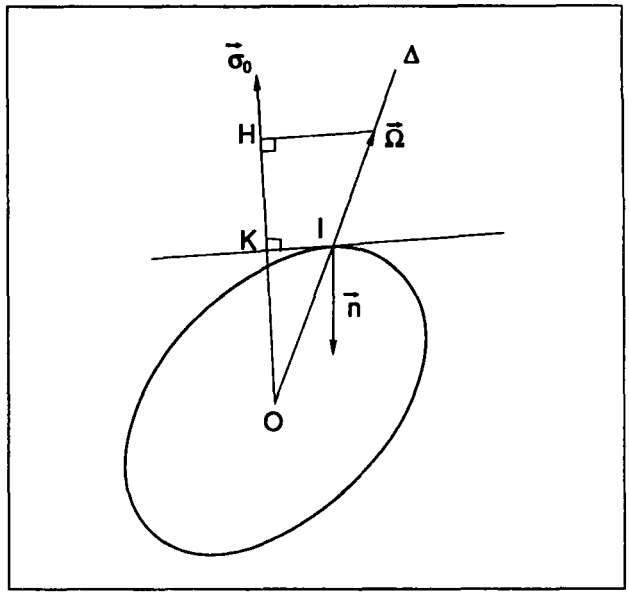
Вес P уравновешивает систему в состоянии покоя. Когда S приведено во вращение, последнее продолжается бесконечно долго при отсутствии трения.

Тем не менее, вращение вокруг средней главной оси инерции неустойчиво.

1.5.3.10.2. Тело, приведенное во вращение вокруг произвольной оси

$\vec{\sigma}_0$ – постоянный вектор,

$E_c = \frac{1}{2}\vec{\Omega} \cdot \vec{\sigma}_0$ – постоянно, следовательно, OH = = const.



$\vec{\Omega}(p, q, r)$ протыкает эллипсоид

$$AX_1^2 + BY_1^2 + CZ_1^2 = 1$$

в $$I\left(\frac{p}{\sqrt{2E_c}}, \frac{q}{\sqrt{2E_c}}, \frac{r}{\sqrt{2E_c}}\right);$$

в I нормаль к эллипсоиду имеет направляющий вектор

$$\vec{n} = \left(\frac{Ap}{\sqrt{E_c}}, \frac{Bq}{\sqrt{E_c}}, \frac{Cr}{\sqrt{E_c}}\right),$$

он параллелен $\vec{\sigma}_0$.

Наконец:

$$\overrightarrow{OI} \cdot \vec{\sigma}_0 = \frac{Ap^2 + Bq^2 + Cr^2}{\sqrt{2E_c}} = \sqrt{2E_c} = \text{const},$$

откуда $\overline{OK} = \text{const}$.

Плоскость P, касательная к эллипсоиду в точке I, постоянная. Мгновенная скорость в точке плоскости, лежащей на эллипсоиде, равна нулю (I лежит на мгновенной оси вращения Δ).

Движение твердого тела таково, что эллипсоид инерции в точке 0 вращается и катится без скольжения по фиксированной плоскости P (определяемой начальными условиями).

1.5.3.10.3. Тело, у которого эллипсоид инерции есть эллипсоид вращения с осью Oz_1

$$B = A$$

Точка I описывает окружность IJ на эллипсоиде и окружность II' на плоскости P.

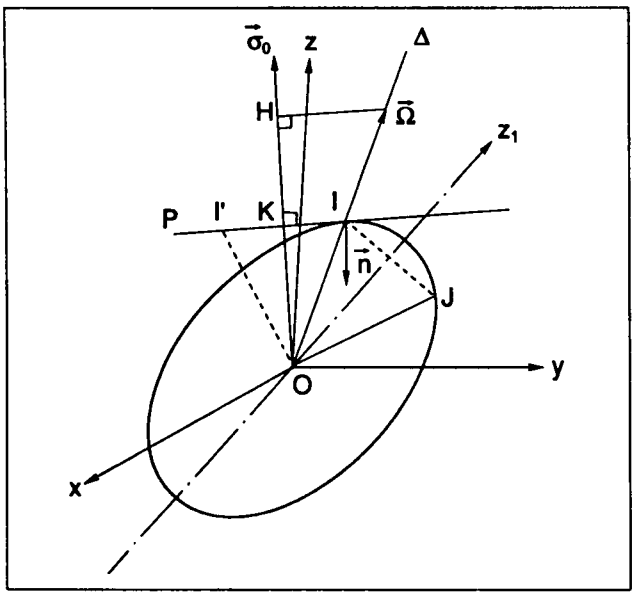
Конус IOJ с осью Oz_1 катится без скольжения по фиксированному конусу IOI' с осью $\vec{\sigma}_0$, с постоянной скоростью Ω.

Имеем: $r = \text{const} = r_0$ (3-е уравнение Эйлера)

и $p = \rho \cos\omega t$,

$q = \rho \sin\omega t$,

где $\omega = \dfrac{C - A}{A} r_0$.



1.5.3.10.4. Относительное движение вокруг центра тяжести

Если на тело действуют внешние силы, проходящие через G, система G*xyz* смещается параллельно самой себе.

Движение точки G дается теоремой количества движения:

$$M\frac{d\vec{V}_G}{dt} = \sum \vec{F}_{внеш} = \vec{F}_G.$$

Движение вращения вокруг G происходит "по Пуансо":

— кинетический момент относительно G:

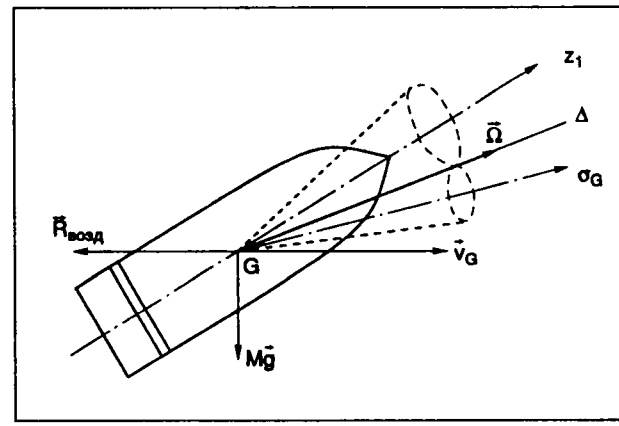
$$\frac{d\vec{\sigma}_0}{dt} = \sum \vec{\mathfrak{M}}_G(\vec{F}_{внеш}) = 0,$$

— кинетическая энергия:

$$dE_c = M\vec{V}_G \cdot d\vec{V}_G + d\left(\frac{1}{2} J_\Delta \Omega^2\right) = \delta\mathfrak{G}_{внеш} =$$

$$= \vec{F}_G \vec{V}_G dt,$$

откуда: $\dfrac{1}{2} J_\Delta \Omega^2 = \text{const}.$



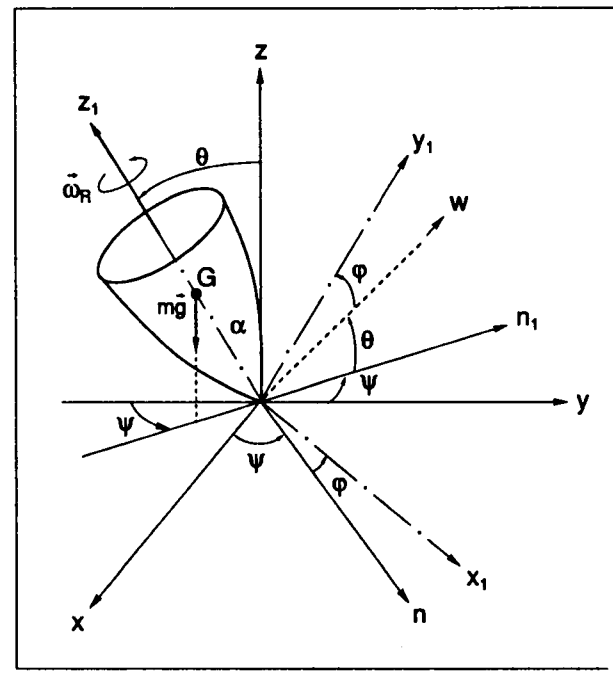
Снаряд нарезного орудия

Здесь предполагается, что сила сопротивления воздуха проходит через G.

1.5.3.11. Задача Лагранжа. Движение волчка

Внешние силы не проходят через 0:

$$\sum \vec{\mathfrak{M}}_G(\vec{F}_{внеш}) \neq 0.$$



Углы Эйлера (международное соглашение)

1.5.3.11.1. Вращение волчка

1.5.3.11.1.1. Плоскость zOx вращается вокруг $\overrightarrow{Oz}$

ψ – угол прецессии,

$\overrightarrow{Ox} \longrightarrow \overrightarrow{On}$: узловая ось,

$\overrightarrow{Oy} \longrightarrow \overrightarrow{On_1}$: прецессия $\vec{\omega}_p = \dot{\psi}\vec{k}$.

1.5.3.11.1.2. Плоскость zOn вращается вокруг $\overrightarrow{On}$, узловой оси

$\overrightarrow{On_1} \longrightarrow \overrightarrow{Ow}$

$\overrightarrow{Oz} \longrightarrow \overrightarrow{Oz_1}$

θ – угол нутации,

нутация $= \vec{\omega}_N = \dot{\theta}\vec{n}$

1.5.3.11.2. Плоскость wOn вращается вокруг $\overrightarrow{Oz_1}$

φ – угол собственного вращения,

$\overrightarrow{On} \longrightarrow \overrightarrow{Ox_1}$

$\overrightarrow{Ow} \longrightarrow \overrightarrow{Oy_1}$

Собственное вращение: $\vec{\omega}_R = \dot{\varphi}\vec{k}_1$.

1.5.3.11.3. Движение волчка

$\vec{\Omega} = \dot{\psi}\vec{k} + \dot{\theta}\vec{n} + \dot{\varphi}\vec{k}_1$ – мгновенное вращение.

Волчок неподвижен в системе $Ox_1y_1z_1$ и:

$$\begin{cases} \vec{k} = \sin\theta(\sin\varphi \cdot \vec{i}_1 + \cos\varphi \cdot \vec{j}_1) + \cos\theta \cdot \vec{k}_1 \\ \vec{n} = \cos\varphi \cdot \vec{i}_1 - \sin\varphi \cdot \vec{j}_1 \end{cases}$$

Составляющие $\vec{\Omega}$ в системе $Ox_1y_1z_1(R_1)$ таковы:

$$\vec{\Omega} = p\vec{i}_1 + q\vec{j}_1 + r\vec{k}_1 =$$

$$= \begin{cases} p = \dot{\psi}\sin\theta\sin\varphi + \dot{\theta}\cos\varphi \\ q = \dot{\psi}\sin\theta\cos\varphi - \dot{\theta}\sin\varphi \\ r = \dot{\psi}\cos\theta + \dot{\varphi} \end{cases}$$

Напомним уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} A\dot{p} + (C - B)qr = \mathfrak{M}_0 \cdot \vec{i}_1 = L \\ B\dot{q} + (A - C)rp = \mathfrak{M}_0 \cdot \vec{j}_1 = M \\ C\dot{r} + (B - A)pq = \mathfrak{M}_0 \cdot \vec{k}_1 = N \end{cases}$$

Поскольку на волчок действует вес $m\vec{g}$, имеем:

$$\mathfrak{M}_0 = mga\sin\theta(\cos\varphi \cdot \vec{i}_1 - \sin\varphi \cdot \vec{j}_1).$$

В силу его вращательной симметрии A = B, откуда:

$$\begin{cases} A\dot{p} + (C - A)qr = mga\sin\theta\cos\varphi \\ A\dot{q} + (A - C)rp = -mga\sin\theta\cos\varphi \\ C\dot{r} = 0 \end{cases}$$

Эта система допускает три следующих первых интеграла:

$$\dot{\varphi} + \dot{\psi}\cos\theta = r_0 = \text{const}; \qquad (1)$$

сохранение кинетического момента относительно $\overrightarrow{Oz}$: $\sigma_z = \vec{\sigma}_0 \cdot \vec{k}$ дает:

$$\sigma_z = A\dot{\psi}\sin^2\theta + Cr_0\cos\theta = Cr_0K \qquad (2)$$

постоянно, поскольку $(\overrightarrow{OG} \wedge m\vec{g}) \cdot \vec{k} = 0$;

сохранение механической энергии:

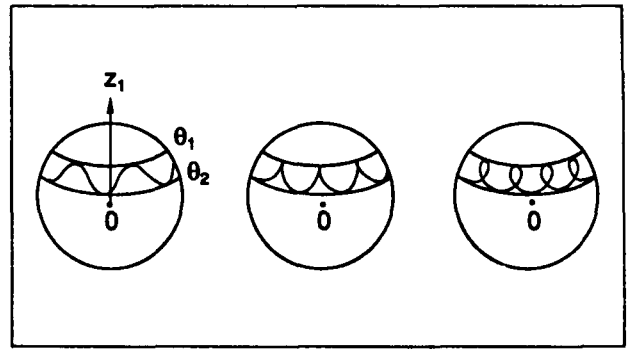
$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2}(Ap^2 + Aq^2 + Cr^2) + mgz = \text{const},$$

откуда:

$$E = \frac{1}{2}A(\dot{\psi}^2\sin^2\theta + \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}Cr_0^2 + mga\cos\theta = \text{const}. \qquad (3)$$

Движение волчка зависит от начальных условий.

Исследование показывает, что угол нутации заключен между двумя значениями θ_1 и θ_2. Произвольная точка оси волчка описывает на сфере с центром 0 кривую, которая может иметь различные формы.



Траектория подвижного конца волчка

1.5.3.11.4. Гироскоп

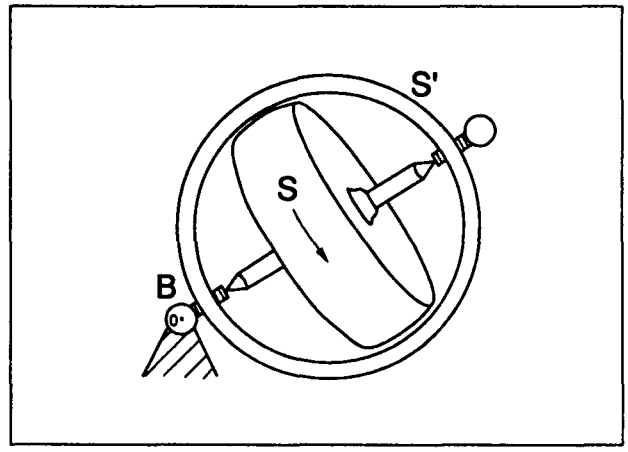
Чем больше начальное вращение $\dot{\varphi}_0$, тем ближе друг к другу θ_1 и θ_2.

Впрочем, в этом случае

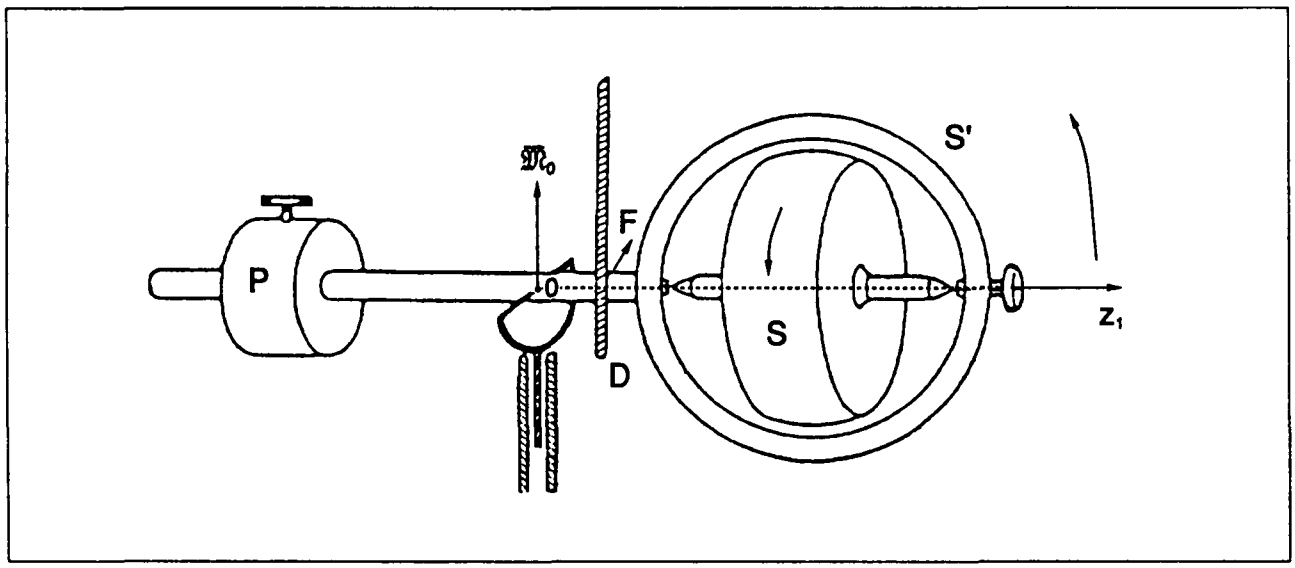
$$\theta \approx \text{const}.$$

Нутационное движение пренебрежимо, и:

$\dot{\psi} \approx \dfrac{mga}{C\dot{\varphi}_0} = \text{const}$ – гироскопическое приближение.



Пример гироскопа. Гироскопический волчок

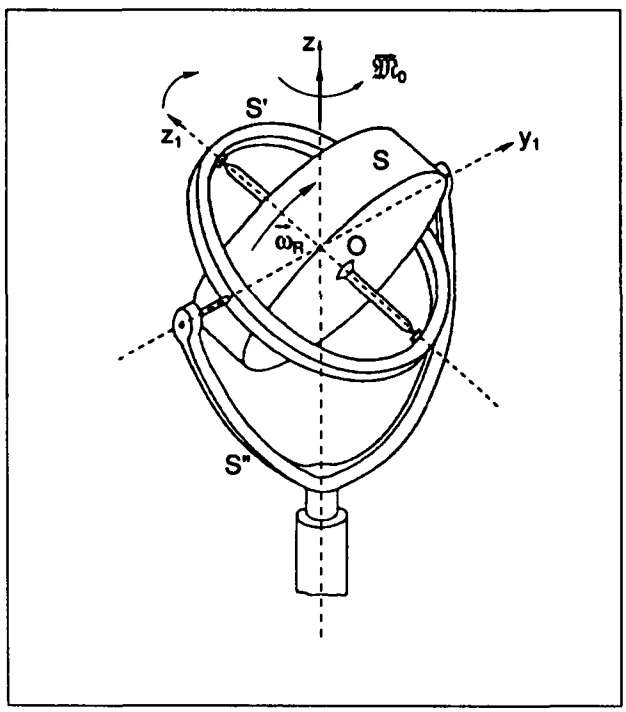


Гироскопический эффект.

Гироскопический эффект:

Вначале система уравновешена весом P, лишь S вращается вокруг своей оси. Если подействовать на нее горизонтальной силой $\vec{F}$ с помощью палочки D, то момент $\mathfrak{M}_0(\vec{F})$ вертикален; конец z_1 приобретет скорость, параллельную $\mathfrak{M}_0$ и имеющую то же направление: это прецессионное движение.

Обратно, всякое изменение начального движения вызывает пару $\mathfrak{M}_0$:



Гироскоп, смонтированный на арматуре S". Точка 0 есть центр тяжести. Если поворачивать S", прилагая момент $\mathfrak{M}_0$, направленный вверх, z_1 получает скорость, направленную вверх: прецессионное движение.

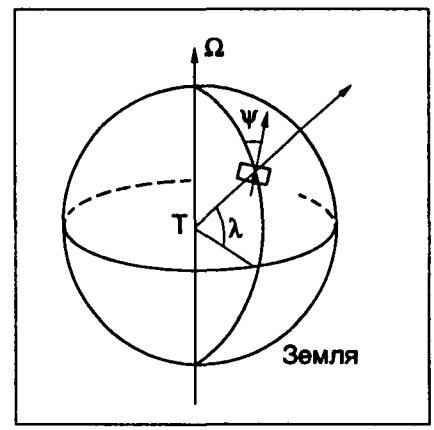
1.5.3.11.5. Применения гироскопа

Гироскоп используется в качестве:

— стабилизатора пути; например, он позволяет регулировать направление движения торпеды,

— нейтрализатора боковой качки,

— компаса; в гироскопическом компасе 0 не совпадает с G. Если он отклоняется от направления на север, появляется сила Кориолиса, дающая противоположный гироскопический эффект. Следовательно, появляются колебания, которые надо погасить.



Навигация с помощью гирокомпаса.

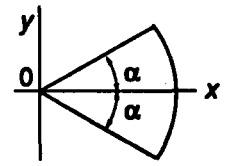
1.5.3.12. Моменты инерции распространенных линий, поверхностей и объемов

Выдержки из "Техники инженера"

Отрезок прямой длины l. Относительно оси, проходящей через один из концов, второй конец на расстоянии r от оси:

$$I = l \cdot \frac{r^2}{3} = M \cdot \frac{r^2}{3}$$

Дуга окружности



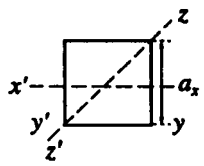
$$J_0 = 2\alpha r^3 = Mr^2$$

$$I_{0x} = \frac{r^3}{2}(2\alpha - \sin 2\alpha) = \frac{Mr^2}{2}\left(1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}\right)$$

$$I_{0y} = \frac{r^2}{2}(2\alpha + \sin 2\alpha) = \frac{Mr^2}{2}\left(1 + \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}\right)$$

Линии

Квадрат

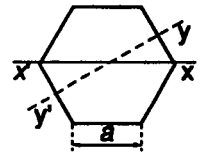


$$I_x = \frac{a^4}{12} = M\frac{a^2}{12}$$

$$I_y = \frac{a^4}{3} = M\frac{a^2}{3}$$

$$I_z = \frac{a^4}{12} = M\frac{a^2}{12}$$

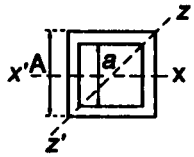
Правильный шестиугольник



$$I_x = \frac{5a^4\sqrt{3}}{16} = M\frac{5}{24}a^2$$

$$I_y = \frac{5a^4\sqrt{3}}{16} = M\frac{5}{24}a^2$$

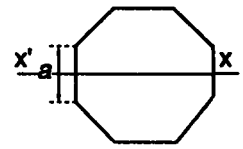
Квадратная рамка



$$I_x = \frac{A^4 - a^4}{12} = M\frac{A^2 + a^2}{12}$$

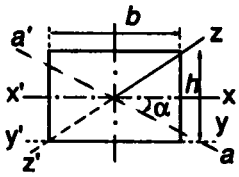
$$I_z = \frac{A^4 - a^4}{12} = M\frac{A^2 + a^2}{12}$$

Правильный восьмиугольник



$$I_x = 1{,}8677\ a^4$$

Прямоугольник



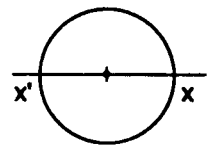
$$I_x = \frac{bh^3}{12} = M\frac{h^2}{12}$$

$$I_y = \frac{bh^3}{3} = M\frac{h^2}{3}$$

$$I_z = \frac{b^3h^3}{6(b^2+h^2)} = M\frac{b^2h^2}{6(b^2+h^2)}$$

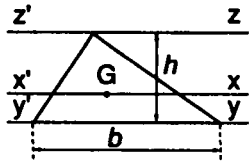
$$I_a = \frac{bh}{12}(h^2\cos^2\alpha + b^2\sin^2\alpha) = \frac{M}{12}(h^2\cos^2\alpha + b^2\sin^2\alpha)$$

Круг



$$I_x = \frac{\pi d^4}{64} = M\frac{d^2}{16}$$

Треугольник

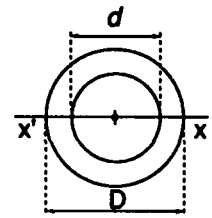


$$I_x = \frac{bh^3}{36} = M\frac{h^2}{18}$$

$$I_y = \frac{bh^3}{12} = M\frac{h^2}{6}$$

$$I_z = \frac{bh^3}{4} = M\frac{h^2}{2}$$

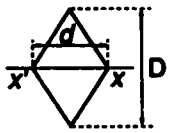
Круговое кольцо



$$I_x = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = M\left(\frac{D^2 + d^2}{16}\right)$$

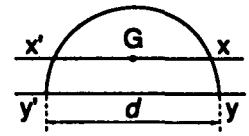
Плоские фигуры

Ромб



$$I_x = \frac{dD^3}{48} = M\frac{D^2}{24}$$

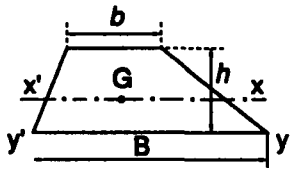
Полукруг



$$I_x = \frac{d^4(9\pi^2 - 64)}{1\,152\pi} = 0,006\,86d^4$$

$$I_y = \frac{\pi d^4}{128} = M\frac{d^2}{16}$$

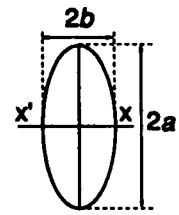
Трапеция



$$I_x = \frac{h^3(B^2 + 4Bb + b^2)}{36(B + b)} = M\frac{h^2(B^2 + 4Bb + b^2)}{18(B + b)^2}$$

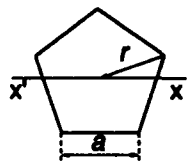
$$I_y = \frac{h^3(B + 3b)}{12} = M\frac{h^2(B + 3b)}{6(B + b)}$$

Эллипс



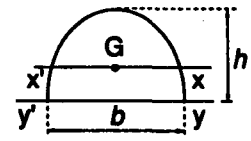
$$I_x = \frac{\pi a^3 b}{4} = M\frac{a^2}{4}$$

Правильный пятиугольник



$$I_x = \frac{M}{12}\left(3r^2 - \frac{a^2}{2}\right)$$

Параболический сегмент

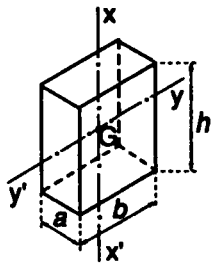


$$I_x = \frac{8bh^3}{175}$$

$$I_y = \frac{32bh^3}{105}$$

Плоские фигуры (окончание).

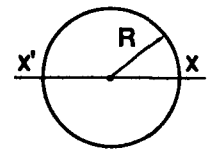
Призма



$$I_x = \frac{abh}{12}(a^2 + b^2) = M\frac{a^2 + b^2}{12}$$

$$I_y = \frac{abh}{12}(a^2 + h^2) = M\frac{a^2 + h^2}{12}$$

Шар

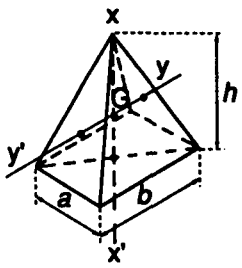


$$I_x = \frac{8}{15}\pi R^5 = \frac{2}{5}MR^2$$

Шаровой слой

$$I_x = \frac{2}{5}M\frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3}$$

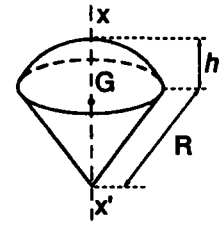
Прямая пирамида с прямоугольным основанием



$$I_x = \frac{abh}{60}(a^2 + b^2) = \frac{M}{20}(a^2 + b^2)$$

$$I_y = \frac{abh}{3}\left(\frac{3h^2}{80} + \frac{a^2}{20}\right) = M\left(\frac{3h^2}{80} + \frac{a^2}{20}\right)$$

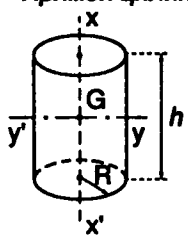
Шаровой сектор



$$I_x = \frac{M}{5}(3Rh - h^2)$$

Объемы

Прямой цилиндр

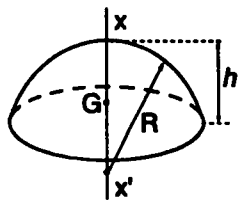


$$I_x = \frac{\pi R^4 h}{2} = M\frac{R^2}{2}$$

$$I_y = \frac{\pi R^2 h}{4}\left(\frac{h^2}{3} + R^2\right) = \frac{M}{4}\left(\frac{h^2}{3} + R^2\right)$$

Шаровой сегмент

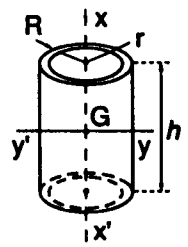
$$I_x = M\left(\frac{2h}{3R - h}\right)\left(R^2 - \frac{3Rh}{4} + \frac{3h}{20}\right)$$



Полушар

$$I_x = \frac{2}{5}MR^2$$

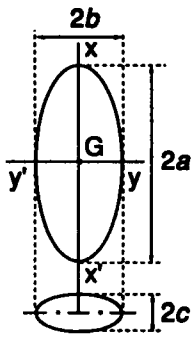
Цилиндрический слой



$$I_x = \frac{\pi h(R^4 - r^4)}{2} = \frac{M}{2}(R^2 + r^2)$$

$$I_y = \frac{\pi h(R^2 - r^2)}{4}\left(\frac{h^2}{3} + R^2 + r^2\right) = \frac{M}{4}\left(\frac{h^2}{3} + R^2 + r^2\right)$$

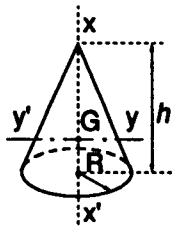
Трехосный эллипсоид



$$I_x = \frac{M}{5}(b^2 + c^2)$$

$$I_y = \frac{M}{5}(a^2 + c^2)$$

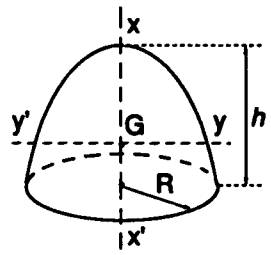
Прямой конус



$$I_x = \frac{\pi R^4 h}{10} = \frac{3}{10}MR^2$$

$$I_y = \frac{\pi R^2 h}{10}\left(R^2 + \frac{h^2}{4}\right) = \frac{3M}{10}\left(R^2 + \frac{h^2}{4}\right)$$

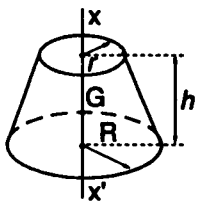
Параболоид вращения



$$I_x = M\frac{R^2}{3}$$

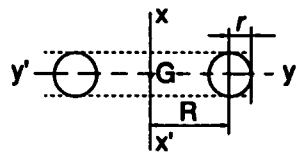
$$I_x = \frac{M}{18}(3R^2 + h^2)$$

Усеченный конус



$$I_x = \frac{3M}{10}\frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3}$$

Тор



$$I_x = \frac{M}{4}(4R^2 + 3r^2)$$

$$I_y = \frac{M}{8}(4R^2 + 5r^2)$$

Объемы (окончание).

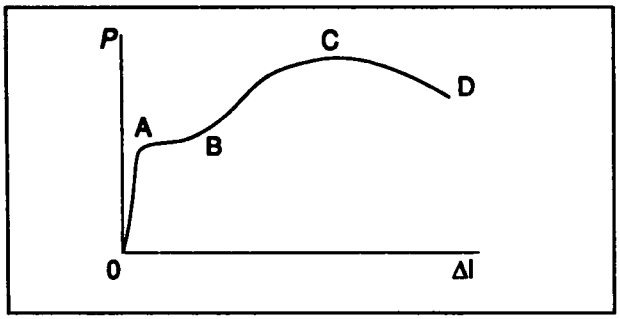
1.5.4. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

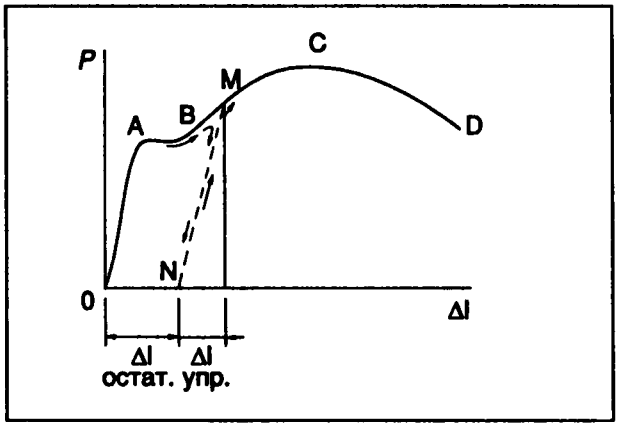
Этот раздел касается только традиционных материалов, в частности металлов, но не термопластиков (см. разд. 1.5.5).

1.5.4.1. Базовые эксперименты

1.5.4.1.1. Растяжение

Опыт с нормализованными образцами NFA 03-151.





OA – упругая зона,

AB – зона течения (если она существует),

BC – зона упрочнения: упругое поведение между M и N после снятия нагрузки F (MN параллельно OA), упрочнение улучшает предел упругости,

D – точка разрыва.

1.5.4.1.1.1. Условные величины

$R_{p_{0,2}}$ – предел упругости при 0,2% остаточного удлинения,

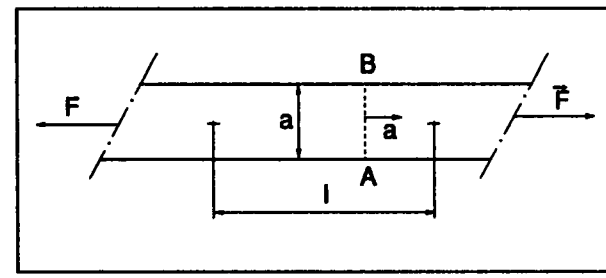
R_m – разрывная нагрузка (отнесенная к Ω_0).

1.5.4.1.1.2. После разрыва

Если Ω есть площадь поперечного сечения, то

$$\text{сужение} = \frac{\Omega_0 - \Omega_{min}\text{ при разрыве}}{\Omega_0} \text{ в \%},$$

условное удлинение $A = \frac{\Delta l_r}{l}$ образца (в %) при разрыве, расстояние l нормализовано в зависимости от сечения Ω_0 до приложения нагрузки: $l = 5{,}65\sqrt{\Omega_0}$, напряжение на площадке AB, вообще говоря, нормальное.



1.5.4.1.1.3. В упругой зоне

1.5.4.1.1.3.1. В направлении силы $\vec{F}$

Закон Гука:

$$\frac{F}{\Omega_0} = E\frac{\Delta l}{l} \text{ или } \boxed{\sigma = E\varepsilon}$$

E – модуль упругости или модуль Юнга,

σ – напряжение растяжения (нормальное напряжение),

ε – относительное удлинение,

Ω_0 – сечение образца (не деформированного).

1.5.4.1.1.3.2. Перпендикулярно $\vec{F}$

В опыте наблюдается и поперечное сжатие $i = \frac{\Delta a}{a}$, каким бы ни было направление отрезка a в плоскости, перпендикулярной силе

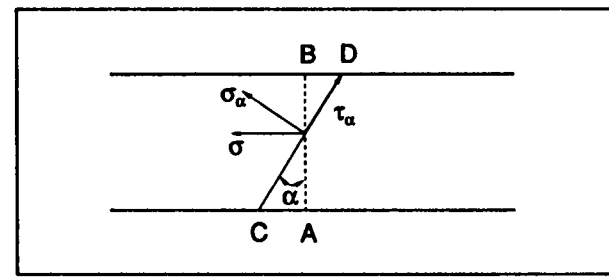
$$\boxed{i = \nu\varepsilon}$$

ν – коэффициент Пуассона.

Поведение кривых растяжения для стали:

OABC: полумягкая сталь,

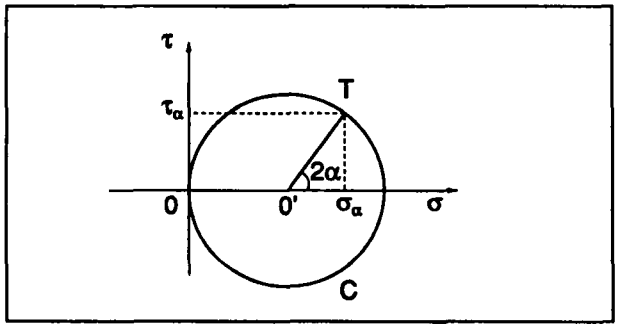
жесткая сталь: постепенное исчезновение AB.



На наклонной площадке CD есть нормальное напряжение σ_α и касательное напряжение τ_α:

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \frac{\sigma}{2}(1 + \cos 2\alpha) \\ \tau_\alpha = \frac{\sigma}{2}\sin 2\alpha \end{cases}$$ – уравнения круга Мора C.

Круг Мора для чистого растяжения дает τ_α как функцию σ_α.



При чистом сжатии σ отрицательна по определению.

1.5.4.1.1.4. Изотропные материалы

Стали одинаково хорошо сопротивляются и растяжению, и сжатию.

1.5.4.1.1.5. Анизотропные материалы

1.5.4.1.1.5.1. Более стойкие к растяжению

Прокатанный алюминий.

Композитные материалы: новые материалы.

Стеклянное волокно.

Трубы из стекловолокна, проклеенного древесной смолой– разрыв $R_m = 350 - 400$ Н · мм$^{-2}$, сравнимо со средней сталью, однако слабо сопротивляются удару.

1.5.4.1.1.5.2. Более стойкие к сжатию

Большинство строительных материалов.

Чугуны.

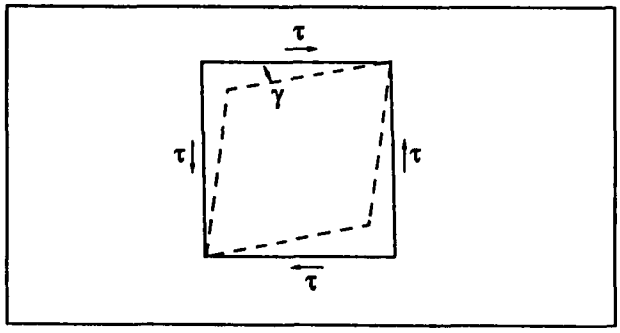
Металлы и сплавы: медь, цинк, свинец, олово, бронза, латунь.

Дерево.

Бетоны.

Грунты произвольной природы.

1.5.4.1.2. Чистый сдвиг и кручение



Малая квадратная площадка, подвергнутая чистому сдвигу

Малый угол γ искажения квадратного в состоянии равновесия сечения под действием напряжений сдвига таков, что

$$\tau = G\gamma,$$

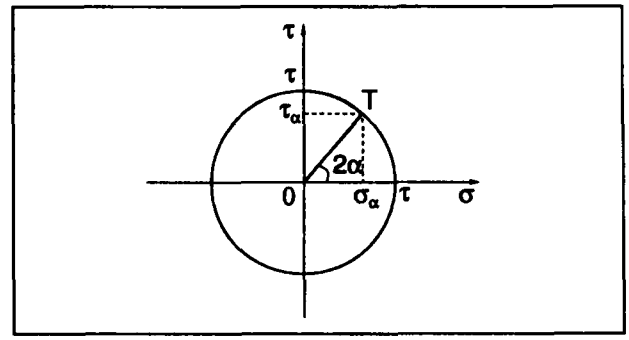
G – модуль упругости сдвига, или модуль жесткости при скольжении, или константа Кулона (обозначаемая в этом случае μ).

Можно показать, что:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad G = \mu$$

На наклонной площадке CD имеются нормальное напряжение σ_α и касательное напряжение τ_α,

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \tau \sin 2\alpha \\ \tau_\alpha = \tau \cos 2\alpha \end{cases}$$



Круг Мора для чистого сдвига

1.5.4.1.2.1. Кручение тонкой трубы парой C (см. рис. на с. 60)

Точка B переходит в B':

$$\tau = \frac{C}{2\pi\rho^2\theta}$$

ρ – радиус трубы.

Искажение: $\gamma = \frac{\tau}{G}$ (деформация малого квадрата).

Угол поворота сечения трубы по отношению к другому сечению:

$$\varphi = \gamma\frac{l}{\rho}$$

Угол относительного поворота:

$$\theta = \frac{\varphi}{l}$$

1.5.4.1.2.2. Кручение толстой трубы

Крутящая пара:

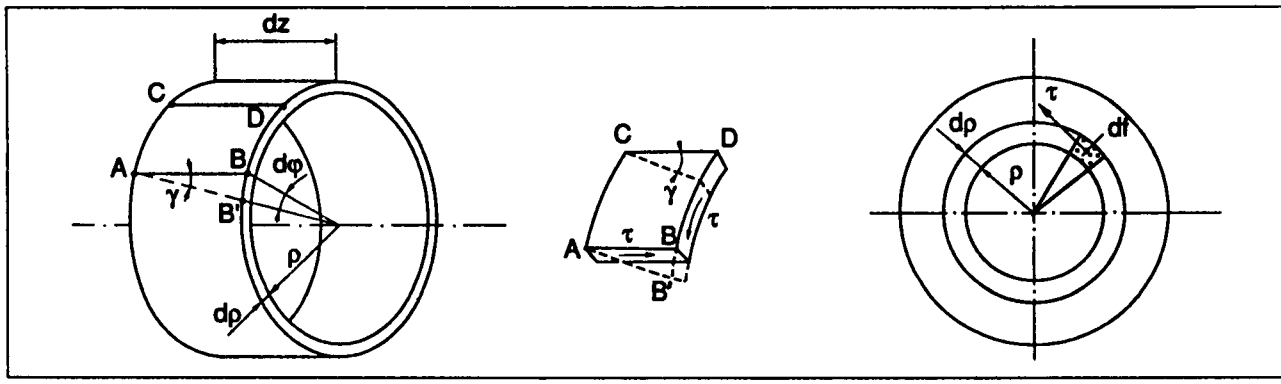
$$C = G\theta J_p = G\frac{\varphi}{l}J_p$$

J_p – полярный момент инерции сечения:

$$\frac{\pi(R^4 - r^4)}{2}$$

Напряжение сдвига: $\tau = \frac{C \cdot \rho}{J_p}$, пропорциональное рассматриваемому радиусу,

$$\tau_{max} = \frac{CR}{J_p}$$

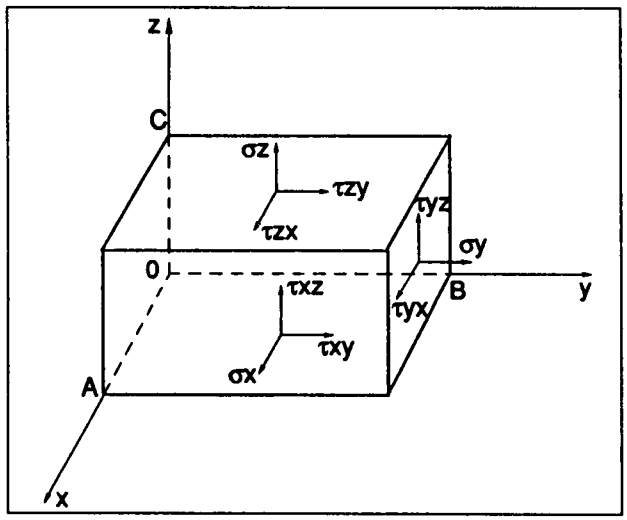


Кручение тонкой трубы.

1.5.4.2. Напряженное состояние в сплошной среде

Чтобы определить напряженное состояние в точке 0, следует ввести напряжения на гранях элементарного параллелепипеда, построенного в 0, и требуется три раза по три составляющих напряжений; условия равновесия требуют, чтобы

$$\tau_{xy} = \tau_{yx},\ \tau_{yz} = \tau_{zy},\ \tau_{zx} = \tau_{xz}$$



Напряжения, действующие на гранях элементарного параллелепипеда.

Тензор напряжений

$$\left\| \begin{matrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{matrix} \right\|$$

симметричен, т.к. $\overrightarrow{\mathfrak{M}_0}(\sum \vec{F}) = 0$.

На элементарной плоской площадке, проходящей через 0 с единичной нормалью $\vec{u}$, имеющей направляющие косинусы α, β, γ, составляющие полного напряжения $\vec{\Sigma}$ (по осям $\vec{0x}$, $\vec{0y}$, $\vec{0z}$) равны:

$$\vec{\Sigma} = \begin{cases} X = \sigma_x\alpha + \tau_{yx}\beta + \tau_{zx}\gamma \\ Y = \tau_{xy}\alpha + \sigma_y\beta + \tau_{zy}\gamma \\ Z = \tau_{xz}\alpha + \tau_{yz}\beta + \sigma_z\gamma \end{cases}$$

Нормальная к площадке составляющая есть:

$$n = X\alpha + Y\beta + Z\gamma = \vec{\Sigma} \cdot \vec{u}$$

Координаты нормального напряжения таковы:

$$\vec{n} = \begin{cases} n\alpha = X_n \\ n\beta = Y_n \\ n\gamma = Z_n \end{cases}$$

Касательное к элементарной площадке напряжение:

$$\vec{t} = \vec{\Sigma} - \vec{n}$$

$$\vec{t} = \begin{cases} (\sigma_x - n)\alpha + \tau_{yx}\beta + \tau_{zx}\gamma = X_t \\ \tau_{xy}\alpha + (\sigma_y - n)\beta + \tau_{zy}\gamma = Y_t \\ \tau_{xz}\alpha + \tau_{yz}\beta + (\sigma_z - n)\gamma = Z_t \end{cases}$$

Если $\vec{t} = 0$, получается площадка, на которой имеется только нормальное напряжение.

Система $X_t = 0$, $Y_t = 0$, $Z_t = 0$ относительно направляющих косинусов предполагает, что ее определитель равен нулю:

$$n^3 - n^2 J_1 + nJ_2 - J_3 = 0,$$

где:

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

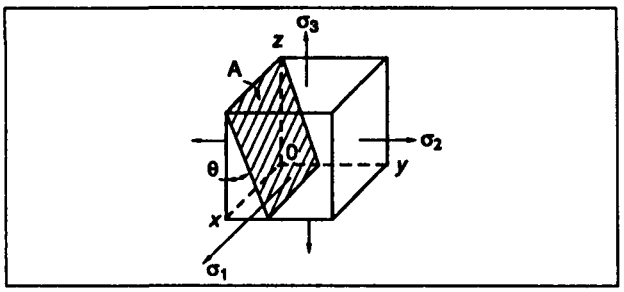
$$J_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2$$

$$J_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}.$$

Таким образом, три действительных корня уравнения 3-й степени дают три нормальных напряжения.

Система дает тройку направляющих косинусов для каждого из трех перпендикулярных друг другу направлений. Это – главные направления, нормальные к трем главным плоскостям, на каждой из которых имеются только нормальные напряжения σ_1, σ_2, σ_3, называемые главными напряжениями. J_1, J_2 и J_3 не зависят от выбора осей координат (инварианты).

В главных осях $\vec{0x}$, $\vec{0y}$, $\vec{0z}$ можно рассмотреть плоскость, параллельную 0x и наклоненную под углом θ, на которой имеются напряжения σ_x и τ_x.

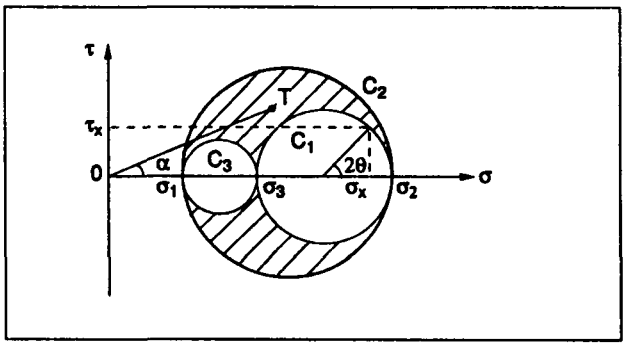


Таким образом:

$$\begin{cases} \sigma_x(\theta) = \dfrac{\sigma_2+\sigma_3}{2} + \dfrac{\sigma_2-\sigma_3}{2}\cos 2\theta \\ \tau_x(\theta) = \dfrac{\sigma_2-\sigma_3}{2}\sin 2\theta \end{cases}$$

Изменение $\tau_x(\theta)$ в зависимости от $\sigma_x(\theta)$ для всех значений θ представляются с помощью круга Мора.

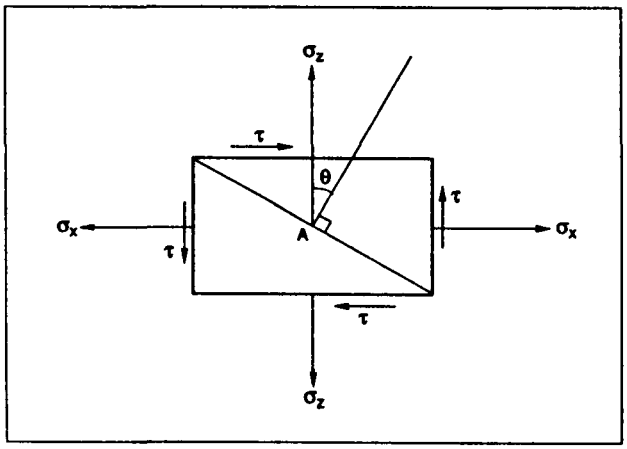
Состояние напряжений в 0 представляется тремя кругами Мора, соответствующими трем семействам плоскостей, параллельных соответственно главным направлениям 0*x*, 0*y*, 0*z*.



T(σ, τ) в заштрихованной зоне – напряжения на произвольной площадке.

1.5.4.2.1. Практически важный случай

На практике очень часто приходится иметь дело с плоским напряженным состоянием.



Пример: тонкая свободная закрытая труба, подверженная внутреннему давлению, чистому изгибу и касательному усилию, вызванному кручением (или весьма большой срезывающей нагрузкой). Точка A соответствует крайнему волокну, растянутому или сжатому.

x – продольная ось,

z – поперечная ось,

$\sigma_z = \sigma_t =$ поперечное напряжение, вызванное давлением $= \dfrac{PR}{e}$,

$\sigma_1 =$ продольное напряжение, вызванное давлением $= \dfrac{PR}{2e}$,

$\sigma_f =$ максимальное напряжение изгиба $= \pm\dfrac{M_f R}{I} = \pm\dfrac{M_f}{\pi e R^2}$,

$\sigma_x = \sigma_1 + \sigma_f$,

$\tau =$ касательное напряжение кручения $= \dfrac{M_t R}{Jp} = \dfrac{M_t}{2\pi e R^2}$

$\tau = \tau_{xz} = \tau_{zx}$

Имеем:

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_z$$

$$J_2 = \sigma_x \cdot \sigma_z - \tau^2$$

$$J_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & 0 & \tau \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau & 0 & \sigma_z \end{vmatrix} = 0$$

Имеем:

$$\sigma_2 = 0 \text{ и } n^2 - nJ_1 + J_2 = 0,$$

откуда

$$n = \frac{\sigma_z+\sigma_x}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_z-\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau^2\right]^{\frac{1}{2}} = \begin{cases} \sigma_3 \\ \sigma_1 \end{cases}$$

Главные направления таковы, что:

$$\vec{t} = \begin{cases} (\sigma_x - n)\alpha + \tau\gamma = 0 \\ \tau\alpha + (\sigma_z - n)\gamma = 0, \end{cases}$$

где

$\alpha = \cos\theta$,

$\gamma = \sin\theta$,

поэтому

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\tau}{\dfrac{\sigma_x-\sigma_z}{2} \pm \left[\left(\dfrac{\sigma_x-\sigma_z}{2}\right)^2 + \tau^2\right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{n-x}{\tau} = \frac{\tau}{n-z}$$

имеем:

$$\sigma_3 - \sigma_1 = [(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau^2]^{1/2}$$

1.5.4.2.2. Уравнения равновесия

Если внешние силы в расчете на единицу объема имеют результирующую с координатами X, Y, Z,

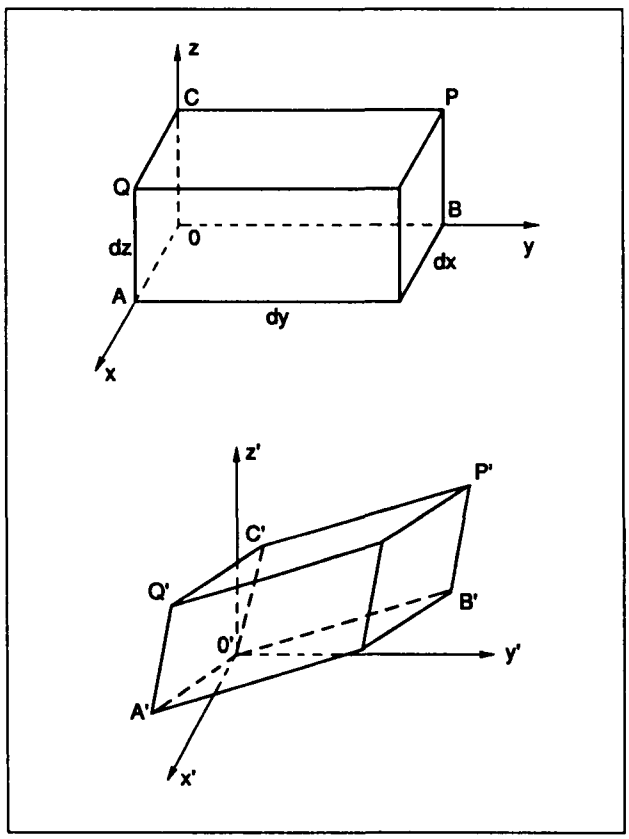
то условия равновесия элементарного параллелепипеда требуют, чтобы:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \\ \dfrac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \dfrac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y = 0 \\ \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \dfrac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0 \end{cases}$$

1.5.4.3. Деформации и перемещения

О результатах, которые часто относятся к малым деформациям. Точка 0 после деформирования тела переходит в 0',

$$\text{Пусть } \overrightarrow{00'} = \begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases} \text{ перемещения}$$



Перемещения и деформации элементарного параллелепипеда

Для каждой из шести вершин элементарного параллелепипеда определен вектор перемещения.

Например:

$$\overrightarrow{AA'} = \begin{cases} u + \dfrac{\partial u}{\partial x} dx \\ v + \dfrac{\partial v}{\partial x} dx \\ w + \dfrac{\partial w}{\partial x} dx \end{cases}$$

$$\overrightarrow{BB'} = \begin{cases} u + \dfrac{\partial u}{\partial y} dy \\ v + \dfrac{\partial v}{\partial y} dy \\ w + \dfrac{\partial w}{\partial y} dy \end{cases}$$

и

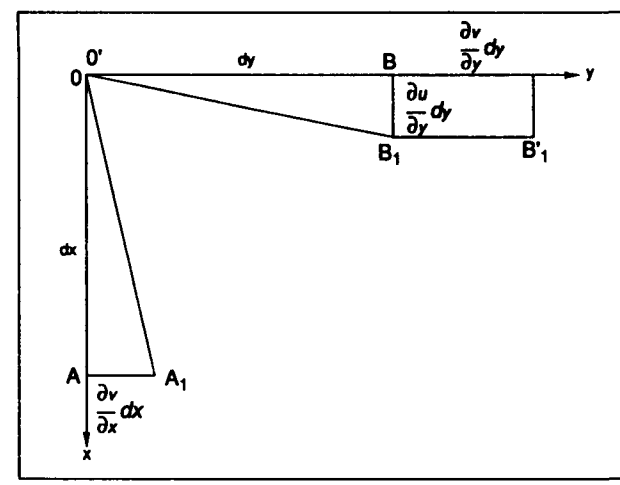
$$\overrightarrow{O'A'} = \overrightarrow{OA'} - \overrightarrow{OO'}$$

Ширина OA параллелепипеда (dx) претерпевает относительное увеличение $\varepsilon_x = \dfrac{\partial u}{\partial x}$

Длина OB изменяется на $\varepsilon_y = \dfrac{\partial v}{\partial y}$ и высота OC на $\varepsilon_z = \dfrac{\partial w}{\partial z}$

Удлинения таковы:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \dfrac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \dfrac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \dfrac{\partial w}{\partial z} \end{cases}$$



Эффект искажения.

Прямой угол AOB переходит в $A_1O'B_1$ в плоскости xOy, он уменьшился на

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \text{ (углы малые)}$$

Искажения определены величинами:

$$\begin{cases} \gamma_{xy} = \dfrac{\partial v}{\partial x} + \dfrac{\partial u}{\partial y} \\ \gamma_{yz} = \dfrac{\partial w}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial z} \\ \gamma_{zx} = \dfrac{\partial u}{\partial z} + \dfrac{\partial w}{\partial x} \end{cases}$$

$$\overrightarrow{QQ'} = \begin{cases} u + \dfrac{\partial u}{\partial x}dx + \dfrac{\partial u}{\partial z}dz \\ v + \dfrac{\partial v}{\partial x}dx + \dfrac{\partial v}{\partial z}dz \\ w + \dfrac{\partial w}{\partial x}dx + \dfrac{\partial w}{\partial z}dz \end{cases}$$

Можно показать, что деформации образуют симметричный тензор:

$$\begin{Vmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \frac{1}{2}\gamma_{zx} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{zy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{Vmatrix}$$

и что существуют три главных направления: три плоскости, в которых нет искажений.

1.5.4.4. Связи между напряжениями и деформациями в сопротивлении материалов

1.5.4.4.1. Упругость (упругие тела): обобщенный закон Гука

1.5.4.4.1.1. Изотропные материалы

Искажения:

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

Удлинения:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \dfrac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \dfrac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z = \dfrac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], \end{cases}$$

поскольку нормальные напряжения вызывают удлинения, параллельные их направлениям, и сужения в двух перпендикулярных направлениях.

Кубическое расширение:

$$\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

1.5.4.4.1.2. Другая точка зрения

Коэффициенты Ламе λ и μ определяются равенствами:

$$\begin{cases} \sigma_x = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_x & \tau_{xy} = \mu\gamma_{xy} \\ \sigma_y = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_y & \tau_{yz} = \mu\gamma_{yz} \\ \sigma_z = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_z & \tau_{zx} = \mu\gamma_{zx}, \end{cases}$$

значит

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G$$

1.5.4.4.2. Термический эффект

К относительным удлинениям, вызванным напряжениями, следует добавить удлинения, вызванные увеличением температуры, например, $\varepsilon_T = \alpha_T \Delta T$, α_T – коэффициент удлинения.

Замечание:

Если помешать удлинению, возникает напряжение сжатия:

$$\sigma_T = -E\alpha_T \Delta T.$$

Поэтому имеем:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \dfrac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha_T \Delta T \\ \varepsilon_y = \dfrac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha_T \Delta T \\ \varepsilon_z = \dfrac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha_T \Delta T \end{cases}$$

1.5.4.5. Закон предельных состояний материала

Приводит:

либо к упругому пределу,

либо к разрыву.

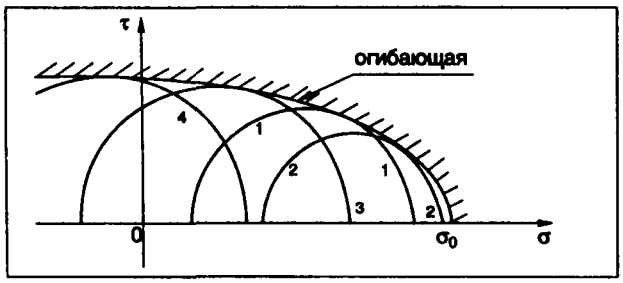
Теория предельных состояний Мора–Како в настоящее время признана всеми.

1.5.4.5.1. Предел на разрыв

Зная в точке M образца три главных напряжения, нарисуем самый большой круг Мора. Если он касается кривой, называемой огибающей Како на разрыв, в этой точке M реализуется разрыв.

Разрыв не, зависит от промежуточных напряжений, он зависит только от диаметра и положения круга Мора.

Чтобы начертить кривую Како, обычно ограничиваются построением прямых, касательных к кругам растяжения и сжатия, соответствующим разрыву; в самом деле, на практике довольно редко встречаются три нормальных напряжения сжатия или растяжения.



Круги Мора и кривая Како.
Точка σ_0 – многостороннее однородное растяжение разрыва,
σ'_0 – гидростатическое сжатие разрыва (неизвестно, как находить эти точки).

Замечание: для круга типа (C) максимальное напряжение превосходит R_m – предел на разрыв при простом растяжении, и однако, как видно на рисунке, этот круг соответствует менее опасному напряженному состоянию. Круг типа (C'), напротив, превосходит предел разрыва.

1.5.4.5.2. Предел упругости

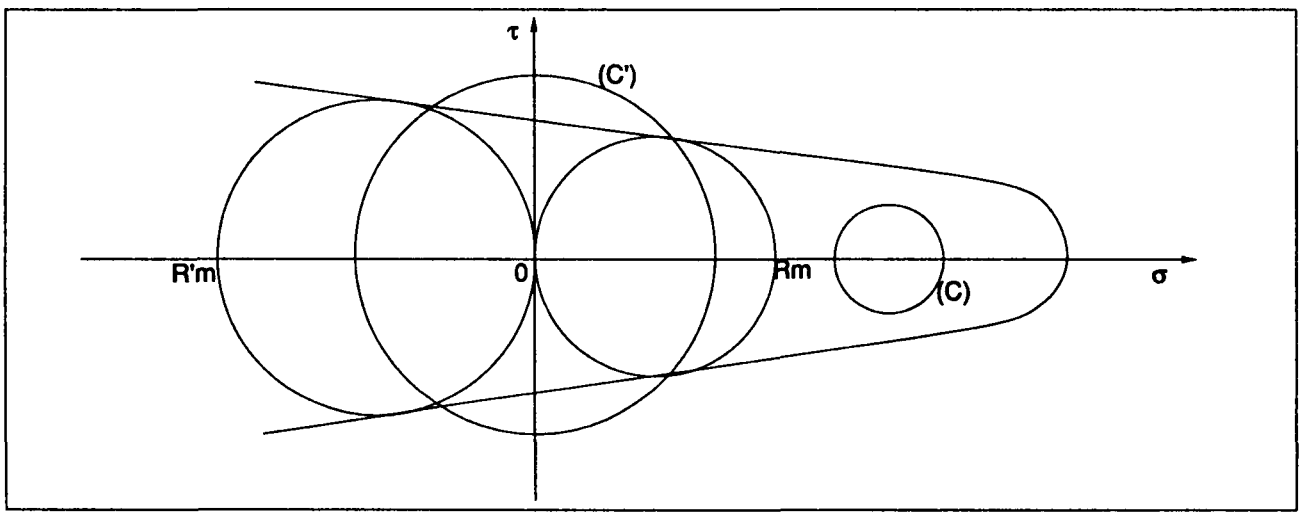
Процесс в точности такой же, существует кривая Како предельных упругих состояний, составленная в обычной области из прямых, касательных кругам растяжения и сжатия.

1.5.4.5.3. Коэффициент безопасности

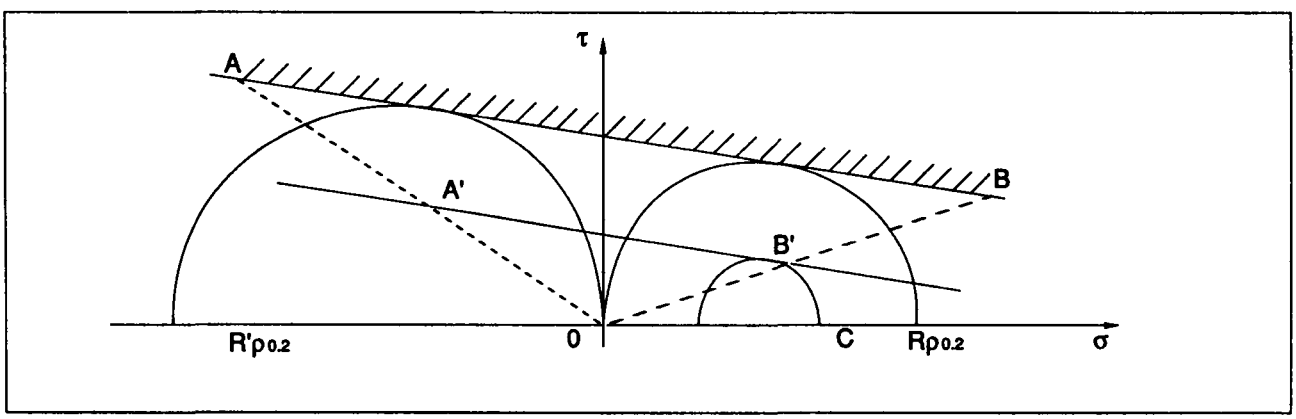
Чтобы выяснить, превосходит ли напряженное состояние в k_e раз упругий предел, пусть например $k_e < 1$, чертят кривую, гомотетичную кривой Како упругих пределов, с отношением подобия k. Если большой круг Мора касается построенной линии, то действительно коэффициент безопасности по отношению к упругому пределу есть $\frac{1}{k_e}$.

Пусть $\frac{OA'}{OA} = \frac{OB'}{OB} = \frac{1}{2}$.

Круг типа C, касательный к A'B', соответствует коэффициенту безопасности 2 по отношению к упругому пределу.

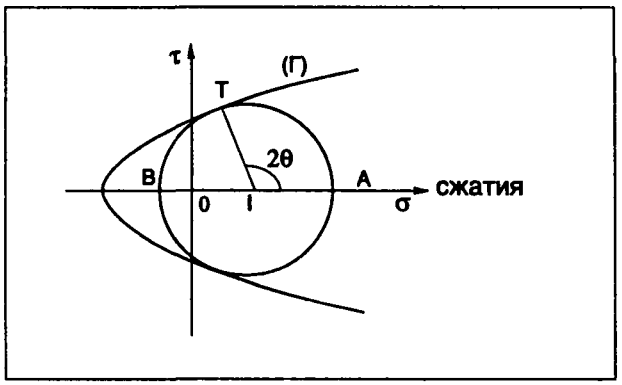


Внутренние кривые безопасности.

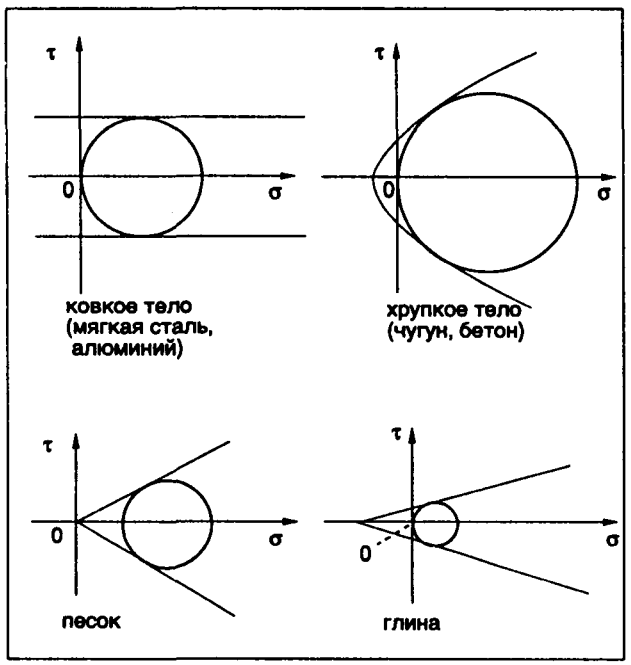


Построение внутренней кривой безопасности.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



Внутренняя кривая и круг Мора



Внутренние кривые для распространенных материалов ($\sigma > 0$ – сжатие)

1.5.4.6. Тонкие стержни и балки

1.5.4.6.1. Плоское напряженное состояние в балке или стержне

Усилия в сечении Ω с криволинейной абсциссой *s* (или *x*): действие части 0Ω на это сечение:

N – нормальное к сечению S,

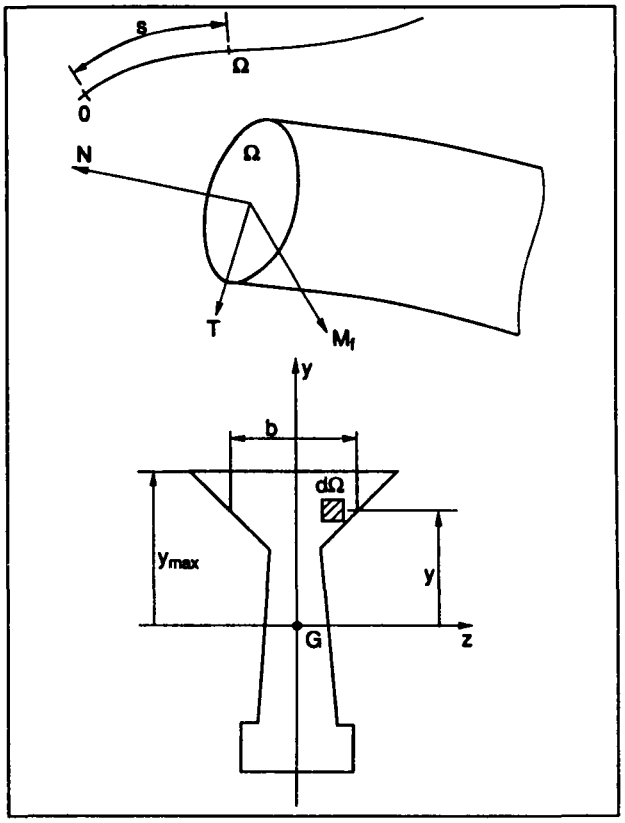
T – срезывающее (касательное),

M – изгибающий момент,

G – центр тяжести сечения. Линия, соединяющая центры тяжести – это нейтральное волокно,

I_z – момент инерции сечения относительно оси $\overrightarrow{Gz}$:

$$I_z = \int_\Omega y^2 d\Omega = I$$



Балка или стержень с плоским напряженным состоянием.

1.5.4.6.1.1. Напряжение, вызванное нормальным усилием N

$$\sigma_n = \frac{N}{\Omega}$$

1.5.4.6.1.2. Простой изгиб (случай, изображенный на рисунке)

Напряжение:

$$\sigma_F = \frac{M_z y}{I}$$

Оно увеличивается при $y > 0$ – растяжение и $y < 0$ – сжатие.

Замечание: вектор – момент изгиба лежит на оси $\overrightarrow{Gz}$.

Деформация:

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} = \frac{M}{EI}$$ (для простоты $M_z = M$),

ρ – радиус кривизны нейтрального волокна после деформирования,

ρ_0 – до деформирования.

Прямая балка:

$$\frac{1}{\rho_0} = 0, \quad \frac{1}{\rho} = y'' = \frac{d^2y}{dx^2}$$

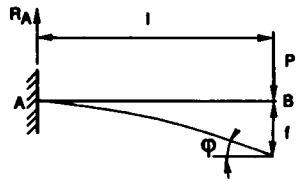
где *y* обозначает прогиб балки. Таким образом $y'' = \frac{M}{EI}$

Примеры распространенных случаев приведены ниже.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Консоли

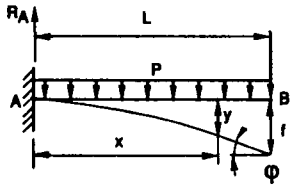
Сосредоточенная нагрузка



$R_A = P \quad M_A = -Pl \quad T = P \quad M = -P(l-x)$

$$y = -\frac{Px^2}{6EI}(3l-x) \quad f = -\frac{Pl^3}{3EI} \quad \varphi = -\frac{Pl^2}{2EI}$$

Равномерно распределенная нагрузка



$$R_A = pl \quad M_A = -\frac{Pl^2}{2}$$

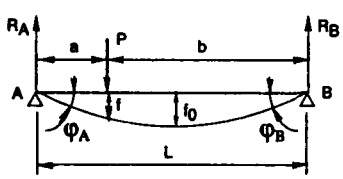
$$T = p(l-x) \quad M = -\frac{p}{2}(l-x)^2$$

$$y = -\frac{p}{24EI}[(l-x^4) + l^3(4x-l)]$$

$$f = -\frac{pl^4}{8EI} \quad \varphi = -\frac{pl^3}{6EI}$$

Балка на двух простых опорах

Сосредоточенная нагрузка



$$R_A = \frac{Pb}{l} \quad R_B = \frac{Pa}{l}$$

$$0 < x < a \quad T = \frac{Pb}{l} \quad M = \frac{Pbx}{l}$$

$$y = -\frac{Pbx}{6EIl}(l^2 - b^2 - x^2)$$

$$x = a \quad M_{max} = \frac{Pab}{l} \quad f = -\frac{Pa^2b^2}{3EIl}$$

$$a < x < l \quad T = -\frac{Pa}{l}$$

$$M = Pa\left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

$$y = -\frac{Pa}{6EIl}(l-x)[2xl - x^2 - a^2]$$

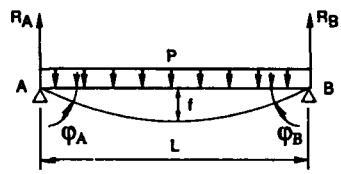
$$x = \frac{l}{2}$$

$$f_0 = -\frac{Pa}{48EI}(3l^2 - 4a^2)$$

$$\varphi_A = -\frac{Pa}{6EIl}(l-a)(2l-a)$$

$$\varphi_B = -\frac{Pa}{6EIl}(l^2 - a^2)$$

Равномерно распределенная нагрузка



$$R_A = R_B = \frac{pl}{2}$$

$$T = p\left(\frac{l}{2} - x\right) \quad M = \frac{px}{2}(l-x)$$

$$y = -\frac{px}{24EI}(l^3 - 2lx^2 + x^3)$$

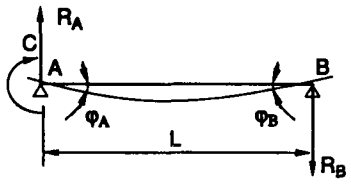
$$M_{max} = \frac{pl^2}{8} \quad \text{для} \quad x = \frac{l}{2}$$

$$f = -\frac{5}{384}\frac{pl^4}{EI}$$

$$\varphi_A = -\varphi_B = -\frac{pl^3}{24EI}$$

Изгиб балок (из справочника Дюно).

Момент на левом конце



$$R_A = -R_B = \frac{C}{l}$$

$$T = \frac{C}{l}$$

$$M = -C\frac{l-x}{l}$$

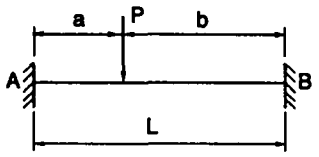
$$y = -\frac{C}{6EIl}(l-x)(2l-x)$$

для $x = \frac{l}{2}$ $\quad f = \frac{Cl^2}{16EI}$

$$\varphi_A = -\frac{Cl}{8EI} = -\varphi_B$$

Балка, заделанная на двух концах

Сосредоточенная нагрузка



$$R_A = \frac{Pb^2}{l^3}(3a+b)$$

$$R_b = \frac{Pa^2}{l^3}(a+3b)$$

$$M_A = -\frac{Pab^2}{l^2}$$

$$M_B = -\frac{Pa^2b}{l^2}$$

для $0 < x < a$

$$M = \frac{Pb^2}{l^3}[(3a+b)x - al]$$

и:

$$y = \frac{Pb^2x^2}{6EIl^3}[3al - x(l+2a)]$$

для $a < x < l$

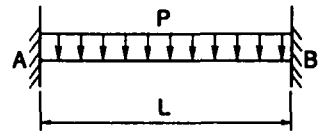
$$M = \frac{Pa^2}{l^3}[(a+3b)(l-x) - bl]$$

и:

$$y = -\frac{Pa^2(l-x)^2}{6EIl^3}[3lx - a(l+2x)]$$

$$M_P = \frac{2Pa^2b^2}{l^3} \qquad y_P = -\frac{Pa^3b^3}{3EIl^3}$$

Равномерно распределенная нагрузка, P=pl



$$R_A = R_B = \frac{pl}{2}$$

$$M_A = M_B = -\frac{pl^2}{12}$$

$$T = \frac{p(l-2x)}{2}$$

$$M = \frac{p}{12}[6x(l-x) - l^2]$$

$$y = -\frac{px^2}{24EI}(l-x)^2$$

$$\left.\begin{aligned} M_{max} &= \frac{pl^2}{24} \\ y_{max} &= -\frac{pl^4}{384EI} \end{aligned}\right\} \quad \text{для} \quad x = \frac{l}{2}$$

Изгиб балок (окончание).

1.5.4.6.1.3. Изгиб с отклонением

Если ось изгибающего момента M не совпадает с одной из главных осей инерции, рассматривают две составляющие M_z и M_y вдоль главных осей.

Нормальное напряжение:

$$\sigma = \frac{M_z y}{I_z} + \frac{M_y z}{I_y}$$

1.5.4.6.1.4. Сложный изгиб

Если M сочетается с нормальным усилием (принцип суперпозиции), то:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_f = \frac{N}{\Omega} + \frac{M_z y}{I_z} + \frac{M_y z}{I_y}$$

Замечание:

Нейтральная ось (для которой $\sigma = 0$) уже не проходит через G.

1.5.4.6.1.5. Срезывающее усилие

Связь с изгибающим моментом:

$$T = \frac{dM}{ds}$$

Порождаемые касательные напряжения:

$$\tau = \frac{T \cdot m(y)}{I \cdot b(y)},$$

$b(y)$ – ширина сечения при ординате y,

$m(y)$ – статический момент части сечения, расположенной выше ординаты y,

$$m(y) = \int_{y}^{y_{max}} y d\Omega,$$

T – срезывающее усилие,

I – момент инерции относительно $\vec{Gz}$ (всего сечения).

Деформации:

Два соседних сечения Ω и Ω' подвержены относительному переносу dv, и:

$$\frac{dv}{ds} = -\frac{T}{G\Omega_1}$$

Ω_1 – приведенное сечение, $\Omega_1 \simeq \Omega$ для тонких балок.

1.5.4.6.2. Детали с большой кривизной (крюк, кольцо)

1.5.4.6.2.1. Напряжение изгиба

$$\sigma_f = \frac{Mf}{\Omega e} \frac{y}{r_0 + y_0}$$

$$M_f = Er_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right) \Omega e$$

e – перемещение нейтрального волокна по отношению к центру тяжести:

$$e = \rho_0 - r_0$$

ρ_0 – радиус кривизны в центре тяжести:

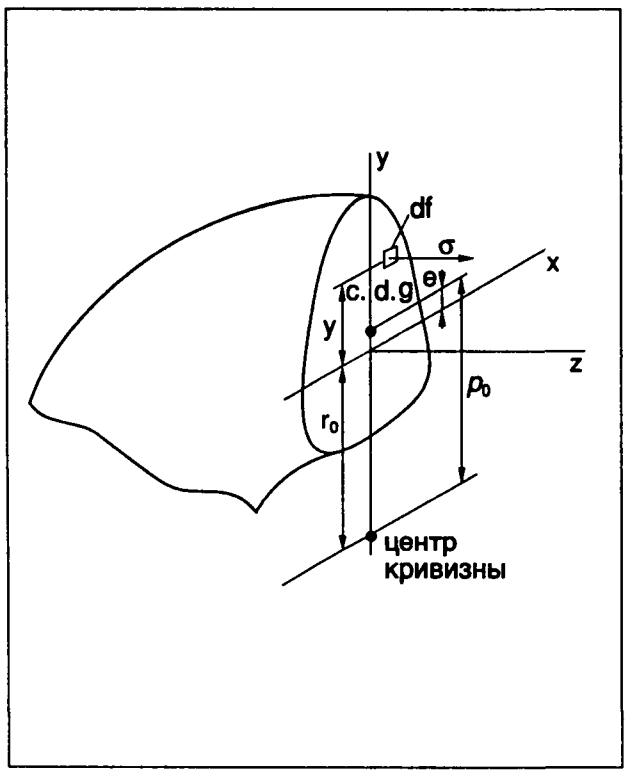
$$e = \frac{I_z}{\rho_0 \Omega}$$

1.5.4.6.2.2. Напряжение, вызванное нормальным усилием

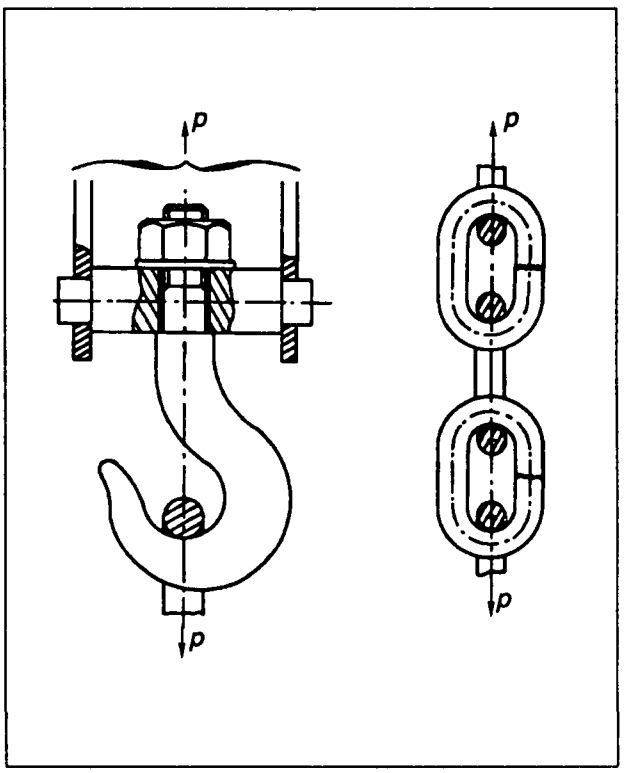
$$n = \frac{N}{\Omega}$$

r_0 таково, что

$$\int_{\Omega} \frac{y d\Omega}{r_0 + y} = 0$$



Сечение крюка.



Детали с большой кривизной: крюк, кольцо.

1.5.4.6.3. Спиральные пружины

1.5.4.6.3.1. Пружины растяжения или сжатия

α – угол винта

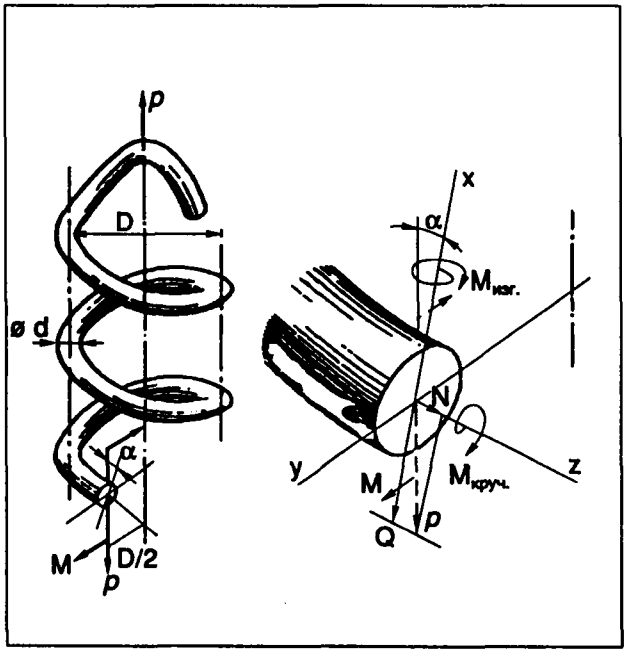
$$M_{крут.} = \frac{PD}{2}\cos\alpha$$

$$M_{изг.} = \frac{PD}{2}\sin\alpha$$

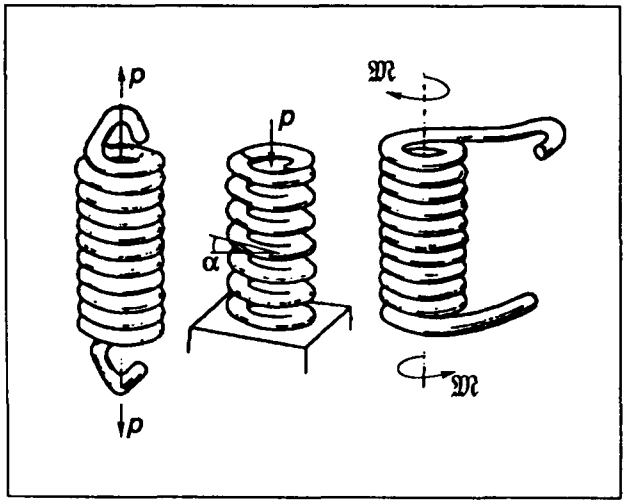
$$\tau_{max} = \frac{8PD}{\pi d^3}\left(\frac{d}{2D}\right)$$

удлинение: $\lambda = \frac{8PD^3n}{Gd^4}$

n – число витков.



Элементы пружины.



Пружины растяжения, сжатия, кручения.

Пружина растяжения: изогнутые части не рассматриваются как витки.

Пружина сжатия: не считают $\frac{3}{4}$ витка на каждом конце, поскольку они уплощены.

1.5.4.6.3.2. Пружина кручения

$M_{изг.} = \mathfrak{M} \cdot \cos\alpha$

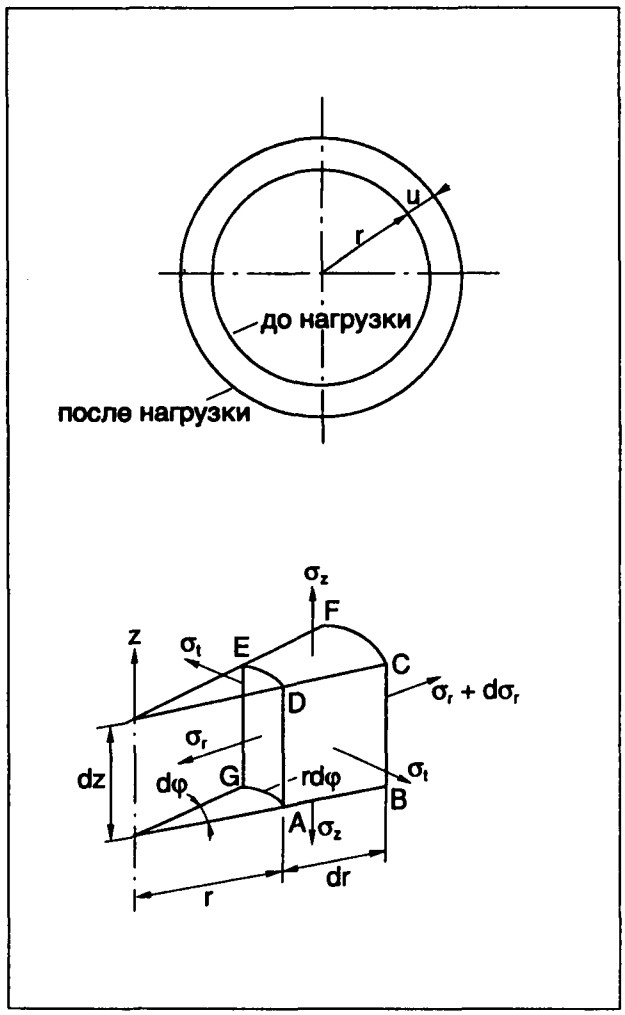
$M_{крут.} = \mathfrak{M} \cdot \sin\alpha$

Угол кручения: $\varphi = \frac{\mathfrak{M}\pi Dn}{EI_x}$

1.5.4.7. Задачи с вращательной симметрией

1.5.4.7.1. Толстостенная труба

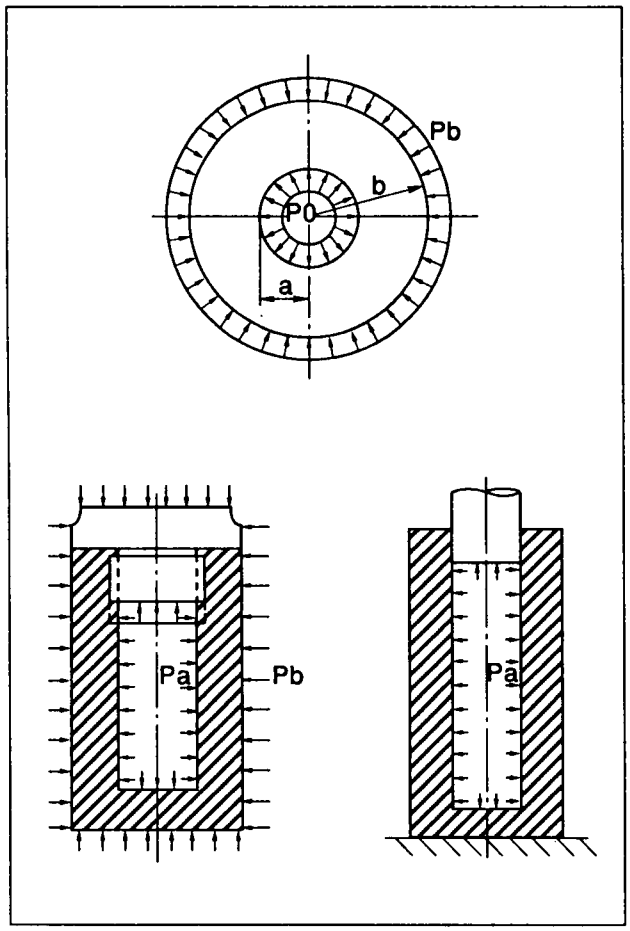
1.5.4.7.1.1. Задача Ламе



Сечение толстой трубы.

1.5.4.7.1.2. Равновесие элемента

$$\frac{d}{dr}(r\sigma_r) - \sigma_t = 0$$



Силы, действующие на толстую трубу.

$$\begin{cases} \sigma_z = \dfrac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} & \text{(равновесие оснований цилиндра)} \\ \sigma_r = \sigma_z - \dfrac{a^2 b^2}{r^2}\dfrac{p_a - p_b}{b^2 - a^2} & \text{(радиальное напряжение)} \\ \sigma_t = \sigma_z + \dfrac{a^2 b^2}{r^2}\dfrac{p_a - p_b}{b^2 - a^2} & \text{(поперечное напряжение)} \end{cases}$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \text{и} \quad \varepsilon_t = \frac{u}{r}$$

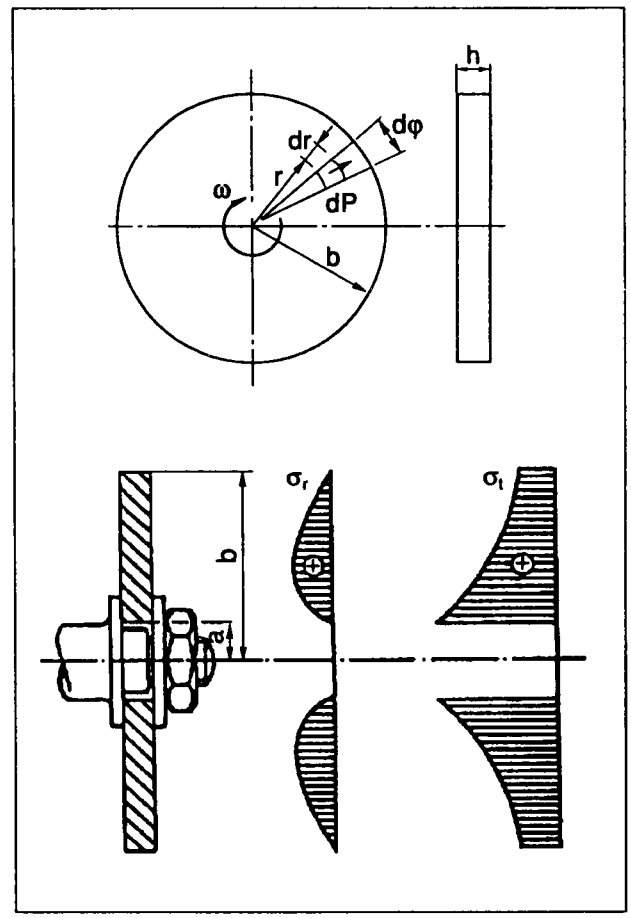
1.5.4.7.1.3. Перемещение *u*

$$u = \frac{1-\nu}{E}\sigma_z r + \frac{1+\nu}{E}\frac{a^2 b^2}{r}\frac{p_a - p_b}{b^2 - a^2}$$

Замечание:

Если цилиндр строится насаживанием (горячим или холодным) нескольких концентрических труб, его сопротивляемость внутреннему давлению увеличивается: трубы, скрепленные обручами для очень высоких давлений.

1.5.4.7.2. Быстро вращающийся диск



Быстро вращающиеся диски и распределение напряжений.

1.5.4.7.2.1. Динамическое уравнение

$$\frac{d}{dr}(r\sigma_r) - \sigma_t + \rho\omega^2 r^2 = 0$$

ρ – плотность массы.

1.5.4.7.2.2. Напряжения

$$\sigma_z = 0$$

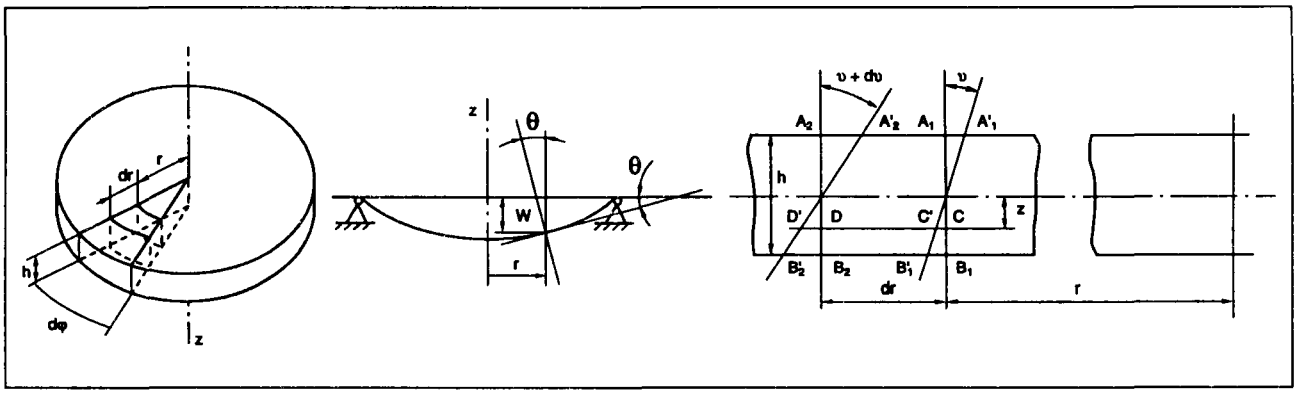
$$\sigma_r = \frac{\rho\omega^2}{8}(3+\nu)\left(b^2 + a^2 - \frac{a^2 b^2}{r^2} - r^2\right)$$

$$\sigma_t = \frac{\rho\omega^2}{8}(3+\nu)\left(b^2 + a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1+3\nu}{3+\nu}r^2\right)$$

Замечание:

Максимальные напряжения имеют место в центральной части, и диски турбин усиливаются вблизи центра.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



Изгиб круговой пластины.

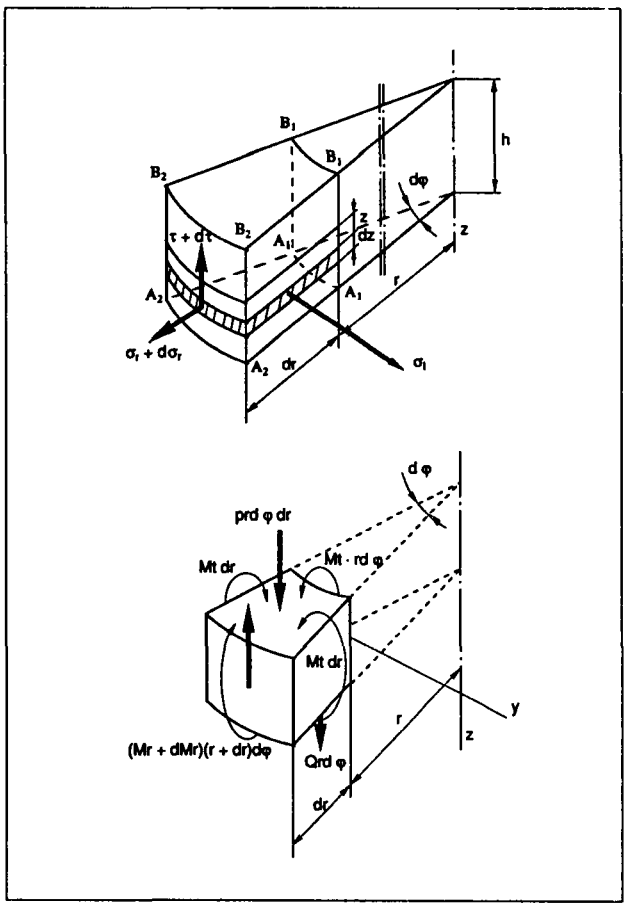
1.5.4.7.3. Изгиб круговых пластин

w – прогиб

$$\theta = -\frac{d}{dr}(w)$$

$$\varepsilon_r = z\frac{d\theta}{dr}$$

$$\varepsilon_t = z\frac{\theta}{r}$$



Усилия в элементарном объеме круговой пластины.

1.5.4.7.3.1. Напряжения

$$\begin{cases} \sigma_r = \dfrac{Ez}{1-\nu^2}\left(\dfrac{d\theta}{dr} + \nu\dfrac{\theta}{r}\right) \\ \sigma_t = \dfrac{Ez}{1-\nu^2}\left(\dfrac{\theta}{r} + \nu\dfrac{d\theta}{dr}\right) \end{cases}$$

1.5.4.7.3.2. Равновесие элемента

Равновесие элемента приводит к результатам:

— моменты:

$$\begin{cases} M_r = D\left(\dfrac{d\theta}{dr} + \nu\dfrac{\theta}{r}\right) \\ M_t = D\left(\dfrac{\theta}{r} + \nu\dfrac{d\theta}{dr}\right) \end{cases}$$

где

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$ – жесткость пластины

— срезывающее усилие Q:

$$pr = \frac{d}{dr}(Qr)$$

$$M_t - \frac{d}{dr}(M_r r) = Qr$$

$$\sigma_r = \frac{12M_r}{h}z$$

и $\sigma_t = \dfrac{12M_t}{h}z$ максимально при $z = \pm\dfrac{h}{2}$.

Для решения этой задачи начинают с расчета Q.

Равномерно нагруженная пластина, заделанная по краям:

$$\sigma_{r_{max}} = \frac{3pR^2}{4h^2}$$

$$\sigma_{t_{max}} = \frac{3\nu pR^2}{4h^2}$$

$$\sigma_z = 0$$

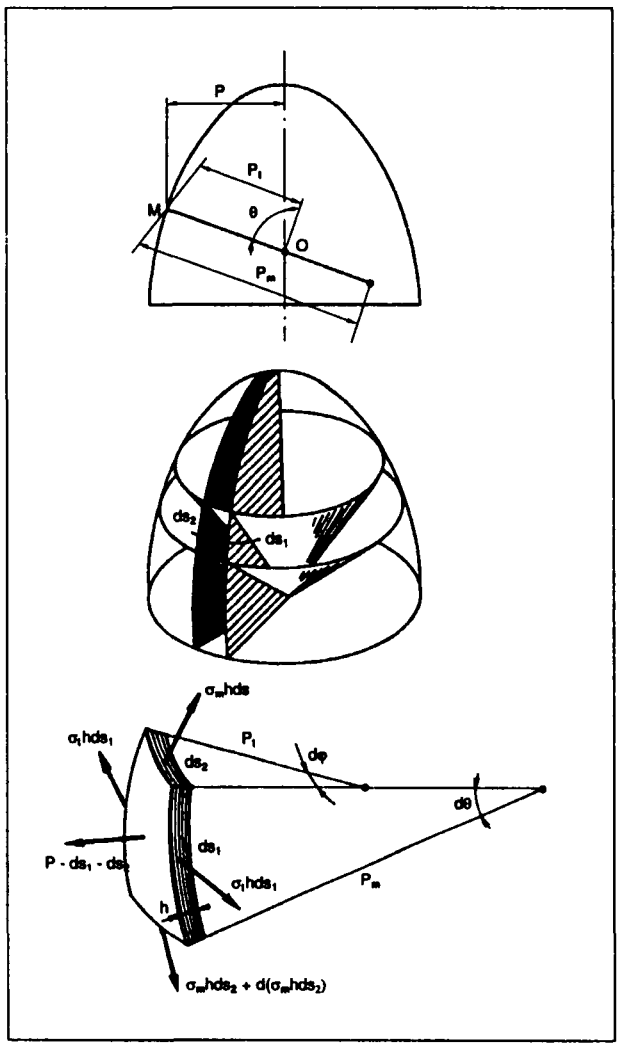
$$w_{max} = \frac{pR^4}{64D}$$

Равномерно нагруженная пластина, поддерживаемая по краям:

$$\sigma_{r_{max}} = \sigma_{t_{max}} = \frac{3(3+\nu)pR^2}{8h^2}$$

$$w_{max} = \frac{5+\nu}{1+\nu}\frac{pR^4}{64D}$$

1.5.4.7.4. Осесимметричные оболочки



Осесимметричные оболочки.

ρ_m – радиус кривизны меридиональной кривой,

ρ_t – радиус кривизны сечения оболочки плоскостью МО,

$\rho_t \sin\theta = \rho$.

Равновесие: соотношение Лапласа:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_v}{\rho_t} = \frac{p}{h}$$

Сфера:

$$\sigma_m = \sigma_t = \frac{pR}{2h}$$

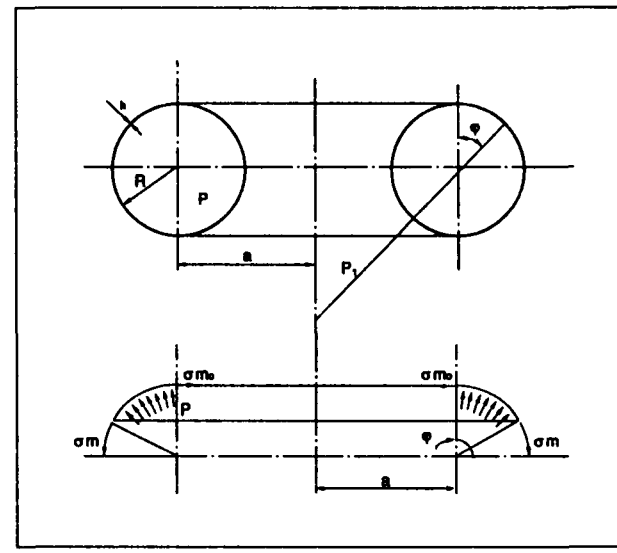
Цилиндр (сосуд):

$$\sigma_m = \frac{pR}{2h}$$

$$\sigma_t = \frac{pR}{h}$$

Сопряжение с основаниями цилиндра не должно иметь углов, иначе теория в соответствующих местах будет неприложима: появится изгиб.

Тор:



Напряжения в торе.

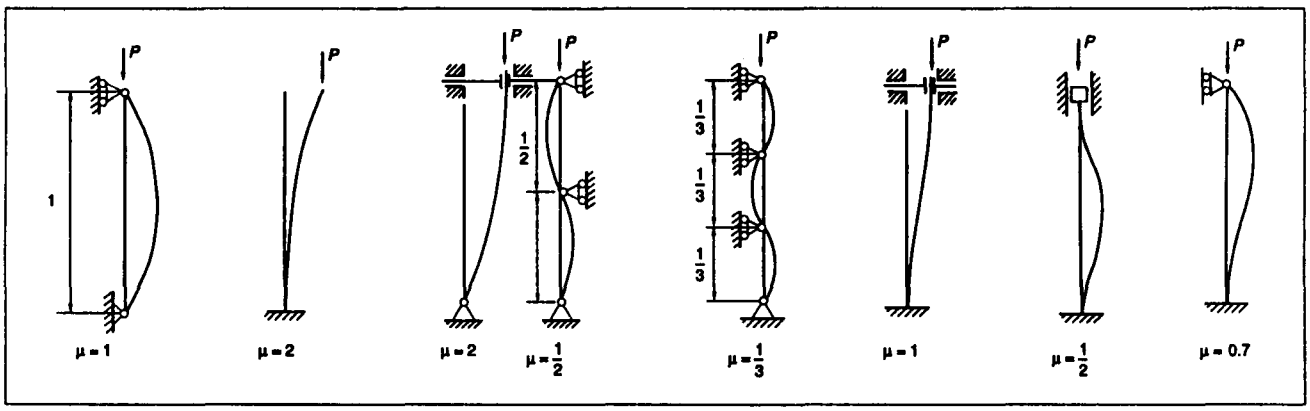
$$\sigma_m = \frac{pR}{2h}\frac{2a + R\sin\varphi}{a + R\sin\varphi}$$

$$\sigma_t = \frac{pR}{2h}$$

Видно, что

$$\sigma_{m_{max}} = \frac{pR}{2h}\frac{2a - R}{a - R}$$

вдоль внутренней параллели, при условии, что h = const, что неверно для кованого коленчатого изгиба.



Искривление.

1.5.4.8. Неустойчивость. Искривление.

1.5.4.8.1. Искривление стержней (задача Эйлера)

Критическая нагрузка, при превышении которой стержень искривляется:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 E I}{(\mu l)^2}$$

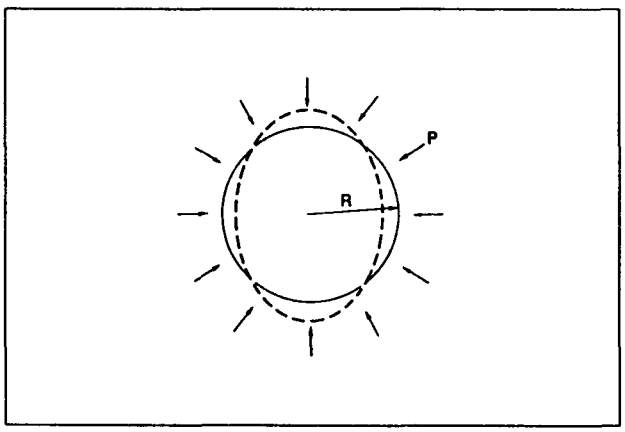
μ зависит от случая на рисунке.

1.5.4.8.2. Искривление труб путем овализации

Трубы кругового сечения подвержены воздействию внешнего давления. Овализация сечения наступает, если давление превосходит $P_{кр}$:

$$P_{кр} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{\theta}{R}\right)^3,$$

θ – толщина



Искривление труб путем овализации.

1.5.4.9. Концентрация напряжений

1.5.4.9.1. Круговые отверстия, вырезы.

d = минимальное сечение пластины,

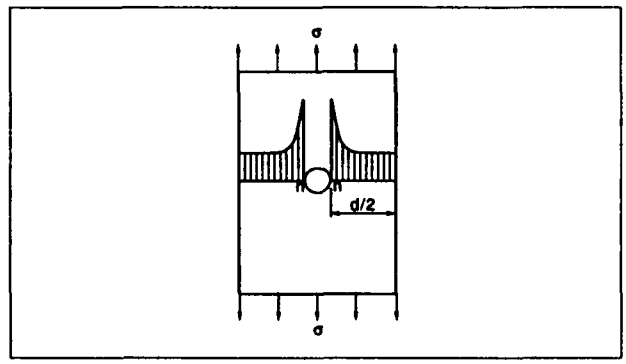
r = радиус отверстия,

$$\sigma_{moy} = \frac{F}{d}$$

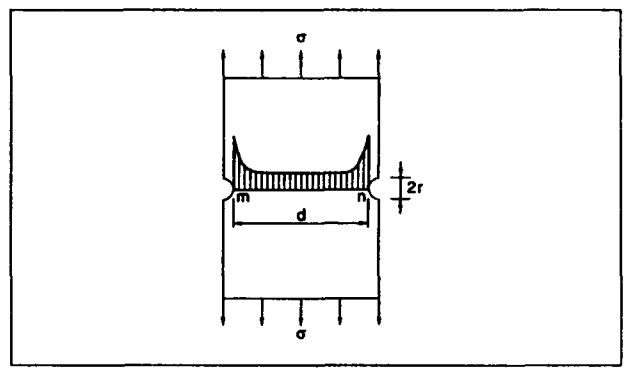
Коэффициент концентрации напряжений:

$$k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{moy}}$$

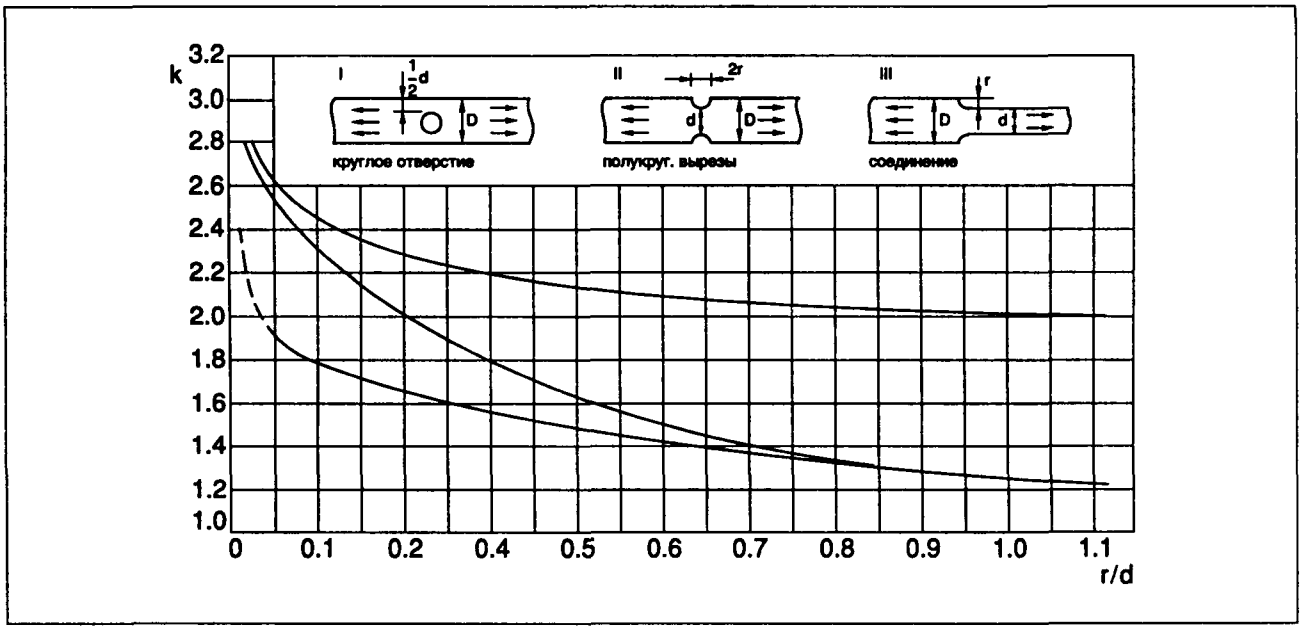
Маленькое отверстие: k стремится к 3.



Пластина с отверстием.



Пластина с полукруглыми вырезами.



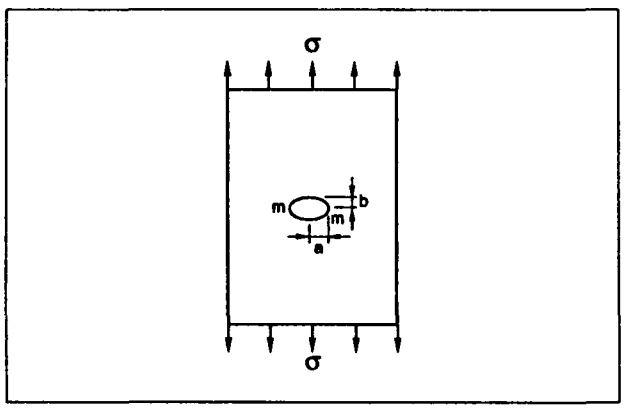
Коэффициент концентрации напряжений (k) в зависимости от отношения $\frac{r}{d}$.

1.5.4.9.2. Малое эллиптическое отверстие в пластине

$$k = 1 + 2\frac{a}{b}$$

Трещины, перпендикулярные усилию F, приводят к повышенным напряжениям в *m*.

Чтобы остановить распространение трещин, трубы протыкают в концах этих трещин.



1.5.4.10. Вибрации структур

1.5.4.10.1. Продольные вибрации стержня.

Скорость распространения волн:

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

ρ – плотность массы.

Для стали:

C_0 = 5050 м · c^{-1} – скорость звука в стержне.

Бесчисленное множество собственных частот:

$$f_n = \frac{2n-1}{4l}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Основная частота:

$$\frac{1}{4l}\sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

l – длина.

1.5.4.10.2. Поперечные или изгибные вибрации стержня

См. таблицу на с. 75

Бесконечное количество собственных частот:

$$f = \frac{A}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{Ml^3}},$$

M – масса стержня.

Обычно рассматривают только основную моду.

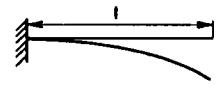
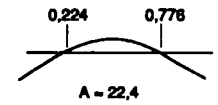
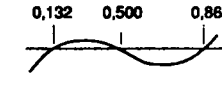
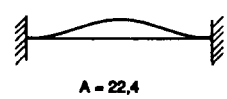
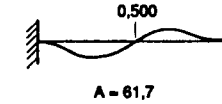
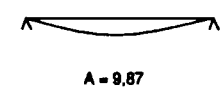
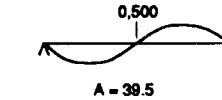
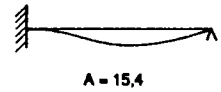
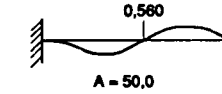
Замечание:

Уравнение, регулирующее изгибные вибрации, есть:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EI\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) = \rho S\frac{\partial^2 y}{\partial t^2},$$

ρ – плотность материала,

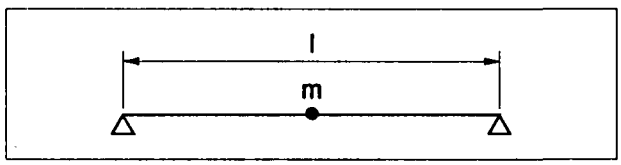
S – сечение стержня.

Закрепление концов	Моды	
	1	2
Заделанный–свободный	 A = 3,52	 A = 22,03
Свободный–свободный	 A = 22,4	 A = 61,7
Заделанный–заделанный	 A = 22,4	 A = 61,7
Опора–опора	 A = 9,87	 A = 39.5
Заделанный–опора	 A = 15,4	 A = 50,0

Множитель A в зависимости от случая на рисунке для двух первых мод вибрации.

1.5.4.10.3. Стержень с массой в середине

1.5.4.10.3.1. На опорах

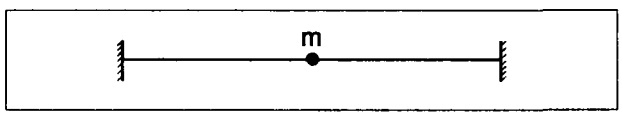


Рассмотрим только одну моду вибрации – основную:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{48EI}{(m+\frac{17}{35}M)\,l^3}}$$

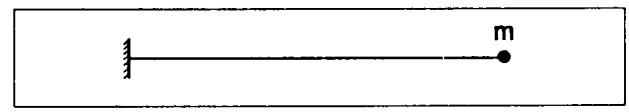
M – общая масса балки.

1.5.4.10.3.2. Заделанные концы



$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{192EI}{(m+\frac{13}{35}M)\,l^3}}$$

1.5.4.10.4. Консоль с массой на конце



$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3EI}{(m+\frac{33}{140}M)\,l^3}}$$

Замечание:

Наличие m уменьшает собственную частоту.

1.5.4.10.5. Вибрации в бесконечной среде

Скорости распространения звука. Есть два вида волн:

— продольные волны:

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$$

(волны сжатия-растяжения, когда частицы движутся в направлении распространения),

— поперечные волны:

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

(волны искажения, когда частицы перемещаются перпендикулярно).

λ и μ - коэффициенты Ламе.

Для стали: $c_1 = 6\,100$ м · с$^{-1}$

$c_2 = 3\,300$ м · с$^{-1}$

1.5.4.11. Бетон

1.5.4.11.1. Цемент

Полученный термообработкой (при 1450°C) затем измельчением (до 15μm) смеси известняка и глин, он содержит ангидриды (CaO, SiO_2, Al_2O_3).

1.5.4.11.2. Минимальная дозировка цемента

250 кг на кубометр армированного бетона и 350 кг на кубометр предварительно напряженного бетона.

Гравий 5/25 мм	1300 кг
Песок 0.8/5 мм	550 кг
Цемент	350 кг
Вода	200 кг
Всего	2400 кг

Средний состав одного кубометра армированного бетона для изделий искусства.

Вместе с арматурой, плотность армированного бетона 2,5.

Бетон должен быть подвергнут виброобработке.

1.5.4.11.3. Расчеты, разрыв

1.5.4.11.3.1. Сопротивление сжатию

Бетон в возрасте j дней: σ'_j (МПа) растет с дозировкой (кг · м$^{-3}$) цемента.

В среднем:

$$\sigma'_{28} = 0{,}075\ C \text{ или } 26{,}5 \text{ МПа}$$

для $C = 350$ кг · м$^{-3}$

$$\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{28}} = 0{,}5, \quad \frac{\sigma'_{365}}{\sigma'_{28}} = 1{,}3.$$

1.5.4.11.3.2. Сопротивление растяжению

$\sigma_j \simeq 0{,}7 + 0{,}06\sigma'_j$, но в расчетах считается нулем: хрупкий взрыв.

Мгновенный модуль упругости:

$E_j = 6\,600\sqrt{\sigma'_j}$ (МПа) или $E_j = 36\,000$ МПа, если $\sigma'_j = 30$ МПа.

За пределами упругого сокращения поведение упруго-пластическое.

1.5.4.11.3.3. Усушка: уменьшение объема бетона при высыхании

$\varepsilon_r = 0$ – воздух, насыщенный влагой

$\varepsilon_r = (2 - 4) \cdot 10^{-4}$ – Франция

$\varepsilon_r = 6 \cdot 10^{-4}$ – сухой воздух (пустыня).

Если противодействовать усушке, бетон подвергается растяжению, риск появления трещин; следует увлажнять поверхность в течение двух-трех недель.

1.5.4.11.3.4. Течение

Под воздействием постоянного σ бетон испытывает мгновенное сокращение ε_i, затем продолжает сжиматься. Течение достигает максимума через четыре года, и $\varepsilon_f = 2\ \varepsilon_i$. Полное сокращение равно $\varepsilon_d \simeq 3\ \varepsilon_i$. Псевдо-модуль полной деформации $E_d \simeq \dfrac{E_i}{3} \simeq 2\,200\sqrt{\sigma'_j} \simeq 12\,000$ МПа.

1.5.4.11.3.5. Армированный бетон

Деформации бетона и стали одинаковы:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_b = \varepsilon$$

и (закон Гука):

$$\varepsilon = \frac{\sigma_a}{E_a} = \frac{\sigma_b}{E_b}$$

Коэффициент эквивалентности сталь-бетон:

$$n = \frac{E_a}{E_b} = \frac{\sigma_a}{\sigma_b}$$

Для простоты берут $n = 15$:

$E_a = 210000$ МПа, $E_b = 14000$ МПа

Гипотеза расчета на изгиб: сечения остаются плоскими после деформирования.

1.5.4.11.3.6. Расчетные нагрузки

$q = q_L + 1{,}2\ q_C$

q_L – постоянные нагрузки,

q_C – кратковременные нагрузки.

1.5.4.11.3.7. Допустимые напряжения

$\bar{\sigma}'_b \le 0{,}6\ \sigma'_{28}$ – максимальное напряжение для бетона,

$\bar{\sigma}'_{b_c} \le 0{,}3\ \sigma'_{28}$ – среднее напряжение сжатия.

1.5.4.11.3.8. Внутренняя кривая Како для бетонов

Напряжения сжатия рассматриваются как положительные.

Пусть x – абсцисса центра большого круга Мора, и r – его радиус; в упругой области Како дал формулу:

$$(x+x_0)^2 \geq r^2\left(1+\frac{r}{r_0}\right).$$

Внутренняя кривая есть огибающая таких кругов, что

$$(x+x_0)^2 = r^2\left(1+\frac{r}{r_0}\right).$$

Константы x_0 и r_0 выводятся при этом из знания пределов упругости при простом сжатии σ'_0 и простом растяжении σ_0 ($\sigma_0 < 0$):

$$x_0 = -\frac{\sigma_0\sigma'_0(\sigma_0^2+\sigma_0'^2)}{\sigma_0'^3+\sigma_0^3} \quad (x_0 > 0)$$

$$r_0 = \frac{\sigma_0'^3+\sigma_0^3}{8x_0(\sigma'_0-\sigma_0)}.$$

1.5.4.12. Механические характеристики распространенных материалов

См. приведенную ниже таблицу.

Практическая нагрузка:

Как правило,

0,3 - 0,4 R_p для сталей, без учета регламентаций,

0,1 R_m или R'_m для древесины.

Материалы	Условное удлинение разрыва A (%)	Модуль Юнга или упругости E (МПа)	Коэффициент Пуассона ν	Предел упругости при растяжении $R_{p_{0,2}}$ (МПа)	Напряжение разрыва при растяжении R_m (МПа)	Предел упругости при сжатии R'_p (МПа)	Напряжение разрыва при сжатии R'_m (МПа)
Тянутые стальные трубы							
TU E 220	26	210 000	0,3 (ср.)	≥220	370-490		
TU E 250	23	210 000	»	≥250	410-530	$R'_p = R_p$	$R'_m = R_m$
TU E 275	20	210 000	»	≥275	470-590	для сталей	для сталей
TU E 290	23	210 000	»	≥290	420-540		
TU E 320	21	»	0,3 (ср.)	≥320	460-580		
TU E 360	20	»	»	≥360	510-630		
TU E 415	18	»	»	≥415	550-700		
TU E 450	18	»	»	≥450	530-680		
TU E 485	18	»	»	≥480	570-720		
Ориентировочные значения (*)							
Сталь обыкновенная		210 000	0,27-0,33	210-280	380-460	$R'_p = R_p$	$R'_m = R_m$
Чугун серый	0,6	80 000	0,36		100-250		640
Чугун узловатый					170-270		700-800
Алюминий обожженный	20			20-40	50-70		
Алюминий кованый	2-8			140-160	150-190		
Алюминий		7 000	0,34				
Дюралюминий	13	7 000		240-320	380-460		
Медь обожженная	46	100 000	0,34	55	210		500
Медный прокат в стержнях	15	110 000		250	320		
Стекло		70 000	0,26		25		2,5
Бетон		28 000					20
Дуб (вдоль волокон)		10 000	не имеет смысла (анизотропия)	30	60-80		54-70
Сосна смолистая (*)		5 600	»		45		45
Ель белая (*)		13 000	»		95		50
Каучук		1 050	0,47	2			
Пробка			0				

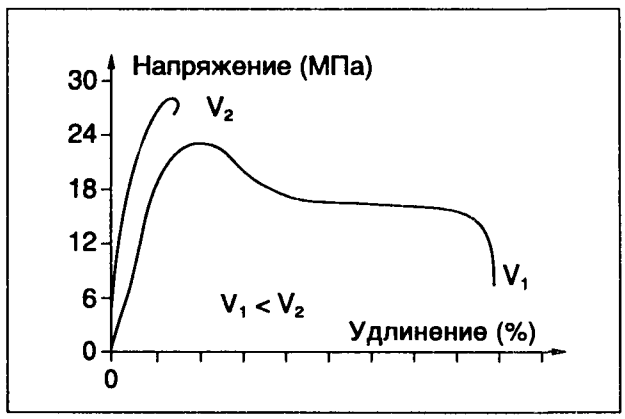
** Характеристики материалов заметно меняются в зависимости от химического состава, термической обработки, процессов изготовления. Для большей точности следует обращаться к нормам.*

1.5.5. Термопластики

В этом разделе более внимательно рассматриваются полиэтиленовые пластмассы, используемые при производстве распределительных труб (ср. § 1.10.5) для газа, но изложение касается всех термопластических материалов, с точностью до числовых значений.

1.5.5.1. Механическое поведение

Механическое поведение полиэтилена (ПЭ) заметно отличается от поведения сталей. Так, если нагрузка возрастает очень медленно, материал медленно растягивается, затем "течет" при постоянной нагрузке. Напротив, при резкой нагрузке материал рвется.



Кривые растяжения при разных скоростях нагружения.

С другой стороны, при постоянной (даже слабой) нагрузке деформация ПЭ растет со временем – материал течет. Деформация зависит не только от нагрузки, но и от времени.

Характеризация ПЭ требует применения специфических понятий:

— реология, которая позволяет описывать течения материалов,

— механическая характеризация,

— механизмы разрыва.

1.5.5.2. Реологические методы

Были получены различные уравнения для предсказания деформации материала ε в зависимости от напряжения σ.

1.5.5.2.1. Уравнение течения

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \sigma_0 \int_0^t f(t-\zeta)\,d\zeta,$$

где

$\varepsilon(t)$ – деформация в момент t,

σ_0 – начальное напряжение, постоянное во времени в случае течения,

E_0 – модуль Юнга материала при $t = 0$,

$f(t)$ – функция памяти материала.

1.5.5.2.2. Уравнение релаксации

Функция памяти при постоянной деформации $f(t-\zeta)$ определяется так, что:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E_0 + \int_{-\infty}^{\varepsilon} \varepsilon(\zeta) f(t-\zeta)\,d\zeta.$$

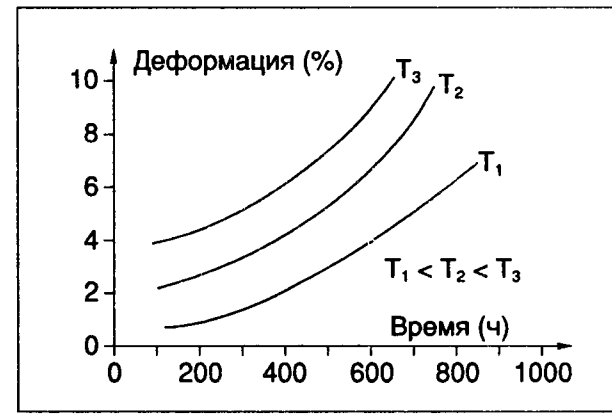
Два опыта позволяют определить реологические коэффициенты этих уравнений:

— текучесть,

— релаксация.

1.5.5.2.3. Текучесть

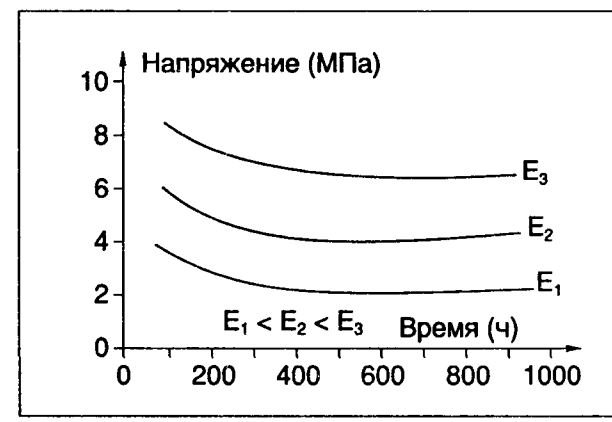
Опыт состоит в создании постоянного напряжения σ_0, действующего на образец, и регистрировании его деформации как функции времени.



Кривая текучести.

1.5.5.2.4. Релаксация

Накладывается мгновенная деформация и измеряется изменение усилия в зависимости от времени.



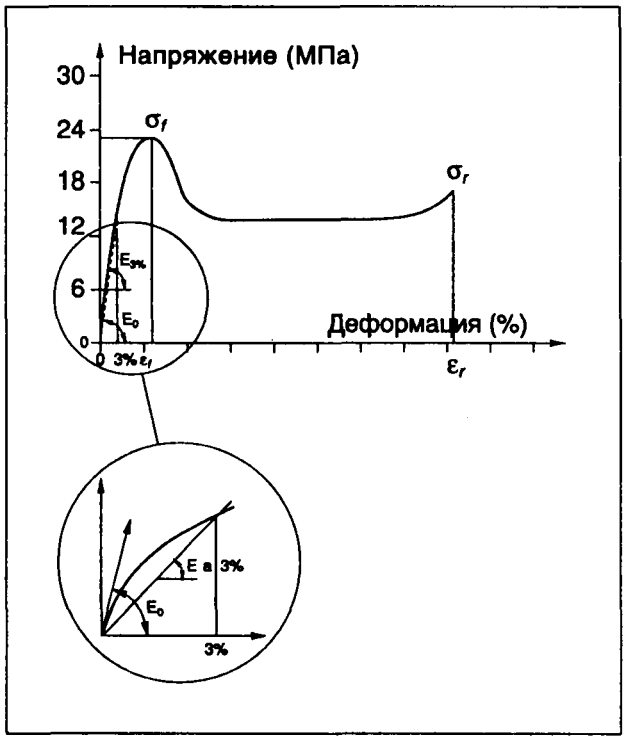
Кривые релаксации.

1.5.5.3. Механическая характеризация

Опыт на растяжение – это наиболее распространенный опыт для описания механического поведения материала. Он позволяет определить следующие значения (см. рисунок ниже) при температуре окружающей среды:

— модуль Юнга E_0,
— эффективный модуль при 3% деформации $E_{3\%}$,
— напряжение на пороге течения σ_f,
— процент удлинения на пороге течения σ_f,
— процент удлинения при разрыве ε_r,
— напряжение при разрыве σ_r.

Все эти характеристики снимаются обычно при скорости растяжения 100 мм · мин$^{-1}$.



Кривая растяжения.

Чтобы учесть неупругость материала, принято использовать эффективный модуль при 3%, что позволяет построить более точный приближенный расчет.

Для полиэтиленов, используемых для газопроводов, можно получить следующие значения:

E_0 = 600 - 1 200 МПа,
$E_{3\%}$ = 200 - 400 МПа,
σ_f = 18 - 23 МПа,
σ_r = 20 - 30 МПа,
ε_f = 12 - 16%,
ε_r ≥ 500%.

1.5.5.4. Механизмы разрыва

При расчете изделия следует выбрать его параметры так, чтобы не возникло разрывов или больших деформаций в течение предполагаемого срока жизни изделия.

В случае металлических материалов, подчиняющихся закону Гука, достаточно рассчитать изделие так, чтобы нагрузки были меньше напряжения упругого предела.

В случае пластических материалов, и в частности ПЭ, необходимо принять в расчет еще один параметр – время.

Под действием даже слабых напряжений возникают медленные эволюции, приводящие со временем к разрушению изделия.

Два основных механизма могут сработать:

— разрыв при большой деформации, называемый также тягучим разрывом,
— разрыв путем медленного растрескивания. В этом случае никакого деформирования материала нет.

Поскольку эти процессы весьма затяжные, трудно воссоздать в лаборатории дефекты указанного типа при обычной температуре. Поэтому были предложены ускоренные эксперименты. Ускорение механизмов вызывалось повышением температуры.

Наиболее часто используемые для характеристики двух указанных механизмов опыты – это опыты с трубами под гидравлическим давлением. Опыт состоит в том, что труба подвергается постоянному давлению при постоянной температуре. Время и характер разрыва фиксируются. Опыт воспроизводится при различных напряжениях и различных температурах. Результаты позволили получить для каждого материала линии такого типа, как на приведенной ниже фигуре, называемые также регрессионными кривыми (рис. на с. 80).

Напряжение на стенке σ рассчитывается по приближенной формуле Ламе:

$$\sigma = P\frac{D - e}{2e},$$

где

σ – напряжение на стенке (в МПа),
P – внутреннее давление в трубе (в МПа),
D – внешний диаметр трубы (в мм),
e – толщина трубы (в мм).

В зависимости от фиксированного времени жизни изделия следует сделать экстраполяцию механизма разрыва, который может быть встречен на практике. Экстраполяция позволяет определить гидростатическое сопротивление на долгое время – желаемое время жизни объекта.

Следующая формула дает возможность вычислить экстраполированные значения:

$$\lg t = A + \frac{B}{T} + C\frac{\lg \sigma_t}{T},$$

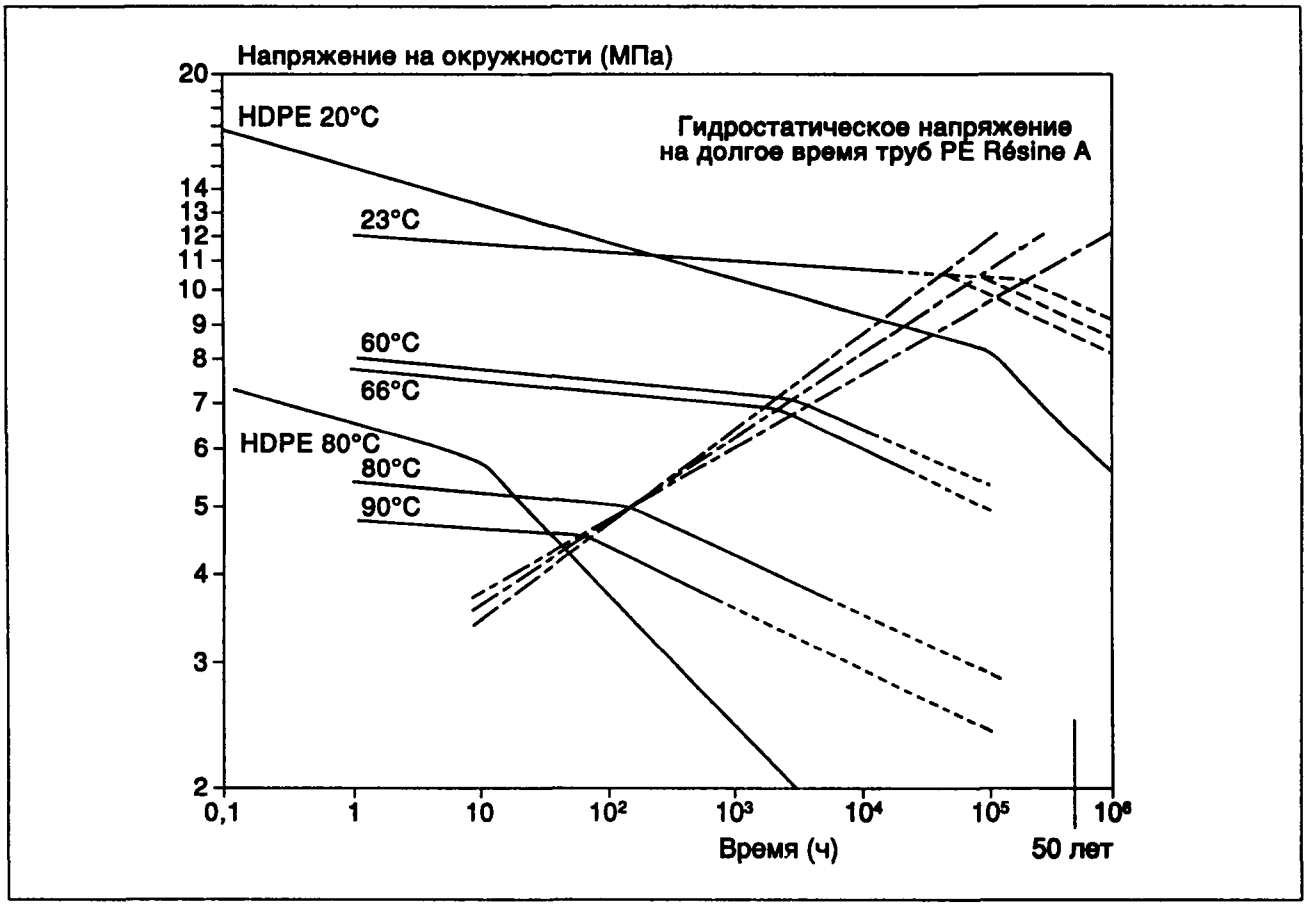
A, B, C – параметры, связанные с природой материала,
t – время, для которого желательно знать напряжение разрыва σ_t.

Для ПЭ с плотностью > 930 кг · м$^{-3}$ гидравлические сопротивления, экстраполированные на 50 лет, таковы:

$\sigma_{50\,лет} \geq 6{,}3$ МПа (для PE 50 – старое название),

$\sigma_{50\,лет} \geq 8{,}0$ МПа (для PE 63 – старое название)

и $\sigma_{50\,лет} \geq 10$ МПа (новое поколение ПЭ).



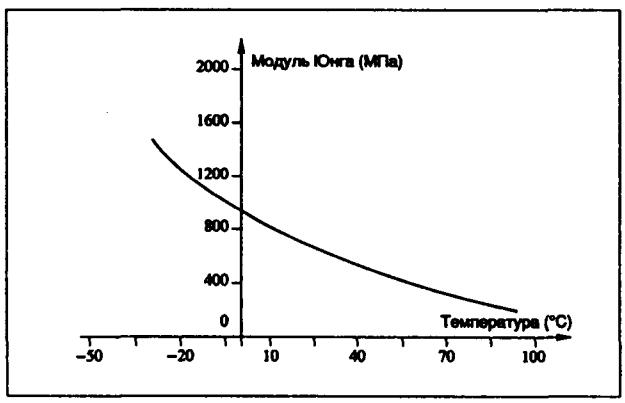
Регрессионные кривые сопротивления труб долговременным напряжениям.

1.5.5.5. Влияние температуры

Полимерные материалы очень чувствительны к температуре. Это хорошо видно при опытах на трубах под гидравлическим давлением при разных температурах. Механизмы разрыва сильно ускоряются при увеличении температуры от 20 до 80°C.

Это же касается и других характеристик, в частности модуля Юнга (см. следующий рисунок).

В случае ПЭ существуют три области температуры:



Изменение модуля Юнга в зависимости от температуры.

— T < T1 соответствует области хрупкости материала; T1 – это температура перехода от стекловидности,
— T1 < T < T2 – зона пластичности; T2 – температура перехода от аморфности ПЭ,
— T2 < T < T3 – зона вязкопластичности, T3 – температура плавления материала.

В случае ПЭ:

$T1 \simeq -100 \ldots -90°C$

$T2 \simeq -20°C$

$T3 \simeq 130°C$

1.5.6. Литература

— J.-C. Bone, J. Morel, M. Boucher. – Mécanique générale, cours et application. Editions Dunod, Paris (1987).
— M. Bertin, J.-P. Faroux, J. Renault. – Physique: (8 volumes) thermodynamique et mécanique classique des systémes de points. Notions de relativité. Éditions Dunod, Paris (1987).
— J. Cessac et G. Treherne. – Cours de physique (Terminale, Seconde, 1re). Éditions Nathan, Paris (1966). Épuisé.
— G. Bruhat. – Mecanique. Cours de physique générale. Enseignement technique et supérieur. Éditions Masson, Paris (1967).

— S. Timoshenko. – Résistance des matériaux. Tome 1: Théorie élémentaire et problèmes; tome 2: Theorie développée et problèmes. Éditions Dunod, Paris (1977).
— S. Timoshenko. – Théorie de la stabilité élastique. Éditions Dunod, Paris (1966).
— M. Feodossiev. – Théorie de la stabilité élastique. Éditions Mir, Moscou.
— L. Solomon. – Élasticité linéaire. Éditions Masson, Paris (1968).
— G. Filliat. – Sols et fondations. Éditions du Moniteur, Paris (1981).
— J. Goulet. – Aide-mémoire de la résistance des matériaux. Éditions Dunod, Paris (1968).
— M. Albiges et A. Coin. – Résistance des matériaux appliquée (deux tomes). Éditions Eyrolles, Paris (1986).
— M. Chatain. – Encyclopédie des sciences industrielles (cinq tomes). Éditions Quillet, Paris (1983).

1.6. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1.6.1. Основные понятия электротехники

1.6.1.1. Наиболее употребительные формулы (постоянный ток)

Закон Ома : $U = RI$

Электрическая мощность : $P = UI = RI^2$

Электрическая энергия : $W = UIt = RI^2t$

Сопротивление проводника при 0°C : $R_0 = \rho \frac{l}{S} \cdot 10^{-2}$

Изменение удельного сопротивления с температурой : $\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta)$

U – разность потенциалов на концах контура, в вольтах;

R – сопротивление, в омах;

I – сила тока, в амперах;

ρ – удельное сопротивление проводника, в микроомах на сантиметр (ср. § 1.6.1.1.3);

l – длина проводника, в метрах;

s – сечение проводника, в квадратных миллиметрах;

W – работа, в ваттчасах;

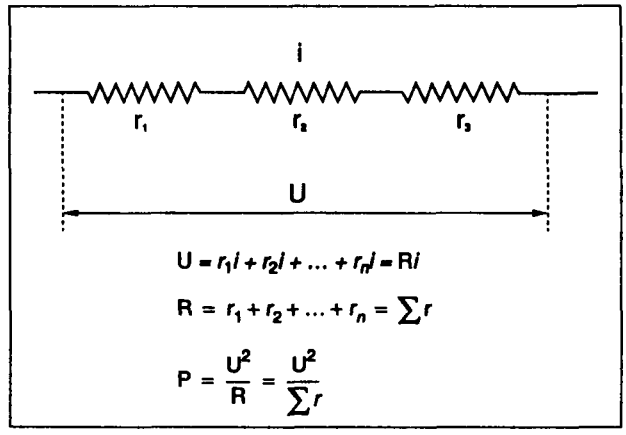
P – мощность, в ваттах;

α – температурный коэффициент металла (ср. § 1.6.2.2. и 1.6.2.3);

t – время, в часах;

θ – температура проводника, в градусах Цельсия.

1.6.1.1.1. Соединение сопротивлений

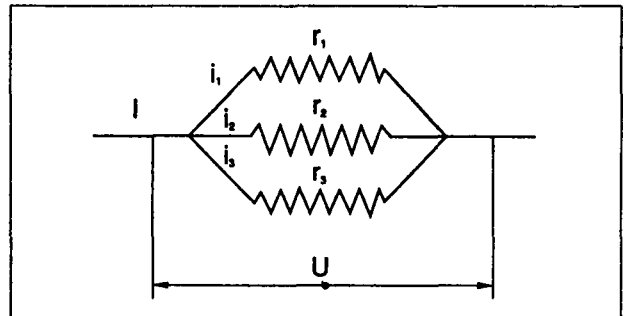


$U = r_1 i + r_2 i + \ldots + r_n i = Ri$

$R = r_1 + r_2 + \ldots + r_n = \sum r$

$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{\sum r}$

Последовательное соединение сопротивлений.



$U = r_1 i_1 + r_2 i_2 + \ldots + r_n i = RI$

$I = i_1 + i_2 + \ldots + i_n = \sum i$

$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n} = \sum \frac{1}{r}$

$P = U^2 \sum \frac{1}{r} \quad \frac{U^2}{R} = U_2 \sum \frac{1}{\sqrt{n}}$

Параллельное соединение сопротивлений.

1.6.1.1.2. Соединение равных сопротивлений

n сопротивлений величины *r* каждое, соединенных последовательно: $R = nr$,

$$I_{пос} = \frac{U}{nr}, \quad P_{пос} = \frac{U^2}{nr}.$$

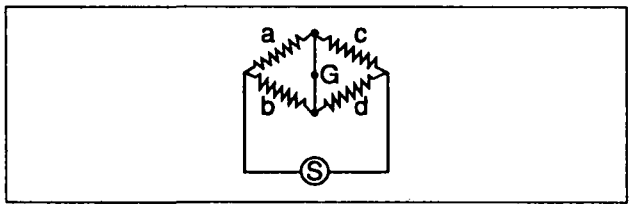
n сопротивлений величины *r* каждое, соединенных параллельно: $R = \frac{r}{n}$,

$$I_{пар} = \frac{nU}{r}, \quad P_{пар} = \frac{nU^2}{r}.$$

Если, при том же количестве равных сопротивлений, перейти от последовательного соединения к параллельному, получим соотношения:

$$I_{пар} = n^2 I_{пос}, \; P_{пар} = n^2 P_{пос}.$$

В случае двух сопротивлений, переход от последовательного соединения к параллельному меняет, следовательно, диссипируемую мощность в четыре раза.



Мостик Уитстона.

В приведенной здесь схеме, если источник S работает, а через гальванометр G ток не идет, то сопротивления *a*, *b*, *c*, *d* связаны соотношением:

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}.$$

1.6.1.1.3. Удельные сопротивления ρ

Металлы	ρ, мкОм/см	α (температурный коэффициент)
Серебро	1,5	0,0040
Медь промышленная	1,75	0,0040
Медь электролитная	1,54	0,0041
Алюминий	2,8	0,0039
Железо	10 - 12	0,0055
Платина	11	0,0038
Никель	10	0,0060
Свинец	19,5	0,0042
Ртуть	94,076	0,00089
Сталь	15,8	0,0039
Латунь (60 Cu, 40 Zn)	8,5 (15°C)	0,001
Латунь (66 Cu, 34 Zn)	5,5 (15°C)	0,002
Бронза фосфорная	5 - 6	
Платина родиевая (90 Pt, 10 Rh)	27	0,0013
Платина иридиевая (90 Pt, 10 Ir)	24	0,0012
Константан	49(18°C)	−0,00001 до +0,00001
Манганез	42	0,0000

1.6.1.2. Наиболее употребительные формулы (переменный ток)

Импеданс:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}.$$

Реактивное сопротивление:

$$X = L\omega - \frac{1}{C\omega}$$

$L\omega = \frac{1}{C\omega}$ для настроенного контура.

Частота (круговая):

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Формулы (1), (2) и (3) (см. таблицу на с. 83) предполагают, что напряжения и токи соответственно равны для каждой фазы.

Коэффициент мощности:

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} = \frac{R}{Z} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}} = \frac{P}{P_a}.$$

Кажущийся ток – $I_a = \frac{U}{Z}$

Активный ток – $I = I_a \cos\varphi$

Реактивный ток – $I_r = I_a \sin\varphi$

Эффективное напряжение – U

Эффективный ток – I, в амперах.

X – реактивное сопротивление, в омах;

Z – импеданс, в омах;

R – сопротивление, в омах;

$L\omega$ – индуктивное сопротивление, в омах (L – индуктивность, в генри);

$\frac{1}{C\omega}$ – емкостное сопротивление, в омах (C – емкость, в фарадах);

U – разность потенциалов, в вольтах, между фазами;

u – разность потенциалов, в вольтах, между фазой и землей;

ω – круговая частота, *f* – частота (50 герц во Франции);

T – период;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности;

φ – сдвиг фазы тока относительно напряжения;

P – активная мощность, в ваттах;

P_a – кажущаяся мощность, в вольтамперах;

P_r – реактивная мощность, в реактивных вольтамперах.

1.6.1.2.1. Расчет коэффициента мощности cos φ

Можно вычислить средний коэффициент мощности потребления за некоторый период, для кото-

	Однофазный	Двухфазный	Трехфазный
Кажущаяся мощность	$P_a = UI = \sqrt{P^2 + P_r^2}$	(1) $P_a = \sqrt{2}UI$	(1) $P_a = \sqrt{3}UI$
Активная мощность	$P = UI \cos \varphi$	(2) $P = \sqrt{2}UI\cos\varphi$	(2) $P = \sqrt{3}UI\cos\varphi$
Реактивная мощность	$P_r = UI \sin \varphi$	(3) $P_r = \sqrt{2}UI\sin\varphi$	(3) $P_r = \sqrt{3}UI\sin\varphi$
Простое напряжение	$u = U$	$u = \frac{U}{\sqrt{2}}$	$u = \frac{U}{\sqrt{3}}$

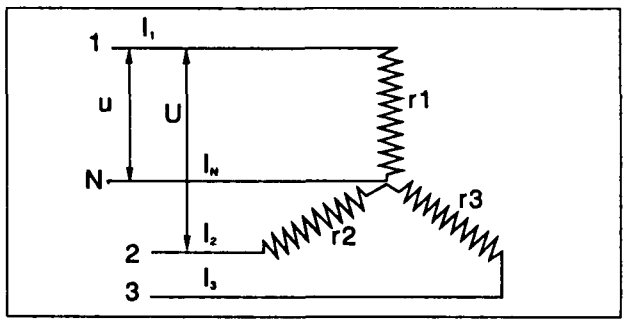
Формулы для переменного тока.

рого потребление активной энергии W и реактивной энергии W_r известны, что легко делается с помощью счетчиков:

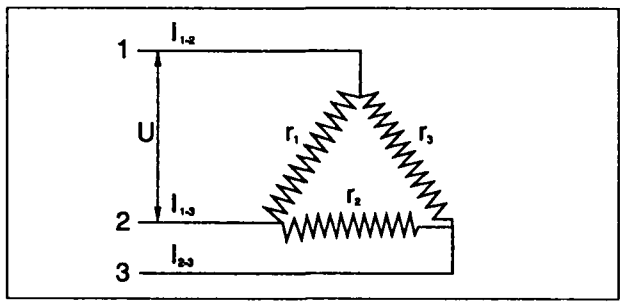
$$\cos\varphi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + W_r^2}}, \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{W_r}{W}.$$

Мгновенный коэффициент мощности дается непосредственно фазометрами. Можно также определить его методом двух ваттметров (или двух однофазных счетчиков), который описывается во всех книгах по электричеству.

1.6.1.2.2. Трехфазная сеть



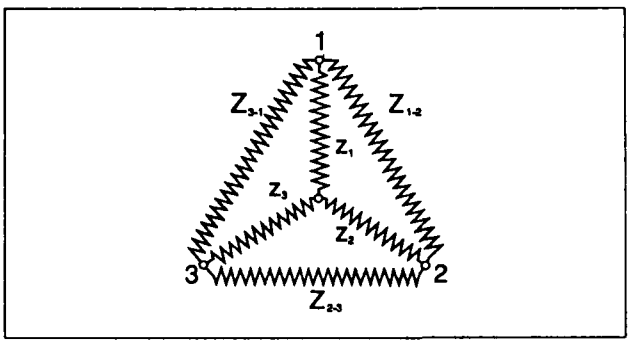
Звездная схема.



Треугольная схема.

1.6.1.2.3. Эквивалентные импедансы

Три импеданса, соединенные звездой, образуют систему, эквивалентную трем импедансам, соединенным в треугольник, и наоборот.



Между этими импедансами имеются следующие соотношения:

$$\bar{Z}_{12} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_3} \qquad \bar{Z}_1 = \frac{\bar{Z}_{31}\bar{Z}_{12}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$$

$$\bar{Z}_{23} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1} \qquad \bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{12}\bar{Z}_{23}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$$

$$\bar{Z}_{31} = \frac{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}{\bar{Z}_2} \qquad \bar{Z}_3 = \frac{\bar{Z}_{23}\bar{Z}_{31}}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{31}}$$

1.6.2. Выбор сечения электрических кабелей

1.6.2.1. Принципы выбора

Минимальные сечения кабелей должны удовлетворять следующим условиям:

— разогрев жилы кабеля должен быть совместим с тем, что допускает выбранная изоляция:
  · в нормальном режиме,
  · в случае короткого замыкания;
— падение напряжения на кабеле должно обеспечить нормальное функционирование объекта, которому подается ток.

Для этого необходимо определить силу тока, передаваемого в нормальном режиме, и требуется учесть следующие элементы:

— предвидимое увеличение и будущее развитие,
— коэффициент использования приемных устройств,
— коэффициент одновременности функционирования,

— производительность приемных устройств. В случае двигателей при отсутствии точных данных можно исходить из следующих практических рекомендаций по поводу технической производительности:

Мощность, кВт	Производительность, %
0 - 15	0,75 - 0,85
15 - 40	0,85 - 0,90
40 - 75	0,90 - 0,92
>75	<0,92

— кажущаяся мощность:

Она требует знания коэффициента мощности.

Ориентировочные данные:

cos φ = 1 – обогрев, освещение лампами накаливания,

cos φ = 0,75 - 0,92 – электродвигатели в нормальном режиме,

cos φ = 0,30 - 0,50 – электродвигатели при включении,

cos φ = 0,85 – освещение дневного света с компенсацией,

cos φ = 0,30 - 0,50 – освещение дневного света без компенсации.

1.6.2.2. Сечение, необходимое с учетом разогрева при нормальном режиме

Максимально допустимый при нормальном режиме ток – это ток, который вызывает в состоянии термического равновесия разогрев проводников до максимально разрешенной температуры.

Она зависит от условий прокладки кабеля (на открытом воздухе, в грунте на разных глубинах заложения, на планшетах и т.д.) и условий окружающей среды (близость других кабелей, солнечное излучение, сопротивление грунта).

Для кабелей, проложенных в грунте, допустимые температуры и удельное термическое сопротивление таковы:

— проводка низкого напряжения: 20°C и 100°C · · см · $Вт^{-1}$,

— проводка среднего напряжения: 20°C и 85°C · · см · $Вт^{-1}$.

Для проводки на планшетах на открытом воздухе допустимая температура воздуха 30°C.

Для ориентировки, в таблицах с. 85 и 86 собраны допустимые силы тока в распространенных проводниках низкого напряжения.

В случае различных удельных термических сопротивлений грунта или наличия поблизости других электрических кабелей, а также для проводки на открытом воздухе при различных температурах воздуха следует применять поправочные коэффициенты. Максимальные температуры в нормальном режиме меняются в зависимости от природы изоляции. Вообще говоря, они не должны превышать 60 - 70°C.

1.6.2.3. Сечение, необходимое с учетом разогрева при коротком замыкании

В случае короткого замыкания через кабели проходит значительно более высокий ток, чем тот, на который они рассчитаны в нормальном режиме. Однако продолжительность прохождения высокого тока очень мала, порядка долей секунды, как правило.

Максимально допустимые в конце короткого замыкания температуры зависят от природы изоляции; они меняются примерно между 120 и 180°C.

Вообще говоря, проблемы короткого замыкания следует рассматривать для проводки среднего напряжения; при низком напряжении ограничения обычно менее жестки.

Конструкторы дают кривые конечной температуры в зависимости от природы проводника и начальной температуры.

Приближенно сечение:

$$S = \frac{Icc}{k\sqrt{\frac{\theta_f - \theta_i}{t}}},$$

в которой

S – сечение проводника, в $мм^2$,

I_{cc} – сила тока при коротком замыкании, в амперах,

t – продолжительность короткого замыкания, в секундах,

θ_f – конечная температура, в °C,

θ_i – начальная температура, в °C,

k – коэффициент = 11 (медь) и 7 (алюминий).

1.6.2.4. Сечение, необходимое для учета падения напряжения

Падение напряжения зависит от характеристик предполагаемых приемных устройств, в принципе это 3% для освещения, 5% для других случаев.

В случае запуска двигателей можно допустить более значительное кратковременное падение напряжения, которое не должно превышать 10 - 15%.

Избираемое сечение дается формулами:

— для постоянного тока:

$$R = \frac{\Delta U_{допуст}}{2I},$$

— для переменного тока:

· однофазного:

$$R\cos\varphi + L\omega\sin\varphi = \frac{\Delta U_{допуст}}{2I},$$

трехфазного:

$$R\cos\varphi + L\omega\sin\varphi = \frac{\Delta U_{допуст}}{\sqrt{3}I},$$

при этом:

R – кажущееся сопротивление проводника при температуре функционирования, в омах на км;

Lω – индуктивное сопротивление в омах на км зависит от изоляции и пространственного размещения. При отсутствии точных значений, данных конструктором, берут:

— для трехфазных кабелей:

Lω = 0,08 Ом · $км^{-1}$ при низком напряжении,

Lω = 0,10 - 0,15 Ом · $км^{-1}$ при среднем напряжении.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Тип проводки		Природа тока (*)				
Кабель с изоляцией из ПВХ или каучука	Многополюсный кабель	Трехфазный	Постоянный или однофазный			
	Система однополюсных		Трехфазный	Постоянный или однофазный		
Кабель с изоляцией из синтетического эластомера	Многополюсный кабель			Трехфазный	Постоянный или однофазный	
	Система однополюсных				Трехфазный	Постоянный или однофазный
	Номинальное сечение (в мм^2)	Медная жила				
	0,5	9	10			
	0,75	12	13,5			
	1	13,5	15,	17	19	21
	1,5	17,5	19,5	22	24	27
	2,5	24	26	30	33	37
	4	32	35	40	45	50
	6	41	46	52	58	64
	10	57	63	71	80	88
	16	76	85	96	107	119
	25	101	112	127	142	157
	35	125	138	157	175	194
	50	151	168	190	212	235
	70	192	213	242	270	299
	95	232	258	293	327	362
	120	269	299	339	379	419
	150	309	344	390	435	481
	185	353	392	444	496	549
	240	415	461	522	584	645
	300	472	525	595	665	735
	400	552	613	695	779	859
	500	618	687	780	870	960
	630	705	782	885	995	1 095
	800	790	875	990	1 145	1 235
	1 000	890	990	1 120	1 250	1 380
		Алюминиевая жила				
	35	97	108	125	138	151
	50	118	131	151	168	183
	70	150	166	192	213	234
	95	181	200	232	258	282
	120	210	236	269	299	327
	150	240	268	309	344	375
	185	275	305	353	392	428
	240	325	360	415	461	503
	300	370	410	472	525	575
	400	432	479	552	613	670
	500	485	537	618	687	750
	630	550	610	705	782	855
	800	620	685	790	875	955
	1 000	700	772	890	990	1 075

(*) Число проводников, реально пробегаемых током:
— постоянным или однофазным – 2
— трехфазным – 3

Допустимая сила тока в нормальном режиме проводки Н.Н. (в амперах) в грунте, температура 30°С.

Тип проводки		Природа тока (*)					
Кабель с изоляцией из ПВХ или каучука	Многополюсный кабель	Трехфазный			Постоянный или однофазный		
	Система однополюсных		Трехфазный				
Кабель с изоляцией из синтетического эластомера	Многополюсный кабель			Трехфазный			Постоянный или однофазный
	Система однополюсных					Трехфазный	
	Номинальное сечение (в мм^2)	Медная жила					
	1.5	26.5		29	30		34
	2.5	36		40	41		46
	4	46		51	53		59
	6	58		64	67		74
	10	79		88	91		101
	16	100		111	115		128
	25	127	133	141	146	148	162
	35	153	161	170	176	179	195
	50	184	193	204	212	214	235
	70	227	238	252	261	264	290
	95	272	286	302	313	317	347
	120	311	327	345	358	363	397
	150	348	365	386	400	405	444
	185	392	412	435	451	457	500
	240	454	477	504	522	529	579
	300		540			600	
	400		622			690	
	500		703			780	
	630		795			880	
	800		895			990	
	1 000		1 005			1 115	
		Алюминиевая жила					
	35	119	126	133	137	140	152
	50	144	151	159	165	167	183
	70	177	186	197	204	206	226
	95	212	223	236	244	247	271
	120	243	255	269	279	283	310
	150	271	285	301	312	316	346
	185	306	321	339	352	357	390
	240	354	372	393	407	413	452
	300		421			468	
	400		485			538	
	500		548			608	
	630		620			686	
	800		698			772	
	1 000		784			870	

(*) Число проводников, реально пробегаемых током:
— постоянным или однофазным – 2
— трехфазным – 3

Допустимая сила тока в нормальном режиме проводки Н.Н. (в амперах) в грунте, температура 20°С, удельное термическое сопротивление 100°С · см · Вт$^{-1}$.

— для однополюсных кабелей:

$L\omega = 0{,}1 - 0{,}2$ Ом · км$^{-1}$,

l – длина кабеля, в километрах,

I – сила передаваемого тока, в амперах, при нормальном режиме и, возможно, при перегрузке,

φ – коэффициент мощности установки.

Совокупность этих данных позволяет выбрать наиболее подходящее нормализованное сечение.

1.6.3. Трансформаторы

В основном используются трансформаторы С.Н/Н.Н (среднее напряжение–низкое напряжение).

Они устанавливаются либо в приборах, либо на столбах.

Выбираются трансформаторы из серии нормализованных трансформаторов, соответствующих норме E.D.F. HN 52 S 20.

Предписанные мощности: 100, 160, 250, 400, 630 и 1000 кВт.

Напряжение короткого замыкания для мощностей этой серии до 630 кВт включительно составляет 4%, для 1000 кВт - 5%.

Соединения первичного и вторичного контуров:

Yz11 до 160 кВт,

Dy11 начиная с 250 кВт.

Эти два варианта исключают прохождение тройных частот первичного или вторичного тока и допускают четырехпроводное распределение 220/380 В.

Первичная обмотка снабжена двумя регулировочными контактами ±2,5%, управляемыми без напряжения, которые позволяют уточнить вторичное напряжение в зависимости от напряжения сети С.Н., если предписанное вторичное напряжение составляет 380 В.

Чтобы соединяться параллельно, трансформаторы должны иметь одинаковую полярность, т.е. для одного и того же первичного питания, напряжения между вторичными границами должны быть в фазе, откуда следующие требования к трансформаторам:

— одинаковое отношение трансформации,

— одинаковое напряжение короткого замыкания,

— одинаковое направление векторного вращения фаз.

На с. 88 даны принятые способы соединений трехфазных систем.

1.6.4. Электродвигатели

Двигатели и генераторы абсолютно обратимы.

1.6.4.1. Электродвигатели постоянного тока

1.6.4.1.1. Преимущества

Электродвигатель постоянного тока удобен тем, что может питаться от сети постоянного тока или переменного тока через выпрямители, либо от аккумуляторов.

У него есть важные достоинства: переменность скорости, возможность регулировки и привода.

Всегда можно получить произвольное отношение:

$$\frac{\text{пусковая пара}}{\text{номинальная пара}}$$

1.6.4.1.2. Неудобства

Он дороже асинхронного двигателя, а наличие коллектора и щеток требует соответствующего обслуживания.

Он плохо подходит для реализации невоспламеняющихся моторов.

1.6.4.1.3. Области приложения

1.6.4.1.3.1. Моторы с последовательным возбуждением

Применение: электрическая тяга, насосы и вентиляторы слабой нагрузки.

Характеристики: мощная пусковая пара, изменяемая с нагрузкой скорость, большие обороты на холостом ходу.

1.6.4.1.3.2. Шунтовые моторы

Применение: станки, запускаемые вхолостую.

Характеристики: слабая пусковая пара, постоянная скорость.

1.6.4.1.3.3. Компаунд-моторы

Применение: подъем и тяга, насосы и вентиляторы с большой инерцией.

Характеристики: повышенная пусковая пара, устойчивость скорости.

1.6.4.2. Электродвигатели переменного тока

Как правило, двигатели переменного тока питаются низким напряжением (трехфазный ток 220, 380 или 660 В) примерно до 150 кВт мощности, при С.Н. (трехфазный ток 6600 В) – выше этой мощности.

Для двигателей переменного тока как высокого, так и низкого напряжения характерно большое разнообразие электрических, динамических и технологических характеристик. Тем не менее, не считая небольшого количества специфических моторов специального назначения, можно говорить о двух семействах:

— асинхронные двигатели:
  - с неподвижными обмотками,
  - с роторной обмоткой;

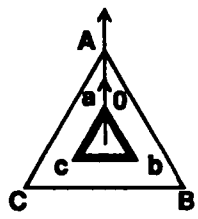
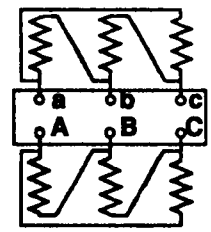
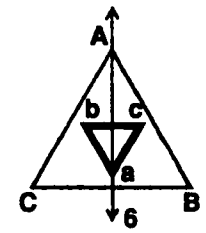
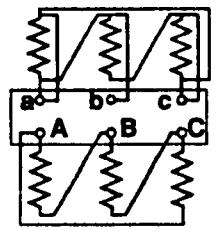
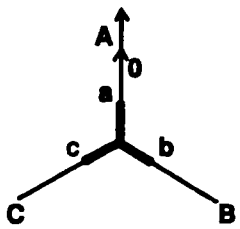
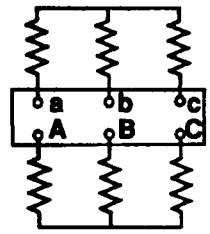
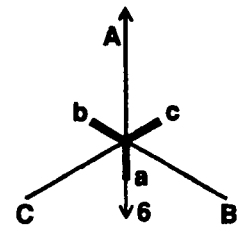
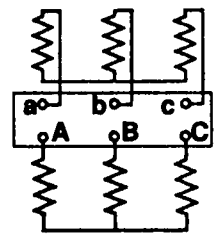
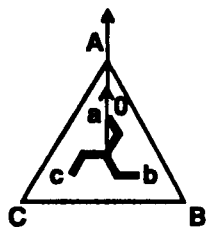
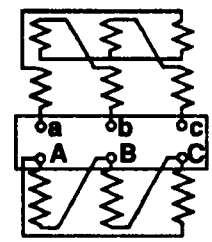
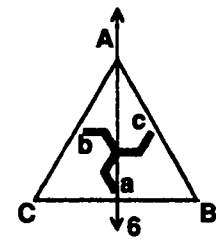
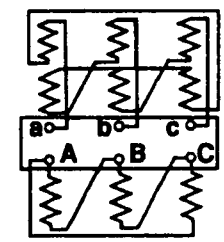
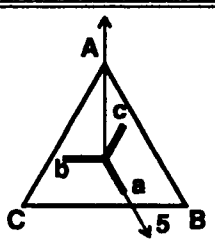
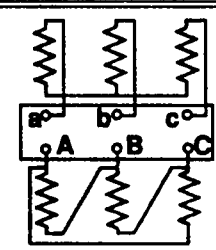
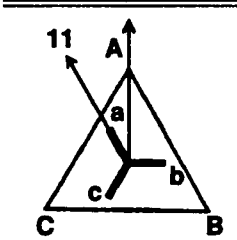
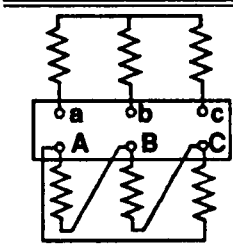
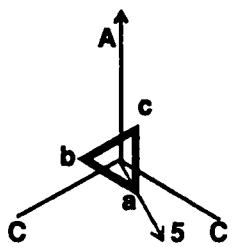
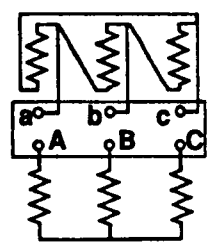
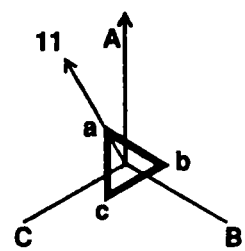
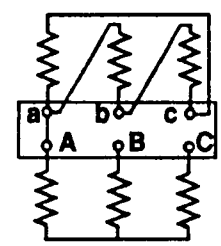
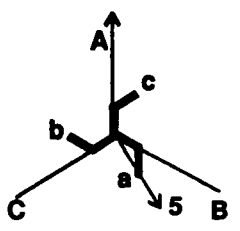
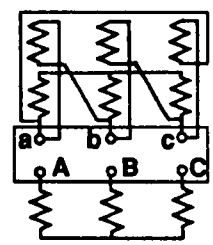
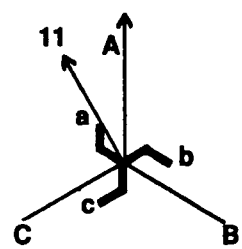
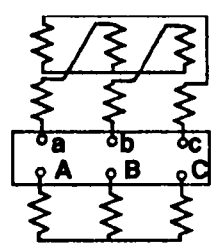
— синхронные двигатели, включая асинхронные синхронизованные.

Они существенно различаются по:

— значениям пары и тока при пуске,

— переменности скорости при нормальном режиме,

— значениям коэффициента мощности и производительности в зависимости от нагрузки.

Символ	Векторная диаграмма	Схема соединений	Символ	Векторная диаграмма	Схема соединений
Dd0 (0°)			Dd6 (180°)		
Yy0 (0°)			Yy6 (180°)		
Dz0 (0°)			Dz6 (180°)		
Dy5 (150°)			Dy11 (330°)		
Yd5 (150°)			Yd11 (330°)		
Yz5 (150°)			Yz11 (330°)		

Замечание. – Схемы даны в предположении, что обмотки имеют одно и то же относительное направление обматывания.
Символы рекомендуемых соединений даны жирными буквами.

Обычные соединения трехфазных систем (источник U.T.E. (*), норма NF C 52-220).

(*) Union technique de l'électricité – Электротехнический союз (прим. перев.).

1.6.4.2.1. Асинхронные двигатели

1.6.4.2.1.1. Асинхронные двигатели с неподвижными обмотками

Они бывают двух основных типов в зависимости от конструкции ротора:

— ротор с простым корпусом,
— ротор с двойным корпусом или с глубокими пазами.

Эти роторы допускают возможность выбора характеристик пары и тока пуска:

— роторы с простым корпусом имеют:
  · относительно слабую пусковую пару (0,5 - 0,9 C_n),
  · максимальную пару, достигающую 3,5 C_n,
  · силу тока пуска, меняющуюся от 4,5 до 5,5 I_n,

(C_n – номинальная пара, I_n – номинальный ток);

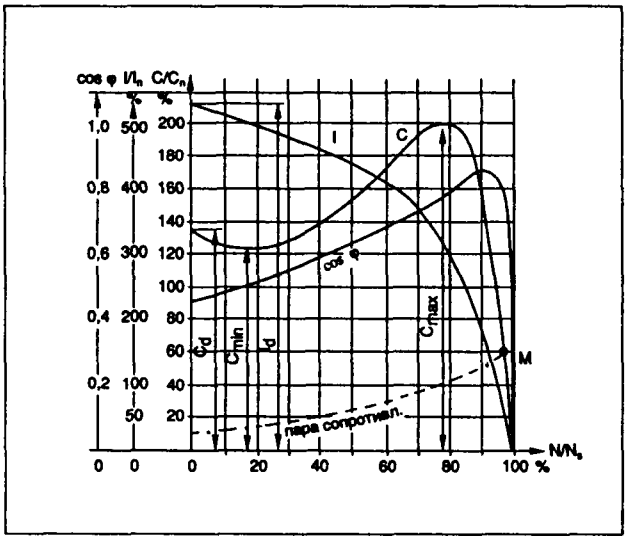
— роторы с двойным корпусом или с глубокими пазами имеют:
  · относительно высокую пусковую пару, порядка $2C_n$,
  · максимальную пару того же порядка,
  · пусковую силу тока, меняющуюся от 5 до 6,5 I_n.

Эти двигатели естественно использовать для интенсивной работы и в опасных условиях, поскольку:

— простота принципа действия ротора на прямых контактах сообщает им большую механическую мощность,
— скорость слабо меняется (примерно на 2%) при нагрузке,
— обслуживание отличается простотой.

Характеристики пары асинхронных двигателей с неподвижными обмотками исключительно хорошо подходят для таких машин, как центробежные насосы, компрессоры, конверторные группы, станки и вентиляторы.

Тем не менее, всем этим двигателям присуще неудобство, связанное с относительно малым коэффициентом мощности, имеющим порядок 0,8 - 0,9 при полной нагрузке и убывающим при работе с малой нагрузкой.



Характеристики асинхронного двигателя с неподвижными обмотками в зависимости от скорости.

Если мощность, заключенная в асинхронных двигателях велика, может оказаться необходимым, в зависимости от случая, реализовать глобальную или частную компенсацию коэффициента мощности.

1.6.4.2.1.2. Асинхронные двигатели с роторной обмоткой

Поскольку контакт с роторной обмоткой осуществляется кольцами, сопротивление этого контура может быть изменено введением внешних сопротивлений.

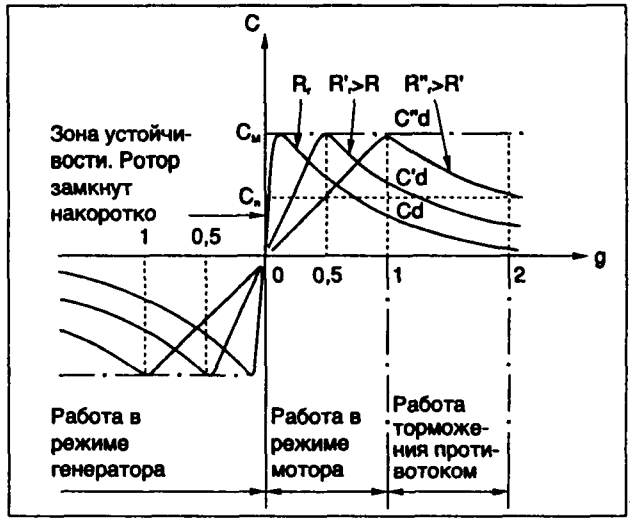
Уменьшая внешнее сопротивление во время запуска, получаем смещение характеристики $C(C_n)$ и согласование пусковой пары с парой приводимой в движение машины. Заметим, что значение максимальной пары не зависит от роторного сопротивления. С другой стороны, роторный ток при слабых скольжениях обратно пропорционален роторному сопротивлению.

Различные возможности применения асинхронных двигателей с роторной обмоткой делают их удобными для приведения в движение машин с большой стартовой парой, таких как вентиляторы большой инерционности, дробильные машины, мешалки, транспортеры и т.д.

Кроме того, в машинах, требующих сильного торможения противотоком, также используются двигатели этого типа.

Как и для асинхронных двигателей с неподвижной обмоткой, коэффициент мощности в нормальном режиме относительно низок; это свойство, а также наличие колец и роторных сопротивлений, ведут к тенденции исчезновения двигателей рассматриваемого типа в пользу двигателей с двойным корпусом или глубокими пазами.

Кривые показывают, что вводя значительное сопротивление в роторный контур, можно получить выгоду при торможении противотоком.



Кривая C(g) асинхронного двигателя с роторной обмоткой.

1.6.4.2.2. Синхронные двигатели

Эти двигатели принципиально отличаются от асинхронных следующими свойствами:

— постоянная скорость,
— роторный контур питается постоянным током,
— коэффициент мощности может регулироваться током возбуждения.

Они технологически идентичны генераторам переменного тока.

Чтобы получить асинхронную пару и избежать колебаний, роторы оборудуются амортизацией: это помогает запускать синхронные моторы аналогично асинхронным с простым корпусом, с кото-рыми они имеют близкие характеристики пары и интенсивности.

Чтобы избежать слишком высоких напряжений в контуре возбуждения, последний шунтируется при запуске и расцеплении сопротивлением, значение которого выбирается в диапазоне между пяти- и десятикратным сопротивлением контура возбуждения.

Поскольку асинхронная пара стремится к нулю при приближении к скорости синхронизма, сцепление в конце запуска таких двигателей от сети не может осуществляться при скорости синхронизма, как для альтернаторов. Это всегда приводит к наличию переходного режима, более или менее значительного в зависимости от достигнутой к концу запуска скорости и от мощности двигателя.

Чтобы ограничить этот переходный режим, можно:

— либо использовать реле, контролирующее скольжение посредством измерения частоты роторного тока, проходящего через сопротивление запуска. Оно управляет питанием сети возбуждения в момент, когда скольжение минимально. Это приспособление практически необходимо, когда синхронный мотор дает значительную часть общей мощности.

— либо в два приема, автоматически или вручную, подавать ток возбуждения.

Различные процедуры возбуждения таковы:

— динамо на конце вала двигателя;

— отдельный возбудитель, реализованный конверторной группой;

— статическое возбуждение, реализованное:
  - диодами, связанными с насыщаемыми сопротивлениями с ручной или автоматической регулировкой,
  - тиристорами с ручной или автоматической регулировкой,
  - вращающимися диодами, которые питаются обратным альтернатором с ручной или автоматической регулировкой.

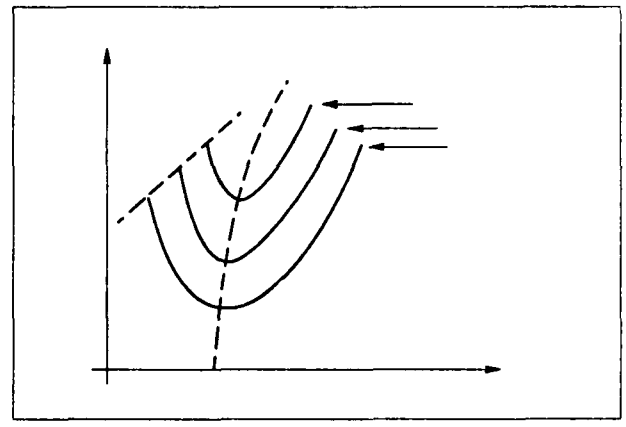
Техника поворачивается к возбуждению тиристорами или вращающимися диодами. Последний вариант исключает щетки, ликвидирует корпус возбудителя и, к тому же, включает часто в себя устройство синхронизации и пересцепления в случае потери синхронизма.

Такие двигатели способны дать реактивную энергию посредством увеличения тока возбуждения. Их применение часто мотивируется этой особенностью, позволяющей компенсировать реактивные нагрузки сети.

Линии на приведенной фигуре показывают изменение статорного тока в зависимости от тока возбуждения при постоянной нагрузке (кривые Морди).

В случае малых мощностей двигатели такого типа применяются довольно редко.

Напротив, для более, чем 2000 кВ, они употребляются часто из-за своей хорошей эффективности и высокого коэффициента мощности. Для плавных движений употребление синхронного двигателя напрашивается само собой: однако, приводимые в движение двигателем машины должны иметь относительно слабую пару сопротивления при



Кривые Морди

запуске, а хрупкость амортизации ограничивает ритм запуска.

1.6.4.2.3. Асинхронные синхронизованные двигатели.

В этом типе двигателей для запуска используются приспособления аналогичные случаю синхронных моторов.

Следовательно, ротор должен быть смешанным и должен содержать:

— обмотку роторного запуска,

— обмотку возбуждения.

Это приспособление позволяет двигателю запускать машины с высокой парой сопротивления. С другой стороны, солидная асинхронная пара двигателя позволяет ему, при некоторых условиях на схему, перезацеплять при потере синхронизма.

К сожалению, указанные преимущества компенсируются довольно высоким наведенным роторным напряжением, а также относительно сложной, дорогой и громоздкой аппаратурой запуска.

Применение таких моторов ограничивается случаем, когда требуются одновременно повышенная пара запуска и очень хорошой коэффициент мощности.

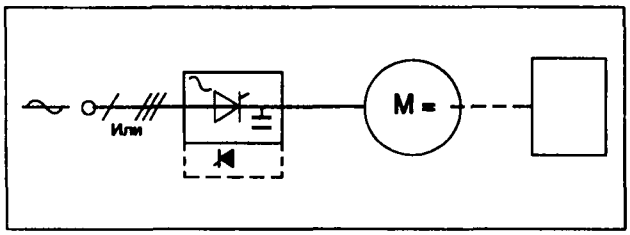
Современная тенденция состоит в предпочтении такому мотору синхронного или асинхронного двигателя, приспособленного к условиям эксплуатации.

1.6.5. ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА

Существуют многочисленные решения проблемы: далее кратко излагаются наиболее распространенные.

1.6.5.1. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПИТАНИЕМ ЧЕРЕЗ УПРАВЛЯЕМЫЙ ТИРИСТОРНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

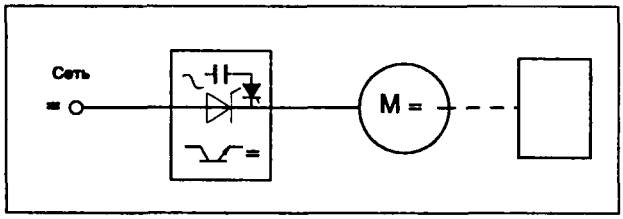
На сегодня это наиболее распространенное решение в промышленности. Технология совершенствуется и привод подобного типа остается конкурентоспособным, поскольку отсутствуют специальные ограничения по мощности, скорости или тому подобное; диапазон мощностей варьируется от киловатта по меньшей мере до десятка мегаватт.



Управляемый выпрямитель, двигатель постоянного тока.

1.6.5.2. Двигатель постоянного тока с питанием от преобразователя тока

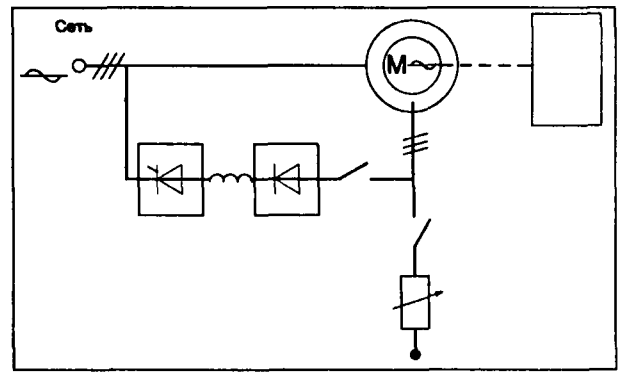
Эти двигатели применяются в двух крупных областях и двух типах технологических процессов. Наиболее широкой областью применения являются средства электрической тяги: локомотивы, электровозы, трамваи, троллейбусы, автобусы и т.п. К другой области относятся сервомеханизмы (регуляторы станков с числовым управлением). Транзисторы в настоящее время используются при малых мощностях до 50 кВт. Тиристоры с отключением управляющего электрода (GTO) поддерживают реле до нескольких сотен киловатт; для больших мощностей используют быстродействующие тиристоры с принудительной коммутацией.



Преобразователь переменного тока в постоянный, двигатель постоянного тока.

1.6.5.3. Асинхронный двигатель с фазным ротором и с подсинхронным каскадом

Хорошо известно, что изменение роторного сопротивления двигателя вызывает изменение его скольжения и скорости, однако подобное решение, пригодное для схем соединительного типа, характеризуется очень плохим кпд при скоростях, отличающихся от максимальной. Подсинхронный каскад играет роль статического преобразователя, обеспечивающего восстановление энергии скольжения. Энергия ротора выпрямляется и возвращается в сеть с помощью инвертора с естественной коммутацией. Теоретически при любой скорости, меньшей, чем скорость синхронизации, ее можно увеличить, но более экономным является ограничение мощности преобразователя в диапазоне необходимой регулировки, если в распоряжении имеется пусковой реостат. Это решение предоставляет преимущества в диапазоне малых скоростей (от 70 до 100% от N_r).



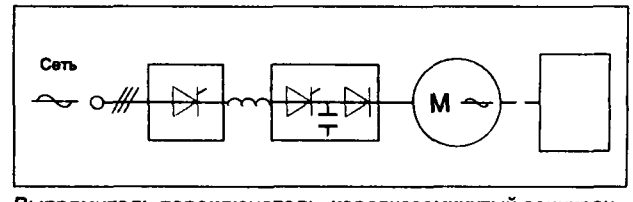
Подсинхронный каскад, асинхронный двигатель с фазным ротором.

1.6.5.4. Короткозамкнутый асинхронный двигатель с питанием от выпрямителя с коммутацией

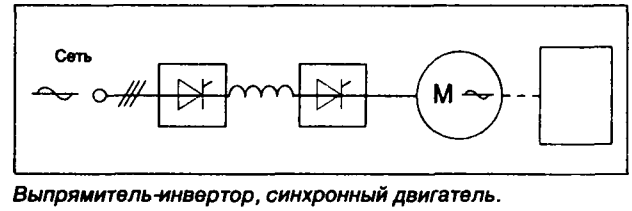
Попытка избавиться от механического коллектора двигателя постоянного тока при полном сохранении замечательной гибкости управления привели к рождению частотно-регулируемого привода. В этом случае преобразователем является выпрямитель–переключатель, а переключателем – инвертор с вынужденной коммутацией. Входной преобразователь (управляемый выпрямитель), связанный со сглаживающей индуктивностью, выступает в роли источника постоянного тока. Выходной преобразователь переключает этот ток на фазы двигателя.

Описанная система может функционировать во всех четырех квадрантах плоскости «вращающий момент–скорость» за счет инверсии способа функционирования двух преобразователей (выпрямитель–инвертор). Такая система охватывает мощности в интервале от нескольких десятков киловатт до нескольких мегаватт.

Помимо этого можно использовать преобразователи – генераторы напряжения, такие как инверторы с широтно-импульсной модуляцией. Этот тип преобразователей развивается в связи с прогрессом тиристоров с отключением управляющего электрода (GTO). При малых мощностях (< 50 кВт) простой и экономичной оказывается схема на транзисторах, применяется во всех случаях, в том числе для маленьких очень скоростных двигателей.



Выпрямитель-переключатель, короткозамкнутый асинхронный двигатель.



Выпрямитель-инвертор, синхронный двигатель.

1.6.5.5. Синхронный двигатель с питанием от выпрямителя-инвертора с авторегулировкой

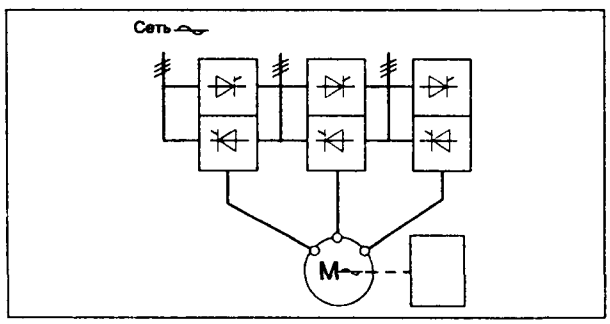
Это решение включает первый входной преобразователь с питанием от сети и второй, управляемый машиной, которые разделены сглаживающей индуктивностью. В схеме работы двигателя преобразователь со стороны сети функционирует как выпрямитель и регулирует интенсивность на промежуточной ступени к постоянному току; второй преобразователь функционирует как вспомогательный инвертор и переключает ток на фазы машины. Переключение одной фазы статора на следующую определяется либо по отметкам положения ротора, либо, проще всего, – по фазе напряжения статора. Необходимая реактивная энергия предоставляется машиной.

Такой привод обычно реверсивен и позволяет функционировать в четырех квадрантах плоскости "крутящий момент–скорость".

Для малых и средних мощностей применяется технология преобразователей питания двигателей постоянного тока. Для очень больших мощностей предпочтительно используются выпрямительные лампы среднего напряжения (от 5 до 20 кВ) на тиристорах, управляемых оптикоэлектронными системами.

1.6.5.6. Синхронный или асинхронный двигатель с питанием от циклического преобразователя частоты

Реверсивные преобразователи, используемые для управления двигателями постоянного тока в 4-х квадрантах плоскости "крутящий момент–скорость", могут по своему определению устанавливать ток с переменными частотой и амплитудой. Преобразователь, реверсивный по фазе, может использоваться для питания двигателя переменного тока с непременным условием такого управления тремя фазами, чтобы получить на выходе переменные напряжения, с симметричным сдвигом по фазе на 120°. Принципиально, что диапазон изменений частот на выходе не может превышать треть входной частоты, поэтому подобное решение также применяется для медленных двигателей (за исключением случая, когда имеется автономный источник питания высокой частоты). Циклический преобразователь частот по своей природе реверсивен и может обеспечить обратимость крутящего момента и скорости.



Циклический преобразователь частоты, синхронный или асинхронный двигатель.

1.6.6. Процесс запуска синхронного или асинхронного двигателя

О запуске синхронного или асинхронного двигателя можно говорить только, если точно известны характеристики его крутящего момента и силы тока, а также характеристики момента сопротивления приводящейся в движение машины и ее инертность.

На самом деле не существует стратегии выбора решения в этой области, в связи с чем невозможно утверждать, что такой-то тип пускового устройства является наилучшим (см. таблицу на с. 93).

1.6.6.1. Прямой пускатель в цепи статора под полным напряжением

1.6.6.1.1. Достоинства и недостатки

Этот тип запуска применяется для асинхронных двигателей на роторе с беличьей клеткой и для синхронных двигателей.

Пик тока при запуске имеет порядок 4 - 7 I_n в зависимости от характеристик двигателя, а его продолжительность может меняться от 1 до 10 секунд приблизительно в зависимости от общего момента инерции (двигатель + машина), крутящего момента двигателя и момента сопротивления.

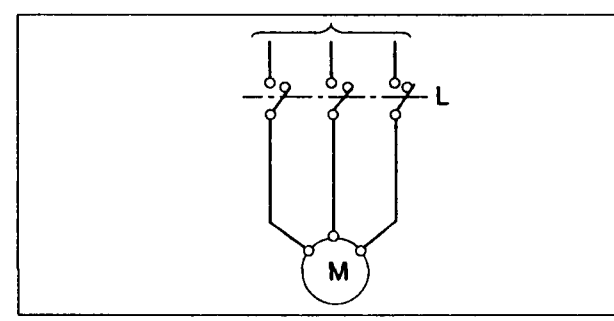
Принятие этого способа запуска требует, чтобы перегрузки по силе тока могли быть восприняты цепью без больших возмущений других устройств и чтобы приводящаяся в движение машина могла выдержать механический толчок, вызванный крутящим моментом двигателя.

Простота оборудования и двигателя, а также достигаемая экономия делают этот тип запуска весьма распространенным.

1.6.6.1.2. Изменение крутящего момента и силы тока при прямом запуске

Изменение крутящего момента и силы тока зависит от типа используемого двигателя.

Двигатель с простой беличьей клеткой испытывает умеренный скачок тока, но имеет достаточно слабый крутящий момент.



Запуск: включение замыкателя L.

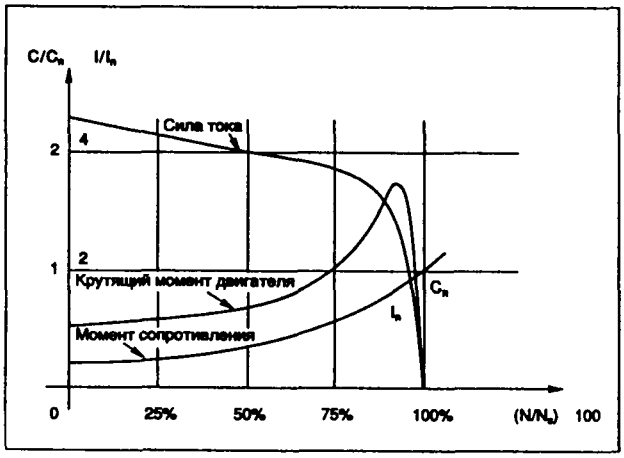
Основные характеристики пусковых устройств	Преимущества	Недостатки	Области применения
1) Прямое пусковое устройство: запуск под полным напряжением.	Простота, легкость работы. Большой пусковой крутящий момент. Используется для двигателя с беличьей клеткой.	Толчок тока при запуске.	Маленькие двигатели. Любые двигатели при отсутствии опасности больших пиков по силе тока.
2) Пускатель в цепи статора: напряжение на зажимах двигателя снижено за счет падения напряжения на реактивных сопротивлениях или за счет автотрансформатора. Ток понижается пропорционально напряжению, а крутящий момент – пропорционально квадрату снижения напряжения.	Простота. Крутящий момент возрастает постепенно, по мере набора скорости. Используется для двигателя с беличьей клеткой.	Дорогой. Необходимость рассеивания теплоты, выделяющейся на сопротивлениях, либо использования более дорогих реактивных сопротивлений или автотрансформаторов.	Все двигатели, приводящие в движение установки со средним противодействующим крутящим моментом, нарастающим постепенно в течение периода запуска.
Вариант предыдущего: пускатель с переключением со звезды на треугольник. Напряжение на зажимах обмотки двигателя снижено в отношении: $\frac{1}{\sqrt{3}}$, крутящий момент и сила тока снижены в 3 раза.	Простота, легкость работы. Толчок тока уменьшен. Используется для двигателя с беличьей клеткой.	Пониженный пусковой крутящий момент. Толчок тока в момент перехода со звезды на треугольник.	Маленькие двигатели низкого напряжения, приводящие в движение установки с малым моментом сопротивления во время запуска.
3) Пускатель в цепи ротора: при подаче напряжения двигатель работает как трансформатор, вторичная обмотка которого (ротор) питает сопротивления. Ток в цепи снижается, но двигатель сохраняет высокий пусковой крутящий момент.	Ограничение тока в цепи. Высокий пусковой крутящий момент.	Дорогой. Используется для двигателя с фазным ротором, более хрупким и более дорогим, чем двигатель с беличьей клеткой. Проблема рассеяния тепла на сопротивлениях.	Все двигатели, приводящие в движение установки с большим моментом сопротивления, такие как мостовые краны, дробильные машины.

Характеристики пусковых устройств.

Двигатель с двойной беличьей клеткой испытывает более значительный толчок тока, но пригоден для запуска машины с более высоким моментом сопротивления.

1.6.6.2. Пуск в цепи статора при пониженном напряжении

Включают замыкатель L и после выдержки во времени закорачивают сопротивление или реактивные сопротивления на C.



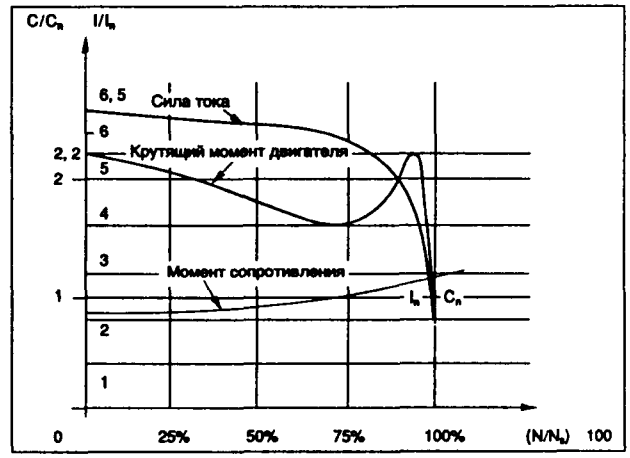
Кривые C(N) и I(N) асинхронного двигателя с простой беличьей клеткой.

1.6.6.2.1. Снижение напряжения сопротивлениями

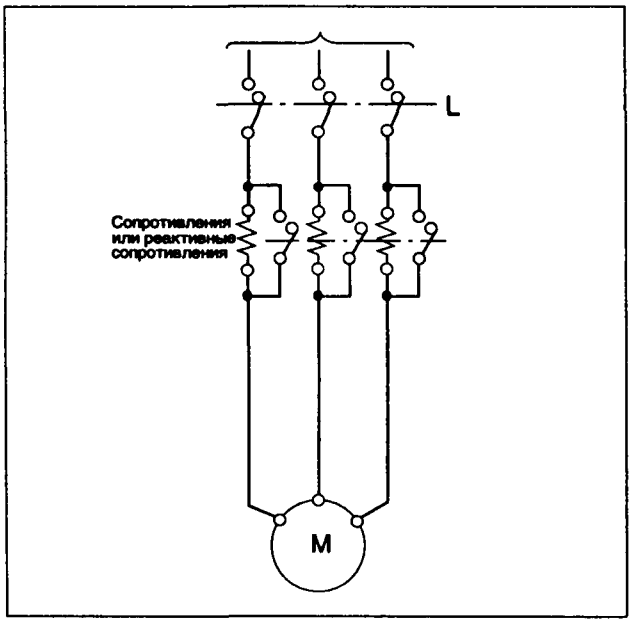
Этот способ запуска используется при низких напряжениях. Для высоких напряжений он не применяется из-за необходимости отвода тепла и трудностей изоляции сопротивлений.

Напряжение запуска определяется по максимальному скачку тока I'_d, допустимому в сети:

$$U_d = U_n \frac{I'_d}{I_d}$$



Кривые C(N) и I(N) асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой.



Пускатель в цепи статора при пониженном напряжении.

1.6.6.2.2. Снижение напряжения реактивным сопротивлением

Такой способ запуска понижает скачок тока в сети, но может применяться только, если приводящиеся в действие машины пускаются вхолостую и имеют достаточно малый момент сопротивления при запуске: компрессоры, центробежные насосы, преобразовательный агрегат и т.д.

В самом деле, крутящий момент асинхронного двигателя зависит от квадрата напряжения питания, тогда как потребляемый ток зависит от напряжения линейно:

$$C'_d = C_d\left(\frac{U_d}{U_n}\right)^2$$

C'_d – пусковой крутящий момент при пониженном напряжении,

C_d – то же при полном напряжении,

U_d – пусковое напряжение,

U_n – номинальное рабочее напряжение,

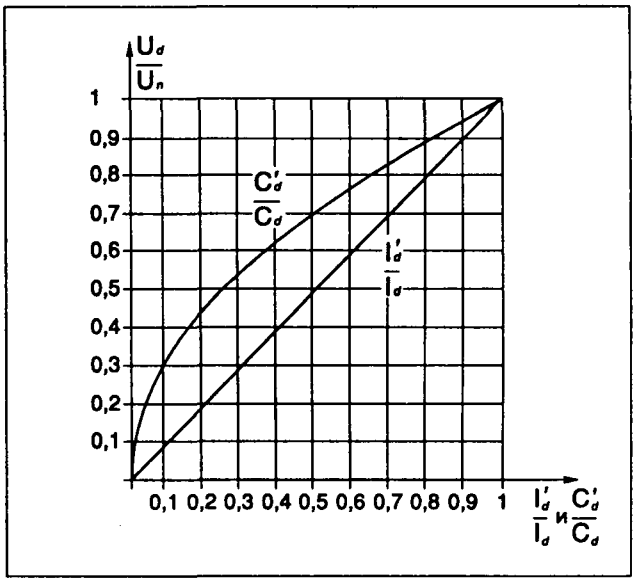
$$I'_d = I_d\frac{U_d}{U_n}$$

I'_d – пусковой ток при пониженном напряжении,

I_d – то же при полном напряжении.

Кривые на следующем рисунке иллюстрируют изменение отношений $\frac{I'_d}{I_d}$ и $\frac{C'_d}{C_d}$ в зависимости от отношения U_d/U_n.

По ходу запуска напряжение на зажимах двигателя постепенно возрастает, в связи с чем пуск оказывается плавным.



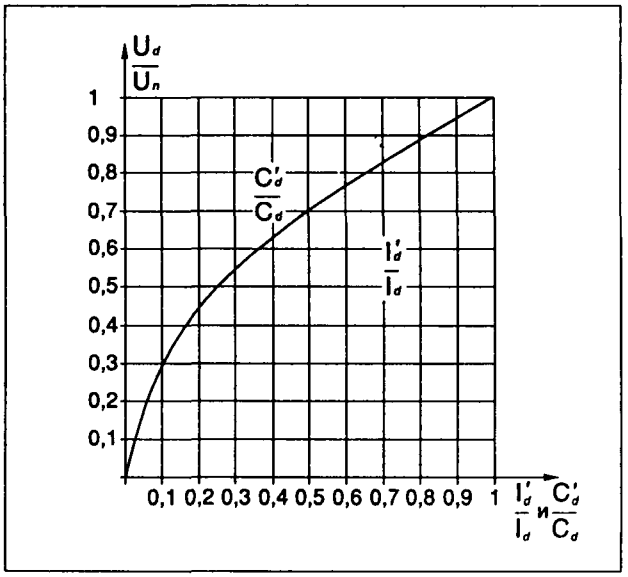
Кривые пуска при снижении напряжения реактивными сопротивлениями.

1.6.6.2.3. Снижение напряжения автотрансформатором

Этот способ запуска иногда позволяет согласовать снижение скачка тока в цепи и величину крутящего момента двигателя. В самом деле, представляется весьма выгодным уменьшить отношение напряжений и за счет этого в квадрате понизить скачок тока:

$$\frac{I'_d}{I_n} = \frac{I_d}{I_n}\left(\frac{U_d}{U_n}\right)^2$$

$$\frac{C'_d}{C_n} = \frac{C_d}{C_n}\left(\frac{U_d}{U_n}\right)^2$$



Кривая пуска при снижении напряжения автотрансформатором.

при этом:

I'_d – пусковой ток со стороны сети при пониженном напряжении.

Эти соотношения позволяют определить величину понижения напряжения в зависимости от отношения:

$$I'_d / I_m$$

допустимого для сети, или от отношения:

$$C'_d / C_m$$

допустимого для приводящейся в движение машины.

Кривая на стр. 94 показывает изменение U_d/U_n в зависимости от I'_d / I_d и C'_d / C_d.

Принцип действия и принципиальная схема (см. следующий рисунок):

L – замыкатель цепи,

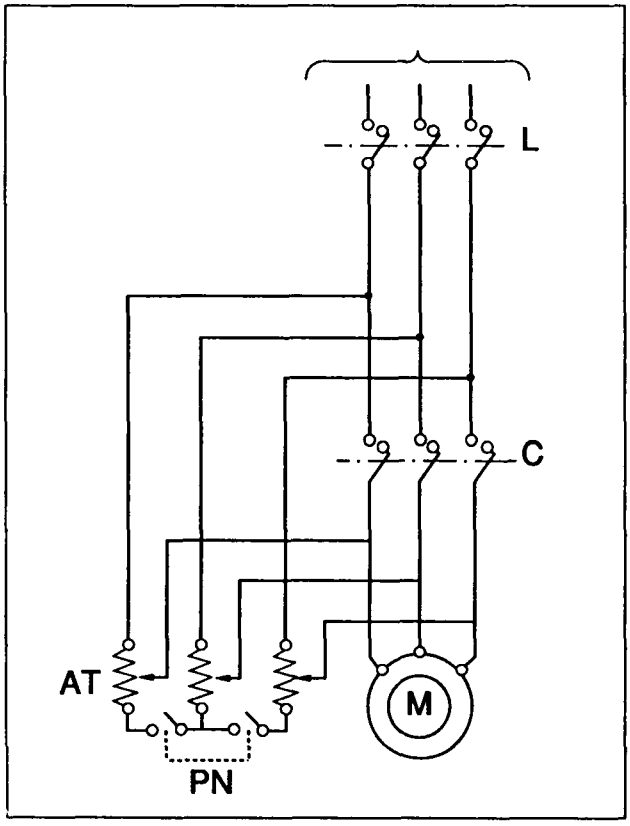
C – замыкатель накоротко,

PN – замыкатель с нейтральными точками высокого напряжения,

AT – автотрансформатор.

Первая стадия:

Работа при пониженном напряжении за счет закрытия PN, вызывающего закрытие L.



Пуск с автотрансформатором.

Вторая стадия:

Работа в качестве индуктивности за счет открытия PN.

Третья стадия:

Работа при полном напряжении за счет закрытия C.

Замечание:

Можно заменить автотрансформатор жидкостным реостатом, который автоматически и постепенно воспроизводит функции звезды статора путем регулировки уровня электролита в пусковой ванне.

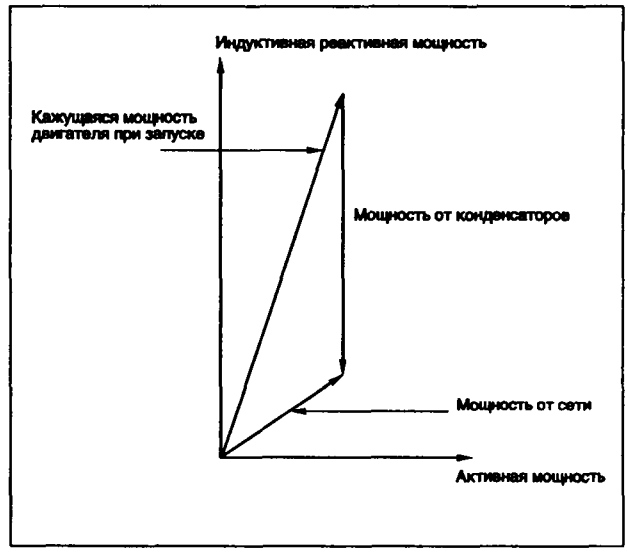
1.6.6.3. Пуск в цепи статора с конденсатором

Этот способ сохраняет характеристики запуска двигателя при полном напряжении. Он применяется специально для синхронных двигателей, у которых необходимо оставить неизменным пусковой крутящий момент, например, в цементировочных агрегатах или установках-дробилках.

Во время фазы запуска конденсаторы предоставляют часть реактивной энергии. Мощность двигателя в связи с этим невелика. Скачок мощности в цепи тока уменьшается тем более.

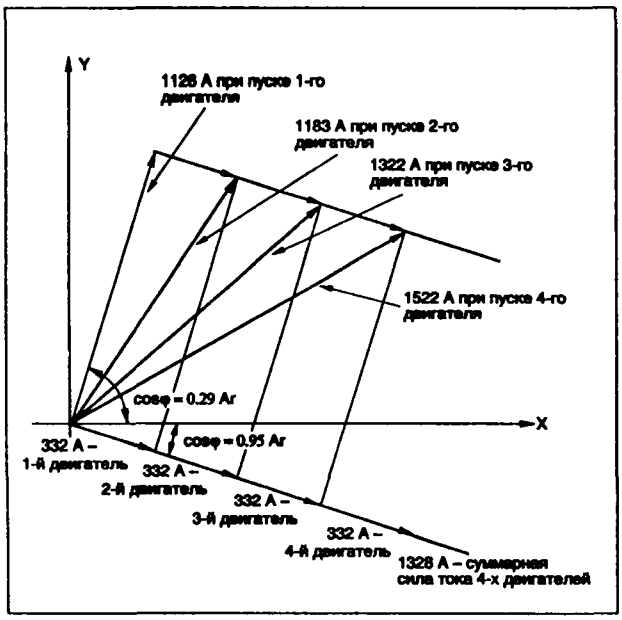
Реализация этого способа является очень тонким делом. Она требует изучения системы двигатель–конденсатор с целью предупредить резонансные явления и перегрузки, вызванные самовозбуждением двигателя и механическими колебаниями системы передач.

С другой стороны, устройства управления должны быть выбраны специально под конденсаторную коммутацию.



Замечания:

Один вариант использования этого решения был применен для запуска нескольких синхронных двигателей. Перевозбуждение двигателя в работе снижает скачок тока при пуске. Пример дается на следующем рисунке.



Сила тока при запуске 4-х синхронных двигателей.

1.6.6.4. Пускатель в цепи статора с переключением со звезды на треугольник

(Для двигателей низкого напряжения и малой мощности).

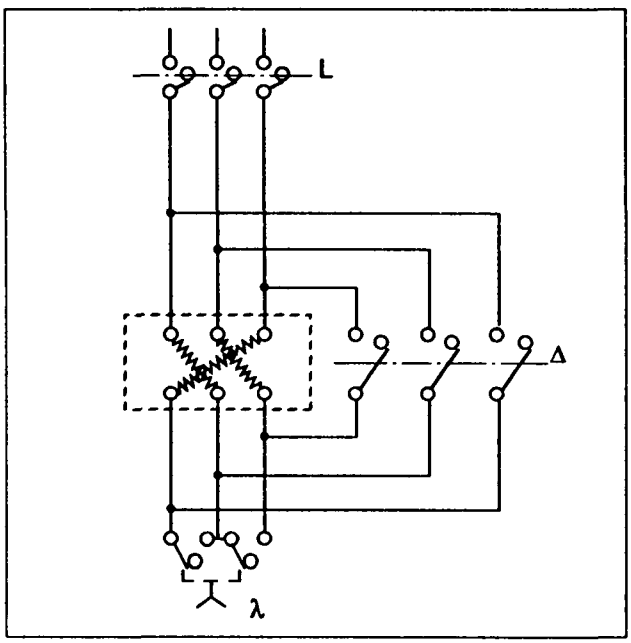
Запуск: включение L и λ.

После паузы одновременно открытие λ и включение Δ.

Напряжение на зажимах обмотки двигателя снижается в отношении:

$$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}58$$

Крутящий момент и сила тока снижается в 3 раза.



Применение подобного способа требует соблюдения некоторых мер предосторожности:

— При переходе со звезды на треугольник возникают временные перенапряжения. Это явление, связанное с разрывом индуктивной цепи, которую представляет собой двигатель, наблюдается, когда переключение осуществляется вдали от номинальной скорости (пример – вентилятор). Если переключение производится вблизи номинальной скорости (пример – компрессор), то контр-ЭДС двигателя оказывается таковой, что перенапряжения не вызывают опасений;

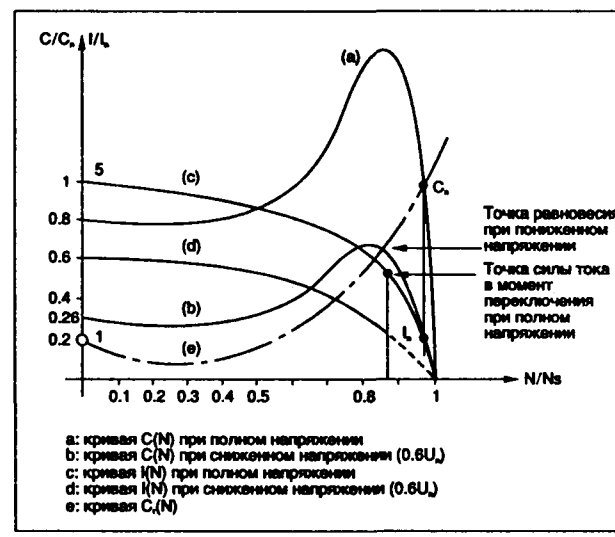
— Замедление машины при переходе со звезды на треугольник.В течение одного короткого мгновения между выключением замыкателя звезды и включением замыкателя треугольника двигатель оказывается без напряжения.Как следствие, машина замедляет ход.

Расчетами можно показать, что это замедление не очень существенно, так как оно вызывает резкое возрастание пика силы тока.

1.6.6.5. Изменение крутящего момента и силы тока при статорном запуске

На следующем рисунке кривые иллюстрируют в качестве примера изменение крутящего момента и силы тока для случая снижения напряжения до 0,6 от номинального.

Для того, чтобы запуск оказался возможным, необходимо, чтобы момент сопротивления был не слишком велик.



1.6.6.6. Пускатели в цепи ротора

1.6.6.6.1. Преимущества роторного пуска

Подобный тип запуска позволяет разрешить практически все проблемы, которые могут возникнуть при пуске, а именно:

— снижение толчка тока в сети с увеличением крутящего момента двигателя,

— согласование крутящего момента двигателя с моментом сопротивления,
— продолжительный и постепенный запуск.

Роторный пуск может использоваться только для асинхронных двигателей с фазным ротором, либо для синхронизированных двигателей.

Применение этого способа в особенности ограничено для пуска под нагрузкой.

1.6.6.6.2. Принципиальная схема функционирования

Рассмотрим пример симметричного запуска с *n* стадиями.

Первая стадия:

Питание от статора и пуск на суммарное сопротивление ротора закрытием L.

Вторая стадия:

Замыкание накоротко первой секции роторного сопротивления закрытием C1.

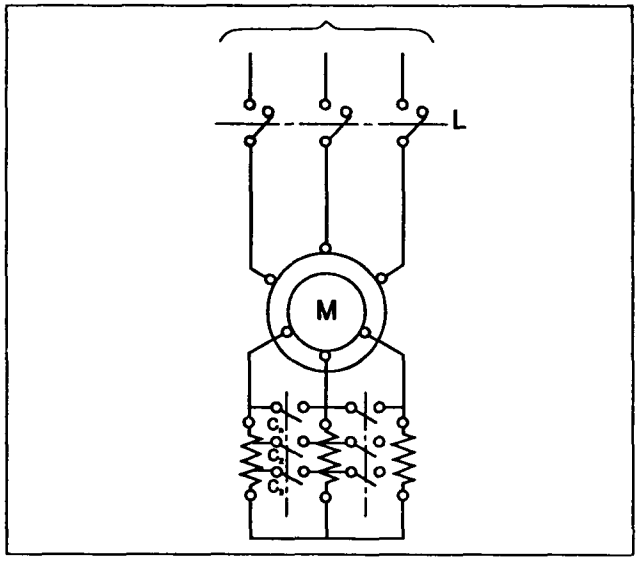
Третья стадия:

Замыкание накоротко второй секции роторного сопротивления закрытием C2.

N-я стадия:

Замыкание накоротко *n*-ой секции роторного сопротивления закрытием C_{n-1}.

Количество стадий и ступеней переключения *n* всегда большей 1 согласно числу секций или замыкателей.



Число *n* определяется приближенно по формуле:

$$n = \frac{\log g_n}{\log \frac{C_n}{C_p}}$$

C_p – пиковый крутящий момент.

g_n – скольжение

Либо иначе:

$$\frac{C_n}{C_p} = \sqrt{g_n}.$$

В разных случаях либо C_p известно, тогда выводится *n*, либо наоборот.

Для полного определения оборудования роторного пуска необходимо знать режим эксплуатации, а именно: частоту запусков во времени и продолжительность одного пуска.

Отсутствие регламентаций для двигателей приводит к тому, что необходимое оборудование определяется специалистами в каждом случае индивидуально.

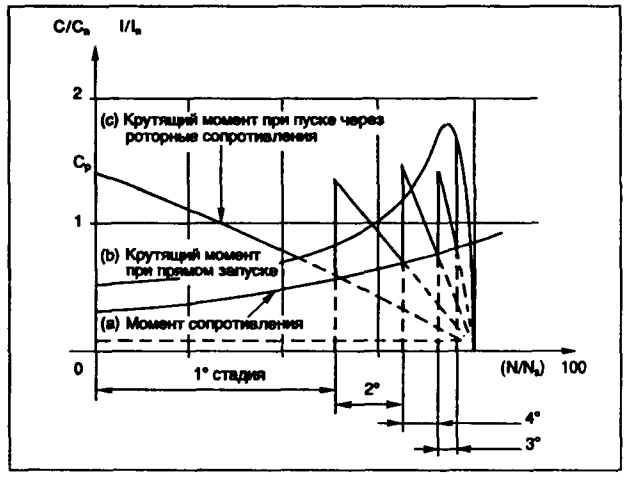
1.6.6.6.3. Изменение крутящего момента и силы тока при роторном запуске

Характеристики запуска иллюстрируются двумя следующими рисунками.

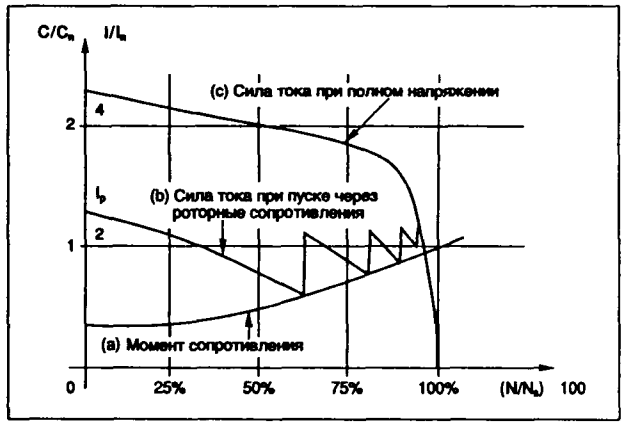
На каждой ступени крутящий момент двигателя изменяется в пределах двух значений. Нижнее принимается равным номинальному крутящему моменту. Сопротивление ротора на каждой ступени меняется, вследствие чего изменяется характеристика «крутящий момент–сила тока». На последней стадии роторное сопротивление понижается до внутреннего сопротивления ротора R_a.

Замечание:

Иногда необходимо реализовать линейный или непрерывный пуск. Включение в цепь ротора парожидкостного реостата обеспечивает нарастание скорости двигателя при постоянном ускорении.



Кривые крутящих моментов.



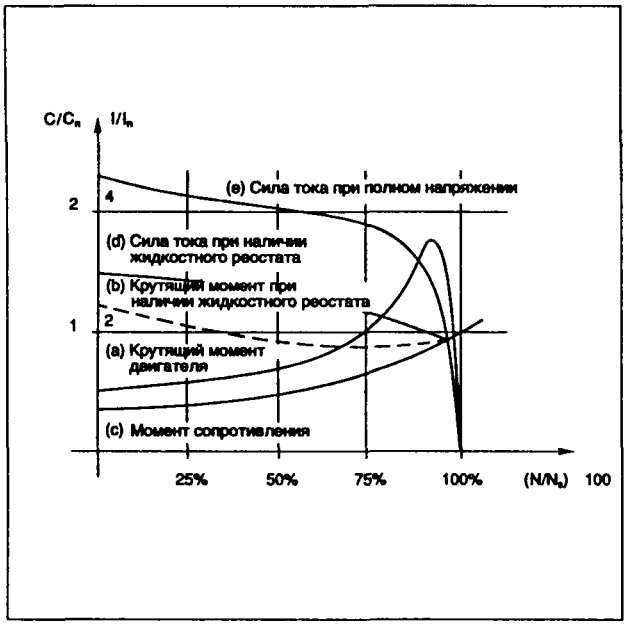
Кривые силы токов.

Этот прибор основывается на разности сопротивления жидкости и ее пара. Скачок тока при пуске вызывает мгновенное испарение жидкости.

В итоге сопротивление ротора оказывается значительным. По мере того, как пар улетучивается и конденсируется, оно постепенно падает.

1.6.6.6.4. Кривые крутящего момента и силы тока при использовании жидкостного реостата

Использование жидкостного реостата обеспечивает более плавные изменения.



Кривые крутящего момента и силы тока при наличии жидкостного реостата.

1.6.7. Улучшение коэффициента мощности

Малые значения коэффициента мощности обусловливают значительные неудобства:

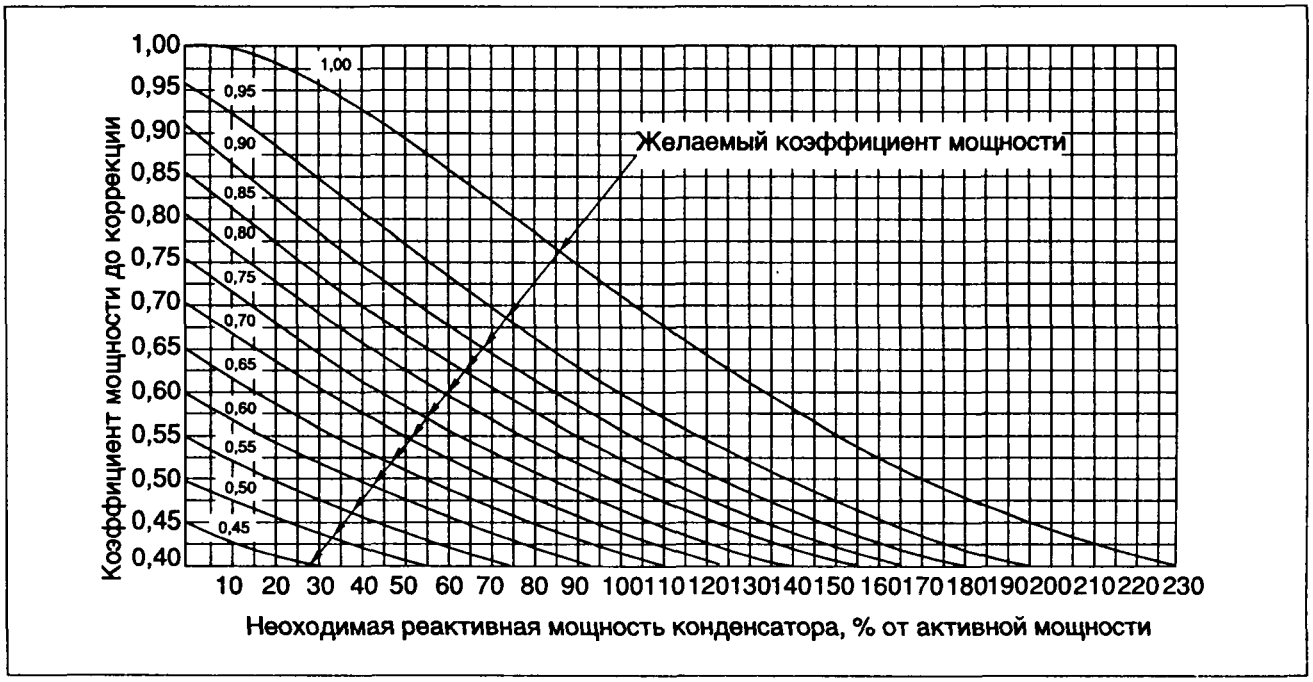
— Государственное электроэнергетическое управление Франции накладывает счет на реактивную энергию(*), когда коэффициент мощности абонента ниже 0.93;
— При одной и той же активной мощности ток оказывается тем выше, чем меньше коэффициент мощности. Отсюда следует, что возрастают потери энергии, связанные с эффектом Джоуля;
— Понижается пусковой крутящий момент асинхронных двигателей в связи с падением напряжения, которое вызвано повышенной силой тока, необходимого для обеспечения энергии намагничивания двигателя.

Пользователь, столкнувшийся с проблемой плохого коэффициента мощности, имеет 3 решения:

— увеличить сечение проводов, а также мощность приборов: трансформаторов, двигателей и т.д.;
— смириться с увеличением потерь, вызванных эффектом Джоуля;
— создать источник реактивной энергии.

Последнее решение, вообще говоря, является наилучшим. Реактивная мощность, необходимая для изменения коэффициента мощности от величины $\cos \varphi_0$ на $\cos \varphi_1$, может быть оценена с помощью нижеприведенных кривых. Из них следует, что заметное улучшение коэффициента мощности имеет место при работе машины вхолостую или при низких мощностях двигателей и трансформаторов.

(*)В течение 5 месяцев, с ноября по март, поставка необходимой реактивной мощности, в общем случае, обеспечивается батареями конденсаторов.



1.7. ТЕРМОДИНАМИКА

1.7.1. Общие сведения

1.7.1.1. Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии)

1.7.1.1.1. Замкнутая система

При циклической эволюции системы, не обменивающейся веществом с внешней средой, сумма произведенной работы (W) и поглощенного тепла (Q) равна нулю:

$$W + Q = 0$$

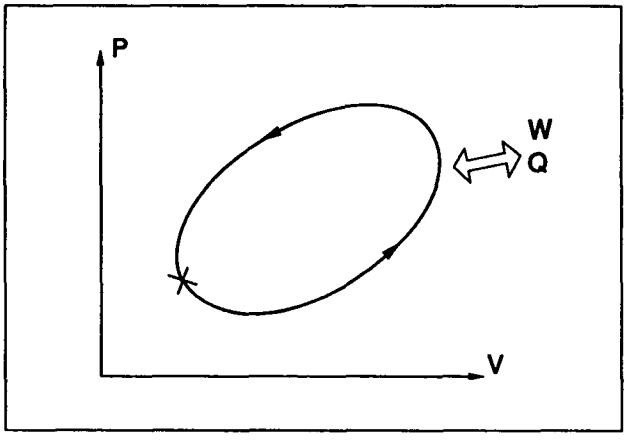
При нециклическом процессе:

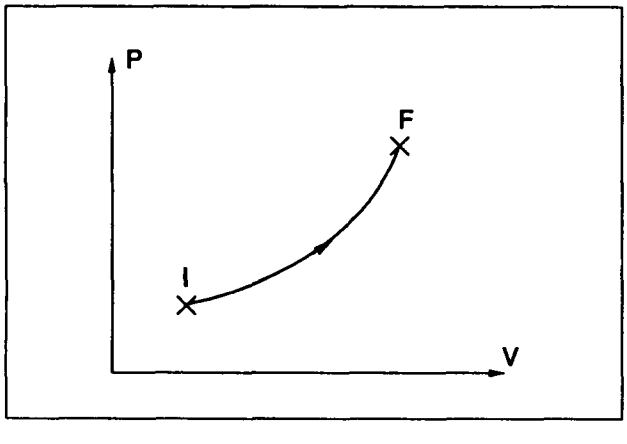
$$W + Q = \Delta U + \Delta E_c$$

ΔU – изменение внутренней энергии ($\Delta U = U_f - U_i$);

ΔE_c – изменение кинетической энергии.

При необходимости следует учитывать и другие виды изменений энергии (потенциальной, электромагнитной и т.д.).





1.7.1.1.2. Открытая система, энтальпия

В случае, когда система обменивается массой и энергией с внешней средой, необходимо учитывать изменение внутренней энергии (U_e, U_f), а также работу внешних сил, развиваемую на входе и выходе:

$$W + Q + (U_e + P_eV_e) - (U_r + P_rV_r) = \Delta U + \Delta E_c$$

или:

$$W + Q + (H_e + H_r) = \Delta U + \Delta E_c$$

где H есть энтальпия – функция состояния, определяемая как:

$$H = U + PV$$

В случае установившегося режима, очень часто встречающегося на практике:

$$\Delta U = U_f - U_i = 0$$

$$W + Q = \Delta H + E_c$$

(в более общем случае необходимо учитывать изменения других видов энергии).

ΔH – изменение энтальпии флюида между условиями на входе и выходе открытой системы ($\Delta H = H_r - H_e$),

W, Q – работа и тепло, поглощаемое системой.

Работа и поглощаемое тепло изменяют состояние флюида, заполняющего систему: изменяются температура, давление, химические реакции, фазовые переходы и т.д.

Энтальпия измеряется в Дж · моль$^{-1}$ или Дж · кг$^{-1}$.

1.7.1.2. Второе начало термодинамики (различие между работой и теплотой)

Второе начало определяет направление возможных превращений.

1.7.1.2.1. Закрытие системы

В случае закрытой системы второе начало в общем виде формулируется следующим образом: элементарное количество тепла δQ, поглощаемое системой извне при температуре T в циклическом процессе, таково, что:

$$\int \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

знак равенства соответствует обратимому процессу.

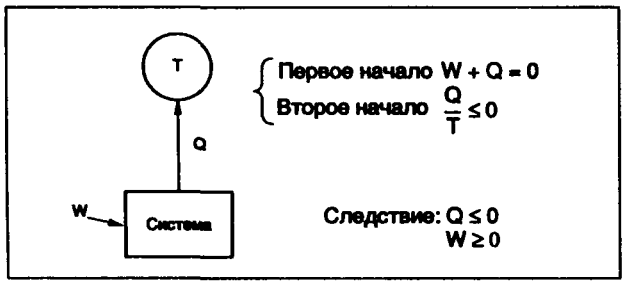
1.7.1.2.1.1. Приложение: циклическая эволюция однотемпературной системы

Первое начало: $W + Q = 0$

Второе начало: $\frac{Q}{T} \le 0$

$$\Rightarrow Q \le 0 \text{ и } W \ge 0$$

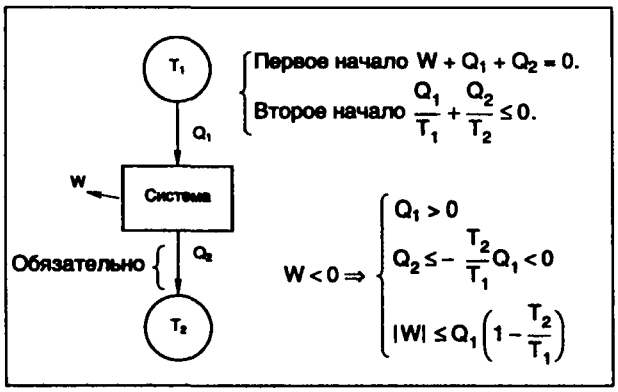
Такая система может только получать работу ($W > 0$) и отдавать тепло ($Q < 0$).



Однотемпературная система при циклической эволюции.

1.7.1.2.1.2. Приложение: циклическая эволюция двухтемпературной системы (определение энтропии)

Система подобного рода обменивается теплом с двумя источниками постоянной температуры (T_1 и T_2, $T_1 > T_2$).



Совершение работы двухтемпературной системой.

Первое начало $W + Q_1 + Q_2 = 0$.

Второе начало $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \le 0$.

Производство работы ($W < 0$) в двухтемпературном цикле приводит к следующим результатам:

$$Q_1 > 0$$

$$Q_2 \le -\frac{T_2}{T_1} Q_1$$

$$|W| \le Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

При циклическом производстве работы второе начало показывает, что передача некоторого количества тепла Q_2 холодному источнику является обязательной; теплу Q, полученное от нагретого источника, не может полностью перейти в работу W.

Для произвольного процесса в закрытой системе можно показать, что величина $\int \frac{\delta Q}{T}$ зависит лишь от начального и конечного состояний, но не зависит от промежуточного пути.

Это приводит к определению новой функции состояния – энтропии – с помощью соотношения:

$$\int \frac{\delta Q}{T} \le S_2 - S_1,$$

где равенство соответствует обратимому процессу; либо с помощью явного введения слагаемого, соответствующего производству энтропии за счет необратимости:

$$\int \frac{\delta Q_{rev}}{T} + \int \delta_i S = S_2 - S_1 \quad (\delta_i S > 0).$$

1.7.1.2.2. Открытая система

Для произвольного превращения в открытой системе:

$$\int \frac{\delta Q}{T} \le S_2 - S_1 + S_r - S_a.$$

1.7.1.3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

1.7.1.3.1. Термодинамические функции

Функции U (внутренняя энергия) и H (энтальпия) были введены при изложении первого начала, а функции S (энтропия) – второго начала термодинамики. Эти функции можно определить, если только состояние системы определено параметрами состояния: P (давление), T (температура), x_i (состав в мольных долях).

В этом смысле роль функций и параметров состояния в описании состояния системы эквивалентна.

Исходя из этих "первичных" функций можно определить следующие функции.

1.7.1.3.1.1. Свободная энергия

$$F = U - TS,$$

использование которой удобно для закрытых систем, изменяющихся при постоянной температуре:

$$\Delta F = W - T \int \delta_i S$$

1.7.1.3.1.2. Термодинамический потенциал Гиббса

$$G = H - TS$$

для открытых систем с постоянной температурой:

$$\Delta G = W - T \int \delta_i S$$

Таким образом, в реальном процессе без совершения работы термодинамический потенциал может только убывать:

$$\Delta G = -T\int \delta_i S.$$

Состояние равновесия отвечает минимуму термодинамического потенциала: этот результат является основой всех расчетов химического и физического (фазового) равновесия.

1.7.1.3.1.3. Избыточная энергия

$$E = H - T_0 S,$$

где T_0 – характерная температура окружающей среды.

Эта функция позволяет выразить второе начало в более ясной форме: выраженная в Джоулях, она дает величину "благородной энергии", то есть работы и механического эквивалента тепла, полученного от окружающей среды:

$$\delta W + \delta Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = dH - T_0 dS + T_0\delta_i S = dE + \delta P_{ex}$$

δP_{ex} – потери энергии.

В предыдущих соотношениях иногда бывает необходимо учитывать изменения кинетической или потенциальной энергии: dE_c, dE_p.

Замечание: В дифференциальных соотношениях необходимо различать элементарные вариации величин, обозначенные через δ (δW, δQ), которые зависят от хода исследуемого процесса, и полные точные дифференциалы функций состояния, обозначенные через d (dH, dS, dE и т.д.), которые зависят только от начального и конечного состояний.

Помимо этого, символ Δ означает конечное приращение (разница между двумя "удаленными" состояниями); наконец, символ ∂ используется для обозначения частных производных.

1.7.1.3.2. Балансовые соотношения и коэффициент полезного действия

Баланс энергии:

$$W + Q = \Delta U$$

Баланс энтальпии:

$$W + Q = \Delta H$$

Баланс энтропии:

$$\int\frac{\delta Q}{T} + \int\delta_i S = \Delta S$$

Баланс избыточной энергии:

$$W + \int\delta Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = \Delta E + P_{ex}.$$

С этими балансовыми соотношениями связаны различные понятия коэффициента полезного действия, которые выражаются отношением полезного усилия к затраченному усилию:

— энергетический кпд η_{en}, или термический к.п.д. (в приложении к тепловым машинам, печам);
— теоретический кпд η_{th} или кпд Карно (тепловые машины): это есть отношение полезного усилия, которые можно получить в обратимом процессе, к затраченному усилию;
— избыточный кпд η_{ex} (применяется во всех случаях): он показывает степень отклонения от обратимого процесса.

Следующие рисунки демонстрируют приложения этих понятий к тепловым машинам (двухтемпературный цикл в замкнутой системе) и традиционным открытым системам (компрессор, турбодетандер, печь).

1.7.1.3.3. Связь функций и параметров состояния

При обратимой эволюции закрытой системы (без химических реакций) работа сил давления и количество тепла, полученное извне, выражаются следующим образом:

$$\delta W = -P dV$$

и

$$\delta Q = C_v dT + l dV$$

или же

$$\delta Q = C_p dT + h dP.$$

Применение первых двух начал приводит к следующим соотношениям:

$$dU = C_v dT + (l - P)dV$$

$$dH = C_p dT + (h + V)dP$$

$$dS = \frac{C_v dT}{T} + \frac{1}{T}dV = \frac{C_p dT}{T} + \frac{h}{T}dP.$$

Учитывая, что эти величины являются полными дифференциалами, получим:

— соотношения Клапейрона:

$$l = T\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_v$$

$$h = -T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_p$$

$$\left(\frac{\partial C_v}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v$$

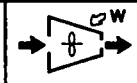
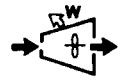
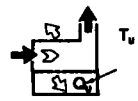
— соотношения Максвелла:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_s = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_v$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = -\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T$$

	Компрессор	Турбина	Нагреватель
Баланс			
Энтальпии	$W = \Delta H$	$W = \Delta H$	$Q_u + Q_p = \Delta H$
Энергии	$W = \Delta E + P_{ex}$	$W = \Delta E + P_{ex}$	$Q_u\left(1-\frac{T_O}{T_u}\right) = \Delta E + P_{ex}$
· Полезное действие · Затраченное · η_{en}	$\Delta H > 0$ $W = \Delta H > 0$ $\frac{1}{(?)}$	$W = \Delta H < 0$ $\Delta H < 0$ $\frac{1}{(?)}$	$Q_u < 0$ $\Delta H < 0$ $\frac{\Delta HQ}{\Delta E}$
· Полезное действие · Затраченное · η_{ex}	$\Delta E > 0$ $W = \Delta H > 0$ $\frac{\Delta E}{\Delta H}$	$W = \Delta H < 0$ $\frac{\Delta E > 0}{\frac{\Delta H}{\Delta E}}$	$Q_u\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right) = \Delta E + P_{ex}$ $\frac{\Delta E < 0}{\frac{Q_u}{\Delta E}\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right)}$

Открытые процессы: выражения для к. п. д.

– и соотношения Майера:

$$C_p - C_v = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -T\frac{\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p^2}{\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T} = -T\frac{\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v^2}{\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T}$$

откуда следуют общие соотношения:

$$dU = TdS - PdV = C_v dT + \left[T\left(\frac{\partial V}{\partial V}\right)_v - P\right]dV$$

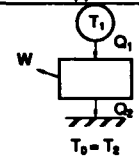
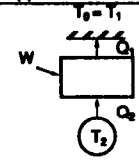
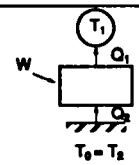
$$dH = TdS - VdP = C_p dT + \left[V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right]dP$$

$$dS = \frac{C_v dT}{T} + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dV = \frac{C_p dT}{T} + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p dP$$

Баланс энтальпии $W + Q + Q_2 = 0$

Баланс избыточной энергии $W + Q_1\left(1-\frac{T_0}{T_1}\right) + Q_2\left(1-\frac{T_0}{T_2}\right) = 0$

К. п. д.:

	Тепловой двигатель	Холодильная машина	РАС
			
Энергетический · Полезное действие · Затраченное · η_{en}	$W < 0$ $Q_1 > 0$ $\frac{\lvert W\rvert}{Q_1}$	$Q_2 > 0$ $W > 0$ $\frac{Q_2}{W}$	$Q_1 < 0$ $W > 0$ $\frac{\lvert Q_1\rvert}{W}$
Теоретический · $P_{ex} = 0$ · Полезное действие · Затраченное · η_{th}	$W_{th} = -Q_1\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right) < 0$ $Q_1 > 0$ $1-\frac{T_2}{T_1}$	$Q_{2th} = W\frac{T_2}{T_1 - T_2} > 0$ $W > 0$ $\frac{T_2}{T_1 - T_2}$	$Q_{1th} = -W\frac{T_2}{T_1 - T_2} < 0$ $W > 0$ $\frac{T_2}{T_1 - T_2}$
Избыточный · Полезное действие · Затраченное · η_{ex}	$W < 0$ $Q_1\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right) > 0$ $\frac{\lvert W\rvert}{Q_1\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right)}$	$Q_2\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right) > 0$ $W > 0$ $\frac{Q_2\frac{T_1 - T_2}{T_2}}{W}$	$Q_1\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right) > 0$ $W > 0$ $\frac{Q_1\frac{T_1 - T_2}{T_2}}{W}$

$\eta_{en} = \eta_{th} \times \eta_{ex}$

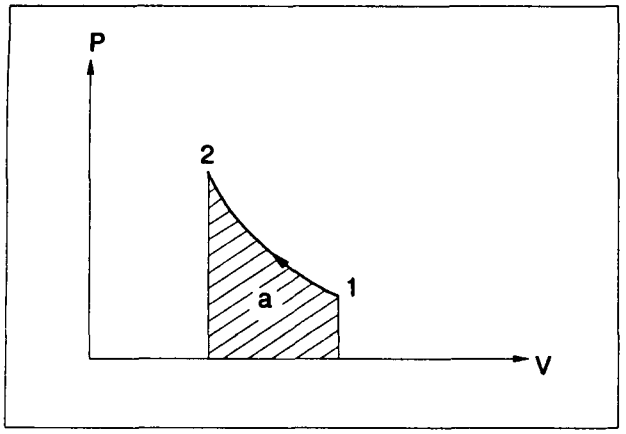
Двухтемпературные циклы: выражения для к. п. д.

Эти соотношения можно применять, если использовать уравнение состояния $f(P, V, T) = 0$ (см. § 1.7.2.1. и 1.7.2.2.).

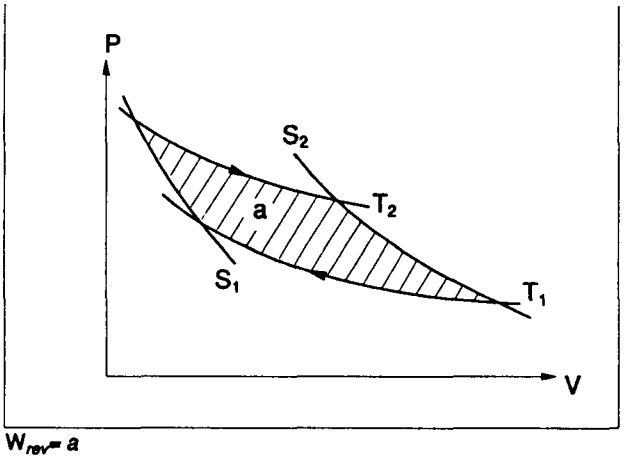
1.7.1.4. Термодинамические диаграммы

1.7.1.4.1. Диаграмма P–V (Клапейрона)

При обратимом процессе площадь под кривой представляет собой работу внешних сил; при циклическом процессе работа, совершаемая флюидом, равна площади внутри контура; цикл соответствует работе двигателя, если направление обхода отрицательно (по ходу часовой стрелки).



$W_{ext} = a$.



$W_{rev} = a$

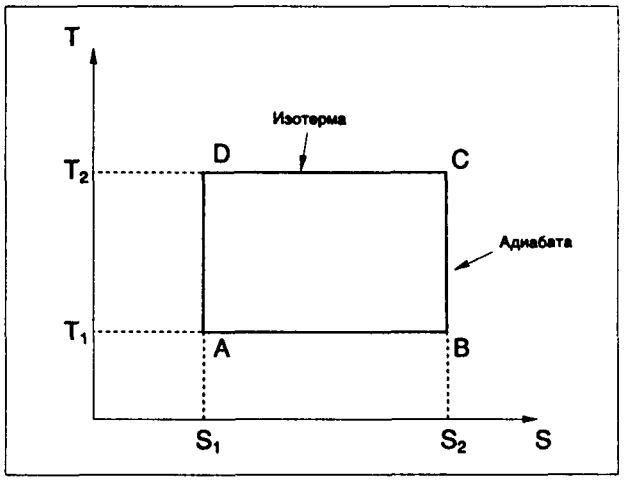
1.7.1.4.2. Диаграмма T–S (энтропийная)

Обратимый цикл Карно изображается прямоугольником; его площадь равна количеству полученного тепла:

$$Q = \int T d S$$

но если процесс необратим, то:

$$Q = \int T d S - \int T \delta_i S < \text{площади}$$



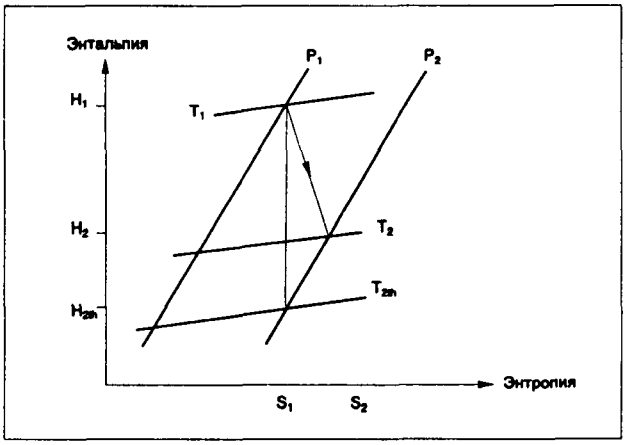
Обратимый цикл Карно.

1.7.1.4.3. Диаграмма H–S (Мольера)

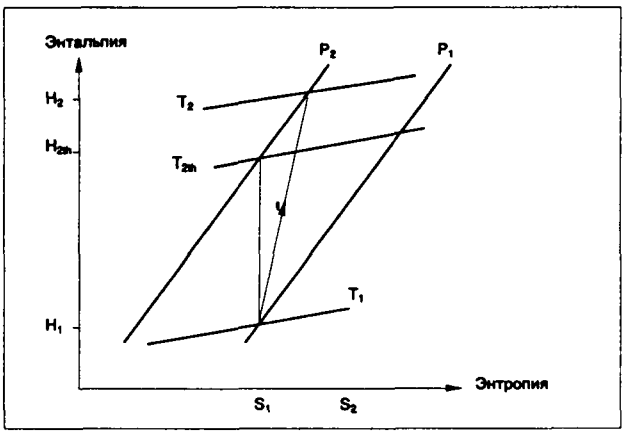
Часто используется для адиабатических превращений (компрессоры, турбины), в которых она позволяет показать степень необратимости, характеризуемую отношением:

$$\eta_s = \frac{W}{W_{rev}},$$

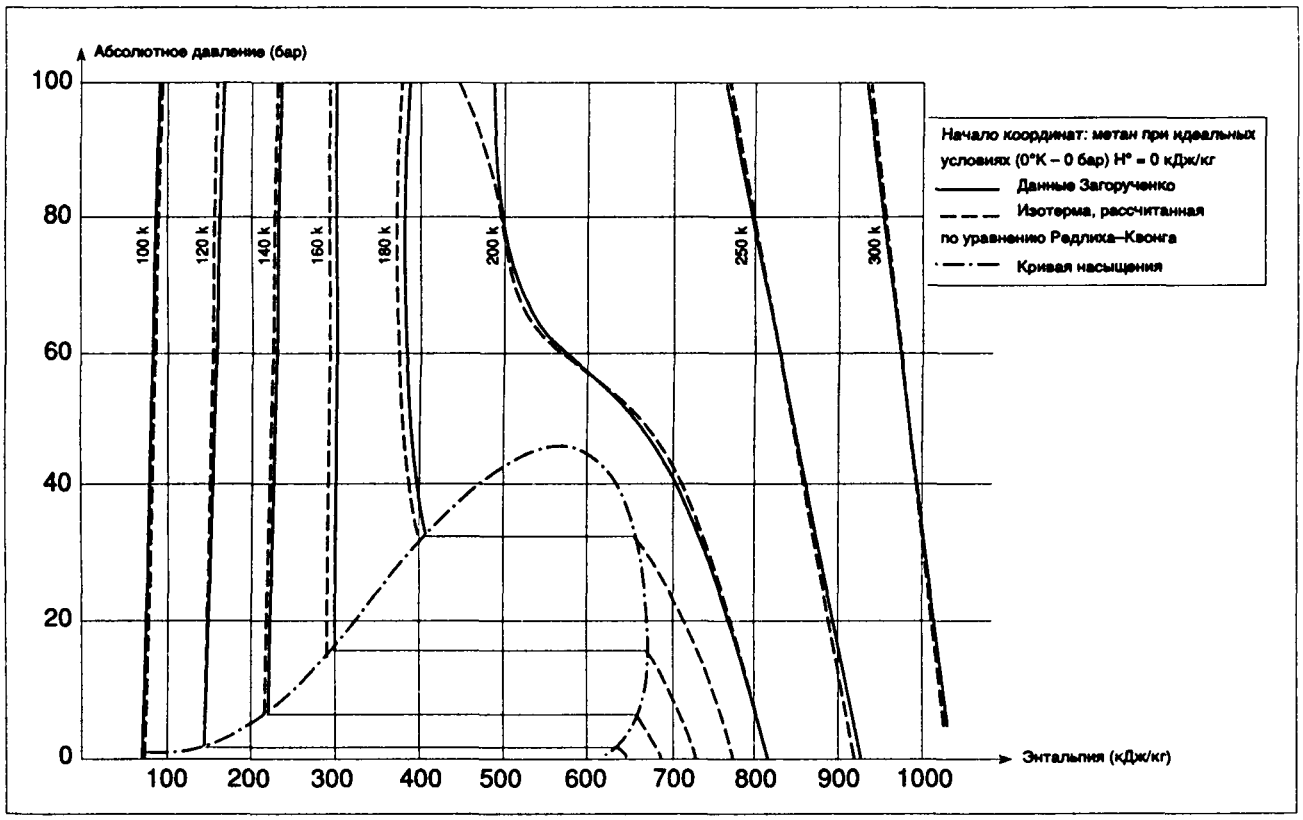
которое называется "изэнтропический к.п.д.".



Компрессор: $\eta_s = \dfrac{H_{2th} - H_1}{H_2 - H_1}$.



Турбина: $\eta_s = \dfrac{H_2 - H_1}{H_{2th} - H_1}$.



Энтальпийная диаграмма метана.

1.7.1.4.4. Диаграмма P–H (энтальпийная)

Очень удобна для представления изобарических превращений: количество теплоты в обменном процессе непосредственно считывается с оси абсцисс:

$$dH = \delta Q$$

1.7.2. Свойства газов

1.7.2.1. Модель идеального газа

1.7.2.1.1. Уравнение состояния

Совершенным газом является особый гипотетический флюид, свойства которого строго удовлетворяют экспериментальным законам, исторически связанным с именами Бойля, Мариотта, Шарля и Гей-Люссака:

$PV = \text{const}$ при постоянной температуре θ,

$V = V_0(1 + \alpha\theta)$ при постоянном давлении, θ – температура в градусах Цельсия, V_0 – объем при 0°C,

$P = P_0(1 + \beta\theta)$ при постоянном объеме, P_0 – давление при 0 K, где α и β стремятся соответственно к α° и β°, когда плотность стремится к 0, при этом:

$$\frac{1}{\alpha^\circ} = \frac{1}{\beta^\circ} = 273,15°C$$

Если определить термодинамическую температуру T (или абсолютную температуру) как:

$$T = \theta + \frac{1}{\alpha^\circ}$$

то легко показать, что комплекс $\frac{PV}{T}$ инвариантен для фиксированной порции газа.

Тогда для одной моли газа (1 моль = N молекулам, где N – число Авогадро) можно получить:

$$\frac{PV}{T} = R$$

где:

R – универсальная постоянная для совершенных газов R = 8,314 45 Дж · моль$^{-1}$ · K^{-1};

P – абсолютное давление (Па);

T – абсолютная температура (K);

V – мольный объем (м^3 · моль$^{-1}$).

Для *n* молей газа, занимающих некоторый объем V:

$$PV = nRT$$

или иначе, для массы m газа с молекулярной массой M (*кг · моль$^{-1}$*) *в некотором объеме V*:

$$PV = \frac{m}{M}RT$$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Физически, модель *совершенного газа* подразумевает отсутствие всякого взаимодействия между молекулами в газе; она позволяет легко оценивать приближенно свойства газа при малых давлениях и высоких температурах (вдали от критической точки и от области фазового перехода).

1.7.2.1.2. Термодинамические свойства совершенных газов

Использование уравнения состояния совершенных газов в соотношениях § 1.7.1.3.3 приводит к следующим свойствам совершенных газов.

1.7.2.1.2.1. Соотношение Клапейрона

$$l = P \text{ и } h = -V$$

$$\left.\begin{aligned}\left(\frac{\partial C_v^0}{\partial V}\right)_T &= 0\\ \left(\frac{\partial C_p^0}{\partial P}\right)_T &= 0\end{aligned}\right| \Rightarrow$$

удельные теплоемкости совершенного газа (обозначенные через C_p^0 и C_v^0) являются функциями только температуры

1.7.2.1.2.2. Соотношение Майера

$$C_p^0 - C_v^0 = R$$

1.7.2.1.2.3. Функции состояния

$$dU = C_v^0 dT$$

$$dH = C_p^0 dT$$

$$dS = C_p^0\frac{dT}{T} - R\frac{dP}{P} = C_v^0\frac{dT}{T} + R\frac{dV}{V} = C_p^0\frac{dV}{V} + C_v^0\frac{dP}{P}$$

1.7.2.1.2.4. Законы Джоуля

Законы Джоуля выводятся из последних соотношений, устанавливающих, что внутренняя энергия и энтальпия совершенного газа зависят только от температуры.

В итоге, термодинамические свойства могут быть вычислены с помощью соотношений:

$$H^0(T) - H^0(T_0) = \int_{T_0}^{T} C_p^0 dt$$

$$S^0(P_0, T) - S^0(P_0, T_0) = \int_{P_0}^{P}\left(\frac{C_p^0}{T}\right)dT$$

и

$$S^0(P, T) - S^0(P_0, T) = \int_{T_0}^{T} - R\frac{dP}{P} = - R \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

Существуют многочисленные таблицы основных свойств различных веществ(C_p^0, $H^0(T)$ и т.д.) в совершенном состоянии.

Чтобы полностью определить $H^0(T)$ и $S^0(P,T)$, надо зафиксировать величину постоянных $H^0(T_0)$ и $S^0(P_0,T_0)$: широко распространено следующее допущение:

$$\left.\begin{aligned}H^0(T_0) &= 0\\ S^0(P_0, T_0) &= 0\end{aligned}\right|$$

для совершенного газа при $T_0 = 0$ K и $P_0 = 0,1$ МПа (или 1 атм)

Однако эти соглашения не являются универсальными, поэтому прежде, чем пользоваться различными таблицами, необходимо убедиться в соответствии принятых соглашений.

Пример одной из таблиц дан ниже.

На основе данных, взятых из таблицы, может быть рассчитано любое другое свойство с помощью установленных ранее соотношений:

$$C_v^0 = C_p^0 - R$$

$$U^0(T) = H^0(T) - RT$$

$$G^0(P, T) = H^0(P, T) - TS^0(P, T)$$

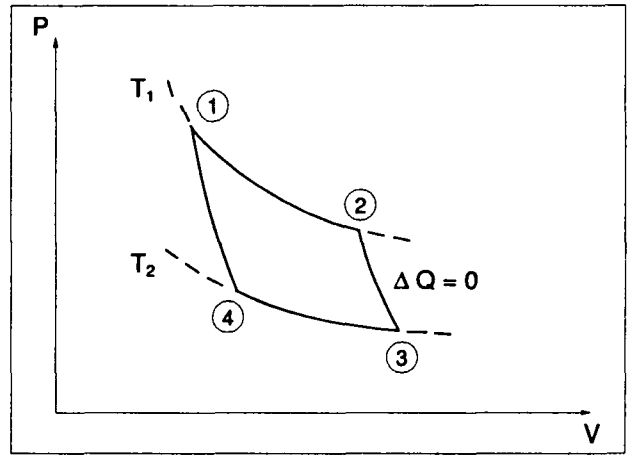
и в частности:

$$G^0(P, T) - G^0(P_0, T) = RT \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

и т.д.

1.7.2.1.3. Приложение: цикл Карно совершенного газа

Такой цикл состоит из двух изотерм и двух адиабат.



Цикл Карно.

1.7.2.1.3.1. Адиабатический процесс

$$dS = 0 \Rightarrow C_p^0\frac{dV}{V} + C_v^0\frac{dP}{P} = 0$$

либо,заменяя величины C_p^0 и C_v^0 своими средними постоянными значениями и интегрируя:

$$PV^\gamma = \text{const, где } \gamma = \frac{C_p^0}{C_v^0}$$

либо

$$P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T = \text{const}$$

Таблица нормальных алканов (с линейной цепочкой)

Вещество			Температура, K							
Формула	Название	Состояние	0	200	298,15	300	400	500	600	700
			Удельная теплоемкость C_p^0, Дж · моль$^{-1}$ · K^{-1}							
CH_4	Метан	г	0	33,51	35,69	35,77	40,63	46,53	52,51	58,20
C_2H_6	Этан	г	0	42,26	52,47	52,72	65,48	77,99	89,24	99,20
C_3H_8	Пропан	г	0	56,07	73,60	73,93	94,01	112,59	128,70	142,67
C_4H_{10}	*n*-Бутан	г	0	76,44	98,49	98,95	124,77	148,66	169,28	187,02
C_5H_{12}	*n*-Пентан	г	0	93,55	120,04	120,62	152,55	182,59	208,78	231,38
C_6H_{14}	*n*-Гексан	г	0	110,58	142,59	143,26	181,54	217,28	248,11	274,05
C_7H_{17}	*n*-Гептан	г	0	127,65	165,18	165,98	210,66	252,09	287,44	317,15
C_8H_{18}	*n*-Октан	г	0	144,77	187,78	188,70	239,74	286,81	326,77	360,24
C_9H_{20}	*n*-Нонан	г	0	161,92	210,41	211,42	268,82	321,54	366,10	403,34
$C_{10}H_{22}$	*n*-Декан	г	0	179,08	233,05	234,18	297,98	356,43	405,85	446,43
$C_{11}H_{24}$	*n*-Ундекан	г	0	196,23	255,69	256,94	327,14	391,32	445,39	489,61
$C_{12}H_{26}$	*n*-Додекан	г	0	213,38	278,33	279,70	356,30	426,21	484,93	532,79
$C_{13}H_{28}$	*n*-Тридекан	г	0	230,53	300,97	302,46	385,46	461,10	524,47	575,97
$C_{14}H_{30}$	*n*-Тетрадекан	г	0	247,68	323,61	325,22	414,62	495,99	564,01	619,15
$C_{15}H_{32}$	*n*-Пентадекан	г	0	264,83	346,25	347,98	443,78	530,88	603,55	662,33
$C_{16}H_{34}$	*n*-Гексадекан	г	0	281,98	368,89	370,74	472,94	565,77	643,09	705,51
$C_{17}H_{36}$	*n*-Гектадекан	г	0	299,13	391,53	393,50	502,10	600,66	682,63	748,69
$C_{18}H_{38}$	*n*-Октадекан	г	0	316,28	414,17	416,26	531,26	635,55	722,17	791,87
$C_{19}H_{40}$	*n*-Нонадекан	г	0	333,43	436,81	439,02	560,42	670,44	761,71	835,05
$C_{20}H_{42}$	*n*-Икосан	г	0	350,58	459,45	461,78	589,58	705,33	801,25	878,23
	После *n*-декана возрастание на группу CH_2		0	17,15	22,64	22,76	29,16	34,89	39,54	43,18

			Температура, K							
			800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500
			Удельная теплоемкость C_p^0, Дж · моль$^{-1}$ · K^{-1}							
CH_4	Метан	г	63,51	68,37	72,80	76,78	80,37	83,55	86,44	88,99
C_2H_6	Этан	г	107,99	115,77	122,59	128,57	133,85	138,41	142,42	145,96
C_3H_8	Пропан	г	154,77	165,35	174,60	182,67	189,74	195,85	201,21	205,89
C_4H_{10}	*n*-Бутан	г	202,38	215,73	227,36	237,48	246,27	253,93	260,58	266,40
C_5H_{12}	*n*-Пентан	г	250,62	266,94	281,58					
C_6H_{14}	*n*-Гексан	г	296,23	315,06	331,37					
C_7H_{17}	*n*-Гептан	г	342,25	363,59	381,58					
C_8H_{18}	*n*-Октан	г	388,28	411,71	431,37					
C_9H_{20}	*n*-Нонан	г	433,88	459,82	481,58					
$C_{10}H_{22}$	*n*-Декан	г	479,90	508,36	531,79					
$C_{11}H_{24}$	*n*-Ундекан	г	526,01	556,77	582,00					
$C_{12}H_{26}$	*n*-Додекан	г	572,12	605,18	632,21					
$C_{13}H_{28}$	*n*-Тридекан	г	618,23	653,59	682,42					
$C_{14}H_{30}$	*n*-Тетрадекан	г	664,34	702,00	732,63					
$C_{15}H_{32}$	*n*-Пентадекан	г	710,45	750,41	782,84					
$C_{16}H_{34}$	*n*-Гексадекан	г	756,56	798,82	833,05					
$C_{17}H_{36}$	*n*-Гектадекан	г	802,67	847,23	883,26					
$C_{18}H_{38}$	*n*-Октадекан	г	848,78	895,64	933,47					
$C_{19}H_{40}$	*n*-Нонадекан	г	894,89	944,05	983,68					
$C_{20}H_{42}$	*n*-Икосан	г	941,00	992,46	1 033,89					
	После *n*-декана возрастание на группу CH_2		46,11	48,41	50,21					

г: Исправленные значения

Выборочные значения свойств углеводородов и их производных (Центр исследований термодинамики и прогноза углеводородов университета Техаса).

1.7.2.1.3.2. Изотермический процесс

$$T = const \Rightarrow PV = const$$

Характеристики обмена теплом и работой в таком процессе подытожены ниже в таблице.

Путь	Природа процесса	Обмен энергией	
		Теплота (Q)	Работа (W)
1 – 2	Изотерма T_1	$-RT_1\ln\frac{P_2}{P_1}$	$+RT_1\ln\frac{P_2}{P_1}$
2 – 3	Адиабата	0	$\int_{T_1}^{T_2} C_p dT$
3 – 4	Изотерма T_2	$-RT_2\ln\frac{P_4}{P_3}$	$+RT_2\ln\frac{P_4}{P_3}$
4 – 1	Адиабата	0	$\int_{T_1}^{T_2} C_p dT$

Энергетический кпд имеет значение

$$\eta_{en} = \frac{|W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}|}{W_{12}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

1.7.2.1.4. Идеальная смесь совершенных газов

Модель совершенного газа применяется для каждой составляющей смеси и для смеси в целом:

$$P_i V = n_i RT$$

где:

P_i – парциальное давление компонента *i*,

n_i – число молей компонента *i* в смеси.

$$PV = nRT$$

где: $n = \sum n_i$.

Таким образом, в идеальной смеси предполагается отсутствие взаимодействия составляющих на молекулярном уровне, причем как между однотипными молекулами, так и между молекулами разных видов.

Это приводит к тому, что свойства смеси представляются через свойства компонентов аддитивным образом.

1.7.2.1.4.1. Закон Дальтона

$P = \sum P_i$, откуда следует $P_i = y_i P$,

здесь: $y_i = \frac{n_i}{n}$ - мольная доля компонента *i* в газовой смеси.

Аналогично:

$$H_m^0(T) = \sum y_i H_i^c(T),$$

$$U_m^0(T) = \sum y_i U_i^c(T),$$

$$S_m^0(P, T) = \sum y_i [S_i^0(P, T) - R \ln (y_i)],$$

где второй член отражает возрастание энтропии из-за необратимости системы.

$$F_m^0(P, T) = \sum y_i [F_i^0 + RT \ln (y_i)],$$

$$G_m^0(P, T) = \sum y_i [G_i^0 + RT \ln (y_i)].$$

1.7.2.1.4.2. Законы Рауля и Генри

Если применить концепцию совершенного газа к растворам (идеальным растворам), то:

$$P_i = P_{s,i} x_i$$

где:

x_i – мольная доля компонента *i* в жидкой фазе;

$P_{s,i}(T)$ – давление насыщенных паров чистого компонента *i* в жидком состоянии при температуре T.

Отсюда получаем константу равновесия:

$$k_i^0 = \frac{y_i}{x_i} = \frac{P_i(T)}{P}$$

Этот закон обеспечивает хорошую аппроксимацию только при низких давлениях и может применяться только, если температура ниже критической температуры рассматриваемого компонента:

$$T < T_{ci}$$

(если $T > T_{ci}$, то $P_i^0(T)$ неопределено).

Закон Генри, полученный экспериментально, формально является обобщением закона Рауля: это предельный закон, применимый для разбавленных растворов газа (*g*) в растворителе (*s*):

$$P_g = H_{g,s} x_g$$

(x_g – мольная доля газа в растворе).

Величина $H_{g,s}$ (константа Генри) зависит от сосуществующих веществ (газ и растворитель); она определяется при давлении насыщенных паров $P_{s,g}(T)$, если применим закон Рауля.

1.7.2.2. Свойства реальных газов

1.7.2.2.1. Общие сведения. Применение уравнения состояния

1.7.2.2.1.1. Уравнения состояния реальных газов

Модель совершенного газа неадекватно описывает двухфазные состояния газа и ее применения ограничены областью очень низких давлений (максимум несколько бар).

В газовой промышленности в общем случае необходимо использование уравнения состояния реальных газов.

Уравнение состояния имеет вид соотношения:

$$f(P,V,T,y) = 0$$

где:

P – абсолютное давление,

V – мольный объем,

T – абсолютная температура,

y – состав (мольные доли).

Коэффициент сжимаемости Z определяется соотношением:

$$Z = \frac{PV}{RT}$$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для описания физического поведения реальных газов было предложено множество уравнений, которые можно сгруппировать в несколько классов:

— кубические уравнения,
— уравнения, использующие принципы соответственных состояний,
— вириальные уравнения и более сложные модификации, развитые на их основе.

1.7.2.2.1.1.1. Кубические уравнения

Это двухпараметрические уравнения, вытекающие из уравнения Ван-дер-Ваальса:

$$(P + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$$

a – коэффициент притяжения, описывает асимметричное воздействие молекул из объема на молекулы, находящиеся в непосредственной близости от стенки или соударяющиеся с ней, и таким образом определяющие давление в рассматриваемом объеме;

b – коэффициент отталкивания (размерность объема), учитывает ненулевой объем, занятый атомами.

Коэффициент сжимаемости теперь записывается в виде:

$$Z = \frac{PV}{RT} = \frac{V}{(V-b)} - \frac{a}{RTV}$$

Его можно найти как решение кубического уравнения:

$$Z^3 - \left(\frac{bP}{RT}+1\right)Z^2 + \left(\frac{aP}{R^2T^2}\right)Z - \left(\frac{abP^2}{RT}\right) = 0$$

В приведенной форме (т.е. в переменных $P_r = \frac{P}{P_c}$, $V_r = \frac{V}{V_c}$ и $T_r = \frac{T}{T_c}$, где P_c, V_c, T_c – координаты критической точки рассматриваемого вещества) уравнение имеет вид:

$$\left(P_r + \frac{3}{V_r^2}\right)(3V_r - 1) = 8T_r.$$

Коэффициенты a и b находятся из условий:

$$\left.\begin{array}{l}\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)T_c = 0 \\ \text{и} \\ \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)T_c = 0\end{array}\right| \Rightarrow \begin{array}{l} a = \frac{3P_cV_c}{} = \frac{27R^2T_c^2}{64P_c} \\ b = \frac{V_c}{3} = \frac{RT_c}{8P_c} \\ \text{и}\quad Z_c = \frac{P_cV_c}{RT_c} = \frac{3}{8} = 0,375\end{array}$$

которые соответствуют точке перегиба критической изотермы ($T = T_c$ на диаграмме (P,V) в точке $P = P_c$, $V = V_c$ (см. §1.7.2.2.1.2.)).

К уравнению Ван-дер-Ваальса сохраняется педагогический интерес, но оно более никогда не применяется к природному газу и его составляющим. В настоящее время наиболее распространены уравнения Редлиха–Квонга и Пенга–Робинсона.

Уравнение Редлиха–Квонга:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{\sqrt{TV(V+b)}}$$

или в форме полинома:

$$Z - Z^2 + (A - B - B^2)Z - AB = 0$$

где $A = \frac{aP}{R^2T}$ и $B = \frac{bP}{R^2T}$

В оригинальной статье a и b являются константами для каждого компонента, которые легко находятся из координат критической точки:

$$a = 0,427\,48\,R^2\frac{T_c}{P_c} \text{ и } b = 0,086\,64\,\frac{RT_c}{P_c}$$

но было предложено множество модификаций (Soave, Graboski и Daubert), в которых параметр a являлся функцией температуры и ацентрического фактора ω, за счет чего обеспечивалось улучшенное совпадение с кривой давления насыщенных паров углеводородов:

$$a(T, \omega) = \alpha a$$

здесь:

$$\alpha = [1 + (0,485\,08 + 1,551\,71\omega - 0,156\,13\omega^2) \times (1 - \sqrt{T_r})]^2$$

Уравнение RK2-GDF, которое приводится далее (см. 1.7.2.2.3), является другой частной модификацией уравнения P–K, в которой параметры a и b были выражены как степенные функции температуры для различных компонентов природного газа.

Уравнение Пенга-Робинсона:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{(V^2 + 2bV - b^2)}$$

или в форме полинома:

$$Z - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B) = 0$$

причем

$$A = \frac{a\alpha P}{RT^2} \quad \text{и} \quad B = \frac{bP}{RT}$$

где

$$a = 0,457\,24R^2\frac{T_c^2}{P_c};$$

$$b = 0,077\,80R\frac{T_c}{P_c};$$

$$\alpha = [1 + (0,374\,64 + 1,542\,26\omega - 0,269\,92\omega^2)(1 - \sqrt{T_r})]^2.$$

Приложение к смесям.

При использовании этих уравнений для газовых смесей (подобных природному газу) параметры a и b смеси определяются по правилам смешения:

$$a\alpha = \sum\sum y_i y_j (a\alpha)_{ij},$$

где:

$$(a\alpha)_{ij} = (1 - k_{ij})\sqrt{(a\alpha)_i (a\alpha)_j}$$

$$b = \sum y_i b_i$$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Фактически, уравнение будет определено лишь после того, как для каждого компонента будут установлены параметры $(a\alpha)_i$ и b_i, а также введены коэффициенты парного взаимодействия k_{ij} для смесей.

1.7.2.2.1.1.2. Принцип соответственных состояний

Представление (см. выше) уравнения Ван-дер-Ваальса в приведенной форме (это можно проделать и с другими уравнениями) позволяет установить, что в принципе для любого вещества оказывается применимым одно единое соотношение, содержащее только безразмерные величины:

$$f(P_r, V_r, T_r) = 0$$

(на следующем рисунке один общий график).

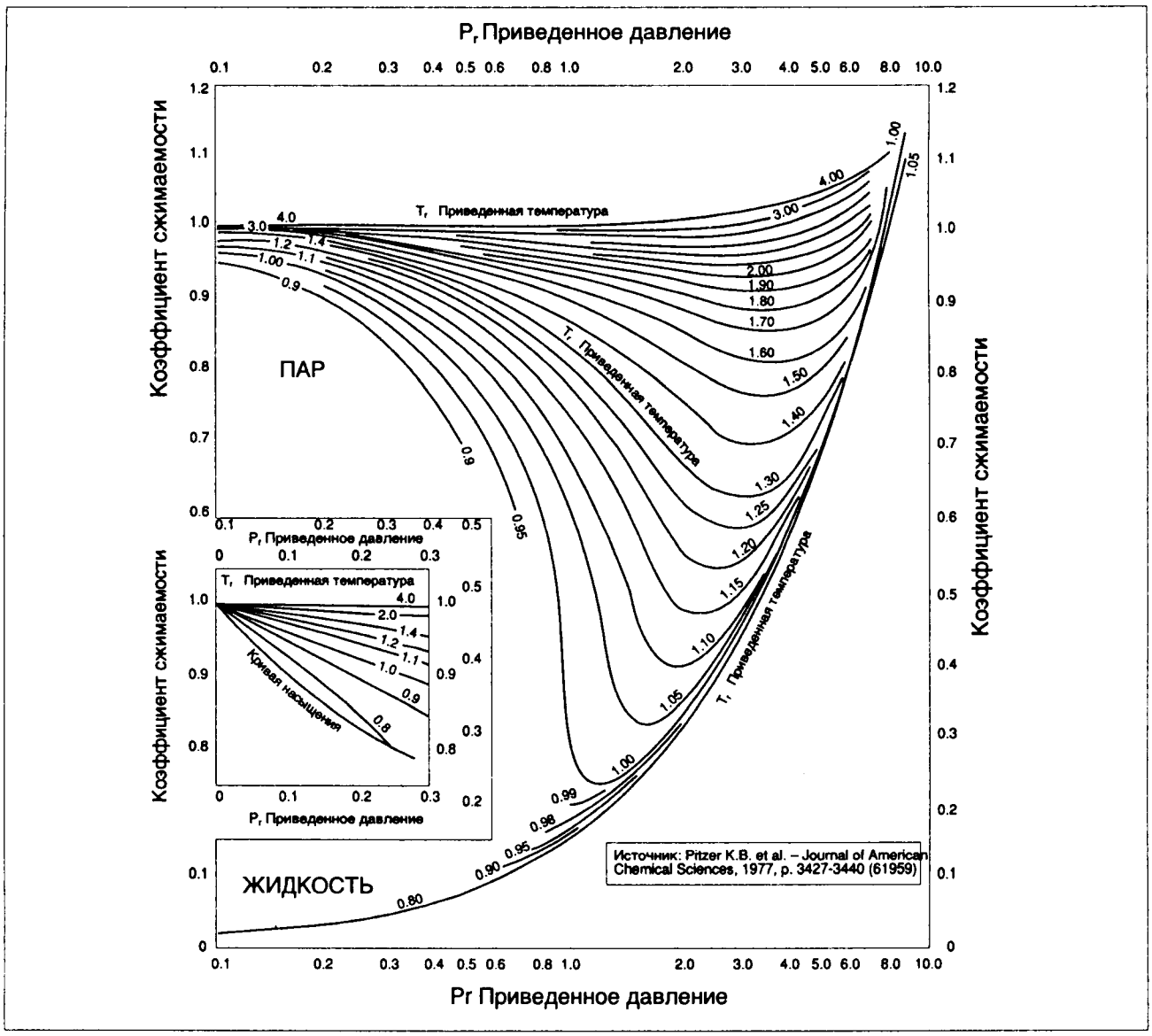
В связи с этим, если два газа находятся в таких состояниях, что по две их приведенных переменных равны, то эти состояния называются соответственными: третья приведенная переменная у этих газов также оказывается одинаковой.

Однако обычно такой подход оказывается недостаточным для описания явлений, в связи с чем делались попытки включить в уравнение и другие параметры: $f(P_r, V_r, T_r, a_1 \ldots) = 0$. Так, Питцером (Pitzer) был введен ацентрический фактор $\omega = \log\left(\frac{P_c}{10P_{sat}}\right)$ при $T_r = 0{,}7$, который является "мерой" степени различия в поведении молекул газа и простых сферических молекул (для аргона $\omega = 0{,}00$).

Уравнения в форме:

$$Z = Z^{(0)} + \omega Z^{(1)} + \omega^2 Z^{(2)} + \ldots$$

были предложены (Pitzer, Lee-Kesler), чтобы выразить PVT-свойства газа и другие величины (H, C_p и др.): члены $Z^{(0)}$, $Z^{(1)}$, ... являются функциями приведенных переменных P_r, T_r.



Принцип соответственных состояний: коэффициент сжимаемости как функция приведенных координат.

Приложение к смесям.

Необходимо определить координаты критической точки для смеси. Было предложено несколько правил, наиболее распространенным является простое суммирование критических параметров компонентов с весом, равным мольной доле. Таким образом определяются псевдокритические параметры смесей:

$$P_{p_c} = \sum y_i P_{c_i}, \quad T_{p_c} = \sum y_i T_{c_i}, \quad V_{p_c} = \sum y_i V_{c_i}.$$

1.7.2.2.1.1.3. Уравнения вириального типа

Они имеют вид:

$$Z = \frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \ldots =$$

$$= 1 + B\rho + C\rho^2 + \ldots = 1 + B'P + C'P^2 + \ldots,$$

где

$$B' = RTB,\ C' = \frac{C - B^2}{(RT)^2},\ D' = \frac{(D - 3BC + 2B)}{(RT)} \ldots$$

Эта формулировка вытекает из статистической механики, которая дает интерпретацию вириальных коэффициентов: второй вириальный коэффициент(B) учитывает взаимодействие между двумя молекулами (парное соударение), третий – взаимодействие трех молекул и т.д.

На практике для проведения вычислений ряд обрывают на 2-м, либо 3-м члене. Коэффициенты, являющиеся функциями температуры, определяются с помощью экспериментальных корреляций (Pitzer-Curl: $B = B^{(0)} + \omega B^{(1)}$), либо могут быть оценены с помощью соотношений для потенциалов межмолекулярного взаимодействия.

Другие, часто используемые для газа уравнения, родственны к вириальным, но содержат дополнительно последний член, описывающий поведение отброшенного остатка разложения.

Уравнение Бенедикта–Вебба–Рубина (Benedict–Webb–Rubin):

$$Z = 1 + \left(\frac{B_0 - A_0}{RT} - \frac{C_0}{RT}\right)_\rho + \left(\frac{b-a}{RT}\right)_{\rho^2} +$$
$$+ \left(\frac{a\alpha}{RT}\right)_{\rho^5} + \left(\frac{c}{RT}\right)(1 + \gamma\rho^2)\rho^2 \exp\ (-\gamma\rho^2)$$

Уравнение Старлинга (Starling):

$$Z = 1 + \left(\frac{B_0 - A_0}{RT} - \frac{C_0}{RT} + \frac{D_0}{RT} - \frac{E_0}{RT}\right)_\rho +$$
$$+ \left(\frac{b-a}{RT} - \frac{d}{RT}\right)_{\rho^2} + \alpha\left(\frac{a}{RT} + \frac{d}{RT}\right)_{\rho^5} +$$
$$+ \left(\frac{c}{RT}\right)(1 + \gamma\rho^2)\rho^2 \exp\ (-\gamma\rho^2)$$

В публикациях авторов можно найти значения коэффициентов для индивидуальных компонентов природного газа, а также правила смешения.

Приведенные выше соотношения являются общими уравнениями, позволяющими оценить физические свойства газа. Существует множество других уравнений, некоторые из которых, имеющие специальное назначение, применяются и в газовой промышленности, например, для расчета плотности жидкой фазы (сжиженного природного газа).

1.7.2.2.1.2. Расчет свойств газов

Поскольку свойства газов в совершенном состоянии известны или легко вычисляются (см. § 1.7.2.1), свойства реальных газов вычисляются следующим образом:

$$M = M^0 + (M - M^0),$$

где второй член представляет собой разницу в свойстве M между реальным газом и данным газом в совершенном состоянии при тех же условиях (P, T): он называется отклонением и рассчитывается с помощью уравнения состояния по соотношениям, приведенным в § 1.7.1.3.3.

1.7.2.2.1.2.1. Энтальпия

Для энтальпии можно получить в итоге:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = \left[V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right] \Rightarrow H - H^0 =$$

$$= \int_0^P \left[V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right] dP$$

или, если ввести Z:

$$H - H^0 = -RT^2 \int_0^P \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right] \frac{dP}{P}$$

или же:

$$H - H^\upsilon = U - U^\upsilon + RT(Z - 1) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow H - H^0 = \int_\infty^V \left[V\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T + T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V\right] dV$$

$$H - H^0 = RT^2 \int_\infty^V \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_V \frac{dV}{V} + PV - RT$$

либо, используя уравнение состояния:

Редлих–Квонг $\Rightarrow H - H^0 =$

$$= RT\left[Z - 1 - \frac{1}{(bRT)}\left(\frac{3a}{2\sqrt{T}} - \frac{\sqrt{T}da}{dT}\right)\ln\left(\frac{1+b}{V}\right)\right]$$

Вириальное $\Rightarrow H - H^0 =$

$$= -RT^2\left[P\frac{dB'}{dT} + \frac{P^2}{2}\frac{dC'}{dT} + \ldots\right]$$

и т.д.

Аналогично можно получить выражения для других свойств с помощью следующих соотношений.

1.7.2.2.1.2.2. Внутренняя энергия

$$U - U^0 = RT(1 - Z) + H - H^0$$

1.7.2.2.1.2.3. Удельная теплоемкость

$$C_p - C_p^0 = \int_0^\nu -T\left(\frac{\partial^2}{\partial T^2}V\right)_p dP =$$

$$= -RT\int_0^P \left[2\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p + T\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2}\right)_p\right] \frac{dP}{P}$$

$$C_v - C_v^0 = \int_0^v T\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v dV =$$

$$= RT\int_{\infty}^{v}\left[2\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_v + T\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2}\right)_v\right]\frac{dV}{V}$$

$$C_p - C_v = -T\frac{\left[\frac{RT}{V}\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_v + \frac{ZR}{V}\right]^2}{\left[\frac{RT}{V}\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_T - \frac{ZRT}{V^2}\right]} =$$

$$= -T\frac{\left[\frac{ZR}{P} + \frac{RT}{P}\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]^2}{\left[\frac{RT}{P}\left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T - \frac{RT}{P^2}\right]}$$

1.7.2.2.1.2.4. Энтропия

$$S - S^0 = \int_0^P \left[\frac{R}{P} - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right] dP =$$

$$= R\int_0^P \left[1 - Z - T\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]\frac{dP}{P} =$$

$$= -\int_{\infty}^{v}\left[\frac{R}{V} - \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v\right] dV - R\ln Z =$$

$$= \int_{\infty}^{v}\left[Z - 1 + T\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_v\right]\frac{dV}{V} - R\ln Z$$

1.7.2.2.1.2.5. Свободная энергия

$$F - F^0 = (U - U^0) - T(S - S^0)$$

1.7.2.2.1.2.6. Потенциал Гиббса

$$G - G^0 = (H - H^0) - T(S - S^0)$$

1.7.2.2.1.2.7. Фугитивность

Для расчетов фазового равновесия используется фугитивность f, определенная как:

$$dG = RT d(\ln f) \quad \text{при} \quad \lim_{p\to 0} f = P$$

Далее будет использоваться коэффициент фугитивности $\varphi = \frac{f}{P}$, вычисляемый как:

$$\ln\left(\frac{f}{P}\right) = \frac{1}{RT}\int_0^{\nu}\left(V - \frac{RT}{P}\right) dP =$$

$$= Z - 1 - \ln Z + \frac{1}{RT}\int_{\infty}^{v}\left[\frac{RT}{V} - P\right] dV$$

1.7.2.2.1.2.8. Коэффициент Джоуля–Томсона

$$\mu = \frac{\partial T}{\partial P}(\text{адиабатич}) = -\frac{\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T}{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p} = \frac{T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V}{C_p}$$

Все эти соотношения могут использоваться совместно с уравнениями состояния, приведенными ранее.

В распоряжении управления исследований и новой техники общества "Газ де Франс" имеются программы, осуществляющие расчет этих свойств, к примеру, в форме программного обеспечения "Газпак" (Gaspack), выполненного в диалоговом виде, что делает его доступным для любого пользователя либо на терминале компьютера G.D.F., либо на дискетах для микрокалькулятора.

1.7.2.2.1.3. Фазовое равновесие

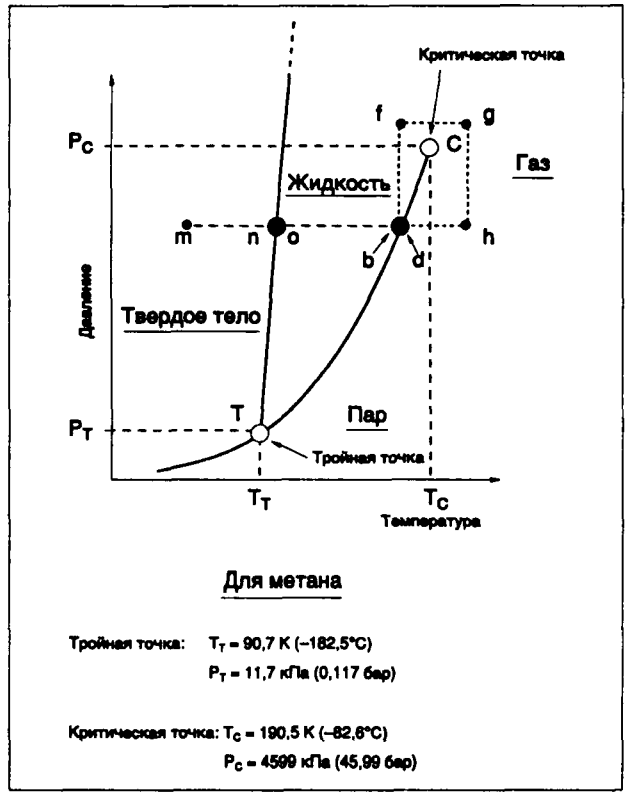
1.7.2.2.1.3.1. Чистые вещества

Фазовая диаграмма в координатах P, T:

T – тройная точка,

C – критическая точка,

кривая TC – кривая давления насыщенного пара (или упругости насыщенного пара) над жидкостью.



Фазовая диаграмма чистого вещества в координатах P, T.

Соотношения Клапейрона:

на кривой равновесия, например, на кривой испарения:

$$\Delta H_{vap} = T(V_v - V_l)\left(\frac{dP}{dT}\right)_{eq}$$

ΔH_{vap} – теплота испарения,

V_v – мольный объем пара,

V_l – мольный объем жидкости.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Фазовая диаграмма в координатах P, V:

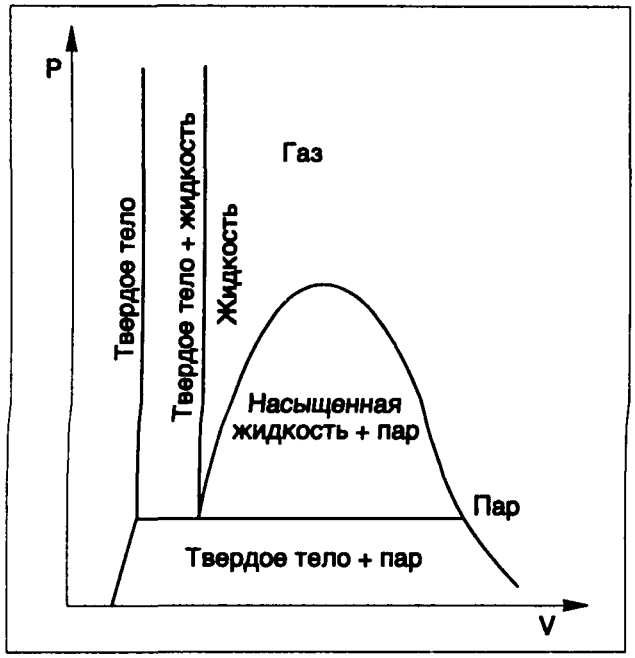
C – критическая точка,

T – тройная точка,

P_c, V_c, T_c – координаты критической точки.

Для критической изотермы критическая точка является точкой перегиба

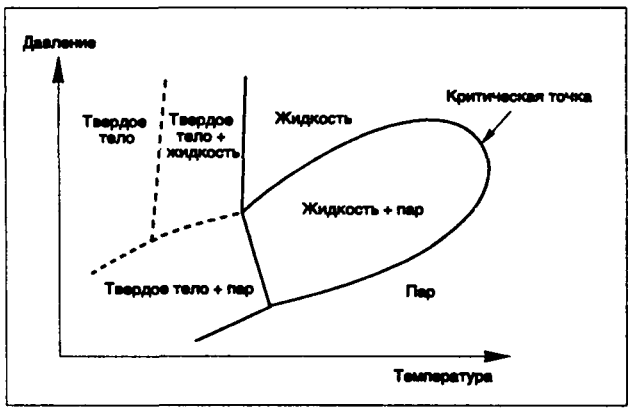
$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_T = 0$$



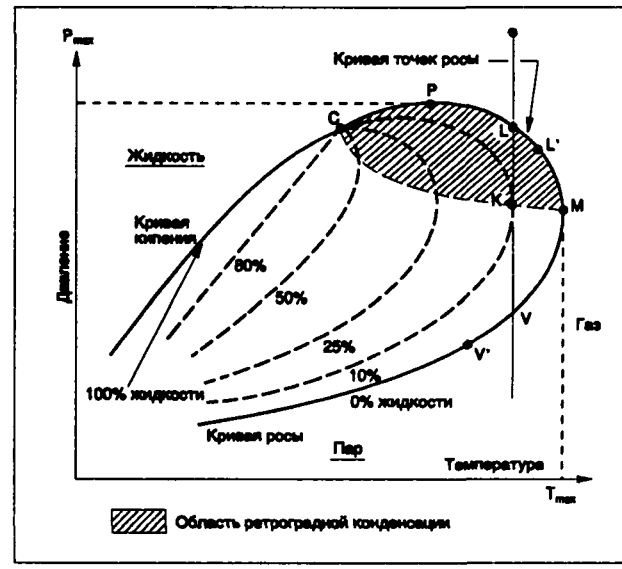
Фазовая диаграмма чистого вещества в координатах P, V.

1.7.2.2.1.3.2. Смеси

Фазовая диаграмма (координаты P, T).



Фазовая диаграмма (общий случай).



Фазовая диаграмма (равновесие жидкость–пар для природного газа).

В критической точке сходятся кривые постоянного содержания жидкой фазы (l = const) в двухфазной области жидкость + пар; кривая росы соответствует началу конденсации (l = 0), кривая кипения – появлению паровой фазы (l = 1).

Произвольная точка росы (или точка кипения) определяется двумя координатами P и T. В частности, можно говорить о температуре точки росы при заданном давлении, или наоборот, о давлении точки росы при заданной температуре.

Затемненная зона в двухфазной области «жидкость-пар» для природных газов называется зоной ретроградной конденсации; она соответствует увеличению количества жидкой фазы при изотермическом расширении либо при изобарическом нагревании.

1.7.2.2.1.3.3. Расчет фазовых равновесий

Термодинамическая эволюция замкнутой системы при данных P и T описывается как:

$$dU = \delta Q + \delta W \quad \text{и} \quad dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

либо:

$$(dU + PdV - TdV - TdS) \leq 0$$

В случае равенства достигается состояние равновесия, то есть

$$dU + PdV - TdS = (dG)_{p,T} = 0$$

(G – термодинамический потенциал).

При выводе этого соотношения можно показать, что в условиях равновесия удельный (на один моль) термодинамический потенциал компонента одинаков в разных фазах, сосуществующих в системе:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)^{(1)}_{\alpha,T} = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)^{(2)}_{\alpha,T} = \ldots$$

или:

$$\mu_i^{(1)} = \mu_i^{(2)} = \ldots$$

$\mu_i^{(\phi)}$ называется химическим потенциалом компонента i в фазе ϕ.

Правило фаз.

Оно вытекает из вышеприведенных соотношений и формулируется следующим образом: вариантность (число независимых интенсивных параметров) гетерогенной системы, содержащей ϕ фаз, N компонентов и r химических реакций, равна:

$$v = N + 2 - \phi - r$$

Примеры:

Равновесие жидкость-пар чистого вещества:

$v = 1 + 2 - 2 = 1 \Rightarrow$ если зафиксировать P, то T однозначно определена (и наоборот).

Равновесие жидкость–пар бинарной смеси:

$v = 2 + 2 - 2 = 2 \Rightarrow$ можно фиксировать две переменные, например, температуру и давление, и получить состав фаз.

Равновесие метана с гидратом метана:

CH_4(газ) + $n$$H_2O$(жидкость) $\rightleftharpoons$ [CH_4, $n$$H_2O$] (тв. тело),

Вариантность трехфазной системы есть:

$v = 3 + 2 - 3 - 1 = 1 \Rightarrow$ если зафиксировать P, можно получить значение T (кривая гидратообразования).

Химический потенциал вычисляется с помощью соотношений:

— для компонента в состоянии совершенного газа:

$$\mu_i^v(P, T) = g_i^v(T) + RT \ln (P_i)$$

(g_i – стандартный потенциал чистого компонента);

— для компонента идеального раствора:

$$\mu_i^l(P, T) = g_i^l(P, T) + RT \ln (x_i)$$

(x_i – мольная доля жидкой фазы,
g_i – потенциал чистого компонента);

— для компонента в реальном состоянии, в жидкой или паровой фазе:

$$\mu_i(P, T) = g_i^0(T) + RT \ln (f_i)$$

(f_i – фугитивность компонента).

Фугитивность компонента i в паровой фазе f_i^v вычисляется с помощью соотношения:

$$f_i^v = y_i \varphi_i^v P$$

где: φ_i^v – коэффициент фугитивности, выводится с помощью уравнения состояния (см. § 1.7.2.2.1.2.7.).

Фугитивность компонента i в жидкой фазе f_i^l вычисляется по уравнению состояния или с помощью эмпирических корреляций (Chao и Seader и др.) через активность $a_i = \gamma_i x_i$:

$$f_i^l = \gamma_i x_i f_i$$

где:

γ_i – коэффициент активности,

x_i – мольная доля,

f_i – фугитивность чистого компонента.

Равновесие фаз описывается соотношениями (для N компонентов):

$$f_i^l = f_i^v$$

Исходя их этих уравнений вычисляются константы равновесия или коэффициенты распределения:

$$k_i = \frac{y_i}{x_i}$$

1.7.2.2.1.3.4. Расчет разделения фаз, точки кипения и точки росы

Расчет разделения фаз дает ответ на следующий вопрос: при заданной смеси N компонентов, характеризуемой составом (n_i), рассматриваемой в условиях P, T, каково ее состояние (однофазное или многофазное), характеризуемое долей жидкой фазы, и каковы соответствующие составы различных фаз.

В случае расчета точки кипения ($l = 1$) или точки росы ($l = 0$) задаются суммарный состав и одна из двух переменных (P или T), а искомыми являются оставшаяся переменная (T или P), а также состав зарождающейся фазы.

Можно показать, что все расчеты сводятся к решению уравнения:

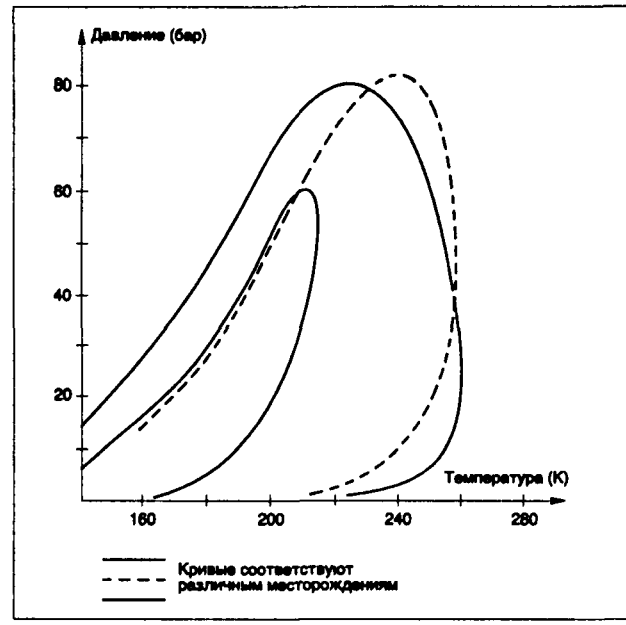
$$\sum_{i=1}^{N} \frac{n_i(1 - k_i)}{l(1 - k_i) + k_i} = 0$$

где: l – доля жидкой фазы, k_i – константы равновесия, вычисляемые по уравнениям состояния.

Решение строится итерациями, так как коэффициенты k_i являются функциями P, T, x_i, y_i.

Все расчеты выполняются с помощью программного обеспечения Газпак.

На приведенном ниже рисунке показаны примеры фазовых диаграмм, вычисленных по уравнению Пенга–Робинсона.



Огибающая фазовой диаграммы согласно уравнению Пенга–Робинсона.

1.7.2.2.2. Основные свойства компонентов газов распределительных сетей

Основные компоненты потребляемых газов (природный газ, смеси пропан–воздух, бутан–воздух и др.) представлены в следующей таблице.

Даются следующие характеристики:

M_w – молекулярная масса [г/моль],

P_c – критическое давление (бар),

T_c – критическая температура (K),

Z_c – критический коэффициент сжимаемости,

T_b – температура (K) выкипания при P = 1 атм (= 101,325 кПа),

ω – ацентрический фактор,

Z(P, T) – коэффициент сжимаемости в нормальных условиях P_0 = 101,325 кПа, T_0 = 273,15K,

ρ(P, T) – плотность реального газа в нормальных условиях (кг/м³),

$d_0(P_0, T_0)$ – относительная плотность по воздуху реального газа в нормальных условиях,

$-\Delta cH^0(T_0)$ – теплота сгорания одной моли при 0°C (энтальпия сгорания при T_0 = = 273,15 K) компонента в совершенном состоянии (кДж/моль),

$-\Delta cH(P_0, T_0)$ – теплота сгорания одной моли при 1 атм (T_0 = 273,15 K, P_0 = = 101,325 кПа) компонента в реальном состоянии (кДж/моль),

$PCS'(P_0, T_0)$ – высшая теплота сгорания единицы объема компонента в реальном состоянии (кВт · ч/м³(н)). Условия горения: 0°C и 101,325 кПа, условия измерения объемов: 0°C и 101,325 кПа.

Стандартный состав воздуха (мольные проценты):

азот	: 78,102
кислород	: 20,946
аргон	: 0,916
углекислота	: 0,033
неон	: 0,0018
гелий	: 0,0005

+ следы элементов: CH_4, Kr, NO, CO, Xe.

1.7.2.2.3. Коэффициент сжимаемости, плотность и относительная плотность

1.7.2.2.3.1. В газообразном состоянии

Коэффициент сжимаемости определяется из любого уравнения состояния $f(P, V, T, x_i) = 0$ (см. § 1.7.2.2.1), как $Z = F(P, T, x_i)$.

Плотность вычисляется как:

$$\rho(P, T) = \frac{M}{V}(P, T)$$

где

M – молекулярная масса, $M = \sum x_i M_i$ (г/моль).

V(P, T) – мольный объем (м³/моль) в условиях (P, T).

$$V(P, T) = Z(P, T)V^0(P, T)$$

здесь $V^0(P, T) = \frac{RT}{P}$ мольный объем совершенного газа в условиях (P, T).

Относительная плотность есть отношение плотности рассматриваемого газа к плотности воздуха при тех же условиях (P, T).

$$d(P, T) = (\rho_{газ})_{P,T} / (\rho_{возд})_{P,T}$$

Обычно используют нормальную плотность $d_0 = d(P_0, T_0)$, то есть плотность, соответствующую условиям, называемым нормальными. Так, во Франции:

$$P_0 = 101{,}325 \text{ кПа}, \quad T_0 = 273{,}15 \text{ K}$$

(но существует много других общепринятых стандартных условий за границей, поэтому относительная плотность чувствительно варьируется в зависимости от давления и температуры).

Для вычисления коэффициента сжимаемости использовалось и используется до сих пор множество уравнений, в частности, уравнения Бенедикта–Вебба–Рубина и Редлиха–Квонга (RK2-GDF), либо принцип соответственных состояний.

Параллельно были разработаны специальные эмпирические методы (AGA-NX19 с коррекцией BRKORR3H) и более поздние методики AGA8 и GERG.

1.7.2.2.3.1.1. Методика AGA-NX19

Она определяет величину

$$F = \sqrt{\frac{Z_r}{Z}} \quad \text{(коэффициент сверхсжимаемости)}$$

используя данные: % N_2, % CO_2, относительную плотность:

Z – коэффициент сжимаемости в условиях P, T;

Z_r – коэффициент сжимаемости в стандартных условиях (t = 60°F = 15,6°C, P = 101,59 кПа).

Учитывая погрешность методики (в среднем, от 0,5 до 1% для природного газа), можно принять, что $F_{p_r} = \sqrt{1/Z}$.

1.7.2.2.3.1.2. Коррекция BRKORR3H

Это есть поправка, вносимая в результат расчетов по методу AGA-NX19, имеющая вид:

$$Z_{BRKOR} = Z_{AGA}[1 + F(P, T, d, PCS, \%\ CO2]$$

Поправочный член является полиномиальной функцией: давления, температуры, нормальной относительной плотности, теплоты сгорания и содержания углекислого газа.

В среднем погрешность этих методов составляет от 0,25 до1% для природного газа при $0 < t < 40$°C и $P < 80$ бар.

Недавно появились две новые методики, использующие уравнения состояния вириального типа.

1.7.2.2.3.1.3. Методика AGA8 (GRI-OU)

Разработана в США (Университет Оклахомы) для института исследований газа, использует уравнение Старлинга:

$$Z = 1 + B\rho + C\rho^2 + D\rho^3 + E\rho^5 + A_1\rho^2(1 + A_2\rho^2)\exp(-A_2\rho^2)$$

где коэффициенты A_1, A_2, B, C, D, E являются функциями температуры, состава и параметров молекул (энергии, размеров и др.). Применяются специальные правила смешения.

Компоненты	Формула	Молярная масса, г/моль	Критические параметры			T_b, K	ω	Z_0 (P_0, T_0)	ρ_0 (P_0, T_0), кг/м³ (н)	d_0, (P_0, T_0)	$-\Delta_c H^0$ (T_0), кДж/моль	$-\Delta_c H$ (P_0, T_0), кДж/моль	PCS (P_0, T_0), кВт · ч/м³(н)
			P_c, бар	T_c, K	Z_c								
Метан	CH_4	16,043	45,99	190,55	0,284	111,66	0,0115	0,9976	0,7175	0,5549	892,97	893,00	11,094
Этан	C_2H_6	30,070	48,80	305,83	0,284	184,55	0,0908	0,9900	1,355	1,048	1 564,3	1 564,3	19,58
Пропан	C_3H_8	44,097	42,50	369,82	0,281	231,07	0,1454	0,9789	2,010	1,554	2 223,9	2 223,9	28,155
n-Бутан	*n*-C_4H_{10}	58,123	37,84	425,14	0,273	272,64	0,1928	0,9572	2,709	2,095	2 883,2	2 883,0	37,33
2-Метилпропан	*i*-C_4H_{10}	58,123	36,48	408,13	0,283	261,36	0,1756	0,958	2,707	2,094	2 874,1	2 874,0	37,18
n-Пентан	*n*-C_5H_{12}	72,150	33,64	469,69	0,268	309,22	0,2510	0,918 *h*	3,51 *h*	2,71 *h*	3 542,8	*l*	*l*
2-Метилбутан	*i*-C_5H_{12}	72,150	33,81	460,39	0,270	300,99	0,2273	0,937 *h*	3,435 *h*	2,66 *h*	3 535,9	*l*	*l*
2, 2-Диметилпропан	néoC_5H_{12}	72,150	31,99	433,75	0,269	282,65	0,1970	0,943 *h*	3,41 *h*	2,64 *h*	3 521,6	*l*	*l*
n-Гексан	*n*-C_6H_{14}	86,177	30,3	506,4	0,266	341,89	0,2957	0,892 *h*	4,31 *h*	3,33 *h*	4 203,1	*l*	*l*
2-Метилпентан	C_6H_{14}	86,177	30,1	497,5	0,267	333,41	0,2791	0,898 *h*	4,28 *h*	3,31 *h*	4 195,5	*l*	*l*
2, 2-Диметилбутан	C_6H_{14}	86,177	30,8	488,7	0,272	322,88	0,2310	0,916 *h*	4,20 *h*	3,25 *h*	4 185,7	*l*	*l*
n-Гептан	*n*-C_7H_{16}	100,20	27,4	539,2	0,264	371,57	0,3506	0,830 *h*	5,39 *h*	4,17 *h*	4 862,7	*l*	*l*
n-Октан	*n*-C_8H_{18}	114,23	24,9	568,4	0,259	398,82	0,3942	0,742 *h*	6,87 *h*	5,31 *h*	5 522,2	*l*	*l*
Этен (этилен)	C_2H_4	28,054	50,42	282,35	0,282	169,41	0,0856	0,9925	1,261	0,9754	1 413,5	1 413,5	17,65
Пропен (пропилен)	C_3H_6	42,081	46,01	364,85	0,275	225,43	0,1477	0,981	1,91	1,48	2 061,5	2 061,5	26,04
1-Бутен	C_4H_8	56,108	40,23	419,53	0,277	266,92	0,1874	0,965	2,59	2,01	2 721,5	2 721,5	34,95
Пропадиен	C_3H_4	40,065	54,7	393,00	0,271	238,8	0,149	0,980	1,82	1,41	1 945,2	1 945,2	24,60
1, 2 Бутадиен	C_4H_6	54,092	45,0	443,7	0,267	284,0	0,3394	0,955 *h*	2,53 *h*	1,95 *h*	2 597,1	*l*	*l*
Ацетилен (этин)	C_2H_2	26,308	61,39	308,33	0,270	189,35	0,1841	0,991	1,18	0,907	1 301,8	1 301,9	16,281
Циклогексан	C_6H_{12}	84,161	40,74	553,5	0,274	353,88	0,2144	0,897 *h*	4,19 *h*	3,24 *h*	3 960,5	*l*	*l*
Метилциклогексан	C_7H_{14}	98,188	34,71	572,12	0,268	374,08	0,2333	0,855 *h*	5,12 *h*	3,96 *h*	4 609,2	*l*	*l*
Бензол	C_6H_6	78,114	48,98	562,16	0,269	353,24	0,2100	0,909 *h*	3,83 *h*	2,96 *h*	3 305,0	*l*	*l*
Толуол	C_7H_8	92,141	41,06	591,80	0,264	393,78	0,2566	0,849 *h*	4,84 *h*	3,74 *h*	3 952,6	*l*	*l*
Этилбензол	C_8H_{10}	106,17	36,06	617,20	0,263	409,35	0,3011	0,764 *h*	6,20 *h*	4,80 *h*	4 615,3	*l*	*l*
Ортоксилол	C_8H_{10}	106,17	37,34	630,33	0,263	417,58	0,3136	0,737 *h*	6,43 *h*	4,97 *h*	4 600,6	*l*	*l*
Водород	H_2	2,016	12,97	33,2	0,306	20,397	−0,218	1,0006	0,08989	0,06952	286,62	286,63	3,550
Одноокись углерода	CO	28,010	34,94	132,85	0,291	81,64	0,053	0,9993	1,251	0,9672	282,81	282,83	3,508
Гелий	He	4,003	2,27	5,19	0,301	4,224	−0,365	1,0005	0,1785	0,1380			0
Азот	N_2	28,013	33,9	126,2	0,289	77,34	0,039	0,9995	1,250	0,9671			0
Кислород	O_2	31,999	50,43	154,58	0,288	90,19	0,025	0,9990	1,429	1,105			0
Двуокись углерода	CO_2	44,010	73,86	304,20	0,275	194,67	0,239	0,9933	1,977	1,529			0
Сероводород	H_2S	34,082	89,4	373,2	0,284	212,88	0,109	0,990	1,536	1,188	562,9	563,0	7,048
Вода	H_2O	18,015	220,6	647,14	0,229	373,15	0,328	0,930 *h*	0,864 *h*	0,668 *h*			
Метанол	CH_3OH	32,042	80,92	512,64	0,224	337,85	0,556	0,773 *h*	1,85 *h*	1,43 *h*	766,6	*l*	*l*
Воздух	*a*	28,963	37,69	132,55	0,316			0,99941	1,2929	1,00000			

h – величина, рассчитанная для гипотетического газового состояния, *l* – для жидкого состояния в условиях: P_0 = 101,325 кПа, T_0 = 273,15 K.

Физические свойства основных компонентов природного газа.

1.7.2.2.3.1.4. Методика GERG (VDW)

Разработана европейской группой исследований газов и использует усеченное вириальное уравнение:

$$Z = 1 + B\rho + C\rho^2$$

где вириальные коэффициенты и используемые правила смешения были получены на основе корреляционного анализа множества экспериментальных данных по коэффициенту сжимаемости (базы данных GERG – европейской группы исследований газов).

Погрешность этих двух последних методик в целом менее 0,1% для природного газа при $0 < t < 40°C$ и $P < 80$ бар при использовании состава газовой фазы в качестве входных данных.

Однако, существуют упрощенные версии, эквивалентные (с точки зрения приложений) методикам AGA-NX19 и BRKORR3H, использующие в качестве входных данных: % N_2, % CO_2, относительную плотность, PCS и т.д. и обеспечивающие погрешность около 0,2%.

Нижеследующие три таблицы представляют некоторые результаты расчетов коэффициента сжимаемости природного газа по методу AGA8, полученные с помощью пакета Газпак, в котором обе методики используются как рабочие.

1.7.2.2.3.2. В жидком состоянии

Коэффициент сжимаемости жидкостей очень редко рассчитывается с помощью общих уравнений состояния, хотя они и позволяют это сделать (например, для кубических уравнений это есть наименьший корень полинома степени 3 относительно Z), так как они не обеспечивают в целом достаточную точность.

Более предпочтительны корреляции, основанные на принципе соответственных состояний и позволяющие оценивать мольный объем жидкости, например, методы Hankinson-Thompson (Costald) и Klosek McKinley (с модификацией MacCarthy).

Плотность жидкости есть отношение M/V (M – молекулярная масса, V – мольный объем жидкости).

1.7.2.2.3.2.1. Методика Hankin-Tompson (Costald)

Она использует следующую формулировку "соответственных состояний":

$$\frac{V_s}{V^*} = V_r^{(0)}\left(1 - \omega V_r^{(\delta)}\right)$$

где:

V_s – мольный объем жидкости в равновесии на кривой кипения;

V^* – характерный объем, вычисляемый по характерным объемам чистых компонентов (V_j^0) с помощью правил смешения;

$V_r^{(0)}$ и $V_r^{(\delta)}$ – функции одной лишь приведенной температуры T_r;

ω – ацентрический фактор.

Методика имеет общее назначение и, в частности, хорошо адаптирована к сжиженным попутным нефтяным газам и конденсатам природного газа; ее погрешность порядка 1% в широком диапазоне.

Компоненты	Метан	Газ 1	Газ 2	Газ 3	Газ 4	Газ 5
Метан	100,0	88,499	96,99	94,755	88,102	82,381
Этан		9,097	2,194	1,306	5,376	3,326
Пропан		1,521	0,163	0,304	1,207	0,576
n-Бутан		0,241	0,080	0,059	0,215	0,103
2-Метилпропан		0,177	0,042	0,043	0,154	0,086
n-Пентан		0,002	0,019	0,013	0,053	0,027
2-Метилбутан		0,011	0,014	0,015	0,044	0,023
2, 2 Диметилпропан		0,002		0,002	0,003	0,004
C_nH_m ($n \geq 6$)			0,102	0,033	0,091	0,072
Гелий			0,007	0,025	0,043	0,047
Азот		0,450	0,389	3,127	3,333	12,324
Углекислый газ				0,318	1,379	1,031
Основные свойства						
Молярная масса, г/моль	16,043	17,98	16,58	16,85	18,19	18,59
Z_0	0,9976	0,9969	0,9975	0,9976	0,9972	0,9976
ρ_0, кг · м$^{-3}$ (н)	0,7176	0,8048	0,7418	0,7538	0,8137	0,8313
Относит. плотность (d_0)	0,5549	0,6225	0,5738	0,5831	0,6294	0,6430
PCS (0°C), кВт · ч/м^3 (н)	11,094	12,17	11,34	10,91	11,37	10,07
Вобб, кВт · ч/м^3 (н)	14,89	15,42	14,97	14,29	14,34	12,56

Составы некоторых природных газов (мольные %).

Температура	Давление	Метан CH_4	Газ 1	Газ 2	Газ 3	Газ 4	Газ 5
0°C	1 бар	0,9976	0,9969	0,9975	0,9976	0,9972	0,9977
	20 бар	0,9530	0,9384	0,9496	0,9520	0,9437	0,9533
	50 бар	0,8836	0,8438	0,8746	0,8811	0,8586	0,8850
	80 бар	0,8197	0,7532	0,8048	0,8161	0,7787	0,8236
	150 бар	0,7395	0,6587	0,7200	0,7369	0,6901	0,7528
20°C	1 бар	0,9981	0,9976	0,9980	0,9981	0,9978	0,9982
	20 бар	0,9637	0,9521	0,9611	0,9630	0,9564	0,9642
	50 бар	0,9118	0,8815	0,9049	0,9101	0,8929	0,9134
	80 бар	0,8657	0,8167	0,8547	0,8632	0,8355	0,8694
	150 бар	0,8048	0,7353	0,7886	0,8025	0,7628	0,8154
40°C	1 бар	0,9985	0,9981	0,9985	0,9985	0,9983	0,9986
	20 бар	0,9719	0,9625	0,9697	0,9714	0,9660	0,9724
	50 бар	0,9327	0,9089	0,9273	0,9314	0,9179	0,9344
	80 бар	0,8990	0,8611	0,8904	0,8972	0,8758	0,9024
	150 бар	0,8547	0,7976	0,8416	0,8529	0,8205	0,8637

Коэффициент сжимаемости метана и некоторых природных газов, рассчитанный по методу AGA8.

Температура	Давление	Метан CH_4	Газ 1	Газ 2	Газ 3	Газ 4	Газ 5
0°C	1 бар	0,708	0,794	0,732	0,744	0,805	0,821
	20 бар	14,82	16,88	15,38	15,59	17,01	17,18
	50 бар	39,97	46,92	41,76	42,12	46,74	46,25
	80 бар	68,94	84,10	72,60	72,76	82,46	79,52
	150 бар	143,2	180,3	152,2	151,1	174,5	163,1
20°C	1 бар	0,659	0,740	0,682	0,693	0,750	0,764
	20 бар	13,66	15,50	14,16	14,36	15,64	15,82
	50 бар	36,09	41,85	37,60	38,00	41,88	41,75
	80 бар	60,82	72,27	63,70	64,10	71,61	70,20
	150 бар	122,6	150,5	129,5	129,3	147,1	140,3
40°C	1 бар	0,617	0,692	0,638	0,648	0,701	0,715
	20 бар	12,68	14,35	13,14	13,33	14,49	14,69
	50 бар	33,03	38,00	34,35	34,76	38,14	38,21
	80 бар	54,83	64,17	57,24	57,73	63,95	63,31
	150 бар	108,1	129,9	133,6	133,9	128,0	124,0

Плотность метана и некоторых природных газов, рассчитанная по методу AGA8 (в кг/м^3).

1.7.2.2.3.2.2. Метод Klosek-McKinley (с модификацией MacCarthy)

Это чисто эмпирический метод, предназначенный для сжиженных газов (CH_4 > 60%, N_2 < 4%) на их кривой кипения, то есть вдали от области низких температур.

$$V_m = \sum x_i V_i - \left[\frac{k_1 + (k_2 - k_1)\, x_{N_2}}{0,042\,5}\right] x_{CH_4}$$

где:

V_m – мольный объем жидкости (на кривой кипения),

V_i – мольный объем i-го жидкого компонента, зависящий от температуры,

k_1 и k_2 – коэффициенты, зависящие от температуры и молекулярной массы,

x_{CH_4} и x_{N_2} – мольные доли метана и азота.

Погрешность метода имеет порядок 0,1 - 0,2% в ограниченной области (T ≤ 120K).

Некоторые результаты расчетов, полученные с помощью программного обеспечения Газпак, которое включает эти методики, приведены в нижеследующей таблице.

1.7.2.2.4. Удельные теплоемкости и изэнтропические показатели

Удельные теплоемкости при постоянном давлении (C_p) и постоянном объеме (C_v) могут быть получены на базе удельных теплоемкостей газа в совершенном состоянии (C_p^0 и C_v^0: см. § 1.7.2.1.2.) и избыточных теплоемкостей ($C_p - C_p^0$) и ($C_v - C_v^0$), вычисляемых с помощью уравнений состояния (см. § 1.7.2.2.1.2.).

Отношение $\frac{C_p}{C_v}$, обозначаемое через γ, позволяет в рамках модели совершенного газа осуществлять быстрый расчет изэнтропических (адиабатических и обратимых) превращений согласно соотношениям:

$$PV^{\gamma} = \text{const} \quad \text{или} \quad P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma}$$

либо $P^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)} T = \text{const}$ или $\frac{P_1}{P_2^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)}} = \frac{T_1}{T_2}$

(см. § 1.7.2.1.3.).

В случае изэнтропических превращений реальных газов легко показать, что формулировка вышеприведенных законов может быть сохранена с заменой показателей γ и $\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma}\right)$ на k и $\left(\frac{k' - 1}{k'}\right)$ соответственно, где

$$k = -\frac{V}{P\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_s} = -\frac{\frac{C_p}{C_v V}}{P\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T}$$

либо иначе:

$$\frac{1}{k} = \frac{C_v}{C_p\left[1 - \frac{P}{Z\left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T}\right]}$$

а также

$$\frac{k' - 1}{k'} = \frac{P}{T\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s} = \frac{P}{C_p\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p}$$

либо:

$$\frac{k' - 1}{k'} = \frac{R}{C_p\left[Z + T\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]}$$

Эти показатели, называемые изэнтропическими, легко вычисляются с помощью уравнения состояния.

Следующие четыре таблицы дают некоторые значения C_p, γ, k, $(k' - 1)/k'$ для метана и различных газов, вычисленные с помощью пакета Газпак при использовании метода AGA8.

Замечание:

Изэнтропический показатель используется, в частности, для расчета изменений энтальпии в изэнтропическом обратимом процессе (расчет гипотетической работы, выполняемой флюидом в идеальной тепловой машине при сжатии или расширении, расчет сопла и др.):

$$\Delta H = \int V dP$$

или, интегрируя при постоянной энтропии $PV^k = \text{const}$

$$\Delta H = \frac{k}{(k-1)\,\Delta(PV)} = \frac{k}{(k-1)\,P_1 V_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}$$

Помимо того для изэнтальпических превращений таким же образом вводится показатель, называемый изэнтальпическим, с помощью соотношения:

$$\frac{h-1}{h} = \frac{P}{T\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H} = \frac{RT}{C_p\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p} = \frac{P}{T_{\mu_J}}$$

где μ_J – коэффициент Джоуля–Томсона.

Температура, (K)		110	120	130	140	150
Метан CH_4	P, (МПа)	0,0885	0,192	0,369	0,644	1,044
	(кг/м^3)	425,1	410,2	394,2	377,0	358,1
Газ 1	P, (МПа)	0,091	0,188	0,350	0,595	0,944
	(кг/м^3)	462,8	448,7	434,2	418,3	400,0

Плотность метана и газа-1 (GNL) на кривой кипения (вкг/м^3), вычисленная с помощью пакета Газпак.

Температура	Давление	Метан CH_4	Газ 1	Газ 2	Газ 3	Газ 4	Газ 5
0°C	1 бар	34,9	37,1	35,5	35,2	36,4	35,2
	20 бар	37,4	40,3	38,2	37,7	39,4	37,7
	50 бар	42,5	47,8	43,8	43,0	46,0	42,9
	80 бар	49,2	58,9	51,3	49,9	55,1	49,6
	150 бар	62,3	73,7	65,1	63,0	69,5	61,7
20°C	1 бар	35,6	37,9	36,2	35,8	37,1	35,8
	20 бар	37,6	40,5	38,3	37,9	38,5	37,9
	50 бар	41,4	45,9	42,5	41,8	44,3	41,8
	80 бар	46,0	52,8	47,6	46,6	50,3	46,4
	150 бар	55,9	66,0	58,2	56,6	62,2	55,8
40°C	1 бар	36,3	38,9	37,0	36,6	38,0	36,5
	20 бар	38,0	41,0	38,8	38,3	40,0	38,2
	50 бар	41,0	45,1	42,0	41,4	43,7	41,3
	80 бар	44,4	50,0	45,7	44,9	48,0	44,7
	150 бар	51,9	60,2	53,8	52,5	57,1	52,0

Удельная теплоемкость при постоянном давлении (C_p) метана и некоторых природных газов, вычисленная методом AGA8 (Дж/моль · К).

Температура	Давление	Метан CH_4	Газ 1	Газ 2	Газ 3	Газ 4	Газ 5
0°C	1 бар	1,31	1,29	1,31	1,31	1,30	1,31
	20 бар	1,38	1,37	1,38	1,38	1,38	1,38
	50 бар	1,53	1,57	1,54	1,53	1,56	1,53
	80 бар	1,73	1,88	1,76	1,74	1,82	1,73
	150 бар	2,13	2,29	2,17	2,12	2,22	2,07
20°C	1 бар	1,30	1,28	1,30	1,30	1,29	1,30
	20 бар	1,36	1,35	1,36	1,36	1,35	1,36
	50 бар	1,47	1,49	1,47	1,47	1,48	1,47
	80 бар	1,61	1,67	1,62	1,61	1,64	1,60
	150 бар	1,90	2,03	1,92	1,90	1,97	1,87
40°C	1 бар	1,29	1,27	1,29	1,29	1,28	1,29
	20 бар	1,34	1,32	1,34	1,34	1,33	1,34
	50 бар	1,43	1,43	1,42	1,43	1,43	1,42
	80 бар	1,52	1,55	1,53	1,52	1,54	1,52
	150 бар	1,74	1,82	1,75	1,74	1,78	1,72

Отношение удельных теплоемкостей ($\gamma = C_p/C_v$) метана и некоторых природных газов, вычисленное методом AGA8.

Температура	Давление	Метан CH_4	Газ 1	Газ 2	Газ 3	Газ 4	Газ 5
0°C	1 бар	1,31	1,29	1,31	1,31	1,30	1,31
	20 бар	1,32	1,29	1,31	1,32	1,30	1,32
	50 бар	1,36	1,33	1,35	1,36	1,34	1,37
	80 бар	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,47
	150 бар	2,05	2,39	2,11	2,07	2,23	2,05
20°C	1 бар	1,31	1,28	1,30	1,30	1,29	1,30
	20 бар	1,32	1,29	1,31	1,31	1,30	1,32
	50 бар	1,35	1,32	1,34	1,35	1,33	1,36
	80 бар	1,43	1,41	1,42	1,43	1,41	1,43
	150 бар	1,81	1,95	1,83	1,82	1,89	1,82
40°C	1 бар	1,30	1,27	1,29	1,29	1,28	1,30
	20 бар	1,31	1,28	1,30	1,31	1,29	1,31
	50 бар	1,34	1,31	1,33	1,34	1,32	1,34
	80 бар	1,40	1,37	1,39	1,40	1,39	1,41
	150 бар	1,68	1,73	1,69	1,68	1,71	1,69

Изэнтропический показатель k метана и некоторых природных газов, вычисленный методом AGA8.

Температура	Давление	Метан CH_4	Газ 1	Газ 2	Газ 3	Газ 4	Газ 5
0°C	1 бар	0,24	0,22	0,23	0,24	0,22	0,24
	20 бар	0,23	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22
	50 бар	0,21	0,18	0,20	0,20	0,19	0,20
	80 бар	0,19	0,16	0,18	0,18	0,17	0,18
	150 бар	0,17	0,15	0,16	0,17	0,16	0,17
20°C	1 бар	0,23	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23
	20 бар	0,23	0,21	0,22	0,22	0,21	0,22
	50 бар	0,21	0,19	0,21	0,21	0,20	0,21
	80 бар	0,20	0,17	0,19	0,19	0,18	0,20
	150 бар	0,18	0,16	0,18	0,18	0,17	0,18
40°C	1 бар	0,23	0,21	0,22	0,23	0,22	0,23
	20 бар	0,22	0,21	0,22	0,22	0,21	0,22
	50 бар	0,21	0,19	0,21	0,21	0,20	0,21
	80 бар	0,20	0,18	0,20	0,20	0,19	0,20
	150 бар	0,19	0,17	0,19	0,19	0,18	0,19

Изэнтропический показатель $\frac{k'-1}{k'}$ метана и некоторых природных газов, вычисленный методом AGA8.

1.7.2.2.5. Теплота сгорания. Число Вобба. Коэффициент окисляемости

1.7.2.2.5.1. Теплота сгорания

Теплота сгорания топлива есть количество тепла, которое может выделить в процессе своего горения единичное количество топлива при полном сгорании и при одинаковых условиях по температуре и давлению для исходных реагентов и продуктов реакции.

К примеру, для углеводорода C_nH_m теплотворная способность определяется по теплу, выделяемому при реакции:

$$C_nH_m + (n + \frac{m}{4})O_2 \longrightarrow nCO_2 + \frac{m}{2}H_2O$$

Таким образом, теплота сгорания равна энтальпии реакции горения с обратным знаком: $PC = -\Delta cH$, и выражается в Дж/моль.

Теплота сгорания называется высшей (PCS) или низшей (PCI), если вода, выделяющаяся в ходе реакции, рассматривается в жидком или газообразном состоянии. В условиях P_0 = 101.325 кПа и T_0 = 273,15 K этой альтернативе соответствует разница в 45,07 кДж на один моль образующейся воды.

Для газовых смесей (таких как природный газ), теплота сгорания определяется взвешиванием по мольным долям соответствующих величин для отдельных компонентов, взятых в совершенном состоянии:

$$PCS^0(T_0) = -\sum x_i \Delta CH_i^0(T_0)$$

(выражается в кДж/моль), где

x_i – мольная доля компонента i,

ΔCH_i^0 – энтальпия сгорания при температуре T_0 i-го компонента в совершенном состоянии (Дж/моль),

T_0 – стандартная температура горения: если компоненты берутся в совершенном состоянии, то величины не зависят от давления.

Вычисленная таким образом величина PCS^0 учитывает компоненты смеси (углеводороды $\geq C_5$), которые в чистом виде при температуре T_0 находятся в жидком состоянии.

Можно показать, что для природного газа величина $PCS^0(T_0)$ мало отличается от реальной величины $PCS^0(P_0, T_0)$, получаемой при строгих, более сложных расчетах (отклонение ≤50 Дж/моль для P_0 = 101,325 кПа и T_0 = 273,15K).

Очень часто используется высшая теплота сгорания, выраженная в МДж/м³ или в кВт · ч/м³. Она определяется соотношением:

$$PCS_v(T_0, (P_1, T_1)) = \frac{PCS^0(T_0)}{V(P_1, T_1)}$$

где:

$PCS^0(T_0)$ – мольная теплота сгорания,

T_0 – стандартная температура для процесса горения,

$V(P_1, T_1)$ – мольный объем смеси в условиях P_1, T_1, стандартных для измерения объемов:

$$V(P_1, T_1) = Z(P_1, T_1)V^0(P_1, T_1) = Z(P_1, T_1)\frac{RT_1}{P_1};$$

здесь $Z(P_1, T_1)$ – коэффициент сжимаемости смеси в условиях P_1 и T_1.

Во Франции для процессов горения стандартной является температура T_0 = 273,15 K, для измерения объемов стандартными являются нормальные условия: P_0 = 101,325 кПа, T_0 = 273,15 K (в других странах Европы стандартные условия выбираются иначе и везде по-разному).

Постановлением от 25 сентября 1977 года установлены диапазоны изменения теплоты сгорания газов в распределительной сети Франции:

газ B: 9,5 < PCS < 10,5 кВт · ч/м³(н)

газ H: 10,7 < PCS < 12,8 кВт · ч/м³(н)

Определение теплоты сгорания (и показателя Вобба, см. далее) регламентируется стандартом ISO 6 976; эта методика внедрена в программное обеспечение Газпак (см. таблицу § 1.7.2.2.3.1.4).

1.7.2.2.5.2. Число Вобба

Определяется соотношением:

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d_0}}$$ и выражается в кВт · ч/м³(н)

где d_0 – нормальная относительная плотность.

Можно показать, что мощность одной горелки пропорциональна числу Вобба сжигаемого газа при прочих равных условиях; диапазон изменения числа Вобба, допустимый для горелки, соответствует области ее функционирования, ограниченной с одной стороны срывом пламени и, с другой стороны, санитарной нормой горючего (максимально допустимое отношение CO/CO_2 в продуктах сгорания).

С учетом имевшегося арсенала промышленных и бытовых аппаратов, границы этой области на 1 января 1986 года составляли:

газ B: 11,8 < W < 13,0 кВт · ч/м³(н)

газ H: 13,4 < PCS < 15,7 кВт · ч/м³(н)

Этот показатель используется в смесительных установках транспортной сети для регулирования процесса и в области потребления для регулирования мощности нагревателей.

1.7.2.2.5.3. Окислительная способность и коэффициент окисляемости

Окислительная способность (обозначается как V_a) есть безразмерное число, выражающее отношение объема воздуха, необходимого для стехиометрического горения единицы объема газа (оба объема измеряются в нормальных условиях).

Коэффициент окисляемости определяется отношением:

$$B = \frac{V_a}{\sqrt{d_0}}$$

где:

V_a – окислительная способность,

d_0 – нормальная относительная плотность.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

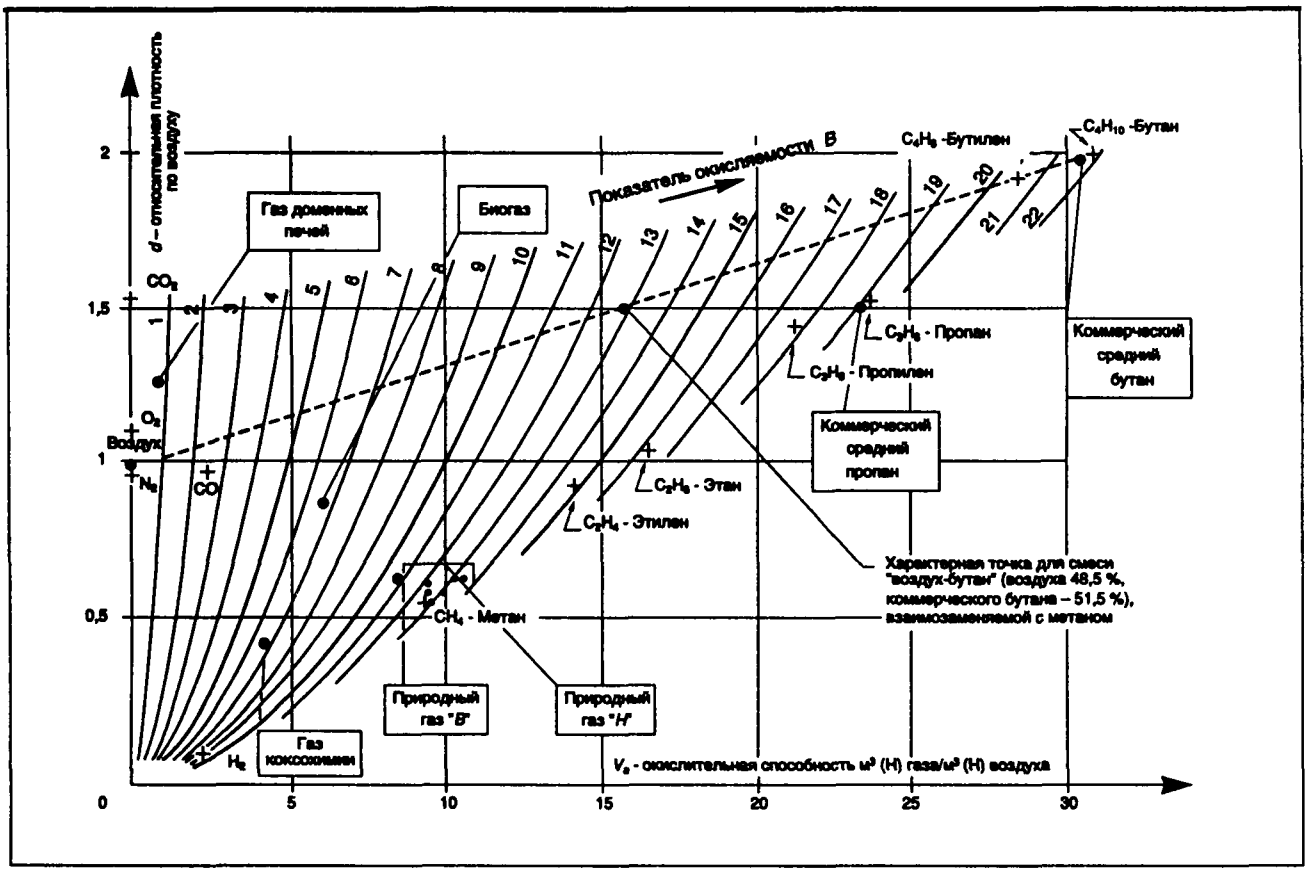


Диаграмма окисляемости промышленных газообразных топлив.

Сохранение этого параметра при потребляемом давлении фиксированной горелки обеспечивает возможность управления процессом горения; таким образом, этот параметр используется для регулирования горения и представляет собой величину, характеризующую массообмен между газами.

На вышеприведенном рисунке представлены различные газообразные топлива на диаграмме окисляемости: $d = f(V_a)$.

1.7.2.2.6. Вязкость и теплопроводность

1.7.2.2.6.1. Динамическая и кинематическая вязкость

Динамическая вязкость отражает трение между частицами жидкости в потоке при наличии градиентов скорости:

$$\tau = \frac{\mu du}{dy}$$

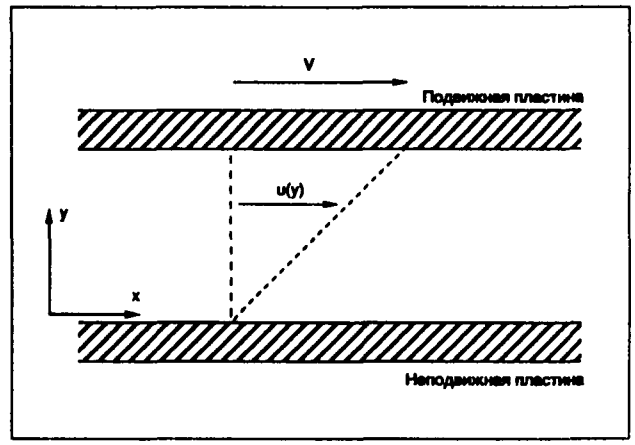
где:

τ – вязкостное напряжение; сила на единицу поверхности, нормальной к оси y,

μ – динамическая вязкость,

$\frac{du}{dy}$ – градиент скорости.

В системе СИ динамическая вязкость выражается в Па · с. Привычной внесистемной единицей является пуаз (П) или микропуаз (1 мкПз = 10^{-7} Па · с). Старинная единица "пуазейль" равнялась 10 пуазам или же 1 Па·с.



В уравнениях гидромеханики наиболее часто встречается отношение:

$$\frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\text{динамическая вязкость}}{\text{плотность}}\right)$$

называемое кинематической вязкостью.

В системе СИ кинематическая вязкость выражается в м²/с. Часто используют мм²/с, равный 1 сСт (Ст – стокс, единица кинематической вязкости в системе СГС).

Существует очень большое число методов оценки вязкостей газов, большей частью эмпирических.

1.7.2.2.6.2. В паровой фазе

Для чистых тел в паровой фазе наиболее употребима формула Сазерланда для расчета динамической вязкости разреженных газов (низкие давления) в интервале от 0 до 150°С:

$$\mu^0 = \frac{B\sqrt{T}}{1 + \frac{C}{T}}$$

где B и C являются коэффициентами, выражаемыми соответственно в (мкПз · $K^{-1/2}$) и (К) (см. таблицу ниже), а T есть абсолютная температура в кельвинах.

Газ	B, мкПз · $K^{-1/2}$	C, К
Метан	9,91	164
Этан	10,0	259
Пропан	9,13	279
n-бутан	9,20	333
Азот	14,0	110
Кислород	17,8	140
CO_2	16,2	260
Воздух	15,1	120

Соотношения Херниига и Циппереера (Herning, Zipperer) применимы для газовых смесей:

$$\mu_m^0 = \frac{\sum x_i \mu_i^0 \sqrt{M_i}}{\sum x_i \sqrt{M_i}}$$

или непосредственно:

$$B_m = \frac{\sum x_i B_i \sqrt{M_i}}{\sum x_i \sqrt{M_i}} \quad \text{и} \quad C_m = \sum x_i C_i$$

при этом:

x_i – мольная доля компонента *i*,

M_i – молекулярная масса (г/моль),

B_m и C_m – коэффициенты смешения (мкПз · $K^{-1/2}$ и К),

μ_m – динамическая вязкость смеси (мкПз).

Эти соотношения позволяют оценить вязкость газов при атмосферном давлении, а влияние изменения давления на вязкость, хотя оно и мало, может быть учтено с помощью соотношения Экин-Эллингтона (Eakin-Ellington):

$$\mu_m(P, T) - \mu_m^0(T) =$$

$$= A[\exp(7,237\rho) - \exp(-45,9\rho^2)]$$

где:

ρ – плотность в г/см³, и:

$$A = 32,80 - 0,1637M$$

(M – молекулярная масса в г/моль).

Для природных газов была предложена обобщенная зависимость Lee, Starling, Dolan и Ellington в виде:

$$\mu = K \exp X\rho^Y$$

при этом:

$$K = \frac{(7,77 + 0,0063M)T}{122,4 + 12,9M + T}, \quad X = \frac{2,57 + 1\,914,5}{T + 0,0095M},$$

$$Y = 1,11 + 0,04X$$

а также:

T – абсолютная температура в градусах Ренкина

$$(T(R) = \frac{9}{5}T(K)),$$

ρ – плотность в г/см³,

M – молекулярная масса в г/моль.

Эта корреляция обеспечивает хорошую точность (в лучшем случае невязка составляет несколько в условиях до 170°С и 560 бар) оценки динамической вязкости природных газов в паровой фазе (тяжелых углеводородов $C^{6+} < 0.8\%$).

Нижеприведенная таблица демонстрирует несколько значений, рассчитанных для метана и различных природных газов (результаты получены с помощью пакета Газпак).

Параметр		Динамическая вязкость, мкПз		Теплопроводность, мВт/(м · К)	
Температура	Давление	Метан CH_4	Природный газ	Метан CH_4	Природный газ
0°С	1 бар	102	104	29	28
	20 бар	105	108	32	31,5
	50 бар	114	118	37	35,5
	100 бар	139	148,5	48	48
20°С	1 бар	109	111	33	31,5
	20 бар	112	114,5	35	33,5
	50 бар	119	123	40	38,5
	100 бар	139	146	49	49
40°С	1 бар	115	118	37	35,5
	20 бар	118	121	39	38
	50 бар	125	128,5	43	41,5
	100 бар	141	147,5	51	50

Динамическая вязкость (в мПз = 10^{-7} Па · с) и теплопроводность (в мВт/ м · К) метана и природного газа (средняя величина для газов 1 - 5).

1.7.2.2.6.3. В жидкой фазе

Методы, позволяющие оценить вязкость в жидкой фазе, менее многочисленны и менее точны; нередко отклонения от экспериментальных значений (тоже очень редких) составляет 50%.

Специальные корреляции (Van Welsen и др., Medani и т.д.) в форме:

$$\mu = A\exp\left(\frac{B}{T} + K\right)$$

используются для расчета вязкости чистых компонентов, после чего вязкость смеси получается из закона смешения в форме:

$$\log\ (x_m) = \sum x_i \log\ (x_i)$$

где:

x – кинематическая (или динамическая) вязкость.

Следующая таблица предлагает некоторые величины, вычисленные (пакетом Газпак) для сжиженных природных газов в состоянии насыщения (на кривой кипения).

Замечание:

Для чистого жидкого метана в состоянии насыщения была установлена следующая корреляция при 100 < T < 190 K:

$$\mu'(CH_4) = \sum_{i=1}^{i=7} a\rho^i$$

где

ρ – плотность (кг/м³),

μ – динамическая вязкость (10^{-6} Па · с),

при этом:

$a_0 = 0{,}107\ 42\ 10^3$ $a_1 = -0{,}698\ 27$

$a_2 = -0{,}252\ 62 \times 10^{-3}$ $a_3 = 0{,}607\ 81 \times 10^{-5}$

$a_4 = 0{,}246\ 50 \times 10^{-7}$ $a_5 = -0{,}479\ 33 \times 10^{-10}$

$a_6 = -0{,}293\ 10 \times 10^{-12}$ $a_7 = 0{,}584\ 31 \times 10^{-15}$.

Она позволяет получить значения $\mu(CH_4)$ с погрешностью порядка нескольких процентов.

1.7.2.2.7. Влагосодержание природного газа, образование гидратов

1.7.2.2.7.1. Влагосодержание природного газа

При низких давлениях (P < 0,5 МПа) влагосодержание природного газа при насыщении может быть легко получено с помощью законов Дальтона и Рауля (см. § 1.7.2.1.4.) в рамках модели совершенного газа:

$$P_{H_2O} = x_{H_2O} P s_{H_2O}(T), \quad y = \frac{P_{H_2O}}{P}$$

$Ps_{H_2O}(T)$ – давление насыщенных паров воды при температуре T,

x_{H_2O} – мольная доля воды в жидкой фазе ($x = 1$, если жидкость состоит только из воды),

y_{H_2O} – мольная доля воды в паровой фазе,

P_{H_2O} – парциальное давление воды в паровой фазе,

P – общее давление;

откуда:

$$[H_2O] = \frac{y_{H_2O} M_{H_2O}}{V^0} = \frac{0{,}804 \times 10^6 P s_{H_2O}(T)}{P}$$

где

$[H_2O]$ – влагосодержание в условиях насыщения, выраженное в мг/м³(н),

M_{H_2O} – молекулярная масса воды (= 18,015 г/моль),

$Ps_{H_2O}(T)$ – давление насыщенных паров воды при температуре T, для насыщенного газа эта температура является также точкой росы "газ–вода" при рассматриваемом давлении газа P (замечание: помимо этого существует точка росы "газ–углеводороды").

При средних и, тем более, при высоких давлениях необходимо обращаться к уравнению состояния, способному учесть специальные свойства воды (существенный дипольный момент, водородные связи), или к эмпирической методике, основанной на экспериментальных данных.

Часто используется корреляция Букачека, базирующаяся на величине влагосодержания метана при насыщении. Она записывается в виде:

$$[H_2O] = \frac{A}{P + B}$$

где:

P – абсолютное давление (бар),

A и B – коэффициенты, являющиеся функциями температуры; для $-40°C < t < 40°C$:

$A = 4\ 926{,}5 \exp(0{,}073\ 74t - 0{,}000\ 307t^2)$

$B = 44{,}87 \exp(0{,}053\ 57t - 0{,}000\ 199t^2)$

Температура, K		110	120	130	140	150
Метан	P, МПа	0,0885	0,192	0,369	0,644	1,044
	кг/м³	1 190	940	760	630	530
Газ 1	P, МПа	0,091	0,188	0,350	0,595	0,944
	кг/м³	1 470	1 160	940	770	650

Плотность метана и газа-1 (GNL) на кривой кипения (в кг/м³), вычисленная с помощью пакета Газпак.

Темп. t, °C	Давл. p, кПа	Удельный объем, м³/кг		Внутренняя энергия, кДж/кг			Энтальпия, кДж/кг			Энтропия, кДж/(кг · К)		
		Жидкая фаза $10^3 v_f$	Газовая фаза $10^3 v_g$	Жидкая фаза u_f	Сублимация u_{fg}	Газовая фаза u_g	Жидкая фаза h_f	Сублимация h_{fg}	Газовая фаза h_g	Жидкая фаза s_f	Сублимация s_{fg}	Газовая фаза s_g
0	*,0006109*	*1,0002*	*206 278*	*–0,03*	*2 375,4*	*2 375,3*	*–0,02*	*2 501,4*	*2 501,3*	*–0,0001*	*9,1566*	*9,1565*
0,01	,0006113	1,0002	206 136	0,00	2 375,3	2 375,3	0,01	2 501,3	2 501,4	0,0000	9,1562	9,1562
1	,0006567	1,0002	192 577	4,15	2 372,6	2 376,7	4,16	2 499,0	2 503,2	0,0152	9,1147	9,1299
2	,0007056	1,0001	179 889	8,36	2 369,7	2 378,1	8,37	2 496,7	2 505,0	0,0305	9,0730	9,1035
3	,0007577	1,0001	168 132	12,56	2 366,9	2 379,5	12,57	2 494,3	2 506,9	0,0457	9,0316	9,0773
4	,0008131	1,0001	157 232	16,77	2 364,1	2 380,9	16,78	2 491,9	2 508,7	0,0610	8,9904	9,0514
5	,0008721	1,0001	147 120	20,97	2 361,3	2 382,3	20,98	2 489,6	2 510,6	0,0761	8,9496	9,0257
6	,0009349	1,0001	137 734	25,19	2 358,4	2 383,6	25,20	2 487,2	2 512,4	0,0912	8,9090	9,0003
7	,0010016	1,0002	129 017	29,38	2 355,6	2 385,0	29,39	2 484,8	2 514,2	0,1062	8,8688	8,9751
8	,0010724	1,0002	120 917	33,59	2 352,8	2 386,4	33,60	2 482,5	2 516,1	0,1212	8,8289	8,9501
9	,0011477	1,0003	113 386	37,80	2 350,0	2 387,8	37,80	2 480,1	2 517,9	0,1362	8,7892	8,9253
10	,0012276	1,0004	106 379	42,00	2 347,2	2 389,2	42,01	2 477,7	2 519,8	0,1510	8,7498	8,9008
11	,0013123	1,0004	99 857	46,20	2 344,3	2 390,5	46,20	2 475,4	2 521,6	0,1658	8,7107	8,8765
12	,0014022	1,0005	93 784	50,41	2 341,5	2 391,9	50,41	2 473,0	2 523,4	0,1806	8,6718	8,8524
13	,0014974	1,0007	88 124	54,60	2 338,7	2 393,3	54,60	2 470,7	2 525,3	0,1953	8,6332	8,8285
14	,0015983	1,0008	82 848	58,79	2 335,9	2 394,7	58,80	2 468,3	2 527,1	0,2099	8,5949	8,8048
15	,0017051	1,0009	77 926	62,99	2 333,1	2 396,1	62,99	2 465,9	2 528,9	0,2245	8,5569	8,7814
16	,0018181	1,0011	73 333	67,18	2 330,3	2 397,4	67,19	2 463,6	2 530,8	0,2390	8,5191	8,7582
17	,0019376	1,0012	69 044	71,38	2 327,4	2 398,8	71,38	2 461,2	2 532,6	0,2535	8,4816	8,7351
18	,0020640	1,0014	65 038	75,57	2 324,6	2 400,2	75,58	2 458,8	2 534,4	0,2679	8,4443	8,7123
19	,0021975	1,0016	61 293	79,76	2 321,8	2 401,6	79,77	2 456,5	2 536,2	0,2823	8,4073	8,6897
20	,002339	1,0018	57 791	83,95	2 319,0	2 402,9	83,96	2 454,1	2 538,1	0,2966	8,3706	8,6672
21	,002487	1,0020	54 514	88,14	2 316,2	2 404,3	88,14	2 451,8	2 539,9	0,3109	8,3341	8,6450
22	,002645	1,0022	51 447	92,32	2 313,3	2 405,7	92,33	2 449,4	2 541,7	0,3251	8,2979	8,6229
23	,002810	1,0024	48 574	96,51	2 310,5	2 407,0	96,52	2 447,0	2 543,5	0,3393	8,2618	8,6011
24	,002985	1,0027	45 883	100,70	2 307,7	2 408,4	100,70	2 444,7	2 545,4	0,3534	8,2261	8,5794
25	,003169	1,0029	43 360	104,88	2 304,9	2 409,8	104,89	2 442,3	2 547,2	0,3674	8,1905	8,5580
26	,003363	1,0032	40 994	109,06	2 302,1	2 411,1	109,07	2 439,9	2 549,0	0,3814	8,1552	8,5367
27	,003567	1,0035	38 774	113,25	2 299,3	2 412,5	113,25	2 437,6	2 550,8	0,3954	8,1202	8,5156
28	,003782	1,0037	36 690	117,42	2 296,4	2 413,9	117,43	2 435,2	2 552,6	0,4093	8,0854	8,4946
29	,004008	1,0040	34 733	121,60	2 293,6	2 415,2	121,61	2 432,8	2 554,5	0,4231	8,0508	8,4739
30	,004246	1,0043	32 894	125,78	2 290,8	2 416,6	125,79	2 430,5	2 556,3	0,4369	8,0164	8,4533
31	,004496	1,0046	31 165	129,96	2 288,0	2 418,0	129,97	2 428,1	2 558,1	0,4507	7,9822	8,4329
32	,004759	1,0050	29 540	134,14	2 285,2	2 419,3	134,15	2 425,7	2 559,9	0,4644	7,9483	8,4127
33	,005034	1,0053	28 011	138,32	2 282,4	2 420,7	138,33	2 423,4	2 561,7	0,4781	7,9146	8,3927
34	,005324	1,0056	26 571	142,50	2 279,5	2 422,0	142,50	2 421,0	2 563,5	0,4917	7,8811	8,3728
35	,005628	1,0060	25 216	146,67	2 276,7	2 423,4	146,68	2 418,6	2 565,3	0,5053	7,8478	8,3531
36	,005947	1,0063	23 940	150,85	2 273,9	2 424,7	150,86	2 416,2	2 567,1	0,5188	7,8147	8,3336
37	,006281	1,0067	22 737	155,03	2 271,1	2 426,1	155,03	2 413,9	2 568,9	0,5323	7,7819	8,3142
38	,006632	1,0071	21 602	159,20	2 268,2	2 427,4	159,21	2 411,5	2 570,7	0,5458	7,7492	8,2950
39	,006999	1,0074	20 533	163,38	2 265,4	2 428,8	163,39	2 409,1	2 572,5	0,5592	7,7167	8,2759
40	,007384	1,0078	19 523	167,56	2 262,6	2 430,1	167,57	2 406,7	2 574,3	0,5725	7,6845	8,2570

Таблица значений $Ps_{H_2O}(T)$: взято из "Steam tables", J. H. Keenan et al., John Wiley (1978).

Это соотношение, на основе которого рассчитана номограмма, приведенная на стр. 127, может также применяться для некислых природных газов, удовлетворяющих следующим условиям:

CO_2 < 2% (мольн.), H_2S < 1,5% (объемн.), отн. плотность <0,8 в противном случае необходима коррекция методики.

Номограмма позволяет определить влагосодержание природного газа в условиях насыщения как функцию давления и температуры; поскольку состояния насыщенные, температура является также точкой росы "газ–вода".

С другой стороны, при заданном влагосодержании эта номограмма отражает закон соответствия между точкой росы (температурой росы) при заданном давлении и содержании воды.

К примеру, точка росы –25°С при 16 барах эквивалентна влагосодержанию 50 мг/м³ (н), а также точке росы –12°С при 70 барах.

Диаграмма может быть использована также для того, чтобы перевести результат измерения точки росы во влагосодержание (или наоборот). В случае определения точки росы по давлению (P > 5 бар), если замерное устройство не осуществляет прямое измерение точки росы (это характерно для

Темп. °C, t	Давл. p, кПа	Удельный объем, м³/кг		Внутренняя энергия, кДж/кг			Энтальпия, кДж/кг			Энтропия, кДж/(кг · К)		
		Твердая фаза $10^3 v_f$	Газовая фаза v_g	Твердая фаза u_f	Сублимация u_{fg}	Газовая фаза u_g	Твердая фаза h_f	Сублимация h_{fg}	Газовая фаза h_g	Твердая фаза s_f	Сублимация s_{fg}	Газовая фаза s_g
0,01	0,6113	1,0908	206,1	–333,40	2 708,7	2 375,3	–333,40	2 834,8	2 501,4	–1,221	10,378	9,156
0	0,6108	1,0908	206,3	–333,43	2 708,8	2 375,3	–333,43	2 834,8	2 501,3	–1,221	10,378	9,157
–2	0,5176	1,0904	241,7	–337,62	2 710,2	2 372,6	–337,62	2 835,3	2 497,7	–1,237	10,456	9,219
–4	0,4375	1,0901	283,8	–341,78	2 711,6	2 369,8	–341,78	2 835,7	2 494,0	–1,253	10,536	9,283
–6	0,3689	1,0898	334,2	–345,91	2 712,9	2 367,0	–345,91	2 836,2	2 490,3	–1,268	10,616	9,348
–8	0,3102	1,0894	394,4	–350,02	2 714,2	2 364,2	–350,02	2 836,6	2 486,6	–1,284	10,698	9,414
–10	0,2602	1,0891	466,7	–354,09	2 715,5	2 361,4	–354,09	2 837,0	2 482,9	–1,299	10,781	9,481
–12	0,2176	1,0888	553,7	–358,14	2 716,8	2 358,7	–358,14	2 837,3	2 479,2	–1,315	10,865	9,550
–14	0,1815	1,0884	658,8	–362,15	2 718,0	2 355,9	–362,15	2 837,6	2 475,5	–1,331	10,950	9,619
–16	0,1510	1,0881	786,0	–366,14	2 719,2	2 353,1	–366,14	2 837,9	2 471,8	–1,346	11,036	9,690
–18	0,1252	1,0878	940,5	–370,10	2 720,4	2 350,3	–370,10	2 838,2	2 468,1	–1,362	11,123	9,762
–20	0,1035	1,0874	1 126,6	–374,03	2 721,5	2 347,5	–374,03	2 838,4	2 464,3	–1,377	11,212	9,835
–22	0,0853	1,0871	1 358,4	–377,93	2 722,7	2 344,7	–377,93	2 838,6	2 460,6	–1,393	11,302	9,909
–24	0,0701	1,0868	1 640,1	–381,80	2 723,7	2 342,0	–381,80	2 838,7	2 456,9	–1,408	11,394	9,985
–26	0,0574	1,0864	1 986,4	–385,64	2 274,8	2 339,2	–385,64	2 838,9	2 453,2	–1,424	11,486	10,062
–28	0,0469	1,0861	2 413,7	–389,45	2 725,8	2 336,4	–389,45	2 839,0	2 449,5	–1,439	11,580	10,141
–30	0,0381	1,0858	2 943,	–393,23	2 726,8	2 333,6	–393,23	2 839,0	2 445,8	–1,455	11,676	10,221
–32	0,0309	1,0854	3 600,	–396,98	2 727,8	2 330,8	–396,98	2 839,1	2 442,1	–1,471	11,773	10,303
–34	0,0250	1,0851	4 419,	–400,71	2 728,7	2 328,0	–400,71	2 839,1	2 438,4	–1,486	11,872	10,386
–36	0,0201	1,0848	5 444,	–404,40	2 729,6	2 325,2	–404,40	2 839,1	2 434,7	–1,501	11,972	10,470
–38	0,0161	1,0844	6 731,	–408,06	2 730,5	2 322,4	–408,06	2 839,0	2 430,9	–1,517	12,073	10,556
–40	0,0129	1,0841	8 354,	–411,70	2 731,3	2 319,6	–411,70	2 838,9	2 427,2	–1,532	12,176	10,644

Таблица значений $Ps_{H_2O}(T)$: взято из "Steam tables", J. H. Keenan et al., John Wiley (1978).

всех гигрометров, которые устроены не по принципу охлаждающего зеркала и показания которых даются не в °C), используется закон соответствия, который позволяет конвертировать замеряемую величину (в общем случае это парциальное давление воды или, более точно, фугитивность) в результат, выражаемый в °C.

Применение этого закона (обычно конструкторы используют описанную выше модель совершенного газа, за исключением специальных случаев) позволяет получить величину влагосодержания, соответствующую величине, измеряемой в °C. Таким образом, использование диаграммы позволяет получить точку росы для природного газа (при заданном давлении).

1.7.2.2.7.2. Гидратообразование

В зависимости от условий давления и температуры газ, насыщенный водой, может образовывать твердые вещества, такие как лед или еще чаще - гидраты природного газа:

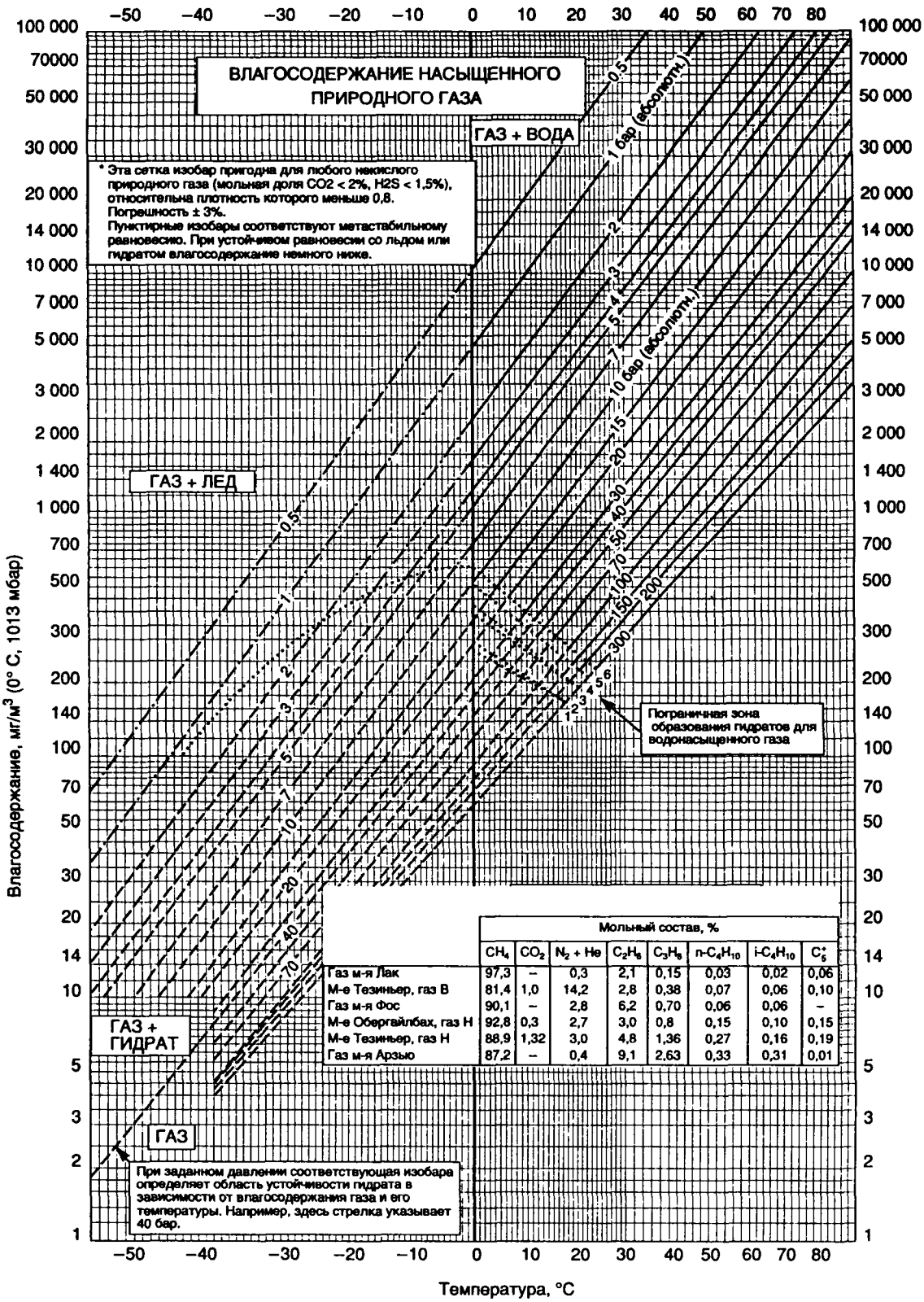
природный газ + вода ⇌ гидраты
(газообразное состояние) (жидкость) (твердое тело)

Область существования гидратов ограничена на плоскости (P, T) кривой гидратообразования (см. нижеследующие два рисунка кривых гидратообразования различных природных газов).

Предупреждение образования подобных твердых формирований заключается прежде всего во введении ингибиторов (метанол, гликоль), воздействие которых заключается в смещении равновесия газ-гидрат, так что образование гидрата становится возможным при более низких температурах (при заданном давлении), либо при более высоких давлениях (при заданной температуре).

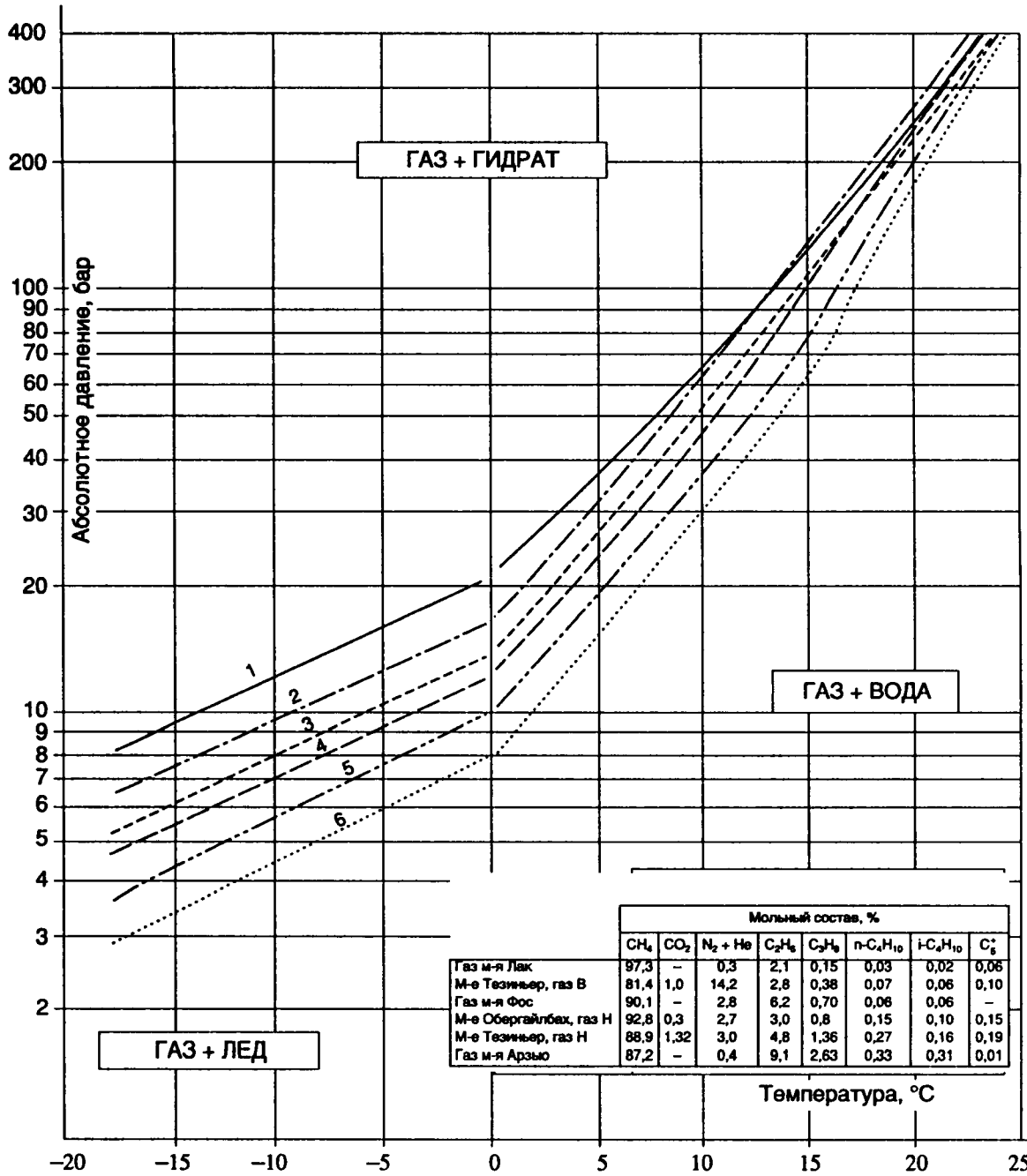
Расчеты влагосодержания природных газов (или точки росы при заданном влагосодержании), а также расчеты, относящиеся к образованию и предупреждению гидратов, реализованы с помощью пакета Газпак.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



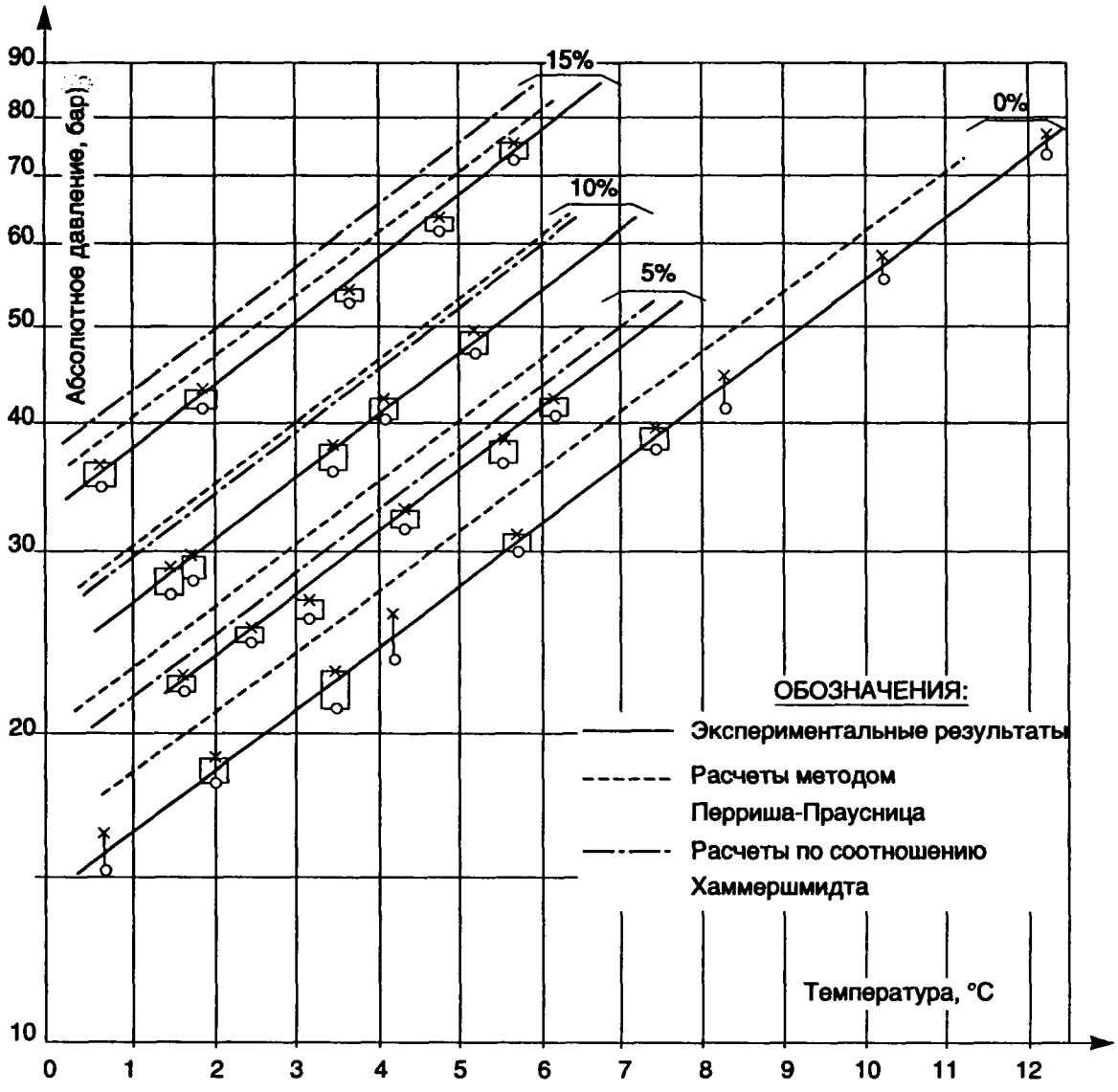
	Мольный состав, %							
	CH_4	CO_2	N_2 + He	C_2H_6	C_3H_8	n-C_4H_{10}	i-C_4H_{10}	C_5^+
Газ м-я Лак	97,3	–	0,3	2,1	0,15	0,03	0,02	0,06
М-е Тезиньер, газ В	81,4	1,0	14,2	2,8	0,38	0,07	0,06	0,10
Газ м-я Фос	90,1	–	2,8	6,2	0,70	0,06	0,06	–
М-е Обергайлбах, газ Н	92,8	0,3	2,7	3,0	0,8	0,15	0,10	0,15
М-е Тезиньер, газ Н	88,9	1,32	3,0	4,8	1,36	0,27	0,16	0,19
Газ м-я Арзью	87,2	–	0,4	9,1	2,63	0,33	0,31	0,01

Влагосодержание насыщенного природного газа,



	Мольный состав, %							
	CH_4	CO_2	N_2 + He	C_2H_6	C_3H_8	n-C_4H_{10}	i-C_4H_{10}	C_5^+
Газ м-я Лак	97,3	–	0,3	2,1	0,15	0,03	0,02	0,06
М-е Тезиньер, газ В	81,4	1,0	14,2	2,8	0,38	0,07	0,06	0,10
Газ м-я Фос	90,1	–	2,8	6,2	0,70	0,06	0,06	–
М-е Обергайлбах, газ Н	92,8	0,3	2,7	3,0	0,8	0,15	0,10	0,15
М-е Тезиньер, газ Н	88,9	1,32	3,0	4,8	1,36	0,27	0,16	0,19
Газ м-я Арзью	87,2	–	0,4	9,1	2,63	0,33	0,31	0,01

Кривые гидратообразования: расчеты выполнены программой управления исследований и новой техники "Газ де Франс" (май 1985),



Мольный состав (%) : C1 : 81,60 C_5^+ : 0,09
C2 : 2,70 N_2 : 14,2
C3 : 0,36 CO_2 : 0,9
C4 : 0,15

Кривые гидратообразования для газа месторождения Гронинг в зависимости от содержания метанола в водной жидкой фазе (массовая доля метанола в воде: 0, 5, 10, 15 %),

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.8. ХИМИЯ

1.8.1. Теория атома и химические связи

1.8.1.1. Строение атома

Атом состоит из центрального ядра, в котором сосредоточена практически вся его масса. Ядро несет положительный заряд и окружено облаком электронов, отрицательных электрических частиц, имеющих в сумме заряд, противоположный заряду ядра.

Электроны вращаются слоями вокруг ядра; их масса очень мала по сравнению с массой атома. Масса одного электрона $m = 9{,}11 \cdot 10^{-28}$ г (в покое), а его заряд $-e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кулон.

Атомное ядро состоит из двух типов частиц:

— *протонов*, число которых равно числу электронов, они несут положительный заряд ($+e$) и имеют массу, равную $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ г;

— *нейтронов*, не имеющих электрического заряда, масса которых близка к массе протонов ($m = 1{,}6627 \cdot 10^{-24}$ г).

Атомное ядро характеризуется:

— *атомным номером* Z, равным числу его протонов, которое меняется от 1 (для водорода) до 109[1];

— массовое число A рассматриваемого элемента, равное Z + N, где N – число нейтронов. Масса ядра в точности равна (Z + N) · M, где M есть масса протона.

Элементы, атомный номер которых одинаков, но число нейтронов неодинаково, называются *изотопами*. Например, никель имеет 28 протонов, но может содержать 30, 32, 33 или 36 нейтронов.

1.8.1.1.1. Атомная масса, грамм-атом

По определению единицей массы атома (u) является 1/12 массы атома углерода-12; она равна:

$$u = 1{,}660\,565\,5 \cdot 10^{-24} \text{ г}$$

Атомная масса есть отношение массы атома элемента к 1/12 массы атома углерода-12. Так, атомная масса водорода равна: H = 1,007 94, а масса атома равна 1,007 94 · u (см. таблицу атомных масс). Грамм-атом представляет собой массу N атомов рассматриваемого элемента. N является числом Авогадро и равно $6{,}023 \cdot 10^{23}$.

[1] В оригинальном тексте последние элементы таблицы Менделеева с номерами 105 - 109 имеют названия, являющиеся соответствующими именами числительными на латинском языке, например, элемент 109 называется как "унниленниум" ("унни" – девять) и т.п. В отечественной литературе подобные названия не используются. (*Прим. перев.*)

1.8.1.1.2. Молекулярная масса, моль

Молекулярной массой вещества является отношение массы молекулы этого вещества к 1/12 массы атома углерода-12; следовательно, она формируется атомными массами элементов, входящих в состав молекулы.

Пример: молекула H_2S содержит один атом серы и два атома водорода, молекулярная масса равна:

$$2 \cdot 1{,}008 + 32{,}066 = 34{,}082$$

Грамм-молекула или моль вещества есть некоторая масса этого вещества, которая выражается в граммах числом, равным молекулярной массе рассматриваемого вещества.

Пример: 1 моль H_2S равен 34,082 г.

1.8.1.2. Электронная структура атома

Электроны вращаются вокруг ядра. Область пространства, в которой можно встретить данный электрон, называется *атомной орбитой*. Квантовая механика показывает, что "положение", или, более точно, состояние отдельного электрона в атоме определяется четырьмя целыми числами, названными квантовыми числами.

1.8.1.2.1. Главное квантовое число

Главное квантовое число n характеризует уровень энергии электрона, который называется электронным слоем. Эти слои обозначаются заглавными буквами K, L, M и т.д. соответственно последовательным значениям числа n: 1, 2, 3 и т.д.

1.8.1.2.2. Вторичное квантовое число

Вторичное квантовое число l определяет форму орбиты, а вместе с числом n и среднее расстояние от электрона до ядра. Оно может принимать значения 0, 1, 2 ... $n - 1$, которые соответствуют энергетическим состояниям, называемым *подслоями* и обозначаемым буквами *s*, *p*, *d*, *f*, когда l имеет значение 0, 1, 2, или 3.

1.8.1.2.3. Магнитное квантовое число

Магнитное квантовое число m определяет угловую ориентацию орбиты в пространстве. Оно может принимать значения между $-l$ и $+l$. Каждый подслой содержит фиксированное число *квантовых ячеек*, определяемое величиной m (см. следующую таблицу).

Слой		Подслой		Квантовые ячейки (m)	Число электронов в слое	Электронная формула
(n)	Обозначение	(l)	Обозначение			
1	K	0	1 s	0	2	$1s^{1-2}$
2	L	0	2 s	0	2 } 8	$2s^{1-2}$
		1	2 p	−1, 0, 1	6 } 8	$2p^{1-6}$
3	M	0	3 s	0	2 } 18	$3s^{1-2}$
		1	3 p	1, 0, 1	6 } 18	$3p^{1-6}$
		2	3 d	−2, −1, 0, 1, 2	10 } 18	$3d^{1-10}$

Распределение электронов по трем первым слоям в атоме.

1.8.1.2.4. Спиновое квантовое число

Спиновое квантовое число s определяет направление вращения электрона вокруг самого себя; возможны лишь два его значения:

$$s = 1/2 \quad либо \quad s = -1/2$$

Принцип исключения Паули указывает, что два электрона из одного атома не могут иметь одинаковую тетраду (n, l, m, s) квантовых чисел.

Исходя из этих сведений можно определить распределение электронов по различным электронным слоям; в вышеприведенной таблице представлены распределения, соответствующие трем первым слоям.

1.8.1.3. Периодическая классификация элементов (таблица Менделеева, 1869)

Периодическая таблица содержит семь строк, указывающих число электронных слоев вокруг ядра. Каждая строка составляет один период. Число элементов, соответствующих каждому периоду, зависит от возрастающей емкости электронных слоев. Последний слой пока не заполнен.

Периодическая таблица, используемая в настоящее время, состоит из 18 вертикальных рядов, которые объединены в 9 групп, занумерованных римскими цифрами. Каждая цифра соответствует числу электронов на внешней орбите (валентные электроны). Элементы одного ряда имеют сходные химические свойства.

Первые семь групп разделены на две подгруппы A и B:

— *подгруппы A*: от I-A до VII-A характеризуются пустым или заполненным подслоем d;
— *подгруппы B*: от III-B до VII-B, а также группа VIII, состоящая из элементов рядов 8, 9 и 10, являются *переходными элементами*, соответствующими заполнению подслоя d.

1.8.1.4. Понятие химической связи

Связи формируются за счет взаимодействий электронов внешних слоев соседних атомов. Существуют различные типы связей, основными из которых являются следующие.

1.8.1.4.1. Ионная связь

Это электростатическая связь, которая устанавливается между двумя ионами противоположного знака: многие атомы металлов легко теряют один или несколько электронов, образуя катионы (Na^+, Ca^{2+}), другие атомы способны легко их присоединять, образуя анионы (Cl^-, F^-, S^{2-}).

Пример: соли металлов, такие как NaCl, имеющие кристаллическую структуру (ионные кристаллы).

1.8.1.4.2. Ковалентная связь

Устанавливается путем объединения электронов внешних слоев. В простейшей двухэлектронной связи каждый атом предоставляет по одному электрону для образования дублета. Связь называется кратной, если она формируется несколькими дублетами.

Ковалентная связь является более сильной, чем ионная.

Пример: H_2 (простая связь), CO_2 (двойная связь).

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	I а	I б	II а	II б	III а	III б	IV а	IV б	V а	V б	VI а	VI б	VII а	VII б	VIII а	VIII б	VIII б	VIII б
1		H											1 H 1,0079 $1s^1$ ВОДОРОД		2 He 4,00260 $1s^2$ ГЕЛИЙ			
2	3 Li 6,941 $2s^1$ ЛИТИЙ		4 Be 9,01218 $2s^2$ БЕРИЛЛИЙ		5 B 10,81 $2s^2 2p^1$ БОР		6 C 12,011 $2s^2 2p^2$ УГЛЕРОД		7 N 14,0067 $2s^2 2p^3$ АЗОТ		8 O 15,9994 $2s^2 2p^4$ КИСЛОРОД		9 F 18,99840 $2s^2 2p^5$ ФТОР		10 Ne 20,179 $2s^2 2p^6$ НЕОН			
3	11 Na 22,98977 $3s^1$ НАТРИЙ		12 Mg 24,305 $3s^2$ МАГНИЙ		13 Al 26,98154 $3s^2 3p^1$ АЛЮМИНИЙ		14 Si 28,086 $3s^2 3p^2$ КРЕМНИЙ		15 P 30,97376 $3s^2 3p^3$ ФОСФОР		16 S 32,06 $3s^2 3p^4$ СЕРА		17 Cl 35,453 $3s^2 3p^5$ ХЛОР		18 Ar 39,948 $3s^2 3p^6$ АРГОН			
4	19 K 39,098 $4s^1$ КАЛИЙ		20 Ca 40,08 $4s^2$ КАЛЬЦИЙ		21 Sc $3d^1 4s^2$ 44,9559 СКАНДИЙ		22 Ti $3d^2 4s^2$ 47,90 ТИТАН		23 V $3d^3 4s^2$ 50,9415 ВАНАДИЙ		24 Cr $3d^5 4s^1$ 51,996 ХРОМ		25 Mn $3d^5 4s^2$ 54,9380 МАРГАНЕЦ		26 Fe $3d^6 4s^2$ 55,847 ЖЕЛЕЗО	27 Co $3d^7 4s^2$ 58,9332 КОБАЛЬТ	28 Ni $3d^8 4s^2$ 58,70 НИКЕЛЬ
	29 Cu $3d^{10} 4s^1$ 63,546 МЕДЬ		30 Zn $3d^{10} 4s^2$ 65,38 ЦИНК		31 Ga 69,72 $4s^2 4p^1$ ГАЛЛИЙ		32 Ge 72,59 $4s^2 4p^2$ ГЕРМАНИЙ		33 As 74,9216 $4s^2 4p^3$ МЫШЬЯК		34 Se 78,96 $4s^2 4p^4$ СЕЛЕН		35 Br 79,904 $4s^2 4p^5$ БРОМ		36 Kr 83,80 $4s^2 4p^6$ КРИПТОН			
5	37 Rb 85,4678 $5s^1$ РУБИДИЙ		38 Sr 87,62 $5s^2$ СТРОНЦИЙ		39 Y $4d^1 5s^2$ 88,9059 ИТТРИЙ		40 Zr $4d^2 5s^2$ 91,22 ЦИРКОНИЙ		41 Nb $4d^4 5s^1$ 92,9064 НИОБИЙ		42 Mo $4d^5 5s^1$ 95,94 МОЛИБДЕН		43 Tc $4d^5 5s^2$ [97] ТЕХНЕЦИЙ		44 Ru $4d^7 5s^1$ 101,07 РУТЕНИЙ	45 Rh $4d^8 5s^1$ 102,9055 РОДИЙ	46 Pd $4d^{10}$ 106,4 ПАЛЛАДИЙ
	47 Ag $4d^{10} 5s^1$ 107,868 СЕРЕБРО		48 Cd $4d^{10} 5s^2$ 112,40 КАДМИЙ		49 In 114,82 $5s^2 5p^1$ ИНДИЙ		50 Sn 118,69 $5s^2 5p^2$ ОЛОВО		51 Sb 121,75 $5s^2 5p^3$ СУРЬМА		52 Te 127,60 $5s^2 5p^4$ ТЕЛЛУР		53 I 126,9045 $5s^2 5p^5$ ИОД		54 Xe 131,30 $5s^2 5p^6$ КСЕНОН			
6	55 Cs 132,9054 $6s^1$ ЦЕЗИЙ		56 Ba 137,34 $6s^2$ БАРИЙ		57 La* $5d^1 6s^2$ 138,905 ЛАНТАН		72 Hf $5d^2 6s^2$ 178,49 ГАФНИЙ		73 Ta $5d^3 6s^2$ 180,947 ТАНТАЛ		74 W $5d^4 6s^2$ 183,85 ВОЛЬФРАМ		75 Re $5d^5 6s^2$ 186,207 РЕНИЙ		76 Os $5d^6 6s^2$ 190,2 ОСМИЙ	77 Ir $5d^7 6s^2$ 192,22 ИРИДИЙ	78 Pt $5d^9 6s^1$ 195,09 ПЛАТИНА
	79 Au $5d^{10} 6s^1$ 196,9665 ЗОЛОТО		80 Hg $5d^{10} 6s^2$ 200,59 РТУТЬ		81 Tl 204,37 $6s^2 6p^1$ ТАЛЛИЙ		82 Pb 207,2 $6s^2 6p^2$ СВИНЕЦ		83 Bi 208,9804 $6s^2 6p^3$ ВИСМУТ		84 Po [209] $6s^2 6p^4$ ПОЛОНИЙ		85 At [210] $6s^2 6p^5$ АСТАТ		86 Rn [222] $6s^2 6p^6$ РАДОН			
7	87 Fr [223] $7s^1$ ФРАНЦИЙ		88 Ra [226] $7s^2$ РАДИЙ		89 Ac** $6d^1 7s^2$ [227] АКТИНИЙ		104 (Ku) $6d^2 7s^2$ [261] КУРЧАТОВИЙ		105 (Ns) [262] (НИЛЬСБОРИЙ)		106 (E-W) [263]		107 (E-Re) [262]					

Атомный номер → 92 U ← Символ
Атомная масса → 238,03 $6d^1$
УРАН $5f^3$

Распределение электронов по застраивающимся и ближайшим подоболочкам

* ЛАНТАНОИДЫ

58 Ce $6s^2$ 140,12 $5d^1$ ЦЕРИЙ $4f^1$	59 Pr 140,9077 $4f^3 6s^2$ ПРАЗЕОДИМ	60 Nd 144,24 $4f^4 6s^2$ НЕОДИМ	61 Pm [145] $4f^5 6s^2$ ПРОМЕТИЙ	62 Sm 150,4 $4f^6 6s^2$ САМАРИЙ	63 Eu 151,96 $4f^7 6s^2$ ЕВРОПИЙ	64 Gd $5d^1$ 157,25 $4f^7$ ГАДОЛИНИЙ	65 Tb 158,9254 $4f^9 6s^2$ ТЕРБИЙ	66 Dy 162,50 $4f^{10} 6s^2$ ДИСПРОЗИЙ	67 Ho $4f^{11}$ 164,9303 $6s^2$ ГОЛЬМИЙ	68 Er 167,26 $4f^{12} 6s^2$ ЭРБИЙ	69 Tm 168,9342 $4f^{13}$ ТУЛИЙ $6s^2$	70 Yb 173,04 $4f^{14}$ ИТТЕРБИЙ $6s^2$	71 Lu $6s^2$ $5d^1$ 174,97 $4f^{14}$ ЛЮТЕЦИЙ

** АКТИНОИДЫ

90 Th 232,0381 $6d^2 7s^2$ ТОРИЙ	91 Pa $7s^2$ $6d^1$ [231] $5f^2$ ПРОТАКТИНИЙ	92 U $7s^2$ $6d^1$ 238,02 $5f^3$ УРАН	93 Np $7s^2$ $6d^1$ [237] $5f^4$ НЕПТУНИЙ	94 Pu [244] $5f^6 7s^2$ ПЛУТОНИЙ	95 Am [243] $5f^7 7s^2$ АМЕРИЦИЙ	96 Cm $7s^2$ [247] $6d^1$ КЮРИЙ $5f^7$	97 Bk $7s^2$ [247] $6d^1$ БЕРКЛИЙ $5f^8$	98 Cf [251] $5f^{10} 7s^2$ КАЛИФОРНИЙ	99 Es [252] $5f^{11} 7s^2$ ЭЙНШТЕЙНИЙ	100 Fm [257] $5f^{12} 7s^2$ ФЕРМИЙ	101 Md [258] $5f^{13} 7s^2$ МЕНДЕЛЕВИЙ	102 (No) [259] $5f^{14} 7s^2$ (НОБЕЛИЙ)	103 Lr $5f^{14}$ $6d^1$ [260] $7s^2$ ЛОУРЕНСИЙ)

Атомный номер	Название	Обозначение	Относительная атомная масса (1)	Атомный номер	Название	Обозначение	Относительная атомная масса (1)
89	Актиний	Ac	227,0278	25	Марганец	Mn	24,9380
13	Алюминий	Al	26,98154	101	Менделеевий	Md	(258)
95	Америций	Am	(243)	80	Ртуть	Hg	200,59 ± 3
51	Сурьма	Sb	121,75 ± 3	42	Молибден	Mo	95,94
47	Серебро	Ag	107,868 2 ± 3	60	Неодим	Nd	144,24 ± 3
18	Аргон	Ar	39,948	10	Неон	Ne	20,179
33	Мышьяк	As	74,9216	93	Нептуний	Np	237,0482
85	Астат	At	(210)	28	Никель	Ni	58,69
7	Азот	N	14,0067	41	Ниобий	Nb	92,9064
56	Барий	Ba	137,33	102	Нобелий	No	(259)
97	Берклий	Bk	(247)	79	Золото	Au	196,9665
4	Бериллий	Be	9,01218	76	Осмий	Os	190,2
83	Висмут	Bi	208,9804	8	Кислород	O	15,9994 ± 3
5	Бор	B	10,81	46	Палладий	Pd	106,42
35	Бром	Br	79,904	15	Фосфор	P	30,97376
48	Кадмий	Cd	112,41	78	Платина	Pt	195,08 ± 3
20	Кальций	Ca	40,08	82	Свинец	Pb	207,2
98	Калифорний	Cf	(251)	94	Плутоний	Pu	(244)
6	Углерод	C	12,01115	84	Полоний	Po	(209)
58	Церий	Ce	140,12	19	Калий	K	39,0983
55	Цезий	Cs	132,9054	59	Празеодим	Pr	140,9077
17	Хлор	Cl	35,453	61	Прометий	Pm	(145)
24	Хром	Cr	51,996	91	Протактиний	Pa	231,0359
27	Кобальт	Co	58,9332	88	Радий	Ra	226,0254
29	Медь	Cu	63,546 ± 3	86	Радон	Rn	(222)
96	Кюрий	Cm	(247)	75	Рений	Re	186,207
66	Диспрозий	Dy	162,50 ± 3	45	Родий	Rh	102,9055
99	Эйнштейний	Es	(252)	37	Рубидий	Rb	85,467 ± 3
68	Эрбий	Er	167,26 ± 3	44	Рутений	Ru	101,07 ± 3
50	Олово	Sn	118,69 ± 3	62	Самарий	Sm	150,36 ± 3
63	Европий	Eu	151,96	21	Скандий	Sc	44,9559
26	Железо	Fe	55,847 ± 3	34	Селен	Se	78,96 ± 3
100	Фермий	Fm	(257)	14	Кремний	Si	28,0855 ± 3
9	Фтор	F	18,998403	11	Натрий	Na	22,98977
87	Франций	Fr	(223)	16	Сера	S	32,064
64	Гадолиний	Gd	157,25 ± 3	38	Стронций	Sr	87,62
31	Галлий	Ga	69,72	73	Тантал	Ta	180,9479
32	Германий	Ge	72,59 ± 3	43	Технеций	Tc	(98)
72	Гафний	Hf	178,49 ± 3	52	Теллур	Te	127,60 ± 3
2	Гелий	He	4,00260	65	Тербий	Tb	158,9254
67	Гольмий	Ho	164,9304	81	Таллий	Tl	204,383
1	Водород	H	1,00794 ± 3	90	Торий	Th	232,0381
49	Индий	In	114,82	69	Тулий	Tm	168,9342
53	Иод	I	126,9045	22	Титан	Ti	47,88 ± 3
77	Иридий	Ir	192,22 ± 3	74	Вольфрам	W	183,85 ± 3
36	Криптон	Kr	83,80	92	Уран	U	238,0289
57	Лантан	La	138,9055 ± 3	23	Ванадий	V	50,9415
103	Лоуренсий	Lr		54	Ксенон	Xe	131,29 ± 3
3	Литий	Li	6,941 ± 3	70	Иттербий	Yb	173,04 ± 3
71	Лютеций	Lu	174,967	39	Иттрий	Y	88,9059
12	Магний	Mg	24,305	30	Цинк	Zn	65,38
				40	Цирконий	Zr	91,22

(1) В системе, в которой атомная масса углерода 12 равна 12,

Таблица относительных атомных масс.

Координационная связь (или донорно-акцепторная): в этом случае один из присутствующих атомов предоставляет пару электронов. Элемент, являющийся "донором", имеет по меньшей мере один свободный дублет (фосфор, кислород, сера и галогены), который становится общим для другого атома "акцептора", имеющего свободные орбиты (бор, алюминий).

Пример: SO_2, $AlCl_3$, $[Fe(CN)_6]^3$.

1.8.1.4.3. Гибридная связь

Это связь, устанавливающаяся с помощью образования гибридных эквивалентных орбит, которые являются комбинациями орбит *s*, *p* и/или *d*. Существуют различные типы гибридизации в зависимости от природы и количества скрещивающихся орбит.

Пример: тетрагональная гибридизация sp^3 в случае метана CH_4.

Орбиты sp^3 получаются как комбинация одной орбиты 2*s* и трех чистых орбит 3*p*:

— в фундаментальном состоянии электронная структура углерода имеет вид:

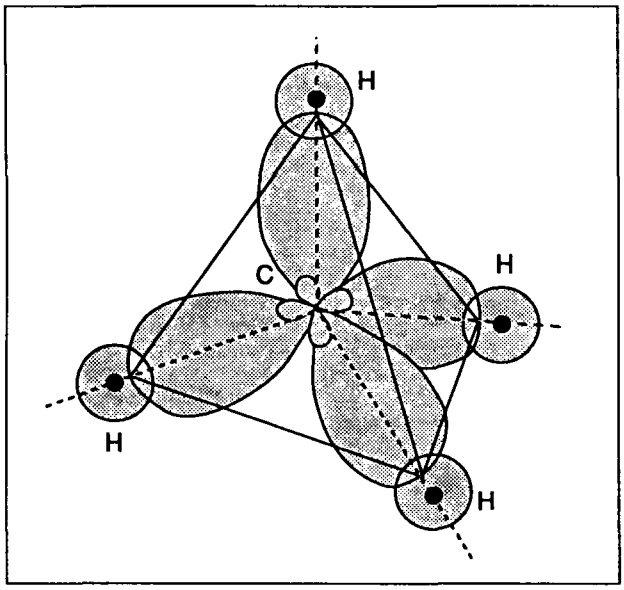
$1s^2\ 2s^2\ 2p^2$ 

— в состоянии гибридизации в результате скрещивания орбит 2*s* и 2*p* углерод имеет четыре эквивалентных орбиты:

1*s* 4 орбиты sp^3 

Молекула метана образована перекрытием четырех гибридных орбит (sp^3) углерода с орбитами 1*s* атома водорода.

Четыре связи C–H эквивалентны и ориентированы к вершинам правильного тетраэдра.



Молекула метана.

1.8.2. Химическая термодинамика

1.8.2.1. Определения

Системой является часть пространства, отделенная от внешней среды границей, которая может быть как реальной, так и фиктивной. Система может быть гомогенной или гетерогенной в зависимости от того, содержит ли она одну, либо несколько фаз.

В замкнутой системе возможен обмен с внешней средой теплом и работой; если же система обменивается и массой, то она называется открытой. В изолированной системе отсутствует обмен любой формой энергии с внешней средой. Для описания состояния системы используют две группы переменных состояния:

— экстенсивные переменные, зависящие от количества вещества (массы, объема и т.д.),

— интенсивные переменные, не зависящие от протяженности системы, такие как давление, температура, плотность.

Система находится в состоянии равновесия, если ее свойства не претерпевают резких изменений во времени.

1.8.2.2. Мольные величины

Для системы, состоящей из *p* компонентов, общее число молей (*n*) равно:

$$n = \sum_1^p n_i$$

где n_i есть число молей *i*-го компонента.

Мольная доля x_i определяется соотношением:

$$x_i = \frac{n_i}{n}, \quad \text{причем} \sum_1^p x_i = 1$$

Величина x_i является интенсивной.

В смеси на мольные свойства отдельного компонента влияют другие компоненты. По определению парциальной мольной величиной X_i, соответствующей экстенсивной величине X, является частная производная от X по числу молей n_i *i*-го компонента при постоянных значениях других переменных. Эта величина является интенсивной:

$$\bar{X}_i = \left[\frac{\partial X}{\partial n_i}\right]_{T,P,n_j}, \quad j \neq i$$

при этом:

$$X = \sum n_i \bar{X}_i$$

Пример: для смеси нескольких компонентов, занимающей объем V, имеет место:

$$V = \sum n_i \bar{V}_i$$

причем:

$$V_i = \left[\frac{\partial V}{\partial n_i}\right]_{T,P,n_j}$$

Пусть для чистых веществ их мольные объемы равны V_1^0, V_2^0, ..., V_i^0, тогда при выполнении свойства аддитивности объем смеси будет равен:

$$V_{ideal} = \sum n_i V_i^0$$

В общем случае V отличается от V_{ideal}; так например, для смеси воды с метанолом в пропорции 3 моли воды к одной моли спирта можно наблюдать сокращение объема:

$$\frac{V - V_{ideal}}{V_{ideal}} = 3,4\%$$

1.8.2.3. Термодинамические функции

(См. § 1.7.1. и 1.7.2.).

Соединения	Энтальпия (кДж/моль)	Энтропия (Дж · моль$^{-1}$ · K^{-1})	Мольная удельная теплоемкость $C_p = \alpha + \beta \cdot 10^{-3}T + \gamma \cdot 10^{-6}T^2 + \delta \cdot 10^{5}T^{-2}$ (Дж · моль$^{-1}$ · K^{-1})				Область пригодности по температуре
			α	β	γ	δ	
H_2 (газ)	0	130,63	27,29	3,26	0,50	–	298 - 3 000 K
C	0	5,742	0,109	38,954	– 1,482	–17,391	298 - 863 K
(графит)			24,45	0,435	–31,636	–	863 - 4 073 K
CO (газ)	–110,58	197,811	24,4	4,102	– 0,460	–	298 - 2 500 K
CO_2 (газ)	–393,64	213,737	44,16	9,04	– 8,54	–	298 - 2 500 K
H_2O (газ)	–242,55	188,79	30,01	10,71	0,335	–	298 - 2 500 K
CH_4 (газ)	– 74,84	166,25	12,452	76,72	1,448	–18,01	298 - 2 000 K
CH_3OH (газ)	–238,78	126,74	4,311	128,77	4,537	–44,12	298 - 1 000 K
T_0 = 298,15 K (25°C) – (г) газ.							

Величины термодинамических характеристик некоторых элементов и соединений, представляющих интерес в газовой промышленности (согласно Barin и Knacke).

1.8.2.4. Термодинамические функции простых веществ

(См. § 1.7.2.).

1.8.2.4.1. Химический потенциал совершенного газа

Для одной моли совершенного газа уравнение состояния может быть записано в форме:

$$V = \frac{RT}{P}$$

Если подставить это выражение в уравнение, описывающее изменение химического потенциала μ в зависимости от давления, то можно получить:

$$\mu(T, P) = \mu(T_0, P_0) + RT \ln \frac{P}{P_0}$$

если P_0 = 1 атм или 1013 25 Па, то $\mu(T, P_0)$ обозначается через μ_T^0 и называется стандартным химическим потенциалом.

Если выразить давление в паскалях, то выражение для химического потенциала может быть записано в форме:

$$\mu(T, P) = \mu_T^0 + RT \ln P, \quad [P] = \text{Па}$$

1.8.2.4.2. Химический потенциал реального газа

Введение новой функции (f), называемой фугитивностью, позволяет сохранить для химического потенциала ту же форму, что и в случае совершенного газа:

$$\mu(T, P) = \mu_T^0 + RT \ln \frac{f}{f_0}$$

μ_T^0 – химический потенциал, который соответствовал бы данному газу при заданной температуре и давлении 101 325 Па (1 атм), если бы он был совершенным; в этом случае $f_0 = 1$.

Кроме того для реальных газов вводится коэффициент фугитивности (φ), такой что:

$$\varphi = \frac{f}{P}$$

Чем ближе газ к совершенному, тем ближе φ к единице, то есть:

$$\lim \varphi = \lim_{P \to 0} \frac{f}{P} = 1$$

Для реального газа уравнение состояния можно записать в виде:

$$PV = ZRT$$

где Z является коэффициентом сжимаемости данного газа.

Кроме этого имеет место:

$$RT \ln f = \int_{P_0}^{P} V dP$$

Из этих двух соотношений легко показать, что:

$$\ln \varphi = \ln \frac{f}{P} = \int_0^P (Z - 1) \frac{dP}{P}$$

1.8.2.5. Термодинамические функции газовых смесей

1.8.2.5.1. Смесь совершенных газов

Парциальным давлением P_i i-го компонента в смеси n_1, n_2, ..., n_i молей совершенных газов, занимающих объем V при температуре T, называется

давление, которое имел бы этот газ, если бы находился один в объеме V при той же температуре; таким образом, выполняется:

$$P_i V = n_i RT \quad \text{(см. § 1.7.2.1.4.)}$$

причем:

$$P_i = \frac{n_i}{n} P = x_i P$$

Общее давление смеси равно сумме парциальных давлений (закон Дальтона):

$$P = \sum P_i$$

Химический потенциал i-го компонента задается как:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln \frac{P_i}{P_i^0}$$

если стандартным является состояние совершенного газа в чистом виде, то $P_i^0 = 1$, откуда:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln P_i$$

1.8.2.5.2. Смесь реальных газов

Общее выражение для химического потенциала компонента i в смеси реальных газов имеет следующий вид:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln \frac{f_i}{f_i^0}$$

где f_i играет такую же роль, как P_i для совершенных газов.

Если принять в качестве стандартного состояние совершенного газа при 101 325 Па, когда $f_i^0 = f_i = 1$, то выражение для μ_i примет вид:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln f_i$$

Помимо этого можно определить коэффициент фугитивности (φ_i) для каждого компонента, так что:

$$\varphi_i = \frac{f_i}{P_i}, \quad \text{причем } \lim_{P \to 0} \varphi_i = 1$$

1.8.2.6. Растворы

1.8.2.6.1. Идеальные растворы (закон Рауля)

Химический потенциал компонента i в идеальном растворе задается в виде:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln x_i$$

где μ_i^0 является химическим потенциалом в стандартном состоянии, которое соответствует чистому компоненту ($x_i = 1$).

Для идеального раствора, находящегося в равновесии со своим паром, химический потенциал каждого компонента в обеих фазах одинаков, то есть:

$$(\mu_i)_{\text{жидк}} = (\mu_i)_{\text{пар}}$$

и далее:

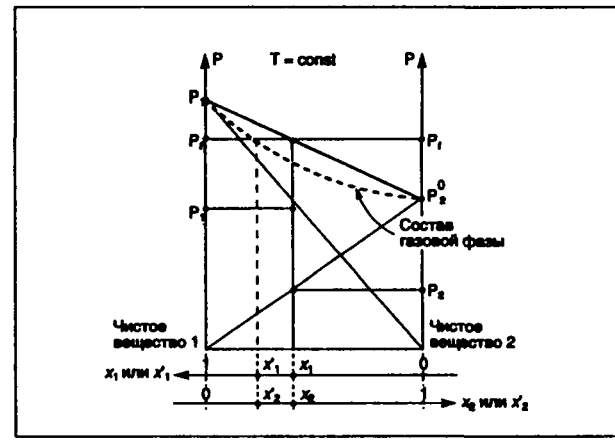
$$\mu_i^0 + RT \ln x_i = \mu_i'^0 + RT \ln \frac{P_i}{P_i^0}$$

Если принять для обеих фаз одно и то же стандартное состояние, например, соответствующее чистому веществу ($x_i = 1$, $P_i = P_i^0$), то несложно вывести закон Рауля:

$$P_i = P_i^0 x_i$$

В идеальной смеси парциальное давление пара (P_i) произвольного компонента пропорционально его мольной доле в жидкой фазе, причем коэффициент пропорциональности равен давлению пара чистого компонента при рассматриваемой температуре.

Рисунок, представленный ниже, демонстрирует линейные изменения парциальных давлений (P_1 и P_2) в зависимости от состава бинарной идеальной смеси.



Идеальная бинарная смесь.

1.8.2.6.2. Разбавленные растворы (закон Генри)

Разбавленным является раствор, в котором содержание одного компонента очень близко к 1 ($x_1 \approx 1$) – этот компонент является растворителем, а содержание других компонентов, являющихся растворенными веществами, очень близко к нулю. В таком растворе давление паров i-го растворенного вещества пропорционально его мольной доле x_i. Коэффициент пропорциональности $(k_H)_i$ (коэффициент Генри) зависит только от температуры и от природы растворителя:

$$P_i = (k_H)_i x_i \quad \text{при} \quad x_i \longrightarrow 0$$

Это есть формулировка закона Генри. Он может применяться и для газа, растворенного в слаболетучей жидкости, тогда его давление в паровой фазе пропорционально его мольной концентрации в растворе.

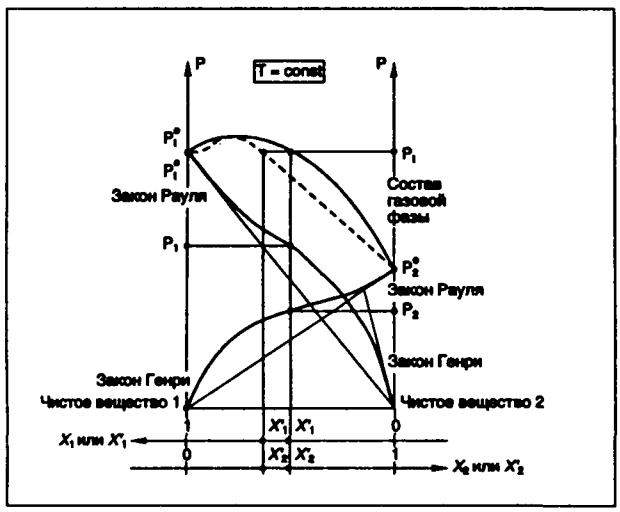
Для реальной бинарной смеси при малых концентрациях растворенного вещества растворитель подчиняется закону Рауля, а растворенное вещество – закону Генри.

Разбавленный раствор близок по свойствам к идеальному раствору, причем их сходство тем больше, чем больше степень разбавления.

1.8.2.6.3. Реальные растворы. Понятие активности

В концентрированных растворах вместо мольных концентраций (x_i) вводят новую величину (a_i), называемую активностью, такую что:

$$\mu_i = \mu_i' + RT \ln a_i$$



Реальная бинарная смесь.

Выбор стандартных условий произволен, каждому из них соответствуют свои значения a_i.

Обычно за стандартное принимается состояние чистого вещества, играющего роль растворителя. В этом случае имеем:

$$a_i = \gamma_i x_i$$

причем:

$$\lim_{x_i \to 1} (\gamma_i) = 1,$$

γ_i – коэффициент активности, отражающий степень отклонения от идеального состояния.

При принятых соглашениях активность любого i-го компонента равна отношению давления его пара (P_i) в растворе к давлению его пара в чистом состоянии (P_i^0)

$$a_i = \frac{P_i}{P_i^0}$$

Для растворенного вещества более удобно в качестве стандартного взять состояние компонента в бесконечно разбавленном растворе. В этом случае имеем:

$$a'_i = \gamma'_i x_i$$

причем

$$\lim_{x_i \to 0} (\gamma'_i) = 1$$

Можно показать при этом, что

$$a'_i = \frac{P_i}{(k_H)_i}$$

$(k_H)_i$ – константа Генри i-компонента, которая может быть оценена по углу наклона кривой:

$$P_i = f(x_i) \text{ при } x_i \longrightarrow 0$$

1.8.2.7. Равновесие

1.8.2.7.1. Условия равновесия и эволюции термодинамической системы

Любое превращение в системе при постоянных температуре и давлении (фазовый переход или химическая реакция) обязательно сопровождается уменьшением термодинамического потенциала. Необходимым условием для того, чтобы произошло самопроизвольное превращение, является следующее:

$$dG_{T,P} < 0$$

Превращения будут происходить тем легче, чем значительнее понижение термодинамического потенциала.

Система находится в равновесии, когда ее термодинамический потенциал минимален, то есть:

$$dG_{T,P} = 0$$

Различают устойчивое или неустойчивое равновесие в зависимости от того, положительным или отрицательным является d^2G.

1.8.2.7.2. Правило фаз Гиббса

Вариантностью (v) или числом степеней свободы произвольной системы называется количество независимых интенсивных величин, фиксированные значения которых определяют состояние системы:

$$v = (N - r) + 2 - \phi$$

$(N - r)$ – число независимых компонентов: равно разности общего числа компонентов N и числа независимых связей r, существующих межу ними (химические реакции или связи между концентрациями);

ϕ – число фаз; газы, однородные жидкие или твердые растворы представляют одну фазу; твердые тела разной природы являются различными фазами.

Инвариантная система ($v = 0$) может существовать только при заданных температуре и давлении. В моновариантной системе ($v = 1$) можно варьировать одним из равновесных параметров, сохраняя при этом состояние равновесия. Если система дивариантна, то при постоянных температуре и давлении состав ее фаз фиксирован.

Пример: реакция дисмутации CO (реакция Будуара):

$$2CO \rightleftharpoons C + CO_2$$

Система состоит из двух фаз (газ и твердое тело), трех компонентов ($N = 3$), связанных одной реакцией ($r = 1$). Правило фаз показывает, что система дивариантна:

$$v = (3 - 1) + 2 - 2 = 2$$

1.8.2.7.3. Равновесие чистых веществ

Чистое вещество в однофазном виде: газообразном, жидком или твердом, представляет собой дивариантную систему ($v = 2$). Для определения ее состояния необходимо зафиксировать давление и температуру.

Если в равновесии находятся две фазы одного вещества, система моновариантна ($v = 1$). Если зафиксировать давление, то температура однозначно определяется. Связь между этими переменными дается уравнением Клапейрона:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V}$$

ΔH – скрытая теплота изменения состояния,

ΔV – разница мольных объемов двух фаз.

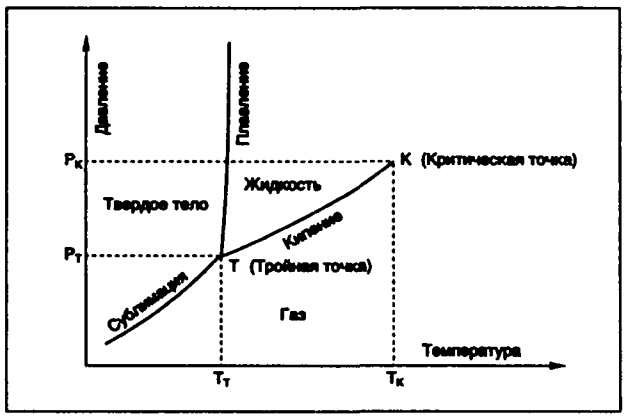
При равновесии жидкость–пар (испарение) мольный объем жидкой фазы (V_l) пренебрежимо мал по сравнению с мольным объемом пара (V_g).

Если считать, что пар является насыщенным совершенным газом, можно получить:

$$\Delta V = V_g - V_l \approx V_g = \frac{RT}{P}$$

В этом случае уравнение Клапейрона можно записать как:

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_v}{RT^2}$$ (уравнение Клаузиуса–Клайперона)

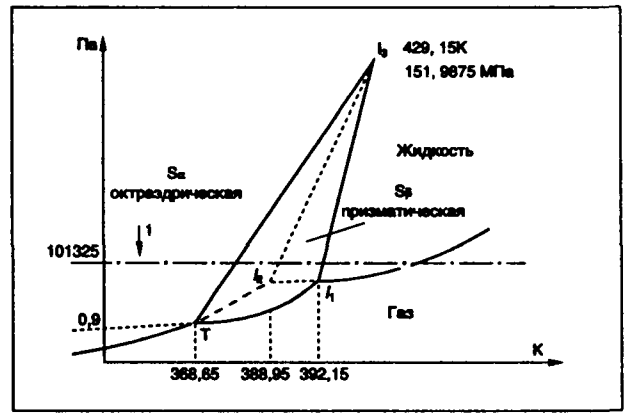


Фазовая диаграмма чистого вещества.

Кривые $P = f(T)$ сублимации (равновесие "твердое тело–пар") и испарения имеют близкий наклон. Кривая, относящаяся к плавлению (равновесие "твердое тело–жидкость"), очень близка к вертикали, так как при очень малых ΔV величина $\frac{dP}{dT}$ становится очень большой.

Система, рассматриваемая как чистое вещество одновременно в трех своих состояниях, является инвариантной ($v = 0$). Она соответствует точке пересечения трех кривых, которая называется тройной точкой. Для метана тройная точка соответствует $T = -182°C$ и $P \approx 11{,}1$ кПа, для воды: $T = -0{,}0075°C$ и $P = 610$ Па.

Если чистое вещество в твердом состоянии может быть представлено несколькими аллотропными модификациями (твердые фазы с различной кристаллической структурой), то фазовая диаграмма имеет несколько тройных точек. Для серы существует две разновидности: Sα (октаэдрическая или ромбическая сера) и Sβ (призматическая или моноклинная сера); диаграмма $P = f(t)$ содержит четыре тройные точки (см. следующий рисунок).



Фазовая диаграмма серы.

1.8.2.7.4. Химическое равновесие

Стехиометрическое уравнение химической реакции для компонентов A_i может быть записано в виде:

$$\sum \nu_i A_i = 0$$

ν_i – стехиометрический коэффициент компонента A_i; он отрицателен для исходных реагентов и положителен для продуктов реакции.

Приращение числа молей (dn_i) различных компонентов подчиняется закону заданных пропорций:

$$dn_i = \nu_i d\xi$$

Переменная ξ характеризует полноту протекания реакции.

Пример: реакция конверсии газа синтеза:

$$CO + 3H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H_2O$$

Имеем:

$$\nu_{CO} = -1\,,\ \nu_{H_2} = -3\,,\ \nu_{CH_4} = \nu_{H_2O} = +1$$

а также:

$$d\xi = \frac{dn_{CO}}{-1} = \frac{dn_{H_2}}{-3} = \frac{dn_{CH_4}}{+1} = \frac{dn_{H_2O}}{+1}$$

1.8.2.7.4.1. Энтальпия и энергия Гиббса химической реакции

Энтальпия реакции равна количеству тепла, отданного или полученного системой при постоянном давлении.

Теплота реакции при одной атмосфере называется стандартной и обозначается как ΔH^0. Она определяется с помощью стандартных мольных энтальпий компонентов реакции (h_T^0):

$$\Delta H_T^0 = \sum \nu_i (h_T^0)_i$$

— Если $\Delta H_T^0 < 0$, то реакция является экзотермической и сопровождается выделением тепла.

— Если $\Delta H_T^0 > 0$, реакция является эндотермической и для ее протекания необходимо подвести энергию.

Замечание:

В таблицах термодинамических констант встречается стандартная энтальпия образования химического соединения (ΔH_f^0) из отдельных элементов.

Принято соглашение, что энтальпия элементов, взятых в наиболее устойчивом состоянии при T_0 = = 298,15 K (25°C), равна нулю. В итоге, энтальпия химического соединения при 298,15 K равна энтальпии его образования при той же температуре.

Изменение энтальпии в зависимости от температуры определяется соотношением Кирхгофа:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{T_0}^0 + \int_{T_0}^{T} \Delta C_p dT$$

причем

$$\Delta C_p = \sum_i \nu_i (C_p)$$

а изменение стандартной энтропии (ΔS_T^0) в зависимости от температуры находится из уравнения:

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{T_0}^0 + \int_{T_0}^{T} \frac{\Delta C_p}{T} dT$$

где:

$$\Delta S_{T_0}^0 = \sum_i \nu_i (s_{T_0}^0)$$

$(s_{T_0}^0)_i$ представляет собой стандартную энтальпию i-го компонента при 298,15 K и одной атмосфере.

Из выражений для ΔH_T^0 и ΔS_T^0 можно определить изменение энергии Гиббса реакции в зависимости от температуры:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0$$

откуда:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{T_0}^0 - T\Delta S_{T_0}^0 + \int_{T_0}^{T} \Delta C_p dT - T\int_{T_0}^{T} \frac{\Delta C_p}{T} dT$$

Замечание:

Если в рассматриваемом интервале температур происходит изменение фазового состояния при температуре перехода T_i, необходимо учитывать соответствующие изменения энтальпии (L_i) и энтропии $(\Delta S_i) = \frac{L_i}{T_i}$.

1.8.2.7.4.2. Закон действующих масс

В условиях термодинамического равновесия для химической реакции, в которой участвуют компоненты A_i, выполняется:

$$\Delta G = \sum \nu_i \mu_i = 0$$

причем:

$$\mu_i = (\mu_T^0)_i + RT \ln a_i$$

$(\mu_T^0)_i$ – химический потенциал компонента A_i в чистом состоянии, a_i – его активность при равновесии.

Учитывая выражения для μ_i, условия равновесия можно записать в следующей форме:

$$\sum \nu_i \mu_i = \sum \nu_i (\mu_T^0)_i + RT \ln \pi_i a_i^{\nu_i} = 0$$

при этом:

π – символ произведения.

Слагаемое $\sum \nu_i (\mu_T^0)_i$ является стандартной энергией Гиббса реакции: ΔG_T^0.

Если ввести константу действующих масс K_T^0:

$$K_T^0 = \pi_i a_i^{\nu_i}$$

можно прийти к фундаментальному соотношению:

$$\ln K_T^0 = -\frac{G_T^0}{RT}$$

Величина K_T^0 является безразмерным числом, которое зависит только от температуры и от стандартных состояний каждого компонента реакции.

1.8.2.7.4.3. Различные выражения закона действующих масс

1.8.2.7.4.3.1. Для реальных газов

Если в качестве стандартного состояния выбрать идеальный газ в чистом виде, то для реального газа активность равна его фугитивности:

$$a_i = f_i$$

откуда:

$$K_f = \pi_i f_i^{\nu_i} \quad (f_i^c = 1)$$

либо:

$$f_i = \varphi_i P_i = \varphi_i x_i P$$

так что:

$$K_f = (\pi_i f_i^{\nu_i'})\,(\pi_i f_i^{\nu_i''})\, P^{\Delta\nu}$$

где:

$$\Delta\nu = \sum_i \nu_i.$$

Рассмотрим константу равновесия K_x, введенную через мольные концентрации:

$$K_x = \pi_i x_i^{\nu_i}$$

и если положить, что:

$$K_\varphi = \pi_i \varphi_i^{\nu_i}$$

то константа равновесия для реальных газов может быть записана как произведение трех величин:

$$K_f = K_\varphi \cdot K_x \cdot P^{\Delta\nu}$$

1.8.2.7.4.3.2. Для совершенных газов

Обычно в качестве стандартного принимается совершенное состояние чистого газа при одной атмосфере (P^0 = 101 325 Па), а константа равновесия K_p вводится через парциальные давления газов (P_i):

$$K_p = \pi_i p_i^{\nu_i} = K_x \cdot P^{\Delta\nu} \qquad \left(\Delta\nu = \sum_i \nu_i\right)$$

1.8.2.7.4.3.3. Для растворов

В § 1.8.2.6.3. мы видели, что активность компонента в реальном растворе пропорциональна его мольной доле (x_i), как бы ни было выбрано стандартное состояние:

$$a_i = \gamma_i x_i$$

Полагая, что $K_{\gamma_i} = \pi\gamma_i^{\nu_i}$, можно записать константу K_a для химических реакций, протекающих в жидкой среде, в следующем виде:

$$K_a = K_\gamma \cdot K_x$$

Если речь идет об идеальном растворе ($\gamma_i = 1$), константа K_a совпадает с константой K_x, определенной через мольные доли:

$$K_a = K_x = \pi_i x_i^{\nu_i} \quad (K_\gamma = 1)$$

Для разбавленных растворов обычно заменяют мольные доли на молярные концентрации c_i и используют константу равновесия K_c:

$$K_c = \pi C_i^p$$

где:

$$c_i = x_i \frac{1000\rho_0}{M_0}$$

где M_0 – молярная масса растворителя, а ρ_0 – его плотность в г/см^3.

1.8.2.7.4.4. Зависимость константы равновесия от температуры и давления

Существует возможность качественного предсказания влияния различных факторов (температуры, давления или состава) на направление смещения равновесия, исходя из принципа ослабления Ле-Шателье, который гласит, что "любое изменение одного из параметров равновесия смещает равновесие в таком направлении, в котором эффект изменения данного параметра ослабляется".

1.8.2.7.4.4.1. Влияние температуры

Изменение константы равновесия реакции в зависимости от температуры подчиняется закону Вант-Гоффа:

$$\frac{d \ln K_T^0}{dT} = \frac{\Delta H_T^0}{RT^2}$$

(K_T^0 не зависит от давления).

Этот закон показывает, что для экзотермической реакции ($\Delta K_T^0 < 0$) возрастание температуры смещает равновесие влево (log K^0 убывает), то есть в направлении эндотермическом, так чтобы ослабить изменения, вызванные извне. Таким образом, повышение температуры вызывает эндотермические реакции, а понижение температуры – реакции экзотермические в соответствии с принципом Ле-Шателье.

1.8.2.7.4.4.2. Влияние давления

Влияние давления практически никогда не ощущается, за исключением систем, содержащих газовую фазу. Его воздействие на смещение равновесия может быть определено исходя из закона действующих масс для газообразной системы, выраженного через мольные доли:

$$K_x = \pi_i x_i^{\nu_i} = \frac{K_f}{K_\varphi} P^{-\Delta\nu} \quad \text{при} \quad \Delta\nu = \sum \nu_i$$

При малых давлениях газы близки к совершенным ($K_\varphi \longrightarrow 1$) и влияние давления передается только через множитель $P^{-\Delta\nu}$ (K_f зависит лишь от температуры). Следует различать 3 случая:

- если $\Delta\nu < 0$, возрастание давления смещает равновесие в направлении образования продуктов реакции;
- если $\Delta\nu = 0$, давление не оказывает никакого воздействия на реакцию, которая протекает без изменения объема;
- если $\Delta\nu > 0$, то возрастание давления приводит к затуханию реакции.

В соответствии с принципом Ле-Шателье возрастание давления приводит к смещению равновесия в направлении сокращения числа молей газа.

При высоких давлениях K_x зависит от изменений множителя $P^{-\Delta\nu}$, а также от K_φ, так как отклонения от идеального состояния становятся значительными. Эти два эффекта могут протекать одинаково успешно как в одном направлении, так и в противоположных направлениях.

Пример: влияние давления на степень диссоциации метана при 973 K (700°C):

$$CH_4 \rightleftharpoons C + 2H_2$$

$$K^0 = 10{,}27 \text{ (при 973 K)}$$

Пусть в исходном состоянии имеется один моль метана и пусть α – степень диссоциации CH_4 (доля диссоциированных молей) в равновесии, тогда имеем:

$$n_{CH_4} = 1 - \alpha$$

$$x_{CH_4} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}$$

$$n_{H_2} = 2\alpha$$

$$x_{H_2} = \frac{2\alpha}{1+\alpha}$$

$n = n_{CH_4} + n_{H_2} = 1 + \alpha$ (сумма всех молей газовой фазы).

Применяя закон действующих масс, запишем:

$$K_x = \frac{K^0}{k_\varphi P} = \frac{(x_{H_2})^2}{x_{CH_4}} = \frac{4\alpha^2}{1-\alpha^2}$$

причем:

$$k_\varphi = (\varphi_{H_2})^2 / \varphi_{CH_4}$$

(φ_i – коэффициент фугитивности).

Величины K_φ, K_x, α и n, вычисленные для давлений от 1 до 50 атм, приводятся в следующей таблице:

Давление (атм) (*)	K_φ	K_φ	α	n
1	1	7,6	0,809	1,809
50	1 (**)	0,156 (**)	0,191 (**)	1,191 (**)
	1,216	0,125	0,174	0,174

(*) 1атм = 101 325 Па.
(**) Расчеты для совершенных газов.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

$$\log K^0 = \frac{-\Delta G^0}{2{,}303\,RT} = \frac{a}{T} + b \log T + cT + dT^2 + eT^3$$

Реакции	a	b	$c \times 10^3$	$d \times 10^6$	$e \times 10^{10}$
(1)	2 122,83	−1,0046	1,410	−0,413	0,5417
(2)	−6 587,4	+2,5259	−0,5733	−0,0415	0,2566
(3)	10 223,4	−3,6035	−1,8733	1,303	−2,5301
(4)	8 710,2	−3,5322	1,987	−0,7636	0,2851
(5)	−3 636	+1,0769	2,451	−1,2615	2,2736

Реакция обращения CO:
$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ $\Delta H^0 = -40{,}51$ кДж/моль (1)

Реакция газа в воде:
$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$ $\Delta H^0 = 131{,}97$ кДж/моль (2)

Реакция метанизации:
$CO + 3H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H_2O$ $\Delta H^0 = -206{,}8$ кДж/моль (3)

Реакция Будуара:
$2CO \rightleftharpoons C + CO_2$ $\Delta H^0 = -172{,}48$ кДж/моль (4)

Реакция крекинга метана:
$CH_4 \rightleftharpoons C + 2H_2$ $\Delta H^0 = 74{,}84$ кДж/моль (5)

Расчет констант равновесия основных реакций, встречающихся в газовой промышленности, по термодинамическим данным компонентов.

В согласии с принципом Ле-Шателье общее число молей уменьшается, когда давление растет ($\Delta\nu = 1$). Заметим кроме того, что, если учитывать отклонение от идеальности при высоких давлениях, то степень диссоциации метана существенно иная, нежели в предположении совершенного газа.

1.8.2.7.4.4.3. Влияние инертного газа

Добавление инертного компонента смещает равновесие в направлении увеличения числа молей. Следовательно, разбавление инертным газом благоприятно сказывается на тех реакциях, которые сопровождаются снижением числа молей газа.

1.8.2.7.4.5. Расчет констант равновесия

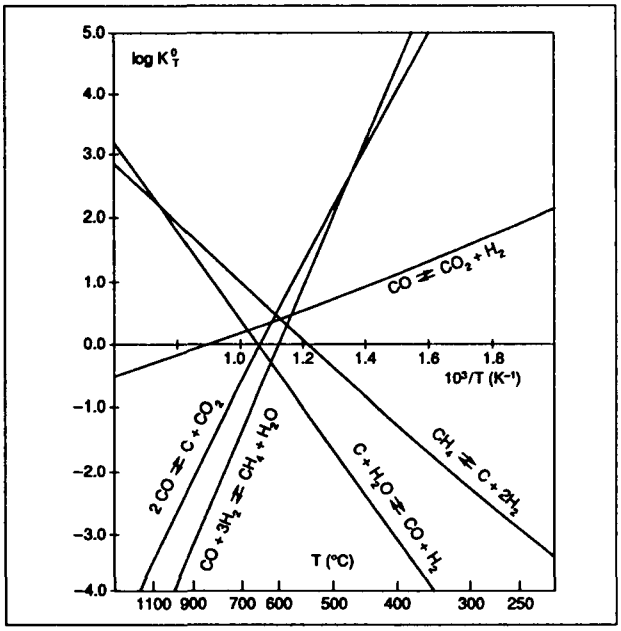
1.8.2.7.4.5.1. На основе энергии Гиббса химической реакции (ΔG_T^0)

$$\log K_T^0 = \frac{-\Delta G_T^0}{2{,}303RT} = \frac{-\Delta H_T^0}{2{,}303RT} + \frac{-\Delta S_T^0}{2{,}303R}$$

Далее в таблице и на рисунке собраны данные по основным реакциям, встречающиеся в газовой промышленности.

1.8.2.7.4.5.2. Приближенный расчет по термодинамическим данным при 298,15 K (25°C)

Если отклонение заданной температуры от стандартной (25°C) мало (<500 K), то слагаемые $\int_{T_0}^{T} \Delta C_p dT$ и $T\int_{T_0}^{T} \frac{\Delta C_p}{T} dT$ имеют один порядок, но одинаковый знак и взаимно уничтожаются. Энергия Гиббса определяется с хорошей точностью соотношением:



Изменение константы равновесия в зависимости от температуры для основных реакций, встречающихся в газовой промышленности (по данным предыдущей таблицы).

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_{T_0}^0 \quad (T_0 = 298{,}15\ K)$$

откуда следует приближенная формула Улиха:

$$\ln K_T^0 = \frac{-\Delta H_{T_0}^0}{RT} + \frac{\Delta S_{T_0}^0}{R}$$

Пример: синтез метанола из CO и H:

$$CO + 2H_2 \rightleftharpoons CH_3OH$$

$$\Delta H^0_{298,15} = -90.86 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta S^0_{298,15} = -222.33 \text{ кДж/моль}$$

Строгое соотношение для константы равновесия K^0_T в зависимости от температуры имеет вид:

$$\log K^0_T = \frac{3\,990,77}{T} + 2,411\,1 \times 10^{-3}T -$$

$$- 2,155\,2 \times 10^{-7}T^2 - 7,555\,5 \log T + 8,999\,3$$

При использовании аппроксимации Улиха:

$$\log K'^0_T = \frac{4\,744}{T} - 11,61$$

при T = 550 K

$\log K^0 = -3,1887$, то есть $K^0 = 6,48 \cdot 10^{-4}$

$\log K'^0 = -2,9839$, то есть $K'^0 = 1,04 \cdot 10^{-4}$

1.8.2.7.4.5.3. Расчеты на основе значений констант и стандартной энергии Гиббса при 298,15 K

Если в рассматриваемом интервале температур выполняется $\Delta H^0_T \neq \Delta H^0_{T_0}$, соотношение Вант-Гоффа приводит к:

$$\log K^0_T = \log K^0_{T_0} + \frac{\Delta H^0_{T_0}}{2,303R}\left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right]$$

Пример: реакция Будуара: $2CO \rightleftharpoons CO_2 + C$

— при T = 298,15 K:

$$\Delta H^0_{T_0} = -172,48 \text{ кДж/моль}$$

и

$$K^0_{T_0} = 7,1 \times 10^{20}$$

то есть:

$$\log K^0_{T_0} = 20,85$$

— при 1000 K:

$$\log K^0_{1\,000} = 20,85 - \frac{172,480}{2,303 \times 8,314\,4} \times$$

$$\frac{1}{98} - \frac{1}{1\,000}\Big] = -0,33$$

то есть:

$$K^0_{1\,000} \approx 0,47$$

Истинная величина, вытекающая из данных последней таблицы, равна 0,54

1.8.2.7.4.6. Совместное равновесие

Для определения равновесного состава сложной системы, в которой протекает множество химических реакций, наиболее часто используются два основных метода:

— *"стехиометрический" метод*, основанный на решении системы алгебраических уравнений, описывающей всю совокупность независимых химических реакций и материальный баланс химических элементов в системе. Число рассматриваемых уравнений в общем случае равно числу веществ, находящихся в равновесии, плюс единица;

— метод, основанный на *минимизации энергии* Гиббса системы. Этот метод имеет следующие особенности:

- не требуются никакие гипотезы относительно природы химических реакций, достаточно знать лишь природу компонентов, способных образоваться в условиях равновесия, и соответствующие термодинамические условия;
- число уравнений системы, подлежащей решению, относительно мало и равно числу химических элементов;
- введение нового элемента апостериори не отражается на принципе расчетов.

Примеры:

— Расчет равновесного состава тройной системы C.H.O. (применение алгебраического метода).

В области температур и давлений, представляющих интерес в газовой промышленности, в равновесии присутствуют шесть основных компонентов: C, CO_2, CO, CH_4, H_2O, и H_2. Их связывают три независимые реакции. Произвольным образом выбраны следующие реакции:

$$\begin{cases} CO + 3H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H_2O & \text{метанизация } CO/H_2 \\ CO + H_2O \rightleftharpoons CH_2 + H_2 & \text{конверсия CO} \\ 2CO \rightleftharpoons C + CO_2 & \text{реакция Будуара} \end{cases}$$

Система содержит две фазы (газ + твердое тело), по правилу фаз имеет место:

$$v = (6 - 3) + 2 - 2 = 3$$

Это тривариантная система, следовательно, для определения состояния достаточно зафиксировать три параметра.

Можно выбрать, например, температуру, давление и отношение O/H, тогда решение алгебраической системы позволяет определить изменение равновесного состава газовой фазы в зависимости от этих трех параметров (см. следующий рисунок).

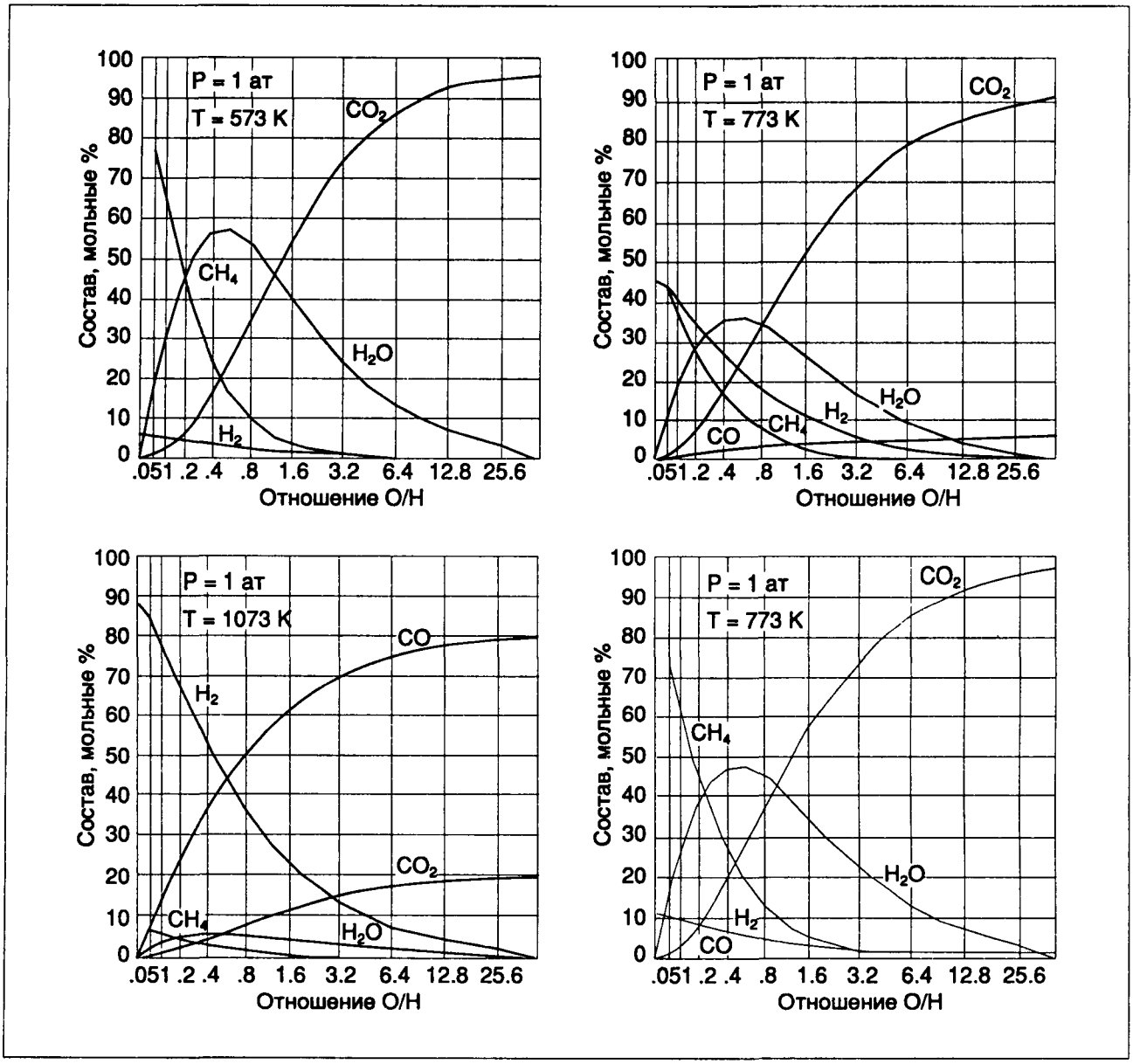
— Расчет равновесного состава эквимолекулярной смеси вода–метанол (метод минимизации энергии Гиббса системы).

На следующем далее рисунке представлены зависимости состава сухих газов при равновесии в зависимости от температуры для различных давлений в интервале от 1 до 70 бар.

При заданном давлении для образования метана из метанола благоприятными оказываются низкие температуры и высокие давления, в соответствии с принципом Ле Шателье, примененным к следующей общей реакции метанизации метанола:

$$4CH_3OH \rightleftharpoons 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$$

$$\Delta H^0 = -74.4 \text{ кДж/моль}$$



Равновесный состав тройной системы C–H–O в зависимости от отношения H/O для различных температур при давлении, равном 1ат (10135 Па)

1.8.2.7.4.7. Тройная диаграмма C–H–O (определение областей образования простого углерода в тройной системе C–H–O)

В установках подготовки газа, работающих на базе системы C–H–O, необходимо избегать опасности образования чистого углерода из реакций (2), (4) или (5) таблицы разд. 1 .8.2.7.4.5.1. Удобным способом оперативного определения требуемых условий, позволяющим предупредить эту опасность, является использование тройных диаграмм C–H–O.

Подобные диаграммы (см. следующий рисунок) представляют собой равносторонний треугольник, вершины которого соответствуют углероду, водороду и кислороду в чистом виде. Любая линия, параллельная стороне, противолежащей вершине углерода, представляет собой тройную смесь C–H–O с фиксированной концентрацией углерода. По мере удаления от вершины C смеси становятся все менее богатыми углеродом. То же самое имеет место для прямых, параллельных сторонам, противолежащим другим вершинам H и O. Стороны треугольника соответствуют бинарным смесям, образованным элементами прилегающих вершин. На диаграмме нанесены особые точно соответствующие основным компонентам: CH_4, CO, CO_2, и H_2O.

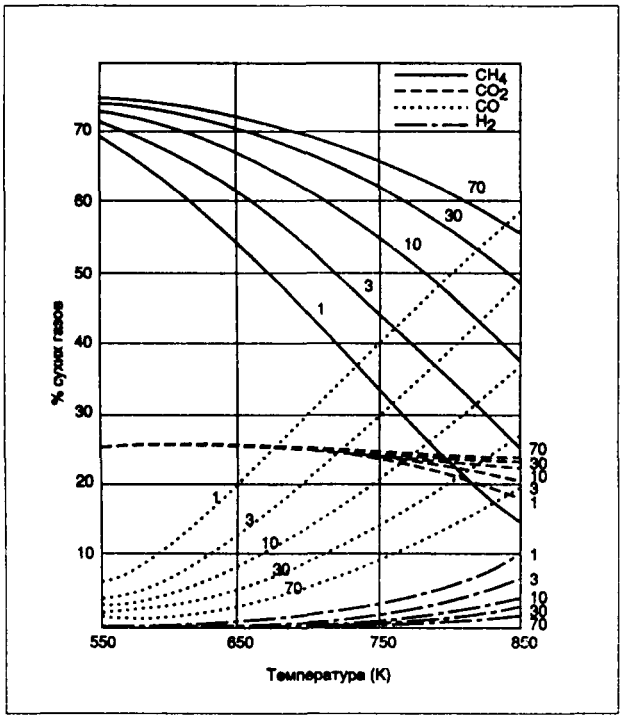
Каждой смеси горючего газа соответствует элементарный состав C–H–O, представляемый единичной точкой на диаграмме.

На этой диаграмме можно видеть три характерных области:

— смеси, находящиеся в области, ограниченной точками C, CO и CH_4, нестабильны и в них возникают реакции, в ходе которых высвобождается углерод;

— зона, ограниченная точками H_2O, CO_2, и O_2, соответствует смесям, насыщенным кислородом;

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



Изменение равновесного состава сухого газа в зависимости от температуры и давления (эквимолекулярная смесь вода–метанол; шифр кривых – давление от 1 до 70 бар)

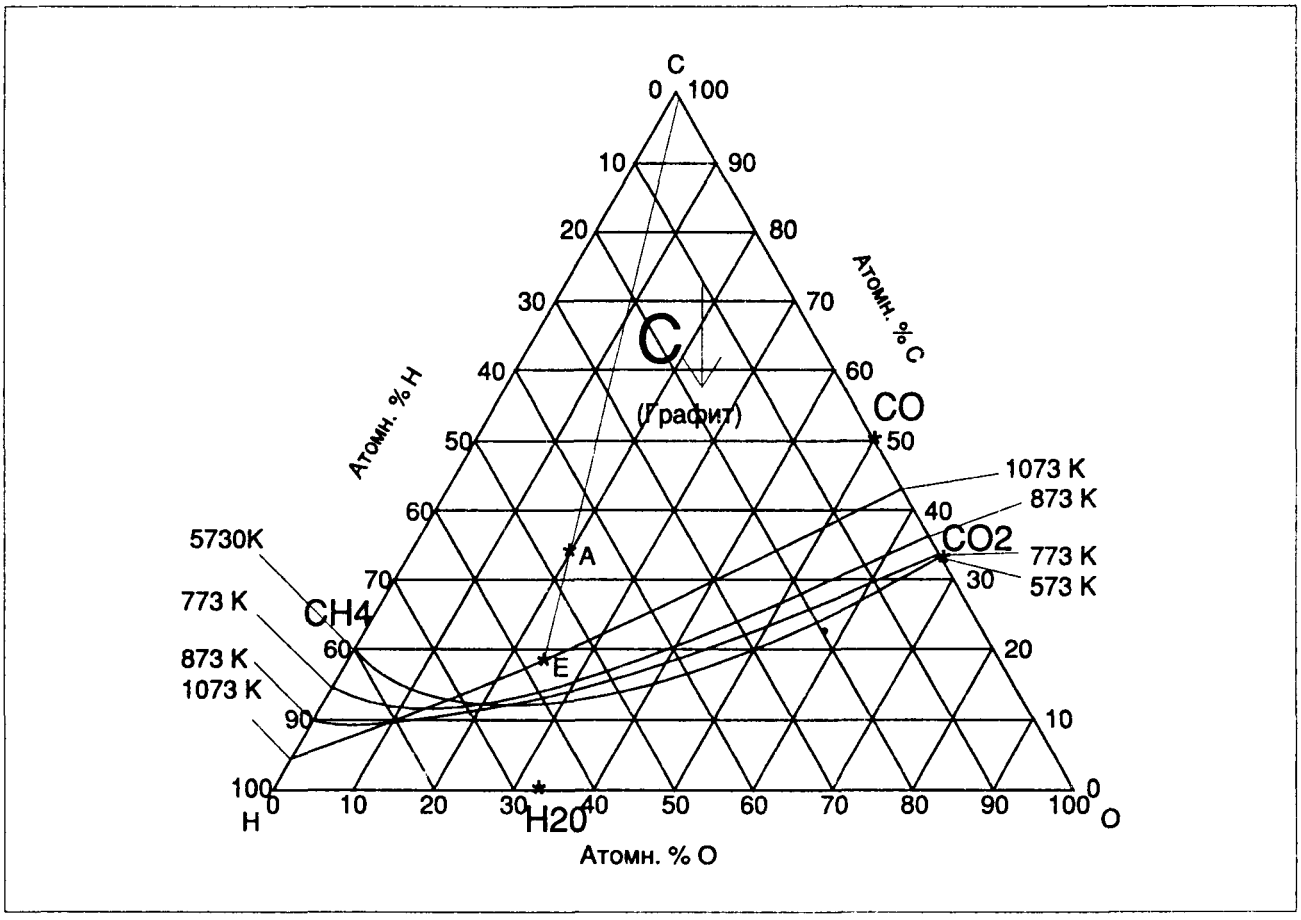
— в центральной зоне находится множество горючих смесей, термодинамическая устойчивость которых зависит от давления и температуры, а также от природы высвобождаемого углерода.

Мы видели в предыдущем примере, что при заданных давлении и температуре и отношении O/H состав смеси C–H–O, находящейся в термодинамическом равновесии со свободным углеродом, строго фиксирован. Варьируя отношение O/H, можно получить кривую, разделяющую диаграмму на две области. Смеси, по составу C–H–O находящиеся выше этой граничной кривой (точка A на диаграмме), неустойчивы и эволюционируют, высвобождая углерод, пока не достигнут точки E, соответствующей пересечению граничной кривой с прямой AC. Смеси, находящиеся под кривой, устойчивы.

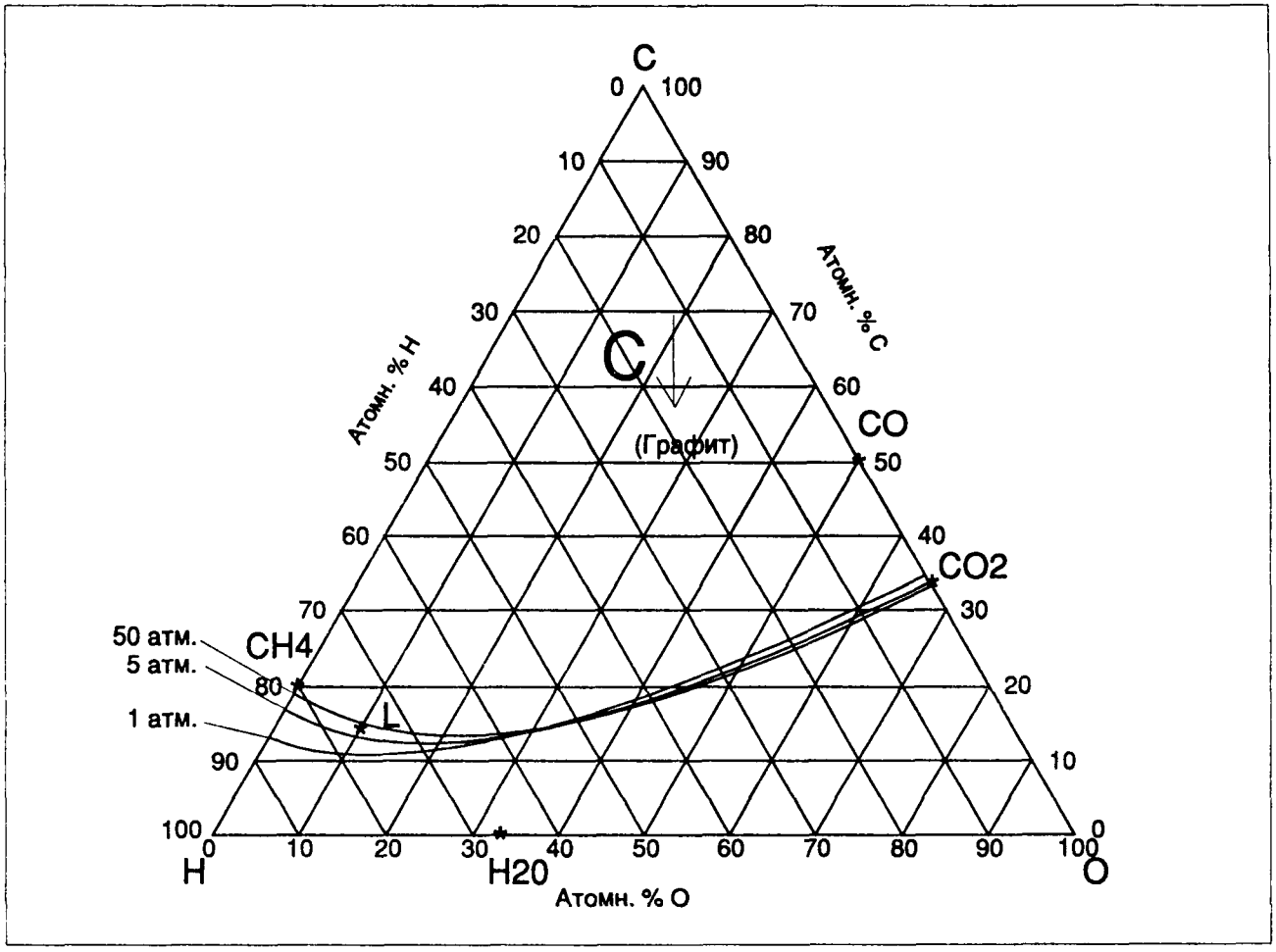
На двух тройных диаграммах представлены граничные кривые, соответствующие различным условиям по температуре и давлению, вычисленные в предположении, что газ совершенный, а свободный углерод имеет форму графита.

Приложение: Влияние давления на условия образования свободного углерода из газа синтеза типа Луржи при 800 K:

На второй диаграмме представлена характерная точка газа Луржи, состав которой имеется в



Тройная диаграмма C–H–O при атмосферном давлении (1 ат = 101325 Па)



Тройная диаграмма C–H–O при T = 800 K (α – точка характерная для газа синтеза типа Луржи)

Соединение	Начальный состав, мол. %	Равновесный состав, мол. %			
		Давление, атм *			
		1 (**)	5 (**)	30	50
H_2	63,0	44,40	24,61	11,26	8,87
CO	17,0	2,12	0,95	0,38	0,30
CO_2	4,0	4,13	4,18	4,25	4,27
CH_4	16,0	27,91	43,00	53,90	55,76
H_2O	0	21,44	27,26	30,21	30,80
Состав C–H–O смеси:					
C	0,147	0,110	0,134	0,148	0,150
H	0,754	0,787	0,765	0,753	0,751
O	0,099	0,103	0,101	0,099	0,099

* 1 атм = 101 325 Па.
** Образование свободного углерода при равновесии.

Влияние давления на равновесный состав газа синтеза типа Луржи при t = 800 K

следующей таблице. Эта точка находится над граничными кривыми, соответствующими температуре 800 K и давлениям от 1 до 5 бар. Как видно, в этих условиях существует возможность образования свободного углерода, на что указывают равновесные составы C–H–O, рассчитанные для давлений, заключенных между 1 и 50 бар. Практически, чтобы избежать образования свободного углерода, надо достичь давления в 30 бар. Ко всему прочему, увеличение давления в условиях равновесия способствует образованию метана.

1.8.2.8. ЭЛЕКТРОЛИТЫ

1.8.2.8.1. Определение

Электролиты диссоциируются на ионы:

— *полностью* (сильные электролиты; примеры: водные растворы NaOH, NaCl; расплавы карбонатов или хлоридов щелочных металлов);

— *частично* (слабые электролиты; примеры: концентрированные водные растворы уксусной кислоты; чистая вода).

Степень ионизации определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{\text{число диссоциированных молей}}{\text{число введенных молей}}:$$

— для сильного электролита: $\alpha = 1$;
— для слабого электролита: $\alpha < 1$.

Закон разбавления Оствальда: при сильном разбавлении слабые электролиты являются диссоциированными полностью ($\alpha \longrightarrow 1$).

1.8.2.8.2. Активность

1.8.2.8.2.1. Определение

Вместо мольных долей используют концентрации (моль/л).

Электролит может рассматриваться:

— либо *глобально* – как обычное растворенное вещество в смеси с растворителем (например, случай водных растворов). Стандартным является описание типа закона Генри:

$$\mu_2 = \mu_2^0 + RT \log a_2 \qquad a_2 = C_2 \quad \text{если} \quad C_2 \longrightarrow 0$$

— либо с учетом ионов, образующихся в результате диссоциации:

$M_\alpha x_\beta \rightleftharpoons \alpha M^{p+} + \beta x^{n-} \qquad \alpha p = \beta n$ (нейтральность)

Примеры:

$CaCl_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2Cl^- \quad \alpha = 1 \quad p = 2 \quad \beta = 2 \quad n = 1$

$Na_2SO_4 \rightleftharpoons 2Na^+ + SO_4^{2-} \quad \alpha = 2 \quad p = 1 \quad \beta = 1 \quad n = 2$

Для ионов стандартным является также состояние, удовлетворяющее закону типа Генри:

$$\mu_+ = \mu_+^0 + RT \log (a_+)^\alpha \quad \gamma_+ C_+ = a_+ \longrightarrow C_+, \text{ если } C_+ \longrightarrow 0$$

$$\mu_- = \mu_-^0 + RT \log (a_-)^\beta \quad \gamma_- C_- = a_- \longrightarrow C_-, \text{ если } C_- \longrightarrow 0$$

Принимают:

$\alpha\mu_-^0 + \beta\mu_-^0 = \mu_2^0$ с тем, чтобы: $a_2 = (a_+)^\alpha (a_-)^\beta$

1.8.2.8.2.2. Расчет средней активности

1.8.2.8.2.2.1. Определения

Средняя активность:

$$a_\pm = \sqrt[\alpha+\beta]{(a_+)^\alpha (a_-)^\beta} = \sqrt[\alpha+\beta]{a_2}$$

Средний коэффициент активности:

$$\gamma_\pm = \sqrt[\alpha+\beta]{(\gamma_+)^\alpha (\gamma_-)^\beta}$$

Средняя мольная доля ионов:

$$C_\pm = \sqrt[\alpha+\beta]{(C_+)^\alpha (C_-)^\beta}$$

Пример:

SO_4Na_2 в водном растворе диссоциирует полностью:

$$\alpha = 1$$
$$\beta = 2$$
$$C_\pm = \sqrt[3]{\frac{1}{2}} = 0,795$$
$$a_\pm = \gamma_\pm C_\pm$$

1.8.2.8.2.2.2. Расчет коэффициентов γ

Упрощенный закон Дебаля-Хюкеля (Debye-Hückel): при малых концентрациях (полностью диссоциированный электролит):

$$\log_{10} \gamma_+ = - Bp^2\sqrt{\mu}$$
$$\log_{10} \gamma_- = - Bn^2\sqrt{\mu}$$
$$\log_{10} \gamma_\pm = - Bnp\sqrt{\mu}$$

B = 0.504 в воде при 20°C,
p = величина заряда ионов +,
n = величина заряда ионов –,

$$\mu = \frac{1}{2}\sum C_i Z_i^2 = \text{ионная сила раствора},$$

C_i - число ионов, г/л;
Z_i - величина заряда (p или n).

Примеры:

— Активность HCl, $c = 0.01$ моль/л

$$p = 1 \quad \alpha = 1 \quad n = 1 \quad \beta = 1$$
$$\mu = \frac{1}{2}[0,01 \times (1)^2 + 0,01 \times (1)^2] = 0,01$$
$$\log_{10} \gamma_+ = \log_{10} \gamma_- = - 0,504\sqrt{0,01} = - 0,050\,4$$
$$\gamma_+ = \gamma_- = 0.89$$
$$a_H = a_{Cl} = 0.0089 \quad a = -0.0089$$

— Активность $NiCl_2$, $c = 0.01$ моль/л

$$p = 2 \quad \alpha = 1 \quad n = 1 \quad \beta = 2$$
$$\mu = \frac{1}{2}[0,01 \times (1)^2 + 0,02 \times (1)^2] = 0,03$$
$$\log_{10} \gamma_+ = - 0,504 \times (2)^2 \times \sqrt{0,03} = - 0,34$$
$$\gamma_{Ni^+} = 0,43$$
$$\log_{10} \gamma_- = - 0,504 \times (1)^2 \times \sqrt{0,03} = - 0,085$$
$$\gamma_{Cl^-} = 0,81$$
$$\log_{10} \gamma_\pm = - 0,504 \times 1 \times 2 \times \sqrt{0,03} = - 0,17$$
$$\gamma_\pm = 0,67$$
$$C_- = 0,02 \quad C_+ = 0,01$$
$$C_\pm = \sqrt[3]{(0,02)^2 \times 0,01} = 0,015\,8$$
$$a_\pm = \gamma_\pm C_\pm = 0.67 \times 0.015\,8 = 0.010\,6$$

— Активность HCl в растворе 0.01 моль/л HCl и 0.01 моль/л $NiCl_2$

$$C_{Ni^+} = 0,01 \quad C_{Cl} = 0,03 \quad C_H = 0,01$$
$$\mu = \frac{1}{2}[0,01 \times (2)^2 + 0,03 \times (1)^2 + 0,01 \times (1)^2] = 0,03$$
$$\log_{10} \gamma_{Cl} = - 0,504 \times (1)^2 \times \sqrt{0,04} = - 0,1$$
$$\gamma_{Cl} = 0,80$$
$$\log_{10} \gamma_H = - 0,504 \times (1)^2 \times \sqrt{0,04} = - 0,1$$
$$\gamma_H = 0,80$$
$$C_{\pm HCl} = \sqrt{0,01 \times 0,03} = 0,017$$
$$a_{\pm HCl} = 0,017 \times 0,80 = 0,013\,6$$

θ°C	0	10	20	25	30	50	80	100
$K_e \cdot 10^{14}$	0.115	0.293	0.685	1.008	1.471	5.476	34.1	58.2
pK_{H_2O}	14.939	14.533	14.167	13.997	13.882	13.262	12.467	12.235

1.8.2.8.3. Ионное произведение воды, pH

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$$

$$a_{H^+} \cdot a_{OH^-} = K_e \quad \text{и} \quad pK_{H_2O} = \text{CoLog}_{10}K_e$$

По определению: $pH = \text{Colog}_{10}a_H$ (Символ "Colog" означает "контрлогарифм", то есть логарифм с обратным знаком (прим. перев.)) При малых значениях pH среда является *кислой*.

1.8.2.8.4. Кислотность, щелочность

1.8.2.8.4.1. Классическая теория

Кислоты характеризуются способностью высвобождать протоны H^+

$$AH \rightleftharpoons A^- + H^+$$

Основания высвобождают ионы OH^-:

$$NH_4OH \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$$

Для *сильной* кислоты AH при концентрации *c* моль/л:

$$pH = -\log_{10} c \quad (\text{если } \gamma_{H^+} \simeq 1)$$

Для *сильного* основания BOH при концентрации *c* моль/л:

$$pH = 14 + \log_{10} c \quad (\text{если } \gamma_{OH^-} \simeq 1)$$

В обоих случаях увеличение концентрации в 10 раз изменяет pH на единицу.

Для слабой кислоты или слабого основания:

$$AH \rightleftharpoons A^- + H^+$$

$$\frac{a_H a_A}{a_{AH}} = K_a \quad pH \simeq -\frac{\log_{10}K_a + \log_{10}c}{2}$$

$$pK_a = -\log_{10}K_a \quad pH = \frac{1}{2}pK_a - \frac{1}{2}\log_{10}c$$

$$BOH \rightleftharpoons B^+ - OH^-$$

$$\frac{a_{OH} a_B}{a_{BOH}} = K_b \quad pH \simeq 14 + \frac{\log_{10}K_b + \log_{10}c}{2}$$

$$pK_b = -\log_{10}K_b \quad pH = 14 - \frac{1}{2}pK_b + \frac{1}{2}\log_{10}c$$

Увеличение концентрации в 10 раз изменяет *p*H на 0.5.

1.8.2.8.4.2. Теория Бронстеда

Кислота является веществом, способным высвобождать протоны H^+:

$$AH \rightleftharpoons A^- + H^+$$

$$H_2O + NH_4^+ \rightleftharpoons NH_4OH + H^+$$

Основанием является вещество, способное захватывать протоны:

$$NH_4OH + H^+ \rightleftharpoons NH_4^+ + H_2O$$

Более общая форма:

$$\underset{1}{\text{кислота}} + \underset{2}{\text{основание}} \rightleftharpoons \underset{2}{\text{кислота}} + \underset{1}{\text{основание}}$$

$$\underset{\text{кислота}}{A} + \underset{\text{основание}}{H_2O} \rightleftharpoons \underset{\text{основание}}{B} + \underset{\text{кислота}}{H^+}$$

$$\underset{\text{основание}}{B} + \underset{\text{кислота}}{H_2O} \rightleftharpoons \underset{\text{кислота}}{A} + \underset{\text{основание}}{OH^-}$$

1.8.2.8.4.3. Теория Льюиса

Кислота действует как *акцептор* электронов, а основание – как *донор* электронов.

1.8.2.8.5. Буферные растворы. Амфотерные электролиты

Водный раствор называется буферным, если его *p*H слабо меняется при добавлении кислоты или основания. Его можно получить как смесь слабой кислоты (AH) и ее соли (A^-X^+). В этом случае pH выражается как:

$$pH = pK_A + \log_{10}\frac{aA^-}{a_{AH}}$$

$pH = pK_A$ при $a_{AH} = aA^-$.

Пример: эквимолекулярная смесь уксусной кислоты (CO_3COOH) и ацетата натрия (CH_3COONa).

Поликислоты: поликислоты способны высвобождать несколько протонов. Например, для H_2S возможны следующие равновесные последовательные реакции:

(1) $H_2S \rightleftharpoons HS + H^+ \quad pKa_2 = 7.0$

(2) $HS_ \rightleftharpoons S^{2-} + H^+ \quad pKa_1 = 12.9$

HS^- называется амфолитом, так как он может играть роль и основания (равновесие 1), и кислоты (равновесие 2). Для раствора амфолита его pH не зависит от концентрации:

$$pH = \frac{1}{2}(pKa_1 + pKa_2)$$

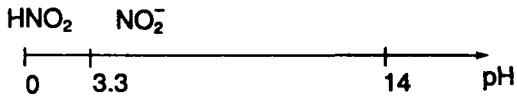
Для раствора HS имеет место:

$$pH = \frac{1}{2}(12,9 + 7,0) = 9,95$$

1.8.2.8.6. Области преобладания кислотно-щелочных свойств в зависимости от *p*H

Примеры:

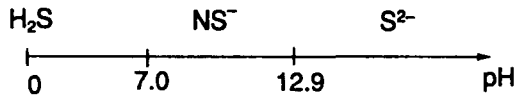
— Азотные кислоты: HNO_2/NO_2^- (*p*Ka = 3,3)



для *p*H = *p*Ka = 3,3 имеет место

$$C_{HNO_2} \approx C_{NO_2^-}$$

— Поликислоты (H_2S):



1.8.2.8.7. Окисление–восстановление

Окисление – это процесс потери электронов.

Восстановление – это процесс приобретения электронов.

Примеры:

Ni (металл) → NiO эквивалентно: $Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$

В процессе электролиза: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ (газ)

В общем случае:

Восст. $\rightleftharpoons$ Окисл. + ze^- и M (металл) $\rightleftharpoons M^{z+} + ze^-$.

1.8.2.8.8. Закон Нернста

Электрод, находящийся в контакте с электролитом (проводник ионов), в котором протекает электрохимическая реакция, имеет потенциал E по отношению к электролиту:

$$E = E^0 + \frac{RT}{zF} \lg \frac{a_{окисл}}{a_{восст}}$$

где E^0 является стандартным (или нормальным) потенциалом рассматриваемой электрохимической системы:

Окисл. + ze^- $\rightleftharpoons$ Восст.

z – число электронов, участвующих в обмене;

F – постоянная Фарадея, равная 96 487 К.

Согласно принятым соглашениям стандартный потенциал нормального водородного электрода (ENH) равен нулю при любой температуре в водном растворе, насыщенном водородом под давлением 101 325 Па (1 ат), с pH =0).

Примеры:

— Водородный электрод (P_{H_2} = 101 325 Па или 1 атм)

$$\frac{1}{2}H_{2(восст)} = H^+_{(окисл)} + e^-$$

$$E(B) = E^0 + \frac{RT}{F} \lg a_{H^+} = -kpH \quad (E^0 = 0)$$

0°C	0	10	15	20	25	30
k	0.05417	0.05615	0.05714	0.05814	0.05913	0.06012

— Окисление воды в кислороде:

$2H_2O \rightleftharpoons O_2 + 4H^+ + 4e^-$

E(B) = 1,23 – 0,059*p*H (при 25°C)

в растворе, насыщенном кислородом при P = = 101325 Па (1 атм).

— Металлические системы (Cu/Cu^{2+})

$$Cu\downarrow \rightarrow Cu^{2+} + 2e^- \quad (E^0 - \frac{0{,}34\ B}{E.\ N.\ H.})$$

$$E(B) = E^0 + \frac{2.3RT}{2F} \log a_{Cu^{2+}} = 0.34 + 0.03 \log a_{Cu^{2+}}$$

Стандартные электроды:

Основными электрохимическими системами, используемыми в качестве стандартных, являются:

— $Hg_2Cl_2\downarrow + 2e^- \rightleftharpoons 2\,Hg + 2Cl^-$

E^0 = 0,244 (B) (в насыщенном растворе KCl и Hg_2Cl_2 при 25°C);

— $AgCl\downarrow + e^- \rightleftharpoons Ag\downarrow + Cl^-$

E^0 = 0,234 B (в 1М-растворе KCl при 25°C).

1.8.2.8.9. Окислительно-восстановительные реакции. Дисмутация

Рассмотрим следующие две окислительно-восстановительные пары:

— Окисл$_1$ + z_1e^- → Восст$_1$
(стандартный потенциал E_1^0),

— Окисл$_2$ + z_2e^- → Восст$_2$
(стандартный потенциал E_2^0).

Возможность протекания реакции между двумя парами, помещенными в раствор, а также их равновесный состав определяются разностью ($E_1^0 - E_2^0$). Условие $E_1^0 > E_2^0$ благоприятно для протекания следующей реакции:

$$z_2Окисл_1 + z_1Восст_2 \rightarrow z_2Восст_1 + z_1Окисл_2$$

Пример:

окисление меди трехвалентным железом (Fe^{3+}):

$Cu\downarrow/Cu^{2+}$ (E^0 = +0,34 B) и Fe^{3+}/Fe^{2+} (E^0 = +0,77)

$$2Fe^{3+} + Cu\downarrow \rightarrow Cu^{2+} + 2Fe^{2+}$$

Если вещество является восстановителем в одной паре и окислителем в другой, оно называется амфотерным.

Так например, Восст$_1$ = Окисл$_2$ = A.

Если $E_1^0 < E_2^0$, то A неустойчиво и практически исчезает благодаря следующей реакции дисмутации (если $E_2^0 - E_1^0$ достаточно велико):

$$(z_1 + z_2)A \rightleftharpoons z_2Окисл_1 + z_1Восст_2$$

Пример: дисмутация одновалентной ртути (Hg_2^{2+}) в ртуть Hg и оксид ртути HgO при $pH \geq 2,5$ согласно реакции:

$$Hg_2^{2+} + H_2O \rightarrow HgO\downarrow + Hg + 2H^+$$

1.8.2.8.10. Гальванические элементы

Если два электрода, погруженные в один электролит и имеющие разные потенциалы, соединить внешним контуром, то в нем возникает энергия циркуляции электронов. Электродвижущая сила гальванического элемента, устроенного подобным образом, зависит от природы электродов или от уровня электрического потенциала составляющих веществ.

Примеры:

ЭДС гальванического элемента из горючего вещества при высокой температуре (электролитом являются расплавы карбонатов щелочных металлов) зависит от состава горючего, представляющего анод (индекс "*a*") и окислителя, поддерживающего горение, представляющего катод (индекс "*c*"):

$$E = E_0 + \frac{\Re T}{2F} \lg \frac{(P_{H_2})_a \sqrt{(P_{O_2})_c (P_{CO_2})_c}}{(P_{H_2O})_a (P_{CO_2})_a}$$

Если окислителем является смесь 30% воздуха и CO_2, а горючим – равновесная смесь метана с парами воды (1 моль метана на 2 моля воды), то ЭДС равна 1,1 В.

1.8.3. Химический анализ

1.8.3.1. Анализ воды

1.8.3.1.1. Отборы проб

Проба должна быть однородной, представительной и полученной без нарушения физико-химического состояния воды (растворенные газы, взвешенные частицы и т.д.).

Материал для пробоотборников (флаконы из пластмассы или стекла) должен выбираться тщательно с учетом планируемого анализа.

Нормативы:

— почвенные воды и источники: NF T 90 - 100;
— вода паровых котлов: NF T 90 - 001.

1.8.3.1.2. Физико-химический анализ

1.8.3.1.2.1. pH

Величина pH тесно связана с концентрацией ионов водорода (H^+) в воде. Она характеризует ее кислотность ($0 < pH < 7$), или ее щелочность ($7 \leq pH \leq 14$).

Измерение pH осуществляется методом колориметрии (NF T 90 - 006) или с помощью стеклянного электрода (NF T 90 - 008).

1.8.3.1.2.2. Электросопротивление (NF T 90 - 031)

Электросопротивление позволяет быстро, но приближенно оценить общую степень минерализации воды.

Сопротивление <1000 Ом · м – высокая минерализация,

Сопротивление >1000 Ом · м – очень низкая минерализация.

1.8.3.1.3. Химический анализ

1.8.3.1.3.1. Щелочность (NF T 90 - 036)

Щелочность воды обусловливается наличием бикарбонатов, карбонатов и гидроксидов. Измерение осуществляется путем нейтрализации некоторого объема воды неорганической кислотой в присутствии двух цветных индикаторов.

Окрашивание фенолфталеина (pH 8,3) соответствует завершению половины реакции для карбонатов и полному окончанию для гидроксидов. Результат этих измерений дает щелочность воды (ЩВ).

Изменение окраски метилоранжа (pH 4,5) позволяет определить общее содержание гидроксидов, карбонатов и бикарбонатов. Результат этих измерений называют общей щелочностью воды (ОЩВ).

Щелочность и общая щелочность выражаются в миллиэквивалентах на литр (1 эквивалент соответствует добавлению одного моля кислоты) или во французских градусах (1°f = 0,2 мэк/л).

Следующая таблица позволяет определить содержание гидроксидов, карбонатов и бикарбонатов в зависимости от ОЩВ и ЩВ.

Содержание вещества	Значения ЩВ и ОЩВ, мэк/л				
	ЩВ = 0	$ЩВ < \frac{ОЩВ}{2}$	$ЩВ = \frac{ОЩВ}{2}$	$ЩВ > \frac{ОЩВ}{2}$	ЩВ = ОЩВ
Гидроксиды [$Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$, NaOH]	0	0	0	2ЩВ – ОЩВ	ОЩВ
Карбонаты [$CaCO_3$, $MgCO_3$, Na_2CO_3]	0	2ЩВ	ОЩВ	2(ЩВ – ОЩВ)	0
Карбонаты [$Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$, $NaHCO_3$]	ОЩВ	ОЩВ – 2ЩВ	0	0	0

Интерпритация замеров щелочности воды: ЩВ и ОЩВ.

1.8.3.1.3.2. Жесткость или гидротиметрический показатель (ГП) (NF T 90 - 003)

Гидротиметрический показатель характеризует полную жесткость воды и соответствует общему содержанию солей кальция и магния. Он выражается во французских градусах или миллиэквивалентах на литр (1°f = 0,2 мэк/л = 10 мг $CaCO_3$/л.)

Вода называется жесткой, если при выпаривании она дает прилипающий к стенкам сосуда или нет осадок твердых солей, а именно, солей кальция и магния.

1.8.3.1.3.3. Определение элементов, растворенных в воде

Анализ анионов (F^-, Cl^-, NO_2^-, $2NO_3^-$, SO_4^{2-} и др.), катионов (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} и др.) или металлов (Al, Fe, Cu, Pb, Ni, Cr и др.) очень часто представляет большой интерес, прежде всего в связи с явлениями коррозии и токсичности, которые вода может вызывать.

1.8.3.1.3.4. Химическая потребность в кислороде (NF T 90 - 101)

Химическая потребность в кислороде – это количество кислорода, потребляемого веществами, содержащимися в воде. Оно выражается количеством кислорода, выделяемого бикарбонатом калия и необходимого для окисления органических веществ (протеинов, углеводов, липидов и др.), содержащихся в воде.

1.8.3.1.4. Биохимический анализ. Биохимическая потребность в кислороде (NF T 90 - 103)

Биохимическая потребность в кислороде определяется как количество кислорода, потребляемого различными веществами, находящимися в воде, за инкубационный период длительностью 5 дней при 20°C и в темноте, что прежде всего сопровождается их биологическим распадом.

1.8.3.1.5. Бактериологический анализ

1.8.3.1.5.1. Подсчет микроорганизмов

Целью этого исследования является подсчет наибольшего числа микроорганизмов не специального типа и, в частности, бактерий, развивающихся в обычных условиях аэробных культур.

Подсчеты выполняются после инкубационного периода либо при 37°C в течение 24 часов (NF T 90 - 402), либо при 20°C в течение 72 часов (NF T 90 - 402).

1.8.3.1.5.2. Поиск специальных типов бактерий

Обнаружение микроорганизмов специального типа может быть полезным во время исследований на загрязнение (поиск патогенных бактерий) или на коррозию (поиск серовоспроизводящих бактерий или железных бактерий).

1.8.3.1.6. Список литературы

— Французский сборник нормативов: Eaux–Methodes d'essais. Afnor, 1re edition, Paris (1979)[1];
— J.Rodier.–L'analyse d'eau: Ed. Dunod, 7e edition, Paris, (1984)[2].

1.8.3.2. АНАЛИЗ ГАЗОВ И ДЫМОВ

Анализы такого рода могут быть осуществлены:
— либо на месте непрерывным и автоматическим способом с помощью приборов, удовлетворяющих функциональным требованиям в условиях эксплуатации;
— либо после пунктуального изъятия пробы, с условием, что последняя является представительной и устойчиво сохраняется за время ее доставки в лабораторию.

1.8.3.2.1. Автоматический анализ в трубопроводах природного газа

Для управления сетью необходимо без задержек иметь информацию о химическом составе и физических характеристиках газов различной природы, которые в ней циркулируют.

Основные физические характеристики природных газов определяются путем прямых измерений такими приборами, как автоматический калориметр, дансиметр и др.

Химический состав природных газов измеряется автоматическим хроматографом для газов. Точность этих замеров такова, что позволяет с малой погрешностью рассчитать основные физические характеристики, которые, таким образом, можно определять не прямым путем, а пересчетом.

1.8.3.2.1.1. Принцип хроматографии в газовой фазе (напоминание)

Газовая хроматография основывается на технике разделения различных компонентов смеси. Это разделение реализуется внутри хроматографической колонки, постоянно продуваемой чистым нейтральным газом, который выбирается специалистом (хроматографистом) в зависимости от природы анализируемой пробы.

Для обеспечения желаемого разделения могут использоваться два процесса:
— первый базируется на общем свойстве многих твердых веществ (активируемый уголь, аллюминий, простые полимеры и др.) адсорбировать на своей поверхности различные компоненты газовых смесей, а впоследствии – десорбировать их селективным образом. Это – адсорбционная хроматография;
— второй основывается на том факте, что различные компоненты более или менее сильно распределяются в зависимости от своей природы между неподвижной (стационарной) жидкой фазой с очень низкой упругостью паров, подаваемых в колонну в виде смеси на основе инертных газов, и чистым нейтральным газом, постоянно циркулирующим в колонне. Это – распределительная хроматография.

[1]Вода – Методы исследования, - Париж, изд. Афнор, 1-е изд-е, 1984

[2]Родье Ж, Анализ проб воды. - Париж, изд. Дюнод, 7-е изд-е, 1984

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Любой хроматограф обязательно содержит:

— источник простого нейтрального газа (направляющий газ или газ-носитель). Простой газ может быть азотом, гелием, водородом, метаном и т.д., находящимся в сжатом состоянии в металлическом балоне.

Расход этого газа регулируется:

— инжектором на входе в хроматографическую колонку для порционного впрыска заданного количества анализируемой смеси в поток направляющего газа. Инжекция может осуществляться "ручным способом" оператором с помощью шприца, либо автоматически с помощью крана, имеющего шесть положений и приводящегося в действие домкратом;

— одну (или несколько) хроматографических колонок, используемых в печах с регулируемой температурой. Используемые колонки являются либо "набивными" – заполненными гранулами адсорбента или гранулами на "впитывающей основе", либо "капиллярными колонками", в которых неподвижная активная фаза (жидкая фаза, либо же гранулы адсорбента) располагается только на внутренних стенках трубки, внутренний диаметр которой равен нескольким десятым долям миллиметра, а длина – нескольким десяткам метров. Колонки последнего типа котируются очень высоко, так как их разделительная способность значительно выше, нежели у набивных. Отсюда следует также, что анализ, выполненный на "маленькой" капиллярной колонке, при равной степени сепарации сокращает время исследования;

— детектор, предназначенный для количественного определения присутствия компонента в направляющем газе на выходе из хроматографической колонки с очень малым временем отклика. Детекторы весьма многочисленны, тем не менее, можно выделить среди наиболее используемых:

- а) детектор по теплопроводности, называемый также катарометром, который чувствителен к компонентам, имеющим иную теплопроводность, нежели направляющий газ;
- б) детектор по ионизации пламени, чувствительный к углеводородам (связям C–H);
- в) электрохимический детектор и детектор по фотометрии пламени, обычно используемые в газовой промышленности для специального измерения содержания серных соединений;
- г) детектор массы, все более часто употребляемый в центральных лабораториях, чувствительный ко всем компонентам и позволяющий их идентифицировать по спектру масс, получаемому для каждого пика хроматограммы.

Совокупность "пиков", полученных во время анализа пробы, составляет "хроматограмму анализа", получаемой путем инжекции стандартной смеси такой же природы. Сначала производится сравнение времен прохождения стандартного и измеренного пиков для идентификации компонентов, затем для идентифицированных стандартного и замеренного пиков – сравнение их формы для расчета концентраций.

Часто эти сопоставления выполняются автоматически интеграторами, которые способны даже выдать полный бюллетень анализа.

Таким образом, в основе принципа хроматографии лежит сравнительная и последовательная методика, время отклика которой в худшем случае равно длительности самого анализа.

1.8.3.2.1.2. Наиболее практикуемые виды анализа во время эксплуатации

1.8.3.2.1.2.1. Хроматографические анализы

В следующей таблице упорядочены основные данные, касающиеся методов хроматографии, наиболее практикуемых для осуществления автоматического контроля при эксплуатации. Совокупность хроматографов, имеющихся на месте, может обслуживаться единой централизованной системой (система Коканья (Cocagna)).

Хроматограф	Замеряемые компоненты	Продолжительность анализа, мин	Нижний предел замеров	Нормативы	Детектор	Значимость для газовой отрасли
№ 1	N_2, CO_2, C_1–C_5 и C_{6+}	20	0,01% (мольный) мг/м³ (н)	NF X20-501 ISO 6568	Теплопроводность	Подсчет (N_2, CO_2), PCS, D, W, Z_0
№ 1 *bis*	N_2, CO_2, C_1–C_5	15		NF X20-501 ISO 6568	Теплопроводность	То же, что № 1 + относительная плотность сжиженного природного газа
№ 2	H_2S, R–SH, THT, R–S–R'	5 - 60	0,1 мг/м³ (н)	NF X20-511 ISO 6326	Электрохимический	Одоризация, предупреждение коррозии и др.
№ 3	H_2O и CH_3OH	10	15 мг/м³ (н)	NF X20-530	Теплопроводность	Гидраты
№ 4	COS	10	0,5 мг/м³ (н)		Электрохимический	То же, что № 2 (коррозия)
№ 5	He, H_2, O_2, N_2 и CO	20	0,01%		Теплопроводность	То же, что № 1 (при необходимости)
№ 6	Детально от C_4 до C_{18}	30	1 ppm (C_{13})		Ионизация пламени	То же, что № 1 + расчет потенциального конденсатосодержания

Хроматографические измерения, реализуемые компанией «Cocagna»

1.8.3.2.1.2.2. Специальные анализаторы непрерывного действия

Наряду с приборами прямого измерения физических характеристик газа (колориметры, дансиметры и иные приборы, упомянутые в других главах), существуют специальные приборы-анализаторы непрерывного действия.

Наиболее распространено их применение в двух областях:

— определение количества сероводорода, осуществляемое промышленными приборами, использующими эффект почернения бумаги, пропитанной ацетатом свинца;
— определение количества воды, осуществляемое несколькими типами промышленных приборов, основывающихся на разных принципах: один из наиболее удовлетворительных заключается в прямом измерении влажности по изменению частоты вибраций кристалла кварца, помещенного в резиновый гигроскопичный кожух.

1.8.3.2.1.3. Последовательный расчет физических характеристик по результатам хроматографии

1.8.3.2.1.3.1. Характеристики, связанные с "полным" составом газа

В нормативах NF X 20-522, соответствующих международным нормативам ISO/DIS 6976, излагаются расчеты теплоты сгорания, плотности природного газа с использованием численных значений физических констант простых компонентов и состава газа в мольных долях. Для такого применения хроматограф должен быть оттарирован с помощью стандартного газа, приготовленного методом взвешивания, который описан в нормативах NF X 20-202 (соответствуют международным нормативам ISO/DIS 6142).

1.8.3.2.1.3.2. Характеристики, связанные со специальной ролью вторичных компонентов

Разработаны методики для выполнения расчетов по результатам анализов:

— двухфазного равновесия (потенциального конденсатосодержания природного газа);
— опасности образования гидратов;
— показателя одоризации, связанного с природой и концентрацией пахучих серных соединений.

1.8.3.2.2. Анализ продуктов горения

1.8.3.2.2.1. Распространенные общие методы

1.8.3.2.2.1.1. Колориметрия

Принцип способа колориметрии состоит в пропускании определенного количества анализируемого газа над специальным реактивом, содержащим исследуемый компонент, цвет которого меняется из-за химической реакции. Содержание оценивается по интенсивности итогового окрашивания или по количеству окрашенного реактива. Этот метод часто используется для выявления загрязненности как в атмосфере, так и в дымовых газах.

1.8.3.2.2.1.2. Поглощение инфракрасного излучения

Большое количество газов с несимметричными молекулами (то есть отличные от одноатомных газов и от N_2, O_2, H_2) имеют полосы поглощения в инфракрасном свете. Это свойство было использовано для определения концентрации одного из компонентов газовой смеси путем замера ослабления инфракрасного излучения вследствие поглощения исследуемого компонента.

1.8.3.2.2.2. Углекислый газ (CO_2)

Напомним метод объемного поглощения и титриметрический метод (барботирование газа в поташе и дозирование образованного карбоната).

Метод колориметрии (трубки Драгера).

Метод поглощения инфракрасного излучения (широко применяется).

Метод теплопроводности: нить, помещенная в камеру, нагревается при небольшой температуре: передача тепла к стенкам камеры происходит через газ. Температура и, как следствие, сопротивление нити изменяются в зависимости от теплопроводности смеси, последняя является функцией содержания CO_2. Этод метод не является специфическим (существование интерференции).

1.8.3.2.2.3. Оксид углерода (CO)

1.8.3.2.2.3.1. Определение следов CO в атмосфере

Применяются:

— Метод колориметрии (трубки Драгера).
— Метод измерения теплоты сгорания: анализируемый газ вводится в каталитический реактор, где CO окисляется в CO_2 кислородом воздуха. Реакция экзотермична, в связи с этим замеряется возрастание температуры, связанное с содержанием CO.
— Метод поглощения инфракрасного излучения.
— Электрохимический метод: измерение электродвижущей силы газового гальванометра, использующего CO как источник питания.

1.8.3.2.2.3.2. Концентрация в дымовых газах

Применяются:

— Метод колориметрии.
— Метод поглощения инфракрасного излучения (широко применяется при контроле нагревателей).

1.8.3.2.2.4. Кислород

Применяются:

Метод электрохимических ванн: это гальванические элементы, использующие в качестве электролита окись циркония, развиваемая ЭДС в которых связана с парциальным давлением кислорода. Существуют как легкие переносные версии подобных анализаторов, так и стационарные.

Используются и анализаторы, основанные на магнитной чувствительности кислорода – очень широко используются в стационарных условиях.

1.8.3.2.2.5. Оксиды азота (NO_x)

1.8.3.2.2.5.1. Оксид азота NO

Присутствие NO в дымовых газах выражается концентрациями от нескольких десятков ppm (об.) до одного процента.

Применяются:

Метод химической люминисценции: NO окисляется в NO_2 озоном O_3. Часть молекул NO_2 оказывается в возбужденном состоянии переходит в свое нормальное состояние с излучением света. Интенсивность излучения пропорциональна количеству NO. Это свойство используется в многочисленных автоматических анализаторах.

Метод поглощения инфракрасного излучения.

Поглощение ультрафиолетового излучения.

Метод колориметрии (трубки Драгера).

1.8.3.2.2.5.2. Диокисид азота NO_2

В дымовых газах NO_2 сопутствует с NO, но при более низких концентрациях (NO/NO_2 имеет порядок от 10 до 5).

Применяются:

Химический метод (Gress-Saltzmann): поглощение NO_2 в реактиве, приобретающем окраску диазосоединений, измерение интенсивности окрашивания.

Метод поглощения ультрафиолетового излучения.

Колориметрия (трубки Драгера).

Использование каталитического или термического конвертора, обеспечивающего переход NO_2 в NO и позволяющего свести проблему к определению содержание NO. Этот прибор часто спарен с автоматическим анализатором NO и выдает, таким образом, одновременно данные об NO и NO_2.

1.8.3.2.2.6. Диоксид серы (SO_2)

Концентрации SO_2 в дымовых газах сильно варьируют в зависимости от содержания серы в использовавшемся горючем: от одного процента до одного ppm, для сернистых топлив либо еще меньше – для природного газа.

Применяются:

Химический метод – улавливание в растворе воды, насыщенной кислородом, замер содержания образующихся сульфатов.

Метод поглощения инфракрасного излучения.

Метод поглощения ультрафиолетового излучения.

Метод флуоресценции в ультрафиолете: газ, в котором содержится SO_2, облучается ультрафиолетовым излучением; в этих условиях молекулы SO_2 испускают флуоресцирующий свет, который фиксируется и замеряется. Этот метод очень популярен, особенно в автоматических анализаторах для очень низких содержаний (<10 ppm).

Метод интерферометрии, основанный на получении интерферограммы, исходя из спектров поглощения SO_2.

Метод колориметрии (трубки Драгера).

1.8.3.2.3. Точный анализ проб различных газов

Последовательный анализ на месте в общем случае применяется, когда имеется материал для анализа, взятый при местных условиях эксплуатации, и когда:

— измерения должны осуществляться непрерывным образом в течение времени, достаточного для оправдания цены анализатора;

— требуется получать результаты анализа без малейшей отсрочки;

— нет возможности сохранить пробу за время ее доставки в центральную лабораторию.

Для осуществления особых измерений или для анализа проб, природа которых неясна, часто представляет интерес выполнение анализов на пробах, взятых в стеклянных ампулах и/или в металлических бутылках. Эти различные пробы могут быть без труда проанализированы в центральных лабораториях, оборудованных эффективными вспомогательными средствами анализа.

Наиболее приспособлены две методики: масс-спектроскопия и газовая хроматография в лаборатории.

1.8.3.2.3.1. Принцип масс-спектроскопии

Эта техника, известная прежде всего как средство качественного анализа, позволяет также делать прямой количественный анализ газовой смеси с помощью специально приспособленного прибора, без настройки анализатора в зависимости от природы пробы.

Масс-спектрометр состоит из:

— системы насосов, позволяющих достичь глубокого вакуума (10^{-5} Па);

— устройства ввода, содержащего молекулярную щель, позволяющую проникнуть очень слабому расходу анализируемой смеси в источник спектрометра;

— источника, в котором различные молекулы в пробе газа подвергаются бомбардировке электронами, вызывающими рождение положительных ионов (молекул-ионов и/или ионизованных агрегатов). Каждый из этих ионов характеризуется отношением его массы к электрическому заряду (m/e);

— массового фильтра: образовавшиеся ионы извлекаются из источника электрическим полем, а затем пучки ионов с одинаковым отношением m/e селективно сортируются магнитной секцией;

— детектора типа клетки Фарадея, который позволяет количественно измерить интенсивности каждого характерного пучка ионов с заданным отношением m/e.

Лабораторные приборы, предназначенные для анализа проб любой природы, имеют единый детектор; детекция различных ионных пучков осуществляется варьированием магнитного поля с целью "расчистки" области исследуемого значения массы.

В случае масс-спектрометров, предназначенных для непрерывных измерений в промышленности (пробы известной и неизменной природы), часто используется прибор мультиколлектор, что позволяет одновременно и непрерывным способом наблюдать различные характерные ионные пучки исследуемых компонентов.

1.8.3.2.3.2. Анализ методом газовой хроматографии

Описанный принцип анализа природных газов в равной степени применим и для анализа газовых смесей любого типа. Однако для успеха анализа необходимо:

— знать все компоненты, подлежащие измерениям;

— иметь достаточный объем информации о природе пробы, в частности для проверки, нет ли возможности нежелательных взаимодействий различных компонентов;
— иметь уверенность, что некоторые компоненты не окажутся необратимо поглощенными в хроматографической колонне.

Пренебрежение этими условиями порождает значительные ошибки, порой трудно обнаружимые, вот почему точные анализы подобного рода могут осуществляться только подготовленным оператором.

1.8.3.2.3.3. Взаимодополняемость масс-спектрометрии и газовой хроматографии

Масс-спектрометрия является лабораторным методом, позволяющим специалисту быстро получить надежные результаты даже для пробы, природа которой не определена.

Газовый хроматограф применяется в лаборатории для восполнения иногда недостаточных результатов масс-спектрометрии (с целью повышения точности и/или улучшения нижнего предела детекции на пробе, уже подвергнутой исследованию известными способами масс-спектрометрии).

1.8.3.2.4. Отборы проб газа. Тарирование анализаторов

Качество измерения зависит прежде всего от качества отбора проб и от точности тарирования анализатора.

1.8.3.2.4.1. Отборы проб

Отбор пробы является очень тонкой операцией, которая самым прямым образом может дискредитировать конечные результаты. В нормативах NF X 20-251, соответствующих международным нормативам ISO 6712, речь идет о "приборах для отбора и транспортировки проб газа на установках-анализаторах".

1.8.3.2.4.2. Тарирование

Качество тарирования (не путать с воспроизводимостью результатов анализатора) самым прямым образом обуславливает точность итоговых замеров. Весьма разнообразные аспекты методов отбора проб представлены в нормативах от NF X 20-200 до NF X 20-211, а также в нормативах NF X 20-220 и NF X 20-230.

1.9. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Передача тепла осуществляется с помощью трех механизмов, обычно сопутствующих друг другу, хотя и имеющих совершенно различную физическую природу:

— излучением – практически для всех веществ, за исключением нескольких простых газов;
— кондукцией в чистом виде – внутри твердых тел;
— конвекцией (естественной или вынужденной) – в жидкостях.

1.9.1. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ

В отличие от двух последних видов теплопередачи, которые требуют физического контакта источника тепла с акцептором, излучение осуществляется на расстоянии, предпочтительно в направлении вакуума.

1.9.1.1. ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕД ДРУГИМИ ФОРМАМИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Излучение обладает рядом преимуществ перед другими формами теплопередачи:

— когда имеется опасность загрязнения акцептора или химической реакции;
— поскольку излучение переходит в тепло только после поглощения приемником, тепловые потери между источником и приемником незначительны, если среда между ними легко пропускает радиацию;
— количество тепла, передающееся с излучением при постоянном перепаде температур, значительно возрастает с ростом температуры источника.

1.9.1.2. ИЗЛУЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ЧЕРНОЕ ТЕЛО (ИЛИ ПОЛНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ)

При падении пучка излучения на тело часть его α поглощается и переходит в тепло, другая часть τ проходит сквозь тело, если оно является прозрачным, и, наконец, третья – ρ – отражается от входной поверхности тела, не проникая в него.

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

где

α – коэффициент поглощения тела-акцептора;

τ – его коэффициент пропускания;

ρ – его коэффициент отражения.

Для тела, которое при данной температуре поглощает максимум излучения, $\tau = 0$ (непрозрачное тело) и $\rho = 0$. Тело, не отражающее излучения, в частности, никаких световых лучей, воспринимает-

ся как абсолютно черное при обычной температуре, откуда следует название "черное тело" для объектов подобного рода.

Согласно определению Кирхгоффа черное тело к тому же излучает максимум энергии при любой температуре как в целом, так и для каждой монохроматической компоненты полного излучения.

Поскольку законы излучения черного тела очень хорошо изучены, можно определить излучение некоторого тело по отношению к черному телу при одинаковых температурах с помощью числа, всегда меньшего единицы, которое называется коэффициентом черноты ε_t вещества при заданной температуре t (прежде – коэффициент полной эмиссии).

При каждой температуре спектральный коэффициент черноты для расчетной длины волны λ совпадает с коэффициентом поглощения волны той же длины:

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

Для полного излучения подобное совпадение имеет место лишь в следующих случаях:

— для серого тела, коэффициент черноты которого одинаков для всех длин волн;
— для произвольного тела, если поглощаемое им излучение является излучением черного тела, имеющего ту же температуру, что и поглощатель.

1.9.1.2.1. Физические величины, описывающие излучение

1.9.1.2.1.1. Поток энергии F

Поток F – это мощность полного излучения тела в окружающее пространство.

Единица измерения в системе СИ: ватт (Вт).

1.9.1.2.1.2. Энергетическая светимость M[1]

Светимостью M называется поток, излучаемый единицей поверхности тела в пространство-полусферу перед ним:

$$M = F/S$$

Единица измерения в СИ: Вт/м^2.

1.9.1.2.1.3. Энергоосвещенность E

Освещенность E – это поток, падающий на единицу поверхности поглощающего тела:

$$E = \frac{F}{S'}$$

Единица измерения в СИ: Вт/м^2.

1.9.1.2.1.4. Сила излучения I в направлении Δ

Величина I определяется как отношение элементарного потока dF, испускаемого телом внутри элементарного конуса с осью Δ, к величине $\Delta\Omega$ телесного угла при вершине этого конуса при его стремлении к нулю:

$$I = \frac{dF}{d\Omega} = \frac{D^2 dF}{dS'} = D^2 E$$

D определяется в следующем разделе.

1.9.1.2.1.5. Энергетическая яркость L в направлении Δ

Яркостью L называется отношение силы излучения в данном направлении к площади dS_0 проекции элемента излучающей поверхности на плоскость, нормальную к направлению Δ:

$$L = \frac{I}{dS_0} = \frac{ED^2}{dS_0}$$

Величина $\frac{dS_0}{D^2}$ представляет собой телесный угол, под которым наблюдается излучающий элемент dS из точки, расположенной на расстоянии D в заданном направлении Δ. Отсюда следует соотношение:

$$E = L d\Omega_0$$

Единица измерения: Вт · ср$^{-1}$ · м$^{-2}$, где ср – стерадиан.

1.9.1.2.2. Излучение черного тела

1.9.1.2.2.1. Величина константы Стефана σ

Светимость M^0 черного тела при абсолютной температуре T [K] задается формулой Стефана:

$$M = \sigma T^4$$

В системе СИ: $\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8}$ Вт · м$^{-2}$ · K^{-4}

1.9.1.2.2.2. Величины констант C_1 и C_2 в уравнении Планка

Эти константы выражают монохроматическую светимость черного тела m^0_λ в зависимости от длины волны λ и реальной абсолютной температуры T черного тела:

$$m^0_\lambda = C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1\right)^{-1}$$

$C_2 = 0.014388$ (длина волны выражена в метрах),

либо

$C_2 = 14388$ (длина волны выражена в микронах).

Значение C_1: $3{,}742 \cdot 10^{-16}$ Вт/м^2 (длина волны в метрах).

1.9.1.2.2.3. Величина константы Вьена (C_w)

$$\lambda_m \cdot T = C_w$$

где λ_m – длина волны, соответствующая максимальному монохроматическому излучению черного тела при абсолютной температуре T.

$C_w = 0.002897$ (длина волны в метрах),

$C_w = 2897$ (длина волны в микронах).

[1] И современное название "exitance energetique", и прежнее название "emittance energetique" в русском переводе полностью эквивалентны (прим. перев.)

Температура источника 1	Температура источника 2									
	0°C	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C	140°C	160°C	180°C
20°C	5,16									
40°C	5,74	6,33								
60°C	6,38	6,99	7,66							
80°C	7,08	7,72	8,42	9,17						
100°C	7,84	8,51	9,23	10,02	10,87					
120°C	8,66	9,36	10,12	10,94	11,82	12,77				
140°C	9,55	10,28	11,07	11,92	12,84	13,82	14,87			
160°C	10,50	11,27	12,09	12,97	13,92	14,94	16,03	17,19		
180°C	11,53	12,33	13,18	14,10	15,09	16,14	17,27	18,47	19,75	
200°C	12,63	13,46	14,35	15,31	16,33	17,42	18,59	19,83	21,15	22,54

Температура источника 1	Температура источника 2									
	0°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
100°C	7,84									
200°C	12,63	17,42								
300°C	19,34	25,10	32,77							
400°C	28,32	35,14	44,00	55,23						
500°C	39,89	47,90	58,06	70,71	86,18					
600°C	54,40	63,71	75,29	89,46	106,6	127,0				
700°C	72,19	82,92	96,02	111,8	130,7	153,0	179,0			
800°C	93,61	105,9	120,6	138,2	158,9	183,1	211,2	243,5		
900°C	119,0	132,9	149,4	168,8	191,5	217,8	248,1	282,7	322,0	
1 000°C	148,7	164,3	182,7	204,1	228,9	257,4	290,0	327,1	368,8	415,7
1 100°C	183,0	200,5	220,8	244,3	271,3	302,2	337,3	376,8	421,3	470,9
1 200°C	222,3	241,8	264,2	289,9	319,2	352,5	390,1	432,4	479,6	532,1
1 300°C	266,9	288,5	313,1	341,1	372,9	408,8	449,0	494,0	544,1	599,7
1 400°C	317,2	341,0	367,9	398,4	432,7	471,2	514,2	562,1	615,2	673,9
1 500°C	373,4	399,6	429,0	462,0	498,9	540,2	586,1	637,0	693,3	755,1
1 600°C	436,1	464,6	496,6	532,2	572,0	616,1	665,1	719,1	778,5	843,8
1 700°C	505,4	536,5	571,1	609,5	652,2	699,3	751,4	808,6	871,4	940,1
1 800°C	581,7	615,5	652,8	694,2	739,8	790,1	845,4	905,9	972,2	1 044
1 900°C	665,4	701,9	742,2	786,5	835,3	888,8	947,4	1 011	1 081	1 157
2 000°C	756,8	796,2	839,5	886,9	938,9	995,8	1 058	1 125	1 199	1 279

Температура источника 1	Температура источника 2									
	1 000°C	1 100°C	1 200°C	1 300°C	1 400°C	1 500	1 600°C	1 700°C	1 800°C	1 900°C
1 100°C	526,1									
1 200°C	590,3	654,5								
1 300°C	661,0	728,4	802,3							
1 400°C	738,4	809,2	886,6	970,8						
1 500°C	823,0	897,3	978,2	1 066	1 161					
1 600°C	915,1	992,9	1 077	1 169	1 268	1 375				
1 700°C	1 015	1 096	1 185	1 280	1 384	1 495	1 614			
1 800°C	1 123	1 208	1 301	1 400	1 508	1 623	1 747	1 879		
1 900°C	1 240	1 329	1 425	1 529	1 640	1 760	1 888	2 026	2 172	
2 000°C	1 365	1 458	1 559	1 667	1 783	1 907	2 040	2 181	2 333	2 493

Коэффициент излучения черного тела между источниками 1 и 2 с температурами T_1 и T_2: $\alpha_r = \sigma \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}$.

1.9.1.2.3. Коэффициент излучения

В расчетах оказывается полезным отношение количества тепла, переданного излучением, к разности температур $T_1 - T_2$ между двумя источниками. Таким способом определяется коэффициент излучения, полностью аналогичный коэффициенту конвекции, так что, если передача тепла происходит с излучением и конвекцией, то для получения коэффициента полной теплопередачи достаточно просуммировать коэффициенты излучения и конвекции.

Пример:

Рассчитать коэффициент излучения полусферического свода из известняка при 1700°C к листу платины при 1500°C, лежащему в основании свода.

Коэффициент излучения черных поверхностей при этих двух температурах согласно таблице равен 1495 Вт · м$^{-2}$ · К$^{-1}$:

— для известняка при 1 700°С:

$$\epsilon_1 = 0{,}14 \quad S_1 = 2\pi r^2;$$

— для платины при 1 500°С:

$$\epsilon_2 = 0{,}17 \quad S_2 = \pi r^2;$$

$$\frac{\text{поверхность выпуклая}}{\text{поверхность вогнутая}} = \frac{S_2}{S_1} = 0{,}5$$

Откуда искомый коэффициент излучения:

$$\alpha_r = \frac{1495 \times 0{,}14 \times 0{,}17}{1 - (1 - 0{,}14) \cdot (1 - 0{,}17) \cdot 0{,}5} =$$

$$= 55{,}3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$$

1.9.1.2.4. Величины энергетических светимостей черного тела

$$M_0^T = 5{,}670 \cdot 10^{-8} T^4 \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$$

См. следующую таблицу.

T (K)	M_T^0, (10^3 Вт/м^2)	T (K)	M_T^0, (10^3 Вт/м^2)
273	0,3149	1 300	161,9
300	0,4593	1 325	174,8
325	0,6326	1 350	188,3
350	0,8509	1 375	202,7
375	1,121	1 400	217,8
400	1,452	1 425	233,8
425	1,850	1 450	250,6
450	2,325	1 475	268,4
475	2,886	1 500	287,0
500	3,544	1 525	306,7
525	4,307	1 550	327,3
550	5,188	1 575	348,9
575	6,198	1 600	371,6
600	7,348	1 625	395,4
625	8,652	1 650	420,3
650	10,12	1 675	446,3
675	11,77	1 700	473,6
700	13,61	1 725	502,0
725	15,67	1 750	531,8
750	17,94	1 775	562,8
775	20,45	1 800	595,2
800	23,22	1 825	629,0
825	26,27	1 850	664,2
850	29,60	1 875	700,8
875	33,24	1 900	738,9
900	37,20	1 925	778,6
925	41,51	1 950	819,8
950	46,18	1 975	862,7
975	51,24	2 000	907,2
1 000	56,70	2 025	953,4
1 025	62,59	2 050	1 001
1 050	68,92	2 075	1 051
1 075	75,72	2 100	1 103
1 100	83,01	2 125	1 156
1 125	90,82	2 150	1 212
1 150	99,17	2 175	1 269
1 175	108,1	2 200	1 328
1 200	117,6	2 225	1 390
1 225	127,7	2 250	1 453
1 250	138,4	2 275	1 519
1 275	149,8	2 300	1 587

Величины энергетических светимостей черного тела.

1.9.1.3. Излучение прозрачных тел

Реальные тела поглощают попадающее на них излучение лишь частично.

Для непрозрачных тел в зависимости от того, полированный или матовой является их поверхность, непоглощенная энергия падающих лучей может быть либо отражена от поверхности, либо рассеяна во всем пространстве перед телом. Для тел, прозрачных к излучению, часть падающего потока может пройти сквозь всю толщину тела без поглощения: эта часть потока соответствует коэффициенту пропускания τ тела.

Тело	Толщина (мм)	Температура черного тела – источника излучения (К)						
		370	600	750	1 020	1 130	1 400	1 650
Белое стекло	0,13	0,097	0,295	0,412	0,605	0,631	0,658	0,793
	1,03	0,013	0,106	0,183	0,366	0,420	0,500	0,639
	1,50	0,009	0,088	0,170	0,327	0,377	0,464	0,588
Зеркальное стекло (зеркала Сент-Гобен)					980	1 170	1 390	1 670
	2	0,012	0,062	0,142	0,285	0,381	0,495	0,602
	4	0,004	0,029	0,091	0,213	0,307	0,427	0,542
Жаростойкое стекло	2	0,012	0,032	0,093	0,220	0,320	0,463	0,553
	4	0,005	0,015	0,069	0,179	0,267	0,384	0,503
Плексиглаз (сообщество Альстхом)						1 140 K	1 390 K	
	5,25	–	–	0,007	0,040	0,062	0,128	0,210

Значения коэффициента пропускания некоторых типов стекол и плексиглаза (с параллельными поверхностями) по отношению к излучению черного тела при T (K), согласно A. Goeffe: Передача тепла излучением.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.9.1.4. ИЗЛУЧЕНИЕ РЕАЛЬНЫХ ТЕЛ

Светимость реальных тел :

$$M = \varepsilon_t M^0,$$

M^0 – светимость черного тела при рассматриваемой температуре;

M – светимость заданного тела при той же температуре;

ε_t – коэффициент черноты данного тела.

Коэффициент ε_t существенно зависит от состояния поверхности тела: с ростом шероховатости он возрастает.

1.9.1.5. ИЗЛУЧЕНИЕ ГАЗОВ

1.9.1.5.1. Общие сведения

Некоторые газы, такие как сухой азот и сухой кислород, являются полностью прозрачными к излучению.

Среди обычных газов, обладающих способностью значительного лучеиспускания, основными являются углекислый газ, однокись углерода, пары воды, причем это излучение ограничено узкой областью относительно длин волн (отдельные полосы испускания и поглощения). Лучеиспускание этих газов при каждой температуре зависит от толщины e слоя излучения и их концентрации (парциального давления p) в атмосфере.

Наименование и состояние поверхности	Температура °C	Коэффициент черноты	Наименование и состояние поверхности	Температура, °C	Коэффициент черноты
Алюминий:			*Свинец*		
хорошо отполированная пластинка из чистого (на 98,37%) алюминия	226 - 577	0,039 - 0,057	окись никеля	127 - 227	0,057 - 0,075
			серый окисленный	24	0,28
			окисленный при 15°C	200	0,63
полированный	100	0,095	*Железо – металлическая поверхность (либо очень тонкий слой окиси):*		
грубая полировка	100	0,18			
промышленные листы	100	0,09			
окисленный при 600°C	199 - 600	0,11 - 0,19	полированное железо	427 - 1027	0,14 - 0,38
окись алюминия	277 - 500	0,63 - 0,42	грубо отполированное железо	100	0,17
окись алюминия	500 - 828	0,42 - 0,26	полированная сталь	100	0,066
Серебро:			грубая жесть	938 - 1 100	0,55 - 0,61
чистое и полированное	227 - 627	0,020 - 0,032	полированная жесть	900 - 1 038	0,55 - 0,60
полированное	100	0,052	полированный чугун	200	0,21
Медь:			*Железо – окисленная поверхность:*		
промышленная, обработанная наждаком, отполированная	19	0,030	луженая стальная жесть	21	0,66
			окисленное железо	100	0,74
промышленная, начищенная до блеска	22	0,072	сталь, окисленная при 600°C	200 - 600	0,79
пластинка, нагретая до 600°C	200 - 600	0,57	окись железа	500 - 1 200	0,85 - 0,89
окись меди	800 - 1100	0,66 - 0,54	*Цинк:*		
Олово:			промышленный, чистый на 99,1%, отполированный	227 - 327	0,045 - 0,053
блестящее луженое железо	24	0,043 - 0,064			
промышленная луженая жесть	100	0,07 - 0,08	окисленный нагревом при 400°C	400	0,11
Латунь:			блестящая гальваническая неокисленная полированная жесть	28	0,23
хорошо отполированная (82,9% – Cu, 17% – Zn)	277	0,030			
прокатная пластина, отполированная грубым наждаком	22	0,20	серая окисленная гальваническая жесть	24	0,28
блеклая пластина	49 - 349	0,22	*различные материалы:*		
окисленная нагреванием при 600°C	200 - 600	0,61 - 0,59	пластины асбеста	24	0,96
			бумага из асбеста	38 - 371	0,93 - 0,94
Ртуть	0 - 100	0,09 - 0,12	огнеупорный кирпич	1 000	0,75
Никель:			белая эмаль на железе	23	0,906
чистое (98,9%), отполированное электролитическое покрытие	227 - 377	0,07 - 0,087	пробка	25	0,93
			белая или кремовая радиаторная краска	100	0,77 - 0,84
пластина, окисленная при 600°C	200 - 600	0,37 - 0,49	кремний-алюминиевая краска, два слоя на инконеле	260	0,29
окись никеля	650 - 1 254	0,59 - 0,85	гладкое стекло	22	0,93

При наличии взаимно соответствующих интервалов температуры и коэффициентов черноты можно в указанных диапазонах применять линейную интерполяцию.
Значения установлены H.C. Hottel'em и заимствованы из работы: McAdams, Transmission de la chaleur.

Коэффициент черноты некоторых металлов и различных материалов

1.9.1.5.2. Светящееся пламя

Светящимся называется пламя, содержащее в виде суспензии очень мелкие частицы углерода (от 0,1 до 0,01 мк), которые образуются в результате частичного крекинга некоторых углеводородов горючих газов (особенно этана или этилена). Излучение этих твердых частичек охватывает весь спектр и складывается с инфракрасным излучением прозрачных газов пламени (CO, CO_2 и H_2O).

1.9.1.5.3. Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda p}$

Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda p}$ изменяется обратно длине волны λ согласно приближенному закону:

$$\varepsilon_{\alpha p} = 1 - \exp\left(-\frac{K_1 l}{\lambda}\right)$$

где l – толщина пламени в направлении наблюдения, а K_1, называемый коэффициентом линейного ослабления волны, длиной 1 мк, прямо пропорционален весовому содержанию в пламени газов углерода крекинга и обратно пропорционален диаметру частиц.

1.9.1.5.4. Коэффициент излучения ε_p

Коэффициент излучения ε_p частичек вычисляется по обобщенному соотношению:

$$\varepsilon_p = 1 - \left(1 + \frac{K_1 l \theta}{14\ 380}\right)^{-4}$$

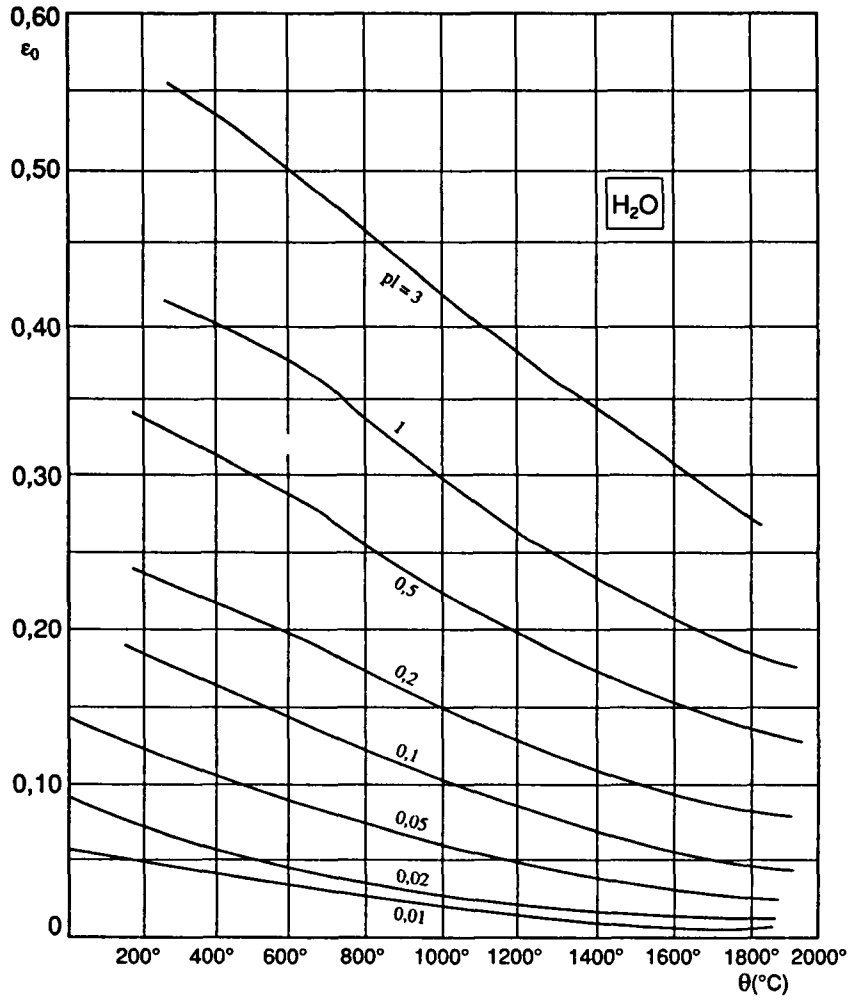
Это выражение показывает, что ε_p возрастает с ростом температуры θ пламени.

Помимо этого по результатам анализа газов пламени вычисляется коэффициент излучения ε_g прозрачных газов.

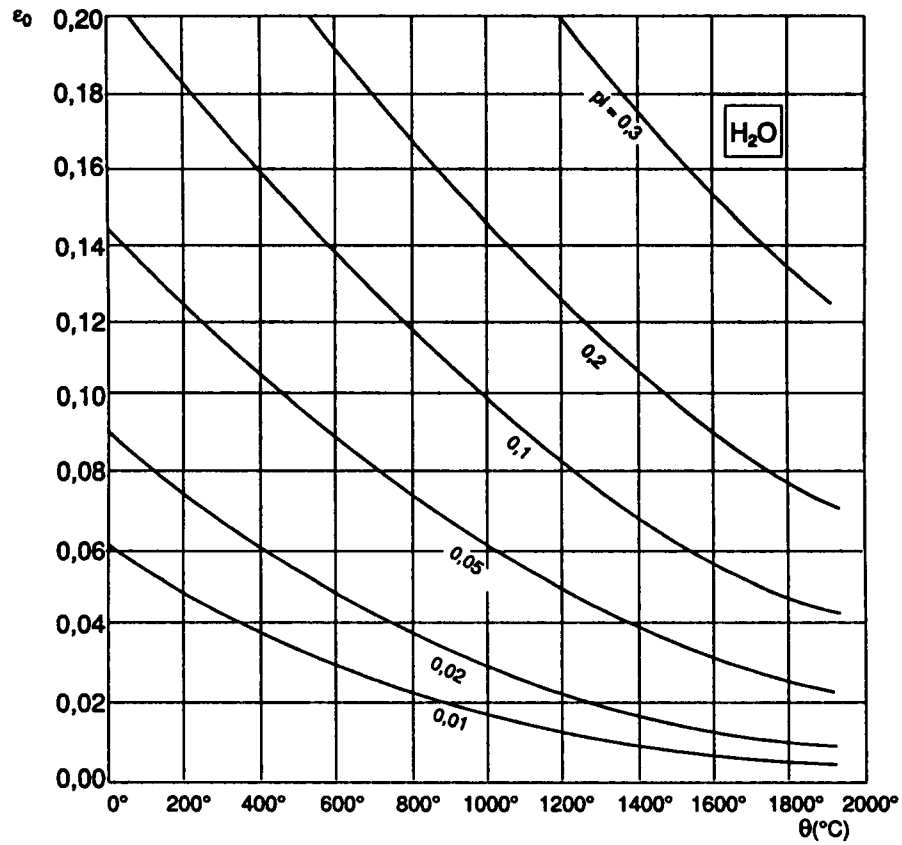
Отсюда выводится коэффициент излучения светящегося пламени:

$$\varepsilon_f = 1 - (1 - \varepsilon_p)(1 - \varepsilon_g)$$

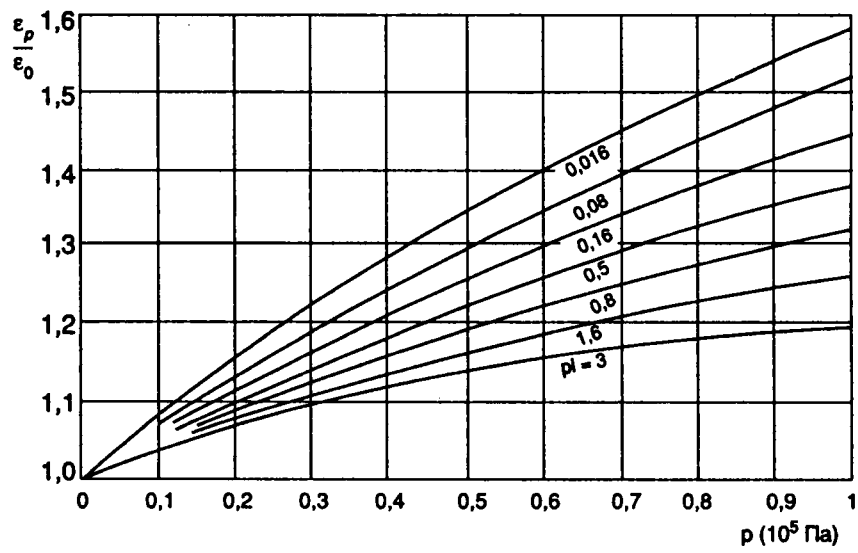
1.9.1.5.5. Коэффициент излучения паров воды



Коэффициент излучения для ε для H_2O в зависимости от произведения $p \cdot l$, выраженного в 10^5 Па · м.



Коэффициент излучения ε для H_2O в зависимости от произведения p · l, выраженного в 10^5 Па · м.



Поправка к коэффициенту излучения ε паров воды в зависимости от произведения p · l, выраженного в 10^5 Па · м

1.9.1.5.6. Коэффициент излучения ε углекислого газа

В приведенной ниже таблице дается пример расчетов коэффициента излучения дымовых газов, прозрачных при 300°C, толщиной слоя 1,50 м, состав которых следующий:

$$CO_2 - 10\%, H_2O - 20\%, N_2 - 70\%$$

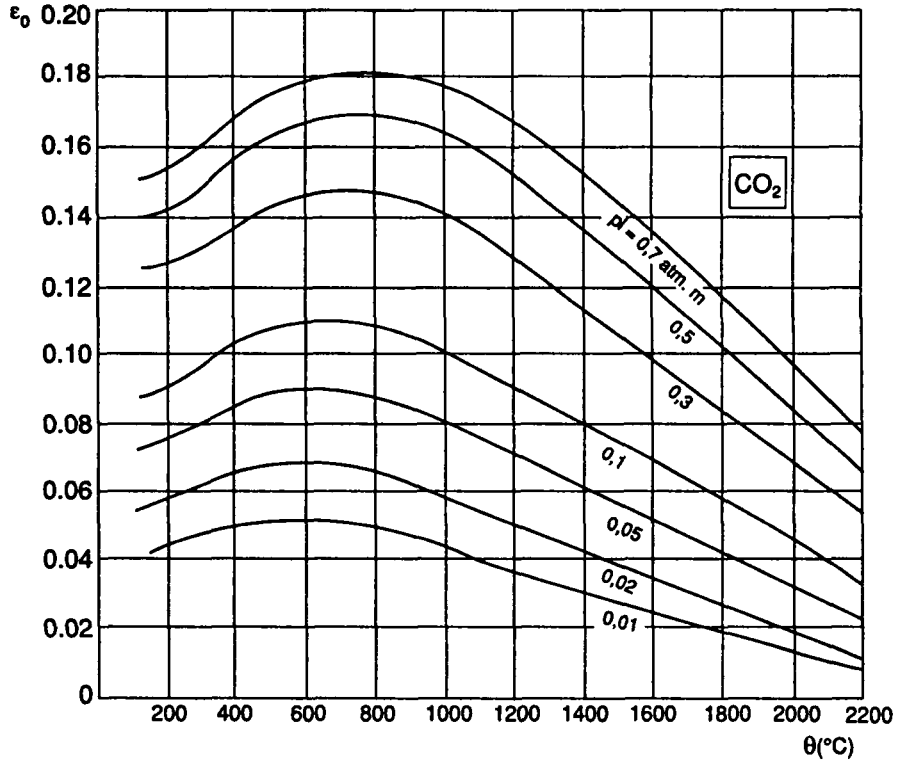
Замечания:

Для расчета коэффициента излучения полезно обратиться к работе: G. Ribaud, E. Brun – Transmission de la chaleur, tome 1; Le rayonnement thermique. Edition J. et R. Sennac, Paris, 1948.

1.9.2. Передача тепла кондукцией

1.9.2.1. Связующее соединение

Количества тепла Q, передающееся в стационарном режиме за единицу времени через стенку с поверхностью S на расстояние *l* в направлении, перпендикулярном этой поверхности, под действием разности температур $t_1 - t_2$, дается соотношением: $Q = (t_1 - t_2)\frac{S}{l}\lambda$, в котором λ – представляет собой коэффициент теплопроводности.



Коэффициент излучения CO_2 в зависимости от произведения p · l, выраженного в Па · м.

	p	l	pl	$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}$	ε_l при 300°C
CO_2	$0{,}1 \cdot 10^5$ Па	1,5 м	$0{,}15 \cdot 10^5$ Па · м		0,108
H_2O	$0{,}2 \cdot 10^5$ Па	1,5 м	$0{,}30 \cdot 10^5$ Па · м	1,1	0,27 × 1,1 = 0,297
					Коэффициент излучения = 0,405

Пример расчета коэффициента излучения.

1.9.2.2. Теплопроводность металлов, изолирующих и строительных материалов

Теплопроводность металлов зависит от степени чистоты и от состояния их поверхности так же, как у обычных изоляционных материалов. В связи с этим ее измерение является весьма тонким процес и очень часто значения, указываемые для одного и того же тела разными авторами, значительно различаются.

В следующих таблицах λ выражена в Вт/(м · К).

Сплавы *	Обозначения (издат-во Afnor)	λ при 20°С
Обычная сталь	A.37	50
Нержавеющая сталь	Z10 CN 18.8	15
Инвар		9
Латунь 1-го титра	UZ.36	117
Латунь 2-го титра	UZ.40	121
Монель	UN.30	29
Дюралюминий	AU.4G1	188
Силумин	AS.106	151
Замак	ZA.46	113

* Согласно различным источникам.

Металлы *	Температура °С	λ
Алюминий 99%	18	211
	100	205
Серебро 99,98%	18	421
	100	415
Чистая медь	18	384
	100	380
Олово	0	64
	100	59
Чистое железо	18	67
	100	63
Никель 99%	18	59
	100	58
Платина	0 - 200	70
Свинец	18	35
	100	34
Вольфрам	0	160
Цинк	18	112
	100	109

* Согласно: "*Handbook of Chemistry*", Lange (1956).

Земля и строительные материалы	λ
Земля сухая	0,52
Земля влажная	2,3
Песок сухой	0,35
Песок влажный	1,1
Камень строительный	1,5 при 2,4
Цемент	0,30
Кирпич из глинозема при 600°С	0,99 при 1,34
Кирпич из кремнезема	
при 600°С	1,0
при 1 000°С	1,4
Стекло обычное	0,76
Бетон	1,3 при 1,4
Гипс	0,55
Гипсовая плитка	0,43
Красный кирпич	0,35 при 0,47
Древесина дуба, сухая	0,23 при 0,35
Древесина сосны	0,12 при 0,35
Пробковая кора	0,043
Шерсть натуральная (в зависимости от плотности)	0,034 при 0,056
Полистирол эластичный (в зависимости от плотности)	0,031 при 0,046

1.9.2.3. Теплопроводность газов и паров

1.9.2.3.1. Коэффициент теплопроводности λ

В следующей таблице коэффициент теплопроводности λ выражен в Вт/(м · К).

Наименование	Температура °С	$\lambda \times 10^3$
Углекислый газ	0	14,5
	100	22,1
Азот	0	24,1
	100	31,4
Этан	0	18,4
	100	30,4
Этилен	0	17,6
	100	27,9
Водород	0	16,6
	100	21,5
Метан	0	30,6
	0	35,5
Кислород	100	24,7
	10	32,6
Оксид углерода	0	23,1
	100	30,4
Пары воды	46	19,2

Представленные значения взяты из работы: McAdams "*Transmission de la chaleur*", 1961, за исключением значения для паров воды, заимствованного из: "*Handbook of Chemistry*", Lange (1956).

1.9.2.3.2. Формула Сазерленда

Принято считать, что зависимость теплопроводности от температуры достаточно хорошо описывается формулой Сазерленда:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1 + \frac{C}{T_0}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

где T – абсолютная температура; $T_0 = 273$; C – константа, зависящая от природы газа.

Газы	C
Воздух	119
Углекислый газ	240
Азот	113
Этилен	226
Водород	72
Кислород	138
Метан	198
Пары воды	650

1.9.2.3.3. Теплопроводность воздуха

Зависимость теплопроводности воздуха от температуры в интервале от 0 до 200°C достаточно хорошо согласуется с формулой:

$$\lambda = 0{,}0238 + 0{,}000064\ t$$

1.9.2.3.4. Теплопроводность паров воды

В следующей таблице даются значения теплопроводности паров воды в интервале температур от 100° до 300°C:

t, °C	100	140	160	180	200	240	260	280	300
$\lambda \times 10^3$	23,4	26,7	27,3	28,6	30	32,7	34	35,2	36,6

1.9.3. Передача тепла конвекцией

1.9.3.1. Определение

Коэффициентом тепловой конвекции α жидкости вблизи стенки называется количество теплоты, переданное с единичной поверхности стенки (или полученное от нее) в единицу времени при разнице температур в один градус между удаленной массой жидкости и стенкой.

В соотношениях, встречающихся в задачах тепловой конвекции, широко используются характеристические числа, которые, как правило, не являются независимыми друг от друга.

1.9.3.2. Безразмерные числа, применяемые в соотношениях для коэффициента тепловой конвекции

См. таблицу на с. 164

1.9.3.3. Значения числа Прандтля $\frac{\eta C_p}{\lambda}$ для некоторых газов и жидкостей при атмосферном давлении и 100°C

См. таблицу на с. 164

1.9.4. Смешанная передача тепла кондукцией, конвекцией и излучением

На практике все три процесса протекают одновременно.

Температура в стационарном режиме через стенку, разделяющую две жидкие среды, выражается соотношением:

$$Q = K(T - t)$$

в котором:

Q – количество тепла, переданное за одну секунду на 1 м² поверхности стенки, выражается в Вт/м²;

$T - t$ – разница температур между теплой и холодной жидкостью, замеренные вдали от стенки;

K – параметр, называемый коэффициентом полной теплопередачи и определяемый формулой:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

где

λ – коэффициент теплопроводности стенки;

e – ее толщина;

α_1 и α_2 – коэффициенты теплопередачи между флюидом и стенкой.

Каждый из двух последних коэффициентов равен сумме коэффициентов конвекции между соответствующим флюидом и стенкой, которые определены в разд. 1.9.1.2.3. и 1.9.2.3.1.

Наименование	Обозначение	Определение	Связующее соотношение
Число Био (в литературе иначе называется числом Нуссельта и обозначается N_u).	B_l	$B_l = \frac{\alpha l}{\lambda}$	
Число Маргулиса	M_s	$M_s = \frac{\alpha}{C_p \rho u}$	$M_s = B_l \cdot S_t \cdot R_e^{-1}$
Число Рейнольдса	R_e	$R_e = \frac{\rho u l}{\eta} = \frac{ul}{\nu}$	
Число Пекле	P_e	$P_e = \frac{C_p \rho u l}{\lambda} = \frac{ul}{a}$	$P_e = R_e \cdot S_t^{-1}$
Число Грасгофа	G_r	$G_r = \frac{g l^3 \beta \Delta\theta}{\nu^2}$	
Число Прандтля (используется также обратное ему число Стентона St)	P_r	$P_r = \frac{\eta C_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$	$P_r = S_t^{-1}$
Число Фурье	F_o	$F_o = \frac{at}{l^2}$	

Обозначения:

a – коэффициент температуропроводности $\frac{\lambda}{C_p \rho}$
α – коэффициент тепловой конвекции.
β – коэффициент расширения жидкости при постоянном давлении.
C_p – истинная массовая теплоемкость флюида при постоянном давлении.
η – динамическая вязкость.
g – ускорение свободного падения.
l, D – длина, диаметр (l – характеристика тела, в контакте с которым циркулирует жидкость; D – например, диаметр трубопровода).
λ – коэффициент теплопроводности флюида.
ρ – плотность флюида.
ν – кинематическая вязкость флюида.
t – время.
$\Delta\theta$ – разница температур между флюидом и стенкой.
u – скорость флюида.

Безразмерное число, использующееся в соотношениях для коэффициента теплопроводности.

	$\frac{\eta C_p}{\lambda}$	$\left(\frac{\eta C_p}{\lambda}\right)^{0,3}$	$\left(\frac{\eta C_p}{\lambda}\right)^{1/3}$	$\left(\frac{\eta C_p}{\lambda}\right)^{0,4}$	$\left(\frac{\eta C_p}{\lambda}\right)^{2/3}$
Воздух, водород	0,69	0,894	0,884	0,866	0,781
Углекислый газ	0,75	0,917	0,909	0,891	0,826
Одноокись углерода	0,72	0,906	0,896	0,877	0,803
Азот, кислород	0,70	0,899	0,888	0,867	0,789
Пары воды	1,06	1,018	1,020	1,024	1,040

Значения числа Прандтля (согласно: «Transmission de la chaleur», McAdams).

1.9.5. Физико-химические и энергетические аспекты горения газов

1.9.5.1. Стехиометрическое горение

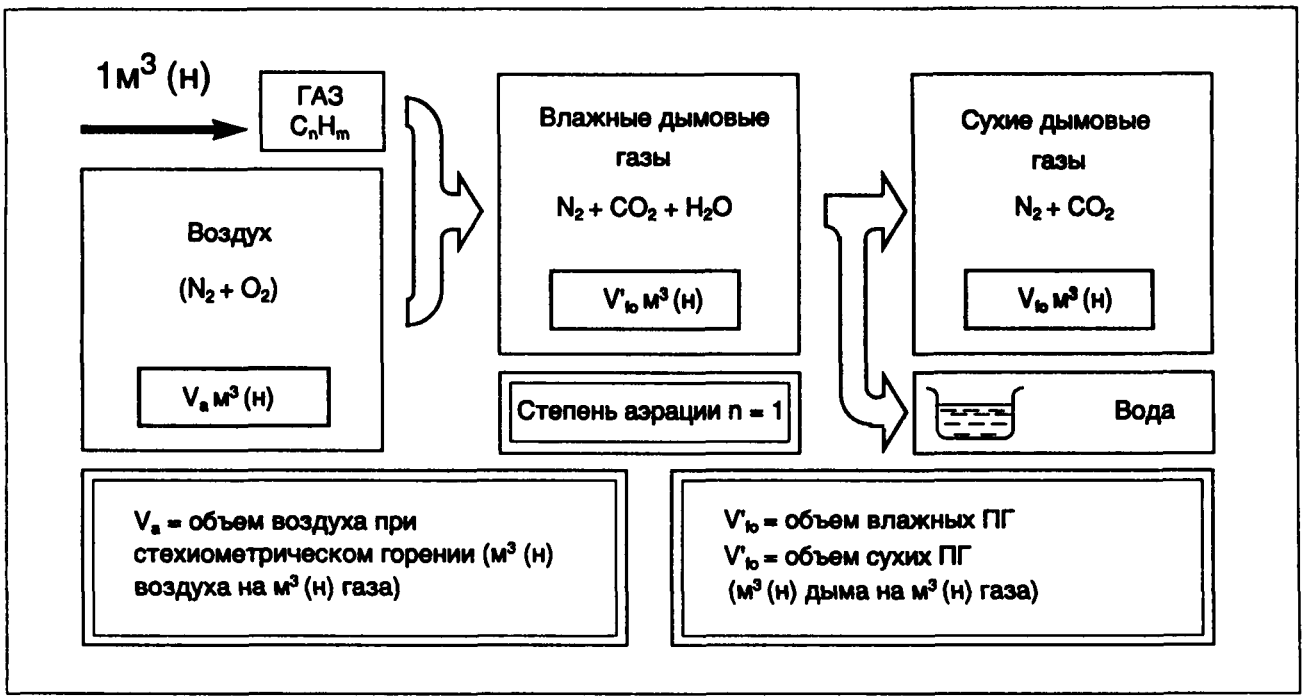
См. рисунок на с. 165

Горение такого типа трудно реализуемо на практике, так как требует подачи на горелку воздуха и газа в строгих стехиометрических пропорциях, а кроме того малейшее нарушение однородности смеси может привести к неполному сгоранию.

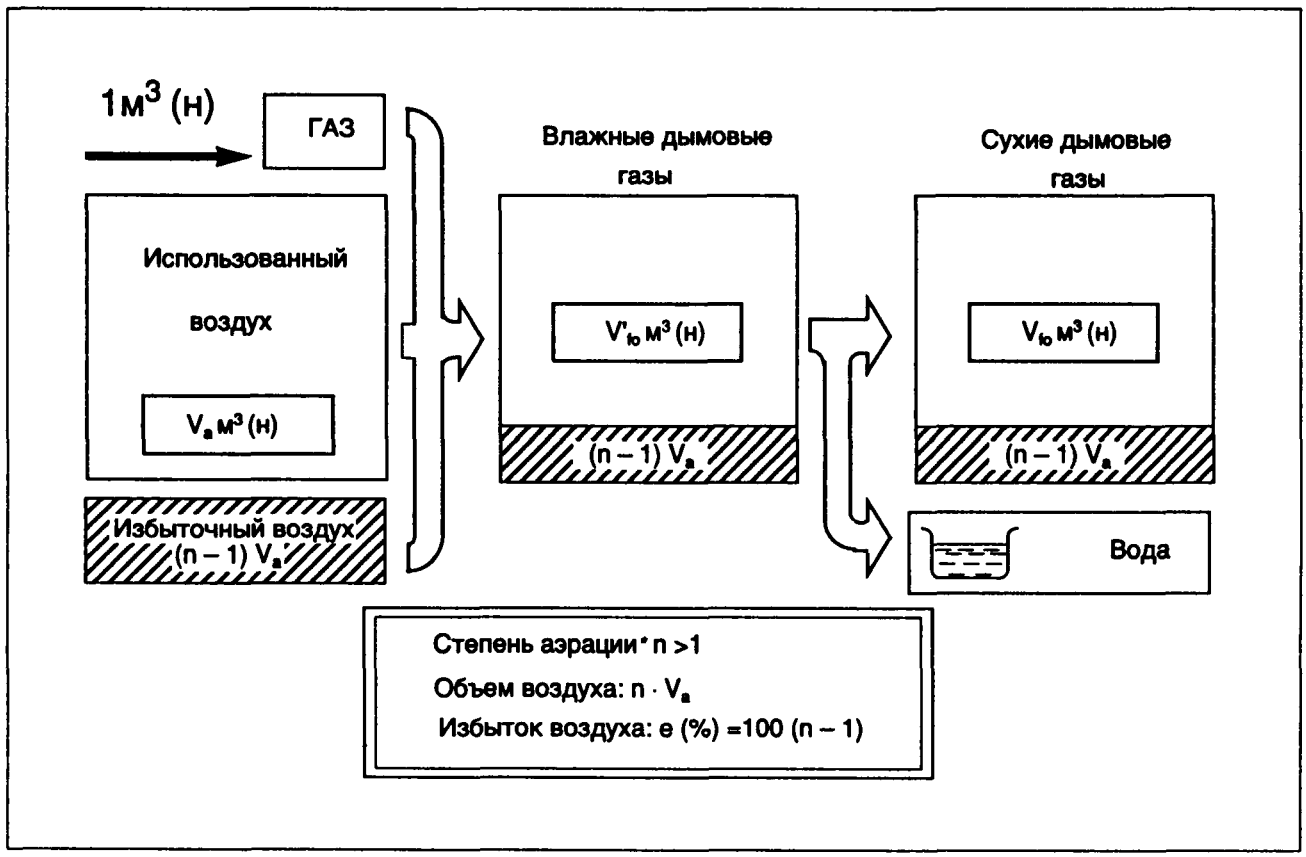
1.9.5.2. Полное сгорание при избытке воздуха

См. рисунок на с. 165

Горение такого типа относится к нормальному горению.

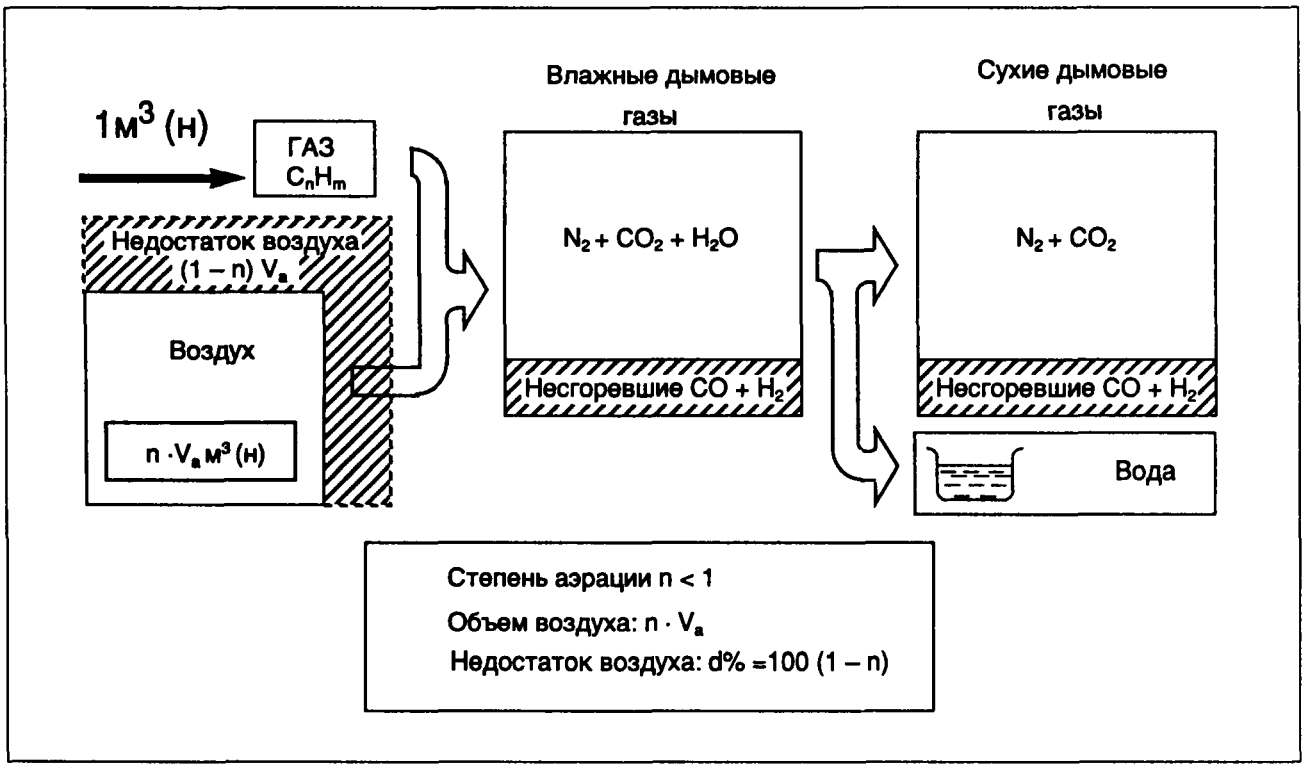


Стехиометрическое горение (полное сгорание без избытка или недостатка воздуха).
(ПГ – продукты горения).

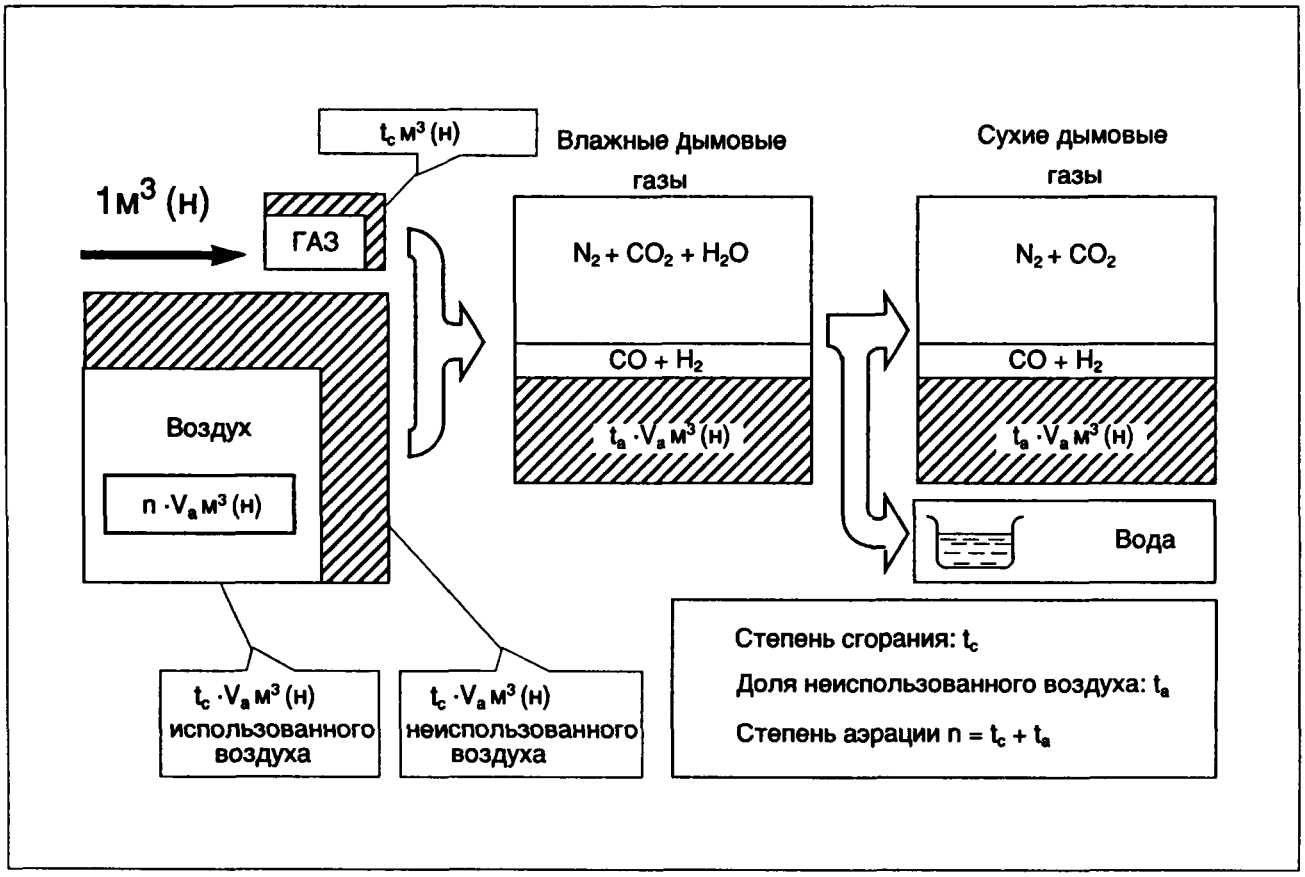


Полное сгорание при избытке воздуха.
** Степень аэрации – отношение объема воздуха при истинном горении к объему воздуха при стехиометрическом горении (м³ (н) воздуха на м³(н) воздуха).*

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



Полное сгорание при недостатке воздуха (полное использование кислорода).



Неполное горение (химическое равновесие нереализуемо).

1.9.5.3. Полное сгорание при недостатке воздуха

См. рисунок на с. 166

Горение такого типа встречается иногда в некоторых промышленных процессах, его причиной является влияние продуктов горения на нагрузку некоторых печей. На практике очень трудно реализуемо.

1.9.5.4. Неполное горение

См. рисунок на с. 166

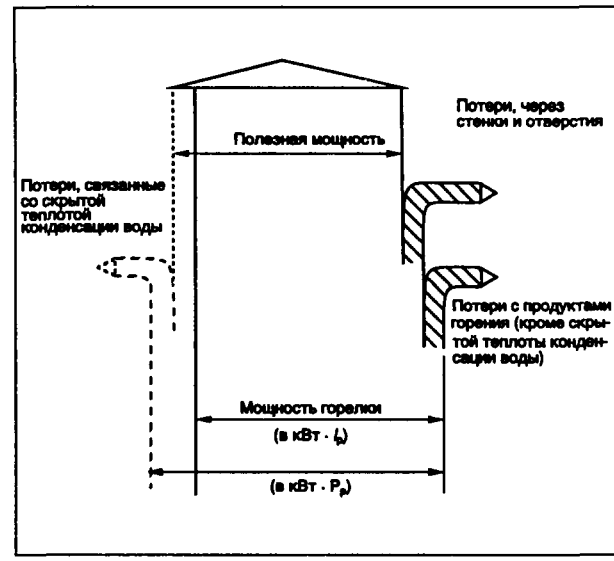
Горение такого типа реализуется, если имеющиеся воздух и газ не полностью перемешиваются в зоне горения. Причиной этого может быть повреждение горелки, обуславливающее несовершенство смеси, либо внезапное охлаждение, вызывающее остановку горения. Кроме того горение подобного типа можно встретить в промышленных печах, если часть воздуха засасывается в отверстия из-за пониженного давления внутри камеры сгорания.

Горение этого типа всегда нежелательно и является результатом плохо отрегулированного или испорченного оборудования.

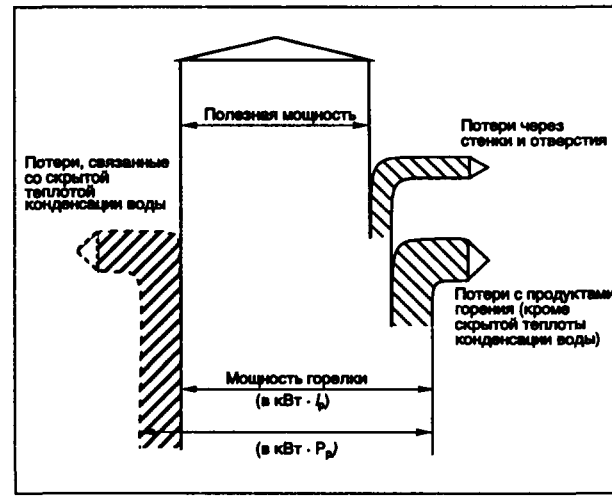
Энергетический баланс представляется диаграммой Сэнки (Sankey). Существует два типа диаграмм в зависимости от того, рекуперируется или нет скрытая теплота конденсации продуктов горения.

Для выражения энергетической эффективности установки наиболее часто используется величина полезного кпд, являющегося отношением полезной мощности к мощности горелки. Следует учитывать при этом, к чему отнесена мощность горелки: к высшей (Pp) или низшей (Ip) теплотворной способности газа. В последнем случае используется тот же термин "кпд", хотя теперь он может превышать единицу.

Если температура продуктов горения ниже точки росы содержащейся в них воды, то она конденсируется.



Установки с конденсацией.



Установки без конденсации.

Природа газов		Температура росы продуктов полного сгорания без избытка воздуха, °C	Температура росы продуктов полного сгорания при различном избытке воздуха		
			20%	40%	60%
Природные газы	Месторождение Лак	59,2	55,6	52,7	50,2
	Газ из Алжира (Гавр)	59,0	55,5	52,5	50,0
	Газ из Алжира (Фос-дю-Мер)	59,1	55,6	52,7	50,1
	Газ из Алжира (Монтуар-де-Бретань)	59,0	55,5	52,6	50,0
	Газ Северного моря	59,1	55,6	52,7	50,1
	Газ СССР	60,0	56,5	53,6	51,0
	Месторождение Гронинг	58,8	55,5	52,5	50,0
Попутный нефтяной газ	Коммерческий пропан	53,9	50,5	48,0	45,5
	Коммерческий бутан	53,6	48,5	47,5	45,0
Заводской газ	Коксовый газ 5,5 (кВт/м^3 (н))	61,7	58,5	55,5	53,0

Температура росы продуктов горения горючих газов распределительной сети.

1.10. МАТЕРИАЛЫ

1.10.1. Стальные газопроводные трубы

1.10.1.1. Соотношения между наиболее употребляемыми обозначениями

См. таблицу →

1.10.1.2. Стальные бесшовные газопроводные трубы внешним диаметром от 42,4 мм до 406,4 мм (по техническим спецификациям GDF 521 - 10)

См. нижеследующую таблицу и таблицу на с. 169

Принятые обозначения		Внешний диаметр	
Номинальный диаметр (DN)	Дюймы	мм **	Дюймы
25	1	33.7	1.325
32	1 1/4	42.4	1.670
40 *	1 1/2	48.3	1.900
50	2	60.3	2 3/8
65*	2 1/2	76.1	3
80	3	88.9	3 1/2
100	4	114.3	4 1/2
125 *	5	139.7	5 1/2
150	6	168.3	6 5/8
200	8	219.1	8 5/8
250	10	273	10 3/4
300	12	323.9	12 3/4
350	14	355.6	14
400	16	406.4	16
450	18	457	18
500	20	508	20
550	22	559	22
600	24	610	24
650	26	660	26
700	28	711	28
750	30	762	30
800	32	813	32
850	34	864	34
900	36	914	36
950 *	38	965	38
1 000 *	40	1 016	40
1 050 *	42	1 067	42
1 100 *	44	1 118	44
1 150 *	46	1 168	46
1 200 *	48	1 219	48
1 300 *	52	1 321	52
1 400 *	56	1 422	56

* Эти диаметры во Франции в настоящее время не используются для транспорта газа.
** Значения, которые нужно брать для регламентных расчетов.

Разновидность		$R\rho_{0,2}$ (МПа) минимальное	Сопротивление разрыву Rm, МПа		$\frac{R\rho_{0,2}}{Rm}$ максимальное	Минимальное удлинение A, %	Удельная работа деформации при ударной нагрузке, продольная, Дж/см² при 0°C (ударная прочность) *	
Обозначение Afnor (Афнор)	Обозначение API (АПИ)		Минимальное	Максимальное			средняя	единичная
TU E 220	Марка A	220	370	490	0,90	26	35	28
TU E 250	Марка B	250	410	530	0,90	23	35	28
TU E 275	A 48	275	470	590	0,90	23	35	28
TU E 290	X 42	290	420	540	0,90	23	35	28
TU E 320	X 46	320	460	580	0,90	21	35	28
TU E 360	X 52	360	510	630	0,90	20	35	28
TU E 415	X 60	415	550	700	0,90	18	35	28
TU E 450	X 65	450	530	680	0,90	18	35	28

* Испытания на ударную прочность проведены при 20°C для условий подземных хранилищ, в том числе газосборных сетей.

Механические характеристики труб.

Разновидность		Максимальное содержание углерода	Марганец	Максимальное содержание кремния	Максимальное содержание фосфора	Максимальное содержание серы	Ниобий	Максимальное содержание ванадия
Обозначение Afnor (Афнор)	Обозначение АПИ (API) сопоставимое							
TU E 220	Марка A	0,17	≤0,85	0,35	0,035	0,030		
TU E 250	Марка B	0,23	≤1,05	0,40	0,035	0,030	≤0,04	
TU E 275	A 48	0,23	≤1,15	0,40	0,035	0,030	≤0,04	
TU E 290	X 42	0,23	≤1,15	0,40	0,035	0,030	≤0,04	
TU E 320	X 46	0,23	≤1,40	0,40	0,035	0,030	≤0,04	
TU E 360	X 52	0,23	0,70 ≤ Mn ≤ 1,50	0,40	0,035	0,030	0,01 ≤ Nb ≤ 0,035	
TU E 415	X 60	0,20	0,70 ≤ Mn ≤ 1,60	0,40	0,035	0,030	0,01 ≤ Nb ≤ 0,035	0,06
TU E 450	X 65	0,20	0,70 ≤ Mn ≤ 1,60	0,50	0,035	0,030	0,01 ≤ Nb ≤ 0,035	0,06

Химический состав трубных сталей.

1.10.1.3. Трубы сварные стальные газопроводные

Марка		Предел упругости $Re_{0,2}$, МПа	Прочность при растяжении Rm, МПа		$\frac{Rp_{0,2}}{Rm}$
Обозначение Afnor (Афнор)	Обозначение АПИ (API)	Минимум	Минимум	Максимум	Максимум
(A34) TSE 210b	–	210	340	–	0,85
(A37) TSE 220b	Марка A	220	370	480	0,85
(A42) TSE 250b	Марка B	250	420	530	0,85
TSE 290b	X 42	290	420	530	0,85
TSE 320b	X 46	320	440	560	0,85
TSE 360b	X 52	360	480	620	0,85
TSE 415b	X 60	415	550	670	0,85
TSE 450b	X 65	450	560	680	0,85
TSE 480b	X 70	480	570	710	–
Минимальное удлинение и ударная прочность (продольная и поперечная) определяются по особым спецификациям.					

Механические характеристики труб.

Марка	Разновидность	C	Mn	Nb	V	C_{eq} * max
Марка A	C – Mn	0.11 - 0.15	0.70 - 1.00	–	–	–
Марка B	C – Mn	0.11 - 0.15	0.70 - 1.00	–	–	320
X 52	C – Mn – Nb	015 - 0.20	1.30 - 1.45	0.02 - 0.05	–	450
X 60	C – Mn – Nb – V	0.18 - 0.22	1.30 - 1.45	0.02 - 0.05	0.07 - 1.40	490
* эквивалент углерода.						

Химический состав материала труб (%): нормализованные стали.

Марка	Разновидность	C	Mn	Nb	V	C_{eq} * max
Марка A	C – Mn	0.11 - 0.15	0.70 - 1.00	–	–	–
Марка B	C – Mn	0.11 - 0.15	0.70 - 1.00	–	–	320
X 52	C – Mn – Nb	010 - 0.16	1.00 - 1.40	0.03 - 0.05	–	400
X 60	C – Mn – Nb	0.09 - 0.16	1.30 - 1.50	0.03 - 0.05	–	400
X 65	C – Mn – Nb – V	0.08 - 0.17	1.30 - 1.60	0.05 - 0.08	0.05 - 0.07	420
X 70	C – Mn – Nb – V	0.08 - 0.17	1.45 - 1.66	0.05 - 0.08	0.08 - 0.10	420
* Эквивалент углерода.						

Химический состав материала труб (%): катаная контролируемая сталь.

1.10.1.4. Каталог сварных стальных газопроводных труб

Д внешний, мм	Среднее рабочее избыточное давление, бар (PMS) (0,1 МПа)	Разновидность стали	Толщина стенки, мм									Заводское давление (Pu), бар			Предельное давление безопасности (PLS), бар			Масса, кг/м		
			Минимальная расчетная (Ec)			Минимальная возможная (Er)			Er + допуск											
			Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C
88,9	67,7	TSE 220	1,88	2,28	3,42	3,2	3,2	3,5	3,5	3,5	3,8	142,5	142,5	155,9	115,6	95,0	69,3	7,4	7,4	8,0
		TSE 250	1,65	2,01	3,01	3,2	3,2	3,2	3,5	3,5	3,5	161,9	161,9	161,9	131,3	107,9	72,0	7,4	7,4	7,4
	80	TSE 220	2,22	2,70	4,05	3,2	3,2	4,1	3,5	3,5	4,4	142,5	142,5	182,6	115,6	95,0	81,1	7,4	7,4	9,2
		TSE 250	1,95	2,38	3,56	3,2	3,2	3,6	3,5	3,5	3,9	161,9	161,9	182,2	131,3	107,9	80,9	7,4	7,4	8,2
114,3	67,7	TSE 220	2,41	2,94	4,40	3,2	3,2	4,4	3,5	3,5	4,7	110,8	110,8	152,4	89,9	73,9	67,7	9,6	9,6	12,7
		TSE 250	2,13	2,58	3,87	3,2	3,2	3,9	3,5	3,5	4,2	125,9	125,9	153,5	102,1	83,9	68,2	9,6	9,6	11,4
		TSE 290	1,83	2,23	3,34	3,2	3,2	3,4	3,5	3,5	3,7	146,1	146,1	155,2	118,5	97,4	69,0	9,6	9,6	10,1
	80	TSE 220	2,85	3,47	5,20	3,2	3,5	5,2	3,5	3,8	5,5	110,8	121,2	180,1	89,9	80,8	80,0	9,6	10,4	14,8
		TSE 250	2,51	3,05	4,58	3,2	3,2	4,6	3,5	3,5	4,9	125,9	125,9	181,1	102,1	83,9	80,4	9,6	9,6	13,2
		TSE 290	2,16	2,63	3,95	3,2	3,2	4,0	3,5	3,5	4,3	146,1	146,1	182,6	118,5	97,4	81,1	9,6	9,6	11,7
168,3	67,7	TSE 220	3,55	4,32	6,48	3,6	4,4	6,5	4,0	4,8	6,9	84,7	103,5	152,9	68,7	69,0	67,9	16,2	19,4	27,5
		TSE 250	3,13	3,80	5,70	3,5	3,8	5,7	3,9	4,2	6,1	93,5	101,6	152,4	75,9	67,7	67,7	15,8	16,9	24,4
		TSE 290	2,70	3,28	4,92	3,5	3,5	5,0	3,9	3,9	5,4	108,5	108,5	155,0	88,0	72,3	68,9	15,8	15,8	21,7
	80	TSE 220	4,20	5,10	7,65	4,2	5,1	7,7	4,6	5,5	8,1	98,8	120,0	181,1	80,1	80,0	80,5	18,6	22,1	32,0
		TSE 250	3,69	4,49	6,74	3,7	4,5	6,8	4,1	4,9	7,2	98,9	120,3	181,8	80,2	80,2	80,8	16,6	19,7	28,6
		TSE 290	3,18	3,87	5,81	3,5	3,9	5,9	3,9	4,3	6,3	108,5	120,9	183,0	88,0	80,6	81,3	15,8	17,4	25,2
219,1	67,7	TSE 220	4,62	5,62	8,43	4,7	5,7	8,5	5,1	6,1	8,9	84,9	103,0	153,6	68,9	68,6	68,2	26,9	32,0	46,1
		TSE 250	4,07	4,95	7,42	4,1	5,0	7,5	4,5	5,4	7,9	84,2	102,7	154,0	68,3	68,4	68,4	23,8	28,5	41,1
		TSE 290	3,51	4,27	6,40	3,6	4,3	6,4	4,0	4,7	6,8	85,7	102,4	152,4	69,5	68,3	67,7	21,2	24,9	35,6
		TSE 360	2,83	3,44	5,16	3,6	3,6	5,2	4,0	4,0	5,6	106,4	106,4	153,8	86,3	70,9	68,3	21,2	21,2	29,5
	80	TSE 220	5,46	6,64	9,96	5,5	6,7	10,0	5,9	7,1	10,4	99,4	121,1	180,7	80,6	80,7	80,3	31,0	37,1	53,5
		TSE 250	4,81	5,85	8,77	4,9	5,9	8,8	5,3	6,3	9,2	100,6	121,1	180,7	81,6	80,7	80,3	27,9	33,1	47,6
		TSE 290	4,14	5,04	7,56	4,2	5,1	7,6	4,6	5,5	8,0	100,0	121,5	181,0	81,1	81,0	80,4	24,3	29,0	41,6
		TSE 360	3,34	4,06	6,09	3,6	4,1	6,1	4,0	4,5	6,5	106,4	121,2	180,4	86,3	80,8	80,1	21,2	23,8	34,1
273	67,7	TSE 220	5,76	7,01	10,51	5,8	7,1	10,6	6,2	7,5	11,0	84,1	102,9	153,7	68,2	68,6	68,3	40,8	49,1	71,1
		TSE 250	5,07	6,17	9,25	5,1	6,2	9,3	5,5	6,6	9,7	84,0	102,2	153,3	68,1	68,1	68,1	36,3	43,4	63,0
		TSE 290	4,37	5,32	7,97	4,4	5,4	8,0	4,8	5,8	8,4	84,1	103,2	152,9	68,2	68,8	67,9	31,7	38,2	54,8
		TSE 360	3,52	4,28	6,42	3,6	4,3	6,5	4,0	4,7	6,9	85,4	102,0	154,2	69,3	68,0	68,5	26,5	31,1	45,3
		TSE 415	3,06	3,72	5,57	3,6	3,8	5,6	4,0	4,2	6,0	98,5	103,9	153,2	79,9	69,3	68,1	26,5	27,8	39,5
	80	TSE 220	6,80	8,28	12,41	6,8	8,3	12,5	7,2	8,7	12,9	98,6	120,4	181,3	80,0	80,2	80,5	47,2	56,7	82,7
		TSE 250	5,99	7,28	10,92	6,0	7,3	11,0	6,4	7,7	11,4	98,9	120,3	181,3	80,2	80,2	80,5	42,1	50,4	73,5
		TSE 290	5,16	6,28	9,42	5,2	6,3	9,5	5,6	6,7	9,9	99,4	120,4	181,6	80,6	80,3	80,7	36,9	44,0	64,2
		TSE 360	4,16	5,06	7,59	4,2	5,1	7,6	4,6	5,5	8,0	99,7	121,0	180,4	80,8	80,7	80,1	30,4	36,3	52,3
		TSE 415	3,61	4,39	6,58	3,7	4,4	6,6	4,1	4,8	7,0	101,2	120,4	180,6	82,1	80,2	80,2	27,2	31,7	45,9

Давление (x) = (2 · x · Re · Er)/Д внешн.; Pu = (0,9) давления; PLS = (0,73) давления для категории A; PLS = (0,6) давления для категории B; PLS = (0,4) давления для категории C.
Ec = (PMS · Д внешн.)/(2 · x · Re); x = 0,73 для категории A; x = 0,6 для категории B); x = 0,4 для категории C.
(Re – предел упругости стали при 0,2% остаточном растяжении). Допуск = (–0; +0,3) для Д внешн. ≤ 114,3; допуск = (–0; +0,4) для 114,3 ≤ Д внешн. ≤ 355,6 мм.
Масса = (Д внешн. – Er) · Er · 0,0246615.

Сварные трубы.

Д внешний, мм	Среднее рабочее избыточное давление, бар (PMS) (0,1 МПа)	Разновидность стали	Толщина стенки, мм									Заводское давление (Pu), бар			Предельное давление безопасности (PLS), бар			Масса, кг/м		
			Минимальная расчетная (Ec)			Минимальная возможная (Er)			Er + допуск											
			Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C
323,9	67,7	TSE 220	6,83	8,31	12,46	6,9	8,4	12,5	7,3	8,8	12,9	84,3	102,7	152,8	68,4	68,4	67,9	57,0	68,4	98,9
		TSE 250	6,01	7,31	10,97	6,1	7,4	11,0	6,5	7,8	11,4	84,7	102,8	152,8	68,7	68,5	67,9	50,9	60,8	87,9
		TSE 290	5,18	6,31	9,46	5,2	6,4	9,5	5,6	6,8	9,9	83,8	103,1	153,1	67,9	68,7	68,0	44,0	53,2	76,7
		TSE 360	4,18	5,08	7,62	4,2	5,1	7,7	4,6	5,5	8,1	84,3	102,0	154,0	68,1	68,0	68,4	36,2	43,2	63,1
		TSE 415	3,62	4,41	6,61	3,7	4,5	6,7	4,1	4,9	7,1	85,3	103,7	154,5	69,2	69,1	68,6	32,3	38,5	55,5
	80	TSE 220	8,07	9,82	14,73	8,1	9,9	14,8	8,5	10,3	15,2	99,0	121,0	180,9	80,3	80,7	80,4	66,1	79,7	115,7
		TSE 250	7,10	8,64	12,96	7,1	8,7	13,0	7,5	9,1	13,4	98,6	120,8	180,6	80,0	80,5	80,2	58,5	70,6	102,6
		TSE 290	6,12	7,45	11,17	6,2	7,5	11,2	6,6	7,9	11,6	99,9	120,8	180,5	81,0	80,5	80,2	51,6	61,6	89,3
		TSE 360	4,93	6,00	9,00	5,0	6,0	9,0	5,4	6,4	9,4	100,0	120,0	180,0	81,1	80,0	80,0	42,4	50,1	72,9
		TSE 415	4,28	5,21	7,81	4,3	5,3	7,9	4,7	5,7	8,3	99,1	122,2	182,2	80,4	81,4	80,9	37,0	44,7	64,6
355,6	67,7	TSE 220	7,50	9,12	13,68	7,5	9,2	13,7	7,9	9,6	14,1	83,5	102,4	152,5	67,7	68,3	67,8	67,7	81,9	118,7
		TSE 250	6,60	8,03	12,04	6,6	8,1	12,1	7,0	8,5	12,5	83,6	102,5	153,1	67,7	68,3	68,0	60,1	72,8	105,8
		TSE 290	5,69	6,92	10,38	5,7	7,0	10,4	6,1	7,4	10,8	83,6	102,7	152,6	67,8	68,5	67,8	52,6	63,5	91,8
		TSE 360	4,59	5,58	8,36	4,6	5,6	8,4	5,0	6,0	8,8	83,8	102,0	153,0	68,0	68,0	68,0	43,2	51,7	75,3
		TSE 415	3,98	4,84	7,26	4,0	4,9	7,3	4,4	5,3	7,7	84,0	102,9	153,3	68,1	68,6	68,1	38,1	45,8	66,1
	80	TSE 220	8,86	10,78	16,17	8,9	10,8	16,2	9,3	11,2	16,6	99,1	120,2	180,4	80,4	80,1	80,1	79,4	95,1	138,8
		TSE 250	7,80	9,49	14,23	7,8	9,5	14,3	8,2	9,9	14,7	98,7	120,2	180,9	80,0	80,1	80,4	70,3	84,4	123,6
		TSE 290	6,72	8,18	12,27	6,8	8,2	12,3	7,2	8,6	12,7	99,8	120,3	180,5	80,9	80,2	80,2	61,9	73,6	107,4
		TSE 360	5,42	6,59	9,88	5,5	6,6	9,9	5,9	7,0	10,3	100,2	120,2	180,4	81,3	80,1	80,1	50,9	60,2	87,7
		TSE 415	4,70	5,72	8,57	4,7	5,8	8,6	5,1	6,2	9,0	98,7	121,8	180,6	80,0	81,2	80,3	44,1	53,4	76,9
406,4	67,7	TSE 290	6,50	7,91	11,86	6,5	8,0	11,9	7,0	8,5	12,4	83,4	102,7	152,8	67,7	68,5	67,9	68,9	83,4	120,5
		TSE 360	5,24	6,37	9,56	5,3	6,4	9,6	5,8	6,9	10,1	84,5	102,0	153,0	68,5	68,0	68,0	57,3	68,0	98,7
		TSE 415	4,55	5,53	8,29	4,6	5,6	8,3	5,1	6,1	8,8	84,5	102,9	152,5	68,5	68,6	67,8	50,5	60,2	86,3
		TSE 450	4,19	5,10	7,65	4,2	5,1	7,7	4,7	5,6	8,2	83,7	101,6	153,4	67,9	67,7	68,2	46,6	55,4	80,5
	80	TSE 290	7,68	9,35	14,02	7,7	9,4	14,1	8,2	9,9	14,6	98,9	120,7	181,1	80,2	80,5	80,5	80,5	96,8	141,1
		TSE 360	6,19	7,53	11,29	6,2	7,6	11,3	6,7	8,1	11,8	98,8	121,1	180,1	80,1	80,7	80,0	66,0	79,6	114,8
		TSE 415	5,37	6,53	9,80	5,4	6,6	9,8	5,9	7,1	10,3	99,2	121,3	180,1	80,5	80,8	80,0	58,3	69,9	100,6
		TSE 450	4,95	6,03	90,4	5,0	6,1	9,1	5,5	6,6	9,6	99,6	121,5	181,3	80,8	81,0	80,6	54,4	65,1	93,9
457,2	67,7	TSE 290	7,32	8,90	13,35	7,4	8,9	13,4	7,9	9,4	13,9	84,4	101,6	153,0	68,5	67,7	68,0	87,5	103,8	152,0
		TSE 360	5,89	7,17	10,75	5,9	7,2	10,8	6,4	7,7	11,3	83,6	102,0	153,0	67,8	68,0	68,0	71,2	85,4	124,3
		TSE 415	5,11	6,22	9,33	5,2	6,3	9,4	5,7	6,8	9,9	84,9	102,9	153,5	68,9	68,6	68,2	63,5	75,5	109,2
		TSE 450	4,72	5,74	8,60	4,8	5,8	8,6	5,3	6,3	9,1	85,0	102,7	152,3	68,9	68,5	67,7	59,1	70,1	100,6
	80	TSE 290	8,64	10,52	15,77	8,7	10,6	15,8	9,2	11,1	16,3	99,3	121,0	180,4	80,5	80,6	80,1	101,6	122,1	177,2
		TSE 360	6,96	8,47	12,70	7,0	8,5	12,7	7,5	9,0	13,2	99,2	120,4	180,0	80,4	80,3	80,0	83,2	99,5	144,5
		TSE 415	6,04	7,35	11,02	6,1	7,4	11,1	6,6	7,9	11,6	99,6	120,9	181,3	80,8	80,6	80,6	73,3	87,5	127,5
		TSE 450	5,57	6,78	10,16	5,6	6,8	10,2	6,1	7,3	10,7	99,2	120,4	180,7	80,4	80,3	80,3	67,9	81,0	117,8

Давление (x) = (2 · x · Re · Er)/Д внешн.; Pu = (0,9) давления; PLS = (0,73) давления для категории A; PLS = (0,6) давления для категории B; PLS = (0,4) давления для категории C.
Ec = (PMS · Д внешн.)/(2 · x · Re); x = 0,73 для категории A; x = 0,6 для категории B; x = 0,4 для категории C.
(Re – предел упругости стали при 0,2% остаточном растяжении). Допуск = (–0; +0,4) для 114,3 ≤ Д внешн. ≤ 355,6; допуск = = (–0; +0,5) для 355,6 < Д внешн.
Масса = (Д внешн. – Er) · Er · 0,0246615.

Сварные трубы (Продолжение).

Д внешний, мм	Среднее рабочее избыточное давление, бар (PMS) (0,1 МПа)	Разновидность стали	Толщина стенки, мм									Заводское давление (Pu), бар			Предельное давление безопасности (PLS), бар			Масса, кг/м		
			Минимальная расчетная (Ec)			Минимальная возможная (Er)			Er + допуск											
			Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат .A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C
508	67,7	TSE 290	8,13	9,89	14,83	8,2	9,9	14,9	8,7	10,4	15,4	84,2	101,7	153,1	68,3	67,8	68,0	107,1	127,6	187,1
		TSE 360	6,55	7,97	11,95	6,6	8,0	12,0	7,1	8,5	12,5	84,1	102,0	153,0	68,2	68,0	68,0	87,7	104,7	152,7
		TSE 415	5,68	6,91	10,36	5,7	7,0	10,4	6,2	7,5	10,9	83,8	102,9	152,9	67,9	68,6	67,9	76,7	92,6	133,6
		TSE 450	5,24	6,37	9,56	5,3	6,4	9,6	5,8	6,9	10,1	84,5	102,0	153,0	68,5	68,0	68,0	71,8	85,3	124,0
	80	TSE 290	9,60	11,68	17,52	9,6	11,7	17,6	10,1	12,2	18,1	98,6	120,2	180,8	80,0	80,1	80,3	124,0	149,2	218,7
		TSE 360	7,74	9,41	14,12	7,8	9,5	14,2	8,3	10,0	14,7	99,5	121,1	181,1	80,7	80,7	80,5	102,3	122,8	178,8
		TSE 415	6,71	8,17	12,25	6,8	8,2	12,3	7,3	8,7	12,8	100,0	120,5	180,8	81,1	80,3	80,3	90,1	107,1	156,3
		TSE 450	6,19	7,53	11,29	6,2	7,6	11,3	6,7	8,1	11,8	98,8	121,1	180,1	80,1	80,7	80,0	82,8	99,9	144,4
558,8	67,7	TSE 290	8,94	10,88	16,31	9,0	10,9	16,4	9,5	11,4	16,9	84,0	101,8	153,2	68,2	67,8	68,0	128,7	153,9	225,9
		TSE 360	7,20	8,76	13,14	7,2	8,8	13,2	7,7	9,3	13,7	83,5	102,0	153,0	67,7	68,0	68,0	104,7	126,0	184,2
		TSE 415	6,25	7,60	11,40	6,3	7,6	11,4	6,8	8,1	11,9	84,2	101,6	152,4	68,3	67,7	67,7	92,6	110,0	160,5
		TSE 450	5,76	7,01	10,51	5,8	7,1	10,6	6,3	7,6	11,1	84,0	102,9	153,6	68,2	68,6	68,2	85,8	103,3	149,9
	80	TSE 290	10,56	12,58	19,27	10,6	12,9	19,3	11,1	13,4	19,8	99,0	120,5	180,2	80,3	80,3	80,1	149,9	180,2	263,2
		TSE 360	8,51	10,35	15,53	8,6	10,4	15,6	9,1	10,9	16,1	99,7	120,6	180,9	80,9	80,4	80,4	123,4	147,3	215,5
		TSE 415	7,38	8,98	13,47	7,4	9,0	13,5	7,9	9,5	14,0	98,9	120,3	180,4	80,2	80,2	80,2	107,3	128,7	188,1
		TSE 450	6,81	8,28	12,42	6,9	8,3	12,5	7,4	8,8	13,0	100,0	120,3	181,2	81,1	80,2	80,5	100,6	119,4	175,0
609,6	67,7	TSE 360	7,86	9,56	14,33	7,9	9,6	14,4	8,4	10,1	14,9	83,9	102,0	153,0	68,1	68,0	68,0	124,5	149,3	218,5
		TSE 415	6,82	8,29	12,44	6,9	8,3	12,5	7,4	8,8	13,0	84,5	101,7	153,1	68,5	67,8	68,0	108,9	130,4	191,3
		TSE 450	6,29	7,65	11,47	6,3	7,7	11,5	6,8	8,2	12,1	83,7	102,3	152,8	67,9	68,2	67,9	101,1	121,6	176,9
		TSE 480	5,89	7,17	10,75	5,9	7,2	10,8	6,4	7,7	11,3	83,6	102,0	153,0	67,8	68,0	68,0	95,2	114,3	166,7
	80	TSE 360	9,28	11,29	16,94	9,3	11,3	17,0	9,8	11,8	17,5	98,8	120,1	180,7	80,1	80,0	80,3	145,0	174,0	255,5
		TSE 415	8,05	9,80	14,69	8,1	9,8	14,7	8,6	10,3	15,2	99,2	120,0	180,1	80,5	80,0	80,0	127,5	152,2	222,8
		TSE 450	7,43	9,04	13,55	7,5	9,1	13,6	8,0	9,6	14,1	99,6	120,9	180,7	80,8	80,6	80,3	118,7	142,1	207,1
		TSE 480	6,96	8,47	12,70	7,0	8,5	12,7	7,5	9,0	13,2	99,2	120,4	180,0	80,4	80,3	80,0	111,4	133,3	194,1
711,2	67,7	TSE 360	9,17	11,15	16,72	9,2	11,2	16,8	9,7	11,7	17,3	83,8	102,0	153,0	68,0	68,0	68,0	167,8	201,8	296,1
		TSE 415	7,95	9,67	14,51	8,0	9,7	14,6	8,5	10,2	15,1	84,0	101,8	153,3	68,1	67,9	68,1	147,3	176,3	259,2
		TSE 450	7,33	8,92	13,38	7,4	9,0	13,4	7,9	9,5	13,9	84,2	102,5	152,6	68,3	68,3	67,8	137,0	164,4	239,0
		TSE 480	6,88	8,36	12,54	6,9	8,4	12,6	7,4	8,9	13,1	83,8	102,0	153,0	68,0	68,0	68,0	128,4	154,1	225,5
	80	TSE 360	10,83	13,18	19,76	10,9	13,2	19,8	11,4	13,7	20,3	99,3	120,2	180,4	80,5	80,1	80,1	196,7	235,7	345,9
		TSE 415	9,40	11,43	17,14	9,4	11,5	17,2	9,9	12,1	17,7	98,7	120,7	180,6	80,0	80,5	80,3	171,2	206,9	302,7
		TSE 450	8,66	10,54	15,81	8,7	10,6	15,9	9,2	11,1	16,4	99,0	120,7	181,0	80,3	80,4	80,4	159,3	191,6	281,0
		TSE 480	8,12	9,88	14,82	8,2	9,9	14,9	8,7	10,4	15,4	99,6	120,2	181,0	80,8	80,1	80,4	150,7	179,7	264,3

Давление (x) = (2 · x · Re · Er)/Д внешн.; Pu = (0,9) давления; PLS = (0,73) давления для категории A; PLS = (0,6) давления для категории B; PLS = (0,4) давления для категории C.
Ec = (PMS · Д внешн.)/(2 · x · Re); x = 0,73 для категории A; x = 0,6 для категории B; x = 0,4 для категории C.
(Re – предел упругости стали при 0,2% остаточном растяжении). Допуск = (–0; +0,5) для 355,6< Д внешн.
Масса = (Д внешн. – Er) · Er · 0,0246615.

Сварные трубы (Продолжение).

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Д внешний, мм	Среднее рабочее избыточное давление, бар (PMS) (0,1 МПа)	Разновидность стали	Толщина стенки, мм									Заводское давление (Pu), бар			Предельное давление безопасности (PLS), бар			Масса, кг/м		
			Минимальная расчетная (Ec)			Минимальная возможная (Er)			Er + допуск											
			Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C
762	67,7	TSE 360	9,82	11,95	17,92	9,9	12,0	18,0	10,4	12,5	18,5	84,1	102,0	153,0	68,2	68,0	68,0	192,8	231,0	339,2
		TSE 415	8,52	10,36	15,54	8,6	10,4	15,6	9,1	10,9	16,1	84,3	101,9	152,9	68,3	67,9	67,9	169,0	201,9	296,2
		TSE 450	7,86	9,56	14,33	7,9	9,6	14,4	8,4	10,1	14,9	83,9	102,0	153,0	68,1	68,0	68,0	156,1	187,3	274,5
		TSE 480	7,37	8,96	13,44	7,4	9,0	13,5	7,9	9,5	14,0	83,9	102,0	153,0	68,0	68,0	68,0	146,9	176,3	258,3
	80	TSE 360	11,60	14,12	21,17	11,6	14,2	21,2	12,1	14,7	21,7	98,6	120,7	180,2	80,0	80,5	80,1	223,8	270,9	396,2
		TSE 415	10,07	12,25	18,37	10,1	12,3	18,4	10,6	12,8	18,9	99,0	120,5	180,3	80,3	80,3	80,1	196,4	236,5	346,4
		TSE 450	9,28	11,29	16,94	9,3	11,3	17,0	9,8	11,8	17,5	98,8	120,1	180,7	80,1	80,0	80,3	181,8	218,3	321,4
		TSE 480	8,70	10,59	15,88	8,7	10,6	15,9	9,2	11,1	16,4	98,6	120,1	180,2	80,0	80,1	80,1	170,8	205,6	301,6
812,8	67,7	TSE 360	10,47	12,74	19,11	10,5	12,8	19,2	11,0	13,3	19,7	83,7	102,0	153,0	67,9	68,0	68,0	217,5	262,2	385,3
		TSE 415	9,09	11,05	16,58	9,1	11,1	16,6	9,6	11,6	17,1	83,6	102,0	152,5	67,8	68,0	67,8	190,2	229,2	335,6
		TSE 450	8,38	10,20	15,29	8,4	10,2	15,3	8,9	10,7	15,8	83,7	101,6	152,4	67,9	67,7	67,7	176,4	211,7	310,6
		TSE 480	7,86	9,56	14,33	7,9	9,6	14,4	8,4	10,1	14,9	83,9	102,0	153,0	68,1	68,0	68,0	166,6	199,9	293,2
	80	TSE 360	12,38	15,06	22,58	12,4	15,1	22,6	12,9	15,6	23,1	98,8	120,3	180,1	80,1	80,2	80,0	254,5	306,7	449,9
		TSE 415	10,74	13,06	19,59	10,8	13,1	19,6	11,3	13,6	20,1	99,2	120,4	180,1	80,5	80,2	80,0	223,4	268,0	392,9
		TSE 450	9,90	12,05	18,07	9,9	12,1	18,1	10,4	12,6	18,6	98,6	120,5	180,3	80,0	80,3	80,1	205,8	248,7	364,3
		TSE 480	9,28	11,29	16,94	9,3	11,3	17,0	9,8	11,8	17,5	98,8	120,1	180,7	80,1	80,0	80,3	194,1	233,1	343,2
914,4	67,7	TSE 360	11,78	14,33	21,50	11,8	14,4	21,5	12,3	14,9	22,0	83,6	102,0	152,3	67,8	68,0	67,7	273,6	330,5	484,2
		TSE 415	10,22	12,44	18,65	10,3	12,5	18,7	10,8	13,0	19,2	84,1	102,1	152,7	68,2	68,0	67,9	240,7	289,0	423,9
		TSE 450	9,43	11,47	17,20	9,5	11,5	17,2	10,0	12,0	17,7	84,1	101,8	152,3	68,2	67,9	67,7	223,0	267,0	391,4
		TSE 480	8,84	10,75	16,13	8,9	10,8	16,2	9,4	11,3	16,7	84,1	102,0	153,0	68,2	68,0	68,0	209,8	251,7	369,7
	80	TSE 360	13,92	16,94	25,40	14,0	17,0	25,4	14,5	17,5	25,9	99,2	120,4	180,0	80,4	80,3	80,0	321,8	387,1	567,5
		TSE 415	12,08	14,69	22,04	12,1	14,7	22,1	12,6	15,2	22,6	98,8	120,0	180,5	80,1	80,0	80,2	280,2	337,1	497,0
		TSE 450	11,14	13,55	20,32	11,2	13,6	20,4	11,7	14,1	20,9	99,2	120,4	180,7	80,4	80,3	80,3	260,5	313,1	460,5
		TSE 480	10,44	12,70	19,05	10,5	12,7	19,1	11,0	13,2	19,6	99,2	120,0	180,4	80,4	80,0	80,2	245,1	293,4	432,5
1 016,0	67,7	TSE 360	13,08	15,93	23,88	13,1	16,0	23,9	13,6	16,6	24,4	83,5	102,0	152,4	67,7	68,0	67,7	336,2	409,1	596,7
		TSE 415	11,36	13,82	20,72	11,4	13,9	20,8	11,9	14,4	21,2	83,8	102,2	152,9	67,9	68,1	67,9	294,7	355,7	520,1
		TSE 450	10,47	12,74	19,11	10,5	12,8	19,2	11,0	13,3	19,7	83,7	102,0	153,0	67,9	68,0	68,0	272,6	328,9	484,0
		TSE 480	9,82	11,95	17,92	9,9	12,0	18,0	10,4	12,5	18,5	84,1	102,0	153,0	68,2	68,0	68,0	257,9	309,3	455,1
	80	TSE 360	15,47	18,82	28,23	15,5	18,9	28,3	16,0	19,4	28,8	98,8	120,5	180,5	80,1	80,3	80,2	394,6	476,8	701,2
		TSE 415	13,42	16,33	24,49	13,5	16,4	24,5	14,0	16,9	25,0	99,2	120,5	180,1	80,5	80,3	80,0	346,0	416,4	611,0
		TSE 450	12,38	15,06	22,58	12,4	15,1	22,6	12,9	15,6	23,1	98,8	120,3	180,1	80,1	80,2	80,0	319,1	384,9	565,6
		TSE 480	11,60	14,12	21,17	11,6	14,2	21,2	12,1	14,7	21,7	98,6	120,7	180,2	80,0	80,5	80,1	299,6	363,0	520,1

Давление (x) = (2 · x · Re · Er)/Д внешн.; Pu = (0,9) давления; PLS = (0,73) давления для категории A; PLS = (0,6) давления для категории B; PLS = (0,4) давления для категории C.
Ec = (PMS · Д внешн.)/(2 · x · Re); x = 0,73 для категории A; x = 0,6 для категории B; x = 0,4 для категории C.
(Re – предел упругости стали при 0,2% остаточном растяжении). Допуск = (–0; +0,5) для 355,6< Д внешн.
Масса = (Д внешн. – Er) · Er · 0,0246615.

Сварные трубы (Продолжение).

Д внешний, мм	Среднее рабочее избыточное давление, бар (PMS) (0,1 МПа)	Разновидность стали	Толщина стенки, мм									Заводское давление (Pu), бар			Предельное давление безопасности (PLS), бар			Масса, кг/м		
			Минимальная расчетная (Ec)			Минимальная возможная (Er)			Er + допуск											
			Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C
1 117,6	67,7	TSE 360	14,40	17,52	26,28	14,4	17,6	26,3	14,9	18,1	26,8	83,5	102,0	152,5	67,7	68,0	67,7	405,2	490,8	720,9
		TSE 415	12,49	15,20	22,79	12,5	15,2	22,8	13,0	15,7	23,3	83,5	101,6	152,4	67,7	67,7	67,7	354,1	426,6	628,8
		TSE 450	11,52	14,02	21,02	11,6	14,1	21,1	12,1	14,6	21,6	84,0	102,2	152,9	68,2	68,1	67,9	329,9	397,1	583,8
		TSE 480	10,80	13,14	19,71	10,8	13,2	19,8	11,3	13,7	20,3	83,5	102,0	153,0	67,7	68,0	68,0	308,3	373,0	549,3
	80	TSE 360	17,02	20,70	31,05	17,1	20,7	31,1	17,6	21,2	31,6	99,1	120,0	180,3	80,4	80,0	80,1	477,4	573,2	846,3
		TSE 415	14,76	17,96	26,94	14,8	18,0	27,0	15,3	18,5	27,5	98,9	120,3	180,4	80,2	80,2	80,2	415,9	501,5	739,3
		TSE 450	13,61	16,56	24,84	13,7	16,6	24,9	14,2	17,1	25,4	99,3	120,3	180,4	80,5	80,2	80,2	386,4	464,1	684,2
		TSE 480	12,76	15,53	23,29	12,8	15,6	23,3	13,3	16,1	23,8	98,9	120,6	180,1	80,2	80,4	80,0	362,2	437,4	642,0
1 219,2	67,7	TSE 360	15,71	19,11	28,66	15,8	19,2	28,7	16,3	19,7	29,2	83,9	102,0	152,5	68,1	68,0	67,8	483,5	582,8	856,9
		TSE 415	13,63	16,58	24,87	13,7	16,6	24,9	14,2	17,1	25,4	83,9	101,7	152,5	68,0	67,8	67,8	422,0	506,9	747,8
		TSE 450	12,57	15,29	22,93	12,6	15,3	23,0	13,1	15,8	23,5	83,7	101,6	152,8	67,9	67,7	67,9	389,6	468,9	693,0
		TSE 480	11,78	14,33	21,50	11,8	14,4	21,5	12,3	14,9	22,0	83,6	102,0	152,3	67,8	68,0	67,7	366,1	442,5	649,5
	80	TSE 360	18,56	22,58	33,87	18,6	22,6	33,9	19,1	23,1	34,4	98,8	120,1	180,1	80,1	80,0	80,0	565,3	681,4	1005,1
		TSE 415	16,10	19,59	29,38	16,1	19,6	29,4	16,6	20,1	29,9	98,6	120,0	180,1	80,0	80,0	80,0	492,3	594,4	877,0
		TSE 450	14,85	18,07	27,09	14,9	18,1	27,1	15,4	18,6	27,6	99,0	120,2	180,0	80,3	80,1	80,0	457,2	550,7	811,1
		TSE 480	13,92	16,94	25,40	14,0	17,0	25,4	14,5	17,5	25,9	99,2	120,4	180,0	80,4	80,3	80,0	430,8	518,6	762,2

Давление (x) = (2 · x · Re · Er)/Д внешн.; Pu = (0,9) давления; PLS = (0,73) давления для категории A; PLS = (0,6) давления для категории B; PLS = (0,4) давления для категории C.
Ec = (PMS · Д внешн.)/(2 · x · Re); x = 0,73 для категории A; x = 0,60 для категории B); x = 0,40 для категории C.
(Re – предел упругости стали при 0,2% остаточном растяжении). Допуск = (–0 - +0,5) для 355,6 < Д внешн.
Масса = (Д внешн. – Er) · Er · 0,0246615.

Сварные трубы (Окончание).

1.10.1.5. Каталог стальных бесшовных газопроводных труб

См. таблицу на с. 175 - 176.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Д внешний, мм	Среднее рабочее избыточное давление, бар (PMS) (0,1 МПа)	Разновидность стали	Толщина стенки, мм									Заводское давление (Pu), бар			Предельное давление безопасности (PLS), бар			Масса, кг/м		
			Минимальная расчетная (Ec)			Минимальная возможная (Er)			Er + допуск											
			Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C
88,9	67,7	TSE 220	1,88	2,28	3,42	3,2	3,2	3,9	2,9	2,9	3,5	129,1	129,1	155,9	104,7	86,1	69,3	6,8	6,8	8,2
		TSE 250	1,65	2,01	3,01	3,2	3,2	3,4	2,9	2,9	3,1	146,8	146,8	156,9	119,0	97,8	69,7	6,8	6,8	7,2
	80	TSE 220	2,22	2,70	4,05	3,2	3,25	4,6	2,9	2,9	4,1	129,1	129,1	182,6	104,7	86,1	81,1	6,8	6,8	9,6
		TSE 250	1,95	2,38	3,56	3,2	3,2	4,0	2,9	2,9	3,6	146,8	146,8	182,2	119,0	97,8	80,9	6,8	6,8	8,4
114,3	67,7	TSE 220	2,41	2,94	4,40	3,6	3,6	4,9	3,2	3,2	4,4	110,8	110,8	152,4	89,9	73,9	67,7	9,8	9,8	13,2
		TSE 250	2,13	2,58	3,87	3,6	3,6	4,3	3,2	3,2	3,9	125,9	125,9	153,5	102,1	83,9	68,2	9,8	9,8	11,7
		TSE 290	1,83	2,23	3,34	3,6	3,6	3,8	3,2	3,2	3,4	146,1	146,1	155,2	118,5	97,4	69,0	9,8	9,8	10,4
	80	TSE 220	2,85	3,47	5,20	3,6	3,9	5,8	3,2	3,5	5,2	110,8	121,2	180,1	89,9	80,8	80,0	9,8	10,6	15,5
		TSE 250	2,51	3,05	4,58	3,6	3,6	5,1	3,2	3,2	4,6	125,9	125,9	181,1	102,1	83,9	80,4	9,8	9,8	13,7
		TSE 290	2,16	2,63	3,95	3,6	3,6	4,5	3,2	3,2	4,0	146,1	182,6	182,6	118,5	97,4	81,1	9,8	9,8	12,2
168,3	67,7	TSE 220	3,55	4,32	6,48	4,8	4,9	7,3	4,3	4,4	6,5	101,1	103,5	152,9	82,0	69,0	67,9	19,4	19,7	29,0
		TSE 250	3,13	3,80	5,70	4,8	4,8	6,4	4,3	4,3	5,7	114,9	114,9	152,4	93,2	76,6	67,7	19,4	19,4	25,6
		TSE 290	2,70	3,28	4,92	4,8	4,8	5,6	4,3	4,3	5,0	133,3	133,3	155,0	108,1	88,9	68,9	19,4	19,4	22,5
	80	TSE 220	4,20	5,10	7,65	4,8	5,7	8,6	4,3	5,1	7,7	101,1	120,0	181,1	82,0	80,0	80,5	19,4	22,9	33,9
		TSE 250	3,69	4,49	6,74	4,8	5,0	7,6	4,3	4,5	6,8	114,9	120,3	181,8	93,2	80,2	80,8	19,4	20,1	30,1
		TSE 290	3,18	3,87	5,81	4,8	4,8	6,6	4,3	4,3	5,9	133,3	133,3	183,0	108,1	88,9	81,3	19,4	19,4	26,3
219,3	67,7	TSE 220	4,62	5,62	8,43	5,6	6,4	9,5	5,0	5,7	8,5	90,3	103,0	153,6	73,3	68,6	68,2	29,5	33,6	49,1
		TSE 250	4,07	4,95	7,42	5,6	5,6	8,4	5,0	5,0	7,5	102,7	102,7	154,0	83,3	68,4	68,4	29,5	29,5	43,6
		TSE 290	3,51	4,27	6,40	5,6	5,6	7,2	5,0	5,0	6,4	119,1	119,1	152,4	96,6	79,4	67,7	29,5	29,5	37,6
		TSE 360	2,83	3,44	5,16	5,6	5,6	5,8	5,0	5,0	5,2	147,8	147,8	153,8	119,9	98,5	68,3	29,5	29,5	30,5
	80	TSE 220	5,46	6,64	9,96	6,1	7,5	11,2	5,5	6,7	10,0	99,4	121,1	180,7	80,6	80,7	80,3	32,0	39,1	57,4
		TSE 250	4,81	5,85	8,77	5,6	6,6	9,9	5,0	5,9	8,8	102,7	121,1	180,7	83,3	80,7	80,3	29,5	34,6	51,1
		TSE 290	4,14	5,04	7,56	5,6	5,7	8,5	5,0	5,1	7,6	119,1	121,5	181,0	96,6	81,0	80,4	29,5	30,0	44,1
		TSE 360	3,34	4,06	6,09	5,6	5,6	6,8	5,0	5,0	6,1	147,8	147,8	180,4	119,9	98,5	80,1	29,5	29,5	35,6
273	67,7	TSE 220	5,76	7,01	10,51	6,5	7,9	11,9	5,8	7,1	10,6	84,1	102,9	153,7	68,2	68,6	68,3	42,7	51,6	76,6
		TSE 250	5,07	6,17	9,25	6,4	6,9	10,4	5,7	6,2	9,3	93,9	102,2	153,3	76,2	68,1	68,1	42,1	45,3	67,4
		TSE 290	4,37	5,32	7,97	6,4	6,4	9,0	5,7	5,7	8,0	108,9	108,9	152,9	88,4	72,6	67,9	42,1	42,1	58,6
		TSE 360	3,52	4,28	6,42	6,4	6,4	7,3	5,7	5,7	6,5	135,3	135,3	154,2	109,7	90,2	68,5	42,1	42,1	47,8
		TSE 415	3,06	3,72	5,57	6,4	6,4	6,4	5,7	5,7	5,7	155,9	155,9	155,9	126,5	103,9	69,3	42,1	42,1	42,1
	80	TSE 220	6,80	8,28	12,41	7,6	9,3	14,0	6,8	8,3	12,5	98,6	120,4	181,3	80,0	80,2	80,5	49,7	60,5	89,4
		TSE 250	5,99	7,28	10,92	6,7	8,2	12,3	6,0	7,3	11,0	98,9	120,3	181,3	80,2	80,2	80,5	44,0	53,5	79,1
		TSE 290	5,16	6,28	9,42	6,4	7,0	10,6	5,7	6,3	9,5	108,9	120,4	181,6	88,4	80,3	80,7	42,1	46,0	68,6
		TSE 360	4,16	5,06	7,59	6,4	6,4	8,5	5,7	5,7	7,6	135,3	135,3	180,4	109,7	90,2	80,1	42,1	42,1	55,4
		TSE 415	3,61	4,39	6,58	6,4	6,4	7,4	5,7	5,7	6,6	155,9	155,9	180,6	126,5	103,9	80,2	42,1	42,1	48,5

Давление (x) = (2 · x · Re · Er)/Д внешн.; Pu = (0,9) давления; PLS = (0,73) давления для категории A; PLS = (0,6) давления для категории B; PLS = (0,4) давления для категории C.
Ec = (PMS · Д внешн.)/(2 · x · Re); x = 0,73 для категории A; x = 0,6 для категории B); x = 0,4 для категории C.
(Re – предел упругости стали при 0,2% остаточном растяжении). Допуск = (–0 - +0,3) для Д внешн. ≤ 114,3; допуск = (–0 - +0,4) для114,3 ≤ Д внешн. ≤ 355,6 мм.
Масса = (Д внешн. – Er) · Er · 0,0246615.

Бесшовные трубы.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Д внешний, мм	Среднее рабочее избыточное давление, бар (PMS) (0,1 МПа)	Разновидность стали	Толщина стенки, мм									Заводское давление (Pu), бар			Предельное давление безопасности (PLS), бар			Масса, кг/м		
			Минимальная расчетная (Ec)			Минимальная возможная (Er)			Er + допуск											
			Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C	Кат. A	Кат. B	Кат. C
323,9	67,7	TSE 220	6,83	8,31	12,46	7,7	9,4	14,0	6,9	8,4	12,5	84,3	102,7	152,8	68,4	68,4	67,9	60,0	72,9	107,0
		TSE 250	6,01	7,31	10,97	7,2	8,3	12,3	6,4	7,4	11,0	88,9	102,8	152,8	72,1	68,5	67,9	56,2	64,6	94,5
		TSE 290	5,18	6,31	9,46	7,2	7,2	10,6	6,4	6,4	9,5	103,1	103,1	153,1	83,6	68,7	68,0	56,2	56,2	81,9
		TSE 360	4,18	5,08	7,62	7,2	7,2	8,6	6,4	6,4	7,7	128,0	128,0	154,0	103,8	85,3	68,4	56,2	56,2	66,9
		TSE 415	3,62	4,41	6,61	7,2	7,2	7,5	6,4	6,4	6,7	147,6	147,6	154,5	119,7	98,4	68,6	56,2	56,2	58,5
	80	TSE 220	8,07	9,82	14,73	9,1	11,1	16,6	8,1	9,9	14,8	99,0	121,0	180,9	80,3	80,7	80,4	70,6	85,6	125,9
		TSE 250	7,10	8,64	12,96	8,0	9,8	14,6	7,1	8,7	13,0	98,6	120,8	180,6	80,0	80,5	80,2	61,6	75,2	111,4
		TSE 290	6,12	7,45	11,17	7,2	8,4	12,6	6,4	7,5	11,2	103,1	120,8	180,5	83,6	80,5	80,2	56,2	65,4	96,7
		TSE 360	4,93	6,00	9,00	7,2	7,2	10,1	6,4	6,4	9,0	128,0	128,0	180,0	103,8	85,3	80,0	56,2	56,2	78,2
		TSE 415	4,28	5,21	7,81	7,2	7,2	8,8	6,4	6,4	7,9	147,6	147,6	182,2	119,7	98,4	80,9	56,2	56,2	68,4
355,6	67,7	TSE 220	7,50	9,12	13,68	8,4	10,3	15,4	7,5	9,2	13,7	83,5	102,4	152,5	67,7	68,3	67,8	71,9	87,7	129,2
		TSE 250	6,60	8,03	12,04	8,1	9,1	13,6	7,2	8,1	12,1	91,1	102,5	153,1	73,9	68,3	68,0	69,4	77,8	114,7
		TSE 290	5,69	6,92	10,38	8,1	8,1	11,7	7,2	7,2	10,4	105,7	105,7	152,6	85,7	70,4	67,8	69,4	69,4	99,2
		TSE 360	4,59	5,58	8,36	8,1	8,1	9,4	7,2	7,2	8,4	131,2	131,2	153,0	106,4	87,4	68,0	69,4	69,4	80,3
		TSE 415	3,98	4,84	7,26	8,1	8,1	8,2	7,2	7,2	7,3	151,2	151,2	153,3	122,6	100,8	68,1	69,4	69,4	70,3
	80	TSE 220	8,86	10,78	6,17	10,0	12,1	18,2	8,9	10,8	16,2	99,1	120,2	180,4	80,4	80,1	80,1	85,2	102,5	151,4
		TSE 250	7,80	9,49	14,23	8,7	10,6	16,0	7,8	9,5	14,3	98,7	120,2	180,9	80,0	80,1	80,4	74,4	90,2	134,0
		TSE 290	6,72	8,18	12,27	8,1	9,2	13,8	7,2	8,2	12,3	105,7	120,3	180,5	85,7	80,2	80,2	69,4	78,6	116,3
		TSE 360	5,42	6,59	9,88	8,1	8,1	11,1	7,2	7,2	9,9	131,2	131,2	180,4	106,4	87,4	80,1	69,4	69,4	94,9
		TSE 415	4,70	5,72	8,57	8,1	8,1	9,6	7,2	7,2	8,6	151,2	151,2	180,6	122,6	100,8	80,3	69,4	69,4	81,9
406,4	67,7	TSE 290	6,50	7,91	11,86	8,8	9,0	13,3	7,9	8,0	11,9	101,4	102,7	152,8	82,3	68,5	67,9	86,3	88,2	128,9
		TSE 360	5,24	6,37	9,56	8,8	8,8	10,8	7,9	7,9	9,6	125,9	125,9	153,0	102,1	83,9	68,0	86,3	86,3	105,4
		TSE 415	4,55	5,53	8,29	8,8	8,8	9,3	7,9	7,9	8,3	145,2	145,2	152,5	117,7	96,8	67,8	86,3	86,3	91,1
		TSE 450	4,19	5,10	7,65	8,8	8,8	8,8	7,9	7,9	7,9	157,4	157,4	157,4	127,7	104,9	69,9	86,3	86,3	86,3
	80	TSE 290	7,68	9,35	14,02	8,8	10,5	15,8	7,9	9,4	14,1	101,4	120,7	181,1	82,3	80,5	80,5	86,3	102,5	152,2
		TSE 360	6,19	7,53	11,29	8,8	8,8	12,7	7,9	7,9	11,3	125,9	125,9	180,1	102,1	83,9	80,0	86,3	86,3	123,3
		TSE 415	5,37	6,53	9,80	8,8	8,8	11,0	7,9	7,9	9,8	145,2	145,2	180,1	117,7	96,8	80,0	86,3	86,3	107,3
		TSE 450	4,95	6,03	9,04	8,8	8,8	10,2	7,9	7,9	9,1	157,4	157,4	181,3	127,7	104,9	80,6	86,3	86,3	99,7

Давление (x) = (2 · x · Re · Er)/Д внешн.; Pu = (0,9) давления; PLS = (0,73) давления для категории A; PLS = (0,6) давления для категории B; PLS = (0,4) давления для категории C.
Ec = (PMS · Д внешн.)/(2 · x · Re); x = 0,73 для категории A; x = 0,6 для категории B); x = 0,4 для категории C.
(Re – предел упругости стали при 0,2% остаточном растяжении). Допуск = (–0 - +0,3) для Д внешн. ≤ 114,3; допуск = (–0 - +0,4) для114,3 ≤ Д внешн. ≤ 355,6 мм.
Масса = (Д внешн. – Er) · Er · 0,0246615.

Бесшовные трубы (Продолжение).

1.10.1.6. Сварные соединения труб или стальных деталей из нелегированных или слаболегированных сталей

Вид работ и условия сварки		Вид сварки	Способ сварки	Техника сварки	Сварочные металлы	Тип защитного слоя (обмазка)	Примечания
	Ремонтные работы	Ручная	Дуговая	Снизу вверх	Электроды	Основной	Иногда целлюлозный в первом проходе
	Отводные патрубки на трубах	Ручная	Дуговая	Стационарная	Электроды	Основной	
Сварка стальных труб	Диаметр менее 60,3 мм	Ручная	Ацетиленовая горелка	Снизу вверх	Электроды	С двухвалентным железом	
		Ручная	Дуговая	Снизу вверх	Электроды	Рутильный	Для толщины труб более 2,5 мм
Сварка стальных труб	Диаметр более 60,3 мм	Ручная	Дуговая	Снизу вверх	Электроды	Рутильный или основный	
		Ручная	Дуговая	Снизу вверх; Сверху вниз	Электроды	Целлюлозный	В определенных случаях. Использование подлежит утверждению для каждой стройки
Сварка отводных патрубков или специальных деталей	Все диаметры	Ручная	Дуговая	Стационарная	Электроды	Рутильный	

Трубы для газораспределителя.

Вид работ	Условия сварки	Вид сварки	Способ сварки	Техника сварки	Сварочные металлы	Тип защитного слоя (обмазки)	Примечания
Оборудование (Прокладка трубопроводов)	Линейная сварка	Ручная	Дуговая	Сверху вниз	Электроды	Целлюлозный	
		Полуавтоматическая	Дуговая	Сверху вниз	Провод с наполнением без газа	Основный	"Смешанная" техника (проволока + электроды)
	Специальные точки Соединения	Ручная	Дуговая	Снизу вверх 1-й проход Сверху-вниз или снизу вверх (другие проходы)	Электроды	Целлюлозный (1-й проход) Основный (другие проходы)	"Смешанная" техника с преимущественным использованием основных электродов со сваркой сверху-вниз
	Ремонтные работы	Ручная	Дуговая	Снизу-вверх	Электроды	Основный	Иногда целлюлозные электроды для 1-го прохода
Эксплуатация газопроводов (Текущий ремонт)	Сварка стык в стык	Ручная	Дуговая	Все проходы снизу-вверх	Электроды	Основный	Смешанная техника при сварке снизу-вверх. В определенных случаях использование электродов со сваркой сверху-вниз
				Все проходы снизу-вверх (иногда сверху-вниз со второго прохода)	Электроды	Основный – 1-й проход – целлюлозный + другие проходы (основные	
	Сварка стык в стык	Полуавтоматическая	Дуговая	Снизу-вверх	Провод с наполнением без газа	Основный	Техника может быть смешанной. Электроды + провод с наполнением

Трубы для магистрального транспорта газа.

1.10.2. Чугунные газовые трубы

1.10.2.1. Характеристики чугунов, используемых для изготовления газопроводных труб

Трубы и соединения, использовавшиеся в 1982 г., изготовленные из ковкого чугуна, входят в серию Express 2GS – газ, определяемую нормами NF A 48-801 и A 48-860. В процессе запуска в производство находится новое поколение соединений (Express 3GS).

Толщина стенок труб и соединительных деталей рассчитывается в зависимости от номинального диаметра (DN)

Для труб с DN ≤ 200:

$$e = 5{,}8 + 0{,}003DN$$

Для всех соединений и труб с DN > 200:

$$e = K(0{,}5 + 0{,}001DN)$$

где

K = 9 для труб,

K = 12 для угловых соединений и муфт,

K = 14 для крестовин.

1.10.2.2. Характеристика труб серии K = 9 (под это название подпадают трубы с DN ≤ 200)

См. главу 7: Распределение, разд. 7.2.1.4.3.

1.10.2.3. Различные типы чугунных соединений

См. главу 7: Распределение, разд. 7.2.1.4.3.2.

1.10.2.4. Монтаж одного из соединений на чугуне

См. главу 7: Распределение, разд. 7.2.1.4.3.1.

1.10.3. Медные газопроводные трубы

1.10.3.1. Характеристики меди и ее сплавов

Основные физические характеристики меди:

плотность – 8 900 кг/м^3,

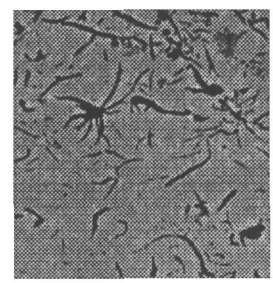
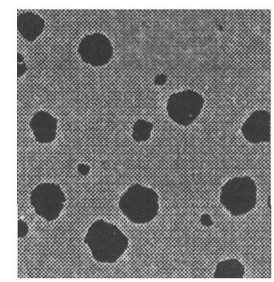
— точка плавления – 1 083°C,

— коэффициент расширения – $17 \cdot 10^{-6}$ K^{-1},

— массовая теплоемкость – 380 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1},

— теплопроводность – 380 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1},

— сопротивление – $1{,}67 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

Обозначение	Серый чугун	Ковкий чугун
Структура	Чешуйчатая	Графит А сферический (GS)
(содержание углерода)	от 2,5 до 4%	от 2,5 до 4%
Включения и примеси	P, S, Si, Mn	P, S, Si, Mn, Ce, Mg
Сопротивление разрыву	P, S, Si, Mn	>400 МПа
Удлинение	P, S, Si, Mn	от 12 до 20%
Сопротивление почвенной коррозии	хорошее	хорошее
Использование для газа	до 1967 г	с 1967 г.
Микрография металла		

Характеристика чугунов.

1.10.3.1.1. Медные сплавы

Различают в общем случае легированные меди и медные сплавы. В первые (серебристая медь, хромовая медь, теллуровая медь) дополнительный элемент входит в очень малых пропорциях (менее 1%). Во вторых дополнительный элемент преобладает, но могут входить в очень небольших количествах другие элементы или для модификации характеристик или для облегчения обработки сплава.

Основные сплавы:

— медно-алюминиевый (от 8 до 12% алюминия),

— бронзы (от 2 до 20% олова),

— латуни (от 5 до 40% цинка и, наиболее часто, от 35 до 40%, особенно для соединительных деталей, используемых в газовой промышленности для сборки медных трубопроводов).

1.10.3.1.2. Спецификации

Трубы и соединения, которые могут быть использованы для разводки внутри жилых помещений, входят в спецификацию B. 524 Технической ассоциации газовой промышленности Франции, обязательной к исполнению по постановлению министерства от 15 июля 1980 г. По аналогии эта спецификация может быть использована для других работ.

1.10.3.2. Характеристики труб

Они определяются двумя французскими нормами, одна из которых NF A51-120 относится к трубам с диаметром менее 54 мм, соединяемых капиллярной пайкой, другая, NF A51-124 относится к трубам, среди которых упоминаются трубки диаметром более 54 мм, соединяемые сваркопайкой.

В соответствии с диаметрами и толщинами стенок можно использовать трубки отожженные (диаметром 22 мм, толщиной 1 мм), твердые холоднокатанные (диаметром ≤54 мм, толщиной 1,6 мм или диаметром 85 мм и 100 мм, толщиной 2 мм) или среднехолоднокатанные (диаметром ≤22 мм, толщиной 0,8)

Выбор диаметра, толщины стенки и вида поставки может быть ограничен поставщиком в зависимости от вида работ.

Трубки поставляются в виде прямых отрезков длиной от 4 до 6 м за исключением отожженных труб, которые поставляются в мотках от 25 до 50 м.

1.10.3.2.1. Размеры

Допуски на толщину составляют ±10% для толщиной от 0,8 до 1 мм и ±9% для толщин от 1,6 до 2 мм.

Внешний диаметр, мм	Допуск на внешний диаметр, мм	Масса 1м, кг	Толщина, мм
8	±0,05	0,196	1 - 0,8 (*)
10		0,252	
12		0,308	
14		0,363	
16		0,419	
18		0,475	
22	±0,06	0,587	
28		0,755	
35	±0,07	0,95	
42		1,146	
54		1,482	1
70	±0,2	3,06	1,6
85	±0,25	4,92	2
100		5,48	
* – Массы даны для толщины 1 мм.			

1.10.3.2.2. Минимальные механические характеристики

Вид поставки	Сопротивление разрыву, МПа	Удлинение при разрыве, %
Отожженные	200	35
Твердые катаные	310	5
Средние катаные	230 - 290	20 - 7

1.10.3.3. Характеристики соединительных деталей

Они определяются нормой NFE29-591 для диаметров от 8 до 54 мм.

Соединения выполняются из меди или латуни, чаще всего для капиллярной пайки. Бронза больше не используется для газовой арматуры из-за ее температуры плавления, близкой к температуре плавления припоев.

Медные соединения позволяют соединять трубы между собой (дуга большого радиуса под 90 - 135°, угол 90°, крестовина, переходная муфта и т.д.).

Латунные соединительные детали делают возможной сборку трубки с деталью (втулка, муфта с плоским соединением, втулка или ниппель со сфероконическим соединением и др.).

Медные соединения могут быть с наружными или внутренними концами, латунные детали всегда выполняются с внутренними концами.

1.10.3.4. Различные способы соединений

Могут быть использованы три способа соединений в зависимости от размеров труб, от действующей регламентации.

1.10.3.4.1. Капиллярная пайка

Эта операция заключается в соединении двух металлических деталей с помощью наплавляемого металла (припоя) в жидком состоянии, температура плавления которого ниже температуры плавления соединяемых деталей. Припой смачивает соединяемые детали. Соединяемые детали не плавятся и поэтому их металл не входит в состав соединения (шва).

В зависимости от температуры плавления припоя t различают:

— мягкую капиллярную пайку ($t < 450°C$),
— жесткую капиллярную пайку ($t > 450°C$).

Капиллярная пайка применяется для трубок и соединительных деталей диаметров до 54 мм.

1.10.3.4.2. Сварка паянием

Это операция, в которой соединение достигается постепенно с помощью технологии, аналогичной автогенной сварке плавлением. В то же время наплавляемый металл имеет температуру плавления ниже температуры плавления меди, что приводит к образованию шнура между трубкой и концом раструбного стыка. Поэтому зазор в пазе стыка может достигать 2 мм при минимально необходимой длине муфты трубы (раструба) в 20 мм.

Сварка паянием применяется для трубок диаметром не менее 42 мм. Она не годится для соединения латунных деталей из-за слишком низкой температуры плавления латуни.

1.10.3.4.3. Наплавляемые металлы (припои)

Перечень припоев установлен спецификацией ATG B 524, они должны использоваться обязательно с флюсом.

1.10.3.4.3.1. Жесткая капиллярная пайка (B. 524.3)

В качестве припоев используют сплавы на основе серебра. В настоящее время содержание серебра составляет 6; 8; 21; 40 или 45%

1.10.3.4.3.2. Мягкая капиллярная сварка (B. 524.4)

Используют припои на основе латуни (40 или 50%).

1.10.3.4.3.3. Сварка паянием (B. 524.7)

Используют полоски из латуни (60% меди и 40% цинка).

1.10.3.4.4. Квалификация персонала

В соответствии с видом выполняемых работ может требоваться диплом сварщика.

Именно поэтому постановление от 16 июля 1980 г. требует соблюдения спецификации ATG B540.9 при проведении сварочных работ в жилых помещениях.

Эта спецификация для работ с медью устанавливает два типа квалификационных дипломов: один для пайщиков, второй для сваркопайщиков. В каждом случае необходимо получить квалификационный сертификат (диплом), срок годности которого составляет три года для пайщиков и один год для сваркопайщиков.

Квалификационный сертификат пайщиков предусматривает в основном работы по жесткой пайке меди т.е. сваркопайщиков – по сварке как меди, так и стали.

1.10.4. Алюминиевые газопроводные трубы

1.10.4.1. Характеристики алюминия

1.10.4.1.1. Физические характеристики

Плотность – 2 700 кг/м^3

Точка плавления: 660°C

Коэффициент линейного расширения при 100°C – $23{,}6 \cdot 10^{-6}$ K^{-1},

Массовая теплоемкость – 920 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1},

Теплопроводность при 20°C – 222 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}

Сопротивление при 20°C – $2{,}65 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

1.10.4.1.2. Химические свойства

Алюминий сильно окисляется. На поверхности голого металла самопроизвольно образуется компактный непроницаемый слой оксида алюминия. Этот оксид предохраняет металл, в частности от атмосферной коррозии. Слой изменяется во времени, его толщина увеличивается с около 0,01 мкм в момент образования до 0,1 мкм через год на холоде или за 12 часов при 500°C. Алюминий подвержен действию соляной кислоты и щелочей, которые химически растворяют защитный слой.

1.10.4.2. Трубки и соединительные детали для газопроводов

Сплав алюминия (5005 R 14) (A–G 0,6 H 14) принят во Франции для прокладки труб воздушным путем, на фасадах зданий, если это позволяет архитектура.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Спецификации ATG B. 525 для труб и трубных соединений определяют область применения, геометрические характеристики, физические, механические и химические свойства, качество изготовления, технологию испытаний и контроля, маркировку, служащие для их идентификации.

Постановление от 15 июля 1980 г. кодифицирует использование и поставку трубных материалов из сплавов алюминия.

Трубы, получаемые прокаткой и волочением, имеют состав и свойства сплава 5005 R 14 среднетвердого, характеристики которого, нормированные нормально Афнор (Afnor) NF A50-411, указаны в нижеследующих таблицах.

Сопротивление труб гидравлическому давлению

Обозначение трубы	Теоретическое давление разрыва, бар	Испытательное давление, бар
12 × 1	250	165
16 × 1	180	120
28 × 1	95	65
36 × 1	70	45
56 × 1,2	55	35

Минимальные механические свойства труб

Обозначение трубы	Разрывное усилие при растяжении, Н	Давление разрыва, бар	Изгибающее усилие *
12 × 1	4 900	250	500
16 × 1	6 600	180	900
28 × 1	12 000	95	1 000
36 × 1	15 500	70	1 100
56 × 1,2	29 000	55	1 500

* При расстоянии между опорами, равном десятикратному внешнему диаметру трубы.

Механические характеристики при растяжении должны иметь следующие минимальные значения:

— сопротивление растяжению (R) = 145 МПа,
— предел упругости ($R_{p\,0,2}$) = 105 МПа,
— удлинение (A 5,65) = 5% минимум.

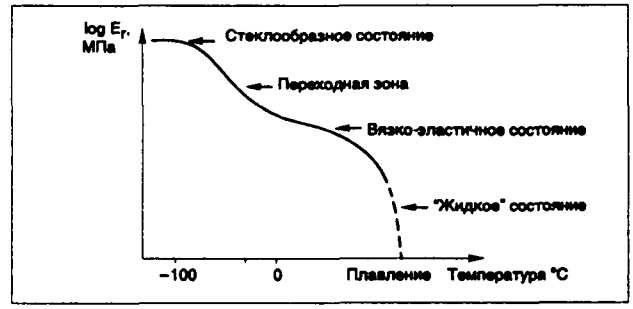
1.10.4.3. Сборка труб и трубные соединения из сплава алюминия

См. ниже приведенную таблицу.

1.10.5. Полиэтиленовые газопроводные трубы

1.10.5.1. Свойства полиэтилена марки "5" (PE "5")

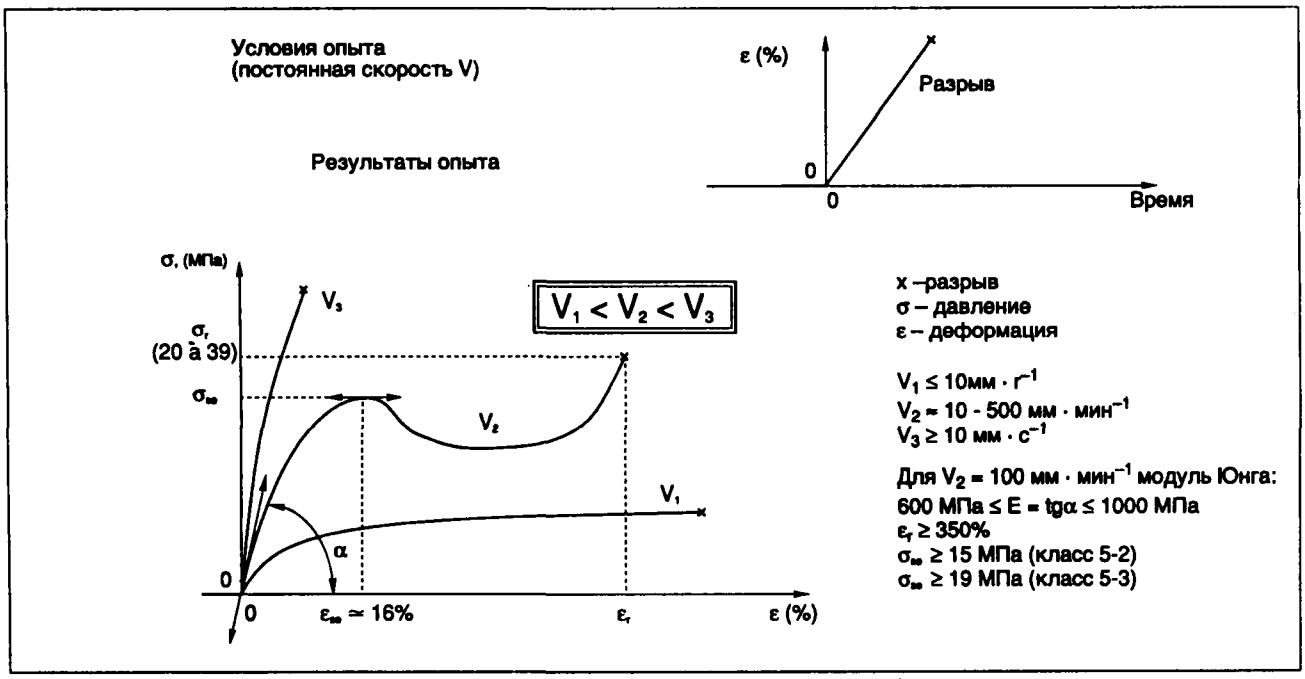
Французские газовики отныне выбирают полиэтилен из семейства, называемого PE "5" в соответствии с нормативом NFT 54-072 от июня 1981 г. Свойства этого полиэтилена определяются их характеристическим напряжением при минимальном сроке службы труб в 20 лет при 20°C. Величина этого напряжения равна 5 МПа.



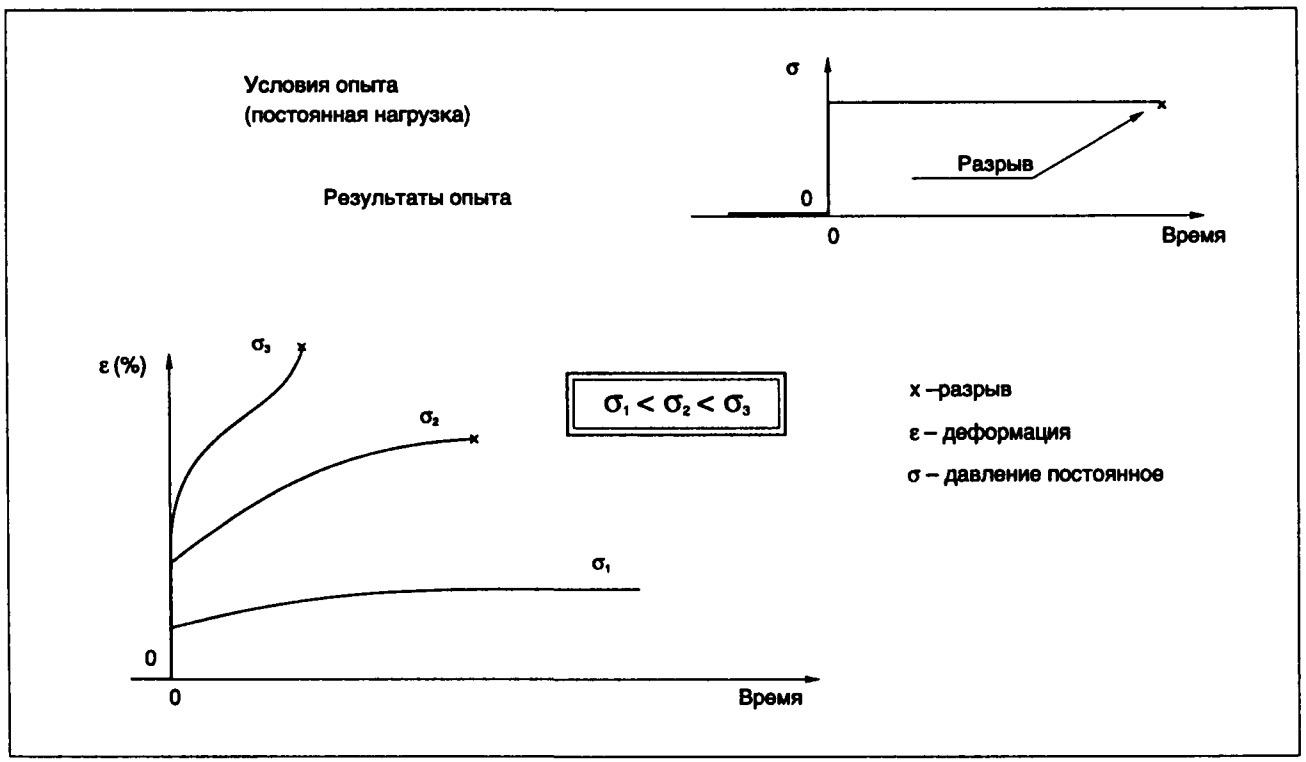
Действие температуры на полиэтилен "5"; E_r – модуль релаксации

Сборка труб и трубные соединения из алюминиевого сплава

Тип	Подготовка поверхности	Припои	Температура сборки	Примечание
Пайка				
мягкая	Флюс	Различные (Sn, Zn)		Флюс коррозионный Возможна пористость стыка
		(Sn, Pb, Zn)	<450°C	
жесткая	Флюс	(Sn, Pb, Zn)	>450°C	
Сваркопайка	Флюс	Различные (A-310, AS-5)		Повышенная температура
		(A-310, AS-5)	600°C	Ухудшение механических свойств
Сварка				
кислородноацетиленовая	Флюс	Тот же металл	650°C	Повышенная температура
дуговая				
– TIG	нет	Вольфрамовый электрод		
– MIG	нет	Алюминиевый или сплавной электрод		
Склеивание	Обезжиривание	Полимерная эпоксидная смола в холодном и горячем состоянии	150°C	Температура, регулируемая в автоматической печи

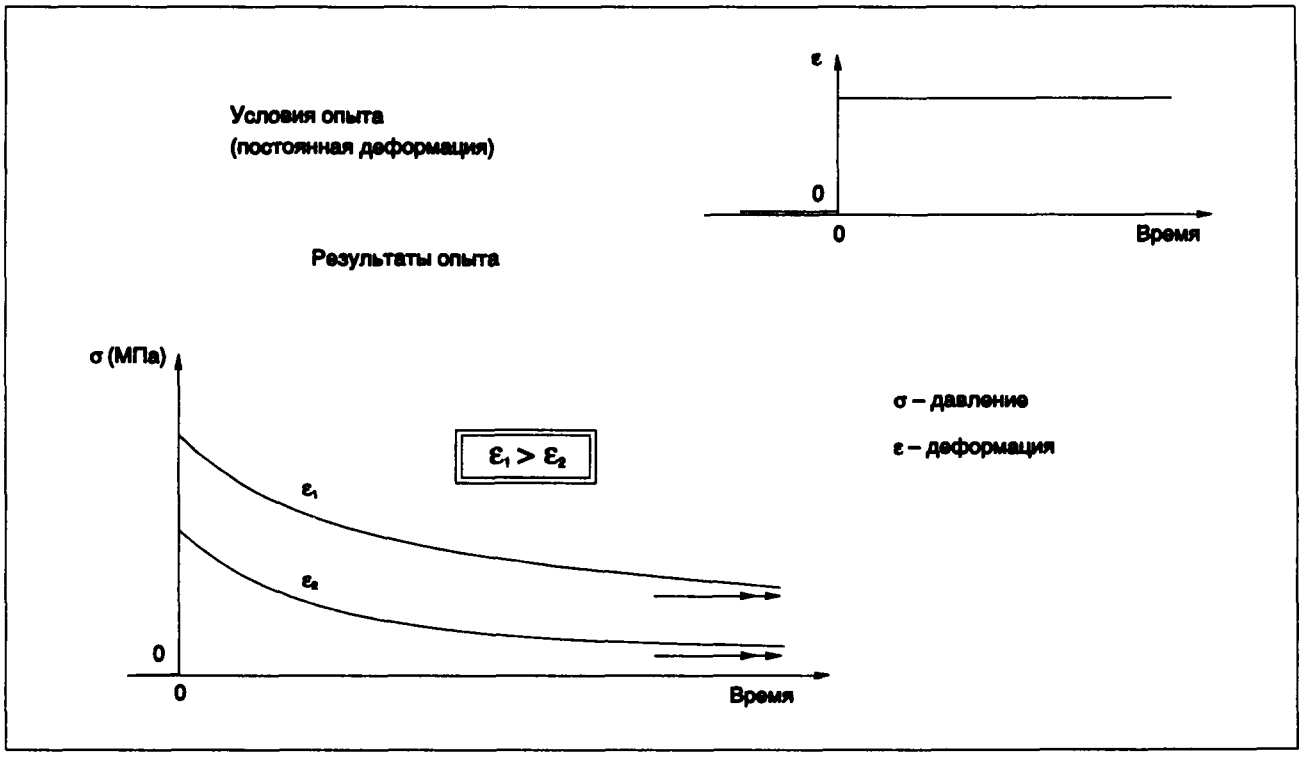


Изменение свойств полиэтилена "5" при растяжении с постоянной скоростью при 23°С

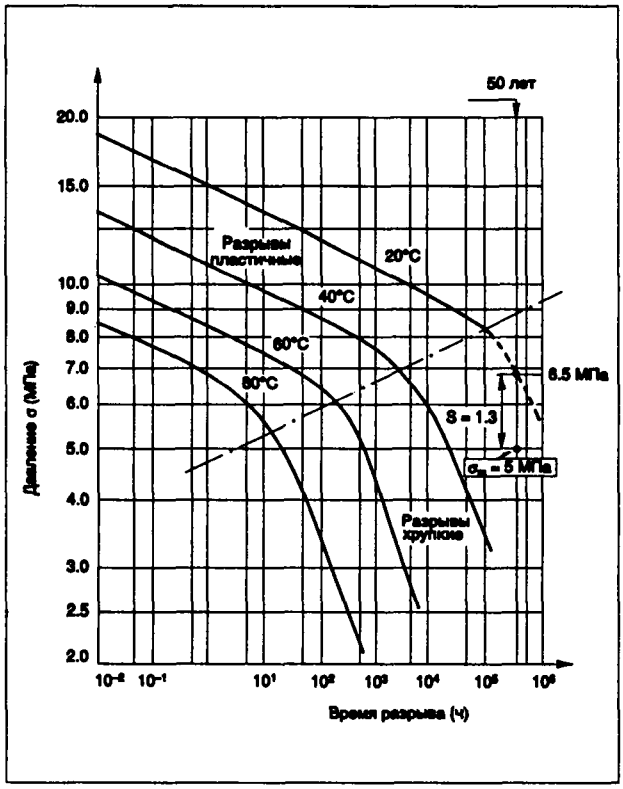


Изменение свойств полиэтилена "5" при растяжении с постоянной нагрузкой (текучесть) при 23°С

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



Изменение свойств полиэтилена "5" при растяжении с постоянной деформацией (релаксация) при 23°C



Изменение свойств трубы из полиэтилена "5" под давлением

Основные характеристики PE «5»

Физические:
- Плотность = 950 кг/м^3
- Первичный материал: порошок или гранулы белые прозрачные с содержанием черного углерода 2,3% масс.
- Коэффициент расширения: от 130 до 200 · 10^{-6} 1/K
- Температура плавления 130°C
- Проницаемость по метану: 0,6 м^3/(0,1 МПа · км) (труба серии S = 5)
- Возгораемый и горючий материал

Химические:
- Большая химическая инертность
- Подвержен многолетнему воздействию жидких углеводородов и поверхностно-активных веществ (в присутствии механических напряжений)

Электрические:
- Изолирующий материал,
  удельное сопротивление = 10^{16} Ом · м

Термические:
- Плохой проводник тепла: λ = 0,45 Вт/(м · K)
- Массовая теплоемкость Ср = 1900 Дж/(кг · K)
- Термопластический материал
- Свариваемый материал

Механические:
- Растяжение при 23°C – 100 мм/мин:
  600 МПа ≤ E ≤ 1000 МПа
  σ_{so} от 15 до 25 МПа σ_r от 20 до 39 МПа;
  ε_{so} = 16% $\varepsilon_r \cong$ 350 - 1000%
- Давление: σ_m = 5 МПа (50 лет при 20°C)
- Способность к текучести
- Способность к релаксации

Номинальный внешний диаметр	Средний внешний диаметр		Серия S 12,5-PN 4 (SDR 26) *			Серия S 8-PN 6 (SDR 17) (*)			Серия S 5-PN 10 (SDR 11) (*)		
			Толщина		Масса 1 м (кг)	Толщина		Масса 1 м (кг)	Толщина		Масса 1 м (кг)
	минимальный	максимальный	минимальная	максимальная		минимальная	максимальная		минимальная	максимальная	
10	10,0	10,3							2,0	2,4	0,053
12	12,0	12,3							2,0	2,4	0,066
16	16,0	16,3							2,0	2,4	0,093
20	20,0	20,3							2,0	2,4	0,119
25	25,0	25,3				2,0	2,4	0,152	2,3	2,8	0,173
32	32,0	32,3				2,0	2,4	0,198	2,9	3,4	0,275
40	40,0	40,4				2,4	2,9	0,299	3,7	4,3	0,435
50	50,0	50,5	2,0	2,4	0,318	3,0	3,5	0,458	4,6	5,3	0,675
63	63,0	63,6	2,4	2,9	0,483	3,8	4,4	0,730	5,8	6,6	1,070
75	75,0	75,7	2,9	3,4	0,685	4,5	5,2	1,030	6,8	7,7	1,490
90	90,0	90,9	3,5	4,1	0,990	5,4	6,2	1,480	8,2	9,3	2,150
110	110,0	111,0	4,2	4,9	1,450	6,6	7,5	2,190	10,0	11,2	3,180
125	125,0	126,2	4,8	5,5	1,870	7,4	8,4	2,800	11,4	12,8	4,130
140	140,0	141,3	5,4	6,2	2,350	8,3	9,4	3,500	12,7	14,2	5,150
160	160,0	161,5	6,2	7,1	3,080	9,5	10,7	4,570	14,6	16,3	6,750
200	200,0	201,8	7,7	8,7	4,750	11,9	13,3	7,150	18,2	20,3	10,500
250	250,0	252,3	9,6	10,8	7,400	14,8	16,5	11,100	22,7	25,2	16,400
315	315,0	317,9	12,1	13,6	11,700	18,7	20,8	17,600	28,6	31,7	25,900
400	400,0	403,6	15,3	17,8	19,200	23,7	27,5	28,900			
500	500,0	504,5	19,1	22,2	29,900	29,6	34,3	45,100			

* SDR = Standard Dimension Ratio: отношение номинального внешнего диаметра к толщине стенки (по спецификации).

1.10.5.2. Размеры труб (NF T 54-072)

См. вышеприведенную таблицу.

1.10.5.3. Классификация труб

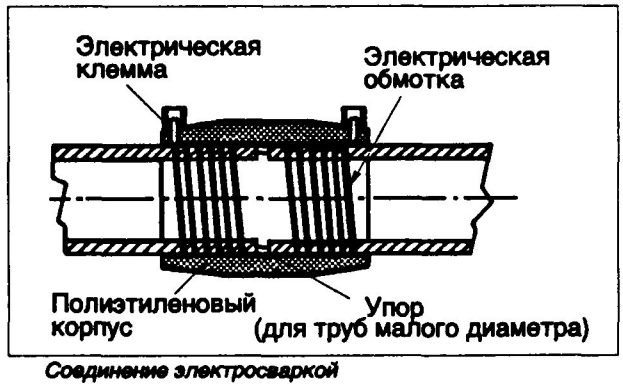
Сопротивление давлению

Класс трубы	5-2	5-3
Испытание при 20°C 1 ч, МПа	11,8	14,7
Испытание при 80°C 170 ч, МПа	3,9	2,9

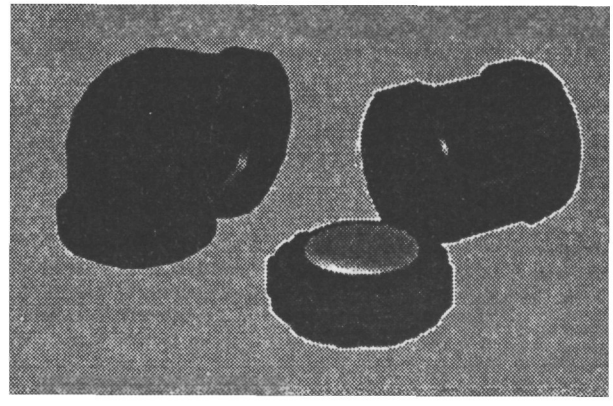
Сопротивление растяжению при постоянной скорости

Характеристики	Спецификация 5-2	Спецификация 5-3
Пороговое напряжение текучести, МПа	≥15	≥19
Удлинение в момент разрыва, %	≥350	≥350

1.10.5.4. Трубные соединения

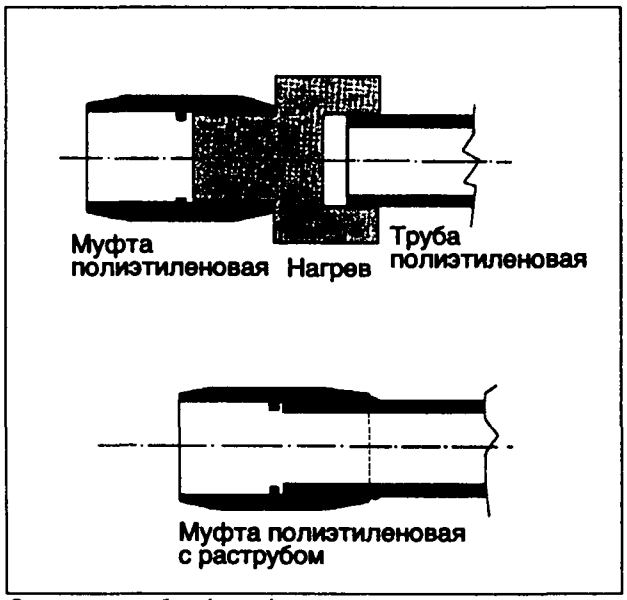


Соединение электросваркой

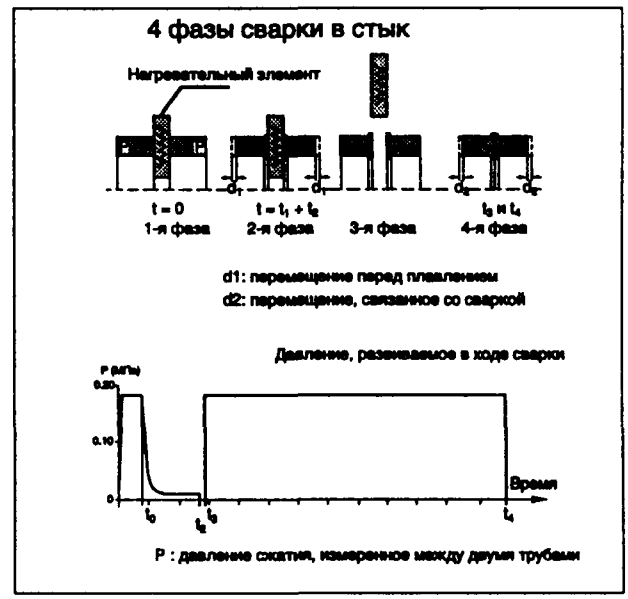


Соединение механическое

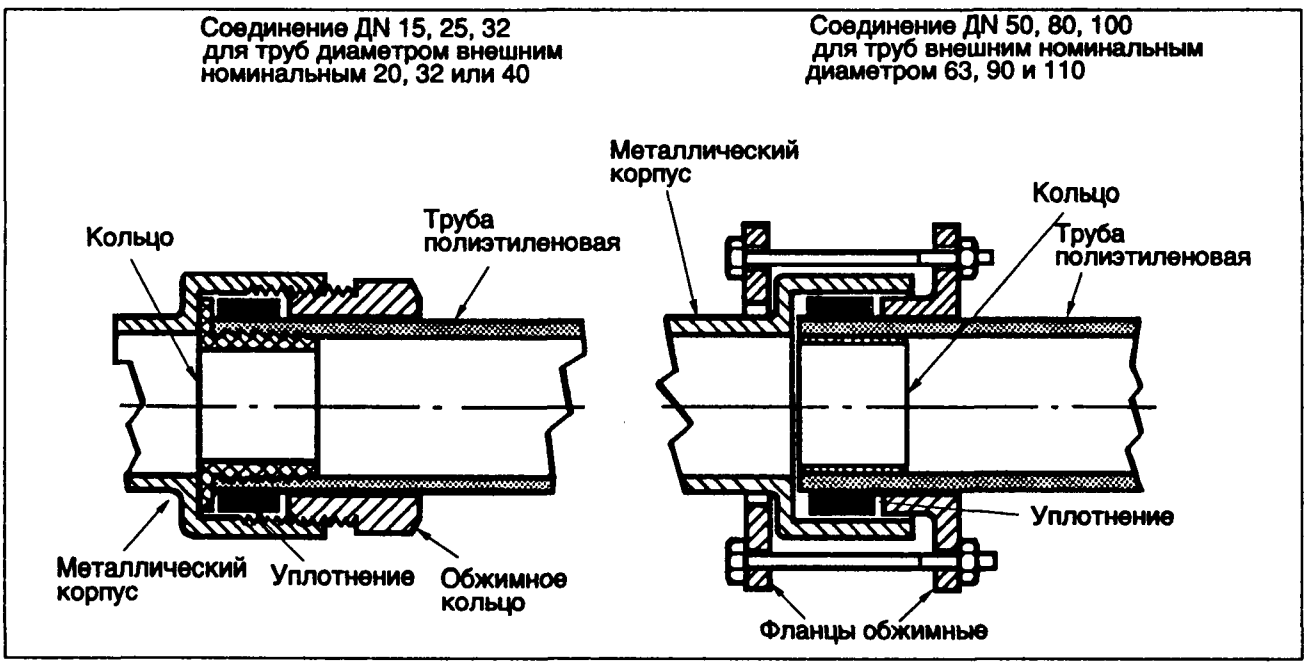
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



Сварка раструбом (эскиз)



Сварка в стык



Соединение металл–пластик (схема)

1.10.5.5. Условия применения полиэтиленовых труб и изделий

Полиэтилен имеет некоторые недостатки:

— чувствителен к ультрафиолетовому излучению;
— деформируется под действием тепла;
— горит при относительно низкой температуре;
— имеет повышенный коэффициент температурного расширения;
— чувствителен к механическому воздействию: камни, режущие кромки и т.д.

Достоинства полиэтилена многочисленны и представляют интерес для газовой промышленности:

— хорошие механические характеристики;
— большой коэффициент удлинения при растяжении;
— большая инертность по отношению к большинству химических веществ;
— нечувствительность к коррозии;
— большая гибкость и небольшой вес, что позволяет механизированную укладку труб с малым количеством стыков.

Отсюда следует, что этот материал имеет много преимуществ для экономичной прокладки новых распределительных сетей и восстановления изношенных сетей.

1.11. Течение флюидов

1.11.1. Установившиеся течения флюидов

1.11.1.1. Определение режима

Установившийся режим характеризуется следующими условиями:

— давление в каждой точке постоянно во времени;
— массовый расход в заданный момент времени одинаков вдоль участка, на котором отсутствуют источники и стоки.

1.11.1.2. Общие уравнения

Течение флюида в трубе произвольной формы со скоростью U, постоянной в каждой точке, описывается соотношением:

$$dE + UdU + d\mathcal{E}_p + gdz = dQ + dw \qquad (1)$$

(сохранение энергии единичной массы флюида при ее перемещении на dL), где:

dE – изменение внутренней энергии для единичной массы флюида:

UdU – изменение кинетической энергии ($m = 1$);

$d\mathcal{E}_p$ – элементарная работа внутренних сил давления в струе;

gdz – элементарная работа гравитационных сил ($m = 1$);

dQ – энергия, переданная из струи во внешнюю среду в форме тепла;

dw – рассеяние энергии за счет сил трения

Если учесть, что

$$d\mathcal{E}_p = d\left(\frac{P}{\rho}\right)$$

а также:

$$dE = dQ - Pd\left(\frac{1}{\rho}\right)$$

то можно получить:

$$\rho UdU + dP + \rho gdz = \rho dw \qquad (2)$$

ρ – плотность флюида при давлении и температуре течения рассматриваемого элемента;

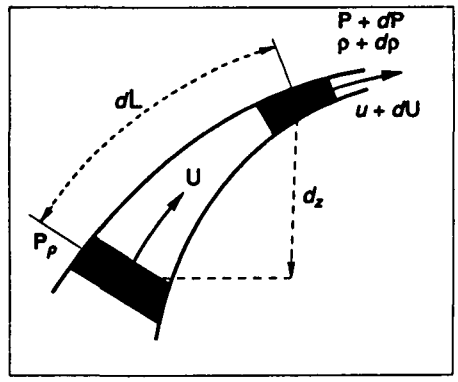
ρdw – элементарные потери напора.

Это уравнение пригодно во всех случаях (изотермического или адиабатического течения). Оно используется в исследованиях:

— адиабатических течений в трубопроводах (трубках Вентури, штуцерах);
— стационарных течений флюидов в цилиндрических трубопроводах.

Расчеты и опыты показывают, что в последнем случае величиной ρUdU можно пренебречь. Тогда имеет место:

$$dP + \rho gdz = \rho dw \qquad (3)$$



Заштрихован элемент единичной массы флюида ($m = 1$)

1.11.1.3. Частные случаи

Если ρ = const (жидкость или газ при слабых вариациях давления) и если $dw = 0$ (для очень коротких элементов трубопровода можно считать флюид невязким), можно получить формулу Бернулли для потока между двумя сечениями 1 и 2:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 + \rho g z_2 \qquad (4)$$

Если течение горизонтально, $z_2 = z_1$, то:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2}(U_2^2 - U_1^2) \qquad (5)$$

или

$$U_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(c^2 - 1)}} \qquad (6)$$

при этом:

$$c = \frac{S_1}{S_2} \quad \text{(отношение площадей сечений)}$$

Уравнения (5), (6) используются:

— в методиках измерения дебитов (трубки Пито, диафрагмы, трубки Вентури (см. § 1.11.3.2.);
— в расчетах калиброванных сопел (например, инжекторной части форсунок).

В этих простых уравнениях отсутствует слагаемое, учитывающее потери напора, которое в первом приближении пропорционально квадрату скорости в сужении.

1.11.2. Установившиеся течения газа в цилиндрических трубопроводах

1.11.2.1. Общая формула для потерь напора

Как показано выше (3), уравнение течения имеет вид:

$$dP + \rho dgz - \rho dw = 0$$

Опыты показывают, что потери напора в цилиндрических трубах пропорциональны длине трубы и кроме того зависят от средней скорости U флюида в трубе, его плотности и диаметра D. Они зависят также от коэффициента шероховатости K, отражающего состояние поверхности. Пусть dL – длина элемента трубопровода, потери напора на этом элементе можно записать в виде:

$$\rho dw = F(\rho, U, D, K, \mu)dL \qquad (7)$$

или

$$\rho\frac{dw}{dL} = F(\rho, U, D, \nu, K) \qquad (8)$$

Простые соображения теории размерностей позволяют записать:

$$\rho dw = -\rho\frac{U^2}{2}\lambda(R_e, K)\frac{dL}{D} \qquad (9)$$

λ называется коэффициентом сопротивления. Его роль будет детально исследована § 1.11.2.5.

Безразмерное число R_e, называемое числом Рейнольдса, позволяет определять тип течения. Оно определяет соотношение инерционных эффектов и трения.

1.11.2.2. Число Рейнольдса

$$R_e = \frac{UD}{\nu} = \frac{\rho UD}{\mu} \qquad (10)$$

здесь:

U – скорость газа,

ρ – плотность газа,

μ – динамическая вязкость,

ν – кинематическая вязкость,

D – диаметр трубы.

1.11.2.3. Потери напора в горизонтальных трубопроводах

Имеет место:

$$dP = -\rho\frac{U^2}{2}\lambda\frac{dL}{D} \qquad (11)$$

или:

$$Q = U\frac{\pi}{4}D^2 \qquad (12)$$

тогда

$$dP = -8\frac{\rho}{\pi^2}\lambda\frac{Q^2}{D^5}dL \qquad (13)$$

1.11.2.3.1. Совершенный газ. Низкие давления

1.11.2.3.1.1. Законы совершенных газов

Закон совершенных газов дается следующим соотношением:

$$\frac{P}{\rho} = RT \qquad (14)$$

1.11.2.3.1.2. Выражение для потерь при низких давлениях

Задаваясь какими либо значениями T_0 и P_0, получим

$$dP = -8\frac{\rho}{\pi^2}\frac{P_0}{P}\frac{T_0}{T}\frac{Q_0^2}{D^5}a \qquad (15)$$

В случае распределительной сети низкого давления абсолютное давление P мало изменяется и его можно рассматривать как константу. Интегрирование (15) позволяет в этом случае рассчитать потери давления между сечениями 1 и 2, расположенными друг от друга на расстоянии L. Они определяются соотношением

$$P_1 - P_2 = 8\frac{\rho_0}{\pi^2}\frac{P_0}{P}\frac{T_0}{T}\lambda\frac{Q_0^2}{D^5}L \qquad (16)$$

Приближение идеального газа так же, как и приведенная формула, может использоваться только для сетей газа низкого давления (сети BP). Действительно, при высоких давлениях газ ведет себя иначе и необходимо учитывать его сверхсжимаемость.

Кроме того, при интегрировании уравнения (15) нельзя считать, что давление вдоль трубопровода не меняется.

1.11.2.3.2. Реальные газы. Высокое давление

В случае реального газа высокого давления уравнение состояния имеет вид

$$\frac{P}{\rho} = ZRT \qquad (17)$$

где Z – коэффициент сжимаемости газа.

Если рабочие давления высокие, интегрирование уравнения (15) приводит к:

$$P_1^2 - P_2^2 = \lambda\frac{16}{\pi^2 D^5}\rho_0 P_0\frac{ZT}{Z_0 T_0}Q_0^2 L \qquad (18)$$

1.11.2.4. Потери напора в негоризонтальных трубопроводах

1.11.2.4.1. Общее уравнение

$$dP = -\rho\frac{U^2\lambda}{2D}dL - \rho g dz \qquad (19)$$

dL – длина элемента трубопровода,

dz – разница альтитуд двух концов этого элемента.

1.11.2.4.2. Вертикальный трубопровод (восходящий) при низких давлениях

Имеет место:

$$dL = dz$$

Предполагая ρ постоянной, получим:

$$P_2 - P_1 = -(z_2 - z_1)(\rho g + h) \qquad (20)$$

где h представляет собой потери напора на единицу длины.

Если ввести эффективные давления p_2 и p_1:

$$p_2 = p_1 - (z_2 - z_1)\,h + (\bar{\omega}_a - \bar{\omega}_g)\,(z_2 - z_1) \qquad (21)$$

и если течение газа отсутствует, $h = 0$, то

$$p_2 = p_1 + (\bar{\omega}_a - \bar{\omega}_g)\,(z_2 - z_1) \qquad (22)$$

где:

$\bar{\omega}_a = g\rho$ воздух

$\bar{\omega}_g = g\rho$ газ

1.11.2.4.3. Реальный газ. Высокие давления

При большой разнице в альтитудах разница квадратов $P_1^2 - P_2^2$ в уравнении потерь напора заменяется на выражение:

$$(P_1^2 - \rho^s P_2^2)\frac{S}{\rho^s - 1} \qquad (23)$$

где

$$S = \frac{2\rho_0 g T_0}{P_0 Z T}(z_2 - z_1) \qquad (24)$$

$z_2 - z_1$ есть разница уровней входной и выходной части трубопровода.

1.11.2.5. Расчеты потерь напора (определение коэффициента сопротивления λ)

Чаще всего расчет λ производится с помощью номограмм или эмпирических формул, полученных из лабораторных экспериментов или измерений в промышленных трубопроводах.

1.11.2.5.1. Опыты Никурадзе

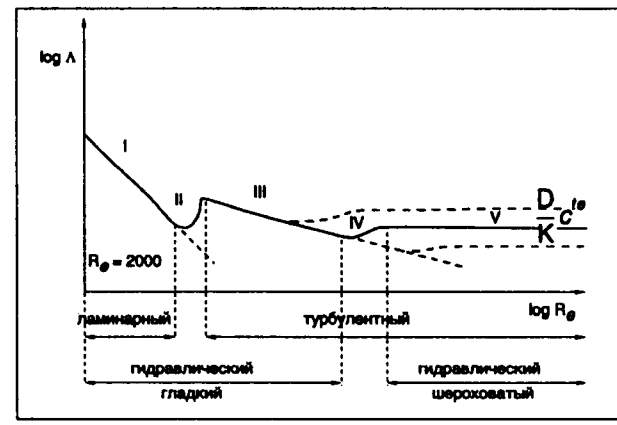
Никурадзе предложил изучать λ как функцию числа Рейнольдса потока и степени шероховатости стенок.

С этой целью он создал искусственную шероховатость внутренних стенок трубопроводов, приклеив однородный слой зерен песка, отсортированных с помощью сита. Таким образом он получил поверхность с однородной шероховатостью K. За меру шероховатости был взят размер зерен песка.

Меняя одновременно K и D, он смог добиться вариаций отношения $\frac{D}{K}$ от 30 до 1000 приблизительно. На следующем рисунке представлены полученные им результаты.

В областях I, II λ зависит только от R_e, а шероховатость не имеет значения. Трубопровод называется гидравлически гладким.

В области V λ не зависит более от R_e, но зависит только от отношения $\frac{D}{K}$.



1.11.2.5.2. Законы изменения λ из опытов Никурадзе

Область I описывает ламинарное течение. Зависимость λ от числа Рейнольдса задается формулой Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{R_e} \qquad (25)$$

Область II является переходной от ламинарной к турбулентной, очень плохо определена, и в ней не существует формул для λ.

В области III при $R < 10^5$ можно принять:

$$\lambda = \frac{0,316}{R_e^{1/4}} \qquad (26)$$

(формула Блазиуса).

При $R_e > 10^5$ λ задается соотношением:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{R_e\sqrt{\lambda}}{2,51} \qquad (27)$$

В области V λ не зависит от R_e, поэтому выполняется:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} 2 \log (3,71\frac{D}{K}) \qquad (28)$$

Два последних выражения известны как формулы Кармана–Прандтля.

1.11.2.5.3. Промышленные трубопроводы (практические расчеты)

В газовой промышленности режим течения всегда турбулентный. Прямым измерением потерь напора можно показать, что для заданного трубопровода:

— существует значение величины R_{e1}, ниже которой трубопровод ведет себя как гидравлически гладкий, то есть λ зависит только от R_e (течение называется частично турбулентным);
— существует также величина R_{e2}, при превышении которой трубопровод ведет себя как гидравлически шероховатый, то есть λ не зависит более от R_e и остается постоянным (течение называется полностью турбулентным).

В зоне между величинами R_{e1}, и R_{e2} λ зависит и от R_e, и от шероховатости K.

Возникла необходимость построения таких формул, которые могли бы описать единым образом течение во всех трех зонах.

Далее представлены наиболее употребляемые формулы для каждого типа материала, а также для встречающихся типов течений.

1.11.2.5.3.1. Трубы из чугуна

Можно использовать формулу, предложенную Ренуаром:

$$\lambda = 0,172 R_e^{-0,18} \qquad (29)$$

Она применима приблизительно для $R_e = 5 \times 10^5$ и для отношений $\frac{Q}{D}$, меньших 150 (Q есть нормальные расход газа в трубопроводе).

Формула предназначена для чугунных труб, которые используются только при низких давлениях и малых расходах.

1.11.2.5.3.2. Полиэтиленовые трубы

Для полиэтилена наиболее приспособленной является модифицированная формула Кармана:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = F\left[- \log \frac{2,82}{R_e\sqrt{\lambda}}\right] \qquad (30)$$

F – коэффициент торможения, равный 0.98.

1.11.2.5.3.3. Стальные трубы

Исторически первой формулой, которая могла использоваться в промышленных трубопроводах при больших числах Рейнольдса в областях III, IV и V, была формула Кольбрука (1939)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = - 2 \log \left[\frac{\frac{K}{D}}{3,71} + \frac{2,51}{R_e\sqrt{\lambda}}\right] \qquad (31)$$

Явные формулы, то есть более простые в использовании, были предложены не так давно для описания зон III, IV и V инженерами группы по газу парижского региона общества Газ де Франс в 1981 г.:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = - \frac{1}{5} \log \left[\left(\frac{K}{3,7D}\right)^{10} + \left(\frac{5,03 \log R_e - 4,32}{R_e}\right)^{10F}\right] \qquad (32)$$

где F – коэффициент торможения, который зависит от внутреннего состояния канала и его кривизны.

В следующей таблице представлены значения, которые может принимать F в типовых конфигурациях трубопроводов.

Можно также упомянуть формулу Хааланда (Haaland, 1984):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = - \frac{1,8}{3} \log \left[\left(\frac{6,9}{R_e}\right)^3 + \left(\frac{K}{3,75D}\right)^{3,33}\right] \qquad (33)$$

Для очень больших чисел Рейнольдса, превышающих 10^7, можно использовать вторую формулу Кармана–Прандтля:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log 3,71\frac{D}{K} \qquad (34)$$

В транспортных и распределительных сетях трубопроводов из стали давление обычно достаточно

Состояние внутренней поверхности	Кривизна, град/км			
	5 - 15° · км$^{-1}$	25 - 35° · км$^{-1}$	≈60° · км$^{-1}$	>120° · км$^{-1}$
Пескоструйная обработка	0,9850	0,9750	0,9650	0,9500
Очистка скребком	0,9800	0,9700	0,9600	0,9400
Пластиковое покрытие.	0,9750	0,9650	0,9550	0,9300
Необработанная сталь без покрытия . . .	0,9700	0,9600	0,9500	0,9200
Эти значения соответствуют трубопроводу, имеющему сварные швы через каждые 12 км, изгибы, из которых 90% не превышают 10°, и одну задвижку на каждые 16 км.				

высокое, а расходы достаточно велики для того, чтобы можно было применять без сомнений одну из трех формул, приведенных в начале параграфа. Однако желательно использовать более точную формулу, например ту, которая предложена группой по газу парижского региона Газ де Франс, или формулу Хааланда.

1.11.2.5.3.4. Реальные значения внутренней шероховатости

Принимается, что внутренняя шероховатость K достигает следующих приближенных значений:

Тип и состояние трубопровода	Оценочное значение K (микрометры)
Стальные трубы без покрытия:	
— новые	13 - 19
— после 6 месяцев на воздухе	25 - 32
— после 1 года на воздухе	38
— после 2 лет на воздухе	44
Трубопровод с пластиковым покрытием	5 - 7,5
Трубопровод после пескоструйной обработки	5 - 7,5
Трубопровод, очищенный скребком	7,5 - 12,5

1.11.2.5.4. Практические методы расчета потерь напора

Правила расчета потерь напора были установлены управлением исследований и новой техники Газ де Франс на базе формулы Ренуара и управлением по добыче и транспорту Газ де Франс, которое использует формулу Панхендла (Panhandle) (1).

Недавно управлением исследований и новой техники Газ де Франс была разработана программа расчета потерь напора, позволяющая применение любой формулы из § 1.11.2.5. Эта расчетная программа предназначена для микрокалькуляторов типа IBM-PC или совместимых с ними. Она написана специально для газовой промышленности и доступна для пользователей, не имеющих никакого образования в области информатики.

Кроме этого можно использовать номограммы.

1.11.3. Адиабатические течения газа при больших скоростях

1.11.3.1. Соотношение Сен-Венана

Из уравнений:

$$\rho U dU + dP = \rho d\omega \quad \text{и} \quad \frac{P}{P^{\gamma}} = \text{const}$$

(1) Сборник этих правил можно купить возле здания Общества развития газовой промышленности во Франции по адресу: 17, rue Alfud-Roll, 75017, Paris.

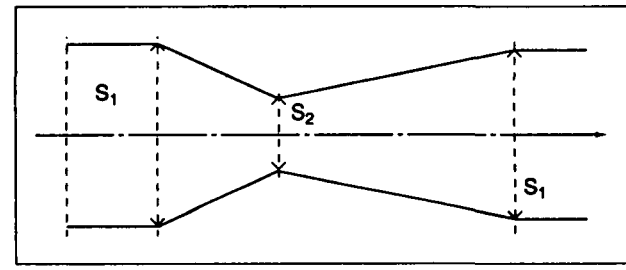
(адиабатическое течение) можно получить:

$$\frac{U_2^2 - U_1^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{P_1}{\rho_1}\left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right] - \Delta\omega \qquad (35)$$

γ – отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме;

$\Delta\omega$ – потери энергии на трение.

1.11.3.2. Трубка Вентури



Если принять:

$\Delta\omega = 0$ (конусность сужающейся и расширяющейся частей выражена нечетко)

$$\Delta P = \frac{\rho_1 U_1^2}{2}\left[c^2\left(1 + \frac{2\Delta P}{\gamma P_1}\right) - 1\right] \qquad (36)$$

где ΔP – изменение давления между сечениями S_1 (вход и выход) и S_2 (сужение), а ΔP считается малым по сравнению с P_1, $c = \frac{S_1}{S_2}$ – коэффициент сужения.

Для жидкости (ρ постоянна):

$$\Delta P = \frac{\rho_1 U_1^2}{2}(c^2 - 1) \qquad (37)$$

1.11.3.3. Адиабатическое дросселирование в штуцере

Применим соотношение Сен-Венана при $U_1 = 0$:

— если $P_2 > P_1\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ или $0.526P_1$ при $\gamma = 1.41$

$$U_2 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}\frac{P_1}{\rho_1}\left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \qquad (36)$$

Массовый расход:

$$q = S_c\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/\gamma} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}P_1\rho_1\left[1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \quad (39)$$

S_c – сечение сужения,

q – функция отношения $\frac{P_2}{P_1}$, возрастающая при уменьшении $\frac{P_2}{P_1}$ от 1 до 0.526.

— Если $P_2 < P_1(\frac{2}{\gamma+1})^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$

давление в сужении остается равным:

$$(\frac{2}{\gamma+1})^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}P_1 \quad (40)$$

Скорость в сужении:

$$U_2 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1}\frac{P_1}{\rho_1}} \quad (41)$$

Массовый расход:

$$q = S_c(\frac{2}{\gamma+1})^{\frac{1}{\gamma-1}} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1}P_1\rho_1} \quad (42)$$

Массовый расход зависит только от P_1.

1.11.3.4. Смесители

Отношение массовых расходов впрыскиваемого флюида и моторной жидкости может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\frac{P_2-P_0}{P_1-P_0} = \frac{\alpha\rho_0}{(1+m)(\rho_0+m\rho_1)} \quad (43)$$

P_1 и ρ_1 – давление и плотность моторной жидкости на входе в сужение,

P_0 и ρ_0 – давление и плотность впрыскиваемого флюида в верхней части инжектора,

P_2 – давление смеси на выходе из расширения,

α – коэффициент (<1), учитывающий трение, а также формулу смесителя (= 0.50 - 0.55).

1.11.4. Нестационарное течение газа

1.11.4.1. Теория нестационарного течения

Скорость флюида в каждой точке меняется во времени *t*.

Если трубопровод горизонтальный и цилиндрический, имеет место

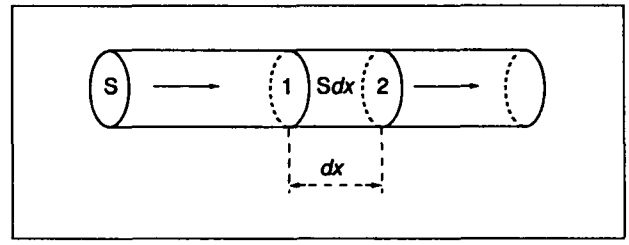
$$\underbrace{S dx(\frac{\partial\rho}{\partial t})dt}_{\text{изменение массы флюида в элементе объема } Sdx} = \underbrace{S\rho U dt}_{\text{масса газа, прошедшая через входное сечение 1}} - \underbrace{S\left[\rho U + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x}dx\right]dt}_{\text{масса газа, прошедшая через выходное сечение 2}}$$

за время dt (44)

или, после упрощений:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} = 0 \quad (45)$$

(уравнение неразрывности или сохранения массы).



С другой стороны:

$$\rho(\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial P}{\partial x} = \rho\frac{\partial\omega}{\partial x} \quad (46)$$

(сохранение энергии).

Расчеты и опыт показывают, что инерционные слагаемые пренебрежимо малы:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho\frac{\partial W}{\partial x} \quad (47)$$

Уравнения (47) и (45) используются в исследованиях нестационарного течения газа в трубопроводном транспорте. На практике их используют в следующей форме:

$$\frac{\partial}{\partial x}P^2 = -\frac{A}{D^2}Q^2 \quad (48)$$

(уравнение потерь напора),

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{B}{D^2}\frac{\partial Q}{\partial x} \quad (49)$$

(уравнение неразрывности),

A и B – константы, Q – расходы при 0°C и 1,013 бар.

Решение этих уравнений позволяет выявить закономерности различных процессов.

1.11.4.2. Численные решения

Уравнения, описывающие нестационарное течение, являются дифференциальными уравнениями в частных производных (уравнение Навье–Стокса). Они крайне редко имеют решения, которые можно выразить в аналитической форме с помощью элементарных функций. В связи с этим приходится прибегать к различным способам дискретизации, смысл которых заключается в замене непрерывной задачи на приближенный дискретный аналог.

В результате возникает необходимость решения систем алгебраических или дифференциальных уравнений. Для этого применяются методы, разделяющиеся на две группы: методы, использующие технику конечных разностей, и более новые методы – конечных элементов. Соответствующие расчетные программы позволяют моделировать нестационарные течения газа в сложных сетях. В частности, они имитируют влияние аварии, например, прорыва трубы, на работу сети.

1.11.5. Течения жидкостей в цилиндрических трубопроводах

1.11.5.1. Общая формула

$$P_1 - P_2 = KS\lambda Q^2 LD^{-5} \qquad (50)$$

(обозначения те же, что и для газа, за исключением S, которая является плотностью по отношению к воде).

Значения коэффициента сопротивления λ в зависимости от числа R_e и относительной шероховатости такие же, как для газа.

1.11.5.2. Течение воды: потери напора в водопроводных сетях

Пусть:

ΔP – потери напора в метрах водяного столба на метр длины трубопровода,

D – внутренний диаметр трубопровода в метрах,

u – скорость воды, м/с.

Скорости, достижимые на практике:

$$u = 0{,}5 - 3 \text{ м/с}$$

1.11.5.2.1. Формула Дарси

$$\Delta P = \frac{4}{D}\left(\alpha + \frac{\beta}{u}\right) u^2 \qquad (51)$$

Применима при 0.040м < D < 0.500м.

При этом:

	α	β
Новые трубы	$0{,}2535 \times 10^{-3}$	$6{,}47 \times 10^{-4}$
Трубы, бывшие в использовании	$0{,}507 \times 10^{-3}$	13×10^{-4}

Формула Дарси: коэффициенты α и β.

1.11.5.2.2. Формула Мориса Леви

$$u = a\sqrt{\frac{D\Delta P}{2}\left(1 + b\sqrt{\frac{D}{2}}\right)} \qquad (52)$$

Применима при D < 0.500м.

При этом:

	a	b
Новые трубы	36,4	1
Трубы с покрытием	20,5	3

Формула Мориса Леви.

1.11.5.2.3. Формула Кольбрука

$$\Delta P = \lambda \frac{u^2}{2gD} \qquad (53)$$

При этом:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{K}{3{,}7D} + \frac{2{,}51}{R_e\sqrt{\lambda}}\right) \qquad (54)$$

K – коэффициент шероховатости: { 0.0001 – для новых труб; 0,0020 – для труб, бывших в употреблении

R_e – число Рейнольдса: { 557 000 D при 0°C, 1250000 D при 30°C.

D (м)	$\frac{\lambda}{D}$ для $u \geq u_m$ и K = 0,0020	u (м/с)
0,040	1,783	0,50
0,050	1,293	0,45
0,060	0,995	0,50
0,080	0,665	0,55
0,100	0,486	0,60
0,150	0,280	0,65
0,200	0,189	0,55
0,250	0,140	0,60
0,300	0,110	0,60
0,350	0,090	0,50
0,400	0,0757	0,55
0,500	0,0566	0,70

Формула Кольбрука.

1.11.5.2.4. Неровности трассы

Пусть Δh – потеря напора в метрах водяного столба:

$$\Delta h = K\frac{u^2}{2g}$$

здесь:

u – средняя скорость воды, м/с

g (ускорение) – 9.81 м/с^2,

значения K даются в следующей таблице.

1.11.5.3. Течение жидкого пропана и бутана

В двух следующих номограммах, заимствованных из работы: L. Herenstein, Manuel pour le stockage du propane (издан в: l' A.T.G., 62, rue de Courcelles, 75008, Paris) приводятся значения потерь напора в трубопроводах жидкого пропана и жидкого бутана.

1.11.5.3.1. Течение жидкого пропана

См. номограмму 1.11.5.3.1.

Рис. 1.11.5.3.1 (стр. 194).

1.11.5.3.2. Течение жидкого бутана

См. номограмму 1.11.5.3.2.

Рис. 1.11.5.3.2 (стр. 195).

1.11.6. Дросселирование газа

1.11.6.1. Общие положения

Устройства, называемые дросселями, понижают давление P_1 в верху потока до более низкого давления P_2 на выходе, за счет потерь напора, вызываемых в потоке газа. Этими потерями напора можно управлять, поддерживая одно из давлений P_1 или P_2 постоянным или изменяющимся по заданному закону.

Наиболее простое устройство состоит из отверстия, степень открытия которого варьируется задвижкой (клапаном или краном) ручного управления (чтобы добиться желаемого давления P_1 в сети в любом случае).

Между верхним и нижним давлением и массовым расходом (либо объемным расходом Q_0 газа, выраженным в нормальных условиях по температуре и давлению), существует взаимосвязь в зависимости от режима истечения газа через отверстие сечением S.

Вследствие этого, каково бы ни было значение одного из давлений (на входе или выходе) и расхода газа, существует значение площади сечения S, которое позволяет установить другое давление (на выходе или входе) на желаемом значении в пределах возможностей устройства.

Идея дросселирования не может быть отделена от идеи регулирования, особенно когда, к примеру, выходное давление должно поддерживаться в установленных пределах. Отсюда следует название этих устройств: "дроссель-регулятор".

В дальнейшем будут обсуждаться дроссели-регуляторы выходного давления, упрощенно называемые "штуцерами".

1.11.6.2. Принципы работы штуцеров

Главным образом, они состоят из:

— подвижного устройства, снабженного клапаном, способного перекрыть проход S в большей или меньшей степени,

— мембраны, к которой приложена сила,

— скользящего штока в герметичном J-образном соединении.

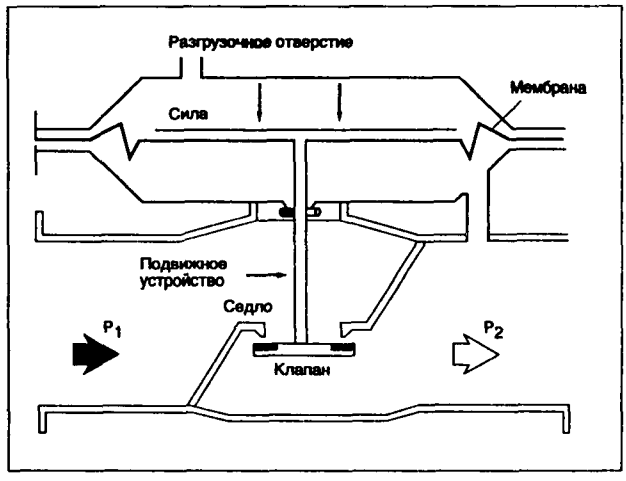
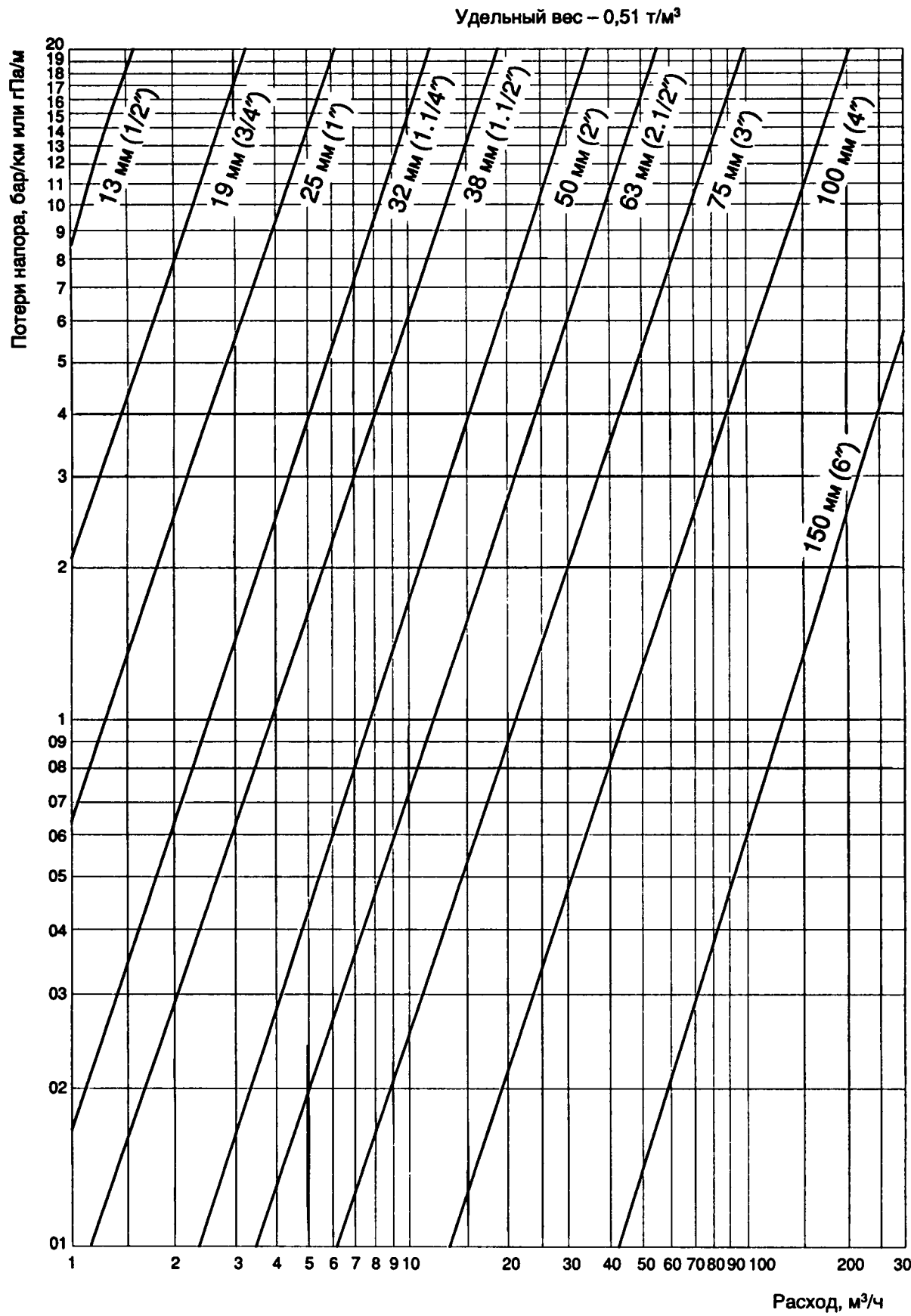


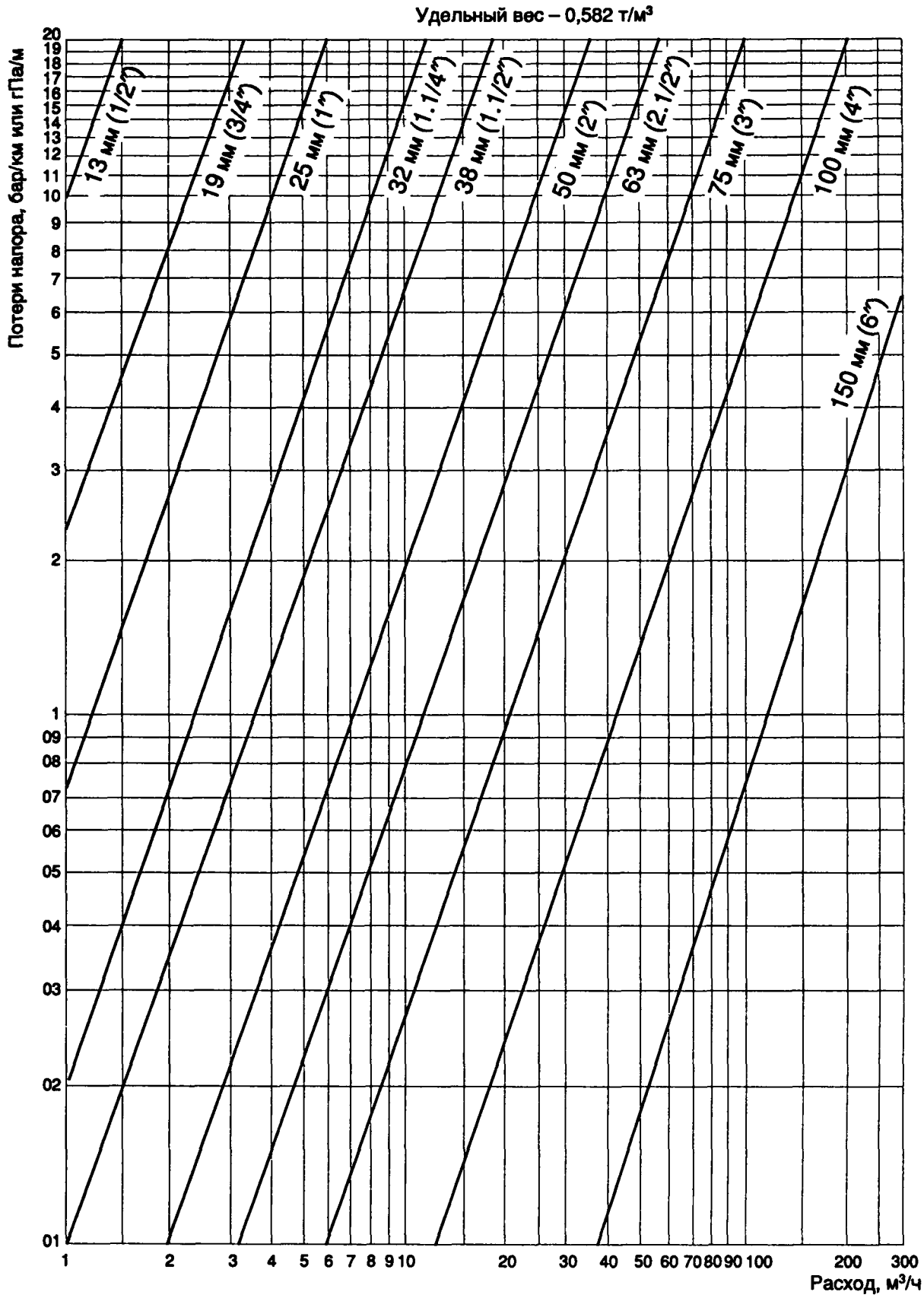
Схема работы штуцера.

Плавные изгибы					Резкие изгибы		Разветвления				
$\frac{r}{D}$	1	2	3	4	α	K	$\frac{q_1}{Q}$	0	0,4	0,8	1
22,5°	0,05	0,05	0,05	0,05	22°5	0,07	K	0,04	–0,05	0,21	0,35
45°	0,19	0,10	0,09	0,08	45°	0,24	K	0,95	0,89	1,10	1,28
60°	0,26	0,12	0,11	0,10	60°	0,47					
90°	0,29	0,14	0,125	0,11	90°	1,13					

Неровности трассы: значения K.



Определение потерь напора в трубопроводах жидкого пропана.



Определение потерь напора в трубопроводах жидкого бутана.

1.11.6.2.1. Схема функционирования

Желаемое выходное давление поддерживается постоянным в точке соединения камеры штуцера с трубопроводом (см. последний рисунок). При любом расходе, допускаемом устройством, подвижная часть занимает положение, уравновешиваемое силами, направленными вниз (вес, атмосферные сила и давление) и вверх (выходное давление на внутренней стенке деформируемой перегородки, разница давлений на входе и выходе).

Действующие давления рассматриваются в абсолютном смысле, но не по отношению к атмосферному давлению. Следующие далее расчеты выполнены для абсолютных давлений, если только не указано иное.

1.11.6.2.2. Общие соотношения

Согласно одному из свойств адиабатического расширения газа, близкого к совершенному, следует различать два случая, в зависимости от того, является ли выходное давление P_2 большим или меньшим, чем половина входного давления P_1 (при этом P_1 и P_2 – абсолютные давления):

— $P_2 < P_1/2$; в самом узком сечении (сужение устройства) скорость газа достигает скорость звука (при давлении и температуре в сужении) и давление P_c в этой точке близко к $P_1/2$. Давление на выходе P_2 может быть меньше, чем P_c. Могут иметь место и другие соотношения.

— $P_2 > P_1/2$; в этом случае скорость газа на клапане всегда меньше скорости звука. Давление на выходе обычно мало отличается от давления в сужении.

Общее соотношение, связывающее массовый расход q_m с давлениями, имеет вид:

$$q_m = AKSF$$

в котором:

— коэффициент A зависит от состояния газа (плотности и температуры на входе) и от того, какие термодинамические условия приняты за стандартные;

— S является площадью проходного сечения;

— K – коэффициент расхода, который характеризует отверстие дросселя ($K < 1$), зависит от формы отверстия (а также если совсем строго, – от природы газа и от давлений);

— расходный фактор:

— либо в сверхзвуковом режиме

$$F \cong \sqrt{P_2(P_1 - P_2)}$$

где

$$P_2 > P_1/2,$$

— либо в дозвуковом режиме:

$$F = \frac{P_1}{2}$$

где

$$P_2 < P_1/2.$$

Наибольший массовый расход будет достигнут при максимальном раскрытии S_m клапана:

$$q_{m(max)} = AKS_mF$$

Представляет интерес величина q_m/P_2:

— в сверхзвуковом режиме:

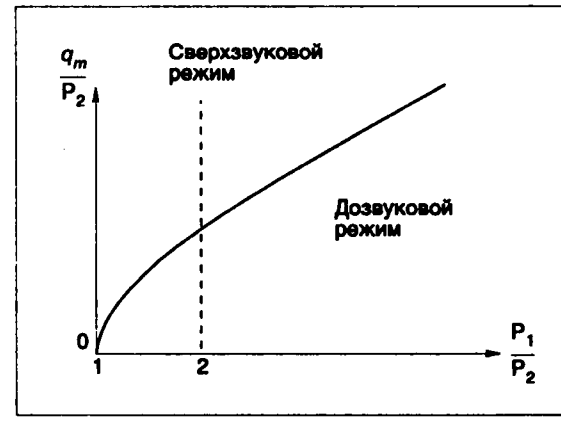
$$\frac{q_{m(max)}}{P_2} = AKS_m\sqrt{\frac{P_1}{P_2} - 1}$$

— дозвуковом режиме:

$$\frac{q_{m(max)}}{P_2} = AKS_m\frac{P_1}{2}$$

В итоге, можно получить для данного газа при фиксированной температуре на входе, единое представление для максимального дебита, каков бы ни был режим истечения:

$$q_{m(max)} = f\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$



1.11.6.2.3. Явления, связанные с дросселированием

Во время дросселирования в устройстве газ охлаждается тем больше, чем меньше он подчиняется свойствам совершенных газов, для которых процесс дросселирования всегда изотермичен. Для природного газа понижение температуры при расширении имеет порядок 0.5°C на 1 бар.

Штуцер может явиться источником шума весьма разнообразной природы:

— аэродинамического происхождения, связанного с явлением расширения;

— механических вибраций, порожденных работой устройства.

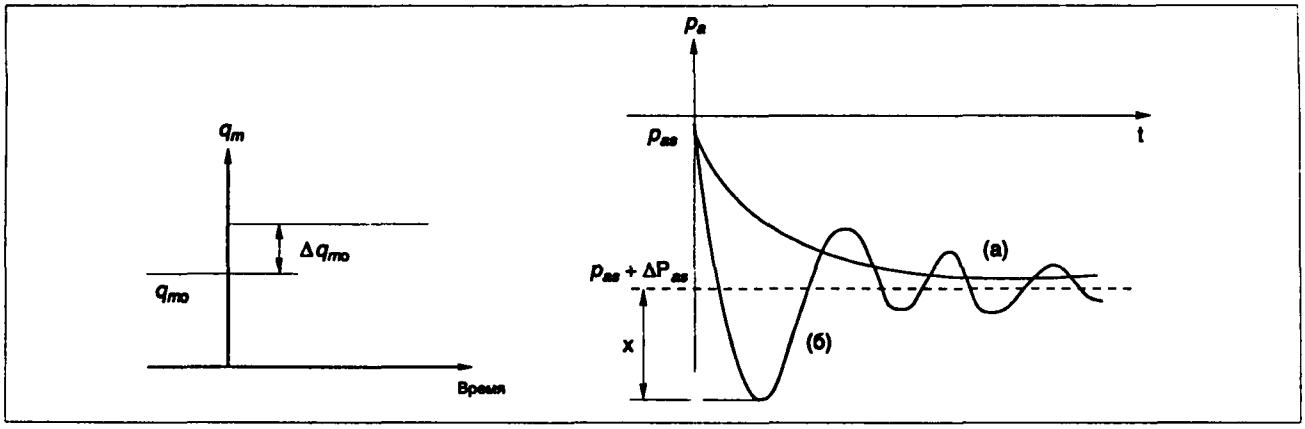
Шумы аэродинамической природы связаны с достижением скорости звука на клапане. Они зарождаются на выходе штуцера и на выходе клапана, где при понижении давления скорость растет и оказывается выше звуковой.

Возможны 3 способа передачи шума:

— излучением волн с корпуса штуцера;

— истечением газа на выходе из устройства;

— передачей механических вибраций по твердому телу.



1.11.6.2.4. Штуцеры

Для заданных давлений на входе и выходе расход q_m связан соотношением с проходным сечением S клапана, которое само является функцией характеристик этого клапана и высоты его поднятия Z (формула отверстия).

Имеет место: $q = AKS(Z)F$, при этом F – расходный фактор, зависит от P_1 и P_2.

Второе соотношение означает, что силы, действующие на подвижную часть, уравновешены:

$$f(P_1, P_2, q_m, Z) = 0$$

Если исключить Z из этих двух выражений, можно получить одно уравнение между P_1, P_2 и характеристическим расходом q_m устройства.

Для штуцера прямого действия в дозвуковом режиме характеристическое уравнение имеет вид:

$$P_2 = A - BP_1 - \frac{Cq_m}{P_1}$$

При использовании устройства на практике изменения P_2 в зависимости от изменений P_1 и q_m должны оставаться предельно малыми.

В регулируемой системе ("дроссель + сеть") смена одного стационарного режима на другой порождает нестационарный переходный процесс. Последний должен быть кратковременным (малое время отклика) и не должен слишком отклонять систему от стационарного состояния (быть затухающим).

1.12. МЕТРОЛОГИЯ

1.12.1. Измерение температур

1.12.1.1. Принципы

С 1960 года термометрическая система по стоградусной шкале основывается на двух опорных точках:

— тройная точка воды – 0,01°C (температура равновесия между льдом, жидкой водой и ее паром; три фазы сосуществуют при давлении 4.58 мм Hg, или 610,6164 Па), а не 0°C – точка плавления льда;

— точка кипения воды при нормальном давлении –100°C.

Международные опорные точки температур при нормальном давлении 101 325 Па	
Кипение кислорода	–182,97°C
Кипение серы	444,60°C
Затвердевание серебра	960,8°C
Затвердевание золота	1 063°C

Вторичные опорные точки температур при нормальном давлении 101 325 Па	
Затвердевание олова	231,9°C
Затвердевание свинца	327,3°C
Затвердевание цинка	419,5°C
Затвердевание сурьмы	630,5°C
Затвердевание алюминия	660,1°C

Для интерполяции температуры между международными опорными точками были приняты:

— платиновый термометр сопротивления для области от –182,97°С, до 630,5°С,

— платинородиевый термоэлемент (10% родия – платина) для области от 630,5°С до 1 063°С,

— оптический монохроматический пирометр красного света в области выше 1 063°С.

1.12.1.2. Жидкостные стеклянные термометры расширения

Используются тонкое стекло с малым коэффициентом расширения и заполняющая жидкость, обладающая хорошей теплопроводностью, малой удельной теплоемкостью и достаточным коэффициентом расширения.

Температурные интервалы применения являются функцией свойств жидкости (см. таблицу § 1.12.1.9).

Чувствительность зависит от отношения объема резервуара к объему капилляра и коэффициента расширения используемой жидкости.

При измерениях следует избегать параллактических ошибок; измерять температуру (снимать показания) как можно ближе к капилляру; периодически проверять показания термометра с помощью эталонного термометра.

При точных измерениях необходимо делать поправки, с одной стороны, на выступающую часть прибора, с другой – на внутреннее и внешнее давление.

1.12.1.3. Манометрические термометры

Они состоят из металлической трубки, присоединенной с помощью тонкой трубочки к деформируемому манометрическому элементу.

Вся система полностью заполнена жидкостью, подобранной в зависимости от диапазона измеряемых температур. Паразитные расширения устраняются с помощью дифференциальной схемы.

1.12.1.4. Конденсационные манометрические термометры

Жидкость в термометре подобрана таким образом, чтобы измеряемые температуры лежали между ее нормальной температурой кипения и ее критической температурой.

Так как закон изменения упругости паров от температуры нелинеен, то градуировка шкалы имеет участки, на которых расстояния между делениями возрастают с ростом температуры. Эти термометры должны использоваться в верхней части шкалы.

1.12.1.5. Твердые термометры расширения

Используются в виде биметаллических пластинок, состоящих из металлов с существенно разными коэффициентами расширения (железо–никель), сваренных по всей длине. Изменению температуры соответствует изменение кривизны пластины, усиленное и переданное стрелочному указателю.

1.12.1.6. Термометры сопротивления

1.12.1.6.1. Принцип действия

В этих приборах используется изменение удельного сопротивления некоторых металлов при изменении температуры. Определение температуры сводится к измерению электрического сопротивления.

Если сопротивление линейно зависит от температуры, то связь между ними имеет вид

$$R_\theta = R_0(1 + \alpha t)$$

где:

α – температурный коэффициент сопротивления

R_0 – значение сопротивления при температуре, равной 0°

Напомним, что

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{s}$$

где:

R_0 – сопротивление проводника при 0°С,

l – его длина в м,

s – площадь поперечного сечения в м^2,

ρ_0 – удельное сопротивление при 0°С в Ом · м

Для этих приборов используются:

— никель или медь для интервала температур от –200°С до +150°С,

— платина для интервалов температур от –200°С до +600°С.

1.12.1.6.2. Электрические характеристики используемых металлов

Металл	ρ_0	α		
	мкОм · · см	от –100 до 0°С	от 0 до +100°С	от 100 до +500°С
Никель	6,38	–	0,0066	0,0093
Медь	1,56	0,0043	0,0043	0,0044
Платина	10,5	–	0,0041	0,0036

Во французском стандарте NFC 42-330 приводится таблица соответствия температур в °С омическому сопротивлению.

Никель позволяет получить высокую чувствительность при измерениях, однако сложности с получением металла высокой степени чистоты приводят к ненадежности взаимозаменяемости.

Недостатком меди является малое удельное сопротивление, что приводит при заданных габаритах к ограниченной чувствительности термометра.

Платина, несмотря на низкое значение температурного коэффициента сопротивления, имеет такие преимущества стабильности и взаимозаменяемости, что употребляется чаще всего. Платиновый термометр сопротивления был принят международной конференцией мер и весов как инструмент интерполяции (см. §1.12.1.1).

Сопротивление определяется классическими методами с помощью мостика Уитстона или цифрового вольтметра, на котором указаны значения в °С.

1.12.1.6.3. Термометры с термосопротивлением

Проводники изготовлены из оксидов металличов, сопротивление которых быстро уменьшается с ростом температуры; поэтому эти приборы, в частности, предназначены для измерения низких температур.

1.12.1.7. Термопары

Термопара состоит из двух гомогенных металлов, проволочек разной природы, спаянных на одном из их концов (горячий спай термопары). При помещении этого спая в область с температурой, отличной от температуры других концов проволочек (холодный спай), подключенных к гальванометру, в цепи возникает электрический ток как функция природы использованных металлов и разности температур, существующей между двумя источниками.

Измерение температуры сводится к измерению электродвижущей силы (э.д.с.).

Э.д.с. измеряется либо непосредственно милливольтметром, включенным в цепь, либо при более точных измерениях, потенциометром.

Электрические термометры классифицируются на четыре нормализованные категории (NFC 42-321, 1978; NFC 42-322, 1985; NFC 42-323, 1985):

— тип T, медь–константан (54 Cu + 46 Ni), применим от –200°С до +350°С;
— тип J, железо–константан, применим до +600°С;
— тип N, группы никель–хромникелевый сплав, применим до +1000°С;
— тип SC, платина–платина родий 10%, применим кратковременно до 1500°С.

Термопары должны быть защищены от атмосферной коррозии и их надо часто тарировать.

1.12.1.8. Оптические пирометры

Эти пирометры предназначены для определения температур, превышающих 900°С, преимущественно в тех случаях, когда не могут быть использованы термопары. Основанные на измерении излучения, испускаемого телом, температура которого подлежит определению, они подразделяются на две группы.

1.12.1.8.1. Оптические пирометры полного излучения (тип Фери)

Все излучение изучаемого источника концентрируется с помощью оптической системы на зачерненном чувствительном элементе, образованном одной или несколькими соединенными последовательно термопарами, электродвижущая сила которых измеряется милливольтметром.

1.12.1.8.2. Оптические пирометры с исчезающей нитью

Измерение осуществляется путем уравнивания яркостей нити накала лампы и изображения регистрируемого источника. Уравнивание этих яркостей достигается либо изменением нагрева нити, либо ослаблением светового потока источника с помощью поглощающего клина переменной толщины, установленного между нитью и источником.

Пирометр с исчезающей нитью более точен, чем пирометр полного излучения, и позволяет регистрировать источники малых размеров, однако он обладает тем неудобством, что необходима оценка оператора* и не позволяет регистрировать температуры, которые можно измерить пирометром полного излучения.

1.12.1.9. Сравнительные характеристики приборов для измерения температуры

См. таблицу на с.200.

Примечание: Для минимизации внешних влияний и получения правильных значений при измерении температуры флюида в трубопроводе длина погруженной части термометра или термометрического зонда должна равняться 15 диаметрам термометра или зонда.

1.12.1.10. Температурные реперы с изменяемой формой

Эти "эталоны" типа Зегера, составленные из смеси керамических продуктов и имеющие вид усеченных конусов, обладают свойством изгибаться под действием тепла до тех пор, пока вершина не коснется плоскости основания.

Эти перенумерованные эталоны покрывают диапазон температур от 600°С до 2000°С с интервалом от 20°С до 30°С, но они должны использоваться с учетом скорости роста температуры и величины временной площадки максимальной температуры. Они используются в печах для обжига керамики, так как показывают уровень обжига.

*В настоящее время применяют фотоэлемент, снабженный электронным умножителем. – Прим. ред.

Тип прибора	Диапазон применения	Точность	Примечание
Жидкостные термометры расширения			Точность зависит от уровня измеряемой температуры и категории термометра (обычный, лабораторный).
— стеклянные			
· ртутные	от –30 до +350°C		
· спиртовые	от –50 до +60°C		
· толуоловые	от –80 до +100°C		
· пентановые	от –200 до +30°C		
— манометрические	от –70 до +300°C	±1% диапазона шкалы	Термометры с ртутью позволяют производить измерения до 600°C.
Конденсационные манометрические термометры	от –70 до +300°C	±1,5% диапазона шкалы	
Твердые термометры расширения	до 550°C	±2%	
Термометры сопротивления	от –200 до +600°C	Зависит от класса точности и способа считывания омического сопротивления	Допуск в °C: класс A: 0,15 + 0,002 · t. класс B: 0,3 + 0,005 · t. (t – значение абсолютной температуры в °C). Тарирование сопротивления может повысить точность.
Полупроводниковые датчики	от –55 до +150°C		Необходимо тарирование датчика.
Термометры с термосопротивлением	от –80 до +700°C	±0,5%	
Термопары	от –200 до +1500°C	±1,5%	
Оптические пирометры			Точность указана в предположении, что излучатель ведет себя как абсолютно черное тело.
— полного излучения	от +500°C до 2 000°C		
— с исчезающей нитью	от +700 до 2 000°C		

Сравнение различных термометров и пирометров.

1.12.1.11. Цветовые индикаторы температуры

Они предназначены для оценки температуры некоторых поверхностей и имеют вид карандашей, порошка (термоколор) или адгезивных пластинок (темп. пластины), а также в виде лаков и красок. Эти субстанции обладают способностью изменять свой цвет при определенной температуре.

Их область применения лежит в пределах от 65°C до 600°C.

1.12.2. Измерение давления

1.12.2.1. Определения

Давление – сила на единицу площади:

$P = \frac{F}{S}$ (формула размерности $ML^{-1}T^{-2}$).

Избыточное давление – давление, уменьшенное на величину атмосферного давления (определяется обычными приборами).

Абсолютное давление – давление, отсчитываемое от уровня вакуума (эквивалентно сумме избыточное давление + атмосферное давление).

Статическое давление – давление, измеренное датчиком, движущимся вместе с флюидом.

Динамическое давление: измеряемое давление, вызываемое кинетической энергией флюида и ей пропорциональное.

Давление торможения*: давление в точке торможения (там, где скорость флюида равна нулю).

Нормальное атмосферное давление равно 101 325 Па, или 760 мм ртутного столба при 0°C и $g = 9.806\,65$ м c^{-2}.

Оно изменяется с высотой Z (в км) по закону:

$$\lg P = 5,28 \lg (1 - 0,022\,6\,Z)$$

где $P_{ат}$ – атмосферное давление**.

1.12.2.2. Манометр Фортена

Единственный прибор, позволяющий непосредственное измерение абсолютного давления.

Он состоит из ртутного барометра, содержащего герметичную чашечку, снабженную патрубком, и соединенную с камерой, в которой надо измерить давление.

1.12.2.3. Манометр с U-образной трубкой

Трубка, укрепленная на пластинке, проградуированной в миллиметрах, заполнена жидкостью с известной плотностью (спирт, вода, ртуть).

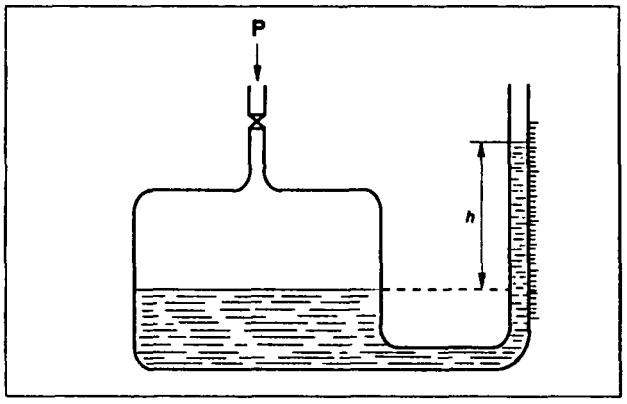
*В отечественной литературе давление торможения определяется как давление при изоэнтропическом торможении. – Прим. ред.

**Приведенная формула справедлива для стандартной атмосферы и высот $Z \leq 11$ км. – Прим. ред.

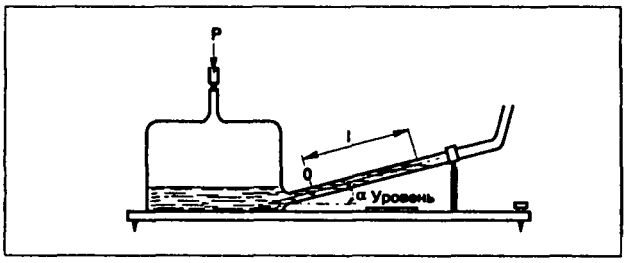
Измеряемое давление p равно $p = \rho_ж g h$, где $\rho_ж$ – плотность залитой в трубку манометра жидкости, h – разность уровней в U-образной трубке. Перевод в единицы водяного столба h_b выполняется по формуле $h_b = \frac{\rho_ж}{\rho_в}$, где $\rho_в$ – плотность воды.

1.12.2.4. Манометр с вертикальной трубкой

В этом приборе связь между уровнем жидкости в градуированной в миллиметрах трубке и уровнем в резервуаре пренебрежимо мала. Поэтому достаточно одного отсчета.



Манометр с вертикальной трубкой.



Манометр с наклонной трубкой.

1.12.2.5. Манометр с наклонной трубкой

Рекомендуется для измерения малых давлений, так как его чувствительность значительно выше, чем у U-образного манометра. Смещение мениска соответствует примерно шестикратному усилению при угле в 10° и порядка 11 при угле 5° : $h = l \sin \alpha$.

1.12.2.6. Микроманометры

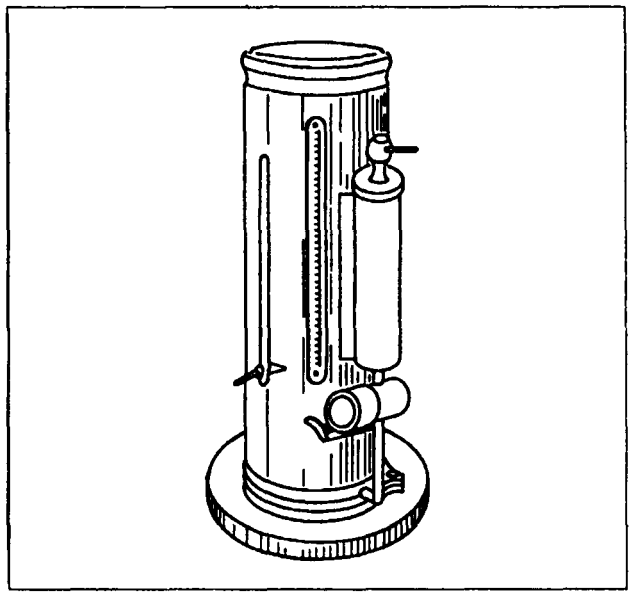
Эти приборы используются для тарирования расходомеров, или для точных измерений давления.

1.12.2.6.1. Микроманометр Асканиа

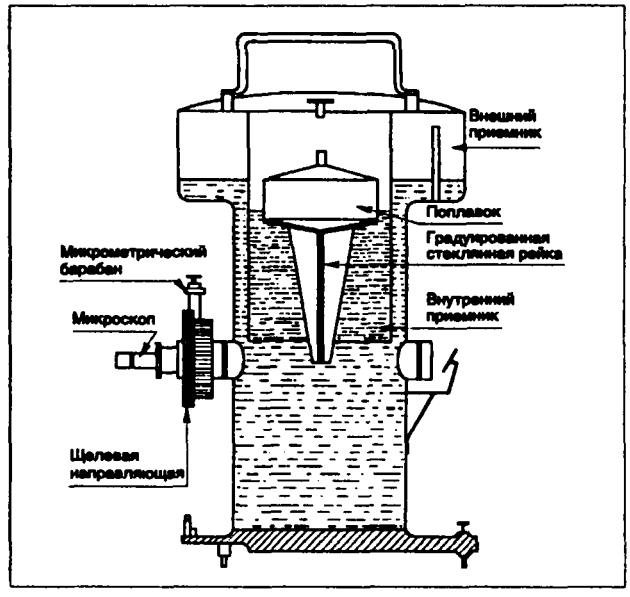
Он состоит из U-образной трубки, нижняя часть которой образована гибким шлангом. Трубка заполнена водой. Одна из ветвей трубки в своей верхней части сообщается с атмосферой и перемещается в вертикальной плоскости для приведения в другой ветви уровня воды к первоначальному положению. Перемещение этой ветви определяет величину давления.

1.12.2.6.2. Микроманометр Дебро

Поплавок с градуированной рейкой помещен в одну из двух коаксиальных трубок, наполненных водой. Считывание производится с помощью микроскопа.



Микроманометр Асканиа.



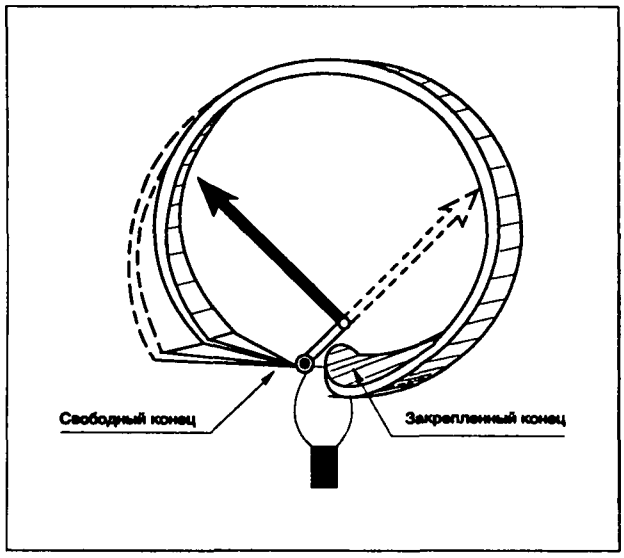
Микроманометр Дебро.

1.12.2.7. Манометр Бурдона

Чувствительным элементом является трубка эллиптического сечения, изогнутая в виде полумесяца; флюид, в котором измеряется давление, заполняет ее до закрепленного конца. Подвижный конец соединен рычажной передачей с показывающей стрелкой.

1.12.2.8. Сильфонный манометр

Используемый для высоких давлений, этот прибор имеет емкость в виде сильфона, деформирующуюся под действием давления и соединенную с показывающей стрелкой.



Манометр Бурдона.

1.12.2.9. Грузопоршневой манометр

Принцип действия состоит в равновесии поршня под действием измеряемого давления и груза известной массы. Для уменьшения трения и хорошей центровки поршень непрерывно вращается в цилиндре.

Обозначив через p измеряемое давление, M – суммарную массу, действующую на поршень, g – ускорение свободного падения, S – площадь поршня, в состоянии равновесия имеем

$$p = \frac{M_g}{S}$$

Грузовые манометры , как правило, представляют собой эталонные приборы, для которых изготовитель составляет поправочные таблицы в зависимости от температуры и давления.

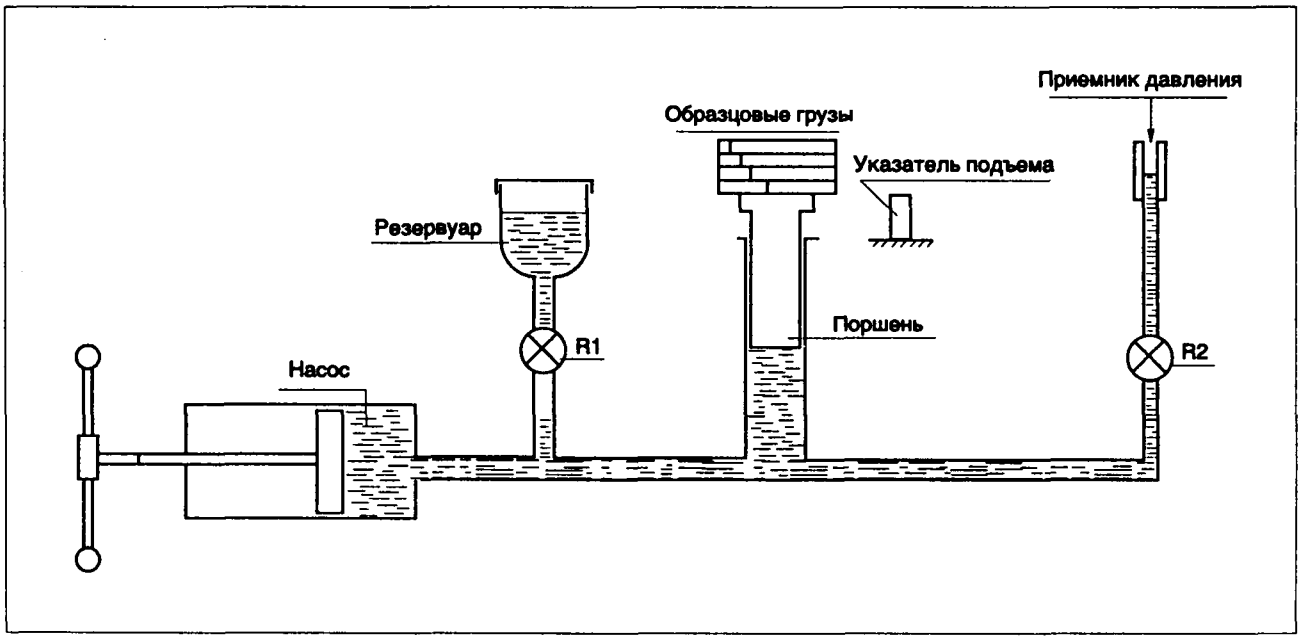
1.12.2.10. Электрические манометры, датчики давления

1.12.2.10.1. Емкостные датчики

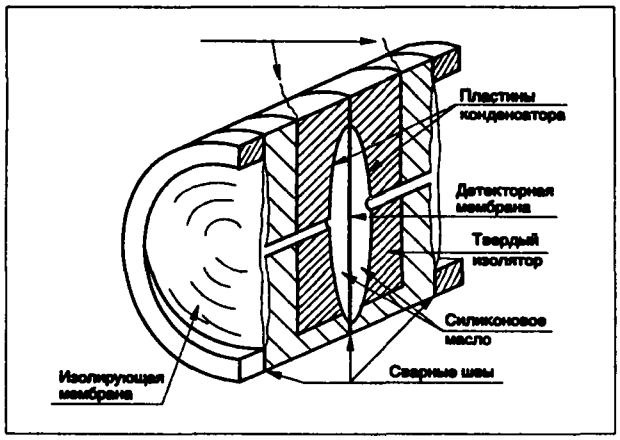
Измерительный элемент образован деформируемой мембраной и двумя неподвижными электродами, образующими пару конденсаторов. Изменение давления приводит к дисбалансу между двумя конденсаторами. Разность их емкостей обрабатывается электронным контуром (см. рисунок на с. 203).

1.12.2.10.2. Датчики сопротивления

Тонкая мембрана, несущая на себе тензометрические датчики, соединенные в виде мостика Уитстона, находится под давлением. Дисбаланс мостика при нагрузке порождает пропорциональный ей сигнал.



Грузопоршневой манометр.



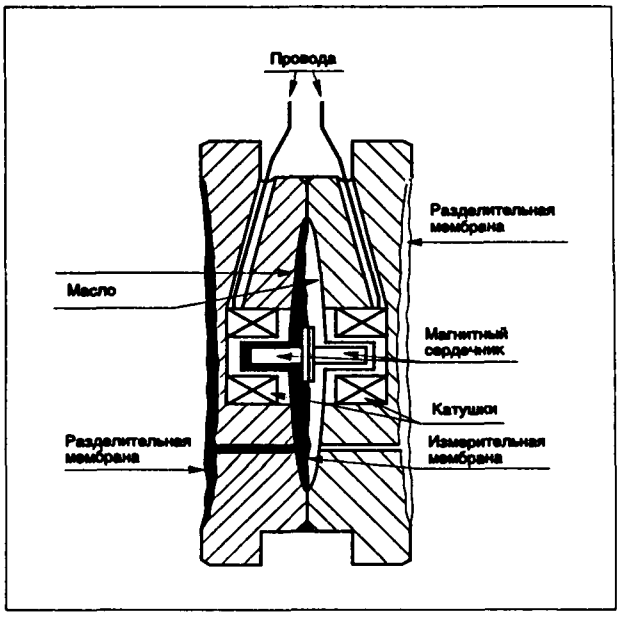
Емкостный датчик.

Различают три типа технологий:

— металлические датчики, наклеенные на мембрану, или расположенные в вакууме;
— полупроводниковые датчики на кремниевых пластинках;
— датчики сопротивления, расположенные в виде толстых слоев.

1.12.2.10.3. Датчики с дифференциальным трансформатором

В этом типе датчика используется трансформатор, сердечник которого перемещается под действием элемента, деформирующегося под давлением. Возникающее при этом изменение связи между вторичными обмотками трансформатора преобразуется соответствующей электронной цепью.



Измерительная ячейка.

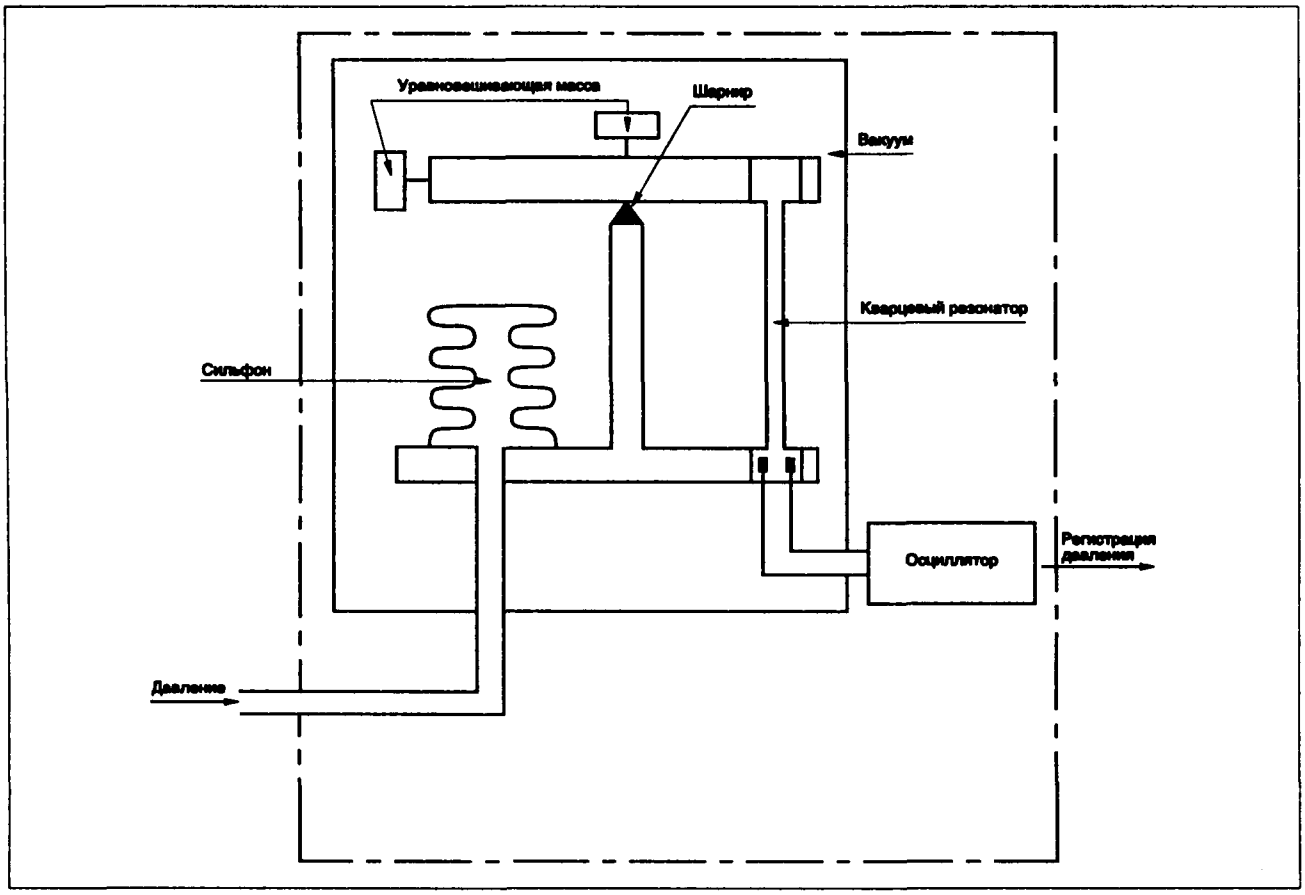
1.12.2.10.4. Датчики с незатухающими колебаниями

Их принцип действия основан на связи, которая существует между собственной частотой колебаний измерительной ячейки и механическим воздействием, которому она подвергается. В настоящее время используются измерительные ячейки двух типов:

— колеблющаяся струна;
— кварцевый резонатор (см. рисунок на с. 204).

Тип манометра		Точность	Область применения (избыточное давление)
Жидкостные манометры			
· с *U*-образной трубкой	водяные	±1 мм вод. столба	от 50 до 15 000 Па
	ртутные	±1 мм рт. столба	от 1 000 до 15 000 Па
· с вертикальной трубкой	водяные	±0,5 мм вод. столба	от 50 до 30 000 Па
	ртутные	±0,5 мм рт. столба	от 500 до 300 000 Па
· с наклонной трубкой		±0,1 мм вод. столба	от 50 до 1 000 Па
· манометр Аскания		±0,01 мм вод. столба	от 0 до 1 500 Па
· манометр Дебро		±0,01 мм вод. столба	от 0 до 2 000 Па
Грузопоршневой манометр		$<10^{-4}$ измеряемой величины	от 20 до 30 000 кПа
Металлические манометры			
· с трубкой Бурдона		±0,1% максимального значения шкалы	от 0 до 600 000 кПа
· с сильфоном		±0,1% максимального значения шкалы	от 0 до 2 500 кПа
Электрические манометры			
· емкостный датчик		0,25% максимального значения шкалы	от 0 до 15 000 кПа
· датчик сопротивления		от 0,1 до 05% максимального значения шкалы	от 0 до 30 000 кПа
· датчик с дифференциальным трасформатором		0,25% максимального значения шкалы	от 1 250 до 7 000 кПа
· датчик с колеблющейся струной		$\pm10^{-3}$ измеряемого значения	от 1 до 5 000 кПа
· датчик с кварцевым резонатором		$\pm10^{-4}$ максимального значения шкалы	от 0 до 15 000 кПа

Сравнительные характеристики манометров.



Датчик с незатухающими колебаниями.

1.12.3. Измерение расходов методом сужения потока

1.12.3.1. Общие соображения

1.12.3.1.1. Принцип

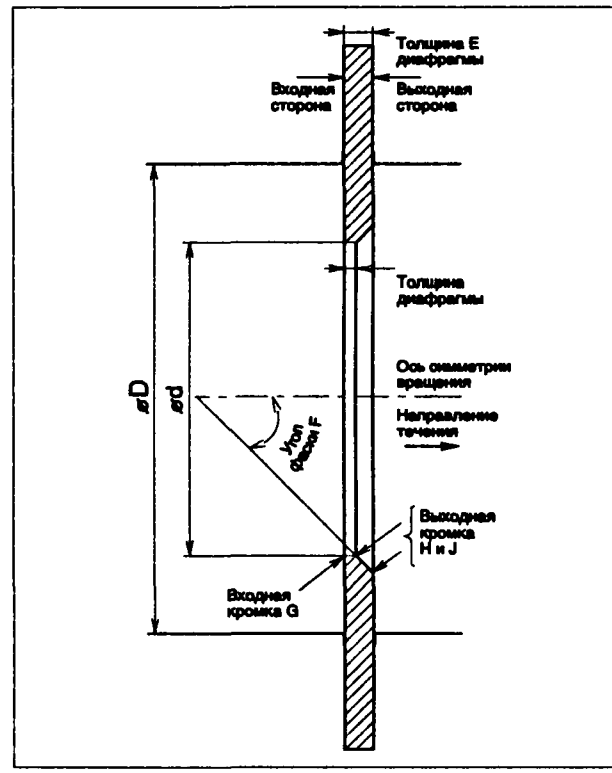
Используемые приборы (диафрагма, сопло, труба Вентури), называемые первичными элементами, устанавливаются в потоке жидкости, текущей по трубопроводу. Они создают разности статических давлений между входом и выходом из прибора, значение которой позволяет определить величину расхода, если известны термодинамические условия течения.

В стандарте NFX 10 - 102 от июня 1980 года (заменившем NFX 10 - 101 от декабря 1970 года) описаны формы и способы использования приборов, для которых многочисленные тарировки позволили получить согласованные системы использования.

1.12.3.1.2. Основные формулы

Массовый расход

$$q_m = \frac{C_c}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho_1}$$



Шайба стандартной диафрагмы.

Объемный расход при условиях течения

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_1} = \frac{C\varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}}$$

1.12.3.1.3. Обозначения

ε – коэффициент расширения ($\varepsilon < 1$ для сжимаемых флюидов),

d – диаметр отверстия используемого первичного прибора,

D – диаметр входного трубопровода (или входной диаметр трубы Вентури),

$\beta = \frac{d}{D}$ – отношение диаметров,

p – абсолютное давление в флюиде (p_1 – на входе, p_2 – на выходе, или в горле). (Символ 1 соответствует состоянию флюида в сечении, где производится отбор входного давления),

Δp – разность давлений ($p_1 - p_2$),

ρ – плотность флюида,

C – коэффициент расхода,

K – показатель адиабаты, используемый при вычислении коэффициента расширения,

$$(1-\beta^4)^{-1/2} = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}}$$

называется "коэффициентом скорости натекания"*.

1.12.3.1.4. Общие условия использования приборов

Флюид должен быть физически и термодинамически гомогенным и однофазным, либо жидким, либо газообразным; протекание флюида через прибор не должно вызывать фазовых переходов.

На длине не менее 2D вверх по течению от входного сечения первичного элемента трубопровод должен быть цилиндрическим.

Стандарт устанавливает порядок расчета погрешностей.

В руководстве по практическому использованию (NFX 10 - 104 декабрь 1970 года)** приводятся физические константы, численные значения коэффициентов, порядок расчетов и способы применения используемых вторичных приборов.

1.12.3.1.5. Первичные элементы: определения

Диафрагма – тонкая пластинка с круговым отверстием соосным трубе.

Сопло – сходящееся устройство, заканчивающееся цилиндрической частью, называемой горлом (различают сопло I. S. A. 1932 и удлиненное сопло).

Труба Вентури – нормированные типы представляют собой устройство, состоящее из сходящегося конуса, цилиндрической части, называемой горлом, расширения, называемого расходящимся конусом (различают сопло Вентури и классическую трубу Вентури, называемую также трубой Гершеля).

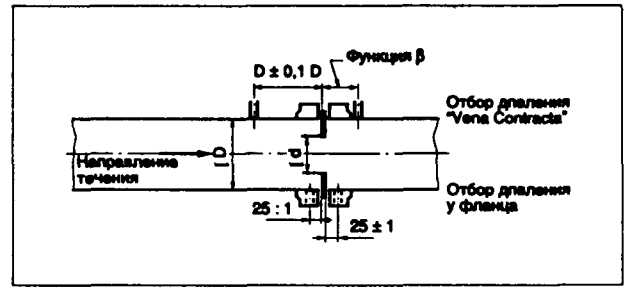
* В отечественной литературе величина $\sqrt{1-\beta^4}$ не имеет специального названия. В ряде руководств под коэффициентом расхода понимается величина $C(1-\beta^4)^{-1/2}$ – прим. ред.

** Должна появиться новая версия. В этой главе даются справки исключительно в соответствии с этими новыми нормами.

1.12.3.2. Типы отбора давления, используемые с диафрагмой

Удаление точки отбора давления представляет собой расстояние, отсчитываемое вдоль прямой, параллельной оси трубопровода, от оси приемного отверстия до одной из плоскостей диафрагмы.

Это расстояние характеризует тип отбора давления у используемой стандартной диафрагмы.



Расстояния отборов давления у диафрагм.

1.12.3.2.1. Отбор давления у фланца

См. вышеприведенный рисунок.

Отбор на входе: расстояние 25,4 мм от входной стороны шайбы.

Отбор на выходе: расстояние 25,4 мм от выходной стороны шайбы с допуском ±0.5 мм при $\beta > 0{,}6$ и $D \le 150$ мм, ±1,0 мм в других случаях.

1.12.3.2.2. Отбор давления на расстоянии D и D/2

Отбор на входе: расстояние в D ± 0,1D от входной стороны шайбы.

Отбор на выходе: расстояние в 0,5D от входной стороны шайбы с допуском ±0,02D при $\beta \le 0{,}6$, ± 0,01D при $\beta > 0{,}6$.

1.12.3.2.3. Отбор давления в углах

Расстояние точек отбора давления от обеих поверхностей шайбы равно половине диаметра (или половине ширины) приемного отверстия, так что оно выходит непосредственно у шайбы.

Эти приемники представляют собой либо отдельные отверстия, либо кольцевые щели определенных размеров.

Коэффициент расширения ε

Для сжимаемых флюидов он рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = 1\,(0{,}41 + 0{,}35\beta^4)\,\frac{\Delta p}{K p_1}$$

1.12.3.3. Расходомеры с классической трубой Вентури (стандарт NF X 10 - 102)

1.12.3.3.1. Характеристики

При равной разности измеренных давлений потери на этих приборах меньше, чем на диафрагмах или соплах.

Стандартом предусмотрены формы входного цилиндра, его длины, рекомендуемой равной D (диаметр цилиндра), конфузора, угла у вершины 21° ± 2°, горла длиной *d* (диаметр горла), особенностей их профиля, правила отбора давления.

1.12.3.3.2. Потери давления

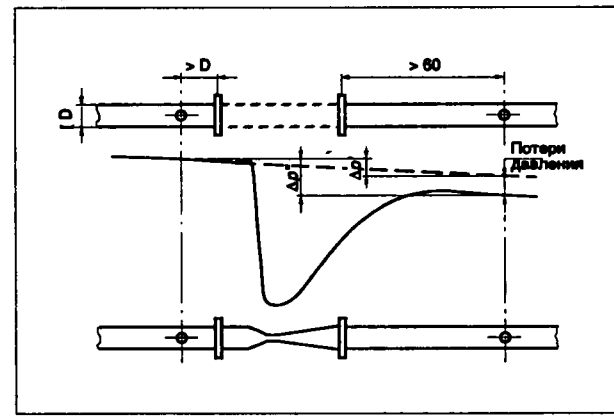
Эти потери могут быть определены измерениями до и после монтажа в трубопроводе при постоянном расходе.

1.12.3.4. Область применения сопел Вентури

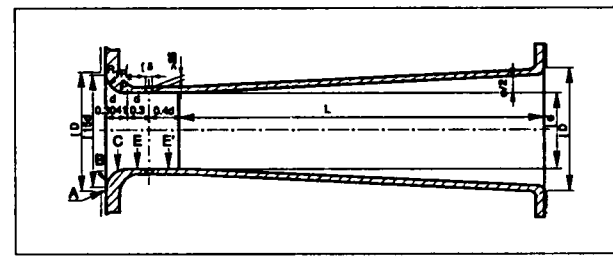
Потери давления на стандартизированных соплах Вентури могут быть существенно меньше, чем на стандартизованном сопле или диафрагме. Они могут быть использованы для измерения расхода в трубопроводе диаметром D от 65 мм до 500 мм и отношений диаметров β от 0,32 до 0,77мм. Нижняя граница для D является функцией отношения диаметров β и диаметра приемного отверстия у горла, приведенной в § 8.2.4.3 стандарта.

Профиль сопла Вентури обладает осевой симметрией. Он состоит из сходящейся части с закругленным профилем, цилиндрического горла и диффузора.

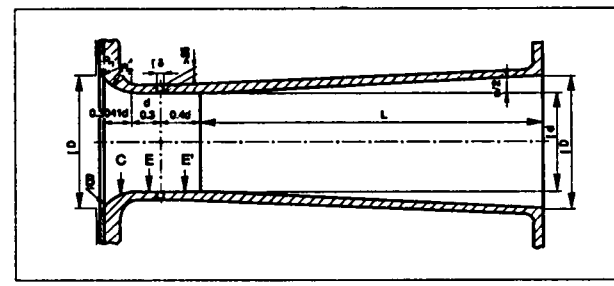
Диаметр горла *d* лежит в пределах от 50 до 390 мм.



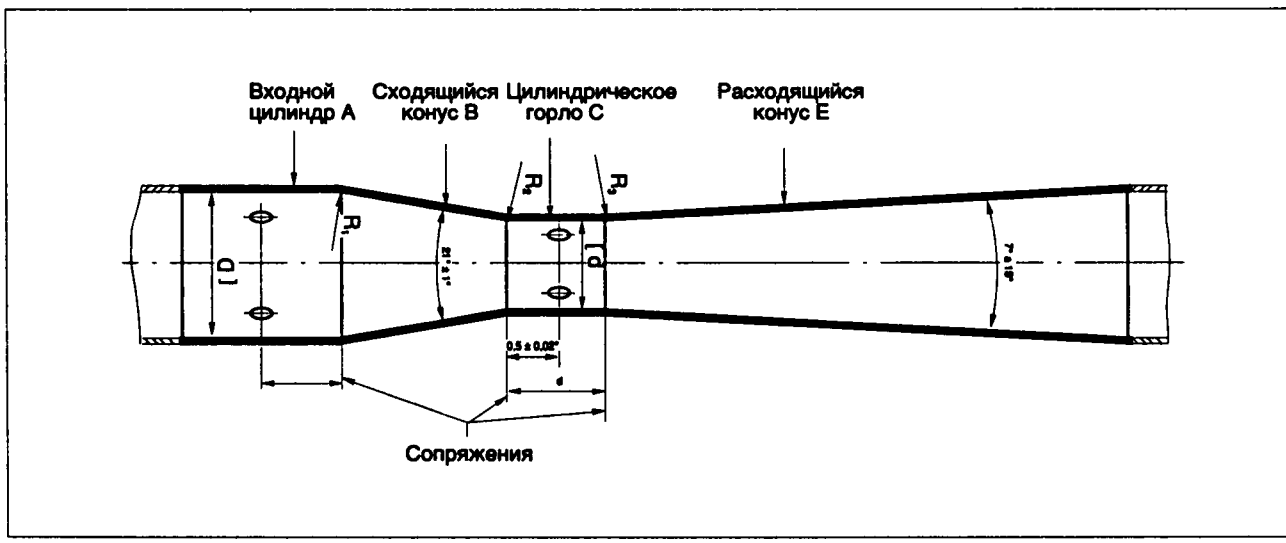
Потери давления в классической трубе Вентури.



Сопло Вентури. Усеченный конус $d < \frac{2}{3}D$.



Сопло Вентури. Усеченный конус $d > \frac{2}{3}D$.



Сечение классической трубы Вентури.

1.12.3.5. Выбор первичных элементов для измерения расхода флюида

1.12.3.5.1. Расход флюида

Диафрагма: легкая адаптация к гамме расходов.

Труба Вентури и сопло Вентури: демонтаж является менее удобной операцией, чем в случае диафрагмы.

1.12.3.5.2. Диаметр трубопровода, отношение диаметров. Число Рейнольдса

Для каждого элемента существуют лимитированные значения диаметра трубы D, отношения диаметров $\beta = \frac{d}{D}$ и числа Рейнольдса потока.

1.12.3.5.3. Прямые участки на входе и выходе

Для классических труб Вентури требуются прямые участки меньших размеров, чем для других первичных элементов. Их размеры существенны и оговорены стандартом.

1.12.3.5.4. Потери давления

Для одной и той же разности замеренных давлений потери давления на классических трубах Вентури и соплах Вентури от четырех до шести раз меньше, чем на диафрагмах и соплах.

1.12.4. Объемные счетчики

1.12.4.1. Общие соображения

Эти приборы определяют объем протекшего через них газа при условиях измерения.

Категории приборов, называемых "объемными газовыми счетчиками", регламентированы следующими положениями:

- декрет № 72-866 от 16 сентября 1972 года (*Journal officiel* от 26 сентября 1972 года), видоизменен декретом № 76-1208 от 17 декабря 1976 года (*Journal officiel* от 25 декабря 1976 года), регламентирующим категорию измерительного прибора: объемный газовый счетчик;
- декреты № 73-788 и № 73-789 от 4 августа 1973 года (*Journal officiel* от 11 августа 1973 года) относительно применения предписаний Европейского экономического сообщества о контроле объемных газовых счетчиков;
- предписания от 23 октября 1974 года (*Journal officiel* от 21 ноября 1974 года), видоизмененные предписаниями от 17 апреля 1979 года (*Journal officiel* от 31 мая 1979 года), от 10 июня 1983 года (*Journal officiel* от 26 июля 1983 года) и от 31 октября 1984 года (*Journal officiel* от 13 ноября 1984 года) относительно конструкции, установки и проверки объемных газовых счетчиков.

Объемные газовые счетчики по принципу действия подразделяются на лопастные, ротационные, тахометрические (турбинные) и вихревые; погрешности при первичной и периодической проверке не должны выходить за пределы максимально допустимых (см. нижерасположенную таблицу).

1.12.4.2. Принципы коррекции плотности

Объем газа V при давлении и температуре измерения (P, T) приводится к нормальным условиям (P_0,T_0, обычно во Франции 101325 Па, 0°C) с помощью уравнения состояния

$$V_0 = V\frac{P}{P_0}\frac{T_0}{T}\frac{Z_0}{Z}$$

где Z – коэффициент сверхсжимаемости рассматриваемого газа.

Для газа месторождения Лак таблицы значений Z приведены в *Journal officiel*. Для других газов были составлены эмпирические корреляционные формулы.

1.12.4.2.1. Коррекция плотности поставляемого газа

Выделяют валовые замеры за период, в течение которого предполагают, что фактически плотность не менялась или мало менялась, либо специально регулировалась (Национальное газовое общество юго-запада S.N.G.S.O.), либо чаще всего

Тип счетчика	Первичная проверка	Периодическая проверка
Лопастные	±3% для $Q_{min} \le Q \le 2Q_{min}$ ±2% для $Q_{min} \le Q \le 2Q_{max}$	±4% для $Q_{min} \le Q \le Q_{max}$
Турбинные Ротационные Вихревые	±2% для $Q_{min} \le Q \le 0{,}2Q_{max}$ ±1% для $0{,}2Q_{max} \le Q \le Q_{max}$	±4% для $Q_{min} \le Q \le 0{,}2Q_{max}$ ±2% для $0{,}2Q_{max} \le Q \le Q_{max}$

Максимально допустимые погрешности для объемных газовых счетчиков при пробных расходах.

регулировалось давление и в исключительных случаях температура. Эти регулировки почти всегда несовершенны и тогда оцениваются "средние" условия.

1.12.4.2.2. Автоматическая коррекция плотности

1.12.4.2.2.1. Механика

Еще встречаются в эксплуатации приборы механической коррекции, но имеется тенденция к их замене электронными калькуляторами.

1.12.4.2.2.2. Электроника

Речь идет о вычислительной машине, оборудованной интерфейсами с различными датчиками. Корректоры обычно используют измерения P и T и подсчитывают Z с помощью таблиц для рассматриваемого газа и измеренных P и T. Существуют корректоры только по температуре. Измерения Z обычно не проводятся.

1.12.4.3. Регламентирующие тексты

Контроль измерительных приборов в общем виде определен декретом № 88-862 от 6 мая 1986 года, модифицирующим декрет от 30 октября 1945 года, и содержит:

— исследование и испытание моделей измерительных приборов, имея ввиду их апробацию,
— первичную проверку каждого нового или отремонтированного прибора, позволяющую констатировать, что эти приборы одинаковы с одобренными моделями и отвечают регламентирующим предписаниям,
— периодическую проверку приборов, находящихся в эксплуатации, в ходе которой может быть предписан ремонт,
— установку монтажником, имеющим допуск,
— декларацию об установке,
— разрешение на эксплуатацию,
— ремонт имеющим допуск ремонтником,
— проверку после ремонта.

Частные предписания для каждой регламентированной категории приборов определены декретами и постановлениями для каждой из этих категорий; для объемных газовых счетчиков эти положения указаны в § 1.12.3.1.

Фактически эти положения соответствуют более или менее директивам Европейского экономического сообщества (71/316 от 26 июля 1971 года, 72/427, 83/375 для общих директив и 71/318, 74/331, 78/365 и 82/623 для объемных счетчиков газа).

Государство гарантирует добросовестность коммерческих сделок и в этом качестве осуществляет контроль используемых измерительных приборов.

Это положение обеспечивается Метеорологической службой и региональной дирекцией промышленности и исследований (D.R.I.R) Министерства промышленности.

1.12.4.4. Калибр счетчика

В Европе калибр счетчика обозначается буковой G в сопровождении с номером серии ISO R 5 (геометрическая серия со знаменателем $10^{11/5}$ округленно): 10, 16, 25, 40, 65, 100,160 и т.д.

По таинственной причине максимальный расход указывается не числом, следующим за G, а следующим за серией: счетчик G 160 предназначен для максимального расхода 250 $м^3 \cdot ч^{-1}$.

1.12.4.5. Погрешности

Приведенные в регламентирующих положениях погрешности, если они указаны в относительных величинах, всегда относятся к измеряемым прибором значениям, а не к максимальному расходу, как это следовало бы из существующего обычая определять класс точности датчика по отношению к максимальному значению шкалы.

1.12.4.6. Основные типы счетчиков

1.12.4.6.1. Лопастные счетчики

Измерительный элемент образован недеформируемым замкнутым объемом, разделенным подвижной перегородкой, непроницаемой для газа: каждая из образованных таким образом камер снабжена отверстием для их заполнения и опорожнения.

Система золотников с прямолинейным или криволинейным перемещением, или ротационная система, приводимая в движение перемещением перегородок (рычаги и мембраны), позволяет сообщать камеры для их заполнения с впуском, изолировать и сообщать для опорожнения с выходным патрубком.

Для преодоления мертвых точек оба объема или камеры соединены коленчатым валом, передающим движение счетчику.

Вся конструкция заключена в корпус: сальник дает возможность соединения деталей, находящихся снаружи и в газовой зоне.

Кинематическая цепь, содержащая два регулировочных колеса и позволяющая корректировать объем камер (теоретический и реальный), реализует представление объемов (см. с. 209).

1.12.4.6.2. Турбинные (тахометрические) счетчики

Они состоят из прямолинейного канала, на оси которого с обеих сторон турбины расположены обтекатели. Лопатки турбины расположены в кольцевом зазоре и наклонены под углом примерно в 45°.

Спереди и сзади турбины могут располагаться ненаклоненные неподвижные лопатки.

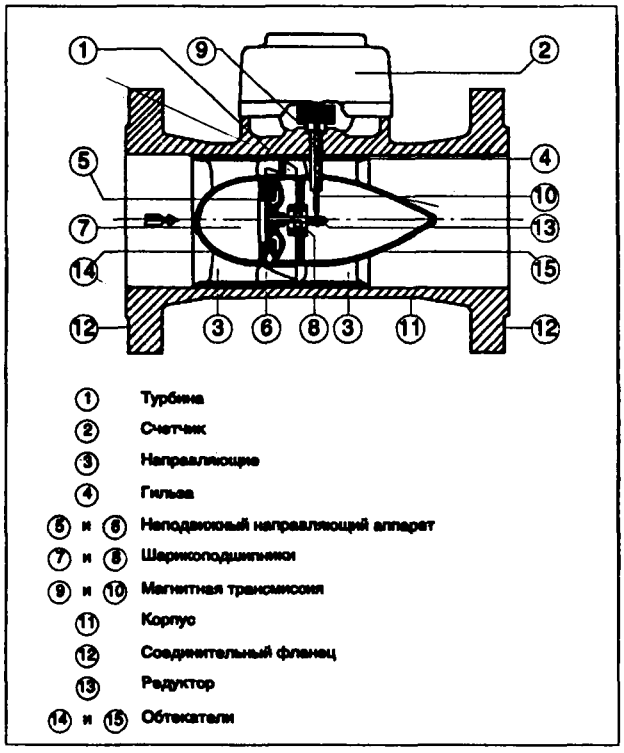
Скорость вращения турбины, пропорциональная скорости течения газа, то есть расходу, передается на счетчик с помощью кинематической цепи, содержащей регулировочные колеса.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

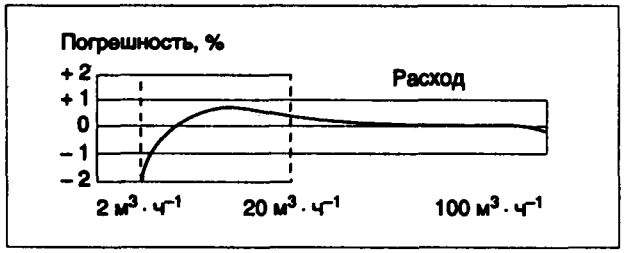
Нормализованный ряд	G 40	G 65	G 100	G 160	G 250	G 400	G 650	G 1 000	G 1 600	G 2 500	G 4 000
Максимальный расход ($м^3 \cdot ч^{-1}$)	65	100	160	250	400	650	1 000	1 600	2 500	4 000	6 500
Минимальный расход ($м^3 \cdot ч^{-1}$)	3	5	8	13	20	32	50	80	130	200	325
Входной диаметр (мм)	50	50	80	80	100	100	150	200	250	300	400
Теоретический объем цикла ($дм^3$)	0,58	0,58	1,37	1,37	3,15	9,2	9,2	27,7	52,0	117,2	205,0
Потери давления	<45 даПа при максимальном расходе на воздухе при атмосферном давлении										

Характеристики счетчиков.

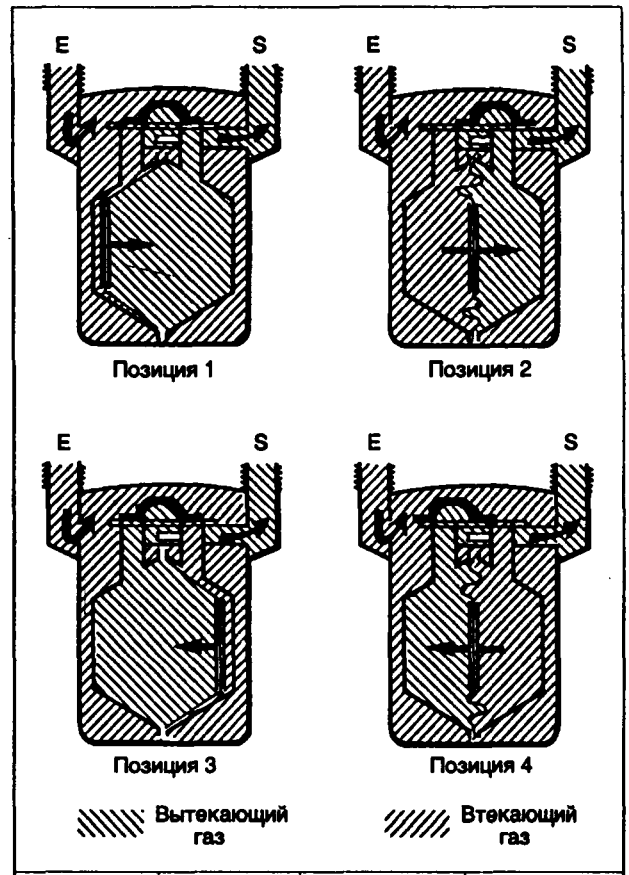
В приведенной выше таблице представлены основные характеристики счетчиков; на представленном ниже графике приведена типиповая кривая погрешностей, полученная после тарировки.



Турбинный (тахометрический) счетчик.



Типовая кривая погрешностей.

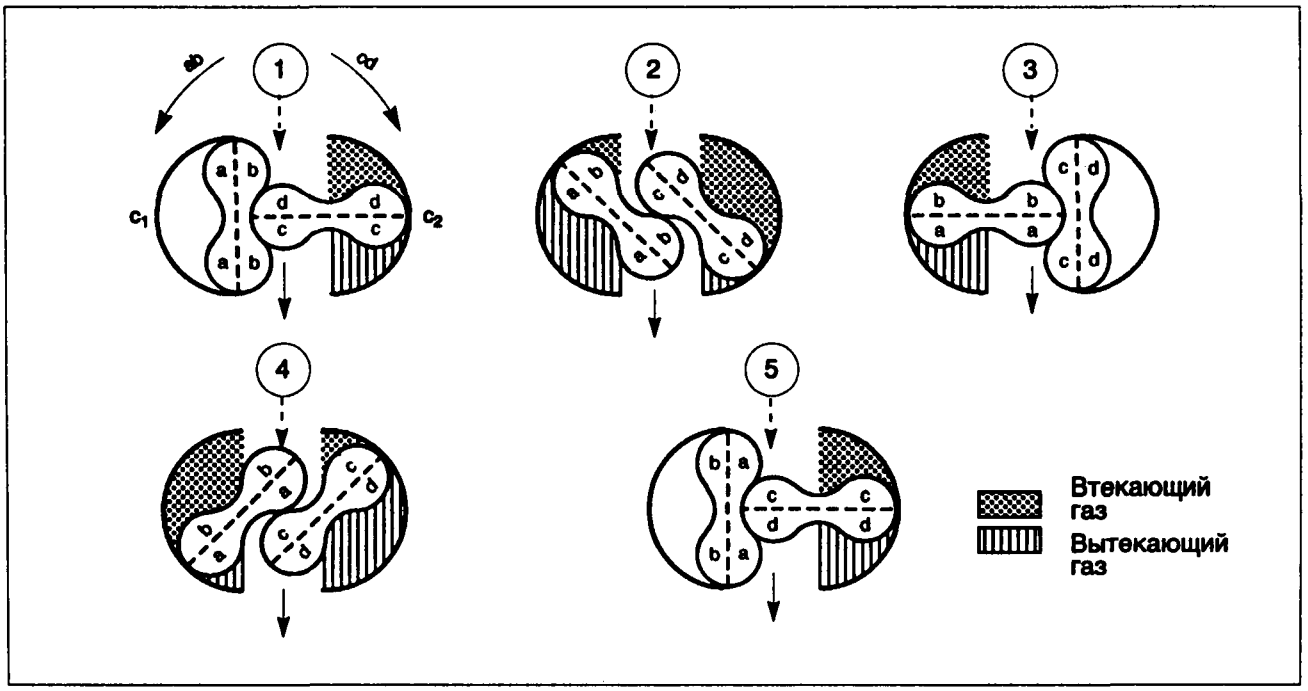


	Положение золотника	Камера № 1	Камера № 2
1-ая фаза	среднее	изолирована, пустая	изолирована, полная
2-ая фаза	справа	наполняется	опорожняется
3-ая фаза	среднее	изолирована, полная	изолирована, пустая
4-ая фаза	слева	опорожняется	наполняется
Вторая часть идентичная первой			

Лопастной счетчик.

1.12.4.6.3. Ротационные счетчики

Речь идет об объемных счетчиках, измерительный элемент которых состоит из двух полуцилиндров, образующих корпус, внутри которого в противоположных направлениях вращаются два тора или цилиндра, профили которых (обычно в виде восьмерки или фасоли) таковы, что они все время соприкасаются между собой и со стенками корпуса.



Ротационные счетчики.

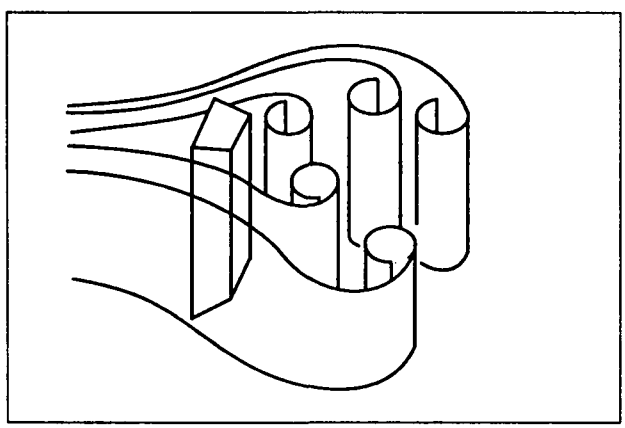
Кинематическая цепь, также содержащая регулировочные колеса, передает вращение подвижных частей счетчику (см. вышеприведенный рисунок).

1.12.4.6.4. Объемные вихревые счетчики

Несколько лет тому назад на рынке появились объемные газовые счетчики, в которых используется принцип возникновения вихрей за препятствием в потоке. Струхаль и фон Карман установили, что частота срыва этих вихрей пропорциональна скорости потока:

$$S_t = \frac{fd}{U}$$

Число Струхаля остается постоянным в широком диапазоне чисел Рейнольдса (f – частота срыва вихрей, d – характерный размер препятствия, U – скорость потока).

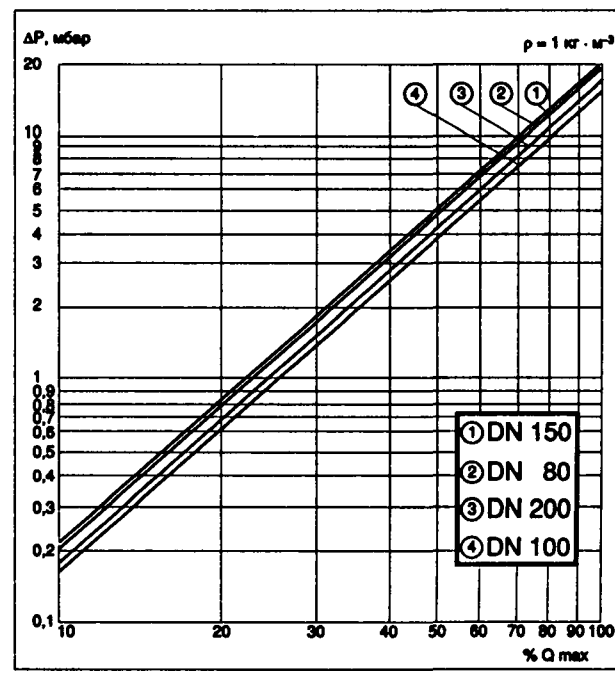


Образование вихрей.

В приведенной ниже таблице представлены характеристики вихревых счетчиков (или vortex), предложенных одним французским фабрикантом:

DN	80	100	150	150	200
Размер	G 400	G 650	G 1 000	G 1 600	G 2 500

На расположенном ниже графике приведены потери давления в этих счетчиках в зависимости от расхода.



Потери давления в вихревом счетчике.

1.12.5. Измерение плотности

1.12.5.1. Определение

Плотностью газа называется масса в единице объема этого газа. Она выражается обычно в кг · м$^{-3}$ (система СИ) и является функцией свойств газа, температуры и давления.

Непосредственное измерение плотности газа осуществляется с помощью статических или динамических денсиметров.

1.12.5.2. Статические плотномеры

Речь идет о приборах, основанных на законе Архимеда.

Сила давления, с которой газ плотностью ρ действует на тело объемом V, равна

$$f2 = -\rho V g3$$

Это тело обычно имеет сферическую форму и крепится к концу коромысла весов (см. приведенный рисунок). Весы удерживаются в равновесии силой F3, приложенной к другому концу коромысла.

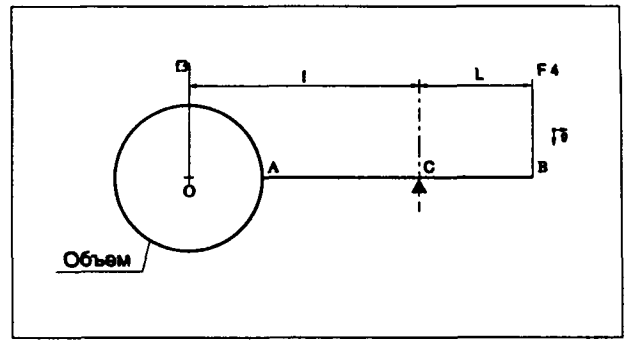
Если эта система уравновешена в пустоте, то в газе имеет место равенство

$$F3L = l\rho V g3$$

Момент уравновешивающей пары пропорционален плотности; его величина зависит от геометрии прибора (через l и V) и места использования (через $g3$).

Уравновешивающий момент создается приведением коромысла в горизонтальное положение при помощи:

— либо с помощью электромагнитной силы переменной величины, приложенной в фиксированной точке (Шлюмберже);



Принцип действия статического денсиметра.

— либо, в соответствии с принципом коромысла, при помощи передвигаемого противовеса (Дегранж и Гюо).

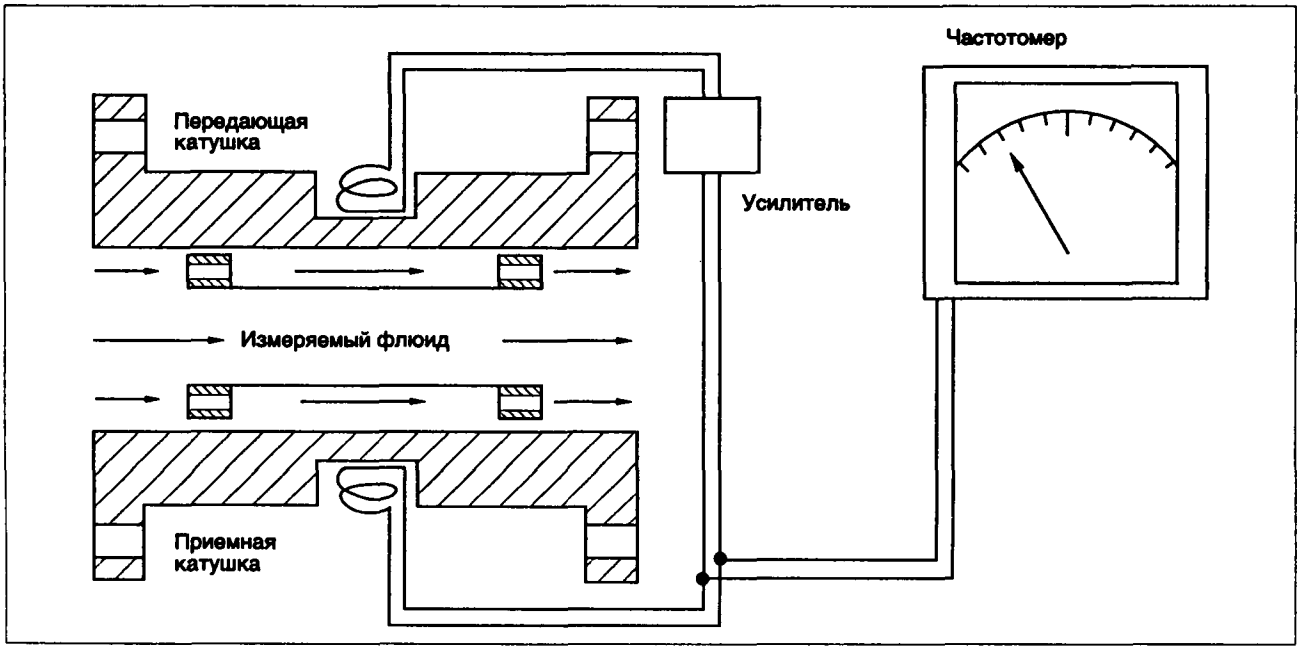
1.12.5.3. Динамические плотномеры

Наиболее употребляемыми в этой группе являются денсиметры с колеблющимися механическими элементами: заделанная по концам пластина (И.Т.Т. Бартон), или цилиндр (Солартрон, Шлюмберже, Ж. Агар).

В последнем случае тонкий никелевый цилиндр приводится в круговое колебательное движение с резонансной частотой при помощи электромагнитного поля; эти колебания детектируются приемной катушкой и поддерживаются при помощи усилителя (см. нижерасположенный рис.).

Резонансная частота цилиндра является функцией плотности газа, циркулирующего внутри и вне его.

Теоретическое определение этой функции весьма затруднено из-за сложности процесса обмена количеством движения на поверхности контакта металл–газ.



Денсиметр с колеблющимся цилиндром..

1.12.6. Измерение относительной плотности

1.12.6.1. Определение

Плотность газа по отношению к воздуху представляет собой отношение массы газа, взятой в определенном объеме, к массе воздуха в том же объеме при одинаковых давлении и температуре. Эта величина является безразмерной.

Измерение относительной плотности выполняется либо весовым, либо динамическим методом.

1.12.6.2. Весовой метод

Определяется масса баллона известного объема сначала заполненного воздухом, а затем рассматриваемым газом. Не смотря на свою простоту это продолжительный и тонкий метод.

1.12.6.3. Динамический метод

В этом методе используется закон, согласно которому скорость истечения газов через отверстие с острой кромкой обратно пропорциональна корню квадратному из их плотности, т.е.

$$dg = \left(\frac{tg}{ta}\right)^2,$$

где *dg* - относительная плотность газа,

tg, *ta* - времена истечения газа и воздуха

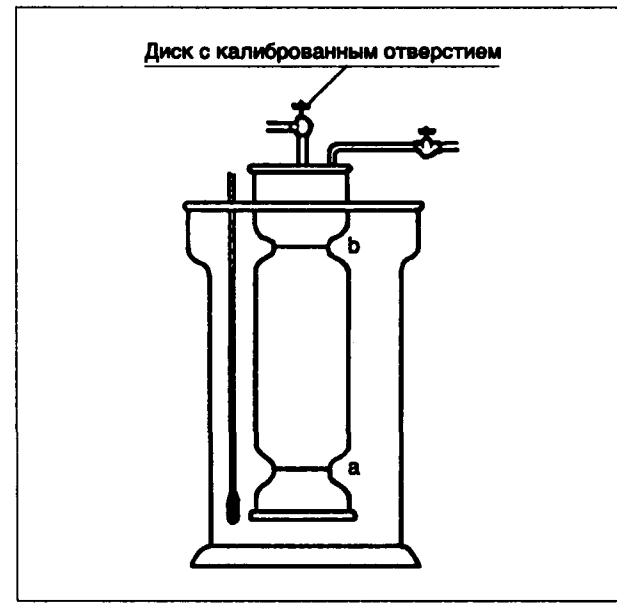
1.12.6.4. Плотномер Шиллинга

Этот прибор, в котором происходит истечение под переменным давлением, состоит из бака с водой, в который погружается пробирка, открытая снизу, а сверху имеющая отверстие с острой кромкой. Пробирку с используемым газом помещают в бак и отмечают время *tg* прохождения уровня воды через отметки *a* и *b*, нанесенные на стенке пробирки. Таким же образом для воздуха определяют время ta.

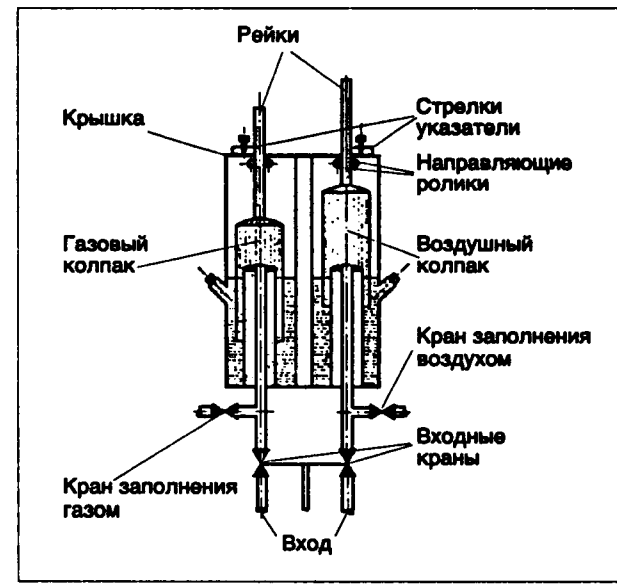
Этот прибор позволяет быстро получать результаты измерений, однако они корректны лишь для газов, изготовленных из угольных газов.

1.12.6.5. Плотномер Гидро

Переносный прибор, в котором происходит истечение под постоянным давлением, применимый для исследования природного газа. Он состоит из двух одинаковых колпаков, снабженных градуированными рейками. Оба колпака погружены в баню с очень жидким маслом и могут быть одновременно соединены с патрубками, имеющими отверстия



Плотномер Шиллинга.



Плотномер Гидро.

с острой кромкой. Один из колпаков заполняется воздухом, другой – исследуемым газом.

По измерению расстояний, пройденных каждым из колпаков, определяют относительную плотность исследуемого газа.

1.12.6.6. Гидростатические плотномеры

Они основаны на определении веса столба газа или разницы весов столбов газа и воздуха. Эти веса, пропорциональные плотностям, определяются по записываемым измерениям соответствующих давлений.

1.12.6.7. Коромысловые плотномеры

В них используется вертикальная выталкивающая сила, действующая на любое тело, погруженное в какой-либо флюид. Эта сила, являющаяся функцией плотности газа, измеряется весами.

Денсиметры Поллю и Тестю основаны на этом принципе.

1.12.6.8. Турбинные плотномеры

Эти приборы имеют вентилятор, снабженный двумя подобными колесами, вращающимися в двух различных камерах (одна для воздуха, другая для газа) и снабженные датчиками бокового давления. Эти давления, пропорциональные плотностям газов, передаются под два колокола с гидравлическими затворами, подвешенные на концах коромысла весов, смещения которого регистрируются.

Денсиметры Дебро и Ранарекс основаны на этом принципе.

1.12.7. Измерение шума

1.12.7.1. Шум

Согласно Afnor* "акустический феномен, производящий слуховое ощущение, рассматриваемое как неприятное или мешающее". Шум может быть также определен как совокупность колебаний различной частоты.

1.12.7.2. Акустическое давление, или звуковое давление

При наличии акустических волн мгновенное давление $p(t)$ в какой-либо точке атмосферы равно сумме атмосферного давления и мгновенного изменения p_s, называемого акустическим или звуковым давлением.

Эффективное значение p_{eff} звукового давления определяется как

$$p_{eff}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T p_c^2(t)\,dt$$

В случае чистого звука (синусоидального)

$$p_{eff} = \frac{p_c}{\sqrt{2}}$$

где p_c – амплитуда изменения давления.

* Afnor – Французское общество стандартизации. Прим. ред.

Уровень звукового давления определяется как

$$NPS = 20 \lg \frac{p_{eff}}{p_0}$$

где p_0 – эталонное звуковое давление, равное 2×10^{-5} Па в воздухе **; единицей измерения уровня звукового давления является децибел (дб), что соответствует отношению давлений в 1,122 раза, или 1/20 lg отношения давлений.

Уровень звукового давления является локальной характеристикой звукового поля.

1.12.7.3. Акустическая мощность

Акустической мощностью W (Вт) звукового источника называется излучаемое им количество звуковой энергии в единицу времени.

Уровень акустической мощности NW определяется как

$$NW = 10 \lg \frac{W}{W_0},$$

где W_0 – эталонная акустическая мощность, равная в воздухе 10^{-12} Вт; единицей измерения уровня акустической мощности является децибел

Уровень акустической мощности является характеристикой звукового источника.

1.12.7.4. Акустическая интенсивность (сила звука)

Акустической интенсивностью I называется средняя звуковая мощность, проходящая через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению распространения звука. Если мощность W (Вт) проходит через перпендикулярно расположенную площадку S ($м^2$), то акустическая интенсивность I ($Вт \cdot м^{-2}$) равна

$$I = \frac{W}{S}$$

Уровень акустической интенсивности NI определяется соотношением

$$NI = 10 \log \frac{I}{I_0},$$

где I_0 – эталонная акустическая интенсивность, равная в воздухе 10^{-12} $Вт \cdot м^{-2}$ (Порог слышимости. Ред.); единицей измерения уровня акустической интенсивности является децибел (дб).

Так же, как и уровень звукового давления, уровень акустической интенсивности является локальной характеристикой звукового поля.

Акустическая интенсивность и звуковое давление связаны между собой соотношением

$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho c}$$

где ρ – плотность среды.

** Условный порог звукового давления. Прим. ред.

В воздухе

$$\rho = 1,29\frac{273}{T}\frac{P_a}{10^5}\ \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

c – скорость звука в среде.

В воздухе

$$c = \sqrt{\frac{1,4Pa}{\rho_0}}\ \text{м с}^{-1}$$

Pa – атмосферное давление, выраженное в паскалях.

В воздухе эталонные значения I_0 и p_0 были выбраны таким образом, что уровень звукового давления и уровень акустической интенсивности численно имеют одинаковое значение. Таким образом можно говорить об уровне звука, не уточняя идет ли речь о давлении или интенсивности.

1.12.7.5. Сферическое распространение

При отсутствии особых препятствий шумы обычно распространяются в виде сферических волн. В этом случае акустическая интенсивность связана простым образом с мощностью источника:

$$I = \frac{W}{4\pi d^2}$$

где d – расстояние до источника.

Таким образом

$$NI = NW - 10\ \lg(4\pi d^2)$$

1.12.7.6. Физиологический уровень

Это звуковой уровень, воспринимаемый ухом; он выражается в децибелах А (дбА), чем учитывается чувствительность человеческого уха в зависимости от частоты.

Приборы для измерения дбА на практике снабжены фильтрами, которые уравнивают уровни, измеренные на разных частотах.

Это выравнивание в первую очередь имеет целью ослабление низких частот, к которым человеческое ухо очень чувствительно.

1.12.7.7. Характеристика шумов

Представляют интерес два весьма различных типа измерений.

1.12.7.7.1. Характеристика звукового поля

Отыскивается уровень шума, существующий в данном месте. Это уровень зависит, разумеется, от имеющихся звуковых источников, но также и от характеристик среды: архитектуры помещений, уровня реверберации и т.д. Этот тип измерений может иметь, например, целью установить, является ли терпимым, или нет, уровень звука на рабочем месте.

1.12.7.7.2. Характеристика источника звука

Отыскиваются характеристики, присущие различным источникам звука, их мощность, направленность с целью, например, определения главной причины шума.

1.12.7.8. Характеристика звуковых полей

Звуковое поле можно характеризовать различными способами. Средний уровень в дбА используется в случае достаточно постоянных шумов.

В случае сильно изменяющихся шумов измеряется эквивалентный уровень на заданном временном периоде, максимальный уровень и т.д.

Этот тип измерений является локальным. Результат измерений зависит от места, где они произведены.

Для единичного источника при отсутствии отражений уровень звука уменьшается на 6 дб при удвоении расстояния от источника.

1.12.7.9. Характеристика источников звука

Определение характеристики источника представляет собой, как правило, продолжительную и сложную операцию.

Если источник можно перемещать, то наиболее просто установить его в специальной реверберирующей или измерительной камере.

В противном случае необходимо проводить измерения *in situ** и вводить коррективы на реверберацию и паразитные источники. Этот тип измерений может быть комплексным.

1.12.7.10. Измерения в заглушенных камерах

Заглушенные камеры свободны от реверберации. Местность на открытом воздухе ведет себя обычно как такое помещение.

Мощность источника определяется по результатам многократных измерений по формуле

$$NW = NI + 10\ \lg(4\pi d^2),$$

где d – расстояние до источника

* На месте. Прим. ред.

Также определяется мощность источника в каждом направлении. Направленность определяется как

$$G = NW - NWm,$$

где NWm – средний уровень мощности.

Изотропный источник можно характеризовать уровнем звука на заданном расстоянии.

1.12.7.11. Измерение в реверберационных камерах

Помещение с реверберацией обладает высоким коэффициентом реверберации. Уровень звука является гомогенным и оценка направленности невозможна.

Взамен достаточно нескольких измерений для определения уровня средней акустической мощности по формуле

$$NWm = NI + K,$$

где K – постоянная, характеризующая помещение и определенная с помощью эталонного источника

1.12.7.12. Микрофоны

Представляют собой преобразователи, трансформирующие акустическое давление в электрический сигнал. Классификация микрофонов основывается на способах создания выходного напряжения.

Чувствительность или эффективность S микрофона (измеренная в децибелах) определяется отношением порожденной электродвижущей силы (э.д.с.) к значению акустического давления рассматриваемого поля:

$$S = 20 \lg \frac{e}{p}$$

e – выражена в вольтах,

p – в паскалях.

Наиболее распространенными микрофонами являются:

— электродинамические микрофоны с подвижной катушкой, мембрана в большей или меньшей степени перекрывает магнитопровод; наведенная э.д.с. пропорциональна силам давления. Прочные приборы, выдерживающие высокие мощности, но обладающие низкой чувствительностью;

— электродинамические ленточные микрофоны, тонкая металлическая лента перемещается в поле магнита; наведенная э.д.с. очень мала и необходим трансформатор. Обладают большими габаритами, хрупки и дороги;

— конденсаторные или электростатические микрофоны; емкость содержит металлическую упругую мембрану, могущую вибрировать под действием звуковых волн. Приборы высокого качества обладают малыми габаритами, хрупки и дороги. Высококачественные приборы для звукозаписывающих студий или лабораторий акустических измерений;

— электретные микрофоны: похожи на конденсаторные микрофоны, в которых металлическая мембрана заменена на пластическую с заключенными в ней электростатическими зарядами. Приборы хорошего качества, с которыми могут возникнуть проблемы, связанные с их старением.

1.12.7.13. Измерители силы звука

Эти приборы усиливают электрические сигналы микрофонов вводя минимум искажений; они снабжены на выходе устройством для считывания показаний, проградуированным непосредственно в децибелах.

Большинство современных измерителей силы звука позволяют непосредственное считывание уровня в дбА или эквивалентного уровня за заданный период.

1.12.7.14. Анализаторы шума

Шум можно характеризовать типичной кривой значений спектра акустического давления как функции частоты. Эти значения спектральных уровней выдаются анализаторами шума, состоящими из входного усилителя, системы полосовых фильтров, контура весовой обработки и индикации на катодной трубке.

Современные анализаторы могут кроме того осуществлять различную обработку сигнала: преобразование Фурье, автокорреляция и т.д.

1.12.7.15. Регистраторы шума

Магнитные регистраторы, характеризующиеся высокой точностью, низким уровнем собственных шумов, большим динамическим диапазоном.

1.12.7.16. Измерение шума от работы некоторых устройств

Газовые установки излучают различные шумы (горение газа, зажигание и истечение из горелок, вибрации и т.д.), которые можно измерять и анализировать следующими методами:

— измерение суммарных уровней шума;

— спектральный анализ шума.

1.12.7.17. Измерения в архитектурной акустике

Эти измерения позволяют характеризовать акустические свойства измерительной камеры, помещений с эффективными звукопоглощающими ограждающими конструкциями, помещений с реверберацией и т.д.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.13. ЭКОНОМИКА

1.13.1. Национальные счета

1.13.1.1. Что такое национальные счета?

Это упрощенное количественное представление экономической (а частично и социальной) деятельности страны, количественное описание наиболее важных параметров и экономической динамики в соответствии с четко сформулированными принципами бухгалтерской науки. Национальные счета включают наиболее существенную информацию об экономических и монетарных процессах: производстве, коммерческой деятельности, транспорте, потреблении, распределении доходов, инвестициях, финансовых потоках, операциях между основными секторами экономики и экономическими субъектами, внешнеторговыми операциями и т.д.

1.13.1.2. Какова их структура?

Субъекты экономической деятельности или экономические агенты группируются в следующие категории: домашние хозяйства, финансовые и не финансовые организации и предприятия, зарубежные административные службы. Обмен между отдельными секторами деятельности задается в виде "таблиц межотраслевых" потоков. Сведение воедино отдельных счетов по различным экономическим агентам и операциям дает "сводную экономическую таблицу" и "агрегаты", то есть синтетические оценочные показатели (валовой внутренний продукт, валовой национальный доход и т.д.).

1.13.1.3. Каким целям они служат?

Они позволяют сделать вывод об общих результатах экономической деятельности (такой отчет готовится ежегодно), а также обеспечить большой объем информации о микроэкономических показателях. Государственные органы управления используют их в качестве ценного инструмента для оценки последствий принимаемых решений и проектов, для разработки краткосрочных прогнозов ("экономических бюджетов", базирующихся на ряде гипотез), а также для обоснования прогнозных показателей плана на 5 и 10 лет. Это педагогический инструмент, позволяющий представить экономические механизмы и использовать их при проведении структурных и количественных преобразований.

1.13.1.4. Агрегированные показатели

"Агрегаты" – это интегральные параметры, которые оценивают результаты экономической деятельности в целом. Основным агрегатом расширенной системы национальных счетов (S.E.C.N.), системы национальных счетов Организации Объединенных Наций (S.C.N.) и европейской системы интегрированных экономических счетов (S.E.C.) является валовой внутренний продукт (P.I.B.). Измеренный в рыночных ценах валовой внутренний продукт определяется из выражения:

Валовой внутренний продукт (P.I.B.) + импорт = конечное потребление + формирование постоянного капитала + изменение запасов + экспорт...

С учетом метода оценки потока товаров и услуг в системе (S.E.C.N.) валовой внутренний продукт рассчитывается следующим образом:

Валовой внутренний продукт (P.I.B.) = Σ добавленных стоимостей по отраслям + налог на добавленную стоимость + таможенные пошлины.

В частном случае сферы коммерциализации основным агрегатом является реализуемый валовой внутренний продукт, определяемый из следующего равенства:

Валовой внутренний продукт в сфере коммерциализации (P.I.B.) + стоимость импорта = сумма конечного использования реализуемой продукции + промежуточное потребление (за вычетом остаточной стоимости продаж) не коммерческих отраслей.

Величина валового внутреннего продукта (P.I.B.) равна также сумме вознаграждения, выплачиваемой работникам предприятий и организаций – резидентами, валовой прибыли от производственно-хозяйственной деятельности этих организаций и выплачиваемых налогов на производство и импорт за вычетом полученных дотаций на производство.

Если из величины P.I.B. вычесть стоимость потребленного постоянного капитала и налогов на производственную деятельность и на импорт (за вычетом дотаций), выплачиваемых институтам европейского сообщества, и если прибавить чистый доход, относимый на затраты труда, собственности и предпринимательской деятельности, получаемый в других странах, то получим национальный доход, измеренный в рыночных ценах.

Национальный доход можно анализировать также в виде суммы первичных доходов, получаемых отдельными отраслями.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Годы	Валовой внутренний продукт (в текущих ценах)	Валовой внутренний продукт (в ценах 1970 г.)	Национальный доход (в текущих ценах)	Конечное потребление семей (в текущих ценах)	Конечное потребление семей (в ценах 1970 г.)
1959	5 907	9 390	5 331	3 721	5 869
1960	6 491	9 966	5 889	3 999	6 078
1961	7 007	10 406	6 363	4 333	6 372
1962	7 684	10 901	6 993	4 755	6 697
1963	8 467	11 287	7 704	5 279	7 029
1964	9 297	11 901	8 471	5 709	7 357
1965	9 916	12 354	9 025	6 034	7 580
1966	10 647	12 893	9 672	6 472	7 874
1967	11 410	13 391	10 363	6 953	8 209
1968	12 313	13 861	11 215	7 531	8 462
1969	13 925	14 709	12 705	8 479	8 897
1970	15 413	15 413	14 031	9 203	9 203
1971	17 023	16 095	15 545	10 253	9 719
1972	18 977	16 896	17 303	11 404	10 209
1973	21 378	17 660	19 472	12 777	10 723
1974	24 367	18 112	21 964	14 828	10 964
1975	27 552	18 065	24 623	16 979	11 286
1976	31 715	18 923	28 080	19 807	11 870
1977	35 461	19 413	31 621	21 947	12 189
1978	40 114	20 061	35 754	24 770	12 651
1979	45 560	20 636	40 650	28 196	13 041
1980	51 396	20 746	45 793	32 219	12 164
1981	57 410	20 726	50 832	36 920	13 368
1982	65 474	20 984	57 384	42 090	13 701
1983	71 900	21 041	62 815	46 313	13 766
1984	77 944	21 276	68 175	49 851	13 821
1985	83 106	21 422	72 906	53 595	14 090

Источник: INSEE

Основные показатели на 1 жителя (во франках, 1971 г.).

Годы	Норма сбережения семей (1)	Норма финансовых сбережений семей (2)	Норма инвестирования акционерных обществ (3)	Норма самофинансирования акционерных обществ исключая трансферты капитала (4)
1959	13,1	4,0	22,2	67,0
1960	15,2	5,7	22,1	67,1
1961	14,5	5,5	22,6	65,8
1962	16,7	7,4	23,2	63,7
1963	15,7	6,0	22,8	64,4
1964	15,5	4,4	22,1	63,5
1965	16,2	4,6	21,9	70,1
1966	15,7	3,9	22,4	68,2
1967	15,9	4,2	22,1	69,1
1968	15,7	3,4	21,3	74,2
1969	14,3	2,1	21,6	65,1
1970	16,7	5,2	21,6	62,3
1971	16,8	5,1	21,4	65,4
1972	16,9	4,8	21,1	65,6
1973	17,3	4,8	20,3	57,8
1974	17,4	5,1	20,1	45,0
1975	18,6	7,5	19,1	58,8
1976	16,4	5,2	19,7	51,7
1977	16,6	5,8	19,0	55,1
1978	17,5	6,9	18,6	64,4
1979	16,2	5,1	18,3	63,3
1980	14,9	4,4	19,3	52,1
1981	15,8	5,8	18,9	52,0
1982	15,7	6,1	18,3	47,3
1983	14,4	5,4	17,2	58,1
1984	13,5	5,1	16,5	60,2
1985	12,3	4,0	16,6	76,3

Источник: INSEE
(1) Отношение валовых сбережений к полученному доходу
(2) Отношение потенциала финансирования к полученному доходу
(3) Отношение валовой стоимости постоянного капитала к валовой добавленной стоимости
(4) Отношение валовых накоплений к валовой стоимости постоянного капитала.

Отдельные показатели, в %.

1.13.1.5. Стоимость и объем (I)

Использование денежных измерителей для характеристики операций с продуктами и услугами позволяет агрегировать и сопоставлять различные потоки, а также увязывать их с операциями перераспределения доходов, сбережений и накоплений; при этом однако маскируется тот факт, что денежный поток, соответствующий этим операциям, зависит от двух различных по своей природе параметров: физического объема продукта (или услуг, хотя в этом случае термин физический объем не точен), являющегося объектом сделки, и единичной цены реализации соответствующей операции. Это можно представить следующей формулой:

стоимость = (количество) × (цена) или V = Qp

Поэтому две различные операции, относящиеся к одному и тому же продукту, могут отличаться по количеству (числу физических единиц, по которым осуществляется обмен) и цене реализации каждой из этих сделок: знание одной лишь стоимости операций не позволяет судить о действительных процессах.

Этот пример из области микроэкономики нельзя непосредственно переносить на макроуровень, соответствующий системе национальных счетов, поскольку трудно определить единицу измерения, позволяющую агрегировать операции, относящиеся к различным продуктам и услугам. Отсюда следует, что понятие "количество" необходимо заменить на понятие "объем", который оценивается в денежных единицах. Точнее говоря, при прочих равных условиях и, в частности, одинаковом количестве продукции стоимостной объем определяется как величина стоимости, измеренная в ценах базового года (2).

На микроэкономическом уровне это можно записать в следующем виде:

Стоимость = (объем) × (изменение цен за период от базового до рассматриваемого года)

Если обозначить через V стоимость, Q – количество продукции и p – ее цену и, кроме того, обозначить через v – объем выпуска, а базовый и текущий годы – соответственно через n_0 и n, то для совокупности продуктов i имеет место соотношение

$$v_n = \sum_i Q_n^i p_{n_0}^i$$

$$\boxed{V_n = \sum_i Q_n^i p_n^i = v_n \frac{\sum Q_n^i p_n^i}{\sum Q_n^i p_{n_0}^i}}$$

В таком случае индекс цен определяется из условия, что при умножении его на индекс объема $\frac{v_n}{v_{n_0}}$ получаем индекс стоимости $\frac{V_n}{V_{n_0}}$:

$$\frac{V_n}{V_{n_0}} = \frac{v_n}{v_{n_0}} \frac{\sum_i Q_n^i p_n^i}{\sum_i Q_n^i p_{n_0}^i}$$

Этот индекс цен агрегирует элементарные индексы цен, взвешивая их по стоимостям операций рассматриваемого года n (3). Его преимущество состоит в том, что при этом не требуется учета изменений внутренней структуры рассматриваемой категории продуктов; в частности, можно проверить, что если ни одна из цен p^i не меняется, то агрегированный индекс действительно равен 1 (4).

1.13.1.6. Институциональные единицы и институциональные отрасли

Институциональные единицы группируются в институциональные отрасли в количестве шести (в расширенном варианте французской системы национальных счетов S.T.C.N.), к которым прибавляется внешнеэкономическая деятельность.

Основной статистической единицей S.E.C.N. отныне является институциональная единица, которая пришла на смену прежнему понятию экономического субъекта.

1.13.1.6.1. Акционерные и квазиакционерные нефинансовые общества

Осуществляя основную деятельность в виде производства товаров и услуг (нефинансового характера), они включают государственные и частные предприятия (анонимные акционерные общества, общества с ограниченной ответственностью и т.д.). При этом исключаются семейные и ремесленные предприятия.

1.13.1.6.2. Кредитные институты

Их роль состоит в аккумулировании сбережений и распределении кредитов. В основном, речь идет о банках.

1.13.1.6.3. Страховые компании

Они предоставляют своим клиентам гарантии против различного рода риска в обмен на выплачиваемые им премии и добровольные взносы.

1.13.1.6.4. Государственные административные службы

Этот сектор в основном включает государственные и муниципальные предприятия. Он обеспечивает некоммерческие услуги (содержание государственных служб, обеспечение народного образования и т.д.).

(1) Теория постоянных цен рассматривается в главе 8 трудов (S.E.C.N), посвященных методам развернутой системы национальных счетов. См. сборник I.N.S.E.E серию C № 44-45, май, 1976.

(2) В качестве базового года для любого счета может быть принят предыдущий год (счета "в объемных единицах") или для совокупности счетов – фиксированный год (счета "в постоянных ценах").

(3) Это можно увидеть, записав индекс в эквивалентной форме:

$$\frac{\sum_i (Q_n^i p_n^i)}{\sum_i (Q_n^i p_n^i) \frac{p_{n_0}^i}{p_n^i}}$$

(4) Это не единственный из возможных подходов. Агрегирование операций, относящихся к различным продуктам (или к одному продукту, но на различных рынках), в действительности приводит к необходимости различать три причины изменения стоимости: изменение натурального объема, изменение цен и изменение структуры. Третий элемент может быть включен в изменение цен. Выбранный вариант, напротив, приводит к объединению этого элемента с изменением натуральных объемов таким образом, что изменение цен является "чистым", то есть отражает лишь изменение элементарных цен.

1.13.1.6.5. Частные административные структуры

Они обеспечивают некоммерческие услуги (например, защита профсоюзами профессиональных интересов своих членов) или коммерческие услуги, не имеющие целью получение прибыли (например, профсоюзные комитеты на предприятиях оплачивают отдых детей в пансионатах и лагерях, которые они организуют).

1.13.1.6.6. Домашние хозяйства

В этом секторе экономики произошли особо сильные изменения в новой системе национальных счетов. Данный сектор "состоит из институциональных единиц – резидентов, основной функцией которых является потребление, или производство (если оно организовано в рамках индивидуального предприятия)".

1.13.1.7. Не финансовые акционерные и квазиакционерные общества

Этот сектор объединяет институциональные единицы, основными функциями которых является производство товаров и услуг не финансового характера. Основные средства этих предприятий формируются за счет продажи их продукции.

1.13.1.7.1. Характеристика сектора

Данный сектор включает:

— государственные акционерные общества (государственные учреждения, предприятия смешанной экономики, предприятия специального статуса, такие как la Régie Renault и т.д.);
— государственные квазиакционерные общества, которые не имеют юридического лица, однако являются крупными по размерам и реализуют большую часть своей продукции государству (P.T.T.);
— частные акционерные общества, имеющие различные юридические формы, но не включающие индивидуальные предприятия;
— частные квазиакционерные общества (предприятия, являющиеся фиктивными резидентами, такие как филиалы иностранных фирм во Франции и т.п.);
— частные организации, основной целью которых не является получение прибыли (Союз предпринимателей и т.п.).

1.13.1.7.2. Подсекторы

Крупные национальные компании:

— энергетики: Charbonages de France, EDF, GDF;
— общественный транспорт: SNCF, RATP, Air France, Air inter;
— почта и связь.

Другие не финансовые акционерные и квазиакционерные общества.

Примечание:

Институциональные единицы в этом секторе группируются согласно их основной деятельности, которая отражается в официальном перечне.

1.13.1.8. Добавленная стоимость

Для расчета показателя валового внутреннего продукта (P.I.P.) необходимо определить ключевое бухгалтерское понятие добавленной стоимости –оно представляет собой производительный вклад предприятия.

Например, модельер производит платья и продает их по некоторой цене; однако он вовсе не является создателем всей стоимости этого платья: ткань, нитки, швейные машины, помещения и т.д. включаются в процесс производства, хотя он и не является их создателем. Чтобы оценить вклад этого модельера, необходимо из рыночной стоимости его продукции вычесть все промежуточные расходы, которые производились в процессе изготовления продукции.

Добавленная стоимость = стоимость производственных благ и услуг – стоимость промежуточного потребления

Товары и услуги, потребляемые предприятием, представляют собой промежуточное потребление.

Промежуточное потребление = стоимость элементов, не произведенных предприятием, но необходимых в производстве: сырье, энергия, полуфабрикаты, оборудование и т.д.

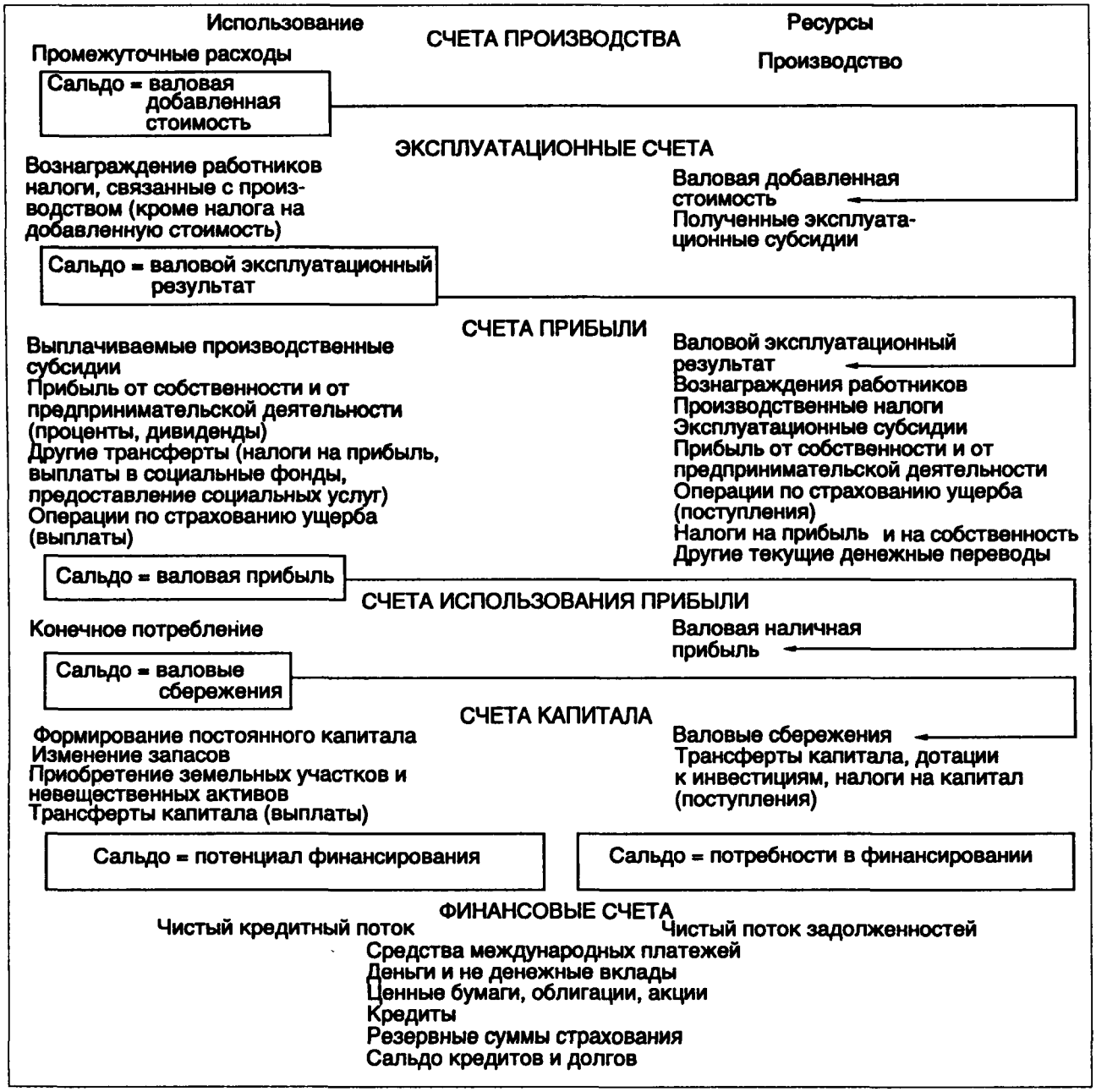
Различают добавленную стоимость, определяемую по рыночным ценам, в которую включаются налоговые платежи, косвенные налоги (налог на добавленную стоимость и т.д.), элементы, не являющиеся вкладом предприятия в удовлетворение конечного потребителя, и добавленную стоимость, оцененную по стоимости используемых ресурсов, без учета налогов.

Добавленная стоимость, оцененная по стоимости израсходованных ресурсов = добавленная стоимость, оцененная по рыночным ценам – прямые и косвенные налоги

1.13.1.9. Валовая добавленная стоимость

Она представляет собой сальдо счетов затрат предприятия и равна разности между стоимостью товаров и услуг, произведенных предприятием, и стоимостью товаров и услуг, потребленных в процессе производства.

Суммарная величина добавленной стоимости для всей национальной экономики, представленная строкой "добавленная стоимость" в таблице на стр. 220, является важнейшей составляющей валового внутреннего продукта.



Счета институциональных секторов

1.13.2. Производство

1.13.2.1. Определения и характеристика

Производство – это организованная экономическая деятельность, заключающаяся в создании продуктов и услуг, которые обычно обмениваются на рынке и/или получаются на базе факторов производства, обмениваемых на рынке.

1.13.2.1.1. Товарное производство

Товарное производство называется товарным, если его продукция обменивается на рынке по ценам, которые как минимум возмещают затраты на ее производство. Все продукты рассматриваются как товары.

Товарные услуги – это все виды услуг, которые могут быть обьектами купли-продажи на рынк, и которые произведены на коммерческом предприятии, т.е. на таком, которое использует производственные ресурсы, получаемые за счет выручки от реализации своей продукции.

1.13.2.1.2. Производство нетоварных услуг

Оно включает услуги, предоставляемые обществу в целом или отдельным группам потребителей частными или государственными предприятиями бесплатно или с частичной оплатой, а также услу-

ги, произведенные в домашнем хозяйстве в качестве нанимателя домашних работников.

1.13.2.2. Оценка производства

Стоимость производства товаров и услуг, как правило, оценивается по рыночным ценам.

В случае, если товары и услуги не являются объектами сделок (внутреннее потребление, производство для собственных нужд), стоимость продукции оценивается по ценам франко-завода на аналогичную продукцию, реализуемую на рынке.

Стоимость производства некоммерческих административных услуг условно измеряется по совокупности производственных расходов (промежуточное потребление, оплата работников, потребление постоянного капитала и производственные налоги), которые несут эти некоммерческие сферы деятельности.

Производство не коммерческих услуг домашними хозяйствами условно измеряется суммой вознаграждения, получаемого домашними работниками от их нанимателей.

1.13.2.3. Формирование валовой стоимости постоянного капитала

"Показатель формирования валовой стоимости постоянного капитала (F.B.C.F.) представляет собой стоимость объектов длительного пользования (исключая те из них, которые имеют небольшую стоимость), приобретаемых производственными предприятиями-резидентами с целью использования их в производственном процессе на срок не менее года, а также товары и услуги, включаемые в объекты приобретаемого постоянного капитала, в земельные участки и невещественные активы". (S.E.C.N.)

Отметим, что институт I.N.S.E.E. ведет учет лишь по новым предметам длительного пользования, закупаемым на рынке или по производственным единицам, поставляющим продукцию на рынок, которые реализовали ее для собственного производственного потребления.

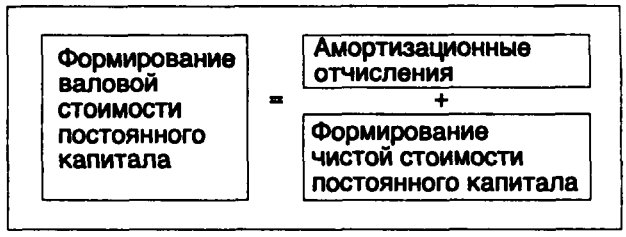
Формирование валовой стоимости постоянного капитала домашних хозяйств в рамках их хозяйственной деятельности относится лишь к приобретению жилья. Все другие виды закупок предметов длительного пользования для домашнего хозяйства (кроме покупок оборудования индивидуальными предприятиями) рассматриваются как конечное потребление.

Продукты и услуги товарного характера, включаемые в F.B.C.F, оцениваются:

— по закупочным ценам без налога на добавленную стоимость;
— по ценам франко-порт отправления, если они произведены за собственный счет.

1.13.2.4. Формирование чистой стоимости постоянного капитала (чистые инвестиции)

Очевидно, что не все закупки производственных средств обеспечивают реальное увеличение существующего производственного потенциала; поэтому для определения чистой стоимости постоянного капитала институт I.N.S.E.E. предлагает вычитать амортизационные отчисления с целью



определения фактического прироста основных производственных средств без учета их физического или морального износа.

1.13.3. Инвестиции

1.13.3.1. Норма инвестиций в национальной экономике

Основным показателем оценки интенсивности национальных инвестиций является отношение инвестиций к полученному доходу от этих вложений; институт I.N.S.E.E. рассматривает показатель интенсивности накопления: норму инвестиций для национальной экономики.

Норма инвестиций для экономики Франции определяется из соотношения:

$$\frac{\text{Валовая стоимость постоянного капитала}}{\text{Валовой внутренний продукт}}$$

Часто бывает полезным уточнить изменение интенсивности инвестиций, рассчитав предельную (маржинальную) норму инвестиций. Маржинальная норма инвестиций определяется из соотношения:

$$\frac{\text{Изменение валовой стоимости постоянного капитала}}{\text{Изменение внутреннего валового продукта}}$$

Иными словами, сравнение динамики инвестиций с динамикой объемов производства позволяет рассчитать коэффициент экономической эффективности.

1.13.3.2. Маржинальная эффективность инвестиций

Маржинальная эффективность инвестиций – это обратная величина по отношению к маржинальной норме инвестиций, то есть она равна

$$\frac{1}{\text{Маржинальная норма инвестиций}}$$

или отношению:

$$\frac{\text{Изменение валового внутреннего продукта}}{\text{Изменение валовой стоимости постоянного капитала}}$$

Например, если эффективность инвестиций равна 0,5, то это означает, что прирост инвестиций на 1% обеспечивает дополнительный прирост производства на 0,5 × 1%, то есть на 0,5%.

Следовательно, увеличение валовой стоимости основного капитала на 1 пункт обеспечивает рост валового внутреннего продукта на 1/2 пункта.

1.13.3.3. Различные виды инвестиций

Экономический анализ инвестиций по их воздействию на экономический рост, занятость и рентабельность приводит к необходимости различать несколько типов инвестиций:



1.13.3.4. Производственные инвестиции

При анализе влияния инвестиций на экономический рост следует различать несколько типов продуктивных инвестиций:

— инвестиции, направленные на увеличение производительности – это часть производственных инвестиций, предназначенная для снижения удельных затрат, увеличения выработки на 1 работника в единицу времени на единицу используемого сырья, на 1 инвестируемый франк, на единицу использованной энергии и т.д.;

— инвестиции замены – это часть производственных инвестиций, предназначенная для замены старых производственных фондов;

— невещественные инвестиции (или инвестиции в технический прогресс) – это часть инвестиций, предназначенная для покупки патентов, лицензий, на проведение проектно-исследовательский работ, подготовку, формирование профессиональных кадров, и в более общем плане – в образование, с целью повышения производительности труда.

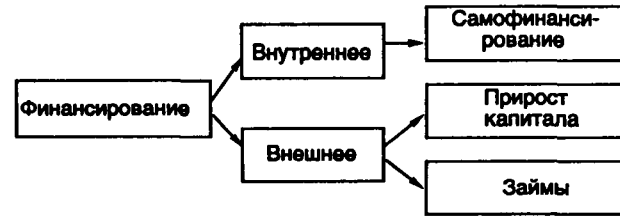
Эту часть инвестиций в системе национальных счетов оценить затруднительно.

1.13.3.5. Самофинансирование

Для инвестирования предприятие должно располагать финансовыми ресурсами, то есть "свободными деньгами" для закупки машин, оборудования, земельных участков, необходимых для производства и реализации продукции.

Откуда взять эти финансовые средства?

С этой целью можно либо использовать свободные ресурсы самого предприятия (не распределяемую прибыль) и осуществлять самофинансирование, либо прибегать к внешним ресурсам – кредитам или выпуску акций. Таким образом, самофинансирование означает способность предприятия к внутреннему накоплению. После оплаты поставщикам, выплаты зарплат работникам и исполнения налоговых обязательств предприятие образует прибыль, которая одновременно служит для вознаграждения авансированного капитала и обеспечивает инвестиции, позволяющие предприятию сохранить или повысить свою конкурентоспособность.



С этой целью обычно рассчитывается следующее отношение:

$$\frac{\text{Самофинансирование}}{\text{Инвестиции}} \times 100$$

показывающее в процентном выражении способность предприятия осуществлять свой рост за счет самофинансирования.

1.13.4. Внешняя торговля

1.13.4.1. Некоторые определения

При рассмотрении обмена между двумя странами обычно различают:

— обмен товарами, который учитывается во Франции при оценке сальдо торгового баланса;

— обмен услугами или "невидимый" обмен, соответствующий, например, затратам туристов во Франции, выплатам процентов по долгам, контрактам на услуги инжиниринга. Объединяя обмен товарами и услугами, получают баланс продуктов и услуг;

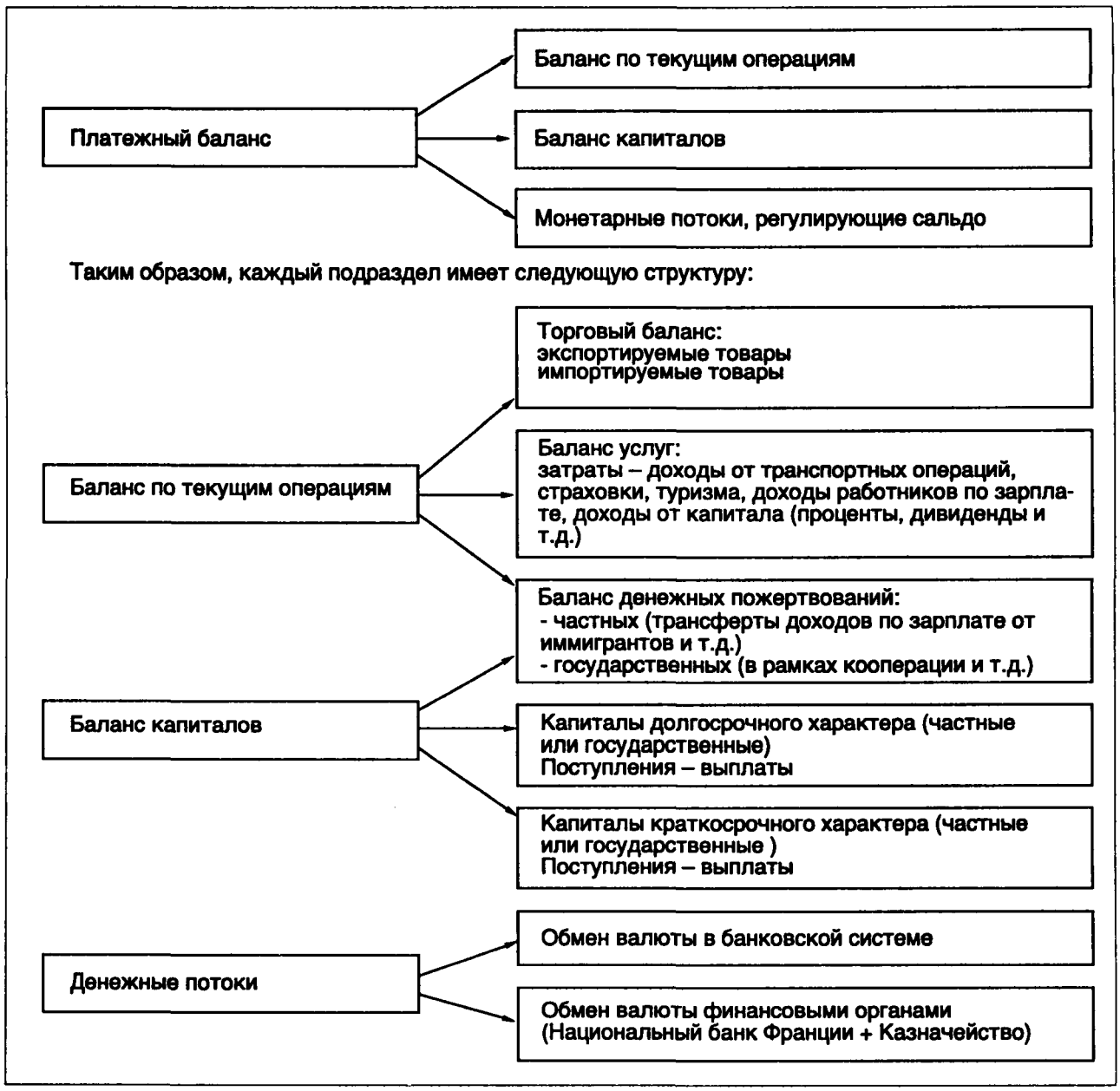
— односторонние переводы (трансферты), например акты дарения. Складывая сальдо этих трансфертов с балансом продуктов и услуг, получают баланс текущих операций или текущий баланс;

— долгосрочные трансферты капиталов. Текущий баланс и баланс капиталов долгосрочного периода совместно образуют базовый баланс;

— краткосрочные трансферты капиталов являются последней составляющей платежного баланса.

По определению, платежный баланс всегда находится в равновесии. Однако для различных частных балансов это условие не соблюдается, и тогда, если, например, текущий баланс является дефицитным, то для сохранения условий равновесия баланс капиталов долгосрочного и краткосрочного периодов должен быть избыточным.

Из-за нечеткой терминологии торговый и платежный балансы нередко путают, что может приводить к неверным выводам о несбалансированности платежного баланса.



Источник: Экономический и социальный словарь, Жанин Бремон и Алэн Голедан, Гатьер (Париж).

1.13.4.2. Связь экспорта и импорта: внешние потребности

В случае, когда страна А импортирует продукты из страны В, это позволяет последней увеличить объем производства и, следовательно, распределять доходы. Часть этих доходов пойдет на сбережение, но основная часть будет израсходована на закупку различных продуктов: предметов потребления для домашних хозяйств, оборудования для заводов и т.д. Часть этой продукции импортируется страной В, в том числе, из страны А, что обеспечивает рост доходов страны А, в последующем – рост ее затрат, импорта и т.д.

Поэтому существует частичная компенсация трансфертов валюты из страны А в страну В для целей начального импорта посредством возврата валюты из страны В в страну А так, чтобы частично покрыть рост потребностей экономических субъектов страны В.

Этот механизм работает и в другом направлении: когда в 1986 г. доходы стран ОПЕК резко упали из-за снижения цен на нефть, экспорт из Франции в эти страны также снизился, что привело к нарушению текущего баланса.

1.13.4.3. Связь экспорта и импорта: внутренние потребности

Известный экономист Рикардо искал причину международных обменов в сравнительных преимуществах различных стран: если, например, относи-

тельно более выгодно производить вино в Португалии, чем в Великобритании, и если относительно более выгодно производить сукно в этой стране по сравнению с Португалией, то Великобритания будет производить сукно, а Португалия – вино, и на международном рынке будет иметь место обмен этим продуктами.

Эту теорию можно распространить на различные этапы производственного процесса. Франция имеет сравнительные преимущества в аэрокосмической технике, но не обладает ими в производстве большинства компонентов авиации: поэтому она будет импортировать большую часть полуфабрикатов, необходимых для строительства самолетов, в то же время она будет экспортировать готовые самолеты.

Таким образом, отмечают, что около 2/3 импортируемой Францией продукции – это полуфабрикаты, тогда как 60% экспортируемых товаров составляет готовая продукция.

Можно утверждать, что импорт выгоден для любой страны в тех случаях, когда он заменяет продукт, производство которого мобилизует ресурсы (трудовые, сырьевые, капитала и т.д.), которые, будучи использованы альтернативным образом, обеспечили бы экспорт, позволяющий с лихвой компенсировать затраты по импорту. Такая оценка весьма затруднительна. Она может производиться лишь на базе сложных эконометрических моделей, но даже в этом случае выбор исходных гипотез и методы формализации являются объектом разноречивых суждений.

1.13.4.4. Значение равновесия текущего баланса

1.13.4.4.1. Необходимость импорта

Любая страна нуждается в импорте сырья, которым она не располагает на своей территории, и продуктов, которые она не может производить либо из-за того, что не имеет соответствующего оборудования, либо из-за отсутствия свободных мощностей.

Мы также видели (см. § 1.13.4.3), что при некоторых условиях выгодно импортировать продукцию, которую можно было бы производить самим, в частности, для того, чтобы ориентировать экономику в направлении других, более эффективных видов деятельности.

1.13.4.4.2. Необходимость экспорта

Экспорт необходим для оплаты закупок по импорту, а также для продления производственно-технологической цепочки и снижения удельных производственных затрат.

1.13.4.4.3. Равновесие текущего баланса

Можно сопоставить два самых крупных раздела платежного баланса: текущий баланс и баланс капитала долгосрочного и краткосрочного характера, т.е. использование доходов: на потребление и сбережение.

Тогда дефицит текущего баланса интерпретируется как признак слишком высокого уровня потребления по сравнению со сбережением, поскольку его необходимо дополнять импортом капитала. Такая ситуация может длиться в течение нескольких лет, если только излишек потребления соответствует производительным инвестициям.

Положительное сальдо текущего баланса объясняется слишком низким уровнем потребления и слишком высоким уровнем накопления для целей финансирования внутренних инвестиций. В таком случае доходы от экспорта будут инвестироваться за границей. Слишком большое положительное сальдо текущего баланса отражает уязвимость экономики к замедлению потребления за рубежом, при условии, что существуют возможности быстро переориентировать экспортируемую продукцию на внутренний рынок.

1.13.4.5. Выводы

Внешняя торговля является жизненно необходимым элементом экономики любой страны, и она развивается параллельно росту мирового производства.

Если важно сбалансировать текущие балансы, то еще важнее, чтобы они устанавливались на возможно более высоком уровне. Динамика изменения объемов внешней торговли Франции показана на рисунке на с. 225.

1.13.5. Население. Занятость. Безработица

1.13.5.1. Население

1.13.5.1.1. Переписи населения

Основные характеристики населения (географическое распределение и демографическая структура) обеспечиваются на основе его общей переписи. Официальные результаты такой переписи определяют так называемое законное население Франции: все граждане (французы или иностранцы), живущие постоянно во французской метрополии на момент переписи.

1.13.5.1.2. Ежегодные оценки

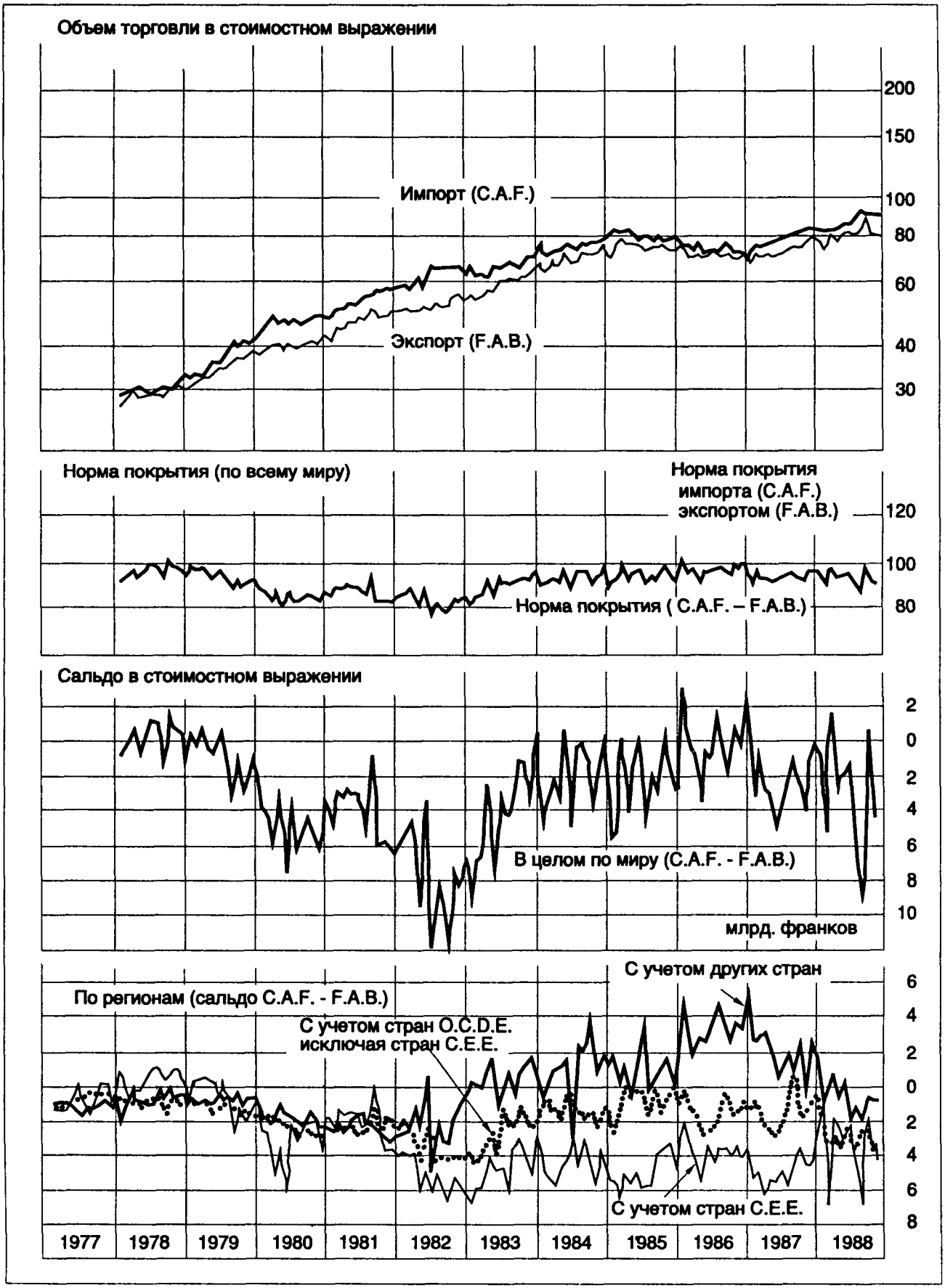
На основе статистики гражданского состояния и оценки миграционных потоков (внутренних и внешних) рассчитывается общая численность населения на 1 января текущего года исходя из результатов последней произведенной переписи.

1.13.5.2. Активное население. Занятость. Безработица

В национальном счетоводстве используется несколько понятий, связанных с населением.

1.13.5.2.1. Общая численность резидентов страны

Она включает совокупность физических лиц-резидентов независимо от их национальности. Она отличается от законного населения метрополии, так как включает дополнительно французских работников дипломатических и военных учреждений и членов их семей, которые не имеют обычной резиденции на территории метрополии.



Внешняя торговля: объем в стоимостном выражении.

Напротив, она исключает дипломатов, военных и членов их семей, которые обычно проживают на территории метрополии.

1.13.5.2.2. Активное население – резиденты страны

Оно включает совокупность физических резидентов от 14 лет и старше, которые имеют работу или безработных (в соответствии с классификацией международного Бюро по труду). Определение безработицы, данное международным Бюро по труду, включает четыре условия:

— отсутствие рабочего места;
— физическая возможность работы;
— желание найти оплачиваемую работу;
— поиски такой работы.

1.13.5.2.3. Активное занятое население – резиденты страны

Оно состоит из лиц, имеющих работу, оплачиваемую в виде зарплаты так и лиц, не получающих зарплату, включая работодателей, которые действуют на свой счет или помогают в домашнем хозяйстве (при условии, что продолжительность работы превышает 15 часов в неделю).

Данная категория населения включает лиц, отсутствующих на работе вследствие таких причин как болезни, несчастные случаи трудовые конфликты, прогулы, отпуска.

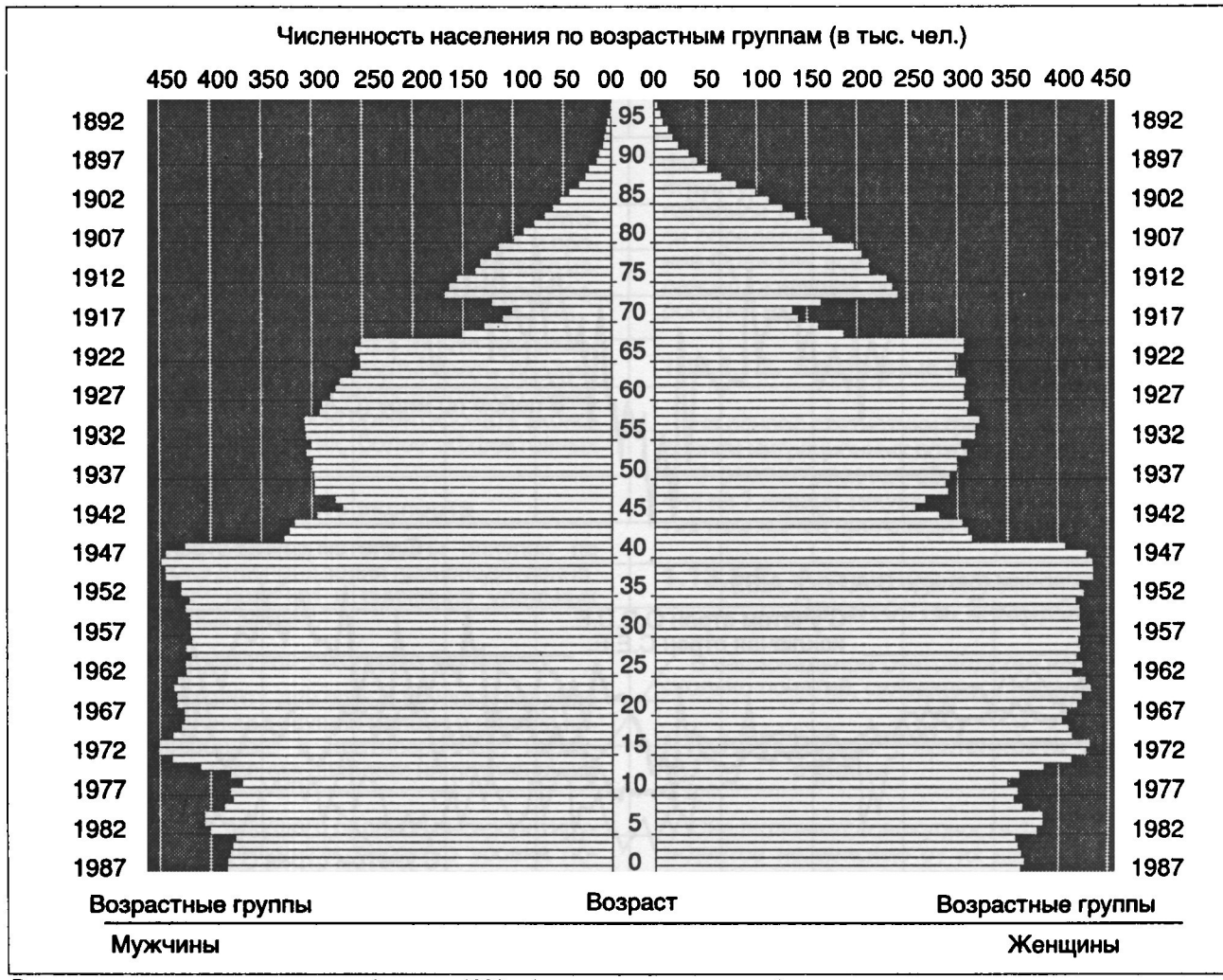
1.13.5.2.4. Активное занятое внутреннее население

Оно состоит из совокупности лиц, имеющих занятость на территории ведения экономической деятельности: следовательно, оно исключает активных резидентов, имеющих занятость в других странах мира.

1.13.5.3. Рынок труда

Помимо безработицы, определяемой в соответствии с принципами Международного Бюро труда, другие данные, используемые во Франции, обеспечиваются организацией UNIDIC (число жителей, пользующихся пособиями по безработице), дирекциями департаментов по труду и местными агентствами по трудоустройству.

* UNIDIC – Национальный союз проблем занятости в промышленности и торговле



Возрастная пирамида населения на 1 января 1988 г. (предварительная оценка).

1.13.6. Потребление и инвестиции в жилье. Доходы

Конечное потребление домашних хозяйств с точки зрения национального счетоводства представляет собой стоимость продуктов и услуг, используемых для удовлетворения потребностей домашних хозяйств.

1.13.6.1. Конечное потребление домашних хозяйств: товарное и нетоварное

Конечное потребление домашних хозяйств включает все виды закупок товаров длительного пользования, кроме тех, которые относятся к приобретению жилья и закупки оборудования индивидуальными предприятиями.

Текущий ремонт жилищ учитывается как потребление, капитальный ремонт и обновление – как инвестиции. Потребление оценивается по цене приобретения за наличные для товаров, купленных на рынке, и по ценам производства (франкопорт завода) для продукции, предназначенной для собственного потребления.

1.13.6.1.1. Товарное потребление

Оно включает товарную продукцию и услуги, а также потребление продуктов питания для собственных нужд (продукция семейных садов) и услуг (арендная плата за квартиры, в которых проживают их владельцы).

С другой стороны, оно учитывает расходы на квартплату (арендные платежи) и на лечение (помимо оплаты государственных больниц) в валовом выражении, то есть, включая долю, которая производится не за счет домашних хозяйств, пропорционально пособиям по жилью и компенсации по социальному обеспечению.

1.13.6.1.2. Нетоварное потребление

Оно складывается из услуг домашних хозяйств и частичных выплат (участие хозяйств в услугах, обеспечиваемых государственными или частными организациями: это в основном, образование, государственное здравоохранение, социальные услуги).

Конечное потребление хозяйств не включает потребление индивидуальных предпринимателей, связанное с их деятельностью и представляющее промежуточное потребление.

1.13.6.2. Источники

Сведения об изменении потребления получают, главным образом, из следующих источников:

— прямых опросов домашних хозяйств (общих или специализированных, например: конъюнктурный опрос домашних хозяйств, опросы относительно структуры семейных бюджетов и т.д.);
— статистических данных о производстве и внешней торговле, получаемых на базе деклараций о прибылях промышленных и торговых предприятий, ежегодных опросов для первых и таможенной статистики – для вторых;
— статистических данных о распределении из различных источников: налоговая статистика, опросы коммерческих структур, профессиональная статистика.

1.13.6.3. Инвестиции в жилье

Они включают затраты как на новые квартиры, так и на текущий и капитальный ремонт старых жилищ.

Национальные счета, предоставляемые по отношению к 1980 году, используют более разнообразные источники, чем статистическая база 1971 г., которая отдавала предпочтение источникам системы S.I.R.O.K.O.*. Они обращаются к статистике предприятий, в частности, к годовым опросам предприятий; чтобы учесть теневые заработки, вносятся соответствующие коррективы, поправки, учитывающие нарушения налогового законодательства или отсутствие налоговых деклараций.

Условно, инвестиции в жилье индивидуальных предпринимателей учитываются в статистике, относящейся к образованию валовой стоимости постоянного капитала домашних хозяйств.

1.13.7. Производственный аппарат. Промышленное производство

1.13.7.1. Производственный аппарат

Производственный аппарат можно анализировать, исходя из нескольких типов статистических единиц:

— предприятий,
— организаций,
— групп акционерных обществ.

1.13.7.1.1. Определение

Предприятие: любое юридическое или физическое лицо, независимо осуществляющее профессиональную деятельность, оплачиваемую не в виде зарплаты.

Организация: любое четко определенное топографически место, где осуществляется деятельность предприятия (в течение периода не менее шести месяцев).

Группа: состоит из совокупности акционерных обществ (предприятий, юридических лиц), зависящих от одного центра принятия решений, головного общества группы.

* S.I.R.O.K.O. – система информации, регистрирующая строительные операции

1.13.7.1.2. Источники информации

Существует три источника:

— статистическая отчетность: S.I.R.E.N.E. (система информации для перечня предприятий и их организаций), R.I.M. (информационный перечень профессий), управляемые институтом INSEE,
— обследования: годовые обследования предприятий (E.A.E) с целью их анализа,
— административные и налоговые источники.

1.13.7.2. Промышленное производство

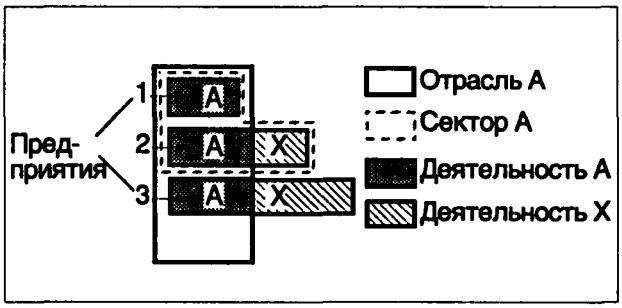
1.13.7.2.1. Концепция производственного сектора и отрасли

Сектор, объединяющий предприятия: к одному и тому же сектору относятся все предприятия, ведущие один и тот же основной вид деятельности.

Отрасль: к одной и той же отрасли относятся все предприятия или их структурные подразделения (в случае предприятий, ведущих различные виды деятельности), которые содействуют осуществлению одной и той же деятельности независимо от того, является ли она основной или вспомогательной.

Предприятие, ведущее несколько видов деятельности, может принадлежать к нескольким отраслям, но входит лишь в один сектор.

Эти два понятия легче различить с помощью следующего графика:



К одной и той же отрасли "A" относятся:

— предприятия группы "1", ведущие один единственный вид деятельности "A";
— подразделения предприятий группы "2", ведущие деятельность типа "A"; – подразделения предприятий группы "3", ведущие деятельность типа "A".

В один и тот же сектор A входят:

— предприятия "1", ведущие единственный вид деятельности "A";
— предприятия "2", попадающие в группу "A" в соответствии с их основной деятельностью "A".

1.13.7.2.2. Индекс промышленного производства

Индексы промышленного производства измеряют объем продукции, которая выпускается ежемесячно (поквартально) заводами, шахтами, карьерами или строительными объектами.

1.13.7.2.2.1. Область использования индексов

Теоретической областью применения индексов промышленного производства являются предприятия (или части предприятий) с численностью работников на зарплате, превышающей 10 человек, за исключением предприятий сельского хозяйства, транспорта, торговли и услуг.

Ремесленные предприятия (обеспечивающие около 10% добавленной стоимости в промышленности) также исключаются из статистики.

Контроль за промышленным производством Франции обеспечивают 649 статистических выборок.

1.13.7.2.2.2. Область охвата

Измеряемые по величине добавленной стоимости по отношению к базовому индексу 1980 года обследуемые отрасли, по которым производится расчет месячных индексов, составляют около 65% от суммарной добавленной стоимости промышленного производства Франции.

Расчетами квартальных индексов охвачено 84% предприятий.

Переход от базы 1970 г., к базе 1980 года сопровождался, начиная с марта 1987 г., введением новых индексов.

Существенное увеличение степени охвата предприятий и более высокая точность позволили статистическим органам Франции приблизиться к качеству систем обследования, существующих в крупных европейский странах.

1.13.7.2.2.3. Перечень показателей

Индексы с базой 1970 г. рассчитывались по номенклатуре экономических показателей N.A.E., действующей на начало 70-х годов.

Новые индексы рассчитываются в соответствии с номенклатурой видов деятельности и продукции N.A.P. по рубрикам 600 и 100, а также по рубрикам 40 и 15 национальной системы счетов (см. таблицы на стр. 229 - 231).

1.13.7.2.2.4. Отрасли, не охваченные расчетами.

К отраслям, не охваченным полностью расчетами индексов с базой 1980 г., относятся самые разнообразные: среди наиболее важных это водоснабжение, городское отопление, производство урана, информатика, издательская деятельность и прочие отрасли (производство игрушек, спортивных товаров и предметов досуга и т.д.).

1.13.8. Индекс цен

1.13.8.1. Месячный индекс потребительских цен

Базовый бюджет месячного индекса потребительских цен (295 позиций затрат, при базе 100 для 1980 г.) является бюджетом городских семейств различного размера, глава которых – рабочий или служащий. Наблюдение за ценами осуществляется по выборке городских агломераций различных размеров: ежемесячно производится около 160,000 наблюдений в 30,000 торговых пунктах, распределенных в сотне агломераций.

* Вместе с позицией "Услуги банков" этот показатель с 1 января 1987 г. содержит 296 позиций.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Уровень 15	Уровень 40	Уровень 90	ПОКАЗАТЕЛИ	Месячный показатель	Квартальный показатель		Доля отрасли без индексации	Добавленная стоимость в отрасли в 1980 г. (млн. фр.)
				Месячные серии	Квартальные серии	Общая статистика		
U 02			**сельскохозяйственные и пищевые отрасли**	**45 268**	**5 482**	**50 750**	**14 207**	**64 957**
	T 02		— мясо и молочные продукты	*19 605*	–	*19 605*	*1140*	*20 745*
		35	— Мясо и мясные консервы	10 095	–	10 095	–	10 095
		36	— Молоко и молочные продукты	9 510	–	9 510	1 140	10 650
	T 03		— прочие сельскохозяйственные и пищевые продукты	*25 663*	*5 482*	*31 145*	*13 067*	*44 212*
		37	— Консервы	–	–	–	4 249	4 249
		38	— Хлеб и кондитерские изделия	–	–	–	4 407	4 407
		39	— Зерновые продукты	10 294	–	10 294	983	11 277
		40,1	— Пищевые жиры	1 863	–	1 863	–	1 863
		40,2	— Сахар	4 209	–	4 209	–	4 109
		40,3	— Прочие продукты питания	–	5 482	5 482	955	6 437
		41	— Напитки, в т.ч. алкогольные	8 056	–	8 056	2 473	10 529
		42	— Табак	1 241	–	1 241	–	1 241
U 03			**энергетика**	**74 828**	–	**74 828**	**9 534**	**84 362**
	T 04		— твердое минеральное топливо, кокс	*8 374*	–	*8 374*	–	*8 374*
		04,1	— Уголь, сланцы	7 342	–	7 342	–	7 342
		04,2	— Продукты коксование	1 032	–	1 032	–	1 032
	T 05		— нефть, природный газ и нефтепродукты	*20 948*	–	*20 948*	–	*20 948*
		05,1	— Добыча нефти	1 322	–	1 322	–	1 322
		05,2	— Добыча природного газа	3 892	–	3 892	–	3 892
		05,3	— Продукты нефтепереработки	15 734	–	15 734	–	15 734
	T 06		— электричество, газ и вода	*45 506*	–	*45 506*	*9 534*	*55 040*
		06	— Производство и распределение электроэнергии	36 758	–	36 758	–	36 758
		07	— Распределение газа	8 748	–	8 748	151	8 899
		08	— Городское водо и теплоснабжение	–	–	–	9 383	9 383
U 04			**промежуточные продукты**	**150 965**	**14 696**	**165 661**	**18 105**	**183 766**
	T 07		— железные руды и черные металлы: первичная обработка стали	*22 121*	–	*22 121*	–	*22 121*
		09	— Железная руда	603	–	603	–	603
		10	— Металлургическая продукция	15 305	–	15 305	–	15 305
		11	— Первичная обработка стали	6 213	–	6 213	–	6 213
	T 08		— руды, цветные металлы и полуфабрикаты	*9 244*	–	*9 244*	*5 398*	*14 642*
		12	— Руды цветных металлов	1 286	–	1 286	37	1 323
		13	— Цветные металлы и полуфабрикаты	7 958	–	7 958	5 361	13 319

(*) Валовая добавленная стоимость оцененная по затратам предприятий с 10 и более работниками в 1980 г.

Индексы промышленного производства (база 1980 г.): таблицы по видам продукции с учетом взвешивания.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Уровень 15	Уровень 40	Уровень 90	ПОКАЗАТЕЛИ	Месячный показатель	Квартальный показатель		Доля отрасли без индексации	Добавленная стоимость в отрасли в 1980 г. (млн. фр.)
				Месячные серии	Квартальные серии	Общая статистика		
	T 09		— конструкционные материалы и различные металлы	*20 416*	–	*20 416*	*4 164*	*24 580*
		14	— Различные полезные ископаемые	2 067	–	2 067	–	2 067
		15	— Конструкционные и керамические материалы	18 349	–	18 349	4 164	22 513
	T 10	16	— стекло	*8 756*	–	*8 756*	–	*8 756*
	T 11		— химические продукты на базе	*23 536*	*1 339*	*24 875*	*2 736*	*27 611*
		17,1	— Продукты минеральной химии	8 694	–	8 694	–	8 694
		17,2	— Продукты органической химии	14 170	1 339	15 509	2 736	18 245
		43	— Нити и искусственные и синтетические волокна	672	–	672	–	672
	T 13		— доменное производство	*46 848*	–	*46 848*	*1 903*	*48 751*
		20	— Доменное производство	6 955	–	6 955	–	6 955
		21	— Работа по металлу	39 893	–	39 893	1 903	41 796
	T 21		— бумага, картон	*10 234*	*1 386*	*11 620*	*3 423*	*15 043*
	T 23		— каучук и пластмассы	*9 810*	*11 971*	*21 781*	*481*	*22 262*
		52	— Пневматические и другие продукты на базе каучука	9 810	393	10 203	–	10 203
		53	— Обработка пластмасс	–	11 578	11 578	481	12 059
U 05A			**оборудование по отраслям**	**53 211**	**76 349**	**129 560**	**24 531**	**154 091**
	T 14		— продукция машиностроения	*2 879*	*55 125*	*58 004*	*1 900*	*59 904*
		22	— Сельскохозяйственная техника	2 879	–	2 879	1 682	4 561
		23	— Станки	–	7 725	7 725	–	7 725
		24	— Промышленное оборудование	–	30 776	30 776	–	30 776
		25	— Складское оборудование, горное оборудование, металлургическое и строительное оборудование	–	9 211	9 211	–	9 211
		34	— Инструменты и измерительная техника	–	7 413	7 413	218	7 631
	T 15A		— электрическое и электронное оборудование	*50 332*	–	*50 332*	*12 743*	*63 075*
		27	— Оргтехника и информационная техника	–	–	–	11 203	11 203
		28	— Электрооборудование	23 168	–	23 168	–	23 168
		29A	— Электронная специализированная техника	**27 164**	–	**27 164**	**1540**	**26 704**
	T 17		— строительство судов и космической техники;производство вооружений	–	*21 224*	*21 224*	*9 888*	*31 112*
		26	— Производство вооружений	–	///	///	///	///
		32	— Строительство судов	–	///	///	///	///
		33	— Строительство космической техники	–	13 365	13 365	6 030	19 395

(*) Валовая добавленная стоимость, оцененная по затратам предприятий с 10 и более работниками в 1980 г.
(**) TAS = Искусственные и синтетические ткани.

Индекс промышленного производства (база 1980 г.); таблицы по видам продукции с учетом взвешивания (продолжение).

Уровень 15	Уровень 40	Уровень 90	ПОКАЗАТЕЛИ	Месячный показатель	Квартальный показатель		Доля отрасли без индексации	Добавленная стоимость в отрасли в 1980 г. (млн. фр.)
				Месячные серии	Квартальные серии	Общая статистика		
U 05BC			**автомобильная промышленность бытовая техника**	**39 622**	**16 457**	**56 079**	**7 321**	**63 400**
	T 15B		— бытовая техника	*7 675*	–	*7 675*	–	*7 675*
		29,2	— Электронные бытовые приборы	1 710	–	1 710	–	1 710
		30	— Бытовая техника	5 965	–	5 965	–	5 965
	T 30		— автомобили: транспортные сухопутные средства	*31 947*	*16 457*	*48 404*	*7 321*	*55 725*
		31,1	— Автомобилестроение	29 405	16 457	45 862	5 859	51 721
		31,2	— Железнодорожная техника	2 542	–	2542	1 462	4 004
U 06			**предметы текущего потребления**	**76 311**	**16 037**	**92 348**	**32 548**	**124 896**
	T 12		— парахимия и аптечные товары	*22 460*	*1 428*	*23 888*	*2 121*	*26 009*
		18	— Парахимия	13 459	1 428	14 887	1 592	16 479
		19	— Аптечные товары	9 001	–	9001	529	9 530
	T 18		— текстильная продукция, предметы одежды	*21 510*	*13 801*	*35 311*	*4 178*	*39 489*
		44,1	— Нити и волокно	6 309	–	6 309	127	6 436
		44,2	— Галантерея	6 668	–	6 668	125	6 793
		44,3	— Предметы текстиля	8 533	–	8 533	2 296	10 829
		47	— Одежда	–	13 801	13 801	1 630	15 431
	T 19		— кожевенно-обувное производство	*5 895*	*808*	*6703*	*1 646*	*8 349*
		45,1	— Кожа и сырье	–	808	808	–	808
		45,2	— Предметы из кожи	–	–	–	1 646	1 646
		46	— Обувь	5 895	–	5 895	–	5 895
	T 20		— лесная мебельная и другие отрасли	*14 448*	–	*14 448*	*14 369*	*28 817*
		48	— Деревообработка	6 476	–	6 476	3 625	10 101
		49	— Мебель	7 972	–	7 972	963	8 935
		54	— Другие отрасли: предметы искусства, антиквариат	–	–	–	9 781	9 781
	T 22	51	— типография, пресса	*11 998*	–	*11 998*	*10 234*	*22 232*
U 07	**T 24**	**55**	**жилищное, гражданское строительство и сельскохозяйственное строительство**	**106 740**	–	**106 740**	**570**	**107 310**

(*) Валовая добавленная стоимость оцененная по затратам предприятий с 10 и более работниками в 1980 г.

Индексы промышленного производства (база 1980 г.): таблицы по видам продукции с учетом взвешивания (окончание).

1.13.8.1.1. Период отсчета

Месячный индекс потребительских цен публиковался начиная с 1970 года (принятого за базу с индексом, равным 100) до мая 1983 г. С этого времени он рассчитывается исходя из базового 1980 г. Среднегодовое значение индекса 1980 г. принято равным 100. Оно равно средней величине из 12 месячных индексов за исключением категории свежих продуктов (для которых в качестве базы принят индекс декабря 1980 г.).

1.13.8.1.2. Область наблюдений

Потребление, учитываемое в месячном индексе, очень близко к уровню потребления, принятому в национальном счетоводстве. Отсюда следует, что:

— затраты на строительство и капитальный ремонт квартир рассматриваются как инвестиции и поэтому исключаются из рассмотрения;

— прямые налоги и социальные выплаты из анализа индексов также исключаются;

— аналогичная ситуация имеет место для косвенных налогов, относящихся к производительной деятельности домашних хозяйств; напротив, рас-сматриваемые цены включают налог на добавленную стоимость (T.V.A.) и некоторые виды платежей (муниципальные, районные);

— медицинские услуги, аренда, затраты на ремонт автомобилей рассчитываются по их валовой стоимости;

— другие закупки оцениваются по фактически выплачиваемым ценам, даже в том случае, когда эти цены изменяются лишь для части домашних хозяйств.

Потребление, не соответствующее фактическим затратам, исключалось из расчета этого индекса; в основном оно носит конъюнктурный характер, в частности это относится к:

— собственному потреблению (включая фиктивную арендную плату);

— заработной плате и помощи в натуральном виде.

Наконец, исключались затраты на здравоохранение и благотворительность, хотя они и фигурировали в потреблении хозяйств в качестве самостоятельных счетов.

По сравнению с ранее рассчитываемыми индексами отмечается существенное расширение охватываемой ими области: ракообразные и устричные виды, алкогольные напитки и аперитивы, цветы и растения, садовые изделия, спортивные и туристские товары, оружие и боеприпасы, потребление продуктов в столовых и кафе, организованные путешествия, аренда земельных участков для кемпингов.

1.13.8.1.3. Коэффициенты взвешивания

Коэффициенты взвешивания пересматривались один раз в год после публикации декабрьского индекса цен предыдущего года и до публикации январского индекса. В этом состоит существенное различие по сравнению с ранее определяемыми индексами, для которых использовались постоянные весовые коэффициенты.

Эти весовые коэффициенты не носят нормативного характера; они пропорциональны стоимости закупок соответствующих домашних хозяйств для заданного года и исходят из статистики, относящейся к потреблению года n-2 (получаемой на базе исследований потребления и счетов домашних хозяйств). Кроме того, учитывается движение цен, происшедшее за период с года n-2 до конца года n-1. Взвешенные значения для последних лет приводятся в таблицах на стр. 234 и 235.

1.13.8.1.4. Переменные

Каждый вид расходов представлен одной или несколькими переменными; список переменных в любой момент может быть изменен. Таким образом, представительность выборки переменных сохраняется, и ее структура никогда не сообщается за пределы института INSEE. Рассматривается около 1000 переменных.

1.13.8.1.5. Наблюдение за ценами

Наблюдение обеспечивается специализированными обследователями, которые регистрируют цены в выборочных местах продажи. Эта статистика распределяется на всю территорию выбранной агломерации; она учитывает все виды торговли. Продукты или услуги, по которым регистрируются цены, не обязательно являются характерными для представителей и семей со скромным достатком. При этом, за пределы института INSEE не сообщаются ни выборка мест продажи, ни даже выборка агломераций. И, наконец, зарегистрированные данные равномерно распределяются на весь месяц, для которого рассчитывается индекс цен.

Данный индекс представляет собой индекс Ласпейреса (Laspeyres) в виде:

$$I = \frac{{}^{t}P_{t}Q_{0}}{{}^{t}P_{t}Q}$$

где:

n – количество позиций,

t_0 – базовый год,

Q_t – вектор потребления в году:

$$t = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} n \times 1$$

P_t – вектор цен в году:

$$t = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} n \times 1$$

1.13.8.1.6. Правила расчета

Для каждой опубликованной строки вначале рассчитывается индекс цен для текущего года; этот индекс равен средневзвешенной арифметической индексов, относящихся к рассматриваемой переменной и к агломерации. Величина индекса делится на 100 и затем умножается на значение индекса в предшествующем декабре месяце, рассчитанном для базового 1980 года. С июня 1983 г. публикуются лишь индексы, при расчете которых в качестве базового (100) принят 1980 год.

1.13.8.1.7. Свежие продукты

Для свежей рыбы, ракообразных и улиткообразных, свежих овощей, фруктов, цветов и насаждений индекс цен учитывает сезонный характер коммерциализации продуктов. Ежемесячно определяется потребительская корзинка различной структуры. Индекс, называемый "чувствительным индексом", позволяет сравнивать стоимость корзинки текущего месяца с индексом месяца, соответствующего базовому году; при этом "чувствительный индекс" является средневзвешенной арифметической всех элементарных индексов, относящихся к каждому продукту.

Наконец, для того чтобы сгладить случайные колебания, индекс цен соответствующей позиции рассчитывается как средневзвешенная арифметическая индексов для двенадцати последних месяцев.

Индекс, относящийся к заданному году, включает совокупность потребительских корзинок текущего года; следовательно, для свежих продуктов он равен индексу декабря месяца. Вследствие учета свежих продуктов простая арифметическая средняя двенадцатимесячных индексов отличается от совокупного годового индекса.

1.13.8.1.8. Квартирная плата

Исследование квартирной платы проводится поквартально. Совокупная выборка складывается из примерно 8000 квартир, разбитых на две подвыборки, по которым последовательно проводятся исследования за каждый квартал. Выборка регулярно обновляется благодаря включению в нее новых построенных квартир. Результаты, относящиеся к подвыборке городских семейств, главой которых является рабочий или служащий, позволяют производить непрерывные расчеты изменения квартплаты при оценке месячного индекса потребительских цен.

1.13.8.1.9. Реклама

Ежемесячно публикуется статистический Бюллетень:

— для всей страны: совокупная статистика, основные подгруппы и наиболее важные позиции;

— для парижского городского округа – основные статистические данные в рамках расчета общенациональных индексов.

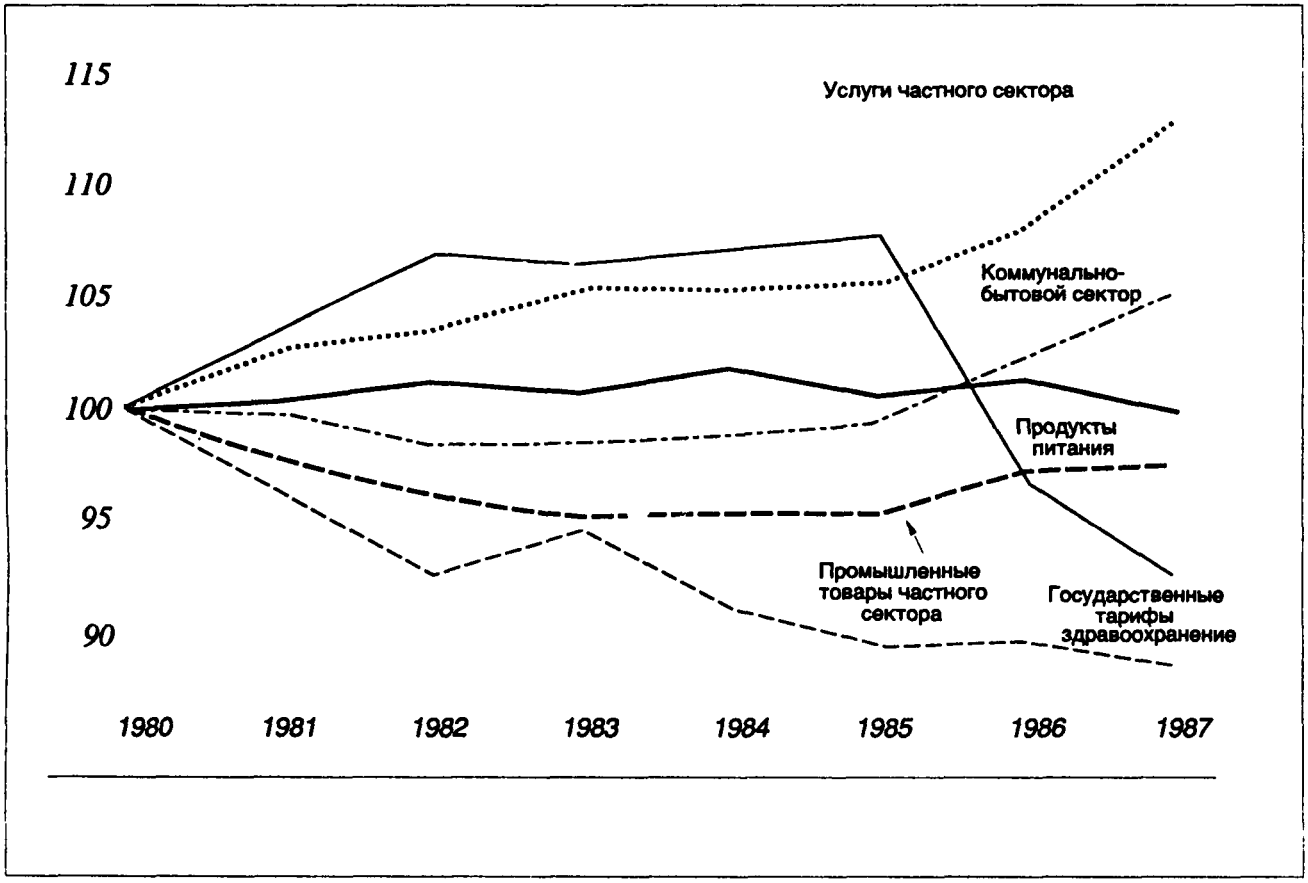
1.13.8.2. Промышленность: индексы оптовых цен и цен реализации продукции

1.13.8.2.1. Индексы оптовых цен энергоносителей и некоторых видов промышленной продукции

Эти индексы рассчитываются институтом INSEE с 1962 года с использованием процедуры взвешивания, начиная с февраля 1986 года, причем величина индекса 1980 года принята равной 100 (для уточнения смотрите Bulletin mensuel de statistique № 2 1986 г.). Они определяются в двух вариантах: с учетом и без учета налогов. Цены без учета налогов (в настоящее время без налога на добавленную стоимость) представляют особый интерес для производителей продукции, поскольку, в конечном счете, это цены, по которым они реализуют свою продукцию. Напротив, цены, учитывающие все налоги, интересуют покупателей, которые не могут исключить налога на добавленную стоимость.

Эти индексы цен учитывают лишь продукцию, реализуемую на внутреннем рынке. Поэтому они соответствуют "внутренним" ценам. Наблюдение за ценами производится на стадии первой реализации вслед за производством. Наблюдаемые цены обычно являются не "среднемесячными", а ценами "на конец месяца".

Индексы цен рассчитываются по формуле Ласпейреса. В общей сумме продаж 1962 г. весовые коэффициенты представляют долю, относящуюся к каждому товару.



Индекс потребительских цен (база 100 для 1980 г.). Относительные среднегодовые изменения. (Источник: Ежегодник INSEE.)

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Группа и подгруппа	Коэффициент связи между базой 1980 г. и базой 1970 г. (5)	1983		1984		1985		1986		1987	
		С учетом взвешивания (3)	Индекс	С учетом взвешивания (3)	Индекс	С учетом взвешивания (3)	Индекс	С учетом взвешивания (3)	Индекс	С учетом взвешивания (3)	Индекс
Совокупный индекс (296 позиций)	2,513	10 000	139,0	10 000	149,3	10 000	158,0	10 000	162,2	10 000	167,3
I. *Продукты питания* (включая напитки)	*2,540*	*2 512*	*140,3*	*2 507*	*151,4*	*2 496*	*158,9*	*2 516*	*164,4*	*2 403*	*167,3*
Продукты питания (без учета напитков)	*2,573*	*2 132*	*140,6*	*2 124*	*151,7*	*2 113*	*159,0*	*2 139*	*164,1*	*2 021*	*167,6*
a. Зерновые продукты	2,862	284	140,3	279	151,4	275	160,4	276	167,0	263	171,9
Хлебные и кондитерские	2,922	252	140,5	246	151,8	243	160,6	242	167,1	220	172,4
в т.ч.: хлеб	3,148	106	139,2	102	149,7	99	156,3	98	160,9	95	165,3
свежие кондитерские	3,175	93	142,8	92	156,3	91	166,6	89	174,4	71	183,1
Другие продукты зерновые	2,418	32	138,5	33	149,1	32	158,8	34	166,3	43	168,8
в т.ч.: пищевое тесто	2,618	14	139,9	14	149,9	14	158,7	14	166,7	14	169,5
рис	2,158	5	144,3	5	158,7	5	175,4	6	179,9	6	180,5
b. Мясо и рыба	2,418	928	139,2	900	148,2	892	154,5	898	159,4	846	162,9
Мясо из лавок	2,444	349	141,8	335	148,8	319	152,5	319	156,3	295	160,9
в т.ч.: говядина	2,481	223	144,2	213	151,0	207	154,5	206	158,0	194	162,8
телятина	2,237	64	138,5	62	143,8	54	147,9	56	154,6	50	163,0
баранина	2,390	39	132,6	39	142,5	38	146,5	37	149,5	38	150,3
конина	2,629	23	143,5	21	150,5	20	154,9	20	155,6	13	156,4
свинина и колбасы	2,222	266	137,6	248	145,6	257	152,8	262	155,6	240	159,7
в т.ч.: свежая и копченая свинина	2,126	85	132,6	73	137,4	76	141,1	76	138,9	69	141,1
колбасы	2,272	181	139,9	175	149,4	181	158,1	186	163,3	171	168,3
в т.ч.: окорока	2,157	72	138,9	68	148,3	71	153,9	71	155,7	72	162,0
птица, кролики, дичь	2,370	132	137,4	133	148,3	129	152,4	128	154,5	126	153,0
в т.ч.: куры	2,272	63	136,7	64	148,5	64	153,4	62	153,2	60	151,0
кролики, дичь	2,640	37	146,6	36	154,6	32	153,7	33	159,9	34	158,4
другие мясные продукты	2,323	60	134,5	62	144,9	63	153,1	63	158,9	74	162,3
в т.ч.: требуха	2,329	27	132,5	28	143,2	28	150,0	27	155,5	25	158,2
Продукты охоты	2,898	121	139,9	122	153,7	124	166,3	126	181,8	111	186,8
в т.ч.: свежая и мороженная рыба (4)	3,096	65	136,3	63	148,6	63	162,7	65	183,2	54	189,2
c. Яйца, молоко, жиры	2,376	401	136,0	411	149,7	409	156,3	418	158,5	403	158,9
в т.ч.: свежее молоко	2,538	54	141,7	53	152,4	53	158,8	56	162,7	71	164,5
сыры	2,664	166	139,2	168	150,3	168	160,2	176	167,1	160	169,1
яйца	2,093	30	124,4	36	143,5	32	143,4	32	142,0	33	152,8
масло	2,006	56	132,4	55	135,2	46	133,1	50	137,2	47	139,6
арахисовое масло	2,370	16	133,6	20	197,3	19	210,8	15	175,4	11	140,8
d. Овощи и фрукты	3,026	303	153,3	315	166,2	313	174,2	317	180,1	322	185,3
в т.ч.: свежие овощи (4)	3,428	132	163,3	149	181,8	148	182,0	143	188,3	141	207,8
свежие фрукты (4)	3,035	111	146,6	110	154,5	107	171,5	116	178,3	129	172,5
e. Др. продукты питания	2,435	216	138,2	219	150,3	224	159,8	230	168,7	187	173,6
в т.ч.: сахар	2,469	19	138,9	19	149,2	18	157,2	18	165,1	13	169,9
шоколад	2,508	19	131,2	19	151,5	21	164,3	21	175,8	17	184,7
Напитки	*2,362*	*380*	*138,8*	*383*	*149,8*	*383*	*158,5*	*377*	*165,9*	*382*	*165,8*
алкогольные	2,318	259	141,1	253	148,8	246	156,4	246	164,0	255	167,3
в т.ч.: вина	2,287	142	138,5	132	144,8	129	154,0	134	163,8	138	167,4
безалкогольные	2,467	121	133,7	130	151,1	137	161,6	131	168,6	127	161,8
в т.ч.: кофе в зернах и молотый	2,728	42	124,9	47	148,8	51	160,7	45	170,0	44	145,0
вода	2,433	26	136,3	27	146,0	28	155,0	30	160,7	31	166,0
II. *Промышленные товары*	*2,416*	*4 550*	*137,0*	*4 551*	*147,4*	*4 538*	*156,4*	*4 438*	*157,7*	*4 379*	*160,9*
A. Одежда и текстильные товары	2,411	829	132,3	857	145,7	862	157,8	854	168,0	938	175,9
a. Одежда	2,419	735	131,8	760	145,1	764	156,9	757	167,0	845	174,9
в т.ч.: верхняя одежда	2,243	276	127,2	285	139,2	282	149,5	287	158,4	321	165,3
прочая одежда и аксессуары	2,399	289	137,1	299	152,3	297	166,4	300	178,5	355	188,1
в т.ч.: белье, трикотажные изделия, аксессуары	2,396	255	138,1	264	153,6	262	167,9	265	180,4	317	190,5
обувь	2,865	170	130,3	176	142,7	175	153,6	170	162,5	169	169,1
b. Другие текстильные товары	2,350	94	136,7	97	151,5	98	165,0	97	176,3	93	185,1
в т.ч.: ткани, галантерея	2,300	44	140,1	45	156,3	46	170,8	46	183,2	38	192,9
постельное белье, обивочные ткани	2,390	50	133,5	52	147,2	52	159,8	51	170,0	55	178,1
B. Другие промышленные товары	2,406	3 721	138,1	3 694	147,7	3 676	156,0	3 584	155,2	3 441	157,3
a. Мебель и ковры	2,191	462	134,8	447	143,6	423	151,0	406	158,0	289	163,6
b. Бытовые электрические и газовые приборы	1,756	138	130,0	140	137,3	127	141,3	120	144,8	137	147,1
c. Другие бытовые товары	2,531	190	142,0	188	155,0	184	165,6	180	174,8	182	181,8
в т.ч.: товары для дома	2,476	147	141,8	145	155,2	142	166,1	140	175,6	137	183,1
электро и скобяные товары	2,694	43	142,8	43	154,2	42	164,1	40	172,1	45	177,4
d. Хозяйственное мыло и товары для уборки	2,154	80	140,0	80	149,0	81	156,0	83	160,9	74	163,6
e. Товары для туалета и ухода	1,777	403	129,1	406	135,9	425	141,5	442	146,0	475	149,0
в т.ч.: парфюмерия	1,505	223	120,6	226	124,9	236	128,0	244	130,2	249	131,8
f. Транспортные средства	2,633	414	132,8	452	143,1	444	151,8	400	161,2	443	165,8
в т.ч.: автомобили	2,750	299	132,3	338	143,4	335	153,1	294	164,4	350	169,8
g. Бумажные товары, книги, газеты	2,845	211	147,4	206	159,6	218	171,0	224	182,4	218	190,1
в т.ч.: бумага	2,394	23	140,2	22	153,3	24	166,6	25	175,0	26	181,0
книги и газеты	2,899	188	148,3	184	160,4	194	171,6	199	183,3	192	191,3
в т. ч.: газеты	4,048	52	160,1	57	174,9	62	187,6	64	200,4	57	206,5
журналы	3,112	73	141,3	65	152,5	73	164,2	75	177,4	67	186,3

Месячные индексы потребительских цен семей (1). В целом по Франции (296 позиций затрат); среднегодовая (2) и взвешенная величины .

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Группа и подгруппа	Коэффициент связи между базой 1980 г. и базой 1970 г. (5)	1983		1984		1985		1986		1987	
		С учетом взвешивания (3)	Индекс	С учетом взвешивания (3)	Индекс	С учетом взвешивания (3)	Индекс	С учетом взвешивания (3)	Индекс	С учетом взвешивания (3)	Индекс
h. Фототовары, оптика, электроакустические	1,337	155	109,1	166	111,9	154	112,2	151	112,6	168	113,2
в т.ч.: фототовары и немедицинская оптика	1,655	27	130,6	27	146,7	28	158,8	25	163,3	31	167,3
электроакустические товары	1,277	128	105,1	139	105,7	126	104,3	126	104,1	137	104,2
i. Другие товары досуга	2,261	180	133,2	182	141,8	175	149,8	173	158,3	196	164,1
j. Топливо, энергия	3,319	1 065	150,7	989	162,8	1 050	176,2	1 026	153,9	932	149,1
в т.ч.: уголь	3,961	23	151,4	21	168,6	22	183,6	22	193,9	19	195,6
бензин	2,985	469	140,2	430	151,6	460	167,1	441	142,1	400	144,1
газ	2,773	117	166,5	119	178,7	131	192,0	132	176,2	122	142,1
электричество для бытовых нужд	2,513	203	145,5	214	158,7	228	165,5	238	164,1	260	163,2
k. Табак и другие промышленные товары	2,604	423	136,1	436	145,5	395	149,1	379	155,4	327	161,4
в т.ч.: табак	1,797	165	150,2	169	159,5	160	157,6	164	167,8	179	176,4
III. Услуги	*2,625*	*2 938*	*141,1*	*2 942*	*150,8*	*2 966*	*160,0*	*3 046*	*167,5*	*3 128*	*177,3*
a. Квартирные услуги	2,521	768	138,1	780	149,1	799	158,9	827	167,7	847	177,3
в т.ч.: квартирная плата	2,237	551	136,0	567	146,5	584	155,9	609	164,5	654	173,8
ремонт квартир и бытовой техники	2,960	128	145,8	128	158,0	127	168,5	127	177,0	115	188,7
b. Личное обслуживание, уход за одеждой	2,681	119	150,9	112	161,4	107	170,1	104	177,0	124	193,5
в т.ч.: починка обуви	2,678	8	157,2	8	170,2	7	179,9	8	189,9	6	205,8
прачечные, химчистка	2,579	31	144,2	28	153,5	28	162,1	26	168,6	27	182,1
парикмахерские	2,747	76	154,4	72	165,2	67	173,9	65	180,5	84	198,1
c. Услуги здравоохранения	2,359	406	131,7	429	136,3	422	141,6	448	145,7	414	148,7
d. Общественный транспорт	2,681	205	144,9	197	155,0	204	165,1	208	172,6	230	179,0
в т.ч.: городской	2,498	56	143,2	55	154,0	55	164,6	56	174,9	64	193,9
железнодорожный	2,240	67	142,2	687	151,0	73	162,8	76	169,3	106	174,6
e. Услуги по обслуживанию личного транспорта	2,764	270	144,6	271	154,1	269	164,2	275	174,2	410	194,5
в т.ч.: ремонт личных автомобилей	2,785	218	143,2	217	152,2	216	162,1	220	172,5	348	193,5
f. Гостиницы, кафе, рестораны, столовые	2,812	832	146,7	805	157,2	805	167,2	821	175,2	690	187,5
в т.ч.: гостиницы	2,537	71	151,6	69	161,5	70	172,9	73	182,3	59	199,1
обслуживание в ресторанах	3,081	275	143,2	269	152,9	269	162,3	275	170,5	266	182,6
обслуживание в кафе	2,891	290	152,2	288	162,4	285	173,2	292	181,2	180	197,6
g. Прочие услуги	2,470	338	136,8	348	148,5	360	157,7	363	163,8	503	169,5
в т.ч.: радио и телекоммуникации	2,446	99	122,4	104	134,7	118	142,9	118	145,1	168	146,7
зрелищные мероприятия	2,876	45	145,6	46	158,3	45	172,9	45	183,0	52	201,8
в т.ч.: кино	2,824	25	143,4	25	153,1	24	165,1	23	173,4	22	184,6
услуги отдыха и спорта	2,764	63	150,4	65	165,4	67	178,0	69	187,6	75	198,1
Классификация по группам:											
Питание (включая рестораны, столовые, кафе)	2,602	3 262	141,6	3 231	152,6	3 220	160,6	3 253	166,6	3,024	171,3
Одежда	2,585	2 236	143,0	2 195	153,8	2 204	163,3	2 202	164,4	2,056	167,7
Предметы гигиены и личного ухода	2,077	1 008	133,5	1 029	139,9	1 035	145,9	1 077	150,5	1,087	154,7
Транспорт	2,756	1 358	139,3	1 350	149,8	1 377	161,1	1 324	159,0	1,483	166,6
Развлечение, досуг	2,359	1 307	134,1	1 338	143,4	1 302	149,7	1 279	156,1	1,370	161,4
Промышленные товары (без отопления, освещения)	2,314	3 954	133,9	3 992	144,0	3 948	152,7	3 853	156,6	3,847	161,7
Отопление, освещение	3,601	596	159,2	559	171,8	590	183,3	585	163,3	532	152,6
Услуги, исключая рестораны, столовые, кафе	2,536	2 188	139,3	2 218	148,8	2 242	157,7	2 309	165,0	2,597	174,3
Услуги, исключая квартирную плату, воду, рестораны, столовые, кафе	2,588	1 548	140,4	1 566	149,4	1 570	157,9	1 609	164,6	1,865	174,0
Услуги, исключая квартирную плату	2,701	2 387	142,2	2 375	151,8	2 382	160,9	2 437	168,1	2,564	178,0
Всего по непродовольственным позициям	2,496	7 488	138,5	7 496	148,7	7 504	157,8	7 484	161,5	7,597	167,4
Всего (включая фиктивную квартирную плату)	2,499	///	138,9	///	149,2	///	157,9	///	162,3	///	167,7
Квартирная плата (в т.ч. фиктивная), вода, отопление, освещение	2,628	///	143,7	///	155,0	///	166,4	///	167,0	///	170,5
Изменчивые показатели:											
свежая рыба	3,111	65	136,4	63	148,7	63	162,7	65	183,2	54	189,4
свежие овощи	3,258	132	162,0	149	181,3	148	182,4	143	182,5	141	201,9
свежие фрукты	2,993	111	145,4	110	153,4	107	170,7	116	176,2	129	170,8

(1) Городские семьи, глава которых рабочий или служащий.
(2) Месячные индексы публикуются, в частности, в *Bulletin mensuel de Statistique.*
(3) Коэффициенты взвешивания пересматриваются один раз в год.
(4) Скользящая средняя двенадцати последних месячных изменчивых индексов.
(5) Средний индекс 1980 г. с базой 100 для 1970 г., деленный на 100.
Источник: INSEE База 100 для 1980 г.

Месячные индексы потребительских цен семей (I). В целом по Франции (296 позиций затрат); среднегодовая (2) и взвешенная величины .

Месячные индексы публикуются в журнале Bulletin mensuel de statistique de e'INSEE. Там же можно найти индексы по металлургической отрасли (по черным и цветным металлам), жировым и кожевенным продуктам, а также индексы, относящиеся к энергоносителям.

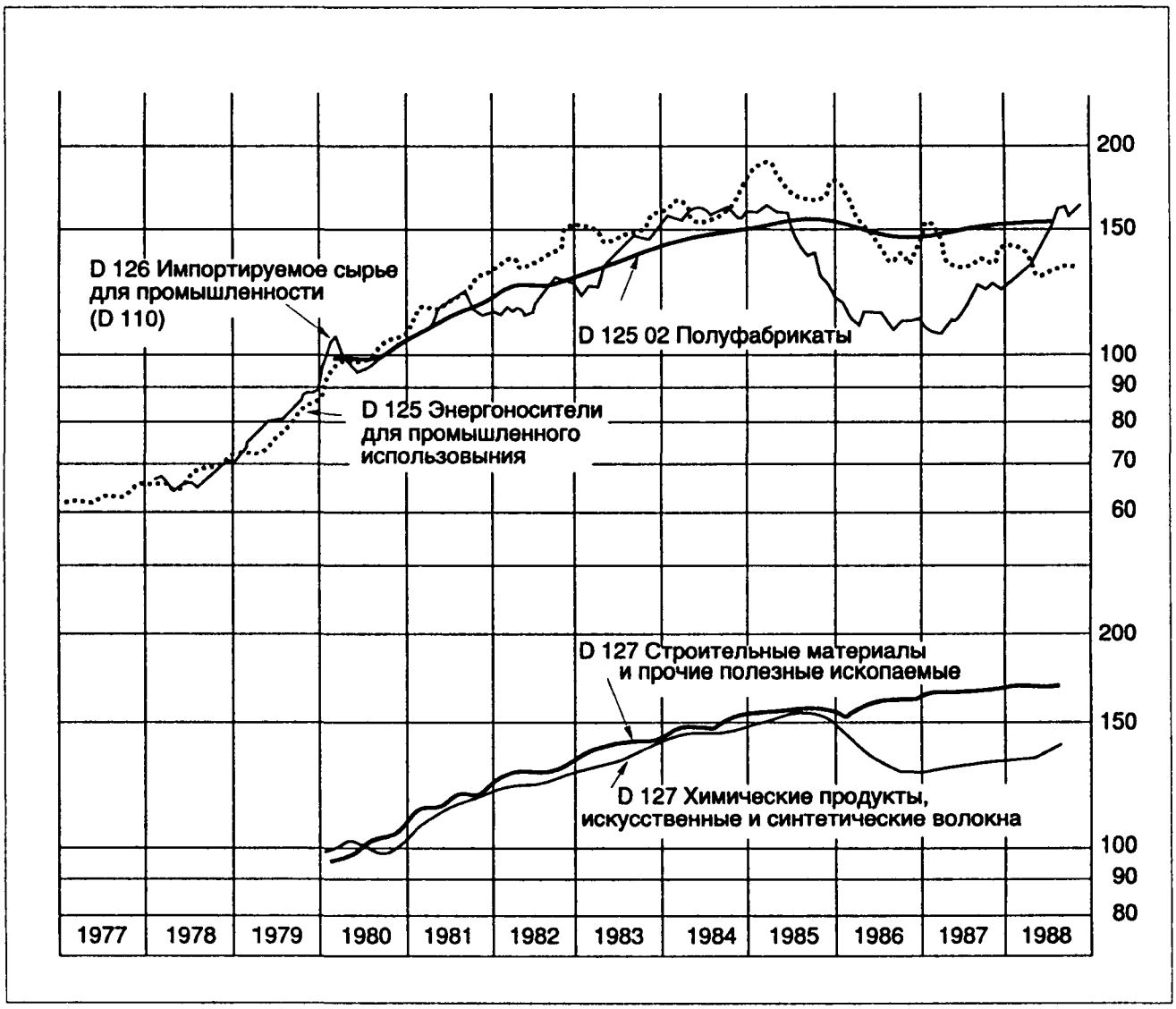
1.13.8.2.2. Индексы цен реализации на стадии производства

Индексы оптовых цен, описанные в предыдущем разделе, имеют ряд недостатков: они охватывают лишь ограниченную область (часть промежуточных продуктов); сбор информации осуществляется через самые разнообразные каналы, что уменьшает ее надежность и нередко обусловливает разрывность статистики; наконец, регистрируемые цены обычно являются справочными ценами, которые даже в динамике нередко отличаются от фактических цен.

Поэтому возникла необходимость пройти эту стадию оптовых индексов цен и разработать более гибкую систему индексов. Институту INSEE было поручено разработать систему наблюдения за ценами на промышленную продукцию, которая была бы лишена этих недостатков. Разработанные этим институтом индексы назвали индексами цен реализации на стадии производства; они охватывают совокупность отраслей промышленности и сельского хозяйства.

1.13.8.2.2.1. *Сельскохозяйственное производство*

Внедрение в практику индексов цен производства в сельском хозяйстве началось в 1977 г.; в качестве базового для большинства отраслей был выбран 1976 год, а для некоторых – 1977 или 1978 годы. В настоящее время эти индексы рассчитываются на базе 1982 года, принятой за100. За некоторыми исключениями принята поквартальная периодичность (полугодовая – для шампанских и шипучих вин; цены в момент уборки – для солода, манной крупы, алкогольных напитков; годовая – для некоторых второстепенных продуктов). Для этой новой базы индексы рассчитаны на уровне



Оптовые цены промышленности (Источник: INSEE, индекс 100 для 1980 г.)

600 и 100 по стандартной номенклатуре производств и продуктов (NAP). Интегральный индекс по совокупности отраслей агропромышленного комплекса должен быть получен в ближайшем будущем.

Взвешенные значения фиксированы (по формуле Ласпейреса): они соответствуют суммарному объему реализации для национальных производителей на внутреннем рынке в 1982 г. В краткосрочном периоде предполагается внедрить столь же точную систему регистрации цен импорта и экспорта, как и для внутреннего рынка.

Принятый подход при выборе продуктов – индикаторов и наблюдение за их ценами аналогично подходу, используемому при определении индекса цен производства в других отраслях промышленности, как это описано выше.

1.13.8.2.2.2. Отрасли, не включаемые в сельскохозяйственное производство

При использовании индексов цен производства возникают две основные трудности:

— с одной стороны, стабильность продуктов промышленного производства нередко весьма непродолжительна, тогда как расчет индексов требует наличия сопоставимой во времени информации.Так же как и при наблюдении за потребительскими ценами, обнаруживаются явления, связанные с модой (производство одежды, обуви и т.д.), т.е. проявляют себя такие факторы, которые существенно влияют на все вышестоящие по производственной цепочке отрасли. К этому добавляется наличие продуктов, произведенных в соответствии со спросом и реализуемых по смете затрат или предназначенных единственному покупателю. Все такие продукты не включаются в каталоги;
— с другой стороны, обычно цены продукции устанавливаются в зависимости от крупности партии, надежности клиента и, возможно, от текущей конъюнктуры. Даже если существует тариф, промышленная цена почти всегда является предметом торгов и нередко можно наблюдать различие в ценах в размере 200% между различными покупателями в течение одного дня и для одного и того же продукта.

Сложные проблемы, связанные с реализацией этой операции, обусловили отказ от традиционных процедур, таких как письменный опрос или использование наблюдателей института INSEE и привели к разработке совершенно оригинального метода для обработки статистики предприятий.

Внедрение индексов производится постепенно, по отдельным отраслям производства. Для каждой из них определяется набор предприятий в зависимости от степени их влияния на различные внутренние рынки. В итоге было выделено около 4000 предприятий.

Опросы чаще всего производятся при активной помощи профессиональных институтов. Это сотрудничество относится к выбору совокупности предприятий, анализу продукции отрасли и действующей коммерческой практике.

Вначале каждое предприятие посещает директор-обследователь. Обсуждения с генеральным и коммерческим директорами позволяет определить разнообразие выпускаемой продукции, специфику коммерческой деятельности предприятий. В таком случае выбор типовых продуктов и соответствующих ценовых показателей осуществляется в наиболее благоприятных условиях. В результате появляются необходимые элементы для расчета индексов цен. После этого начинается длительная работа по совершенствованию анализа, исходя из данных, полученных в ходе визита на предприятия.

На этапе внедрения индексов в рассматриваемой отрасли обычно учитывается мнение профессиональных организаций в отношении перечня индексов, выбираемых для распространения, и получателей этой информации. Предусматривается два способа распространения: с одной стороны, для предприятий отрасли и ее профессиональных организаций – более детальная статистика; с другой стороны, через канал журнала Bulletin mensuel de statistique по нескольким уровням агрегирования – начиная с февральского номера 1986 г. (с уровнями номенклатуры производства и продуктов NPA равными 100, 40 или 15 – в зависимости от типа продуктов для наиболее агрегированных индексов; с уровнем 600 – по совокупности продуктов для наиболее детализированных индексов).

Расчет индексов цен производства в промышленности, исключая сельскохозяйственную продукцию, производится по формуле Ласпейреса: сравнение во времени относится к реализуемому на внутреннем рынке ценовому набору продуктов, представляющих производство Франции в изучаемом году. Однако для некоторых продуктов доля французских производителей на внутреннем рынке не достаточно представительна; поэтому наблюдению подвергаются также импортные цены. Взвешивание производится в стоимостном выражении и остается неизменным в течение нескольких лет. В качестве базовых для расчета взвешенных величин приняты различные годы, в зависимости от последовательности их ввода в действие. Напротив, базовый 1980-й год (со средними значениями индексов равными теперь 100) является единым для всех базовых индексов, предшествующих этому году.

Индексы цен рассчитываются поквартально за исключением случая, когда необходимо знать месячную динамику цен некоторых продуктов (например, сырья) или в случае, когда предприятия обеспечивают цены за полугодие (например, для трикотажного производства).

Введение в практику этих новых индексов было начато в 1977 г. и должно завершиться в 90-е годы.

1.13.8.3. Сельское хозяйство: индекс цен на промышленную продукцию, используемую для сельскохозяйственного производства

Этот индекс (I.P.P.I.N.E.A., с базовым значением 100 для 1975 г.) позволяет отслеживать изменение цен на промышленную продукцию, закупаемую производителями сельскохозяйственной продукции для своих целей. Сельскохозяйственные продукты (например, зерно, закупаемое на корм скоту), а также услуги, которые непосредственно не связаны с распределением продукции, исключаются из сферы расчета индекса, например, из совокупных затрат на ремонт и обслуживание учитываются лишь затраты на приобретение запасных

частей и материалов; точно также не учитываются расходы на ветеринарное обслуживание, подковку животных, тогда как потребление ветеринарных продуктов и подков для лошадей принимается в расчет. Используемые взвешенные величины рассчитываются по формуле Ласпейреса; они определяются исходя из потребления сельскохозяйственного сектора Франции в 1975 году.

Цены, используемые при расчете индекса, должны соответствовать ценам, по которым фактически осуществляется оплата потребителями без учета налога на добавленную стоимость.

Для каждого товара определялась выборка пунктов продажи, распределенных по всей территории страны: в этой выборке представлены различные источники поставок (сельскохозяйственные снабженческие кооперативы, коммерсанты и т.д.). Однако, региональные цены на оборудование не регистрируются; они определяются как цены франко-завод отправления.

1.13.8.4. Строительство: индекс стоимости строительства

Этот индекс (за базу 100 принят 4-ый квартал 1953 г.) рассчитывается поквартально институтом INSEE при сотрудничестве министерства, ответственного за оборудование и жилье. Он измеряет общую динамику цен на строительство жилых зданий (от фундамента до полного завершения работ). При его расчетах используются фактически наблюдаемые цены реализации по законченным строительством зданиям. Такие наблюдения учитывают вид строительства (индивидуальное или коллективное), способ финансирования и масштабы строек.

Данный индекс отражает не только изменение затрат на материальные и трудовые ресурсы, но также проценты за кредит, которые могут оказать влияние на инвесторов (через профессиональные и другие налоги, цену капитала и т.д.), и изменения различных налогов (в частности, Н.Д.С.) и чистой прибыли различных участников строительного производства. Рассчитываемый индекс используется для всей территории страны. Он является хорошим ориентиром при установлении цен за аренду жилья на свободном рынке.

Этот индекс не учитывает стоимости земельных участков и затрат на их обустройство (оплату дорожной службы, соединительных путей). Он также не отражает затрат на исследовательские работы (оплату архитектурной службы). И, наконец, он применяется лишь по отношению к жилым помещениям и не используется для промышленных зданий, школ, больниц и т.д. Данный индекс не может также использоваться для определения затрат на ремонт зданий или их обслуживание.

Для оценки изменений затрат одних лишь физических факторов производства (труда и материалов) различные институты (государственные и частные) рассчитывают специальные индексы. Такими показателями являются средневзвешенные районные индексы, рассчитываемые министерством строительства и жилья. Аналогичными являются индексы Академии архитектуры (AA) (бывшее центральное Общество архитекторов) или Национальной Федерации зданий и сооружений (FNB), которые, с одной стороны, не используют статистику по фактически выплачиваемым ценам за строительную продукцию, с другой, - применяют эти индексы лишь для парижского района. Индекс Академии архитектуры используется для пересмотра цен на ремонт зданий. Индексы Национальной Федерации зданий и сооружений (FNB), введенные по требованию страховых компаний, используются для выплаты премий и возмещения ущерба от стихийных бедствий.

Год	Средняя	1-ый квартал	2-ой квартал	3-ий квартал	4-ый квартал
1971	236,3	231	235	238	241
1972	250,2	244	248	252	257
1973	271,0	260	268	274	280
11974	314,0	291	302	322	339
1975	354,8	345	353	357	364
1976	396,0	375	391	403	415
1977	433,3	416	430	438	449
1978	471,0	452	461	472	499
1979	521,2	502	510	525	548
1980	592,5	569	587	604	610
1981	647,7	630	636	652	673
1982	718,2	697	717	732	727
1983	766,0	746	760	776	782
1984	811,3	794	810	820	821
1985	837,0	826	834	841	847
1986	864,0	855	859	861	881
1987	889,5	884	889	895	890
1988	–	908	–	–	–

Источник: INSEE.
База 100 принята для 4-го квартала 1953 г.

Квартальный индекс стоимости строительства жилых зданий.

1.13.9. Деньги

В предшествующие годы на условия финансирования французской экономики оказали влияния два основных фактора: с одной стороны – развитие рынка капиталов и возрастающая диверсификация финансовых результатов; с другой – все более тесное сближение деятельности различных финансовых институтов.

1.13.9.1. Пересмотр методологии денежной статистики

Эти два фактора потребовали ревизии методологии денежной статистики, существующей до настоящего времени. Такой пересмотр осуществлялся в два этапа.

1.13.9.1.1. Первый этап (1985 - 1986)

Он включает два направления:

— первый пересмотр номенклатуры финансовых институтов, последовавший в соответствии с законом о банках от 24 января 1984 г., учитывал стремление к упрощению деятельности различных институтов; новая номенклатура имела целью сгруппировать организации в зависимости от того, имеют ли они монетарный характер или

нет: категория организаций, занятых банковским кредитом, включала, помимо обычных банков и Банка Франции, Депозитную кассу, сберегательные кассы, финансовые общества и несколько специализированных финансовых институтов, деятельность которых была близка к деятельности банков. Отдельно были сгруппированы кредитные небанковские организации (E.C.N.B., специализированные небанковские финансовые институты), другие финансовые небанковские институты, а также организации с коллективными вкладами в движимое имущество.

В начале 1986 г. была проведена реформа денежных агрегатов.

Пересмотр номенклатуры финансовых институтов, прежде всего, должен логически привести к ревизии институциональных критериев, которые до этого момента управляли распределением денежных активов; точнее говоря, дальнейшее разделение между размещением капитала в зависимости от того, осуществлялось ли оно банковскими институтами ("квази-деньги", обозначаемые M2R-M1R) или сберегательными кассами (M3R-M2R) не имело смысла, поскольку сберегательные кассы, так же как и банки, были интегрированы в категорию организаций, занимающихся банковскими кредитами.

Более глубокий анализ показал, что развитие в области финансовых инноваций, начиная с 1981 г., уже не позволяло придерживаться относительно простых принципов, на которых базировалось само определение денег (активы, управляемые финансовыми институтами, легко конвертируемые в средства платежа, без риска потери капитала и без выплат из кассовой наличности нефинансового юридического субъекта).

Развитие организаций коллективного размещения капитала в *движимое имущество (O.P.C.V.M.)*, специализирующихся в приобретении прав под переменный процент или процент близкий по срокам платежей, наименьшая продолжительность которого составляет несколько дней, и который характеризуется небольшим риском для капитала (депозитные сертификаты, казначейские билеты, коммерческие боны государственного казначейства, боны финансовых акционерных обществ и специализированных финансовых институтов) заставили французский национальный Банк принять определение денег, отправляясь главным образом от реального поведения владельцев финансовых активов.

1.13.9.1.2. Второй этап (1987 г.)

Реформы 1987 г. были нацелены на продолжение реформ, принятых в 1986 г. с учетом необходимости движения в области финансовых инноваций и упрощения финансовой системы.

Сближение условий деятельности различных специализированных финансовых институтов (I.F.S.), предоставленное им право выпускать боны, строки которых отныне одинаковы со сроками других ценных рыночных бумаг (от 10 дней до 7 лет) и, как следствие, введение для большинства из них обязательных резервов, делали неоправданным сохранение категории организаций, занимающихся небанковскими кредитами. Поэтому, начиная с 1 января 1987 г., все финансовые институты, за исключением O.P.C.V.M, были собраны в единую группу кредитных организаций (E.S.). Такая ревизия номенклатуры финансовых институтов в конечном счете не оказала серьезного влияния на величину агрегата M3, она привела к тому, что, с одной стороны, в него включаются акции финансового рынка (коммерческие боны), эмитируемые бывшими небанковскими организациями I.F.S. (Национальным кредитом, земельным кредитом Франции, S.D.R), ранее включаемые в агрегат L-M3 и, с другой стороны, прочие виды ликвидных активов, управляемые теми же организациями (в основном вклады до востребования для C.A.E.C.L * земельного кредита и т.д.).

1.13.9.2. Денежные агрегаты

Новое определение агрегатов базируется в большей мере на оценке поведения держателей кассовой наличности и ценных бумаг, чем на характеристике эмитентов.

Денежные агрегаты отныне группируют средства платежа, удерживаемые нефинансовыми юридическими субъектами – резидентами страны и, среди финансовых вкладов включают те из них, которые могут быть легко и быстро трансформированы в средства платежа без существенного риска потери капитала.

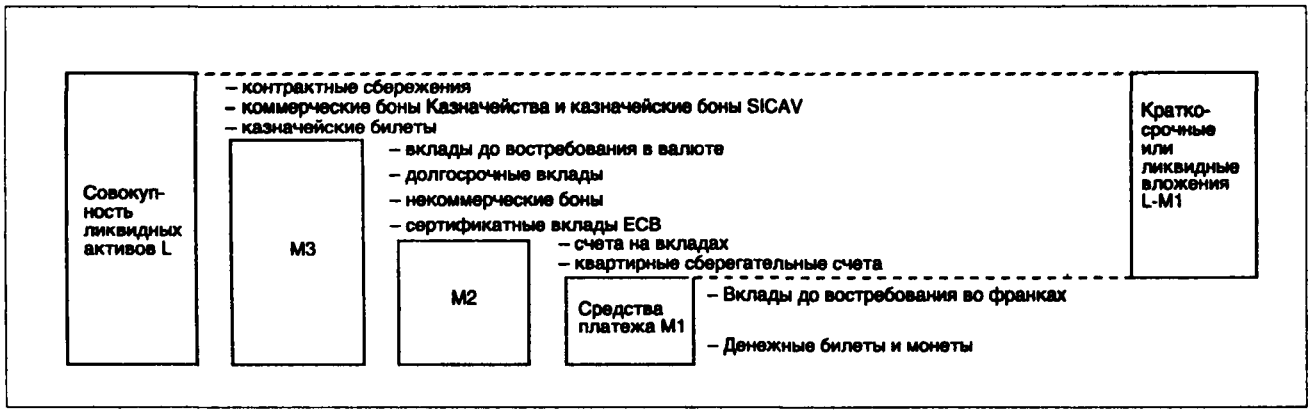
На практике это определение приводит к включению в сумму ликвидности коммерческих инструментов сроком от 10 дней до 7 лет, выпускаемых как кредитными организациями (депозитные сертификаты, боны акционерных финансовых обществ и I.F.S.), так и нефинансовыми субъектами (коммерческие боны государственного казначейства, казначейские билеты). В настоящее время более 80% акций финансового рынка выпускается на срок менее двух лет.

В него также включаются ликвидные активы и акции финансового рынка, принадлежащие группе O.P.C.V.M. в силу принципа прозрачности ее организаций, который обусловливает классификацию их активов в рамках различных агрегатов по аналогии с кредитами предоставляемыми нефинансовыми субъектами.

Кроме того, классификация различных финансовых институтов была реализована таким образом, чтобы собрать в однородные подгруппы легко заменяемые финансовые средства. Денежные агрегаты, от самых узких до наиболее широких, определяются путем последовательной интеграции финансовых средств:

— агрегат M1 группирует все платежные средства, выпускаемые или управляемые кредитными институтами, центрами почтовых чеков и Государственным казначейством:
  · денежные билеты,
— разменные деньги,
  · вклады до востребования во франках, включая вклады коллективного размещения капитала в движимое имущество;
— агрегат M2, помимо агрегата M1, включает совокупность вложений до востребования с процентами, выплачиваемыми во франках, управляемых кредитными организациями и государственным Казначейством, которые не могут быть мобилизованы путем выпуска чеков:
  · сберегательные книжки категории A и голубые книжки взаимного кредита,
  · сберегательные книжки категории B и обычные банковские книжки,
  · Codevi,

* Касса помощи в приобретении оборудования для местных организаций.



Денежные агрегаты
**ECB – институты банковских кредитов.*

- народные сберегательные книжки,
- сберегательные счета на жилищные нужды.

Следовательно, этот агрегат группирует активы, непосредственно связанные со сделками на товары и услуги, т.е. активы, которые имеются под рукой с учетом выплаты процентов и без них;

— агрегат M3 помимо M2 включает:
- все вклады в иностранной валюте (вклады до востребования, другие вклады и ценные бумаги финансового рынка)
- долгосрочные вложения некоммерческого характера, выпускаемые или регулируемые кредитными институтами и государственным Казначейством:
  - долгосрочные вклады: обычные долгосрочные счета, включая счета O.P.C.V.M. и долгосрочные операции с ценными бумагами: вознаграждаемые (продажа кредитными институтами ценных бумаг нефинансовым юридическим субъектам или организации O.P.C.V.M. с правом повторной покупки) и продажи с обязательством повторной покупки и субсидий,
  - кассовые и сберегательные боны (боны банков и финансовых акционерных обществ; боны Sarefi и C.D.C.; специальные боны Казначейства и боны P.T.T.),
- ценные бумаги финансового рынка, выпущенные кредитными институтами при условии что их держат нефинансовые юридические субъекты и O.P.C.V.M.:
  - сертификатные вклады, выпущенные банками,
  - боны, выпущенные финансовыми акционерными обществами,
  - боны и другие ценные бумаги финансового рынка, выпущенные специализированными финансовыми институтами или аналогичными организациями;

— агрегат L помимо агрегата M3 включает:
- в первую очередь, контрактные сбережения, регулируемые кредитными институтами:
  - плановые сбережения на жилье,
  - контрактные сбережения в акционерных обществах долгосрочного кредита,
  - сберегательные книжки предприятий;

эти вложения в любой момент могут быть трансформированы в платежные средства, но их досрочная конверсия вызовет у держателей активов значительные потери процентов и прав на кредит, поэтому на практике их стабильность очень высокая;
- во вторую очередь, ценные бумаги финансового рынка, выпускаемые государственным Казначейством и предприятиями и приобретаемые населением:
  - коммерческие боны государственного Казначейства,
  - казначейские билеты.

В целом, реформа денежных агрегатов расширяет понятие управления ликвидностью и учитывает то обстоятельство, что финансовые коммерческие активы, выпускаемые нефинансовыми юридическими субъектами (предприятиями или государственным Казначейством), могут рассматриваться их держателями в качестве активов, выпускаемых или управляемых кредитными институтами (сертификатные вклады, боны финансовых акционерных обществ и IFS), учитывая при этом специфичность последних (банковских доходов), предложение которых не ограничено и которые попадают в группу M3.

1.13.9.3. Кредит. Процентная ставка

Процентная ставка – это цена, выплачиваемая должником за право получить у заимодавца в свое распоряжение некоторую сумму денег на обусловленный срок. Процентная ставка обычно выражается в виде отношения между суммой годовых процентов и суммой задолженности.

Для заимодавца ссуда означает отказ от использования ликвидности, что ограничивает его возможности:

— покрывать текущие расходы,

— защитить себя против риска будущих периодов,

— использовать другие финансовые возможности заставить "работать свои деньги", что могло бы оказаться более выгодной альтернативой.

В соответствии с классическими представлениями, норма процента должна обеспечить равновесие между спросом и предложением капитала. Следовательно, она имеет характер индикатора дефицитности ресурсов, поскольку доход сберегается лишь частично, и предложение капиталов неизбежно ограничено.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

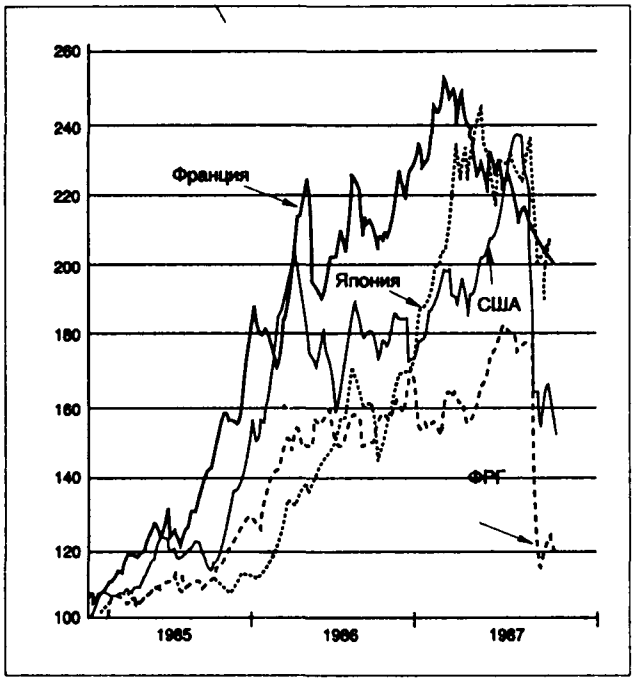
Характер операций	1986				1987			
	1-ый квартал	2-ой квартал	3-ий квартал	4-ый квартал	1-ый квартал	2-ой квартал	3-ий квартал	4-ый квартал
A. Кредиты предприятиям								
Привлечение коммерческих кредитов (2)	11,70 до 17,20	10,70 до 16,10	10,65 до 15,95	10,65 до 15,90	→	→	→	→
Финансовые краткосрочные кредиты (2) и (3)	11,70 до 15,10	10,70 до 14,10	10,65 до 14,05	→	→	→	→	→
Среднесрочные кредиты от 3 до 7 лет (2) и (3)	11,00 до 14,70	10,00 до 13,60	9,95 до 13,45	→	→	→	→	→
Покрытия и авансы (4)	12,15 до 18,00	11,15 до 17,00	11,10 до 16,95	11,10 до 16,90	11,10 до 16,80	→	→	→
Финансирование продаж промышленного оборудования в рассрочку (2) и (3)	13,00 до 23,50	12,00 до 21,00	12,00 до 18,25	→	→	→	→	12,50 до 18,25
B. Кредиты частным лицам								
Ссуды индивидуальным лицам	16,50 до 23,40	14,90 до 23,40	14,00 до 18,25	13,80 до 18,25	→	→	→	→
Финансирование продаж предметов потребления в рассрочку (5)	18,40 до 23,40	16,90 до 23,40	14,50 до 18,25	→	14,00 до 18,25	→	→	→
C. Кредиты под недвижимость								
Кредиты на получателя (2), (3) и (6)	11,40 до 18,00	10,70 до 17,50	10,20 до 17,00	10,10 до 17,00	9,90 до 17,00	→	→	10,10 до 17,00

(1) Годовая ставка без учета налогов на конец периода. Для всех заявленных кредитов банки, кроме того, взимают комиссионные от 1 до 2% в год. (2) Эти процентные ставки согласуются с кредитами, выделяемыми Банком Франции. Не мобилизованные кредиты учитываются по ставке, превышающей указанную на 1 - 2%. (3) Не включается стоимость гарантий, которые могут сопровождать эти кредиты (4). К этим ставкам добавляются комиссионные на наибольшую месячную величину обеспечения: от 1/20% до 1/10% в месяц. Эти комиссионные, взимаемые поквартально, обычно не превышают половины дебиторских процентов, приходящихся на тот же период. (5) К нему добавляются фиксированные отчисления, которые имеет право взимать кредитный институт, и сумма которых установлена постановлением от 16 июня 1975 г. (6) Разница в значениях вышеприведенных процентных ставок охватывает обычные среднесрочные кредиты, ожидаемые кредиты и отдельные кредиты на рынке недвижимости.

Диапазон изменения фактических значений процентных ставок (1), практикуемых для кредитных операций банками и финансовыми институтами.
Источник: Официальная газета. *Единица: % в год.*

1.13.9.4. Финансовый рынок

См. рисунок напротив и стр. 242 - 243

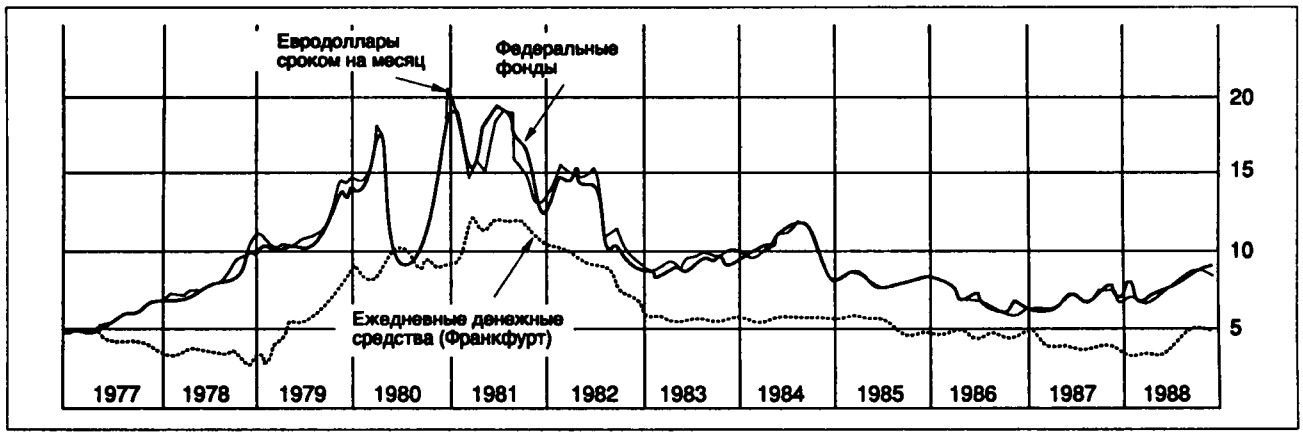


Изменение биржевых индексов в четырех финансовых центрах (курс на среду, базовое значение 100 на первую среду января 1985 г., данные еженедельника). Париж: общий индекс CAC, Нью-Йорк: Доу-Джонса, Токио: общий индекс, Дюссельдорф: индекс коммерческого банка

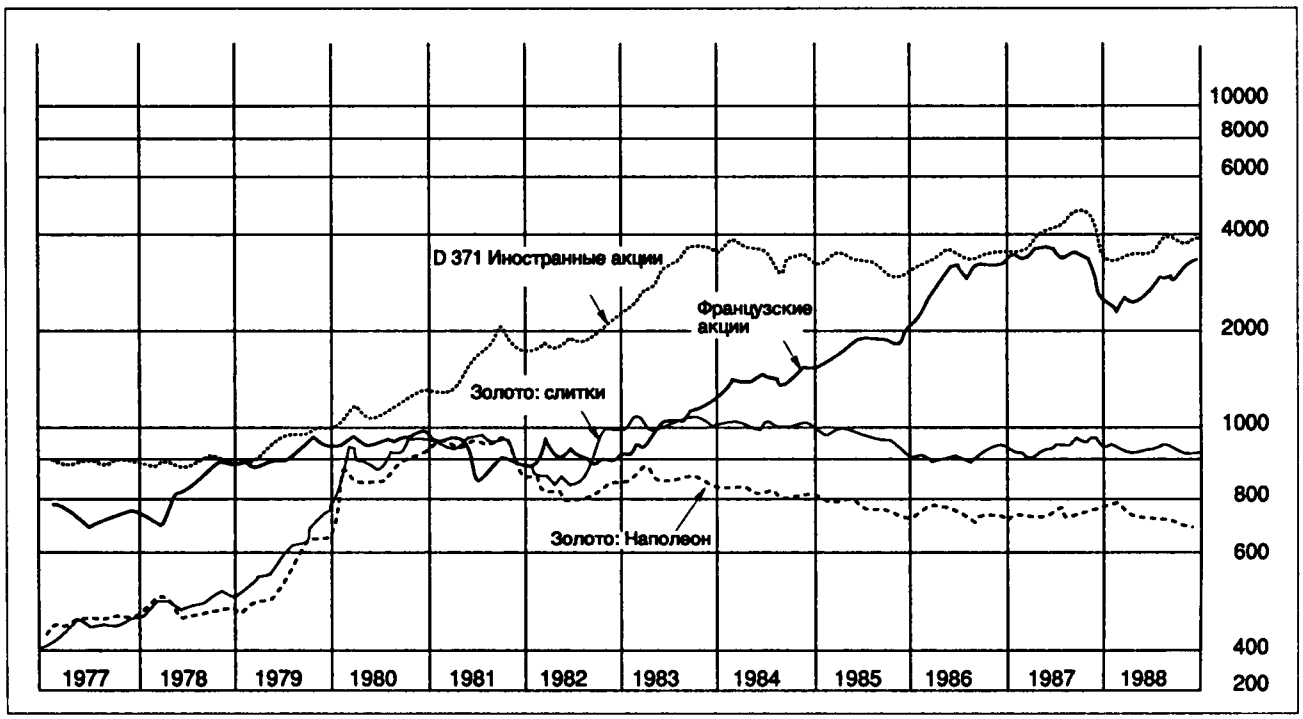
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



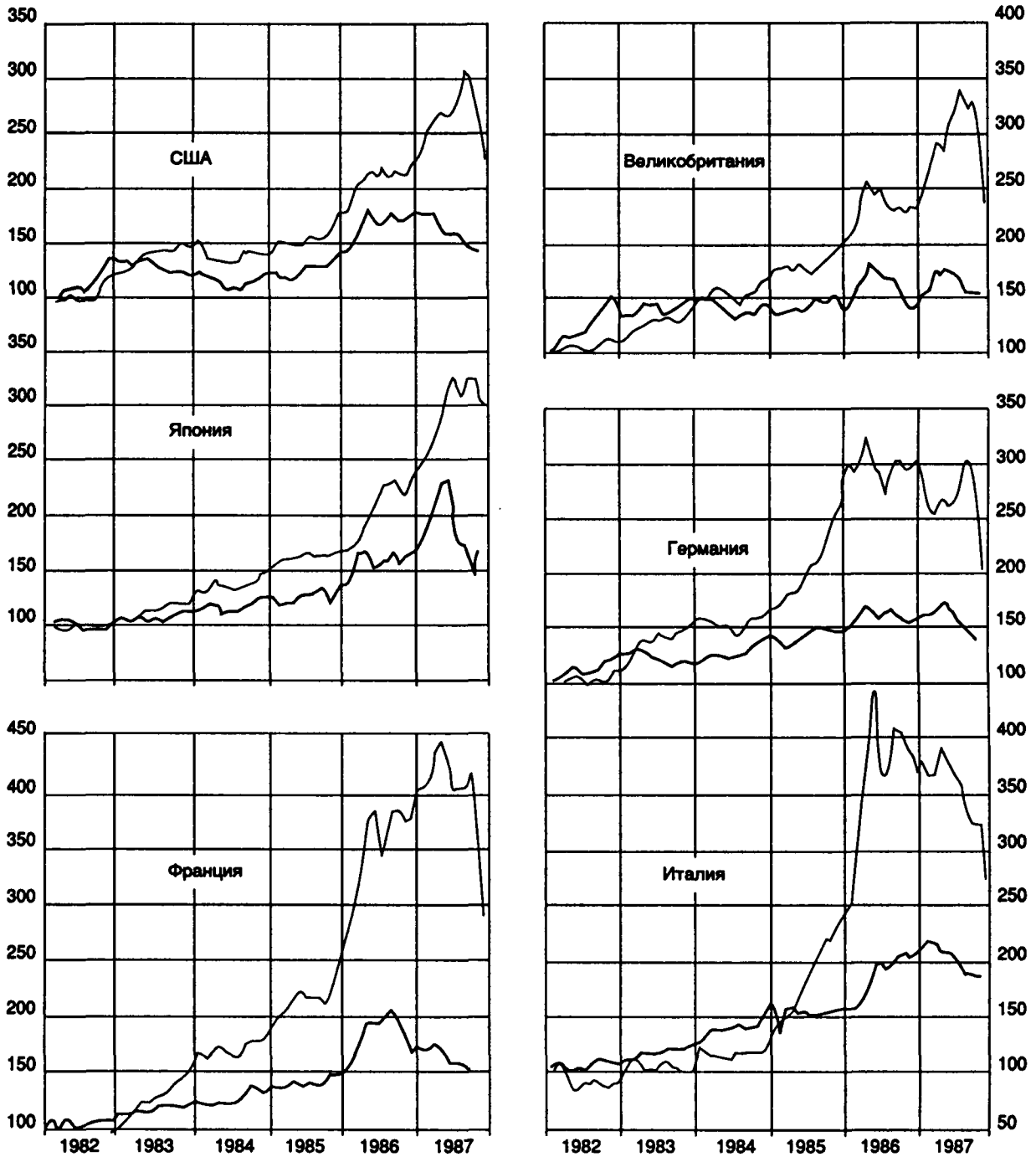
Деньги по краткосрочным вкладам: ставки для Франции (источник: Банк Франции, Национальный Совет по кредиту).
** Ставка в %. С января 1987 г. указанная ставка является ставкой PIBOR (месячной ставкой на межбанковском рынке капиталов).*

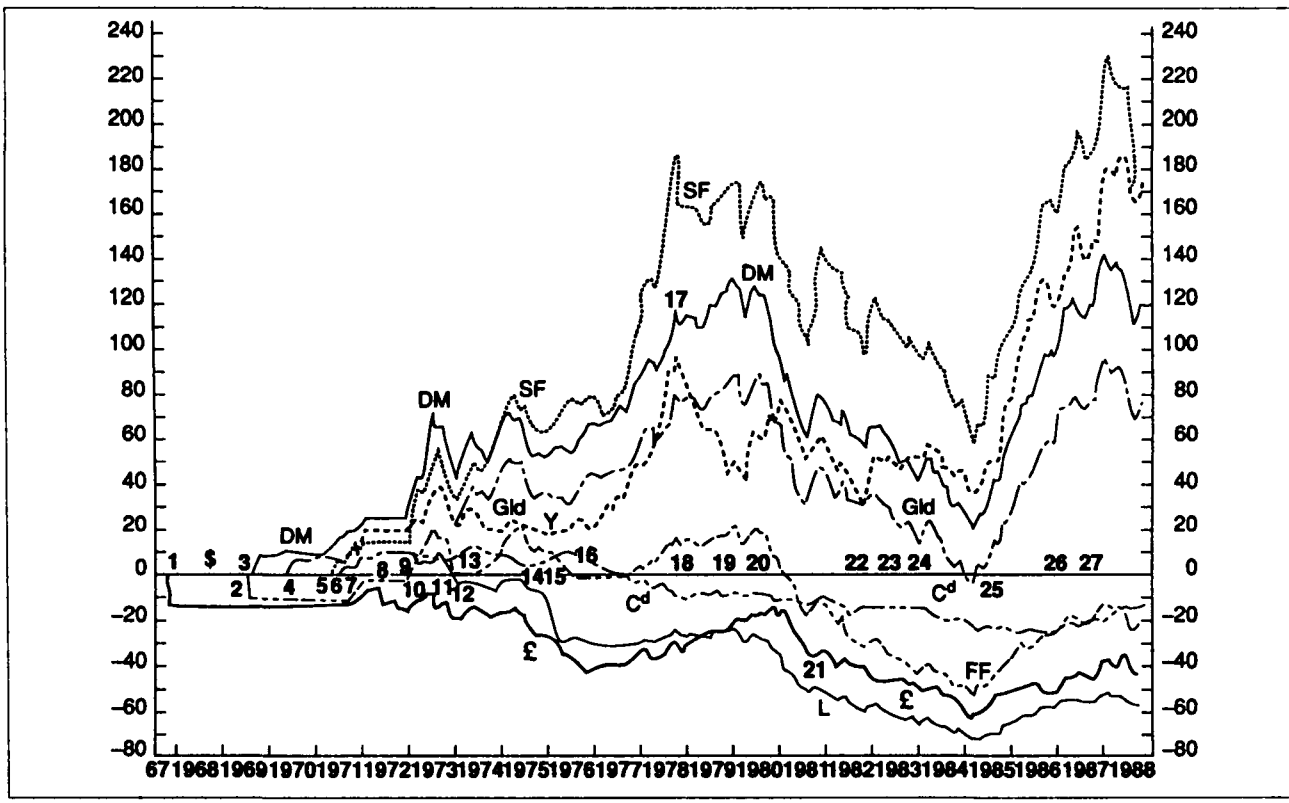


Краткосрочные денежные вложения: ставка по зарубежным странам. Источник: A.G.E.F.I. и O.C.D.E., ставка в %.



Курсы на парижской бирже. (Источник агенство по обмену и I.N.S.E.E.) Золото: во франках за 10 г (слитки), во франках за ед. (Наполеон). Акции: 100 в 1949 г.


США
Япония
Франция
Великобритания
Германия
Италия
1982
1983
1984
1985
1986
1987



1.13.10. Словарь экономических терминов

Амортизация

Амортизация является бухгалтерским и налоговым понятием. Она заключается в отражении в бухгалтерской отчетности потери стоимости основных производственных фондов. Следует различать снижение стоимости вследствие износа основных производственных фондов (собственно амортизация) и выплату процентов, связанных с величиной остаточной стоимости и способом финансирования основных фондов. Основные правила налоговой амортизации сводятся к следующему:

1) Бухгалтерская амортизация имеет целью отразить в бухгалтерском балансе предприятий обесценивание инвестиций. Ее расчет подчиняется определенным правилам, учет которых обязателен.
2) Инвестиции должны соответствовать основным производственным фондам, т.е. объектам недвижимого и движимого имущества, которые обычно предназначены для продажи.
3) Точкой отсчета является дата начала использования производственных фондов.
4) Амортизация должна рассчитываться на базе себестоимости основных фондов исключая налоги:
   а) для объектов недвижимости, – только по зданиям без учета стоимости земли и расходов на приобретение,
   б) для оборудования включая дополнительные расходы – с учетом стоимости транспорта, таможенных пошлин, монтажа и установки.
5) Общепринятым методом расчета амортизационных отчислений является метод "линейного погашения". Он состоит в ежегодном учете амортизации, равной отношению себестоимости приобретения основных фондов к периоду амортизации.
6) В качестве примера приведем следующие общепринятые сроки амортизации:

— административные или торговые здания: 25 лет (или 33 1/3 года),
— производственные здания: 20 лет,
— производственное оборудование: в среднем 10 лет (для некоторых видов оборудования – от 5 до 8 лет, если их износ относительно быстрый и если существует риск их быстрого морального старения, как например, для вычислительного оборудования, стоимость которого обычно погашается за 5 лет),
— газотранспортные сети: от 25 до 30 лет.

С налоговых позиций начисление амортизации приводит к снижению налогов на прибыль акционерных обществ. В связи с этим налоговая администрация следит за тем, чтобы соблюдались минимальные сроки амортизации. Вместо нее во Франции разрешено применять так называемую дегрессивную амортизацию для различного рода инвестиций, которые государство хотело бы стимулировать. В этом случае размер амортизационных отчислений больший в начальные, чем в последующие годы. Такая практика применяется, например, для капиталовложений, направляемых на энергосбережение. Для некоторых видов капиталовложений (в исследования и разработки) можно использовать "прогрессивную" амортизацию: она позволяет отсрочить основную часть амортизационных отчислений до тех пор, пока не начнут поступать доходы, ожидаемые от реализации капиталовложений.

Такой подход позволяет избежать дефицита, отражаемого в эксплуатационных счетах до тех

пор, пока инвестиции не обеспечат соответствующих поступлений.

На величину амортизации оказывает влияние инфляция. Например, в случае линейной амортизации погашаемые суммы постоянны в текущих денежных единицах, так же как неизменно снижение величины налогооблагаемой прибыли. Следовательно, в постоянных ценах эти суммы уменьшаются. Это же обстоятельство является причиной того, что суммы амортизационных отчислений в постоянных ценах меньше первоначальной стоимости инвестиций. Отсюда следует, что бухгалтерская амортизация не пригодна для экономических расчетов.

Экономическая амортизация

Это понятие используется для упрощенных расчетов экономической себестоимости, однако, имеет тот недостаток, что маскирует реальные финансовые потоки, в особенности, если последние существенно изменяются во времени.

Метод расчета "экономической амортизации" для инвестиций I заключается в определении годовой постоянной суммы амортизационных отчислений ("аннуитета") A, на которую обычно накладывается условие постоянства во времени, в неизменных денежных единицах. Выбрав норму дисконтирования i и продолжительность срока службы основных фондов, n величину аннуитета A можно рассчитать по следующей формуле:

$$I = A\sum_{k=1}^{k=n}\frac{1}{(1+i)^k}, \quad \text{отсюда} \quad A = \frac{I i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}.$$

Экономическая амортизация может использоваться для быстрой оценки прошлой или будущей экономической себестоимости при условии, что надлежащим образом выбран норматив дисконтирования.

Когда речь идет о прошедшем периоде, этот норматив в принципе должен быть равным средней норме рентабельности, которую имели бы инвестиции, если бы они вкладывались в альтернативные проекты: в действительности речь идет об оценке текущего экономического эффекта, получаемого от прошлых капиталовложений, т.е. оценки того, какой была бы экономическая ситуация, если бы эти инвестиции не были осуществлены. Напротив, при рассмотрении будущих периодов с целью учета не только будущей рентабельности, но и текущих финансовых ограничений можно использовать норматив дисконтирования, превышающий величину ожидаемой рентабельности; и если это невозможно сделать иными средствами, то учесть увеличение ожидаемого риска.

Расчет ежегодной величины экономической амортизации идентичен расчету годовых сумм погашения кредита при условии, что величина этого аннуитета постоянна. Возможно также рассчитать величину экономической амортизации с переменными значениями аннуитета A_k; при этом предполагается, что совокупность величин A_k может быть определена.

Метод экономической амортизации исключает необходимость учета процентов за кредит.

Потенциал самофинансирования

Потенциал самофинансирования – бухгалтерское понятие, четко определенное в "Генеральном бухгалтерском плане" и одобренное постановлением министра экономики и финансов от 27 апреля 1982 г. Этому определению следует отдавать предпочтение в сравнении с ранее использованными терминами, такими как "самофинансирование", "валовая маржа самофинансирования", "поток наличности"; следует заметить, что эти термины уже не фигурируют в указателе "Генерального бухгалтерского плана".

Определение и способ расчета потенциала самофинансирования приводятся ниже.

— Определение

Потенциал самофинансирования равен чистой прибыли за балансовый год за вычетом налогов, к которой прибавляются амортизационные отчисления и резервы на воспроизводство за вычетом прибыли от дотаций на приобретение оборудования и скорректированной (с плюсом или минусом) на операции продажи основных фондов. Он представляет собой финансовые ресурсы, обеспечиваемые в результате нормальной производственной деятельности предприятия и используемые для самофинансирования.

— Способ формирования Генерального бухгалтерского плана на 1982 г.

Валовая прибыль (или валовые потери) = сальдо эксплуатационных операций, непосредственно связанных с производством, т.е. доходы от производственной деятельности за вычетом текущих расходов (на закупку сырья материалов и сторонние услуги, налогов, затрат на оплату труда)	
Трансферт эксплуатационных расходов	+
Прочие виды поступлений от хозяйственной деятельности	+
Прочие эксплуатационные расходы	–
Получаемые проценты	+
Исключая резервы	–
Выплачиваемые проценты	–
Исключая резервы на амортизацию и финансовые резервы	+
Незапланированная прибыль	+
Кроме прибыли от продажи иммобильных активов	–
Соответствующая доля дотаций к инвестициям, относимая на результаты деятельности	–
на непредвидимые резервы	–
Непредвидимые затраты	–
За вычетом прибыли от продажи основных фондов	+
амортизационных отчислений и резервов на непредвидимые расходы	+
Налоги на прибыль	–
Потенциал самофинансирования	=

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Понятия "валовая эксплуатационная прибыль" и "потенциал самофинансирования" часто используются в расчетах, связанных с управлением финансами.

Движение денежной наличности (cash-flow)

Этот английский термин используется также во французской экономике и нередко это делается некорректно. Термин cash-flow обозначает разницу между денежными поступлениями и денежными выплатами, то есть стоимостями кассовой наличности (упакованной) и стоимостью денег, взятых из кассы; итак, необходимо рассматривать денежные потоки, соответствующие кассовым, а не бухгалтерским операциям.

Если производится долгосрочный расчет кассовой наличности, то величина cash-flow должна дисконтироваться; в таком случае она приближается к понятию дисконтированной прибыли.

Иногда ошибочно cash-flow отождествляется с понятием потенциала самофинансирования или близким к нему понятиям. Такая трактовка этого термина неоправданна.

Затраты

Затраты на проведение некоторой операции (закупка или производство товаров или услуг) для данного субъекта (покупателя, производителя или общества) можно определить как разницу между параметрами, определяющими финансовую ситуацию этого субъекта в случае реализации и отказа от этой операции. Следует сделать несколько замечаний, которые характеризуют трудности использования этого понятия:

— любая операция связана с определенными воздействиями на окружающую среду, сколь бы незначительными они ни были. Поэтому выражение затрат может носить лишь оценочный характер; такая оценка тем более надежна, чем полнее и точнее учтены существенные изменения различных параметров, определяющих ситуацию субъекта, обусловленные операцией, с которой связаны данные затраты,
— любая операция оказывает влияние на величину параметров различного характера (экономического, социального, энергетического) и поэтому затраты на ее осуществление обычно невозможно выразить одной единственной цифрой. Отсюда следует, что существуют социальные, экономические, энергетические и прочие затраты,
— в любой ситуации имеет место неопределенность, поскольку необходимо сделать предположения либо в отношении прошлого, которые отличаются от реальных событий (апостериорные затраты), либо в отношении будущего (априорные затраты). К тому же последствия одной операции распределены во времени, в связи с чем возникают трудности агрегирования операции,
— рассуждения о затратах на операцию без уточнения субъекта, который ее осуществляет, приводят к неоднозначным оценкам.

Использование понятия затраты обычно ограничивается оценкой изложения лишь экономических, бухгалтерских или финансовых параметров. В таком случае понятие затрат на производство операции совпадает с понятием себестоимости продукции или услуг. При этом возникают упомянутые выше трудности и необходимо помнить, что данная операция вносит изменения в отношении других параметров.

Суммарные (совокупные) затраты на производство продукции складываются из:

— постоянных издержек, независимо от числа произведенных единиц (арендная плата за помещение, страховые взносы, налоги, амортизационные отчисления, часть зарплаты и т.д.),
— переменных издержек, меняющихся в зависимости от числа произведенных единиц продукции (закупка сырья, транспортные расходы, часть зарплат и т.д.).

Средние затраты получаются делением суммарных издержек на количество произведенной продукции.

Предельные (маржинальные) затраты – это издержки на производство последней единицы продукции. Они рассчитываются путем деления прироста затрат на увеличение выпуска продукции.

Затраты развития рассчитываются путем деления суммарных дисконтированных затрат на прирост продукции на дисконтированную величину дополнительной продукции.

Различают бухгалтерские затраты, которые регистрируют издержки и распределяют накладные расходы и проценты за кредит по всей выпускаемой продукции, и экономические затраты, предназначенные для выбора решений, учитывающих способ формирования этих затрат.

Для того, чтобы учесть распределение затрат во времени, используется понятие дисконтированные затраты.

Эластичность

Эластичность e переменной *y* относительно переменной *x* определяется делением относительного изменения параметра y на отрицательное изменение параметра *x*; она записывается в виде:

$$e = \frac{\dfrac{dy}{y}}{\dfrac{dx}{x}}$$

Обычно используется эластичность потребления по доходу, эластичность спроса по ценам, эластичность импорта по объемам производства.

Приведем пример расчета эластичности потребления семьей продовольствия по отношению к ее доходу.

Предположим, что рассматриваемая семья имеет первоначальный доход в размере 10 000 франков в месяц и что при этих условиях расходы на продовольствие составляют 3 000 франков.

Представим, что месячный доход увеличивается на 1 000 франков и что расходы на продовольствие составят 3 600 франков. Тогда эластичность потребления продовольствия по доходу составит:

$$\frac{\dfrac{3\,600 - 3\,000}{3\,000}}{\dfrac{11\,000 - 10\,000}{10\,000}} = 2$$

Если эластичность параметра *y* по отношению к параметру *x* слабая, то величину *y* называют негибкой или неэластичной по отношению к величине *x*.

Расчеты в постоянных денежных единицах

Если бы не было инфляции, средняя арифметическая цен была бы стабильной, и стоимость франка, выражаемая его покупательной способностью, не зависела бы от момента его обмена. С целью разделения чисто монетарных проблем и проблем, связанных с ценами часто в экономических расчетах рассуждения обычно ведут в "постоянных франках", то есть исключают эффекты инфляции.

Расчеты в постоянных франках не означают, что они ведутся в "постоянных ценах". В действи-

тельности может иметь место относительное движение во времени цен на некоторые продукты в постоянных франках по вполне объяснимым причинам (повышение производительности или, наоборот, рост покупательной способности зарплаты), что влечет за собой относительные изменения (или отклонения) цены на эти продукты по отношению к средней величине цен.

В расчетах с постоянными денежными единицами необходимо обычно уточнить дату, на которую определяется стоимость денежной единицы: тем самым можно говорить, например, о цене товара в *n* году, измеренной во франках нулевого года.

Расчеты в текущих денежных единицах

Вследствие инфляции стоимость франка в соответствии с его покупательной способностью уменьшается во времени. В этих условиях невозможно считать стоимость денежной единицы постоянной во времени, если в процессе анализа необходимо использовать реальные рыночные цены, учитывающие инфляцию, то следует уточнить, что они выражены в текущих франках.

Изменение стоимости денежной единицы может быть корректно оценено, исходя из изменения индекса, имеющего глобальный характер, такого, например, как индекс цен валового внутреннего продукта. Если обозначить через:

— P_n – цену рассматриваемого товара в году *n*, выраженную в постоянных франках нулевого года, принятого в качестве базового,
— Q_n – цену этого товара в году *n*, выраженную в текущих франках *n*-го года,
— I_0 – величину выбранного в нулевом году индекса для характеристики изменения текущей стоимости франка, то получим:

$$P_n = Q_n \frac{I_0}{I_n}.$$

В таком случае среднегодовой темп инфляции за рассматриваемый период времени определится в процентах, исходя из следующего выражения:

$$Q_n = P_n\left(1 + \frac{t}{100}\right)^n,$$

где:

$$t = 100\left[\left(\frac{I_n}{I_0}\right)^{1/n} - 1\right].$$

Инфляция

Инфляция – это сложный феномен, характеризующийся дифференциальным и кумулятивным повышением цен и соответствующим обесцениванием денег:

— дифференциальное повышение оказывает влияние на отношения товарообмена
— кумулятивное повышение базируется на макропроцессах, запускающих механизмы взаимозависимости между различными сферами деятельности и разными факторами экономики. Так, повышение цен на некоторые товары отражается на стоимости и, следовательно, на ценах других товаров. Этот феномен, автоматически поддерживающийся в течение определенного промежутка времени, является динамическим процессом.

К настоящему времени отмечено, что инфляция может существовать в процветающей экономике, а также в ситуации экономического спада. Это привело к различию (в зависимости от условий) между "инфляцией роста" и "инфляцией кризиса".

По поводу причин инфляции нет единого мнения. Можно привести несколько объяснений.

— Рост цен под давлением спроса

Расширение спроса, повышающего возможности предложения, приводит к росту цен. Это чрезмерное увеличение спроса может исходить от физических или юридических лиц (например, из-за роста доходов) или от Государства (например, из-за бюджетного дефицита).

— Рост цен, обусловленный издержками производства

Согласно этой теории, причина повышения цен кроется в производстве, а вовсе не в чрезмерном спросе. В наиболее распространенной форме эта теория (возникшая в 50-е годы) указывает на решающую роль в возникновении инфляции роста зарплаты сверх роста производительности труда.

— Инфляция, обусловленная структурными факторами

Причина инфляции объясняется устойчивыми структурными факторами. Такое объяснение следует двум направлениям, базирующимся на:

- понятии "узких мест" (относительной нехватки некоторых видов оборудования и некоторых категорий рабочей силы)
- противоречиях, проистекающих из борьбы за собственность над средствами производства. В условиях инфляции распределение дохода смещается в пользу тех, кто больше инвестирует.

Последствия инфляции могут быть разнообразны; назовём некоторые из них:

- возникновение напряжённости между физическими и моральными субъектами; обладатели фиксированных доходов оказываются ущемлёнными, в то время как получатели кредитов с постоянной процентной ставкой, а также продавцы, способные повысить цены на свою продукцию если они предвидят ожидаемый общий рост цен, оказываются в выигрышном положении.
- ослабление валюты может происходить вплоть до её девальвации, что оказывает прямое влияние на внешнеторговый обмен (губительный для импорта, благоприятный для экспорта – разумеется, до определённых пределов).
- рост предупредительных мер, принимаемых с тем, чтобы избежать неблагоприятные последствия (формулы индексации и т.п.) со всеми проистекающими отсюда сложностями и последствиями.
- отрицательное влияние на бухгалтерские данные, связанное со сложением франков различной реальной стоимости (производственные фонды или запасы)

Совершенный рынок (или совершенная конкуренция)

В XIX и начале XX века в теории рынка и цен рассматривались две ситуации: совершенного рынка (или совершенной конкуренции) и монопольного рынка. Классическая экономическая школа формирования цен для совершенного рынка.

Совершенный рынок характеризуется четырьмя основными свойствами:

— атомистическим характером рынка:

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как со стороны предложения, так и со стороны спроса существует большое число субъектов экономической деятельности, при этом ни один из них не в состоянии оказывать влияние на рынок давление, достаточное для изменения цен реализации продукции

— свободный доступ к производству

Любой субъект, имеющий намерение вести производственную деятельность, может это делать без всяких ограничений. Производственные фирмы, образующие отрасль, не могут противиться появлению новых конкурентов; последние могут свободно приобретать необходимые производственные ресурсы.

— абсолютная @прозрачность@ рынка:

все участники рынка обладают полной информацией о всех существующих его характеристиках.

— Совершенная мобильность рынка:

Между отраслями существует совершенная свобода перераспределения производственных ресурсов так же, как и между отраслями и потребителями их продукции; коммерческие операции осуществляются абсолютно беспрепятственно, так что операции по купле-продаже совершаются незамедлительно и без ограничений.

Эти четыре условия определяют совершенный рынок, который свободен от всякого рода монопольных элементов.

Основная идея, относящаяся к определению совершенного рынка, заключается в том, что в условиях полной конкуренции экономика функционирует с наибольшей эффективностью.

Классическая модель совершенного рынка в общих чертах могла бы соответствовать экономике XIX века, для которого характерны небольшие капиталистические предприятия.

В настоящее время феномен экономической концентрации имеет тенденцию к замене большого числа небольших фирм на ограниченное число более мощных фирм. Эти крупные фирмы нуждаются в большом капитале и развитых отношениях с банками; они осуществляют крупные инвестиционные проекты, проводят научно-исследовательские работы и используют достижения научно-технического прогресса.

В условиях современной экономики понятие совершенного рынка все менее соответствует реальным процессам в экономике с тем, чтобы его можно было использовать для описания идеального состояния, которое некоторые исследователи по-прежнему рассматривают в качестве нормативного.

Цены

Ценой называют денежную стоимость, на которую обменивается товар, услуги или кредиты. В последнем случае цена кредита представляет собой сумму выплачиваемых процентов. Следовательно, цена отличается от затрат, которые являются суммой расходов в процессе производства.

В теории совершенного рынка цена выводится из состояния равновесия. Она устанавливается на таком уровне, при котором спрос и предложение одинаковы. Тогда следует предположить, что с ростом цен предложение увеличивается, а спрос падает. Согласно этой теории:

— рыночная цена равна предельным производственным затратам,

— рыночная цена обеспечивает оптимальное распределение производства для общества.

В реальной рыночной экономике установление цен происходит в результате более сложных процессов адаптации между спросом и предложением. Нередко отмечается свойство "истинных" цен, подразумевая при этом, что они отражают реальные затраты и что действительность достаточно близка к модели совершенного рынка.

Производительность

Производительность представляет собой отношение между полученной продукцией и используемыми для этой цели ресурсами, которые называют факторами производства.

Производительность именуется интегральной (или общей), если учитывается вся совокупность производственных факторов. Оценка общей производительности затруднительна, но она может представлять хороший способ для оценки эффективности предприятия.

Часто предпочитают рассчитывать производительность какого-либо одного фактора: например, труда или капитала. Тогда в числителе фигурирует стоимость выпуска продукции, а в знаменателе – количество израсходованного ресурса.

Например, рост производительности может быть достигнут за счет использования большего количества работников или за счет увеличения рабочего времени. Однако, если этот рост производства происходит при неизменных общих затратах рабочего времени или их снижении или же меньшем пропорциональном его росте, то имеет место увеличение производительности.

Производительность может изучаться на уровне производственной единицы отрасли и всей национальной экономики. Например, в системе национальных счетов производительность капитала рассчитывается для всей экономики страны, как отношение добавленной стоимости к валовой стоимости производственного капитала (C.F.B.P.), причем обе величины рассчитываются в постоянных ценах данного периода.

Показатель производительности интересен не столько своей абсолютной величиной, сколько с точки зрения его изменения во времени, с тем, чтобы можно было сравнивать эффективность различных экономических субъектов или стран.

Рост производительности все больше зависит от совершенствования техники и технологии производства (инновации, автоматизации и, в общем случае, в процессе замещения труда на капитал), от эффективности управления и общей организации производства.

P.N.B: Валовой национальный продукт

Валовой национальный продукт представляет собой агрегат системы счетов, относящийся к производству.

Этот показатель исходит из национальной принадлежности предприятия и включает то, что производится французскими предприятиями на своей территории, а также за границей. В то же время деятельность иностранных предприятий на национальной территории, как правило, не принимается в расчет.

Рента

Слово рента имеет несколько значений, которые можно сгруппировать в два понятия: одно свойственно разговорному языку, второе – экономическому.

В разговорном языке слово рента обозначает периодически полученный доход как вознаграждение за предоставляемый капитал или фонды, сдаваемые в аренду: рента, получаемая от государства, земельная рента, пожизненная рента;

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

рантье представляет собой лицо, живущее на рентные доходы. Таким образом, в разговорном языке смешивают ренту и плату за пользование имуществом и капиталом, например, арендная плата – это рента за землю, т.е. цена, выплачиваемая за пользование землей.

На экономическом языке слово рента приобрело иное значение, начиная с работ английского экономиста Рикардо (1772 - 1823). Исходя из закона убывающей производительности в сельском хозяйстве и существования конкурентного рынка, на котором в каждый момент продукт имеет единственную цену, Рикардо предполагает, что наиболее плодородные участки, для которых производственные затраты ниже затрат на наихудших участках, обеспечивают ренту. Эта рента не входит в издержки производства, она является лишь следствием существования более высоких издержек производства на менее плодородных землях и этот излишек обязан природным факторам, а не усилиям того, кто получает ренту.

Анализ, предложенный Рикардо, прояснил определение ренты. Поскольку эта рента следует из соотношения спроса и предложения и, в частности, из свойства неэластичности по отношению к цене реализации, то ее существование характерно не только для сельского хозяйства; рента может возникать во всех случаях, когда возможно дополнительное вознаграждение факторов производства.

Если рентные доходы неустойчивы и непродолжительны, то их иногда называют "квази-рентой": они проявляются в неадекватности предложения спросу в течение ограниченных промежутков времени.

Могут наблюдаться и даже создаваться более или менее искусственные ситуации продолжительного дефицита производственного фактора путем договоренности между производителями или продавцами или вследствие существования монополий. В таком случае говорят, что речь идет о структурной или конъюнктурной ренте.

Эквивалентная процентная ставка

Знание процентной ставки, выплачиваемой за номинальную стоимость ссуды, не достаточно для сравнения с другими вариантами займов. Например, для одной и той же номинальной стоимости стоимость эмиссии может быть различной, так же как могут различаться и стоимости возмещения кредита.

Валовая эквивалентная процентная ставка есть норма рентабельности для рассматриваемой ссуды, причем затраты и доходы выражаются в постоянных ценах.

Следовательно, это эквивалентная фиктивная процентная ставка по кредиту, для которой стоимость эмиссии и возмещения равны номинальной стоимости, а процентная ставка постоянна.

Чистая эквивалентная процентная ставка в отличие от валовой учитывает влияние налогообложения, которое меняется в зависимости от опционов и положения каждого налогоплательщика.

Приведем пример расчета эквивалентной процентной ставки:

номинальная стоимость ссуды: 100;

стоимость возмещения в течение 10 лет: 100;

затраты на эмиссию ссуды: 98;

выплата процентов: 10% годовых по истечению периода в течение 10 лет. Эквивалентная процентная ставка определяется из условия:

$$98 = \frac{100}{(1+t)^{10}} + \sum_{k=1}^{k=10} \frac{10}{(1+t)^{k}}$$

отсюда: $t = 10{,}33\%$

Норматив дисконтирования

Норма дисконтирования характеризует выбор между двумя вариантами затрат или потребления, которые будучи одинаковыми в постоянных ценах, реализуются в различные периоды времени.

Норму дисконтирования можно характеризовать с различных позиций:

— С точки зрения потребителей

Для них безразлично использовать эквивалент франка немедленно, или же обладать $(1 + a)$ франками через год; в таком случае норма дисконтирования равна a.

— С точки зрения плановых органов

Норма дисконтирования вытекает как предельная величина для оптимальной программы экономического роста. Для такой нормы дисконта эта программа столь же удовлетворительна, что и программа, которая была бы отвергнута в пределе и которая бы сводилась к снижению (в начале периода) конечного потребления в пользу сбережения и инвестиций таким образом, чтобы в итоге увеличить это конечное потребление. Следовательно, норма дисконтирования – есть инструмент децентрализации решений в том смысле, что в случае, если экономический выбор производится в соответствии с критерием минимальных суммарных дисконтированных затрат, то достигают оптимального использования финансовых возможностей общества.

Норматив дисконтирования, принятый в настоящее время в планировании французской экономики, составляет 9% в постоянных ценах.

— С точки зрения производителей

Норма дисконтирования государственного плана предлагается для использования некоторым национальным предприятиям, таким как Национальная компания по электроэнергетике (EDF), Газовая национальная компания (GDF), потребности финансирования которых составляют значительную часть наличного капитала Франции.

Частные акционерные компании могут использовать нормативы дисконтирования, существенно отличные от государственного. Обычно, с одной стороны, они являются функцией стоимости источников финансирования предприятия (процентных ставок за получаемые кредиты или требуемых нормативов рентабельности акционеров), с другой – риска, связанного с рассматриваемыми инвестициями.

Норма дисконтирования отличается от процентной ставки, которая является рыночной ценой капитала. Для заимодавца и кредитора требуется знать процентные ставки; для лиц, принимающих решения – норму дисконтирования. Тем не менее в теории совершенного рынка капиталов процентная ставка и норма дисконтированы между собой.

Темпы роста

Скорость роста в интервале времени от t_1 до t_2 некоторого экономического показателя E обычно характеризуется темпами или нормой роста, выражение которой в процентах имеет вид:

$$T = 100\frac{\text{Значение показателя E в момент } t_2 - \text{Значение показателя E в момент } t_1}{\text{Значение показателя E в момент } t_1}$$

Величина E выражается:

— либо в натуральных единицах, однако такой измеритель является нормативным лишь в случае, когда речь идет о конкретном продукте со

стабильными характеристиками (например, зерно, конкретная марка автомобилей);
— либо, как это обычно бывает, в стоимостном выражении, когда речь идет об агрегатах (например, валовом национальном продукте) или о продукте, характеристики которого меняются во времени. В таком случае необходимо уточнить, выполняется ли расчет в текущих ценах (расчет "по стоимости") или же, если необходимо учесть инфляцию – в постоянных ценах (расчет "по объему").

Как и любой показатель, темп роста может иметь лишь ограниченное значение, тесно зависимое от определений, принятых для различных рассматриваемых факторов: следовательно, в зависимости от угла зрения, под которым хотят анализировать феномен роста, можно выбрать различные его определения и, тем самым, рассчитать различные показатели темпов роста. Так, например:
— при сравнении величины валового внутреннего продукта различных стран результаты будут существенно различаться в зависимости от того, рассматриваются ли величины, выражаемые в соответствующих национальных валютах или же, с учетом обменного курса, в единой валюте одной страны,
— в случае, когда в результате научно-технического прогресса для отдельных продуктов имеют место значительные изменения объемов производства и цен, можно оценить темпы роста экономики, используя для оценки реализации продукции в моменты t_1 и t_2 одинаковые цены, то есть либо цены периода t_1 (метод Ласпейреса), либо цены периода t_2 (метод Пааша), либо, наконец, среднюю геометрическую этих двух оценок (метод Фишера): в этом случае также рассчитываемые темпы роста могут существенно различаться.

Норма рентабельности (B/I)

В случае, когда общая сумма кредитов, которой располагает предприятие, недостаточна для реализации всех операций, обеспечивающих положительную дисконтированную прибыль, возникает проблема получения максимально возможной дисконтированной прибыли от ограниченного капитала, которыми ежегодно располагает предприятие.

Решение этой задачи заключается в определении отношения дисконтированной прибыли B к инвестиционным расходам I по каждому из проектов. Тогда, отношение B/I или норма рентабельности, используется как критерий ранжирования или выбора проектов для обоснования программы капиталовложений с учетом финансовых ограничений. Использование этого критерия обеспечивает децентрализацию решений, вырабатываемых на верхних уровнях управления предприятием при условии, что они фиксировали значение нормы дисконта и минимальной пороговой нормы рентабельности.

Внутренняя норма рентабельности

Для инвестиций I,обеспечивающих чистый годовой доход R, выраженный в постоянных денежных единицах, норма рентабельности определяется из следующего уравнения:

$$0 = -1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_k}{(1+r)^k}.$$

Эту норму рентабельности r называют также внутренней нормой рентабельности.

Можно считать, что норма рентабельности представляет собой норму дисконта, для которой дисконтированная прибыль равна нулю, заметим, что последняя уменьшается с ростом нормы дисконтирования.

Конкретное содержание показателя r состоит в том, что его можно считать процентной ставкой, по которой в отсутствие инфляции можно брать кредиты для инвестирования, не получая при этом прибыли, но и не подвергаясь потерям: иными словами, внутренняя норма рентабельности – это процентная ставка, для которой капиталовложения представляют собой нейтральную операцию.

Норма рентабельности может представлять собою критерий выбора или стоимости, в соответствии с которым выбирается операция с наибольшей нормой рентабельности. Отметим, что в соответствии с этим критерием не всегда получают тот же порядок ранжирования операции, что и по критерию максимума дисконтированной прибыли.

Процент (темпы) инфляции

Темпы (или норма) инфляции выражает среднее увеличение цен в процентах, обычно для годового интервала времени. Этот показатель не следует путать с нормой дисконтирования.

Поскольку все цены растут неодинаково, то расчет темпов инфляции ставит теоретические и практические трудности, связанные, в частности с определением того, для какой совокупности товаров ее рассчитывать. На практике в основном используются два следующих индекса:
— индекс цен, входящих в состав валового внутреннего продукта (P.I.B),
— индекс цен на предметы потребления.

Срок окупаемости

Показатель срока окупаемости выражает количество лет, в течение которых накопленные годовые доходы или экономия достигнут общей суммы капиталовложений.

Этот критерий особенно интересен в случае, когда срок окупаемости небольшой, т.е. когда влияние колебаний цен сказывается несущественно и проблема возможного дисконтирования не возникает. Тем не менее, если это считают полезным, можно рассчитывать дисконтированный срок окупаемости.

Этот критерий может приводить к классификации операций, отличной от ранжирования по критерию дисконтированной прибыли. Он благоприятствует проектам, которые обеспечивают наибольшие доходы в течение первых лет.

Если необходимо сравнить различные решения для данного конечного результата, то метод срока окупаемости обусловливает выбор базового решения, по отношению к которому рассчитывается разница затрат.

В отоплении, когда рассматривается единственный энергоноситель (газ), можно, например, подсчитать срок окупаемости дополнительных капиталовложений в конденсационную котельную по сравнению с традиционной котельной.

Напротив, если сравнивать два энергоносителя (например, газ и электричество), то необходимо учитывать различие в ограничениях на изоляцию для этих двух видов энергии.

Полезность

Полезность продуктов или услуг характеризует их способность обеспечить удовлетворение: оно может носить непосредственный (предметы потребления) или косвенный (оборудование) характер. Это субъективное экономическое понятие, меняющееся со временем, которое следует отличать как от

потребностей, так и от полезности в общепринятом смысле (например, табак, обычно рассматриваемый в целом как бесполезный и даже вредный продукт, субъективно представляет собой большую или меньшую полезность для многих людей).

Неоклассическая школа понятие стоимости базирует на понятии полезности: она утверждает, что потребительская стоимость продукта (субъективная оценка удовлетворения, которое он приносит в данный момент) объективно выражается количественными соотношениями при определенном экономическом обмене. Понятие полезности в основном используется при формировании маржинальных (предельных) цен: предельная полезность продукта – это полезность, обеспечиваемая последней использованной единицей, тогда как общая полезность – это сумма полезностей, обеспечиваемых всей совокупностью оцениваемого продукта.

Современная (дисконтированная) стоимость

Если положительный или отрицательный доход R поступает в году *k*, то приведенная к настоящему моменту (дисконтированная) стоимость этого дохода составит:

$$V_A = \frac{R}{(1+a)^k},$$

где *a* – норма дисконтирования (см. также дисконтированная прибыль)

Если доход R выражен в постоянных денежных единицах, то используется классическая норма дисконтирования, если же доход R выражен в текущих денежных единицах, то следует использовать норму дисконтирования, которая учитывает инфляцию.

Потребительская стоимость

Один и тот же продукт или услуга не имеют одинаковой субъективно полезности для потребителей, различающихся по местоположению, социально-профессиональной принадлежности, моменту времени использования продукта.

Классический пример – меховое манто, которое имеет различную потребительскую стоимость в зависимости от того, носят ли его в Сахаре, на Крайнем Севере или в средней полосе или носят ли его в июле или в декабре месяце.

Таким образом, потребительская стоимость является оценкой степени удовлетворения, которое приносит обладание или использование продукта или услуги. Она относительна с точки зрения использования и зависит от момента и места, конкретных условий.

Остаточная стоимость

В экономических расчетах производственные инвестиции оценивают по критерию дисконтированной прибыли. Такая оценка требует выбора экономического горизонта.

Остаточную стоимость можно оценить по стоимости будущей продукции или в некоторых случаях – по цене возможной реализации.

1.14. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

1.14.1. Условные обозначения

A – атомная масса

M – молекулярная масса

δ – плотность газов и паров по отношению к сухому воздуху (0°C; 101, 325 кРа)

ρ – плотность

μ – динамическая вязкость (или абсолютная)

Кип – точка кипения

Плав – точка плавления

Суб – точка сублимации (возгонка)

C – массовая теплоемкость твердого тела или жидкости

C_p – удельная массовая теплоемкость газа при постоянном давлении

C_v – удельная массовая теплоемкость газа при постоянном объеме

γ – отношение массовых теплоемкостей газов $\frac{C_p}{C_v}$

ТП – теплота плавления

ТИ – теплота испарения (парообразования)

α, β – коэффициенты расширения в формуле: $V = V_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$

П – предел взрываемости в воздухе (объемный процент)

В.Т.С. – высшая теплотворная способность

Н.Т.С. – низшая теплотворная способность

λ – теплопроводность

ε – излучательная способность (спектральная) при данной температуре

ρ – электрическое удельное сопротивление (при 20 °C)

1.14.2. Численные данные

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Ацетат свинца, тригидрат $Pb(CH_3CO_2)_2 3H_2O$	M = 379,33 г	
Ацетилен (этин) $HC{\equiv}CH$	M = 26,04 г δ = 0,90666 ρ = 1,1722 × 10^{-3} г · $см^{-3}$ $Суб_{101,325\ кПа}$ = −83,80°C $Плав_{118,790\ кПа}$ = −80,55°c $C_{p15°C}$ = 1689,67 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} $C_{и15°C}$ = 1271,97 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} γ = 1,26 В.Т.С. = 58,610 МДж · $м^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 56,581 МДж · $м^{-3}$ (н) П = 1,5 - 100%	0,404 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$ 0,3039 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$ 14 003 ккал · $м^{-3}$ (н) 13 518 ккал · $м^{-3}$ (н)
Кислота борная H_3BO_3	M = 61,83 г $\rho_{14°C}$ = 1,513 г · $см^{-3}$ Плав (с разложением) = 169°C Растворимость в воде при 100°C = = 27,6 × 10^{-2} г · $см^{-3}$	
Кислота хлористоводородная (соляная) HCl	M = 36,46 г δ = 1,2681 $\rho_{0°C}$ = 1,639 × 10^{-3} г · $см^{-3}$ Кип = −84,9°C Плав = −114,8°C $C_{p0°C}$ = 811,99 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} $\gamma_{0°C}$ = 1,42 α (раств. 33,2%) = 446 × 10^{-6} β (раств. 33,2%) = 215 × 10^{-9}	0,194 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$
Кислота цианистоводородная (синильная) $H{-}C{\equiv}N$	M = 27,03 г $\rho_{18°C}$ = 0,697 г · $см^{-3}$ Кип = 25 - 26°C Плав = −14°C	
Кислота уксусная $CH_3{-}CO_2H$	M = 60,05 г $\rho_{20°C}$ = 1,049 г · $см^{-3}$ Кип = 117,9°C Плав = 16,6°C ТП = 192 156 Дж · $кг^{-1}$ ТИ = 405 156 Дж · $кг^{-1}$	45,91 кал · $г^{-1}$ 96,8 кал · $г^{-1}$
Кислота муравьиная HCO_2H	M = 46,03 г ρ = 1,22 г · $см^{-3}$ Кип = 100,7°C Плав = 8,4°C	
Кислота азотная HNO_3	M = 63,01 г $\rho_{25°C}$ = 1,5027 г · $см^{-3}$ Кип (с разложением) = 83°C Плав = −42°C C = 1 716,06 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} ТП = 39 762 Дж · $кг^{-1}$ ТИ = 481 332 Дж · $кг^{-1}$	0,41 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$ 9,5 кал · $г^{-1}$ 115 кал · $г^{-1}$
Кислота ортоарсенатная гемигидрат (мышьяковая) H_3AsO_4, 1/2 H_2O	M = 150,95 г ρ = 2,0 - 2,5 г · $см^{-3}$	
Кислота дисульфатная (пиросерная) $H_2S_2O_7$	M = 178,14 г $\rho_{20°C}$ = 1,9 г · $см^{-3}$ Плав = 36°C	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Кислота серная H_2SO_4	$M = 98,08$ г $\rho_{18°C}$ (H_2SO_4) = 1,834 г · см$^{-3}$ $\rho_{15°C}$ (H_2SO_4, H_2O) = 1,842 г · см$^{-3}$ $\rho_{0°C}$ (H_2SO_4, H_2O) = 1,650 г · см$^{-3}$ Кип (разложение) = (330 ± 5)°C Плав = 10,36°C C = 1 382,40 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 100 452 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°C\ до\ 30°C}$ (раств. до 13%) = 3,3 × 10^{-5} $\beta_{0°C\ до\ 30°C}$ (раств. до 13%) = 502 × 10^{-8} $\alpha_{0°C\ до\ 30°C}$ (раств. до 52%) = 14,5 × 10^{-5} $\beta_{0°C\ до\ 30°C}$ (раств. до 52%) = 414 × 10^{-8} $\alpha_{0°C\ до\ 30°C}$ (раств. до 98%) = 28,4 × 10^{-5} $\beta_{0°C\ до\ 30°C}$ (раств. до 98%) = 258 × 10^{-8}	0,331 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 24,0 кал · г$^{-1}$
Сталь	ρ = 7,81 г · см$^{-3}$ Плав = 1510°C $C_{20°C}$ = 485,52 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} λ = 51 172 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} r = 11 до 18 мкОм · см	0,116 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 44 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Воздух	$\rho_{0°C,\ 101,325\ кПа}$ = 1,2929 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ $\mu_{0°C}$ = 170,8 × 10^{-7} Па · с $C_{p20°C}$ = 1 004,52 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\gamma_{17°C}$ = 1,403 $\lambda_{0°C}$ = 0,02233 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,24 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,0192 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Сплав американский Al = 92, Cu = 8 Сплав монетный Au = 90, Cu = 10 Ag = 90, Cu = 10 Сплав золота и серебра Au = 20, Ag = 80 Au = 50, Ag = 50 Au = 806, Ag = 20	 Плав = 646°C Плав = 910°C Плав = 875°C Плав = 1 006°C Плав = 1 049°C Плав = 1 061°C	
Альпакс (Si = 11 - 13,5%, Al = 89 - 86,5%)	Плав = 575°C	
Алюминий Al	A = 26,981 г $\rho_{20°C}$ = 2,7 г · см$^{-3}$ ρ (расплавленный) = 2,406 г · см$^{-3}$ Кип = 2 467°C Плав = 660°C $C_{0°C}$ = 929,18 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 395 530,0 Дж · кг$^{-1}$ α = 22,21 × 10^{-6} (10 до 90°C) = = 23,54 × 10^{-6} (0 до 610°C) β = 11,4 × 10^{-9} (10 до 90°C) = = 7,07 × 10^{-9} (0 до 610°C) $\lambda_{20°C}$ = 209,340 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} r = 2,630 мкОм · см	0,222 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 94,5 кал · г$^{-1}$ 180 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Алюминий–медь Al = 97, Cu = 3	Плав = 656°C	
Алюминий–цинк Al = 70, Zn = 30	Плав = 600°C	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Асбест	ρ (термолит) = 2,9 - 3 г · см$^{-3}$ ρ (волокнистый) = 2,219 г · см$^{-3}$ $\rho_{0°C}$ = 0,47 - 0,702 г · см$^{-3}$ ρ (брикет) = 1,783 г · см$^{-3}$ $\rho_{30°C}$ (брикет изоляционный) = 0,290 г · см$^{-3}$ $\rho_{36°C}$ (картон) = 100 г · см$^{-3}$ $\rho_{15°C}$ (спрессованный) = 1,24 г · см$^{-3}$ $\rho_{30°C}$ (войлок) = 0,42 г · см$^{-3}$ C = 795,25 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ = 0,15468 - 0,23376 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (брикет) = 0,22097 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{30°C}$ (брикет изоляционный) = 0,08141 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{36°C}$ (картон) = 0,10583 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{15°C}$ (спрессованный) = 0,25586 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{30°C}$ (войлок) = 0,09304 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,19 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,133 - 0,201 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,19 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,07 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,091 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,22 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,08 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Амин-2 этанол (моноэтаноламин) $NH_2–CH_2–CH_2OH$	M = 61,09 г $\rho_{27°C}$ = 1,011 г · см$^{-3}$ Кип = 170,58°С Плав = 10,3°С	
Аммиак NH_3	M = 17,03 г δ = 0,5966 ρ = 0,771 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) Плав = –77,67°С Кип = –33,33°С В.Т.С. = 17,419 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 14,357 МДж · м$^{-3}$ (н) ТИ = 1,368658 × 10^6 Дж · кг$^{-1}$ П = 15 - 28%	327 кал · г$^{-1}$
Антрацен $C_{14}H_{10}$	M = 178,24 г $\rho_{27°C}$ = 1,25 г · см$^{-3}$ Кип = 340 - 342°С Плав = 219,5°С ТП = 161 811 Дж · кг$^{-1}$	38,66 кал · г$^{-1}$
Антрацит 4 - 8% летучих материалов	ρ = 1,35 - 1,7 г · см$^{-3}$ В.Т.С. = 30,982 МДж · кг$^{-1}$	7 400 ккал · кг$^{-1}$
Сурьма Sb	A = 121,75 г $\rho_{25°C}$ = 6,684 г · см$^{-3}$ Кип = 1 750°С Плав = 630,5°С C = 207,18 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 163 650 Дж · кг$^{-1}$ λ = 24,411 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,0495 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 39,1 кал · г$^{-1}$ 20,99 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Сланец глинистый	ρ = 2,77 - 2,84 г · см$^{-3}$ C = 753,39 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ = 1,744 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,18 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 1,5 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Серебро Ag	A = 107,868 г ρ = 10,5 г · см$^{-3}$ Кип = 2212°С Плав = 961,93°С C = 235,23 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 104 637 Дж · кг$^{-1}$ α = 18,27 × 10^{-6} (0 до 875°С) β = 4,79 × 10^{-9} (0 до 875°С) $\lambda_{20°C}$ = 407,05 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $r_{20°C}$ = 1,59 мкОм · см	0,0562 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 25 кал · г$^{-1}$ 350 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Глина	ρ (сухая) = 1,6 г · см$^{-3}$ ρ (влажная) = 2,0 г · см$^{-3}$ C = 878,96 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (сухая) = 0,698 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,21 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,6 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещество и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Аргон Ar	A = 39,948 г $\rho = 1{,}784 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ (н) Кип = –185,7°С Плав = –189,2°С $C_{p0°C}$ = 523,19 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 28 042,9 Дж · кг$^{-1}$ ТИ =162 816 Дж · кг$^{-1}$	 0,125 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 6,7 кал · г$^{-1}$ 38,9 кал · г$^{-1}$
Мышьяк As	A = 74,922 г $\rho_{14°C}$ = 5,727 г · см$^{-3}$ С = 334,84 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ Плав$_{3\ 647{,}7\ кПа}$ = 814°С Суб = 613°С	 0,08 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Асфальт	ρ = 1,1 - 1,2 г · см$^{-3}$ $C_{20°C}$ = 920,81 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ Плав = 90 - 100°С λ = 0,698 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,22 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,60 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Азот N_2	A = 14,01 г M = 28,013 г δ = 0,96713 $\rho = 1{,}25042 \times 10^{-13}$ г · см$^{-3}$ (н) $\mu_{27°C} = 178{,}1 \times 10^{-7}$ Па · с $\mu_{127°C} = 219{,}1 \times 10^{-7}$ Па · с Кип = –195,81°С Плав = –210,00°С $C_{p0°C}$ = 1 035,17 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{15°C}$ = 1,404 $\lambda_{114°C}$ = 0,02268 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,247 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,0195 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Барий Ba	A = 137,33 г $\rho_{17°C}$ = 3,74 г · см$^{-3}$ $\rho_{20°C}$ = 3,54 г · см$^{-3}$	
Базальт	ρ = 2,65 - 2,70 г · см$^{-3}$ $C_{20°C}$ = 795,25 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ = 1,6282 - 1,7445 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,19 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 1,4 - 1,5 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Бензол C_6H_6	M = 78,12 г $\delta_{100°C}$ = 2,7742 $\rho_{20°C}$ = 0,8765 г · см$^{-3}$ Кип = 80,09°С Плав = 5,53°С $C_{20°C}$ = 1 736,98 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{p100°C}$ = 1 339,47 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{v90°C}$ = 1 238,07 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТИ$_{80°C}$ = 394 023 Дж · кг$^{-1}$ $\gamma_{90°C}$ = 1,10 П = 1,2 - 8,0% В.Т.С. (пар) = 162,219 МДж · м$^{-3}$ (н) В.Т.С. (жидкость) = 42,282 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (пар) = 155,582 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. (жидкость) = 40,519 МДж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ = 0,1512 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,415 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,3201 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,2958 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 94,14 кал · г$^{-1}$ 38757 ккал · м$^{-3}$ (н) 10102 ккал · кг$^{-1}$ 37166 ккал · м$^{-3}$ (н) 9698 ккал · кг$^{-1}$ 0,13 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Бензол	ρ (бензол 90) = 0,882 г · см$^{-3}$ ρ (бензол 50) = 0,876 г · см$^{-3}$ Кип (бензол 90) = при 100°С выпаривание до 90% Кип (бензол 50) = при 100°С выпаривание до 50%, при 120°С выпаривание до 90%	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Бетон	ρ = 1,8 - 2,5 г · см$^{-3}$ С = 878,96 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (железобетон) = 1,512 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (гравийский бетон) = 1,163 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (тощий бетон) = 1,396 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $r_{18°C}$ = 1 до 5 × 10^{4} мкОм · м для бетона с 1 частью цемента и от 3 до 7 частей песка или гравия	0,21 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 1,3 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 1,0 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 1,2 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Дихромат натрия, дигидрат $Na_2Cr_2O_7$, $2H_2O$	М = 298,00 г $\rho_{13°C}$ = 2,52 г · см$^{-3}$	
Диокисид углерода (углекислый газ или угольный ангидрид) CO_2	М = 44,01 г δ = 1,529 $\rho_{0°C}$ = 1,9768 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) $\mu_{0°C}$ = 138,8 × 10^{-7} Па · с Суб = –78,48°С Плав$_{526,9\ кПа}$ = –56,48°С $C_{p0°C}$ = 817,68 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{0°C}$ = 1,31 ТИ = 573 413 Дж · кг$^{-1}$ λ = (14,072 ± 0,078) × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,195 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 137 кал · г$^{-1}$ 0,0121 ±0,0000668 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Диокисид марганца MnO_2	М = 86,94 г ρ = 5,026 г · см$^{-3}$	
Диокисид серы (сернистый ангидрид) SO_2	М = 64,04 г δ = 2,265 ρ = 2,9285 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) ρ (жидкость) = 1,434 г · см$^{-3}$ Кип = –10,02°С Плав = –75,47°С $C_{p0°C}$ = 606,56 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{0°C}$ = 1,40 ТП = 134 773 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 401 808 Дж · кг$^{-1}$	0,145 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 32,2 кал · г$^{-1}$ 96,0 кал · г$^{-1}$
Висмут Bi	А = 208,98 г ρ = 9,80 г · см$^{-3}$ Кип = 1 560°С Плав = 271,3°С	
Дисульфит натрия гидрат $Na_2S_2O_4$, $2H_2O$	М = 210,09 г	
Битум	ρ = 1,07 - 1,10 г · см$^{-3}$ λ = 0,17445 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $r_{20°C}$ = от 8 до 50 × 10^{19} мкОм · см	0,15 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Древесина (см. основные бензины)		
Тетраборат натрия декагидрат (бура) $Na_2B_4O_7$, $10H_2O$	М = 381,37 г ρ = 1,73 г · см$^{-3}$ Плав = 75°С	
Смола	ρ = 1,25 - 1,35 г · см$^{-3}$	
Припой серебряный — 40%: Ag = 40, латунь = 60 — 21%: Ag = 21, Cu = 35,5, Zn = 27, Cd = 16, Si = 0,5 — 18%: Ag = 18, Cu = 75, P = 7 — 6%: Ag = 6, Cu = 87, P = 7	 Плав = 650°С Плав = 720°С Плав = 650°С Плав = 700 - 710°С *Примечание*: Незначительное изменение некоторых составляющих может значительно изменить температуру плавления	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Брикет карбида кремния	C = 841,29 (от 25 до 100°C) Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1}	0,201 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} (от 25 до 100°C)
Кирпич красный обычный	ρ = 1,7 г · см$^{-3}$ C = 837,1 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} λ = 0,698 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	 0,2 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,6 кал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Кирпич динасовый	ρ (кажущаяся) = 1,60 - 1,90 г · см$^{-3}$ ρ (реальная) = 2,30 - 2,37 г · см$^{-3}$ $C_{0°C - 600°C}$ = 920,81 - 1 171,94 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $C_{600°C - 1200°C}$ = 1 171,94 - 1 255,65 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{500°C}$ = 0,33727 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{700°C}$ = 0,44194 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{900°C}$ = 0,54661 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{1\ 100°C}$ = 0,73269 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	 0,22 - 0,28 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,28 - 0,30 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,29 ккал · м$^{-1}$ · °C^{-1} 0,38 ккал · м$^{-1}$ · °C^{-1} 0,47 ккал · м$^{-1}$ · °C^{-1} 0,63 ккал · м$^{-1}$ · °C^{-1}
Кирпич кремниево-глиноземистый	ρ (кажущаяся) = 1,7 - 2 г · см$^{-3}$ ρ (реальная) = 2,55 - 2,80 г · см$^{-3}$ $C_{0°C - 600°C}$ = 837,1 - 1 171,94 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $C_{600°C - 1200°C}$= 1 171,94 - 1 464,93 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{0°C}$ = 0,8955 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{1\ 100°C}$ = 1,6398 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	 0,20 - 0,28 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,28 - 0,35 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,77 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 1,41 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Бромат натрия $NaBrO_3$	M = 150,90 г $\rho_{17,5°C}$ = 3,339 г · см$^{-3}$	
Бром Br_2	A = 79,904 г M = 159,808 г $\delta_{100°C}$ = 5,56 $\rho_{20°C}$ = 3,119 г · см$^{-3}$ Кип = 58,78°C Плав = –7,2°C C = 224,76 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТИ = 179 976 Дж · кг$^{-1}$	 0,0537 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 43 кал · г$^{-1}$
Бромид натрия дигидрат $NaBr, 2H_2O$	M = 138,93 г ρ = 2,176 г · см$^{-3}$	
Бронза алюминиевая Al = 8 - 10%, Cu = 92 - 90%	ρ = 7,55 - 7,77 г · см$^{-3}$ Плав = 1 035°C - 1 050°C C = 418,55 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{18°C}$ = 75,246 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} α = 16,333 × 10^{-6} β = 3,90 × 10^{-9}	 0,10 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 64,7 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Бронза оловянистая — Cu = 90, Sn = 10	$\rho_{20°C}$ = 8,78 г · см$^{-3}$ Плав = 1 005°C $C_{20°C}$ = 376,69 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} α = 2,2 × 10^{-6}	 0,09 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
— Cu = 80, Sn = 20	$\rho_{20°C}$ = 8,9 г · см$^{-3}$ Плав = 890°C $C_{15°C - 98°C}$ = 359,95 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\alpha_{0°C - 800°C}$ = 27 × 10^{-6}	 0,086 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
Бронза фосфористая Cu = 88, Sn = 12	ρ = 8,80 - 8,86 г · см$^{-3}$ $C_{20°C - 100°C}$= 364,14 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1}	 0,087 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Бутан (*n*) $CH_3–(CH_2)_2–CH_3$	M = 58,12 г Кип = –0,51°C Плав = –138,36°C — в жидком виде $\rho_{15°C}$ = 0,583 г · см$^{-3}$ $\rho_{50°C}$ = 0,542 г · см$^{-3}$ $\mu_{4°C}$ = 2 000 × 10^{-7} Па · с $\mu_{15°C}$ = 1 800 × 10^{-7} Па · с $C_{0°C}$ = 2 302,02 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} В.Т.С. = 49,180 МДж · кг$^{-1}$ — в газообразном виде δ = 2,095 $\rho_{0°C,\ 101,325\ кПа}$ = 2,709 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) $\mu_{20°C}$ = 73,9 × 10^{-7} Па · с $C_{p\,15°C}$ = 1 674,68 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $C_{v\,15°C}$ = 1 519,34 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\gamma_{15°C}$ = 1,090 ТИ = 417 755 Дж · кг$^{-1}$ П = 1,5 - 8,5% В.Т.С. = 134,415 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 123,910 = МДж · м$^{-3}$ (н)	0,55 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 11 750 ккал · кг$^{-1}$ 0,396 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,363 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 99,81 кал · г$^{-1}$ 32 114 ккал · м$^{-3}$ (н) 29 605 ккал · м$^{-3}$ (н)
Бутен-1 (бутилен *α*) $CH_3–CH_2–CH=CH_2$	M = 56,11 г $\rho_{0°C}$ = 0,668 г · см$^{-3}$ В.Т.С. (газообразный) = 121,42 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. (газообразный) = 113,38 МДж · м$^{-3}$ (н)	
Бутен-2 (бутилен *β*) $CH_3–CH=CH–CH_3$	M = 56,11 г $\rho_{20°C}$ = 0,62 г · см$^{-3}$	
Кадмий Cd	A = 112,41 г Кип = 765°C Плав = 320,9°C	
Известняк грубозернистый	ρ = 2,4 г · см$^{-3}$	
Кальций Ca	A = 40,08 г ρ = 1,545 г · см$^{-3}$	
Каучук	ρ (чистый каучук) = 0,9 - 0,92 г · см$^{-3}$ ρ (изделия из каучука) = 1,0 - 2,0 г · см$^{-3}$ Плав = 125°C $\lambda_{30°C}$ (не вулканизированный) = 0,17445 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{-32°C}$ (затверделый) = 0,1512 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	 0,15 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,13 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Карбазол $(C_6H_4)_2NH$	M = 167,21 г Кип = 354,8°C Плав = 247 - 248°C	
Карбонат кальция $CaCO_3$	M = 100,09 г $\rho_{25°C}$ (кальцит) = 2,711 г · см$^{-3}$ ρ (арагонит) = 2,93 г · см$^{-3}$	
Карбонат железа $FeCO_3$	M = 115,85 г ρ = 3,8 г · см$^{-3}$	
Карбонат калия K_2CO_3	M = 138,21 г ρ = 2,267 г · см$^{-3}$	
Карбонат калия тригидрат K_2CO_3, $3/2H_2O$ $2K_2CO_3$, $3H_2O$	 M = 165,25 г M = 330,47 г	
Карбонат натрия Na_2CO_3	M = 105,99 г ρ = 2,5325 г · см$^{-3}$ Растворимость при 0°C = 7,0 × 10^{-2} г · см$^{-3}$ Растворимость при 100°C = 46 × 10^{-2} г · см$^{-3}$	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Карбонат натрия декагидрат (кристаллический) $Na_2CO_3, 10H_2O$	M = 286,14 г $\rho_{17°C}$ = 1,446 г · см$^{-3}$ Растворимость при 0°C = 21,52 × 10^{-2} г · см$^{-3}$ Растворимость при 104°C = 421 × 10^{-2} г · см$^{-3}$	
Карбонат цинка $ZnCO_3$	M = 125,39 г ρ = 4,432 г · см$^{-3}$	
Углерод C	M = 12,011 г ρ (аморфный) = 1,8 - 2,14 г · см$^{-3}$ ρ (графит 20°C) = 2,25 г · см$^{-3}$ ρ (алмаз) = 3,51 г · см$^{-3}$ $C_{11°C}$ (графит) = 795,25 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ Суб = 3 652°C $\lambda_{20°C}$ (графит в порошке) = 1,18626 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ ε (графит при 127°C) = 0,77	0,190 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 1,02 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Карбид кальция CaC_2	M = 64,10 г ρ = 2,22 г · см$^{-3}$	
Карбид кремния SiC	M = 40,10 г ρ = 3,217 г · см$^{-3}$ Плав = 2 700°C	
Картон	$\rho_{20°C}$ = 0,79 г · см$^{-3}$, λ = 0,1512 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\rho_{20°C}$ = 1,00 г · см$^{-3}$, λ = 0,1396 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\rho_{20°C}$ = 1,20 г · см$^{-3}$, λ = 0,2326 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,13 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,12 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,20 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Целлюлоза $(C_6H_{10}O_5)_x$	M = 162,14 г ρ = 1,27 - 1,60 г · см$^{-3}$ C = 1 548,64 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,37 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
Пепел древесный	ρ = 0,45 г · см$^{-3}$ C = 795,25 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ = 0,0698 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,19 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,06 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Шамот (глина)	ρ (порошок) = 1,240 г · см$^{-3}$ ρ (куски) = 1,85 - 2,2 г · см$^{-3}$ $C_{20°C}$ = 837,1 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{500°C}$ = 1 130,09 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C}$ (порошок) = 0,44194 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{300°C}$ (порошок) = 0,52335 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{200°C}$ (куски) = 0,60476 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{600°C}$ (куски) = 0,79084 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{1\,000°C}$ (куски) = 0,96529 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,2 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,27 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,38 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,45 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,52 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,68 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,83 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Уголь древесный	$C_{10°C}$ = 669,68 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{0°C - 500°C}$ = 1 130,09 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{0°C - 1\,000°C}$ = 1 506,78 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,16 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,27 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,36 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
Уголь лиственных деревьев	ρ = 0,190 г · см$^{-3}$ $\lambda_{50°C}$ = 0,065128 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,056 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Уголь древесный сильно размельченный	ρ = 0,215 г · см$^{-3}$ $\lambda_{0°C}$ = 0,05815 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C}$ = 0,07327 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,050 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,063 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Уголь древесный мелкий	ρ = 0,200 г · см$^{-3}$ λ = (93,04 - 116,3) × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,08 - 0,10 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Уголь древесный обычный (в порошке)	ρ = 0,410 - 0,490 г · см$^{-3}$ λ = (91,877 - 94,203) × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,079 - 0,081 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Уголь древесный измельченный	ρ = 0,215 г · см$^{-3}$ λ = 63,965 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,055 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Уголь древесный сухой	$\lambda_{0°C}$ = 54,661 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,047 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Уголь древесный (пылевидный)	ρ = 0,6 - 0,750 г · см$^{-3}$ $\lambda_{20°C}$ = 0,1163 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,1 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Уголь ретортный	ρ = 1,610 г · см$^{-3}$ $C_{15°C - 98°C}$ = 837,1 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{0°C - 1\,000°C}$ = 1 506,8 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ = 5,76964 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,20 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,36 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 4,961 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Уголь газовый (сажа)	ρ = 0,420 г · см$^{-3}$ $\lambda_{20°C}$ = 3,5588 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	3,06 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Дуб	ρ = 0,43 - 0,96 (средняя = 0,69) г · см$^{-3}$ C = 2 385,74 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{20°C}$ (тангенциальная) = 0,16282 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{20°C}$ (радиальная) = 0,17445 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{20°C}$ (осевая) = 0,37216 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,57 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,14 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,15 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,32 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Хлорат калия (бертолетова соль) $KClO_3$	M = 122,55 г ρ = 2,325 г · см$^{-3}$ Плав = 356°С	
Хлор Cl_2	A = 35,453 г M = 70,906 г δ = 2,491 $\rho_{0°C}$ = 3,214 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) Кип = –34,6°С Плав = –100,98°С $C_{p\,0°C}$ = 502,26 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{0°C}$ = 1,34	0,120 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Хлорид аммония NH_4Cl	M = 53,49 г $\rho_{25°C}$ = 1,5274 г · см$^{-3}$	
Хлорид серебра AgCl	M = 143,32 г ρ = 5,56 г · см$^{-3}$	
Хлорид кальция $CaCl_2$	M = 110,99 г $\rho_{25°C}$ = 2,152 г · см$^{-3}$ Кип > 1 600°С Плав = 782°С	
Хлорид кальция гексагидрат $CaCl_2$, $6H_2O$	M = 219,08 г $\rho_{25°C}$ = 1,712 г · см$^{-3}$ Плав = 29,92°С	
Хлорид железа тетрагидрат $FeCl_2$, $4H_2O$	M = 198,81 г ρ = 1,93 г · см$^{-3}$	
Хлорид железа $FeCl_2$	M = 162,21 г $\rho_{11°C}$ = 2,894 г · см$^{-3}$	
Хлорид калия KCl	M = 74,56 г ρ = 1,986 г · см$^{-3}$ Плав = 770°С	
Хлорид натрия NaCl	M = 58,47 г $\rho_{25°C}$ = 2,165 г · см$^{-3}$ Кип = 1 413°С Плав = 801°С C = 866,40 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ α (раств. 1,6%) = 2,1 × 10^{-5} β (раств. 1,6%) = 524 × 10^{-8} α (раств. 6,1%) = 14,6 × 10^{-5} β (раств. 6,1%) = 376 × 10^{-8} α (раств. 20,6%) = 36,4 × 10^{-5} β (раств. 20,6%) = 124 × 10^{-8}	0,207 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Хлорид цинка $ZnCl_2$	M = 136,28 г $\rho_{25°C}$ = 2,91 г · см$^{-3}$ Кип = 732°C Плав = 283°C	
Хромат калия K_2CrO_4	M = 193,19 г $\rho_{18°C}$ = 2,732 г · см$^{-3}$ Плав = 968,3°C	
Хромат натрия, тетрагидрат Na_2CrO_4, $4H_2O$	M = 243,03 г ρ = 1,899 г · см$^{-3}$	
Хром Cr	A = 51,996 г $\rho_{28°C}$ = 7,2 г · см$^{-3}$ Кип = 2 672°C Плав = 1 857 ± 20°C C = 447,85 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 259 920 Дж · кг$^{-1}$	0,107 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 62,1 кал · г$^{-1}$
Цемент в порошке	ρ = 1,15 - 1,7 г · см$^{-3}$ λ = 67,454 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,058 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Цемент чистый схватившийся	ρ = 2,7 - 3,0 г · см$^{-3}$	
Воск пчелиный	ρ = 0,959 - 0,967 г · см$^{-3}$ Плав = 60°C - 65°C C = 2 929,85 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{20°C}$ = 87,225 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,7 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,075 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Кобальт Co	A = 58,9332 г ρ = 8,9 г · см$^{-3}$ Кип = 2 870°C Плав = 1 495°C	
Кокс угольный	ρ = 1,6 - 1,9 г · см$^{-3}$ C = 837,1 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{20°C}$ (обломки) = 0,15119 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{20°C}$ (измельченный) = 0,18608 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{20°C}$ (распыленный) = 0,79084 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,2 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,13 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,16 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,68 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Хлопок	ρ (волокно) = 1,47 - 1,5 г · см$^{-3}$ C = 1 297,51 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} λ (хлопок чесанный) = 46,52 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,31 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,040 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Кумарон C_8H_6O	M = 118,13 г $\rho_{16°C}$ = 1,097 г · см$^{-3}$ Кип = 173 - 175°C Плав < –18°C	
Предохранитель $\frac{2}{3}$Sn, $\frac{1}{3}$Pb (припой оцинкованный)	ρ = 8,2 г · см$^{-3}$ Плав = 180°C	
Конский волос	ρ = 1,25 - 1,4 г · см$^{-3}$ $\lambda_{4°C}$ (спрессованный) = 52,335 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,045 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Кронглас обычный	ρ = 2,45 г · см$^{-3}$ C = 665,49 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} α = 9,56 × 10^{-6}	0,159 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Медь Cu	A = 63,546 г ρ = 8,92 г · см$^{-3}$ Кип = 2 567°C Плав = (1 083,04 ± 0,2)°C $C_{20°C}$ = 381,72 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 205 089 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 625°C}$ = 16,07 × 10^{-6} $\beta_{0°C - 625°C}$ = 4,03 × 10^{-9} $\lambda_{20°C}$ (Cu 99%) = 401,27 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{20°C}$ (Cu коммерческая) = 348,900 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} r = 1,673 - 1,71 мкОм · см ε (медь полированная) = 0,023 при 117°C ε (электролитическая, хорошо полированная) = 0,018 при 77°C ε (коммерческая блестящая) = 0,072 при 27°C ε (расплавленная) = 0,16 при 1 077°C	0,0912 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 49,0 кал · г$^{-1}$ 345,03 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 300 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Медь-никель (константан) Cu = 80, Ni = 20	ρ = 8,9 г · см$^{-3}$ Плав = 1 190°C C = 410,18 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{20°C}$ = 22,795 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} r = 49 мкмОм · см	0,098 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 19,6 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Цианат калия KNCO	M = 81,12 г $\rho_{20°C}$ = 2,056 г · см$^{-3}$ Плав = 700 - 900°C	
Циан $(CN)_2$	M = 52,04 г δ = 1,796 ρ (жидкость) = 2,335 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ $\rho_{-21°C}$ = 0,9537 г · см$^{-3}$ Кип = –21,2°C Плав = –27,9°C	
Цианид аммония NH_4CN	M = 44,05 г	
Цианид кальция $Ca(CN)_2$	M = 92,12 г	
Цианид калия KCN	M = 65,12 г $\rho_{25°C}$ = 1,56 г · см$^{-3}$ Плав = 634,5°C	
Цианид натрия NaCN	M = 49,01 г Кип = 1 496°C Плав = 563,7°C	
Диэтаноламин $(CH_2OH–CH_2)_2NH$	M = 105,14 г $\rho_{20°C}$ = 1,0966 г · см$^{-3}$ Кип = 271°C Плав = 28,0°C	
Дигидроортоарсенат натрия гидрат (арсенат натрия) NaH_2AsO_4, H_2O	M = 181,94 г ρ = 2,53 - 2,67 г · см$^{-3}$	
Дигидроортофосфат аммония (ортофосфат аммония) $NH_4H_2PO_4$	M = 115,03 г $\rho_{20°C}$ = 1,803 г · см$^{-3}$	
1, 2-дигидроксилбензол (Пирокатехин) $C_6H_4(OH)_2$ 1, 2	M = 110,11г $\rho_{15°C}$ = 1,371 г · см$^{-3}$ Кип = 245°C Плав = 105°C	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
1,3-дигидроксилбензол (резорсин) $C_6H_4(OH)_2$ 1, 3	М = 110,11 г $\rho_{15°C}$ = 1,285 г · см$^{-3}$ Кип = 276,5 - 281°С Плав = 110,7°С	
1, 2-диметилбензол (*о*-ксилол) $C_6H_4(CH_3)_2$ 1, 2	М = 106,17 г $\rho_{20°C}$ = 0,880 г · см$^{-3}$ Кип = 144,4°С Плав = –25,2°С С = 1 716,05 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 128 244 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 394 167 Дж · кг$^{-1}$ П = 1,0 - 6% В.Т.С. (жидкость) = 42,985 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (жидкость) = 40,863 МДж · кг$^{-1}$ В.Т.С. (газообразный) = 205,32 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (газообразный) = 195,27 МДж · кг$^{-1}$	0,41 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 30,64 кал · г$^{-1}$ 94,2 кал · г$^{-1}$ 10 270 ккал · кг$^{-1}$ 9 763 ккал · кг$^{-1}$ 49 055 ккал · м$^{-3}$ (н) 46 654 ккал · м$^{-3}$ (н)
1, 3-диметилбензол (*м*-ксилол) $C_6H_4(CH_3)_2$ 1, 3	М = 106,17 г $\rho_{20°C}$ = 0,8642 г · см$^{-3}$ Кип = 139,1°С Плав = –47,9°С С = 1 716,05 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 108 865 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 390 507 Дж · кг$^{-1}$	0,41 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 26,01 кал · г$^{-1}$ 93,3 кал · г$^{-1}$
1, 4-диметилбензол (*р*-ксилол) $C_6H_4(CH_3)_2$ 1, 4	М = 106,17 г $\rho_{20°C}$ = 0,861 г · см$^{-3}$ Кип = 138,3°С Плав = 13,3°С С = 1 716,05 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 158 337 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 386 740 Дж · кг$^{-1}$	0,41 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 37,83 кал · г$^{-1}$ 92,4 кал · г$^{-1}$
Парафиновый дистиллят	$\rho_{20°C}$ < 0,910 г · см$^{-3}$ Точка вспышки > 140°С, < 180°С Углерод Конрадсена < 0,5%	
Дюралюминий Al = 94, Cu = 4, Mn = 1, Mg = 0,5, Si = 0,5	ρ = 2,75 - 2,87 г · см$^{-3}$ Плав = 620°С С = 912,44 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ r = 3,4 мкОм · см (АИ 4G1-О) r = 5,7 мкОм · см (АИ 4G1-T_4)	0,218 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Вода H_2O	М = 18,015 г $\rho_{4°C}$ = 1 г · см$^{-3}$ $\rho_{0°C}$ (лед) = 0,9168 г · см$^{-3}$ Кип = 100°С Плав = 0°С ТП = 332 329 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 2,255984 × 10^6 Дж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ (лед) = 0,555 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	79,4 кал · г$^{-1}$ 539 кал · г$^{-1}$ 0,48 ккал · м$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Вода аммиачная	$\rho_{15°C}$ = 1,012 - 1,023 г · см$^{-3}$	
Вода морская	$\rho_{0°C}$ (вода морская 3,485% NaCl) = 1,028 г · см$^{-3}$ (на поверхности) = 1,033 г · см$^{-3}$ (на глубине 1 000 м) = 1,071 г · см$^{-3}$ (на глубине 10 000 м)	
Перекись водорода H_2O_2	М = 34,01 г $\rho_{25°C}$ = 1,4067 г · см$^{-3}$ Кип = 150,2°С Плав = –0,41°С	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Эбонит	ρ = 1,15 - 1,5 г · см$^{-3}$ $C_{20°C}$ = 1 423,07 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{20°C}$ = 0,16282 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ r = 2 - 30 × 10^{2} мкОм · см	0,34 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,14 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Бензины	ρ (легкий бензин) = 0,68 - 0,72 г · см$^{-3}$ ρ (тяжелый бензин) = 0,75 г · см$^{-3}$ $\rho_{15°C}$ (бензин обычный) ≤ 0,765 г · см$^{-3}$ $\rho_{15°C}$ (высшего качества) ≤ 0,77 г · см$^{-3}$ С = 2 134,61 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ П = 1,2 - 6,0% В.Т.С. = 46,010 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. = 42,754 МДж · кг$^{-1}$	0,51 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 11 000 ккал · кг$^{-1}$ 10 215 ккал · кг$^{-1}$
Скипидар (терпентиновое масло) $C_{10}H_{16}$	$\rho_{20°C}$ = 0,86 - 0,88 г · см$^{-3}$ Кип = 160°С Плав = –10°С $C_{20°C}$ = 1 799,76 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ α = 97 × 10^{-5}	0,43 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Олово Sn	А = 118,69 г ρ = 5,75 г · см$^{-3}$ Кип = 2 270°С Плав = 231,9°С $C_{0°C - 18°C}$ = 246,53 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 60 271,2 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{10°C - 90°C}$ = 20,94 × 10^{-6} $\beta_{10°C - 90°C}$ = 17,5 × 10^{-9} $\lambda_{20°C}$ = 67,454 - 111,648 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,0589 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 14,4 кал · г$^{-1}$ 58 - 96 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Этан $CH_3–CH_3$	М = 30,07 г $\delta_{0°C}$ = 1,0481 $\rho_{0°C}$ = 1,335 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) Кип = –88,60°С Плав = –182,80°С $C_{p\,15°C}$ = 1 446,77 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{v\,15°C}$ = 1 312,57 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{15°C}$ = 1,22 ТП = 95 136,6 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 520 676 Дж · кг$^{-1}$ П = 2,8 - 15,5% В.Т.С. = 70,498 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 64,404 МДж · м$^{-3}$ (н) $\lambda_{0°C}$ = 0,01803 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,3458 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,3136 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 22,72 кал · г$^{-1}$ 124,4 кал · г$^{-1}$ 16 843 ккал · м$^{-3}$ (н) 15 387 ккал · м$^{-3}$ (н) 0,0155 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Этандитиол-1, 2 $HS–CH_2–CH_2–SH$	М = 94,19 г $\rho_{24°C}$ = 1,1233 г · см$^{-3}$ Кип = 146,46°С Плав = –41,2°С	
Этантиол (этилмеркаптан) $CH_3–CH_2–SH$	М = 62,13 г $\rho_{20°C}$ = 0,8391 г · см$^{-3}$ Кип = 35°С Плав = –144,4°С	
Этанат аммония (ацетат аммония) $CH_3–CO_2–NH_4$	М = 77,08 г $\rho_{20°C}$ = 1,174 г · см$^{-3}$ Плав = 114°С	
Этанат пентана-1 (ацетат амила) $CH_3–CO_2–C_5H_{11}$	М = 130,13 г $\rho_{20°C}$ = 0,8756 г · см$^{-3}$	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Этанол (этиловый спирт) $CH_3–CH_2–OH$	M = 46,07 г $\delta_{100°C}$ = 1,614 $\rho_{20°C}$ = 0,7893 г · см$^{-3}$ Кип = 78,5°C Плав = –117,3°C $C_{20°C}$ = 2 469,45 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{p90°C}$ = 1 699,31 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{v90°C}$ = 1 502,59 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{90°C}$ = 1,13 ТП = 109 032 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 841 286 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 30°C} = 110 \times 10^{-5}$ П = 3,28 - 18,95% В.Т.С. = 29,675 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. = 26,787 МДж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ = 0,1803 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C} = 19,538 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,59 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,406 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,359 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 26,05 кал · г$^{-1}$ 201 кал · г$^{-1}$ 7 090 ккал · кг$^{-1}$ 6 400 ккал · кг$^{-1}$ 0,155 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,0168 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Нефтяной эфир (легроин)	ρ = 0,645 - 0,665 г · см$^{-3}$ Кип = 40 - 60°C	
Этиловый эфир $(C_2H_5)_2O$	M = 74,12 г $\delta_{100°C}$ = 2,586 $\rho_{25°C}$ = 0,708 г · см$^{-3}$ Кип = 34,5°C Плав = –116,3°C $C_{p27°C - 189°C}$ = 1 933,28 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{35°C}$ = 1,08 ТП = 97 940,7 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 392 181 Дж · кг$^{-1}$	0,4619 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 23,4 кал · г$^{-1}$ 93,7 кал · г$^{-1}$
Этэн (этилен) $H_2C=CH_2$	M = 28,05 г $\delta_{0°C}$ = 0,9754 $\rho_{0°C} = 1,261 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ (н) $\mu_{25°C} = 101,2 \times 10^{-7}$ Па · с Кип = 103,74°C Плав = –169,15°C $C_{p15°C}$ = 1 550,73 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{15°C}$ = 1,255 П = 2,7 - 36% В.Т.С. = 63,540 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 59,488 МДж · м$^{-3}$ (н) $\lambda_{0°C} = 16,631 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,3706 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 15 181 ккал · м$^{-3}$ (н) 14 213 ккал · м$^{-3}$ (н) 0,0143 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Фаянс	ρ = 2,1 - 2,4 г · см$^{-3}$ λ = 1,0467 - 1,6282 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 800°C}$ (Лиможский обжиг при 1 370°C) = $4,5 \times 10^{-6}$	0,9 - 1,4 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Инфузорная земля	$\lambda_{0°C - 300°C}$ (в порошке) = 5,815 - 9,304 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{150°C - 350°C}$ (в покрытии) = 9,304 - 13,956 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{50°C - 300°C}$ (брикет) = 9,304 - 16,282 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	5 - 8 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 8 - 1 2 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 8 - 14 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Железо Fe	A = 55,847 ρ = 7,86 г · см$^{-3}$ Кип = 2 750°C Плав = 1 535°C $C_{20°C}$ = 458,31 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{25°C}$ = 449,94 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 266 616 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = $6,36196 \times 10^6$ Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 38°C} = 11,45 \times 10^{-6}$ $\beta_{0°C - 38°C} = 12,2 \times 10^{-9}$ λ = 68,04 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ ε = 0,35 - 1 (в зависимости от состояния поверхности) r = 10 мкОм · см	0,1095 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,1075 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 63,7 кал · г$^{-1}$ 1520 кал · г$^{-1}$ 58,5 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Пентакарбонилферрум $Fe(CO)_5$	M = 195,90 г $\rho_{21°C}$ = 1,457 г · см$^{-3}$ Кип = 102,8°C Плав = –21°C	
Гексацианоферриат калия $K_2Fe(CN)_6$	M = 329,26 г	
Гексацианоферриат натрия гидрат $Na_3Fe(CN)_6$, H_2O	M = 298,92 г	
Гексацианоферроат железа $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$	M = 859,25 г	
Гексацианоферроат калия, тригидрат $K_4Fe(CN)_6$, $3H_2O$	M = 422,41 г $\rho_{17°C}$ = 1,85 г · см$^{-3}$	
Гексацианоферроат кальция, декагидрат $Na_4Fe(CN)_6$, $10H_2O$	M = 484,04 г ρ = 1,458 г · см$^{-3}$	
Асбестовый войлок	$\rho_{30°C}$ = 0,420 г · см$^{-3}$ $\lambda_{30°C}$ = 93,04 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,08 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Фибра вулканизированная	ρ = 1,1 - 1,45 г · см$^{-3}$ r = 10^{12} мкОм · см	
Стекло флинт обыкновенный	ρ = 3,59 г · см$^{-3}$ C = 481,33 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ α = 7,88 × 10^{-6}	0,115 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
Фтор F_2	A = 18,998 г M = 39,996 г δ = 1,312 $\rho_{15°C}$ = 1,69 г · см$^{-3}$ Кип = –188,14°C Плав = –219,62°C	
Чугун белый	ρ = 7,0 - 7,8 г · см$^{-3}$ Плав = 1 130°C $C_{0°C - 100°C}$ = 544,12 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ приблиз. ТП = 138 121 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 500°C}$ = 9,8 × 10^6 $\beta_{0°C - 500°C}$ = 5,9 × 10^9 $\lambda_{20°C}$ = 45,636 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C}$ = 45,217 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,13 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 33 кал · г$^{-1}$ 39,24 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 38,88 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Чугун серый	ρ = 6,7 - 7,6 г · см$^{-3}$ Плав = 1 200°C ТП = 96 266,5 Дж · кг$^{-1}$	 23 кал · г$^{-1}$
Ясень	ρ = 0,69 (0,45 - 0,86) г · см$^{-3}$	
Мазут бытовой	ρ (бытовой) = 0,82 - 0,86 г · см$^{-3}$ ρ (легкий) = 0,88 - 0,92 г · см$^{-3}$ ρ (тяжелый № 1 и 2) = 0,93 - 0,98 г · см$^{-3}$ C (в емкости) = 1 778,84 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ C (в горелке) = 1 883,47 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ В.Т.С. (бытовой) = 44,366 - 45,203 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (бытовой) = 41,018 - 42,274 МДж · кг$^{-1}$ В.Т.С. (легкий) = 43,948 - 44,366 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (легкий) = 41,436 МДж · кг$^{-1}$ В.Т.С. (тяжелый № 1) = 43,111 - 43,738 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (тяжелый № 1) = 40,599 - 41,227 МДж · кг$^{-1}$ В.Т.С. (тяжелый № 2) = 42,692 - 43,111 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (тяжелый № 2) = 40,181 - 40,599 МДж · кг$^{-1}$	 0,425 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,450 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 10 600 - 10 800 ккал · кг$^{-1}$ 9 800 - 10 100 ккал · кг$^{-1}$ 10 500 - 10 600 ккал · кг$^{-1}$ 9 900 ккал · кг$^{-1}$ 10 300 - 10 450 ккал · кг$^{-1}$ 9 700 - 9 850 ккал · кг$^{-1}$ 10 200 - 10 300 ккал · кг$^{-1}$ 9 600 - 9 700 ккал · кг$^{-1}$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Газ природный из Алжира (Фос)	$\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 0,78 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ $\delta = 0,6$ В.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 42,274$ МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 38,098$ МДж · м$^{-3}$ (н) П = 4,9 - 13,9% Теоретическая температура горения: — в воздухе = 1 950°С — в кислороде = 2 775°С	
Газ природный из Алжира (Гавр)	$\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 0,82 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ $\delta = 0,64$ В.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 44,785$ МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 40,181$ МДж · м$^{-3}$ (н) П = 4,7 - 13,8% Теоретическая температура горения: — в воздухе = 1 955°С — в кислороде = 2 780°С	
Газ природный из Алжира (Монтуар)	$\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 0,82 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ $\delta = 0,64$ В.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 44,366$ МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 40,181$ МДж · м$^{-3}$ (н) П = 4,7 - 13,7% Теоретическая температура горения: — в воздухе = 1 955°С — в кислороде = 2 780°С	
Газ природный из Гронинга	$\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 0,83 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ $\delta = 0,64$ В.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 36,414$ МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 32,647$ МДж · м$^{-3}$ (н) П = 5,7 - 15,6% Теоретическая температура горения: — в воздухе = 1 930°С — в кислороде = 2 750°С	
Газ природный из Лака	$\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 0,74 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ $\delta = 0,57$ В.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 40,599$ МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 36,414$ МДж · м$^{-3}$ (н) П = 5,1 - 14,0% Теоретическая температура горения: — в воздухе = 1 950°С — в кислороде = 2 780°С	
Газ природный из Северного моря	$\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 0,81 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ $\delta = 0,62$ В.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 40,181$ МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 36,414$ МДж · м$^{-3}$ (н) П = 5,2 - 14,5% Теоретическая температура горения: — в воздухе = 1 945°С — в кислороде = 2 765°С	
Газ природный из СССР	$\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 0,78 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ В.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 40,181$ МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С$_{0°C;\ 101,325\ кПа} = 36,414$ МДж · м$^{-3}$ (н) П = 5,2 - 14,3% Теоретическая температура горения: — в воздухе = 1 945°С — в кислороде = 2 770°С	

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Газ бытовой (газ промышленный)	δ = 0,52 μ = 130 × 10^{-7} Па · с В.Т.С.$_{0°C;\ 101,325\ кПа}$ = 18,83 МДж · $м^{-3}$ (н) Н.Т.С.$_{0°C;\ 101,325\ кПа}$ = 16,951 МДж · $м^{-3}$ (н) П = 11,4 - 33,5% Теоретическая температура горения = 1 960°С Индекс Вобба приблизительный = 26,118 МДж · $м^{-3}$ (н) Индекс Вобба скорректированный = 24,778 МДж · $м^{-3}$ (н) Потенциал сгорания Дельбурга = 90 $\lambda_{0°C}$ = 35,588 × 10^{-3} Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$	 4 500 ккал · $м^{-3}$ (н) 4 050 ккал · $м^{-3}$ (н) 6 240 ккал · $м^{-3}$ (н) 5 920 ккал · $м^{-3}$ (н) 0,0306 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°С^{-1}$
Газойль	ρ = 0,86 - 0,89 г · $см^{-3}$ Кип = 250 - 350°С В.Т.С. = 44,994 ± 0,628 МДж · $кг^{-1}$ Н.Т.С. = 42,901 ± 0,628 МДж · $кг^{-1}$	 10 750 ± 150 ккал · $кг^{-1}$ 10 250 ± 150 ккал · $кг^{-1}$
Глюкоза $CH_2OH–(CHOH)_4–CHO$	M = 180,16 г $\rho_{25°C}$ = 1,544 г · $см^{-3}$ Плав = 146°С	
Каменноугольная смола	ρ = 1,1 - 1,2 г · $см^{-3}$ $С_{40°C}$ (смола сырая) = 1 464,93 ± 209,27 Дж · $кг^{-1}$ · $К^{-1}$ $С_{200°C}$ (смола сырая) = 1 883,47 ± 209,27 Дж · $кг^{-1}$ · $К^{-1}$ $\lambda_{20°C}$ = 0,11723 Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$	0,35 ± 0,05 кал · $г^{-1}$ · $°С^{-1}$ 0,45 ± 0,05 кал · $г^{-1}$ · $°С^{-1}$ 0,1008 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°С^{-1}$
Гранит	ρ = 2,6 - 2,75 г · $см^{-3}$ $С_{20°C}$ = 753,39 Дж · $кг^{-1}$ · $К^{-1}$ λ (крупные зерна) = 2,6749 - 2,7912 Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$ λ (№ 2) = 3,0238 - 3,3727 Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$	 0,18 кал · $г^{-1}$ · $°С^{-1}$ 2,3 - 2,4 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°С^{-1}$ 2,6 - 2,9 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°С^{-1}$
Графит	$\rho_{20°C}$ (в порошке, просеянный) = 0,700 г · $см^{-3}$ $\rho_{40°C}$ (в порошке, просеянный) = 0,420 г · $см^{-3}$ $\rho_{79°C}$ (синтетический) = 1,58 г · $см^{-3}$ $С_{20°C}$ = 837,1 Дж · $кг^{-1}$ · $К^{-1}$ $\lambda_{20°C}$ (в порошке, просеянный) = 1,1863 Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$ $\lambda_{40°C}$ (в порошке, просеянный) = 0,3838 Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$ $\lambda_{79°C}$ (синтетический) = 15,5842 Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$	 0,2 кал · $г^{-1}$ · $°С^{-1}$ 1,02 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°С^{-1}$ 0,33 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°С^{-1}$ 13,4 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°С^{-1}$
Песчаник	ρ = 2,2 - 2,5 г · $см^{-3}$ $С_{20°C\ -\ 100°C}$ = 753,39 - 920,81 Дж · $кг^{-1}$ · $К^{-1}$ λ = 1,8608 Вт · $м^{-1}$ · $К^{-1}$	 0,18 - 0,22 кал · $г^{-1}$ · $°С^{-1}$ 1,6 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°С^{-1}$
Гуталерча	ρ = 1,02 г · $см^{-3}$ $r_{20°C}$ = (1 - 100) × 10^{19} мкОм · см	
Гелий He	A = 2,0015 г M = 4,003 г δ = 0,13817 $\rho_{0°C}$ = 0,17864 × 10^{-3} г · $см^{-3}$ (н) $\rho_{-270,8°C}$ = 0,147 × 10^{-3} г · $см^{-3}$ (н) Кип = –268,93°С Плав = –270,97°С $С_{p\,0°C}$ = 5 194,72 Дж · $кг^{-1}$ · $К^{-1}$ $\gamma_{0°C}$ = 1,66	 1,24 кал · $г^{-1}$ · $°С^{-1}$
Гептан *n* C_7H_{16}	M = 100,21 г $\rho_{20°C}$ = 0,6837 г · $см^{-3}$ Кип = 98,42°С Плав = –90,58°С С = 2 218,31 Дж · $кг^{-1}$ · $К^{-1}$ ТП = 141 386 Дж · $кг^{-1}$ ТИ = 372 928 Дж · $кг^{-1}$ α = 124 × 10^{-5} П (пар) = 1,1 - 7,00% В.Т.С. (газ) = 261,39 МДж · $м^{-3}$ (н) Н.Т.С. (газ) = 242,01 МДж · $м^{-3}$ (н)	 0,530 кал · $г^{-1}$ · $°С^{-1}$ 33,78 кал · $г^{-1}$ 89,10 кал · $г^{-1}$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Бук	ρ = 0,72(0,54 - 0,91) г · см$^{-3}$	
Гексан *n* C_6H_{14}	M = 86,18 г $\rho_{20°C}$ = 0,6603 г · см$^{-3}$ Кип = 68,74°C Плав = –95,32°C C = 1 883,47 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 151 808 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 331 115 Дж · кг$^{-1}$ α = 135 × 10^{-5} П (пар) = 1,2 - 7,7% В.Т.С. (газ) = 210,23 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. (газ) = 194,45 МДж · м$^{-3}$ (н)	 0,45 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 36,27 кал · г$^{-1}$ 79,11 кал · г$^{-1}$
Масло смазочное минеральное	$\rho_{20°C}$ = 0,89 - 0,96 г · см$^{-3}$ C = 1 674,2 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} λ = 0,1163 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	 0,40 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,1 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Масло льняное (олифа)	$\rho_{15°C}$ = 0,930 г · см$^{-3}$ Кип = 287°C Плав = –15 - –30°C	
Масло тяжелое каменноугольное	ρ = 1,04 - 1,06 г · см$^{-3}$ Кип = 240 - 300°C В.Т.С. = 39,344 ± 0,419 МДж · кг$^{-1}$	 9 400 ± 100 ккал · кг$^{-1}$
Масло оливковое	ρ = 0,918 г · см$^{-3}$ $C_{0°C - 75°C}$ = 1 297,50 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} λ = 0,17445 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	 0,31 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,15 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Масло парафинистое (каменноугольная смола)	$C_{15°C}$ = 4 269,21 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ρ = 0,51 г · см$^{-3}$	1,02 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
Масло вазелиновое	ρ = 0,86 - 0,88 г · см$^{-3}$	
Гидроксид железа $Fe(OH)_2$	M = 89,86 г ρ = 3,4 г · см$^{-3}$	
Водород H_2	A = 1,0079 г M = 2,0159 г $\delta_{0°C}$ = 0,06953 $\rho_{0°C}$ = 0,899 × 10^{-4} г · см$^{-3}$ (н) $\mu_{0°C}$ = 86 × 10^{-7} Па · с $\mu_{100°C}$ = 107 × 10^{-7} Па · с Кип = –252,75°C Плав = –259,19°C $C_{p0°C}$ = 14 304,3 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\gamma_{15°C}$ = 1,41 ТП = 57 759,9 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 452 034 Дж · кг$^{-1}$ П = 4 - 75,6% В.Т.С. = 12,782 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 10,772 МДж · м$^{-3}$ (н) $\lambda_{0°C}$ = 0,1582 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C}$ = 0,1977 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	 3,4 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 13,8 кал · г$^{-1}$ 108 кал · г$^{-1}$ 3 054 ккал · м$^{-3}$ (н) 2 574 ккал · м$^{-3}$ (н) 0,136 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,170 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Гидроортоарсенат натрия гептагидрат (арсенат натрия) Na_2HAsO_4, $7H_2O$	M = 312,01 г ρ = 1,843 г · см$^{-3}$	
Гидрокарбонат калия (бикарбонат калия) $KHCO_3$	M = 100,12 г ρ = 2,17 г · см$^{-3}$	
Гидрокарбонат натрия (бикарбонат натрия) $NaHCO_3$	M = 84 г ρ = 2,217 г · см$^{-3}$	

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Гидроортофосфат аммония (бифосфат аммония) $(NH_4)_2HPO_4$	M = 132,05 г ρ = 1,619 г · см$^{-3}$	
Гидросульфат калия $KHSO_4$	M = 136,17 г ρ = 2,322 г · см$^{-3}$	
Гидросульфат натрия гидрат $NaHSO_4$, H_2O	M = 138,07 г $\rho_{20°C}$ = 2,118 г · см$^{-3}$	
Гидросульфат калия $KHSO_3$	M = 120,17 г	
Гидросульфат натрия $NaHSO_3$	M = 104,06 г	
Гидросульфид аммония $(NH_4)HS$	M = 51,11 г	
Гидросульфид кальция гексагидрат $Ca(HS)_2$, $6H_2O$	M = 214,32 г	
Гидросульфид натрия дигидрат $NaHS$, $2H_2O$	M = 92,09 г	
2-Гидрокситолуол (2-метилфенол или орто-крезол) CH_3–C_6H_4–OH(1, 2)	M = 108,15 г $\rho_{20°C}$ = 1,0273 г · см$^{-3}$ Кип = 191,74°C Плав = 30,9°C	
3-Гидрокситолуол (3-метилфенол или мета-крезол) CH_3–C_6H_4–OH(1, 3)	M = 108,15 г $\rho_{20°C}$ = 1,0336 г · см$^{-3}$ Кип = 202,2°C Плав = 11,5°C	
4-Гидрокситолуол (4-метафенол или пара-крезол) CH_3–C_6H_4–OH(1, 4)	M = 108,15 г $\rho_{20°C}$ = 1,0178 г · см$^{-3}$ Кип = 201,9°C Плав = 34,8°C	
Гидроксид кальция (гашеная известь) $Ca(OH)_2$	ρ = 2,24 г · см$^{-3}$ λ = 2,8028 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	2,41 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Гидроксид калия (поташ) KOH	M = 56,11 г ρ = 2,044 г · см$^{-3}$ Кип = 1 320°C - 1 324°C Плав = (360,4 ± 0,7)°C	
Гидроксид натрия (сода) NaOH	M = 40 г ρ = 2,13 г · см$^{-3}$ Кип = 1 388°C Плав = 318,4°C	
Гипохлорит кальция тетрагидрат $Ca(ClO)_2$, $4H_2O$	M = 215,06 г	
Гидрохлорит калия KClO	M = 90,55 г	
Инден C_9H_8	M = 116,20 г $\rho_{25°C}$ = 0,996 г · см$^{-3}$ Кип = 182,6°C Плав = –1,8°C	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Иод I_2	А = 126,905 г М = 253,809 г ρ = 4,93 г · см$^{-3}$ Кип = 184,35°С Плав = 113,5°С С = 226,02 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 59 852,6 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 334 840 Дж · кг$^{-1}$	 0,054 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 14,3 кал · г$^{-1}$ 80 кал · г$^{-1}$
Иридий Ir	А = 192,22 г ρ = 22,421 г · см$^{-3}$ Кип = 4 130°С Плав = 2 410°С С = 130,59 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТИ = 3,892515 × 10^{6} Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°С - 1\,750°С}$ = 6,697 × 10^{-6} $\beta_{0°С - 1\,750°С}$ = 1,16 × 10^{-9} $\lambda_{0°С}$ = 59,0804 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,0312 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 930 кал · г$^{-1}$ 50,8 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Капок	ρ = 0,016 г · см$^{-3}$ λ = 39,542 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,034 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Кизельгур обыкновенный	ρ = 0,300 г · см$^{-3}$ λ = 79,084 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,068 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Кизельгур легкий, или инфузорная земля	ρ = 0,150 г · см$^{-3}$ λ = 54,661 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,047 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Кизельгур в порошке	ρ = 0,270 г · см$^{-3}$ λ = 58,15 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,050 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Вата минеральная	ρ = 0,18 - 0,20 г · см$^{-3}$ $\lambda_{0°С}$ = 36,053 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°С}$ = 58,15 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,031 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,050 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Шерсть овечья	ρ = 0,136 г · см$^{-3}$ λ = 38,379 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,033 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Вата шлаковая	ρ = 0,36 г · см$^{-3}$ λ = (11,63 - 220,97) × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,010 - 0,19 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Вата стеклянная	$\rho_{0°С}$ = 0,186 г · см$^{-3}$ $\lambda_{0°С}$ = 34,89 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{300°С}$ = 0,107 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,03 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,125 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Шлак	$\rho_{0°С}$ = 0,36 г · см$^{-3}$ λ (гранулы 2 - 5 мм) = 0,1047 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (гранулы 30 мм) = 0,1454 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,09 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,125 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Латунь (1-я проба) Cu = 67, Zn = 33	ρ = 8,4 г · см$^{-3}$ Плав = 940°С С = 364,14 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\alpha_{0°С - 85°С}$ = 17,93 - 18,84 × 10^{-6} $\beta_{0°С - 85°С}$ = 4,56 - 5,33 × 10^{-9} $\lambda_{18°С}$ (1-я проба) = 121,185 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\varepsilon_{27°С}$ (крупная полированная пластина) = 0,20 $r_{15°С}$ = 5,5 мкОм · см	 0,087 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 104,2 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Латунь (2-я проба) Cu = 60, Zn = 40	Плав = 900°С С = 339,03 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $r_{15°С}$ = 8,5 мкОм · см	 0,081 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Пробка	ρ (агломерат) = 0,585 г · см$^{-3}$ ρ (необработанная) = 0,160 г · см$^{-3}$ ρ (пластина спрессованная) = 0,25 г · см$^{-3}$ ρ (пластина легкая) = 0,18 г · см$^{-3}$ $\rho_{0°C}$ (порошок) = 0,161 г · см$^{-3}$ C = 2 050,89 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (агломерат) = 81,41 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (необработанная) = 0,16282 - 0,2326 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (пластина спрессованная) = 75,595 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (пластина легкая) = 58,15 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ (порошок) = 36,053 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C}$ (порошок) = 55,824 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{200°C}$ (порошок) = 63,965 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,49 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,07 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,14 - 0,20 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,065 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,050 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,031 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,048 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,055 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Бурый уголь	ρ = 0,50 - 0,80 г · см$^{-3}$ В.Т.С. (не обогащенный с 60% воды, 7% породы) = 8,580 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (не обогащенный с 60% воды, 7% породы) = 6,487 МДж · кг$^{-1}$ В.Т.С. (сухой, 7% породы) = 20,928 - 29,299 МДж · кг$^{-1}$	2 050 ккал · кг$^{-1}$ 1 550 ккал · кг$^{-1}$ 5 000 - 7 000 ккал · кг$^{-1}$
Кирпичная полая кладка	ρ = 1,65 г · см$^{-3}$ λ = 0,3256 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,28 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Кирпичная нормальная кладка	ρ = 1,6 - 1,8 г · см$^{-3}$ C = 920,81 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ = 0,75595 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,22 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,65 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Кирпичная кладка из очень сухого кирпича	ρ = 1,85 г · см$^{-3}$ λ = 0,41868 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,36 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Бутовая кладка	λ = 1,5119 - 2,4423 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	1,3 - 2,1 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Магналюм Al = 90, Mg = 10	ρ = 2,5 г · см$^{-3}$ Плав = 608°С α = 24 × 10^{-6}	
Магний Mg	A = 24,305 г $\rho_{5°C}$ = 1,743 г · см$^{-3}$ Кип = 1 107°С Плав = 648,8°С C = 1 025,45 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 372 091 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 5,650425 × 10^{6} Дж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ = 154,679 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,245 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 88,9 кал · г$^{-1}$ 1 350 кал · г$^{-1}$ 133 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Мельхиор 1) Cu = 63, Ni = 15, Zn = 22 2) Cu = 70, Ni = 20, Zn = 10 3) Cu = 60, Ni = 15, Zn = 25	ρ = 8,5 г · см$^{-3}$ C = 393,44 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ Плав = 1 150°С $\alpha_{0°C - 100°C}$ = 18,4 × 10^{-6} $\lambda_{20°C}$ = 29,075 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,094 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 25 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Марганец Mn	A = 54,938 г ρ = 7,2 г · см$^{-3}$ Кип = 1 962°С Плав = 1 244 ± 3°С C = 498,07 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 262 430,8 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 4,1855 × 10^{6} Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{20°C - 300°C}$ = 21,6 × 10^{-6} $\beta_{20°C - 300°C}$ = 12,1 × 10^{-9}	0,119 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 62,7 кал · г$^{-1}$ 1 000 кал · г$^{-1}$
Манганин Cu = 84, Mn = 12, Ni = 4	ρ = 8,4 г · см$^{-3}$ Плав = 910°С $C_{20°C}$ = 405,99 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{20°C}$ = 22,3296 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,097 кал · г$^{-1}$ 19,2 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Мрамор	$\rho = 2{,}62 - 2{,}84$ г · см$^{-3}$ $C_{20°C} = 795{,}24$ Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{20°C} = 2{,}6749 - 2{,}7912$ Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $r = 2 - 20 \times 10^{15}$ мкОм · см	0,19 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 2,3 - 2,4 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Ртуть Hg	A = 200,59 г $\rho_{20°C} = 13{,}5939$ г · см$^{-3}$ Кип = 356,58°С Плав = –38,87°С С = 139,38 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 11 300,8 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 301 356 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha = 18{,}1 \times 10^{-5}$ $\beta = 12{,}444 \times 10^{-9}$ $\lambda_{82°C} = 7{,}7456$ Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $r = 95{,}783$ мкОм · см	0,0333 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 2,7 кал · г$^{-1}$ 72 кал · г$^{-1}$ 6,66 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Метасиликат калия K_2SiO_3	M = 154,25 г Плав = 976°С	
Метасиликат натрия нонагидрат $Na_2SiO_3, 9H_2O$	M = 284,20 г Плав = 40 - 48°С	
Метаналь (формальдегид) (формол) HCOH	M = 30,05 г $\rho_{20°C} = 0{,}815$ г · см$^{-3}$ Кип = –21°С Плав = –92°С	
Метан CH_4	M = 16,04 г $\delta = 0{,}555493$ $\rho = 0{,}71748 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ (н) $\mu_{0°C} = 103{,}5 \times 10^{-7}$ Па · с $\mu_{20°C} = 120{,}1 \times 10^{-7}$ Па · с Кип = –161,49°С Плав = –182,46°С ТП = 58 597 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 552 486 Дж · кг$^{-1}$ $C_{p15°C} = 2\,221{,}91$ Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{v15°C} = 1\,687{,}59$ Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma = 1{,}31$ П = 4,9 - 15% В.Т.С. = 39,936 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 35,904 МДж · м$^{-3}$ (н) $\lambda = 29{,}517 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	14 кал · г$^{-1}$ 132 кал · г$^{-1}$ 0,4032 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 9 542 ккал · м$^{-3}$ (н) 8 578 ккал · м$^{-3}$ (н) 0,02538 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Метанол (метиловый спирт) CH_3OH	M = 32,04 г $\rho_{20°C} = 0{,}7914$ г · см$^{-3}$ Кип = 65,15°С Плав = –97,8°С $C_{20°C} = 2\,469{,}45$ Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{p77°C} = 1\,632{,}34$ Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{v77°C} = 1\,356{,}10$ Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{90°C} = 1{,}203$ ТП = 99 196,3 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = $1{,}100786 \times 10^6$ Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{38°C - 70°C} = 118{,}56 \times 10^{-5}$ $\beta_{38°C - 70°C} = 1\,565 \times 10^{-9}$	0,59 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,390 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,324 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 23,70 кал · г$^{-1}$ 263 кал · г$^{-1}$
Метантиол (метилмеркаптан) CH_3SH	M = 48,11 г $\rho_{20°C} = 0{,}8665$ г · см$^{-3}$ Кип = 6,2°С Плав = –123°С	
2-Метил-1, 3-бутадиен (изопрен) $CH_2{=}C(CH_3){-}CH{=}CH_2$	M = 68,13 г $\rho_{20°C} = 0{,}681$ г · см$^{-3}$ Кип = 34,1°С Плав = –146°С $\lambda = 0{,}1454$ Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,125 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
2-Метил-1-бутен (изоамилен) $(CH_3)_2CH–CH=CH_2$	M = 70,14 г $\rho_{20°C}$ = 0,627 г · см$^{-3}$ Кип = 20,1°C Плав = –168,5°C	
2-Метил этилбензол (изопропилбензол) (кумол) $C_6H_5–CH(CH_3)_2$	M = 120,20 г $\rho_{20°C}$ = 0,8618 г · см$^{-3}$ Кип = 152,4°C Плав = –96,0°C	
2-Метилпропан (изобутан) $(CH_3)_3CH$	M = 58,12 г δ = 2,0935 ρ (газ) = 2,7068 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ Кип = –11,79°C Плав = –159,61°C $\gamma_{15°C}$ = 1,11 ТИ = 360 047 Дж · кг$^{-1}$ П = 1,8 - 8,5% В.Т.С. = 133,851 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 123,356 МДж · м$^{-3}$ (н)	93,19 кал · кг$^{-1}$
2-Метилпропен (изобутилен) $(CH_3)C=CH_2$	M = 56,11 г Кип = –6,9°C Плав = –140,3°C	
Слюда	ρ = 2,6 - 3,2 г · см$^{-3}$ Плав = 850°C C = 837,1 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{41°C}$ = 0,3605 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} r = 5 - 10 × 10^{19} мкОм · см	0,20 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,31 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Миканит	ρ = 1,9 - 2,6 г · см$^{-3}$ r = 5 - 10 × 10^{17} мкОм · см	
Молибден Mo	A = 95,94 г $\rho_{17°C}$ = 10,2 г · см$^{-3}$ Кип = 5 560°C Плав = 2 610°C C = 249,87 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТИ = 7,11535 × 10^{6} Дж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ = 146,538 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C}$ = 139,560 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,0597 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 1 700 кал · г$^{-1}$ 126 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 120 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Оксид азота NO	M = 30,01 г δ = 1,0367 ρ = 1,3402 × 10^{-3} г · см$^{-3}$	
Оксид углерода CO	M = 28,01 г δ = 0,9672 ρ = 1,2505 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ $\mu_{0°C}$ = 162 × 10^{-7} Па · с $\mu_{100°C}$ = 205 × 10^{-7} Па · с Кип = –191,5°C Плав = –205,02°C $C_{p0°C}$ = 1 040,91 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\gamma_{15°C}$ = 1,404 $\gamma_{-180°C}$ = 1,41 ТП = 29 717 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 215 792 Дж · кг$^{-1}$ П = 12,5 - 74,0% В.Т.С. = 12,626 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 12,626 МДж · м$^{-3}$ (н) $\lambda_{0°C}$ = 21,52 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C}$ = 27,507 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,249 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 7,1 кал · г$^{-1}$ 51,6 кал · г$^{-1}$ 3 017 ккал · м$^{-3}$ (н) 3 017 ккал · м$^{-3}$ (н) 0,018504 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,023652 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Раствор известковый	ρ (свежий) = 1,75 - 1,80 г · см$^{-3}$ ρ (сухой) = 1,60 - 1,65 г · см$^{-3}$ $\lambda_{10°C}$ (3 части песка, 1 часть извести, 0,014 объем влажности) = = 0,6745 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ (12 частей песка, 4 части извести, 1 часть цемента, 0,02 объем влажности) = 0,53498 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,58 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,46 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Нафталин $C_{10}H_8$	М = 128,19 г $\rho_{20°C}$ = 1,145 г · см$^{-3}$ Кип = 217,9°С Плав = 80,5°С С = 1 297,50 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 149 255 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 313 912 Дж · кг$^{-1}$ П (предел воспламеняемости при высокой температуре) = 0,9%	0,31 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 35,66 кал · г$^{-1}$ 75 кал · г$^{-1}$
Неон Ne	А = 20,179 г δ = 0,6962 ρ = 0,9002 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) Кип = –235,9°С Плав = –248,67°С	
Никель Ni	А = 58,69 г ρ = 8,925 г · см$^{-3}$ Кип = 2 730°С Плав = 1 455°С С = 444,08 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 299 263 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 6,19454 × 10^6 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 38°C}$ = 12,354 × 10^{-6} $\beta_{0°C - 38°C}$ = 5,66 × 10^{-9} $\alpha_{375°C - 1\,000°C}$= 13,46 × 10^{-6} $\beta_{372°C - 1\,000°C}$= 3,31 × 10^{-9} $\lambda_{0°C}$ = 58,731 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,1061 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 71,5 кал · г$^{-1}$ 1 480 кал · г$^{-1}$ 50,5 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Нитрат аммония NH_4NO_3	М = 80,04 г $\rho_{25°C}$ = 1,725 г · см$^{-3}$ Кип (с разложением) = 210°С Плав = 169,6°С	
Нитрат калия KNO_3	М = 101,11 г $\rho_{30°C}$ = 2,10 г · см$^{-3}$ Кип (с разложением) = 400°С Плав = 334°С	
Нитрат натрия $NaNO_3$	М = 84,99 г $\rho_{18°C}$ = 2,267 г · см$^{-3}$ Кип (с разложением) = 380°С Плав = 306,8°С	
Нитрид кремния Si_3N_4	М = 140,28 г ρ = 3,44 г · см$^{-3}$ Плав = 1 900°С	
Животный уголь	ρ = 2,9 - 3,2 г · см$^{-3}$ С = 1 088,23 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,26 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Октан $CH_3(CH_2)_6CH_3$	М = 114,23 г $\rho_{15°C}$ = 0,764 г · см$^{-3}$ Кип = 125,7°С Плав = –56,8°С С = 2 176,46 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 180 814 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 337 770 Дж · кг$^{-1}$	0,52 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 43,2 кал · г$^{-1}$ 80,7 кал · г$^{-1}$

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Золото Au	A = 196,967 г $\rho_{20°C}$ = 19,31 г · см$^{-3}$ Кип = 3 080°C Плав = 1 064,43°C C = 128,91 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 64 038 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 1,75791 × 10^{6} Дж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ = 295,402 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C}$ = 296,565 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,0308 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 15,3 кал · г$^{-1}$ 420 кал · г$^{-1}$ 254 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 255 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Ортоарсенат натрия додекагидрат (триарсенат натрия) Na_3AsO_4, $12H_2O$	M = 424,07 г ρ = 1,7593 г · см$^{-3}$ Кип = 1 260°C Плав = 86,3°C	
Метил-2-изопропилбензол (орто-изо-пролилбензол) (симен (орто)) CH_3–C_6H_4–$CH(CH_3)_2$	M = 134,22 г $\rho_{20°C}$ = 0,8766 г · см$^{-3}$ Кип = 178,1°C Плав = –71,5°C	
Ортофосфат аммония, тригидрат (трифосфат аммония) $(NH_4)_3PO_4$, $3H_2O$	M = 203,13 г	
Оксид-хлорид углерода (фосген) $COCl_2$	M = 98,92 г $\delta_{100°C}$ = 3,171 ρ = 1,392 г · см$^{-3}$ Кип = 8,3°C Плав = –104°C	
Оксид мышьяка As_2O_3	M = 197,84 г ρ (стекловидный) = 3,7385 г · см$^{-3}$	
Оксид алюминия (глинозем) Al_2O_3	M = 101,96 г ρ (аморфный) = 3,5 - 3,9 г · см$^{-3}$ ρ (кристаллический) = 3,97 г · см$^{-3}$ Плав = 2 015°C	
Оксид кальция (негашеная известь) CaO	M = 56,08 г ρ = 3,25 - 3,38 г · см$^{-3}$ Кип = 2 850°C Плав = 2 850°C C = 763,44 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\varepsilon_{827°C}$ = 0,11 $\varepsilon_{1\,727°C}$ = 0,14 λ = 3,6402 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,1824 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 3,13 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Оксид меди (I) Cu_2O	M = 143,09 г ρ = 6,0 г · см$^{-3}$ Плав = 1 235°C $\varepsilon_{827°C}$ = 0,66 $\varepsilon_{1\,127°C}$ = 0,54	
Оксид меди (II) CuO	M = 79,54 г ρ = 6,40 г · см$^{-3}$	
Оксид железа (III) (магнитный железняк) Fe_3O_4	M = 231,54 г ρ = 5,18 г · см$^{-3}$ Плав (с разложением) = (1 594 ± 5)°C	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Оксид магния (магнезия) MgO	$M = 40,31$ $\rho_{25°C} = 3,58$ г · см$^{-3}$ Плав = 2 852°C $C = 979,41$ Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{15°C} = 1,256$ Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{1\,000°C} = 1,6631$ Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\varepsilon_{227°C} = 0,55$ $\varepsilon_{927 - 1727°C} = 0,20$	0,234 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 1,08 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 1,43 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Оксид свинца (сурик) Pb_3O_4	$M = 685,57$ г $\rho = 9,16$ г · см$^{-3}$ Плав (с разложением) = 500°C	
Оксид кремния (кварц) SiO_2	$M = 60,08$ г $\rho = 2,635 - 2,680$ г · см$^{-3}$ Плав = 1 610°C $C = 782,69$ Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\alpha_{0°C - 250°C}$ (кристалл) $= 7,17 \times 10^{-6}$ $\beta_{0°C - 250°C}$ (кристалл) $= 8,10 \times 10^{-9}$ $\lambda_{0°C}$ (кристалл, вдоль оси) = 13,6071 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C}$ (кристалл, вдоль оси) = 8,9551 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{0°C}$ (кристалл, перпен. оси) = 7,2106 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C}$ (кристалл, перпен. оси) = 5,5824 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} λ (расплавленный) = 0,16389 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $r_{20°C}$ (кристалл, вдоль оси) $= 1 \times 10^{20}$ мкОм · см $r_{300°C}$ (кристалл, вдоль оси) $= 6 \times 10^{13}$ мкОм · см $r_{101°C}$ (аморфный) $= 4 \times 10^{17}$ мкОм · см	0,187 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 11,7 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 7,7 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 6,2 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 4,8 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,141 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Оксид титана TiO_2	$M = 79,90$ г ρ (брукит) = 4,17 г · см$^{-3}$ ρ (анастаз) = 3,84 г · см$^{-3}$ ρ (рутил) = 4,26 г · см$^{-3}$	
Оксид железа (III) (гематит) Fe_2O_3	$M = 159,69$ г $\rho = 5,25$ г · см$^{-3}$ Плав = 1 565°C $C = 665,49$ Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\varepsilon_{500°C} = 0,85$ $\varepsilon_{1\,200°C} = 0,89$	0,159 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
Оксид железа (III) (x-гидрат) Fe_2O_3, xH_2O	$M = (159,691 + 18,015\,x)$ г $\rho = 2,44 - 3,60$ г · см$^{-3}$	
Оксид цинка ZnO	$M = 81,37$ г $\rho = 5,606$ г · см$^{-3}$ Плав = 1 975°C	
Кислород O_2	$A = 15,999$ г $M = 31,999$ г $\delta = 1,1053$ $\rho = 1,429 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ (н) $\mu_{0°C} = 196 \times 10^{-7}$ Па · с $\mu_{100°C} = 252 \times 10^{-7}$ Па · с Кип = −182,96°C Плав = −218,79°C $C_{p\,0°C} = 905,89$ Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\gamma_{0°C} = 1,40$ ТП = 13 812,1 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 212 958,2 Дж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C} = 23,318 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C} = 30,901 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,217 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 3,3 кал · г$^{-1}$ 50,88 кал · г$^{-1}$ 0,02005 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,02657 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Сульфоксид углерода COS	M = 60,07 г δ = 2,105 $\rho = 2{,}72 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ Кип = –50,2°C Плав = –112°C	
Азон O_3	M = 47,998 г δ = 1,6583 $\rho = 2{,}144 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ Кип = –111,9°C Плав = –192,7 ± 2°C	
Паладий Pd	A = 106,42 г $\rho_{20°C}$ = 12,02 г · см$^{-3}$ Кип = 2 970°C Плав = 1 554°C C = 244,01 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 161 560 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = $3{,}976225 \times 10^6$ Дж · кг$^{-1}$ $r_{20°C}$ = 11 мкОм · см	 0,0583 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 38,6 кал · г$^{-1}$ 950 кал · г$^{-1}$
Бумага	ρ (белая писчая) = 0,85 г · см$^{-3}$ ρ (серая неклейкая) = 0,48 г · см$^{-3}$ λ (белая писчая) = $50{,}00 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} λ (серая неклейкая) = $39{,}542 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} r (бумага глянцевая) = $1 - 20 \times 10^{17}$ мкОм · см	 0,043 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,034 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Парафин	ρ = 0,86 - 0,92 г · см$^{-3}$ Кип = 300°C Плав = 54°C C = 2 092,75 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 146 492 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{10°C - 50°C} = 239 \times 10^{-6}$ $\lambda_{0°C}$ = 0,24423 - 0,29075 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $r = 3 - 300 \times 10^{22}$ мкОм · см	 0,5 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 35 кал · г$^{-1}$ 0,21 - 0,25 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Пентан $CH_3(CH_2)_3CH_3$	M = 72,15 г $\delta_{100°C}$ = 2,588 $\rho_{20°C}$ = 0,6262 г · см$^{-3}$ Кип = 36,07°C Плав = –129,73 - 130°C C = 2 176,46 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 116 775 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 382 555 Дж · кг$^{-1}$ П = 1,4 - 8,3% В.Т.С. (газообразный) = 172,189 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. (газообразный) = 158,045 МДж · м$^{-3}$ (н) В.Т.С. (жидкий) = 49,18 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (жидкий) = 45,434 МДж · кг$^{-1}$	 0,52 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 27,9 кал · г$^{-1}$ 91,4 кал · г$^{-1}$ 41 139 ккал · м$^{-3}$ (н) 37 760 ккал · м$^{-3}$ (н) 11 750 ккал · кг$^{-1}$ 10 855 ккал · кг$^{-1}$
Пентасульфид натрия Na_2S_5	M = 206,29 г Плав = 251,8°C	
Пентаоксид фосфора (фосфорный ангидрид) P_2O_5	M = 141,94 г ρ = 2,39 г · см$^{-3}$ Плав = 580 - 585°C Суб = 300°C	
Пентен-1 (амилен *n*) $CH_3(CH_2)_3CH{=}CH_2$	M = 70,14 г $\rho_{20°C}$ = 0,6405 г · см$^{-3}$	
Перманганат калия $KMnO_4$	M = 158,04 г ρ = 2,703 г · см$^{-3}$	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Пероксид азота $(NO_2)_2$	M = 92,02 г $\delta_{100°C}$ = 1,695 $\rho_{100°C}$ = 2,19 × 10^{-3} г · $см^{-3}$ Кип = 21,3°C Плав = –9,3°C	
Пероксид натрия октагидрат Na_2O_2, $8H_2O$	M = 222,12 г	
Нефть	$\rho_{20°C}$ = 0,76 - 0,86 г · $см^{-3}$ C = 2 092,75 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} α = 89,94 × 10^{-5} β = 1 396 × 10^{-9} (для ρ = 0,8467 г · $см^{-3}$) λ = 0,1512 Вт · $м^{-1}$ · K^{-1}	0,50 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$ 0,13 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°C^{-1}$
Керосин	ρ = 0,76 - 0,86 г · $см^{-3}$ Кип (90% объема) = 210°C	
Тополь	ρ = 0,41 - 0,56 (0,45) г · $см^{-3}$	
Фенантрен $C_{14}H_{10}$	M = 178,24 г $\rho_{4°C}$ = 0,9800 г · $см^{-3}$ Кип = 340°C Плав = 101°C	
Фениламин (анилин) $C_6H_5NH_2$	M = 93,13 г $\rho_{20°C}$ = 1,0217 г · $см^{-3}$ Кип = 184,63°C $C_{20°C}$ = 2 076,01 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} ТИ = 447 848 Дж · $кг^{-1}$	 0,496 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$ 107 кал · $г^{-1}$
Фенол (карболовая кислота) (гидроксибензол) C_6H_5OH	M = 94,11 г $\rho_{20°C}$ = 1,0576 г · $см^{-3}$ Кип = 181,7°C Плав = 42 - 43°C C = 1 632,34 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} ТП = 120 124 Дж · $кг^{-1}$ ТИ = 529 047 Дж · $кг^{-1}$	 0,39 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$ 28,7 кал · $г^{-1}$ 126,4 кал · $г^{-1}$
Фосфор P_4	A = 30,974 г M = 123,895 г ρ (черный) = 2,70 г · $см^{-3}$ $\rho_{20°C}$ (красный) = 2,34 г · $см^{-3}$ $\rho_{20°C}$ (белый) = 1,82 г · $см^{-3}$ Кип (белый) = 280°C Плав (белый) = 44,1°C $C_{-188°C\ до\ +20°C}$ (белый) = 707,35 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} $C_{15°C - 98°C}$ (красный) = 711,53 Дж · $кг^{-1}$ · K^{-1} ТП (белый) = 21 764,6 Дж · $кг^{-1}$ ТИ (белый) = 1,6742 × 10^6 Дж · $кг^{-1}$	 0,169 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$ 0,170 кал · $г^{-1}$ · $°C^{-1}$ 5,2 кал · $г^{-1}$ 400 кал · $г^{-1}$
Камень (известняк средний, тесаный камень, песчаник)	ρ = 2 г · $см^{-3}$ λ = 1,6282 Вт · $м^{-1}$ · K^{-1}	 1,4 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°C^{-1}$
Камень с твердой поверхностью	ρ = 2,5 г · $см^{-3}$ λ = 2,326 Вт · $м^{-1}$ · K^{-1}	 2 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°C^{-1}$
Пемза	ρ = 0,390 г · $см^{-3}$ λ = (69,78 - 104,67) × 10^{-3} Вт · $м^{-1}$ · K^{-1}	 0,06 - 0,09 ккал · $м^{-1}$ · $ч^{-1}$ · $°C^{-1}$
Сосна обыкновенная	ρ = 0,33 - 0,68 (047) г · $см^{-3}$	
Сосна лесная	ρ = 0,33 - 0,89 (0,52) г · $см^{-3}$	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Платина Pt	A = 195,08 г ρ = 21,45 г · см$^{-3}$ Кип = (3 827 ± 100)°С Плав = 1 772°С С = 133,94 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 100 871 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 2,51130 × 10^{6} Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 1\,000°C}$ = 8,868 × 10^{-6} $\beta_{0°C - 1\,000°C}$ = 1,32 × 10^{-9} $\lambda_{0°C}$ = 69,547 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C}$ = 70,013 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\varepsilon_{227°C}$ (полированная пластина) = 0,054 $\varepsilon_{627°C}$ (полированная пластина) = 0,104 $r_{20°C}$ = 10 мкОм· см	0,032 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 24,1 кал · г$^{-1}$ 600 кал · г$^{-1}$ 59,8 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 60,2 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Платина прядневая Pt = 90, Ir = 10	ρ = 21,6 г · см$^{-3}$ $r_{0°C}$ = 24 мкОм · см	
Платина родиевая Pt = 90, Rh = 10	$r_{0°C}$ = 27 мкОм · см	
Гипс	ρ (гипсовое покрытие не уплотненное) = 0,9 - 1,2 г · см$^{-3}$ ρ (гипсовое покрытие уплотненное) = 1,3 - 1,7 г · см$^{-3}$ С = 1 088,23 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{30°C}$ = 0,1512 - 0,3838 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (сухой) = 0,4304 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,26 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ (0,13 - 0,33) ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,37 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Свинец Pb	A = 207,2 г $\rho_{20°C}$ = 11,3437 г · см$^{-3}$ Кип = 1 740°С Плав = 327,50°С С = 127,66 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 24 694 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 920 810 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{10°C - 90°C}$ = 28,29 × 10^{-6} $\beta_{10°C - 90°C}$ = 11,95 × 10^{-9} $\lambda_{0°C}$ = 35,123 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C}$ = 33,146 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\varepsilon_{227°C}$ = 0,075 $\varepsilon_{127°C}$ = 0,057 $r_{20°C}$ = 22 мкОм· см	0,0305 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 5,9 кал · г$^{-1}$ 220 кал · г$^{-1}$ 30,2 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 28,5 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Полиэтилен $(CH_2)_n$	— Высокая плотность ρ = 0,930 - 0,965 г · см$^{-3}$ Плав = 120 - 135°С — Низкая плотность ρ = 0,918 - 0,930 г · см$^{-3}$ Плав = 105 - 115°С	
Фарфор	ρ = 2,30 - 2,45 г · см$^{-3}$ $C_{20°C}$ = 795,24 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{100°C}$ = 878,96 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{500°C}$ = 1 088,23 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{1\,000°C}$ = 1 297,51 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 600°C}$ (Байокс) = 3425 × 10^{-6} $\beta_{0°C - 600°C}$ (Байокс) = 1,07 × 10^{-9} $\lambda_{95°C}$ = 1,0351 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $r_{50°C}$ (обыкновенный, покрытый лаком) = 2 × 10^{21} мкОм · см $r_{20°C}$ (обыкновенный, пористый) = 2 × 10^{12} мкОм · см	0,19 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,21 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,26 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,31 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,89 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Калий K	A = 39,10 г $\rho_{20°C}$ = 0,86 г · см$^{-3}$ Кип = 760°С Плав = 63,25°С	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Пропан $CH_3–CH_2–CH_3$	М = 44,11 г Кип = –42,08°С Плав = –187,63°С — *в жидком состоянии* $\rho_{15°C}$ = 0,509 г · см$^{-3}$ $\rho_{50°C}$ = 0,450 г · см$^{-3}$ $\mu_{4°C}$ = 1 170 × 10^{-7} Па · с $\mu_{15°C}$ = 1 060 × 10^{-7} Па · с $C_{0°C}$ = 2 410,85 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТИ = 456 596 Дж · кг$^{-1}$ В.Т.С. = 49,891 МДж · кг$^{-1}$ — *в газообразном состоянии* δ = 1,5545 $\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа}$ = 2,010 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) $\mu_{20°C}$ = 80,60 × 10^{-7} Па · с $C_{p\,15°C}$ = 1 665,51 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{v\,15°C}$ = 1 448,18 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{15°C}$ = 1,128 П = 2,1 - 9,8% В.Т.С. = 101,364 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 93,146 МДж · м$^{-3}$ (н)	0,567 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 109,09 кал · г$^{-1}$ 0,390 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,346 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 24 218 ккал · м$^{-3}$ (н) 22 254 ккал · м$^{-3}$ (н)
Пропанон (ацетон) $CH_3–CO–CH_3$	М = 58,08 г $\rho_{20°C}$ = 0,792 г · см$^{-3}$ $\delta_{100°C}$ = 2,002 ρ (пар) = 2,588 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ Кип = 56,5°С Плав = –94,8°С $C_{20°C}$ = 2 209,94 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ C_p (пар) = 1 297,09 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $ТИ_{56,1°C}$ = 521 095 Дж · кг$^{-1}$	 0,528 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,3099 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 124,5 кал · г$^{-1}$
Пропанол-1 (*н*-пропиловый спирт) $CH_3–CH_2–CH_2OH$	М = 60,11 г $\rho_{20°C}$ = 0,8035 г · см$^{-3}$ Кип = 97,4°С Плав = –126,5°С	
Пропанол-2 (изопропиловый спирт) $(CH_3)_2CHOH$	М = 60,11 г $\rho_{20°C}$ = 0,7855 г · см$^{-3}$ Кип = 82,4°С Плав = –89,5°С	
Пропен (пропилен) $CH_2=CH–CH_3$	М = 42,08 г Кип = –47,42°С Плав = –185,24°С — *в жидком состоянии* $\rho_{15°C}$ = 0,525 г · см$^{-3}$ $\rho_{50°C}$ = 0,460 г · см$^{-3}$ В.Т.С. = 48,761 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. = 45,789 МДж · кг$^{-1}$ — *в газообразном состоянии* δ = 1,4802 $\rho_{0°C;\ 101,325\ кПа}$ = 1,9138 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ $\mu_{20°C}$ = 84,5 × 10^{-7} Па · с $C_{p\,15°C}$ = 1 516,80 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{v\,15°C}$ = 1 247,28 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\gamma_{15°C}$ = 1,180 ТИ = 467 102 Дж · кг$^{-1}$ П = 2 - 11,7% В.Т.С. = 93,757 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 87,607 МДж · м$^{-3}$ (н)	 0,362 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,298 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 111,6 кал · г$^{-1}$ 22 400 ккал · м$^{-3}$ (н) 20 931 ккал · м$^{-3}$ (н)

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Оксид азота (I) N_2O	M = 44,01г δ = 1,530 $\rho = 1{,}978 \times 10^{-3}$ г · см$^{-3}$ $\rho_{-89°C}$ (жидкость) = 1,226 г · см$^{-3}$ Кип = –88,5°C Плав = –90,8°C	
Паразин или диазин-1, 4 $C_4H_4N_2$	M = 80,09 г $\rho_{61°C}$ = 1,00311 г · см$^{-3}$ Кип = 118°C Плав = 52 - 53°C	
Пирен $C_{16}H_{10}$	M = 202,26 г $\rho_{0°C}$ = 1,277 г · см$^{-3}$ Кип = 393°C Плав = 156°C	
Пиридин C_5H_5N	M = 79,10 г $\rho_{20°C}$ = 0,9819 г · см$^{-3}$ Кип = 115,5°C Плав = –42°C	
Кварцит	ρ = 2,56 г · см$^{-3}$	
Радий Ra	A = 226,025 г ρ = 5(?) г · см$^{-3}$ Кип < 1 140°C Плав = 700°C	
Родий Rh	A = 102,906 г ρ = 12,48 г · см$^{-3}$ Кип = 3 727°C Плав = 1 966°C C = 242,76 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{0°C}$ = 89,3184 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C}$ = 80,3633 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,0580 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 76,8 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 69,1 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Песок мелкий сухой	ρ = 1,58 - 1,65 г · см$^{-3}$ C = 795,24 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{0°C}$ = 0,3024 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{20°C}$ = 0,3256 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{160°C}$ = 0,3838 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{300°C}$ = 0,5235 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,19 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,26 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,28 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,33 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,45 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Песок кварцевый	ρ = 1,47 г · см$^{-3}$ C = 795,24 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} λ = 0,2512 - 0,3140 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,19 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,216 - 0,27 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Пихта	ρ = 0,35 - 0,75 (0,45) г · см$^{-3}$ C = 2 720,58 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} λ (в направлении волокон) = 0,3838 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} λ (в направлении перпендикулярном к волокнам) = = 0,1861 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,65 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,33 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,16 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Опилки древесные	$\rho_{15°C}$ = 0,200 г · см$^{-3}$ $\rho_{78°C}$ = 0,215 г · см$^{-3}$ $\lambda_{15°C} = 69{,}78 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{78°C} = 63{,}965 \times 10^{-3}$ Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,06 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,055 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Селен Se_8	A = 78,96 г M = 631,68 г ρ (красный аморфный) = 4,26 г · см$^{-3}$ ρ (серый металлический) = 4,81 г · см$^{-3}$ Кип (серый металлический) = 685°C Плав (серый металлический) = 217°C	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Натрий Na	A = 22,990г $\rho_{20°C}$ = 0,971 г · см$^{-3}$ Кип = 882,9°C Плав = 97,81°C	
Шелк	ρ = 0,100 г · см$^{-3}$ $\lambda_{0°C}$ = 50,242 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} $\lambda_{100°C}$ = 59,313 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}	0,0432 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,051 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Припои 1. свинцовые: Pb = 66% Sn = 34% 2. оловянные: Pb = 34% Sn = 66% 3. Pb = 50, Sn = 50%	ρ = 9,4 г · см$^{-3}$ Плав = 240°C C = 167,42 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ρ = 8,2 г · см$^{-3}$ Плав = 180°C Плав = 220°C	0,040 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
Сера S_8	A = 32,06 г M = 256,48 г ρ (аморфная) = 1,92 г · см$^{-3}$ $\rho_{15°C}$ (моноклинная) = 1,96 г · см$^{-3}$ $\rho_{20°C}$ (ромбическая) = 2,07 г · см$^{-3}$ Кип (аморфная) = 444,6°C Плав (аморфная) = 120°C C = 719,91 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТП = 38 506,6 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 292 985 Дж · кг$^{-1}$	0,172 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 9,2 кал · г$^{-1}$ 70 кал · г$^{-1}$
Стирен (стирол) (фенилэтилен) C_6H_5–CH=CH_2	M = 104,14 г $\rho_{20°C}$ = 0,906 г · см$^{-3}$ Кип = 145,2°C Плав = –30,6°C	
Сульфат алюминия актадекагидрат $Al_2(SO_4)_3$, 18H_2O	M = 666,41 г $\rho_{17°C}$ = 1,69 г · см$^{-3}$ Плав (с разложением) = 86,5°C	
Сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$	M = 132,08 г $\rho_{20°C}$ = 1,7703 г · см$^{-3}$ Плав (с разложением) = 235°C	
Сульфат кальция $CaSO_4$	M = 136,14 г ρ = 2,96 г · см$^{-3}$	
Сульфат кальция дигидрат (гипс) $CaSO_4$, 2H_2O	M = 172,17 г ρ = 2,32 г · см$^{-3}$	
Сульфат меди (II) пентагидрат $CuSO_4$, 5H_2O	M = 249,68 г ρ = 2,284 г · см$^{-3}$	
Сульфат железа (II)-аммония гексагидрат $FeSO_4(NH_4)_2SO_4$, 6H_2O	M = 392,14 г ρ = 1,864 г · см$^{-3}$	
Сульфат калия K_2SO_4	M = 174,25 г ρ = 2,662 г · см$^{-3}$ Плав = 1 069°C	
Сульфат натрия Na_2SO_4	M = 142,05 г ρ = 2,698 г · см$^{-3}$ Плав = 884°C	
Сульфат натрия декагидрат Na_2SO_4, 10H_2O	M = 322,13 г $\rho_{20°C}$ = 1,465 г · см$^{-3}$	

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Сульфат цинка гептагидрат $ZnSO_4, 7H_2O$	M = 287,55 г ρ = 1,957 г · см$^{-3}$	
Сульфат железа (II) гептагидрат $FeSO_4, 7H_2O$	M = 278,0 г ρ = 1,898 г · см$^{-3}$ Плав (с разложением) = 64°C	
Сульфат алюминия-аммония додекагидрат (квасцы аммония кристаллические) $AlNH_4(SO_4)_2, 12H_2O$	M = 453,32 г ρ = 1,64 г · см$^{-3}$	
Сульфат алюминия-калия додекагидрат (квасцы калия кристаллические) $AlK(SO_4)_2, 12H_2O$	M = 474,38 г ρ = 1,75 г · см$^{-3}$	
Сульфат алюминия-натрия додекагидрат (квасцы натрия кристаллические) $AlNa(SO_4)_2, 12H_2O$	M = 458,28 г ρ = 1,675 г · см$^{-3}$	
Сульфат хрома (II)-калия, додекагидрат (квасцы хрома и калия) $KCr(SO_4), 12H_2O$	M = 499,42 г ρ = 1,83 г · см$^{-3}$	
Этилмеркаптан C_2H_5SH	См. Этантиол	
Сульфит кальция гемигидрат $CaSO_3, 1/2H_2O$	M = 129,15 г	
Сульфит калия дигидрат $K_2SO_3, 2H_2O$	M = 194,28 г	
Сульфит натрия гептагидрат $Na_2SO_3, 7H_2O$	M = 252,17 г $\rho_{15°C}$ = 1,539 г · см$^{-3}$	
Сульфид кальция CaS	M = 72,14 г $\rho_{15°C}$ = 2,81 г · см$^{-3}$	
Сульфид углерода CS_2	M = 76,14 г $\delta_{100°C}$ = 2,645 $\rho_{22°C}$ = 1,261 г · см$^{-3}$ $\mu_{20°C}$ = 3 763 × 10^{-7} Па · с Кип = 46,3°C Плав = –110,8°C $C_{20°C}$ = 1 017,08 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $C_{p\,80°C\,-\,190°C}$ = 657,12 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} ТИ = 372 509,5 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{-34°C\,-\,60°C}$ = 113,98 × 10^{-5} $\beta_{-34°C\,-\,60°C}$ = 1 371 × 10^{-9} П = 1,25 - 50,0%	0,243 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,157 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 89 кал · г$^{-1}$
Сульфид водорода (сероводородная кислота) (сероводород) H_2S	M = 34,08 г δ = 1,1880 $\rho_{0°C}$ = 1,5359 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) Кип = –60,27°C Плав = –85,48°C $C_{p\,0°C}$ = 1 104,61 Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1} $\gamma_{0°C}$ = 1,3 ТП = 70 316,4 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 248 300 Дж · кг$^{-1}$ П = 4,0 - 45,5% В.Т.С. = 25,369 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. = 23,338 МДж · м$^{-3}$ (н)	0,264 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 16,8 кал · г$^{-1}$ 131 кал · г$^{-1}$

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Сульфид железа (II) FeS	M = 87,90 г ρ = 4,74 г · см$^{-3}$ Плав = 1 199°C	
Сульфид железа (III) Fe_2S_3	M = 207,86 г ρ = 4,25 г · см$^{-3}$	
Сульфид натрия нонагидрат $Na_2S, 9H_2O$	M = 240,18 ρ = 1,427 г · см$^{-3}$ Плав (с разложением) = 920°C	
Котельный камень (накипь)	λ = 1,6747 - 2,9540 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	1,44 - 2,54 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Земля пахотная	ρ (влажная) = 2 - 2,2 г · см$^{-3}$ λ (обычное состояние) = 0,5233 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (влажная) = 0,6746 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (глинистая с 14% влажностью) = 2,326 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,45 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,58 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 2 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Тетрахлор метан (углерод четыреххлористый) CCl_4	M = 153,81 г ρ = 1,5867 г · см$^{-3}$ Кип = 76,8°C Плав = –23,0°C C = 853,84 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 21 346 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 207 601 Дж · кг$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 76°C}$ = 1,18334 × 10^{-3} $\beta_{0°C - 76°C}$ = 0,89881 × 10^{-6}	 0,204 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 5,1 кал · г$^{-1}$ 49,6 кал · г$^{-1}$
Тетраэтил-свинец $Pb(C_2H_5)_4$	M = 323,45 г $\rho_{18°C}$ = 1,659 г · см$^{-3}$ Кип$_{0,388\ бар}$ = 152°C Плав = –136°C	
Тиокарбонат калия (серокарбонат калия) K_2CS_3	M = 186,41 г	
Тиоцианат аммония NH_4SCN	M = 76,12 г ρ = 1,305 г · см$^{-3}$	
Изотиоцианат железа (II) тригидрат $Fe(SCN)_2, 3H_2O$	M = 226,04 г	
Изотиоцианат железа (III) $Fe(SCN)_3$	M = 230,07 г	
Тиоцианат калия $KSCN$	M = 97,16 г ρ = 1,886 г · см$^{-3}$ Кип (с разложением) = 500°C Плав = 179°C	
Тиолан (тетрагидротиофен) (Т.Г.Т.) C_4H_8S	M = 88,17 г ρ = 0,9987 г · см$^{-3}$ Кип = 121,1°C Плав = –96,2°C	
Тиофен C_4H_4S	M = 84,14 г $\rho_{20°C}$ = 1,0649 г · см$^{-3}$ Кип = 84,2°C Плав = –38,2°C	

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
Тиосульфат аммония (гипосульфат аммония) $(NH_4)_2S_2O_3$	М = 148,20 г	
Тиосульфат калия гидрат (гипосульфит калия) $3K_2S_2O_3$, H_2O	М = 588,95 г ρ = 2,23 г · см$^{-3}$ ρ (безводный) = 2,590 г · см$^{-3}$	
Тиосульфат натрия (гипосульфит натрия) $Na_2S_2O_3$, $5H_2O$	М = 248,15 г ρ = 1,750 г · см$^{-3}$ Плав = 45 - 50°С	
Титан Ti	А = 47,90 г $\rho_{20°C}$ = 4,5 г · см$^{-3}$ Кип = 3 287°С Плав = 1 660°С	
Полотно грубое	λ = 87,225 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,075 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Толуол (метилбензол) C_6H_5–CH_3	М = 92,15 г ρ (газообразный) = 4,842 × 10^{-3} г · см$^{-3}$ (н) $\rho_{20°C}$ (жидкий) = 0,866 г · см$^{-3}$ $\mu_{20°C}$ = 5 903 × 10^{-7} Па · с Кип = 110,63°С Плав = –94,96°С С = 1 674,2 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 65 339 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 389 251 Дж · кг$^{-1}$ П = 1,2 - 7,1% В.Т.С. (жидкий) = 42,734 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (жидкий) = 40,779 МДж · кг$^{-1}$ В.Т.С. (газообразный) = 207,717 МДж · м$^{-3}$ (н) Н.Т.С. (газообразный) = 198,242 МДж · м$^{-3}$ (н) $\alpha_{0°C - 100°C}$ = 1,028 × 10^{-3} $\beta_{0°C - 100°C}$ = 1,779 × 10^{-6} $\lambda_{20°C}$ = 0,1512 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,4 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 18 кал · г$^{-1}$ 93 кал · г$^{-1}$ 49 628 ккал · м$^{-3}$ (н) 47 364 ккал · м$^{-3}$ (н) 0,13 ккал · м$^{-1}$ · час$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Толуол 90 - 120	$\rho_{15°C}$ = 0,85 - 0,875 г · см$^{-3}$ Кип = 90% до 120°С = 98% до 140°С	
Торф	ρ (сухой) = 0,160 - 0,190 г · см$^{-3}$ ρ (природный, влажный) = 0,2 - 0,28 г · см$^{-3}$ В.Т.С. (сухой) = 18,835 - 25,113 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (сухой) = 16,742 - 20,928 МДж · кг$^{-1}$ В.Т.С. (сушеный на воздухе) = 15,905 МДж · кг$^{-1}$ Н.Т.С. (сушеный на воздухе) = 14,440 МДж · кг$^{-1}$ λ (сухой) = 52,335 × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ (природный, влажный) = (63,965 - 81,41) × 10^{-3} Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 4 500 - 6 000 ккал · кг$^{-1}$ 4 000 - 5 000 ккал · кг$^{-1}$ 3 800 ккал · кг$^{-1}$ 3 450 ккал · кг$^{-1}$ 0,045 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 0,055 - 0,07 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °С$^{-1}$
Трихлорметан (хлороформ) $CHCl_3$	М = 119,38 г $\rho_{20°C}$ = 1,4832 г · см$^{-3}$ Кип = 61,7°С Плав = –63,5°С С = 962,67 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТИ = 246 944 Дж · кг$^{-1}$	 0,23 кал · г$^{-1}$ · °С$^{-1}$ 59 кал · г$^{-1}$
Триэтаноламин $(CH_2OH–CH_2)_3N$	Кип = 227°С Плав = 21 - 22°С	
Триэтиленгликоль $HO(CH_2CH_2O)_2–CH_2CH_2OH$	М = 150,18 г $\rho_{15°C}$ = 1,127 г · см$^{-3}$ Кип = 278,3°С Плав = –5°С	

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вещества и их формулы	Константы физические и химические	
	в системе СИ	не в системе СИ
1, 2, 3-триоксибензол (пирогаллол) $C_6H_3(OH)_3$ 1, 2 ,3	M = 126,11 г $\rho_{4°C}$ = 1,453 г · см$^{-3}$ Кип = 309°C Плав = 132,8°C	
1, 2, 3-триоксипропан (глицерол) (глицерин) $CH_2OH–CHOH–CH_2OH$	M = 92,11 г $\rho_{20°C}$ = 1,2613 г · см$^{-3}$ Кип = 290°C Плав = 20°C $C_{0°C}$ = 2220,17 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $C_{50°C}$ = 2 511,3 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\alpha = 48{,}53 \times 10^{-5}$ $\beta = 490 \times 10^{-9}$ $\lambda_{0°C}$ (безводный) = 0,27912 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{20°C}$ (безводный) = 0,28959 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,540 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,600 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,24 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 0,249 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Вольфрам W	A = 183,85 г ρ = 19,35 г · см$^{-3}$ Кип = 5 660°C Плав = (3 410 ± 20)°C C = 134,77 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 251 130 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 4,813325 × 10^6 Дж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ = 169,798 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C}$ = 173,287 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,0322 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 60 кал · г$^{-1}$ 1 150 кал · г$^{-1}$ 146 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 149 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Уран U	A = 238,029 г ρ = 19,05 г · см$^{-3}$ Кип = 3 818°C Плав = 1 132,3 ± 0,8°C	
Ванадий V	A = 50,942 г $\rho_{15°C}$ = 5,96 г · см$^{-3}$ Кип = 3 380°C Плав = 1 890 ± 10°C	
Стекло Иена	C = 778,50 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\alpha_{0°C - 550°C}$ (59‴) = 5,833 × 10^{-6} $\beta_{0°C - 550°C}$ (59‴) = 0,88 × 10^{-9} $\alpha_{0°C - 100°C}$ (16‴) = 7,723 × 10^{-6} $\beta_{0°C - 100°C}$ (16‴) = 3,5 × 10^{-9} λ = 0,9304 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	0,186 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,8 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Стекло Пирекс	$\alpha_{20°C - 220°C}$ = 32 × 10^{-7} C = 774,32 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,185 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1}
Стекло обыкновенное	ρ = 2,48 - 2,87 г · см$^{-3}$ C = 765,95 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ λ = 0,7211 - 1,0351 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,183 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 0,62 - 0,89 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}
Цинк Zn	A = 65,38 г ρ = 7,142 г · см$^{-3}$ Кип = 907°C Плав = 419,6°C C = 385,90 Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$ ТП = 112 171 Дж · кг$^{-1}$ ТИ = 1,799765 × 10^6 Дж · кг$^{-1}$ $\lambda_{0°C}$ = 112,927 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ $\lambda_{100°C}$ = 111,183 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$	 0,0922 кал · г$^{-1}$ · °C^{-1} 26,8 кал · г$^{-1}$ 430 кал · г$^{-1}$ 97,1 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1} 95,6 ккал · м$^{-1}$ · ч$^{-1}$ · °C^{-1}

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.15. Свойства чистых газов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№	Компонент	Формула	Масса молекулярная, г	Коэффициент сжимаемости	Мольный объем, $м^3(н) \cdot кмоль^{-1}$	Плотность идеального газа, $кг \cdot м^{-3}(н)$	Плотность реального газа, $кг \cdot м^{-3}(н)$	Относительная плотность идеального газа	Относительная плотность реального газа
1	Монооксид углерода	CO	28,010	0,999 3	22,398	1,249 66	1,250 54	0,967 11	0,967 22
2	Водород	H_2	2,016	1,000 5	22,425	0,089 94	0,089 90	0,069 61	0,069 53
3	Метан	CH_4	16,043	0,997 6	22,360	0,715 75	0,717 48	0,553 92	0,554 93
4	Этан	C_2H_6	30,070	0,990 0	22,190	1,341 57	1,355 12	1,038 24	1,048 11
5	Пропан	C_3H_8	44,097	0,978 9	21,941	1,967 38	2,009 81	1,522 56	1,554 47
6	*н*-Бутан	*н*-C_4H_{10}	58,123	0,957 2	21,455	2,593 14	2,709 12	2,006 84	2,095 35
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10}	58,123	0,958 0	21,473	2,593 14	2,706 79	2,006 84	2,093 55
8	*н*-Пентан	*н*-C_5H_{12}	72,150	0,918 0	20,576	3,218 96	3,506 58	2,491 15	2,712 15
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	72,150	0,937 0	21,002	3,218 96	3,435 39	2,491 15	2,657 08
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	*нео*-C_5H_{12}	72,150	0,943 0	21,137	3,218 96	3,413 45	2,491 15	2,640 11
11	*н*-Гексан	*н*-C_6H_{14}	86,177	0,892 0	19,994	3,844 77	4,310 17	2,975 47	3,333 68
12	*н*-Гептан	*н*-C_7H_{16}	100,204	0,830 0	18,604	4,470 58	5,386 18	3,459 78	4,165 91
13	Этен (этилен)	C_2H_4	28,054	0,992 5	22,246	1,251 62	1,261 08	0,968 63	0,975 38
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	42,081	0,981 0	21,988	1,877 43	1,913 77	1,452 95	1,480 20
15	Бутен-1	*н*-C_4H_8	56,108	0,965 0	21,629	2,503 25	2,594 05	1,937 26	2,006 36
16	Метил-2 Пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	56,108	0,965 0	21,629	2,503 25	2,594 05	1,937 26	2,006 36
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	26,038	0,991 0	22,212	1,161 68	1,172 24	0,899 02	0,906 66
18	Бензол	C_6H_6	78,114	0,909 0	20,374	3,485 04	3,834 02	2,697 07	2,965 40
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	92,141	0,849 0	19,029	4,110 85	4,842 05	3,181 39	3,745 05
20	Азот	N_2	28,013	0,999 5	22,403	1,249 79	1,250 42	0,967 22	0,967 13
21	Гелий	He	4,003	0,999 7	22,408	0,178 59	0,178 64	0,138 21	0,138 17
22	Диоксид углерода	CO_2	44,010	0,993 3	22,264	1,963 50	1,976 76	1,519 55	1,528 91
23	Кислород	O_2	31,999	0,999 0	22,392	1,427 62	1,429 05	1,104 84	1,105 29
24	Аммиак	NH_3	17,031	0,985 0	22,078	0,759 82	0,771 39	0,588 02	0,596 63
25	Диоксид серы	SO_2	64,065	0,976 0	21,876	2,858 25	2,928 51	2,212 00	2,265 04
26	Сероводород	H_2S	34,082	0,990 0	22,190	1,520 56	1,535 92	1,176 76	1,187 95
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	18,015	0,930 0	20,845	0,803 74	0,864 24	0,622 01	0,668 44

Свойства чистых газов.

Колонка 4: Молекулярная масса посчитана по I.U.P.A.C. Commission on Atomic Weight and Isotopic Abundances. Atomic Weight of the elements. 1985. Pure Appl. Chem. vol. 58(2). P. 1677 - 1692 (1989)

Колонка 5: Коэффициент сжимаемости Z – согласно норм I.S.O. 6876 (1989).

Колонка 6: Мольный объем посчитан по соотношению:

$V_м = z \cdot V$, где $V_м$ = мольный объем реального газа; z = коэффициент сжимаемости газа; V = мольный объем идеального газа $22{,}4141 \cdot 10^{-3}$ $м^3$.

Колонка 7: Плотность ρ идеального газа посчитана по соотношению $\rho_{идеал} = M/V$ где, M – молекулярная масса газа или пара.

Колонка 8. Плотности ρ реального газа посчитана по соотношению $\rho_{реал} = M/(V \cdot Z)$

Колонка 9: Относительная плотность ρ идеального газа посчитана по соотношению $d_{идеал} = M/M_{возд}$, где $M_{возд}$ – молекулярная масса воздуха.

Колонка 10: Относительная плотность d реального газа посчитана по отношению к воздуху по соотношению $d_{реал} = (M \cdot Z_{возд})/(M_{возд} \cdot Z)$, где $M_{возд}$ – коэффициент сжимаемости воздуха;

$M_{возд}$ = 28,961 г и $Z_{возд}$ = 0,99941.

V: Мольный объем посчитан по соотношению PV = RN, где P = 101,325 кПа, N = 273,15 K и R = 8,314510 $Дж \cdot моль^{-1} \cdot K^{-1}$ по E.R. Cohen et B.N. Taylor. – The 1986 Adjustement of the Fundamental Physical Constants Codata Bull, n° 63 (Nov. 1986)

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1	2	3	11	12	13	14		15	
№	Компонент	Формула	Критические константы			Температура плавления		Температура кипения	
			Температура, K	Давление, 10^5 Па	Удельный объем, кг · м$^{-3}$	K	°C	K	°C
1	Монооксид углерода	CO	132,9	34,9	304	68,13	−205,02	81,46	−191,51
2	Водород	H_2	33,2	13,0	31	13,96	−259,16	20,40	−252,75
3	Метан	CH_4	190,5	46,0	164	90,69	−182,46	111,66	−161,49
4	Этан	C_2H_6	305,8	48,8	203	90,35	−182,80	184,85	−88,60
5	Пропан	C_3H_8	369,8	42,5	217	85,52	−187,63	231,07	−42,08
6	*n*-Бутан	*n*-C_4H_{10}	425,1	37,8	228	134,79	−138,36	272,64	−0,51
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10}	408,1	36,5	221	113,54	−159,61	261,36	−11,79
8	*n*-Пентан	*n*-C_5H_{12}	469,7	33,6	232	143,42	−129,73	309,22	36,07
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	460,4	33,8	236	113,25	−159,90	300,99	27,84
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	*нео*-C_5H_{12}	433,8	32,0	238	256,58	−16,57	282,65	9,50
11	*n*-Гексан	*n*-C_6H_{14}	506,4	30,3	233	177,83	−95,32	341,89	68,74
12	*n*-Гептан	*n*-C_7H_{16}	539,2	27,4	232	182,57	−90,58	371,57	98,42
13	Этен (этилен)	C_2H_4	282,4	50,4	214	104,00	−169,15	169,41	−103,74
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	364,9	46,0	232	87,91	−185,24	225,43	−47,72
15	Бутен-1	*n*-C_4H_8	419,5	40,2	234	87,80	−185,35	266,92	−6,23
16	Метил-2 пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	417,9	40,0	235	132,80	−140,35	266,24	−6,91
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	308,3	61,4	231	192,60	−80,55	189,35	−83,80
18	Бензол	C_6H_6	562,2	49,0	304	278,68	5,53	353,24	80,09
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	591,8	41,1	291	178,19	−94,96	383,78	110,63
20	Азот	N_2	126,2	33,9	313	63,15	−210,00	77,34	−195,81
21	Гелий	He	5,2	2,3	70	2,18	−270,97	4,22	−268,93
22	Диоксид углерода	CO_2	304,2	73,9	468	216,58	−56,57	194,67	−78,48
23	Кислород	O_2	154,6	50,4	436	54,36	−218,79	90,19	−182,96
24	Аммиак	NH_3	405,5	113,5	235	195,48	−77,67	239,82	−33,33
25	Диоксид серы	SO_2	430,8	78,8	525	197,68	−75,47	263,13	−10,02
26	Сероводород	H_2S	373,2	89,4	346	187,67	−85,48	212,88	−60,27
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	647,1	220,6	332	273,15	0,00	373,15	100,00

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонки с 11 ио 15: по A.E. Humphreys: – Constantes thermophysiques des contituants du gas naturel et des fluides apparentés. G. E. R. G. TPC/1 (1986), Intenational Gas Conference, Toronto (8 - 11 septembre 1986).

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1	2	3	16	17	18	19	20	21
№	Компонент	Формула	Абсолютная вязкость при 29815 K, мкПа · с	Отношение $\frac{C}{H}$ массовые	Теплота сгорания молярная			
					Н.Т.С., кВт · ч · · моль$^{-1}$	В.Т.С., кВт · ч · · моль$^{-1}$	Н.Т.С., кДж · · моль$^{-1}$	В.Т.С., кДж · · моль$^{-1}$
1	Монооксид углерода	CO	16,52	–	78,556	78,556	282,80	282,80
2	Водород	H_2	8,47	–	67,100	79,619	241,56	286,63
3	Метан	CH_4	11,19	0,25	223,006	248,047	802,82	892,97
4	Этан	C_2H_6	9,22	0,33	396,978	434,539	1 429,12	1 564,34
5	Пропан	C_3H_8	8,24	0,38	567,697	617,781	2 043,71	2 224,01
6	*n*-Бутан	*n*-C_4H_{10}	** 6,98	0,40	738,458	801,061	2 658,45	2 883,82
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10}	** 7,28	0,40	735,786	798,389	2 648,83	2 874,20
8	*n*-Пентан	*n*-C_5H_{12}	–	0,42	909,014	984,136	3 272,45	3 542,89
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	–	0,42	907,094	982,217	3 265,54	3 535,98
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	*нео*-C_5H_{12}	–	0,42	903,133	978,256	3 251,28	3 521,72
11	*n*-Гексан	*n*-C_6H_{14}	–	0,43	1 079,919	1 167,564	3 887,71	4 203,23
12	*n*-Гептан	*n*-C_7H_{16}	–	0,44	1 250,633	1 350,797	4 502,28	4 862,87
13	Этен (этилен)	C_2H_4	10,12	0,50	367,600	392,642	1 323,36	1 413,51
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	8,39	0,50	535,097	572,658	1 926,35	2 061,57
15	Бутен-1	*n*-C_4H_8	7,43	050	705,903	755,986	2 541,25	2 721,55
16	Метил-2 пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	8,14	0,50	701,250	751,333	2 524,50	2 704,80
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	* 10,3	1,00	349,108	361,628	1 256,79	1 301,86
18	Бензол	C_6H_6	7,46	1,00	880,503	918,064	3 169,81	3 305,03
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	6,88	0,88	1 047,894	1 097,978	3 772,42	3 952,72
20	Азот	N_2	16,95	–	–	–	–	–
21	Гелий	He	19,57	–	–	–	–	–
22	Диоксид углерода	CO_2	15,34	–	–	–	–	–
23	Кислород	O_2	19,92	–	–	–	–	–
24	Аммиак	NH_3	10,30	–	88,044	106,825	316,96	384,57
25	Диоксид серы	SO_2	12,82	–	–	–	–	–
26	Сероводород	H_2S	** 12,41	–	143,853	156,372	517,87	562,94
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	9,01	–	–	–	–	–

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонка 16: Согласно Carl L. Yaws – *Physical Propertie by Chemical Enginering*. Mc Graw-Hill. P. 210 - 211 (1977).
Согласно *Encyclopedie des gaz*, Elsvier / Alz Liqnide (1986:)
— значение вязкости при 293,15 K (*).
— значение вязкости при 288,15 K (**).
Колонка 20 и 21: Согласно нормы I.S.O. 6976 (1989).

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1	2	3	22	23	24	25	26	27	28
№	Компонент	Формула	Теплота сгорания массовая				Теплота сгорания объемная		
			Н.Т.С., кВт · ч · · кг$^{-1}$	В.Т.С., кВт · ч · · кг$^{-1}$	Н.Т.С., МДж · · кг$^{-1}$	В.Т.С., МДж · · кг$^{-1}$	Н.Т.С., кВт · ч · · м$^{-3}$	В.Т.С., кВт · ч · · м$^{-3}$	Н.Т.С., кВт · ч · · м$^{-3}$ (н)
1	Монооксид углерода	CO	2,805	2,805	10,10	10,10	3,505	3,505	3,507
2	Водород	H_2	33,284	39,494	119,82	142,18	2,994	3,552	2,992
3	Метан	CH_4	13,900	15,461	50,04	55,66	9,949	11,067	9,973
4	Этан	C_2H_6	13,202	14,451	47,53	52,02	17,711	19,387	17,890
5	Пропан	C_3H_8	12,874	14,010	46,35	50,43	25,328	27,562	25,874
6	*n*-Бутан	*n*-C_4H_{10}	12,705	13,782	45,74	49,62	32,946	35,739	34,420
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10}	12,659	13,736	45,57	49,45	32,827	35,620	34,266
8	*n*-Пентан	*n*-C_5H_{12}	12,599	13,640	45,36	49,10	40,555	43,907	44,179
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	12,572	13,614	45,26	49,01	40,470	43,821	43,191
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	*нео*-C_5H_{12}	12,517	13,559	45,06	48,81	40,293	43,645	42,728
11	*n*-Гексан	*n*-C_6H_{14}	12,531	13,548	45,11	48,77	48,180	52,091	54,013
12	*n*-Гептан	*n*-C_7H_{16}	12,481	13,480	44,93	48,53	55,797	60,266	67,224
13	Этен (этилен)	C_2H_4	13,103	13,996	47,17	50,39	16,400	17,518	16,524
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	12,716	13,608	45,78	48,99	23,873	25,549	24,335
15	Бутен-1	*n*-C_4H_8	12,581	13,474	45,29	48,51	31,494	33,728	32,636
16	Метил-2 пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	12,498	13,391	44,99	48,21	31,286	33,521	32,421
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	13,408	13,888	48,27	50,00	15,575	16,134	15,717
18	Бензол	C_6H_6	11,272	11,753	40,58	42,31	39,283	40,959	43,217
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	11,373	11,916	40,94	42,90	46,752	48,986	55,067
20	Азот	N_2	–	–	–	–	–	–	–
21	Гелий	He	–	–	–	–	–	–	–
22	Диоксид углерода	CO_2	–	–	–	–	–	–	–
23	Кислород	O_2	–	–	–	–	–	–	–
24	Аммиак	NH_3	5,170	6,273	18,61	22,58	3,928	4,766	3,988
25	Диоксид серы	SO_2	–	–	–	–	–	–	–
26	Сероводород	H_2S	4,221	4,588	15,19	16,52	6,418	6,977	6,483
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	–	–	–	–	–	–	–

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонки с 22 по 25: Величины посчитаны согласно следующего соотношения:

$$\text{Н.Т.С. (МДж} \cdot \text{кг}^{-1}) = \text{Н.Т.С. (МДж} \cdot \text{моль}^{-1}) \times \frac{1\,000}{M}$$

где M: Молекулярная масса в г *(колонка 4, см. стр. 288)*.

Аналогично для В.Т.С. и Н.Т.С., выраженных в МДж · кг$^{-1}$ или кВт · ч · кг$^{-1}$.

Колонки с 26 по 28: Величины посчитаны согласно следующего соотношения:

$$\text{Н.Т.С.}_{\text{газ идеальный}}\ (\text{МДж} \cdot \text{м}^{-3}) = \frac{\text{Н.Т.С.(МДж} \cdot \text{моль}^{-1}}{V}$$

где V = 22,4141 · 10^{-3} м^3 – молярный объем.

$$\text{Н.Т.С.}_{\text{газ реальный}}\ (\text{МДж} \cdot \text{м}^{-3}\ (\text{Н})) = \frac{\text{Н.Т.С.(МДж} \cdot \text{м}^{-3}}{Z}$$

где Z = коэффициент сжимаемости (*колонка 5: см. стр. 188*).

Аналогично для В.Т.С. и Н.Т.С., выраженных в МДж · м$^{-3}$ или кВт · ч · м$^{-3}$.

1	2	3	29	30	31	32	33
№	Компонент	Формула	Теплота сгорания объемная				
			В.Т.С. газ реальный, кВт · ч · м$^{-3}$	Н.Т.С. газ идеальный, МДж · м$^{-3}$	В.Т.С. газ идеальный, МДж · м$^{-3}$	Н.Т.С. газ реальный, МДж · м$^{-3}$ (н)	В.Т.С. газ реальный, МДж · м$^{-3}$ (н)
1	Монооксид углерода	CO	3,507	12,617	12,617	12,626	12,626
2	Водород	H_2	3,550	10,777	12,788	10,772	12,782
3	Метан	CH_4	11,093	35,818	39,840	35,904	39,936
4	Этан	C_2H_6	19,583	63,760	69,793	64,404	70,498
5	Пропан	C_3H_8	28,157	91,180	99,224	93,146	101,364
6	*н*-Бутан	*н*-C_4H_{10}	37,337	118,606	128,661	123,910	134,415
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10}	37,181	118,177	128,232	123,356	133,851
8	*н*-Пентан	*н*-C_5H_{12}	47,830	146,000	158,065	159,045	172,189
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	46,768	145,691	157,757	155,487	168,364
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	*нео*-C_5H_{12}	46,282	145,055	157,121	153,819	166,614
11	*н*-Гексан	*н*-C_6H_{14}	58,396	173,449	187,526	194,445	210,226
12	*н*-Гептан	*н*-C_7H_{16}	72,608	200,868	216,956	242,007	261,390
13	Этен (этилен)	C_2H_4	17,650	59,041	63,063	59,488	63,540
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	26,044	85,944	91,976	87,607	93,757
15	Бутен-1	*н*-C_4H_8	34,952	113,377	121,421	117,490	125,826
16	Метил-2 пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	34,737	112,630	120,674	116,716	125,052
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	16,281	56,071	58,082	56,581	58,610
18	Бензол	C_6H_6	45,061	141,420	147,453	155,582	162,219
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	57,699	168,306	176,350	198,242	207,717
20	Азот	N_2	–	–	–	–	–
21	Гелий	He	–	–	–	–	–
22	Диоксид углерода	CO_2	–	–	–	–	–
23	Кислород	O_2	–	–	–	–	–
24	Аммиак	NH_3	4,839	14,141	17,158	14,357	17,419
25	Диоксид серы	SO_2	–	–	–	–	–
26	Сероводород	H_2S	7,047	23,105	25,115	23,338	25,369
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	–	–	–	–	–

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонки с 29 по 33: Величины посчитаны по следующему соотношению:

$$\text{Н.Т.С.}_{\text{газ идеальный}}\ (\text{МДж} \cdot \text{м}^{-3}) = \text{Н.Т.С.}\ \frac{\text{Н.Т.С.}(\text{МДж} \cdot \text{моль}^{-1})}{V}$$

где V = 22,4141 · 10^{-3} м^3 – молярный объем.

$$\text{Н.Т.С.}_{\text{газ реальный}}\ (\text{МДж} \cdot \text{м}^{-3}\ (\text{Н})) = \frac{\text{Н.Т.С.}(\text{МДж} \cdot \text{м}^{-3}}{Z}$$

где Z = коэффициент сжимаемости (*колонка 5: см. стр. 188*).

Аналогично для В.Т.С. и Н.Т.С., выраженных в МДж · м$^{-3}$ или кВт · ч · м$^{-3}$.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1	2	3	34							
№	Компонент	Формула	Удельная молярная теплоемкость при постоянном давлении (P = 101,325 кПа)							
			$Вт \cdot ч \cdot м^{-3}(н) \cdot °C^{-1}$				$Дж \cdot м^{-3}(н) \cdot K^{-1}$			
			0°C	25°C	50°C	100°C	273,15 K	298,15 K	323,15 K	373,15 K
1	Монооксид углерода	CO	8,10	8,10	8,10	8,13	29,16	29,16	29,18	29,27
2	Водород	H_2	8,01	8,01	8,02	8,03	28,84	28,85	28,87	28,90
3	Метан	CH_4	9,57	9,90	10,24	10,96	34,36	35,65	36,88	39,46
4	Этан	C_2H_6	11,30	12,08	12,85	14,30	40,68	43,50	46,25	51,49
5	Пропан	C_3H_8	18,84	20,40	21,92	24,81	67,83	73,44	78,89	89,31
6	*n*-Бутан	$n\text{-}C_4H_{10}$	25,06	27,04	28,96	32,64	90,21	97,34	104,26	117,52
7	Метил-2 пропан (изобутан)	$i\text{-}C_4H_{10}$	24,27	26,87	28,89	32,74	89,19	96,72	104,01	117,86
8	*n*-Пентан	$n\text{-}C_5H_{12}$	30,91	33,36	35,74	40,28	111,26	120,09	128,65	145,02
9	Метил-2 бутан (изопентан)	$i\text{-}C_5H_{12}$	30,42	32,97	35,44	40,15	109,51	118,69	127,58	144,53
10	Диметил-2,2 пропан (*neo*-пентан)	$neo\text{-}C_5H_{12}$	31,04	33,75	36,36	41,30	111,73	121,49	130,89	148,67
11	*n*-Гексан	$n\text{-}C_6H_{14}$	36,79	39,71	42,54	47,95	132,45	142,96	153,15	172,60
12	*n*-Гептан	$n\text{-}C_7H_{16}$	42,68	46,06	49,34	55,60	153,64	165,82	177,62	200,15
13	Этен (этилен)	C_2H_4	11,30	12,08	12,85	14,30	40,68	43,50	46,25	51,49
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	16,54	17,73	18,89	21,13	59,53	63,83	68,01	76,06
15	Бутен-1	$n\text{-}C_4H_8$	22,03	23,78	25,47	28,69	79,30	85,59	91,69	103,28
16	Метил-2 Пропен (*i*-Бутен)	$i\text{-}C_4H_8$	23,10	24,74	26,33	29,38	83,16	89,07	94,80	105,76
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	11,75	12,22	12,66	13,46	42,31	44,00	45,58	48,46
18	Бензол	C_6H_6	20,35	22,67	24,90	29,06	73,25	81,62	89,63	104,63
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	25,98	28,77	31,44	36,49	93,53	103,56	113,20	131,37
20	Азот	N_2	8,06	8,06	8,07	8,10	29,00	29,03	29,06	29,17
21	Гелий	He	5,78	5,78	5,78	5,78	20,79	20,79	20,79	20,79
22	Диоксид углерода	CO_2	10,00	10,31	10,62	11,18	35,99	37,13	38,21	40,24
23	Кислород	O_2	8,05	8,12	8,19	8,33	28,99	29,24	29,50	29,99
24	Аммиак	NH_3	9,64	9,87	10,10	10,56	34,70	35,53	36,36	38,01
25	Диоксид серы	SO_2	10,79	11,08	11,35	11,86	38,86	39,88	40,86	42,69
26	Сероводород	H_2S	9,51	9,62	9,72	9,93	34,24	34,62	34,99	35,75
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	9,47	9,50	9,54	9,62	34,10	34,21	34,34	34,63

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонка 34: C_p посчитано с помощью коэффициентов A, B, C и Д по формуле:

$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3$

Коэффициенты A, B, C и Д получены из: (см. франц. оригинал - литературу на стр. 293).

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1	2	3	35							
№	Компонент	Формула	Удельная объемная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении							
			Вт · ч · м$^{-3}$ (н) · °C^{-1}				Дж · м$^{-3}$ (н) · K^{-1}			
			0°C	25°C	50°C	100°C	273,15 K	298,15 K	323,15 K	373,15 K
1	Монооксид углерода	CO	0,361	0,361	0,362	0,363	1 300,76	1 300,76	1 301,65	1 305,98
2	Водород	H_2	0,357	0,358	0,358	0,358	1 286,57	1 287,18	1 287,86	1 289,46
3	Метан	CH_4	0,427	0,442	0,457	0,489	1 537,24	1 590,34	1 645,38	1 760,59
4	Этан	C_2H_6	0,504	0,539	0,573	0,638	1 814,77	1 940,93	2 063,32	2 297,06
5	Пропан	C_3H_8	0,841	0,910	0,978	1,107	3 026,09	3 276,69	3 519,84	3 984,36
6	*n*-Бутан	*n*-C_4H_{10}	1,118	1,206	1,292	1,456	4 024,72	4 342,70	4 651,64	5 242,98
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10} ·	1,105	1,199	1,289	1,461	3 979,04	4 315,17	4 640,23	5 258,15
8	*n*-Пентан	*n*-C_5H_{12}	1,379	1,488	1,594	1,797	4 964,02	5 357,75	5 739,85	6 470,00
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	1,357	1,471	1,581	1,791	4 885,71	5 295,34	5 692,10	6 448,05
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	*нео*-C_5H_{12}	1,385	1,506	1,622	1,842	4 984,90	5 420,06	5 839,51	6 632,86
11	*n*-Гексан	*n*-C_6H_{14}	1,641	1,772	1,898	2,139	5 909,34	6 378,19	6 832,85	7 700,68
12	*n*-Гептан	*n*-C_7H_{16}	1,904	2,055	2,201	2,480	6 854,59	7 397,94	7 924,69	8 929,62
13	Этен (этилен)	C_2H_4	0,504	0,539	0,573	0,638	1 814,77	1 940,93	2 063,32	2 297,06
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	0,738	0,791	0,843	0,943	2 656,06	2 847,70	3 034,42	3,393,37
15	Бутен-1	*n*-C_4H_8	0,983	1,061	1,136	1,280	3 537,87	3 818,76	4 090,57	4 607,75
16	Метил-2 Пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	1,031	1,104	1,175	1,311	3 710,14	3 973,72	4 229,50	4 718,26
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	0,524	0,545	0,565	0,601	1 887,57	1 962,86	2 033,54	2 161,93
18	Бензол	C_6H_6	0,908	1,011	1,111	1,297	3 268,23	3 641,26	3 998,62	4 668,12
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	1,159	1,283	1,403	1,628	4 172,99	4 620,15	5 050,23	5 860,93
20	Азот	N_2	0,359	0,360	0,360	0,362	1 293,75	1 294,97	1 296,70	1 301,61
21	Гелий	He	0,258	0,258	0,258	0,258	927,74	927,74	927,74	927,74
22	Диоксид углерода	CO_2	0,446	0,460	0,474	0,499	1 605,52	1 656,35	1 704,91	1 795,52
23	Кислород	O_2	0,359	0,362	0,366	0,372	1 293,26	1 304,67	1 315,95	1 338,09
24	Аммиак	NH_3	0,430	0,440	0,451	0,471	1 547,97	1 585,20	1 622,25	1 695,78
25	Диоксид серы	SO_2	0,482	0,494	0,506	0,529	1 733,71	1 779,31	1 822,92	1 904,41
26	Сероводород	H_2S	0,424	0,429	0,434	0,443	1 527,57	1 544,37	1 561,17	1 594,77
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	0,423	0,424	0,426	0,429	1 521,44	1 526,44	1 532,03	1 544,96

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонка 35: Значение теплоемкости расчитаны по соотношению:

$$C_p\,(\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}) = \frac{C_p\,(\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}\,\text{K}^{-1})}{V}$$

где $V = 22{,}4141 \cdot 10^{-3}$ м^3 – мольный объем.

Аналогично для C_p, выраженных в Вт · ч · м$^{-3}$ · °C^{-1}.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1	2	3	36							
№	Компонент	Формула	Удельная объемная теплоемкость реального газа при постоянном давлении							
			Вт · ч · м$^{-3}$ (н) · °C^{-1}				Дж · м$^{-3}$ (н) · K^{-1}			
			0°C	25°C	50°C	100°C	273,15 K	298,15 K	323,15 K	373,15 K
1	Монооксид углерода	CO	0,362	0362	0,362	0,363	1 301,70	1 301,67	1 302,56	1 306,90
2	Водород	H_2	0,357	0,357	0,358	0,358	1 285,93	1 286,54	1 287,22	1 288,82
3	Метан	CH_4	0,428	0,443	0,458	0,490	1 540,94	1 594,17	1 649,34	1 764,83
4	Этан	C_2H_6	0,509	0,545	0,579	0,645	1 833,10	1 960,54	2 084,16	2 320,26
5	Пропан	C_3H_8	0,859	0,930	0,999	1,131	3 091,36	3 347,36	3 595,75	4 070,29
6	*n*-Бутан	*n*-C_4H_{10}	1,168	1,260	1,350	1,522	4 204,71	4 536,91	4 859,67	5 477,46
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10}	1,154	1,251	1,345	1,525	4 153,42	4 504,27	4 843,58	5 488,59
8	*n*-Пентан	*n*-C_5H_{12}	1,502	1,621	1,737	1,958	5 407,58	5 836,48	6 252,73	7 048,12
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	1,448	1,570	1,687	1,912	5 214,21	5 651,38	6 074,82	6 881,60
10	Диметил-2,2 пропан (*neo*-пентан)	*neo*-C_5H_{12}	1,468	1,597	1,720	1,954	5 286,09	5 747,54	6 192,34	7 033,62
11	*n*-Гексан	*n*-C_6H_{14}	1,840	1,986	2,128	2,398	6 624,66	7 150,26	7 659,96	8 632,84
12	*n*-Гептан	*n*-C_7H_{16}	2,294	2,476	2,652	2,988	8 258,45	8 913,09	9 547,72	10 758,47
13	Этен (этилен)	C_2H_4	0,508	0,543	0,577	0,643	1 828,48	1 955,60	2 078,91	2 314,41
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	0,752	0,806	0,859	0,961	2 707,48	2 902,82	3 093,16	3 459,06
15	Бутен-1	*n*-C_4H_8	1,018	1,099	1,177	1,326	3 666,21	3 957,30	4 238,97	4 774,90
16	Метил-2 Пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	1,068	1,144	1,217	1,358	3 844,73	4 117,87	4 382,93	4 889,42
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	0,529	0,550	0,570	0,606	1 904,72	1 980,70	2 052,02	2 181,58
18	Бензол	C_6H_6	0,999	1,113	1,222	1,427	3 595,51	4 005,89	4 399,03	5 135,57
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	1,365	1,512	1,652	1,918	4 915,24	5 441,93	5 948,51	6 903,42
20	Азот	N_2	0,360	0,360	0,360	0,362	1 294,40	1 295,62	1 297,36	1 302,27
21	Гелий	He	0,258	0,258	0,258	0,258	927,98	927,98	927,98	927,98
22	Диоксид углерода	CO_2	0,449	0,463	0,477	0,502	1 616,36	1 667,54	1 716,43	1 807,64
23	Кислород	O_2	0,360	0,363	0,366	0,372	1 294,56	1 305,98	1 317,27	1 339,43
24	Аммиак	NH_3	0,437	0,447	0,457	0,478	1 571,55	1 609,35	1 646,96	1 721,61
25	Диоксид серы	SO_2	0,493	0,506	0,519	0,542	1 776,33	1 823,05	1 867,74	1 951,23
26	Сероводород	H_2S	0,429	0,433	0,438	0,447	1 543,00	1 559,97	1 576,94	1 610,88
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	0,454	0,456	0,458	0,461	1 635,99	1 641,35	1 647,37	1 661,27

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонка 36: Значение теплоемкости расчитаны по соотношению:

$$C_p\,(\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3}(\text{Н}) \cdot \text{K}^{-1}) = \frac{C_p(\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})}{Z}$$

где Z: коэффициент сжимаемости (колонка 5; см. стр. 188).

Аналогично для $C_{\bar{p}}$ выраженных в Вт · ч · м$^{-3}$(Н) · °C^{-1}.

1	2	3	37							
№	Компонент	Формула	Удельная массовая теплоемкость при постоянном давлении (P = 101,325 кПа)							
			Вт · ч · кг$^{-1}$ · °C^{-1}				Дж · кг$^{-1}$ · K^{-1}			
			0°C	25°C	50°C	100°C	273,15 K	298,15 K	323,15 K	373,15 K
1	Монооксид углерода	CO	0,289 1	0,289 1	0,289 3	0,290 3	1 040,91	1 040,89	1 041,60	1 045,07
2	Водород	H_2	3,973 4	3,975 3	3,977 4	3,982 3	14 304,3	14 311,0	14 318,6	14 336,4
3	Метан	CH_4	0,596 6	0,617 2	0,638 6	0,683 3	2 147,72	2 221,91	2 298,80	2 459,77
4	Этан	C_2H_6	0,375 8	0,4019	0,427 2	0,475 6	1 352,72	1 446,77	1 537,99	1 712,22
5	Пропан	C_3H_8	0,427 3	0,462 6	0,497 0	0,562 6	1 538,13	1 665,51	1 789,10	2 025,21
6	*n*-Бутан	*n*-C_4H_{10}	0,431 1	0,465 2	0,498 3	0,561 6	1 552,06	1 674,68	1 793,82	2 021,86
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10}	0,426 2	0,462 2	0,497 1	0,563 3	1 534,45	1 664,07	1 789,42	2 027,71
8	*n*-Пентан	*n*-C_5H_{12}	0,428 4	0,462 3	0,495 3	0,558 3	1 542,12	1 664,44	1 783,14	2 009,97
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	0,421 6	0,457 0	0,491 2	0,556 4	1 517,79	1 645,05	1 768,30	2 003,15
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	*нео*-C_5H_{12}	0,430 2	0,467 7	0,503 9	0,572 4	1 548,61	1 683,79	1 814,10	2 060,56
11	*n*-Гексан	*n*-C_6H_{14}	0,426 9	0,4608	0,493 7	0,556 4	1 536,98	1 658,93	1 777,18	2 002,90
12	*n*-Гептан	*n*-C_7H_{16}	0,425 9	0,459 7	0,492 4	0,554 8	1 533,27	1 654,81	1 772,63	1 997,42
13	Этен (этилен)	C_2H_4	0,402 8	0,430 8	0,457 9	0,509 8	1 449,93	1 550,73	1 648,52	1 835,26
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	0,393 0	0,421 3	0,449 0	0,502 1	1 414,73	1 516,80	1 616,26	1 807,45
15	Бутен-1	*n*-C_4H_8	0,392 6	0,423 8	0,453 9	0,511 3	1 413,31	1 525,53	1 634,11	1 840,71
16	Метил-2 Пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	0,411 7	0,441 0	0,469 3	0,523 6	1 482,13	1 587,43	1 689,61	1 884,86
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	0,451 4	0,469 4	0,486 3	0,517 0	1 624,86	1 689,67	1 750,52	1 861,04
18	Бензол	C_6H_6	0,260 5	0,290 2	0,318 7	0,372 1	937,79	1 044,83	1 147,37	1 339,47
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	0,282 0	0,312 2	0,341 3	0,396 0	1 015,12	1 123,89	1 228,51	1 425,72
20	Азот	N_2	0,287 5	0,287 8	0,288 2	0,289 3	1 035,17	1 036,15	1 037,53	1 041,46
21	Гелий	He	1,443 0	1,443 0	1,443 0	1,443 0	5 194,72	5 194,72	5 194,72	5 194,72
22	Диоксид углерода	CO_2	0,227 1	0,234 3	0,241 2	0,254 0	817,68	843,57	868,30	914,45
23	Кислород	O_2	0,251 6	0,253 9	0,256 0	0,260 4	905,89	913,88	921,78	937,29
24	Аммиак	NH_3	0,565 9	0,579 5	0,593 1	0,620 0	2 037,30	2 086,29	2 135,05	2 231,83
25	Диоксид серы	SO_2	0,168 5	0,172 9	0,177 2	0,185 1	606,56	622,52	637,78	666,29
26	Сероводород	H_2S	0,279 1	0,282 1	0,285 2	0,291 3	1 004,61	1 015,66	1 026,71	1 048,80
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	0,525 8	0,527 5	0,529 5	0,534 0	1892,97	1 899,18	1 906,14	1 922,23

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонка 37: Значения теплоемкости рассчитаны по соотношению:

$$C_p(\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) = C_p(\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}\text{K}^{-1}) \times \frac{1\,000}{M}$$

где M – молекулярная масса в г. (колонка 4; см. стр. 288).

1	2	3	38		39		40	
№	Компонент	Формула	Пределы взрываемости в воздухе		Воздух сухой стехиометрического горения		Дымовые газы влажные стехиометрического горения	
			Нижн. % газа	Верхн. % газа	$м^3 \cdot м^{-3}$	$м^3(н) \cdot м^{-3}(н)$	$м^3 \cdot м^{-3}$	$м^3(н) \cdot м^{-3}(н)$
1	Монооксид углерода	CO	12,5	74,0	2,387	2,387	2,887	2,884
2	Водород	H_2	4,0	75,6	2,387	2,384	2,887	2,853
3	Метан	CH_4	4,9	15,0	9,548	9,566	10,548	10,516
4	Этан	C_2H_6	2,8	15,5	16,710	16,868	18,210	18,306
5	Пропан	C_3H_8	2,1	9,8	23,871	24,371	25,871	26,311
6	*н*-Бутан	$н\text{-}C_4H_{10}$	1,5	8,5	31,032	32,401	33,532	34,881
7	Метил-2 пропан (изобутан)	$и\text{-}C_4H_{10}$	1,8	8,5	31,032	32,373	33,532	34,851
8	*н*-Пентан	$н\text{-}C_5H_{12}$	1,4	8,3	38,193	41,582	41,193	44,685
9	Метил-2 бутан (изопентан)	$и\text{-}C_5H_{12}$	1,3	8,0	38,193	40,737	41,193	43,778
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	$нео\text{-}C_5H_{12}$	1,3	7,5	38,193	40,477	41,193	43,498
11	*н*-Гексан	$н\text{-}C_6H_{14}$	1,2	7,7	45,355	50,815	48,855	54,541
12	*н*-Гептан	$н\text{-}C_7H_{16}$	1,1	7,0	52,516	63,234	56,516	67,811
13	Этен (этилен)	C_2H_4	2,7	36,0	14,323	14,422	15,323	15,379
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	2,0	11,7	21,484	21,887	22,984	23,339
15	Бутен-1	$н\text{-}C_4H_8$	1,6	10,0	28,645	29,667	30,645	31,636
16	Метил-2 пропен (изобутен)	$и\text{-}C_4H_8$	1,8	9,6	28,645	29,667	30,645	31,636
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	1,5	100,0	11,935	12,037	12,435	12,515
18	Бензол	C_6H_6	1,2	8,0	35,806	39,369	37,306	40,934
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	1,2	7,1	42,968	50,580	44,968	52,816
20	Азот	N_2	–	–	–	–	–	–
21	Гелий	He	–	–	–	–	–	–
22	Диоксид углерода	CO_2	–	–	–	–	–	–
23	Кислород	O_2	–	–	–	–	–	–
24	Аммиак	NH_3	15,0	28,0	3,581	3,633	5,331	5,367
25	Диоксид серы	SO_2	–	–	–	–	–	–
26	Сероводород	H_2S	4,0	45,5	7,161	7,229	7,661	7,699
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	–	–	–	–	–	–

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонка 38: Согласно D'fpres A.T. Humphreys. – *Constantes thermophysiques des composants du gaz naturel et des fluides fpp-frentes.* (см. литературу стр. 297).

Колонки 39 и 40: Значения посчитаны, с учетом молярного объема равного $22,4141 \cdot 10^{-3}$ $м^3$, и коэффициента сжимаемости Z при горении в сухом воздухе и влажных продуктов, выделившихся при горении.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1	2	3	41			42	43	44		
№	Компонент	Формула	Состав влажных дымовых газов стехиометрического горения, $м^3 \cdot м^{-3}$			Точка росы дымовых газов стехиометрического горения, °C	Теоретическая температура горения в воздухе, °C	Коэффициенты, используемые для расчета показателей взаимозаменяемости		
			CO_2	$N_2 + Ar$	H_2O			Потенциал горения, *a*	Показатель желтых точек, *j*	Показатель обугливания, *b*
1	Монооксид углерода	CO	1.00	1.89	–	–	2 100.00	–	0.00	0.00
2	Водород	H_2	–	1.89	1,00	72.8	2 060.00	–	0.00	–
3	Метан	CH_4	1.00	7.55	2.00	52.9	1 940.00	1.00	1.00	1.00
4	Этан	C_2H_6	2.00	13.21	3.00	56.2	1 940.00	0.95	2.85	2.00
5	Пропан	C_3H_8	3.00	18.87	4.00	54.9	1 950.00	0.95	4.80	3.60
6	*n*-Бутан	*n*-C_4H_{10}	4.00	24.53	5.00	54.1	1 960.00	1.10	6.80	4.70
7	Метил-2 пропан (изобутан)	*i*-C_4H_{10}	4.00	24.53	5.00	54.1	1 960.00	1.10	6.80	4.70
8	*n*-Пентан	*n*-C_5H_{12}	5.00	30.19	6.00	53.7	2 020.00	1.15	8.80	6.00
9	Метил-2 бутан (изопентан)	*i*-C_5H_{12}	5.00	30.19	6.00	53.7	2 020.00			
10	Диметил-2,2 пропан (*нео*-пентан)	*нео*-C_5H_{12}	5.00	30.19	6.00	53.7	2 020.00			
11	*n*-Гексан	*n*-C_6H_{14}	6.00	35.85	7.00	53.3	–	(g)	12.00	10.00
12	*n*-Гептан	*n*-C_7H_{16}	7.00	41.52	8.00	53.1	–	(g)	15.00	13.00
13	Этен (этилен)	C_2H_4	2.00	11.32	2.00	51.4	2 020.00	1.75	2.65	2.80
14	Пропен (пропилен)	C_3H_6	3.00	16.98	3.00	51.4	2 070.00	1.25	4.80	6.00
15	Бутен-1	*n*-C_4H_8	4.00	22.65	4.00	51.4	2 040.00	1.50	6.80	7.00
16	Метил-2 пропен (изобутен)	*i*-C_4H_8	4.00	22.65	4.00	51.4	–	1.50	6.80	7.00
17	Этин (ацетилен)	C_2H_2	2.00	9.44	1.00	41.9	2 230.00	3.00	2.40	(g)
18	Бензол	C_6H_6	6.00	28.31	3.00	41.9	–	0.90	20.00	16.00
19	Метилбензол (толуол)	C_7H_8	7.00	33.97	4.00	43.8	–	(g)	16.00	20.00
20	Азот	N_2	–	–	–	–	–	–	–	–
21	Гелий	He	–	–	–	–	–	–	–	–
22	Диоксид углерода	CO_2	–	–	–	–	–	–	–	–
23	Кислород	O_2	–	–	–	–	–	–	–	–
24	Аммиак	NH_3	–	3.33	1.50	–	–	–	–	–
25	Диоксид серы	SO_2	–	–	–	–	–	–	–	–
26	Сероводород	H_2S	SO_2=1,00	5.66	1.00	–	–	–	–	–
27	Вода (в парообразном состоянии)	H_2O	–	–	–	–	–	–	–	–

Свойства чистых газов (продолжение).

Колонка 41: Значения посчитаны, при молярном объеме, принятом равным22,4141 · 10^{-3} $м^3$.

Колонка 42: Давление паров воды влажных дымовых газов, выраженное в мм. рт. столба, рассчитано по соотношению: $t = \frac{\text{объем в } м^3 \text{ паров воды}}{\text{объем в } м^3 \text{ дымовых влажных газов}} \times 760$

Значения точек росы получены из таблицы «Vapor pressure of water below 100°C» du Handbook of Chemistry and Physics

Колонки 43 и 44: Согла

2 ДОБЫЧА И ПЕРЕРАБОТКА

2.1. ВВЕДЕНИЕ

В течение десяти лет после второй мировой войны производство газа отождествлялось с перегонкой каменного угля, затем наступил период использования нефтяной продукции и, немного позже, природного газа, который вначале использовался как первоисточник для получения газа бытового назначения, а затем получил более широкое применение.

Число пунктов производства коммунального газа возросло с 245 в 1926 году (без Парижского региона) до 294 в 1955 году, затем снизилось до нуля к 1985 году.

Потребление газа постоянно растет во всех развитых странах, к тому же дальнейший его рост обеспечен уже подтвержденными запасами.

Данная глава "Добыча и переработка"учитывает эту тенденцию, которая соответственно повлияет на развитие транспортных и распределительных сетей, производство искусственного газа, все это будет способствовать бурному развитию промышленности природного газа.

Способ получения газа	Годы						
	1906 (1)	1926 (1)	1936 (1)	1955 (2)	1965 (2)	1975 (2)	1985 (2)
При переработке каменного угля	4 616	13 654	13 453	14 028	8 779	960	228
При переработке нефти (3)	–	–	–	1 314	8 777	4 936	1 623
Природный газ,	–	–	–	2 217	53 454	202 254	317 357
в том числе используемый для коммунального снабжения				300	6 569	4 275	0

(1) Источник I. N. S. E. E.
(2) Источник G. D. F.-D. E. C.
(3) Газ, полученный при крекинге или реформинге, пропан и т. д.

Количества и происхождение газов, распределяемых во Франции (ГВт · ч).

Годы / Страны	Производство			Потребление		
	1984	1990	2000	1984	1990	2000
Франция	63 (1)	35 (1)	18 (1)	303	290/350 (5)	350/407 (5)
Великобритания	379 (1)	407 (1)	372 (1)	514 (1)	582/640 (5)	523/640 (5)
ФРГ	166 (1)	143 (1)	130 (1)	481 (1)	523/582 (5)	523/640 (5)
Италия	133 (1)	116 (1)	116 (1)	313 (1)	349/407 (5)	407/465 (5)
Нидерланды	692 (1)	600 (1)	435 (1)	365 (1)	349/350 (5)	350 (5)
Норвегия	280 (1)	276 (1)	43 (*) (1)	12 (1)	10 (1)	–
Алжир	239 (2)	–	–	116 (***) (5)	198/256 (5)	349/465 (5)
Средний Восток (**)	509 (2)	695 (3)	970 (3)	517 (4)	582/814 (5)	872/1 280 (5)
СССР	6 880 (2)	–	–	5 743 (4)	6 900/7 100 (5)	9 000/9 400 (5)
США	4 857 (1)	4 850 (1)	4 500 (1)	5 002 (1)	4 500/6 300 (5)	4 000/6 000 (5)
Япония	19 (2)	–	–	432 (4)	523/640 (5)	580/756 (5)

(*) Оценки по эксплуатируемым и планируемым в эксплуатацию месторождениям.
(**) Средний Восток (Ирак, Иран, Эмираты Персидского залива и Саудовская Аравия).
(***) 1982.
(1) По данным Международного агентства энергии (1986).
(2) L. N. G. Digest (janvier 1986) p. 7.
(3) Gaz d'aujourd'hui (septembre 1982) p. 275.
(4) L. N. G. Digest (mars 1986) p. 8.
(5)U. I. I. G. Congres de Munich (1985), memoire H 10.

Производство и потребление природного газа в различных странах (ГВт · ч).

2.2. СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

Слова, выделенные в тексте курсивом, определены в словаре.

Кислота синильная

Химическая формула H–C = N (обозначение С.А.(*): цианистоводородная кислота). Встречается в очень небольших количествах в неочищенных газах, полученных от газификации угля или нефтяных остатков.

(*) Обозначение С.А. – обозначение, используемое в американском журнале Chemical Abstracts, позволяющее иметь доступ к большому числу библиографических ссылок.

А.Д.И.

См. *Дисульфоантрахинон.*

А.Д.И.П.

Коммерческое название процесса извлечения из газа сернистых соединений, запатентованного фирмой "Shell" и использующего для поглощения водный раствор *диизопропаноламина* (сокращено Д.И.П.А.).

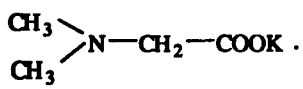
Смягчение

(По английски: sweetening): синоним *нейтрализации.*

Алкацид

Коммерческое название трех процессов *сероочистки* газа, запатентованных немецкой фирмой B.A.S.F. Наиболее часто для абсорбции используется водный раствор N-диметилглицина калия (процесс алкацид-ДИК).

Химическая формула:



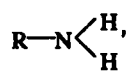
(Обозначение С.А.; N, N-диметилглицин калия).

Окись алюминия активированная

Кристаллический оксид алюминия (Al_2O_3) в виде гранул, удельная поверхность которых при соответствующей подготовке может достигать 300 $м^2 \cdot г^{-1}$. В виде шариков и таблеток этот адсорбент используется между прочим для того, чтобы получить, с помощью только одного процесса осушки, необходимую точку росы природного газа как по воде, так и по углеводородам. Французский производитель: фирма Rhône-Poulens.

Амин первичный

Амин с общей химической формулой

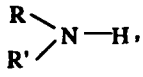


где R – углеводородный радикал.

Например: *моноэтаноламин* или *М.Э.А.*

Амин вторичный

Амин с общей химической формулой:

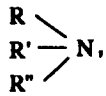


R и R' – два углеводородных радикала, которые могут быть одинаковыми.

Например: *диэтаноламин* или *Д.Э.А.*; *диизопропаноламин* или *Д.И.П.А.*

Амин третичный

Амин с химической формулой:



где R, R', R" – углеводородные радикалы, которые могут быть различными или одинаковыми.

Например: *метилдиэтаноламин* или *М.Д.Э.А.*

Амизол

Коммерческое название процесса *сероочистки* газа, запатентованного инженерным обществом "Lurgi". Он использует в качестве абсорбента смесь метанола и *моноэтаноламина* (или *диэтаноламина*).

Бенфилд

Коммерческое название процесса *сероочистки* газа, запатентованного американской фирмой "Union Carbide". В качестве абсорбента используется раствор карбоната калия (поташа) с добавлением ингибитора коррозии и катализатора (*Д.Э.А.*). Вариант "HI–пюр" процесса включает другую систему абсорбции с использованием амина.

Бюкачек (таблица)

Таблица позволяет рассчитать содержание паров воды в природном некислом газе, содержащем небольшое количество азота и углеводорода C_{4+} для данных давлений и температуры (*I.G.T. Reseach Bulletin*, № 8, 1955).

Катакарб

Коммерческое название процесса *сероочистки* газа, запатентованного фирмой Elickmeyer et Cie и использующего в качестве абсорбента раствор карбоната калия (поташа) с добавкой катализатора, состоящего из бората амина.

С.Е.С.А.

"Carbonisation et charbons actifs" – французская компания производящая твердые адсорбенты (активированные угли, молекулярные сита).

Колд Фрак

Процесс снижения точки росы по углеводородам природного газа или охлаждения газа путем простого изоэнтальпийного расширения последнего.

Превращение CO с помощью паров воды

Промышленный процесс переработки искусственного газа, состоящий в превращении монооксида углерода, который содержится в водороде, с помощью перегретого водяного пара согласно реакции:

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Д.Э.А.

Аббревиатура *диэтаноламина*

Дезазотилование

Синоним *денитрофикации* (извлечения азота).

Д.Э.Г.

Аббревиатура *диэтиленгликоля*

Дегазолинаж (отбензинивание)

Промышленный процесс переработки природного газа, заключающийся в отделении всех углеводородов кроме метана. В точном смысле процесс заключается в извлечении *газолина* (конденсата – углеводорода C_{5+}). Однако этот термин надлежит использовать и в более широком смысле, когда речь идет об отделении бутана и пропана (иногда также этана) и других углеводородов C_{5+}. Кроме того используется часто термин *осушка*. Процесс имеет цель предотвратить выпадение конденсата в газопроводах или отделение бутана, пропана и этана, так как, будучи выделенные, они стоят дороже, чем газ.

Денитрофикация

Промышленный процесс переработки природного газа, заключающийся в отделении фракций более или менее тяжелых чем азот, который в нем содержится. Процесс состоит в получении коммерческого газа с более высокой калорийной способностью и исключении транспорта инертного газа.

Нейтрализация (извлечение кислых компонентов)

Промышленный процесс переработки природного газа, заключающийся в отделении от него группы кислых компонентов, т.е. углекислого газа, сероводорода, а также *меркаптанов* и *COS* (сероокись углерода). Цель процесса – в извлечении, с одной стороны, инертных, а, с другой, – токсичных и коррозионных компонентов.

Обессеривание избирательное

Промышленный процесс переработки природного газа, заключающийся в отделении сероводорода и очень малых количеств, насколько это возможно, углекислого газа. Выгодность процесса зависит от конкретного применения.

Возгонка

См. *пирогенизация*

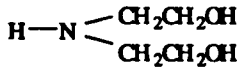
Д.Г.А.

Аббревиатура *дигликольамина*

Диэтаноламин

Сокращенно: Д.Э.А. *Амин вторичный* (обозначение С.А.: этанол, 2, 2' - имино-*бис*).

Химическая формула:

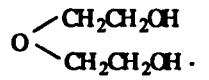


Применяется в виде водного регенерируемого раствора для извлечения кислых компонентов из природного газа.

Диэтиленгликоль

Сокращенно: Д.Э.Г. (Обозначение С.А.: этанол, 2, 2' - окси-*бис*).

Химическая формула:

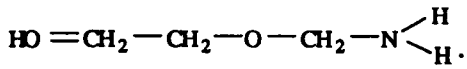


Применяется для осушки природного газа, когда температура подготовки газа находится в пределах 0 - 20°С, или для предотвращения образования гидратов в трубопроводах.

Дигликольамин

Сокращенно: Д.Г.А. (Обозначение С.А.: этанол, 2 - 2 - аминоэтока). *Амин первичный.*

Химическая формула:

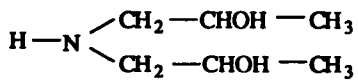


Применяется в виде водного регенерируемого раствора для извлечения кислых компонентов из природного газа. Процесс, запатентованный северо-американской инженерной компанией "Fluor".

Диизопропаноламин

Сокращенно: Д.И.П.А. (Обозначение С.А.: 2 пропанол, 1, 1' - имино-*бис*). *Амин вторичный.*

Химическая формула.



Применяется для извлечения кислых компонентов или в виде водного регенерируемого раствора (А.Д.И.П.-процесс) или в виде смеси с сульфоланом (процесс *Сульфинол*). Эти два процесса запатентованы компанией "Shell".

Диметиловый эфир полиэтиленгликоля

Сокращенно: Д.М.П.Э.Г.

Это название используют как упрощенное для физического раствора в процессе *Селексол.* Типичный состав данного раствора следующий:

Диметиловый эфир триэтиленгликоля 12%.

Диметиловый эфир тетраэтиленгликоля 24%.

Диметиловый эфир пентаэтиленгликоля 25%.

Диметиловый эфир гексаэтиленгликоля 19%.

Диметиловый эфир гептаэтиленгликоля 11%.

Диметиловый эфир октаэтиленгликоля 6%.

Диметиловый эфир нонаэтиленгликоля 3%.

Д.И.П.А.

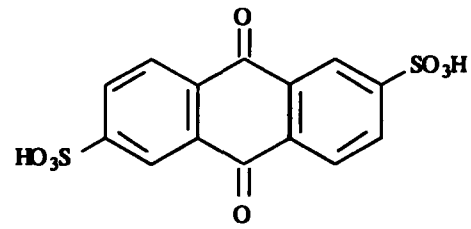
Аббревиатура *диизопропаноламина.*

Дисульфоантрахинон

(или антрахинодисульфоновая кислота).

Сокращенно: А.Д.К. (Обозначение С.А.: 2,6 - антрацен дисульфоник асид - 9,10 диоксо).

Химическая формула



Применяется в процессе *Стретфорд* как агент окисления H_2S в серу преимущественно в виде базового раствора, который затем регенерируется.

Д.М.Э.П.Г.

Аббревиатура *диметилового эфира полиэтиленгликоля.*

Д.Н.Л.

Дистиллят нефтяной легкий.

Драй Боксес (Dry boxes)

Процесс обессеривания, который называется также *Айрон Стронж* (см. это слово).

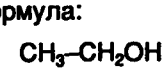
Э.Г.

Аббревиатура *этиленгликоля*, синоним *моноэтиленгликоля* (см. это слово).

Этанол

(или этиловый спирт)

Химическая формула:



Это ингибитор гидратообразования, но редко применяемый в промышленности.

Этиленгликоль

Сокращенно: Э.Г. Синоним *моноэтиленгликоля* (см. это слово).

Флюор

Название северо-американской фирмы, которая запатентовала под этим названием процесс *Флюор*, процесс обессеривания газа методом физической абсорбции, использующий пропиленкарбонат.

Фреон

Коммерческое название гаммы фтористых углеводородов, запатентованных северо-американской фирмой Du Pont de Nemours. В широком смысле обозначает фтористые углеводороды независимо от их изготовителя. Некоторые используются в холодильных циклах. Французский изготовитель Atochem.

Сжиженный нефтяной газ (С.Н.Г.)

Смесь углеводородов C_3 и C_4.

Это – выражение, обозначавшее вначале фракцию газов, легко конденсирующуюся путем охлаждения или сжатия, получаемую при *стабилизации* сырой нефти. Эта фракция углеводородов, состоящая в основном из пропана и бутана, в результате ректификации дает товарный пропан и товарный бутан.

Это название (С.Н.Г.) в дальнейшем было распространено с товарного пропана и товарного бу-

тана на смеси пропана, пропена, бутана, бутена, имеющих аналогичные физические характеристики (давление паров, плотность и т.д.), что и предыдущие, но полученные в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности (крекинг и реформинг).

Наконец, некоторые природные газы имеют значительное содержание пропана и бутана. Можно отделить тяжелую фракцию (пропан, бутан) для того, чтобы они не сконденсировались в газопроводах, или с целью, чтобы продать их отдельно по более высокой цене. Эта тяжелая фракция называется *жидкий природный газ* (Ж.П.Г.) (не путать с С.П.Г. – сжиженный природный газ), с имеющим аналогичный состав (С.Н.Г.). В широком смысле, его также называют С.Н.Г.

Газ синтезированный

Газ, произведенный с помощью различных синтезов (NH_3, метанол и т.д.), состоящий из H_2 и CO, полученный путем газификации различных углеродистых и гидроуглеродистых продуктов.

Газы промышленные

Промышленными газами называют химические продукты, находящиеся в газообразном состоянии в нормальных условиях (0°C, 1013 мбар), полученные в чистом виде и предназначенные для распределения, в основном, промышленным и коммунальным потребителям для различного использования.

Способы распределения промышленных газов зависят обычно от их термодинамической характеристики и транспортируемого количества. Наиболее часто используемые промышленные газы представлены в таблице.

(Не путать с горючими газами промышленного использования, которые представляют собой газовые смеси (на базе CO, H_2, CH_4), поставляемые по газопроводам промышленным потребителям для отопительных нужд или химического синтеза).

Газификация

Процесс превращения веществ, содержащих углерод и водород, в горючий газ под действием высокой температуры и различных химических реагентов.

Таким образом, "генераторный газ" получается путем неполного окисления угля в воздухе; гидрогаз получается путем реакции водяного пара с углем при высокой температуре.

Оксигидрогазификация – это процесс, в котором две предыдущие реакции:

— неполное окисление в кислороде, реакция экзотермическая,

— действие водяного пара, реакция эндотермическая,

реализуются одновременно (проводят с помощью кислорода, а не воздуха, чтобы исключить действие азотного балласта).

Кроме того, гидрогазификация угля это вариант гидропревращения угля, т.е. гидрогенизация – прямая или косвенная – предназначенная для получения жидкостей, используемых как горючее; большинство процессов гидропревращения угля направлено на получение жидких продуктов, однако некоторые процессы были задуманы для получения с помощью более совершенной гидрогенизации, Г.П.С.

Газолин

Жидкость, состоящая в основном из углеводородов $C_{5+в}$, содержащихся в природном газе, полученная на выходе установки *осушки* или *отбензинивания.*

Силикагель

Адсорбент, состоящий из обезвоженного геля кремнезема.

Используется промышленно для получения, с помощью только одного процесса *осушки,* необходимой точки росы природного газа по воде и точки росы по углеводородам. Французский производитель: фирма Rhône - Poulens.

Джаммарко-Ветрокок

Сокращенно: *Д.В.* Процесс *обессеривания* газа, использующий для абсорбции раствор карбоната калия с добавками солей мышьяка. Существует множество вариантов по удалению углекислого газа, полному извлечению кислых компонентов, *избирательному обессериванию.* Он используется только для газов с небольшим содержанием H_2S (<1,5% объемн.).

Гликоль

Гликолями называют все вещества общего химического состава

$$HO–CH_2–C_n–H_{2n}O_x–CH_2–OH$$

	Основное производство	Распределение			Основное использование
		Большая масса	Средние поставки	Мелкие поставки	
Кислород	Сжижение из воздуха	Газопровод, 40 бар	Цистерны, жидкость при –180°C	Стальные баллоны на 200 бар	— Черная металлургия — Сварка и кислородная резка — Госпитали — Химический синтез
Азот	Сжижение из воздуха	Газопровод, 40 бар	Цистерны, жидкость при –190°C	Стальные баллоны на 200 бар	— Инертность — Получение холода
Ацетилен C_2H_2	Карбид + вода; электрическая дуга	Нет (безопасность)	Нет (безопасность)	Баллоны, заполненные пористым материалом, пропитанным ацетоном	— Сварка и кислородная резка — Химия
Диоксид углерода (углекислый газ CO_2)	Совместное с производством аммиака	Газопровод	Цистерны, жидкость при –20°C	Стальные баллоны (жидкость) 200 бар	— Инертность — Газированные напитки — Получение холода (сухой лед)

Наиболее часто используемые промышленные газы.

В подготовке газа обозначают одинаково *моноэтиленгликоль, диэтиленгликоль, триэтиленгликоль*, которые используют для извлечения паров воды из природного газа.

Г.П.С.

Газ природный синтезированный или газ природный замещения (S.N.G. – по-английски)

На самом деле этим неподходящим выражением обозначают искусственный газ, достаточно богатый метаном, чтобы быть заменимым природным газом, обычно транспортируемым по общественным распределительным сетям.

С.Н.Г.

Сокращение сжиженного нефтяного газа (L.P.G. по-английски).

Д.В.

Сокращение *Джаммарко-Ветрокок.*

Хайнес

Процесс *избирательного обессеривания* с помощью молекулярных сит, регенерация сит, насыщенных H_2S, осуществляется горячим газом, содержащим SO_2, чтобы получить серу. Соответствует извлечению низкого содержания H_2S (<0,1 объемн.).

Гаммершмидт (уравнение...)

Экспериментальное уравнение, позволяющее определить количество ингибитора, которое нужно ввести в газ для предотвращения *гидрата.* В уравнение вводят величины понижения температуры гидратообразования, молекулярной массы ингибитора и константы, характеризующие ингибитор.

"Горячий поташ"

Процесс извлечения кислых компонентов из природного газа, использующий для абсорбции раствор карбоната калия при температуре 70 - 90°С, откуда и происходит название процесса.

Гидраты

Твердые соединения, которые образуют с водой в жидком состоянии наиболее легкие углеводороды (метан, этан, пропан и *н*-бутан), а также сероводород и углекислый газ. Они могут образовываться при давлении несколько десятков бар и температурах порядка 25°С и приводить к перекрытию трубопроводов. Предотвратить этот процесс можно, удаляя воду из газа или вводя в поток газа ингибиторы гидратообразования.

Гидрообессеривание

Процесс состоит в превращении в сероводород свободной серы, находящейся в нефтяных фракциях (хвостовые газы), с использованием водорода в качестве восстановителя. Полученный H_2S, который находится в газообразном состоянии, вместе с непрореагировавшим водородом отделяется одним из процессов *удаления кислых компонентов.*

Ф.И.Н. Фюгапол

Процесс *избирательного обессеривания* газа прямым получением серы, запатентованный французским институтом нефти (Ф.И.Н.)

Айрон Стронж (Iron Sponge).

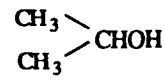
Также называется Драй Боксес (Dry Boxes). Процесс *обессеривания* газа путем образования сульфида железа на твердом реактиве из древесных стружек, пропитанных гидратированным оксидом железа Fe_2O_3–H_2O. Процесс очень старый, все меньше используемый, пригодный для очень малого содержания сернистых соединений.

Изопропанол

(или изопропиловый спирт)

(Обозначение С.А.: 2 - пропанол).

Химическая формула:



Катц (метод...)

Приближенный, но довольно простой метод определения области давления и температуры, где образуются гидраты газа, базирующийся на относительной плотности газа по воздуху.

Катц и Карсон (метод...)

Более точный метод расчета давления и температуры образования гидратов с использованием констант равновесия системы газ–вода–гидрат для каждого компонента.

Коппер-Тотцек

Германский процесс оксигидрогазификации на подвижном слое, разработанный фирмой "Kopper", теперь вошедшей в группу "Krupp".

Ж.П.Г.

(Жидкий природный газ).

См. *С.Н.Г.*

"Лурги"

Коммерческое название "Metallurgische Gesellschaft A. G.", германской инженерной компании (металлургия, химия), филиала "Metall Gesellschaft A. G.". Эта фирма использует в частности многочисленные патенты по оксигидрогазификации угля в неподвижном слое и по переработке газа (процессы Атизол, Пуризол, Ректизол и др.).

Мак Кито (номограмма...).

Дает влагосодержание газа в зависимости от давления и температуры.

М.Д.Э.А.

Сокращение *метилдиэтаноламина.*

М.Э.А.

Сокращение *моноэтаноламина.*

М.Э.Г.

Сокращение *моноэтиленгликоля.*

Меркаптаны

Тиоорганические соединения с общей формулой:

R–SH

R – углеводородный радикал. Наиболее простые (метилмеркаптан, этилмеркаптан, пропилмеркаптан) могут находиться в небольших количествах в природных газах.

Мерокс

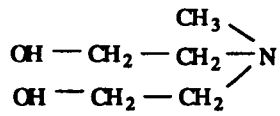
Коммерческое название одного из процессов, предназначенного для удаления меркаптанов, содержащихся в С.Н.Г. Лицензируется северо-американской фирмой U.O.P.

Метилдиэтаноламин

Сокращенно: М.Д.Э.А.

Третичный амин (Обозначение С.А.: этанол, 2, 2'- метилл-имино-*бис*).

Химическая формула:



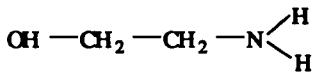
Используется в промышленном масштабе при *избирательном обессеривании.*

Моноэтаноламин

Сокращенно: М.Э.А.

Первичный амин (Обозначение С.А.: этанол, 2 - амин)

Химическая формула:



Используется в промышленном масштабе при *извлечении кислых компонентов.*

Моноэтиленгликоль
(или просто этиленгликоль)

Сокращенно: М.Э.Г. или Э.Г.

(Обозначение С.А.: 1, 2 - этандиол).

Химическая формула:

$$OH–CH_2–CH_2–OH$$

Используется для осушки газов и ингибирования *гидратов*, когда температура газа ниже 0°С.

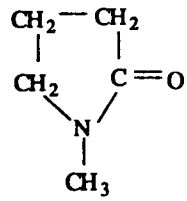
Нафта

Тяжелый бензин, фракция перегонки нефти, заключенная между газолином и керосином, часто используемая как основа для каталитического риформинга.

N-метилпирролидон

(Обозначение С.А.: 2 - пирролидон, 1 - метил).

Химическая формула



Физический раствор используется для *извлечения кислых компонентов из газа* в процессе *Пуризол.*

Сероокись углерода

(Обозначение С.А.: оксид-сульфид углерода)

Присутствует в небольших количествах (несколько сотых миллиграмма в кубическом метре) в некоторых природных газах.

Пенг-Робинсон (уравнение состояния)

Одно из уравнений состояния, связывающее P, V, T газа, предназначенное для определения состояния реального газа.

Общий вид:

$$P = RT/(v - b) - \alpha a/[v + (1 + \sqrt{2})b][v + (1 - \sqrt{2})b],$$

где:

a и *b* являются функциями от T_{cr} и P_{cr}, α является функцией от $T_{ri} = T/T_{cr}$, приведенной температуры *i*-го компонента и ацентрического фактора ω_i.

Фенолы

Компоненты с общей химической формулой:

$$R–(OH)_m$$

R – ароматическое кольцо.

Не находятся в природных газах, но присутствуют в неочищенном синтетическом газе.

Пуризол

Процесс *извлечения кислых компонентов* из газа физическим раствором, запатентованный германской фирмой "Lurgi" и использующий для абсорбции *n-метилпирролидон.*

Пирогенизация или возгонка

Действие нагреванием на твердые вещества, содержащие углерод и водород (каменный уголь, древесина и т.д.), чтобы получить, с одной стороны, горючий газ (каменноугольный газ и т.д.), а, с другой стороны, твердый сухой горючий осадок (кокс, древесный уголь и т.д.).

Ребойлер "Кетла"

Ребойлеры это теплообменники, расположенные вблизи днища колонны регенерации (или дистилляции), предназначенные для выпаривания части физических или химических растворов с помощью пара. Выпаренный раствор представляет паровое орошение. Ребойлеры "Кетла" это трубчатые горизонтальные теплообменники, которые имеют обширную паровую камеру, позволяющую разделить произведенный пар и жидкость.

Реклаймер (английское слово)

Аппарат, предназначенный для отделения побочных продуктов разложения жидкости, циркулирующей в промышленный установке. Этот аппарат часто имеется в установках по *извлечению кислых компонентов* с помощью М.Э.А.

Ректизол

Процесс извлечения кислых компонентов из коммерческого газа, запатентованный западногерманской инженерной фирмой "Lurgi" и использующий в качестве физического раствора метанол.

Риформинг

Переработка углеводорода (обычно тяжелого бензина или *нафта*, дистилляционной фракции) с целью получения более легких продуктов.

R.S.H.

Сокращение, используемое для обозначения *меркаптанов*, получаемое из общей химической формулы этих компонентов.

Скруббер (английское слово)

Аппарат, предназначенный для очистки газа от примесей путем контакта с жидкостью, часто называемый промывочной колонной.

Осушка

Когда речь идет о подготовке газа, этим словом называют, главным образом, установки, предназначенные для извлечения из газа паров воды, чтобы снизить точку росы. Могут также называть установки по извлечению более тяжелых углеводородов с целью снижения точки росы по углеводородам. Некоторые процессы (адсорбция окисидом алюминия или силикагелем) осуществляют одновременно эти две осушки.

Селексол

Процесс извлечения из газа кислых компонентов, лицензируемый северо-американской фирмой "Allied Chemical", и использующий в качестве растворителя *диметиловый эфир пропилатиленгликоля.*

Сепаратор температурный (низкотемпературный)

Процесс извлечения тяжелых углеводородов с помощью охлаждения, запатентованный французской фирмой N.A.T.

Сепазол

Процесс *извлечения* из газа кислых компонентов, лицензируемый западно-германской фирмой B.A.S.F. и использующий в качестве растворителя смесь метилизопропиловых эфиров олигоэтиленгликолей.

Шарма и Кэмпбел (метод...)

Один из методов, позволяющий определить влагосодержание природного газа.

С.Н.П.А. - Д.Э.А.

Процесс *извлечения кислых компонентов*, лицензируемый фирмой "Elf Aquitaine" и использующий в качестве химического растворителя раствор *диэтаноламина* повышенной концентрации.

Соаве–Редлих–Квонг (уравнение состояния...).

Одно из уравнений, устанавливающих связь между давлением, температурой и объемом природного газа. Обобщенный вид:

$$P = \frac{RT}{(v-b)} - \frac{\alpha a}{v(v+b)},$$

где:

$$\alpha = [1 + m_i(1 - T_{ri}^{0,5})]^2$$

a и b – константы, зависящие от T_{ci} и P_{ci};
m_i – константа i – го компонента; $T_{ri} = T/T_{ci}$, приведенная температура i-го компонента.

Сплит-Стрим

Наименование, данное установке извлечения кислых компонентов, где расход растворителя разделяется на две части, чтобы вводить или отбирать в двух точках абсербера или десербера с целью оптимизации потребления энергии.

Стабилизация

Удаление легких фракций из бензина, чтобы снизить давление насыщенных паров до требований нормы.

Стретфорд

Процесс *избирательного обессеривания*, производящий непосредственно элементарную серу, лицензируемый "British Gas". Пригоден для извлечения небольшего содержания H_2S. Используется водный раствор содержащий карбонат и бикарбонат натрия, ванадат натрия и натриевую соль *дисульфоантрахинона.*

Стриппинг

Вовлечение одного или нескольких летучих составляющих жидкости в контакт с газом.

По французски "Strippage".

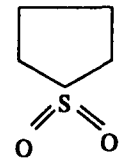
Сульфинол

Процесс полного *извлечения кислых компонентов*, лицензируемый фирмой "Shell" и использующий для абсорбции смесь *диизопропаноламина* (химический растворитель), *сульфолана* (физический растворитель) и воды.

Сульфолан

Одна из составных частей раствора, используемого в процессе *Сульфинол* (Обозначение С.А.: тиофен, тетрагидро-, 1, 1 - диоксид).

Химическая формула



Сероуглерод.

Более точно дисульфид углерода (Обозначение С.А.: карбон дисульфид).

Химическая формула: CS_2

Такахакс

Процесс *избирательного обессеривания*, получающий непосредственно элементарную серу.

Использует водный раствор карбоната натрия и гидросульфоната нафтахинона.

Молекулярные сита

Имя, данное одному из видов адсорбентов, цеолитам, которые характеризуются строго определенными размерами пор. Абсорбируют молекулы размерами меньше диаметра пор и не абсорбируют молекулы большие по размеру, откуда кажется эффект сит. Наряду с молекулярными ситами имеются названия цеолиты.

В переработке газа используются для осушки и извлечения небольших концентраций сернистых соединений.

Т.Э.Г.

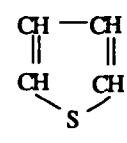
Сокращение *триэтиленгликоля.*

Тексако

Американская нефтяная компания, которая разработала процесс оксигидрогазификации в подвижном слое, применяемый для нефтяных остатков и угля.

Тиофен

Состав формулы:



Присутствует в неочищенном синтетическом газе. В общем случае тиофеном называют побочные продукты заменяющие данный состав.

Трейкел и Кэмпбел (метод...)

Один из предложенных методов определения зоны (давление и температура) образования гидратов природного газа.

Триэтиленгликоль.

Сокращенно: Т.Э.Г. (Обозначение С.А.: этанол, 2, 2' - 1, 2 - этанедил-*бис* (окси)*бис*-).

Химическая формула :

$$HO–CH_2–CH_2–O–CH_2–CH_2–O–CH_2–OH$$

Используется для осушки газов, когда температура контакта по крайней мере минус 20°С.

Таунсенд.

Процесс *избирательного обессеривания*, получающий непосредственно серу и использующий в качестве поглотителя триэтиленгликоль, в котором растворяется SO_2.

Турбодетандер

Слово английское: процесс расширения газа в турбине.

Служит одновременно для охлаждения газа через изоэнтропийное расширение и получения энергии.

И.С.А.R..

Процесс удаления углекислого газа, запатентованный северо-американской фирмой "Union Carbide", осуществляемый водным раствором М.Э.А. 5Н и ингибитором коррозии, не опубликованным.

Вайя. (график...)

Один из предложенных методов для предсказания влагосодержания природного газа.

Винклер.

Германский процесс оксигидрогазификации см. в разд. 1. 15.

2.3. СЫРЬЕ

2.3.1. Угли

Классификация углей по их свойствам согласно Afnor* (NF M 10-001 август 1972 года), (интернациональная классификация).

Угли классифицированы по своим свойствам с помощью условного трехзначного числа, соответствующего трем критериям физико-химических свойств: 1-ое – обозначает класс, 2-ое – группу, 3-е – подгруппу.

2.3.1.1. Классификация углей

2.3.1.1.1. Разделение на классы

См. таблицу на с. 308.

2.3.1.1.2. Подразделение на группы

Подразделение согласно способности к спеканию, выражающей состав быстро нагретого угля.

2.3.1.1.3. Подразделение на подгруппы

Подразделение согласно способности к коксованию, выражающей состав медленно нагретого угля.

*Afnor – Французское общество стандартизации. – Прим. ред.

Номер группы	Способность к спеканию	
	По индексу вспучивания (стандарт NF M 11-001)	По индексу Roga (стандартI.S.O. 335)
0	0 - 1/2	0 - 5
1	1 - 2	>5 - 20
2	21/2 - 4	>20 - 45
3	4	>45

Классификация углей по группам.

Номер подгруппы	Способность к коксованию	
	Согласно дилатометрическому анализу Одибера-Арну (стандарт NF V 11-006, масимальное расширение : 3°С в минуту)	Согласно анализу Грей-Кинг (стандарт I.S.O. 502 (тип кокса))
0	Не разрыхляются	A
1	Только усадка	B-D
2	0 и менее	E-G
3	≥0 - 50	G_1-G_4
4	≥50 - 140	G_5-G_8
5	≥140	≥G_8

Класификация углей по подгруппам.

Номер класса	Теплота сгорания высшая (мокрый продукт*, свободный от золы) в		Индекс летучих веществ (сухой продукт, свободный от золы), %	
	кВт · ч · кг$^{-1}$	ккал · кг$^{-1}$		
0			<3	
1 A			3 до 6,5	
1 B			6,5 до 10	
2			10 до 14	
3			14 до 20	
4			20 до 28	
5			28 до 33	
				Для сведения
6	>9,01	>7 750		33 до 41
7	8,37 до 9,01	7 200 до 7 750 (включительно)	>33	33 до 44
8	7,09 до 8,37	6 100 до 7 200 (включительно)		35 до 50
9	6,63 до 7,09	5 700 до 6 100 (включительно)		42 до 33

* Эта влажность соответствует воде, удерживаемой в продукте в атмосфере при 30°C и 96% влажности.

Распределение углей по классам.

Группы, определенные по спекаемости		Классификация углей по свойствам										Подгруппы, определенные по способности к коксованию	
Индекс набухаемости в тигле	номер группы	Условные номера										номер подгруппы	максимальное расширение
Больше 4	3					435	535	635				5	Более 140
					334	434	534	634				4	50 до 140
					333	433	533	633	733			3	0 до 50
					332	432	532	632	732	832		2	0 и ниже
					a *b*								
2,5 до 4	2				323	423	523	623	723	823		3	0 до 50
					322	422	522	622	722	822		2	0 и ниже
					321	421	521	621	721	821		1	Только усадка
1 до 2	1			212	312	412	512	612	712	812		2	0 и ниже
				211	311	411	511	611	711	811		1	Только усадка
0 до 1,5	0		100 A B	200	300	400	500	600	700	800	900	0	Не разрыхляется
Номер класса		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Индекс летучих веществ		0 до 3	3 до 10: 3 до 6,5; 6,5 до 10	10 до 14	14 до 20	20 до 28	28 до 33	Более 33	Более 33	Более 33	Более 33		
Высшая теплота сгорания (кВт · ч · кг$^{-1}$)		–	– –	–	– –	–	Sup до 9,01	8,37 до 9,01	7,09 до 8,37	6,63 до 7,09			

Классы определены по индексу летучих веществ или высшей теплоте сгорания.

Сводная таблица.

Обозначения	Индекс летучих веществ (по отношению к чистому топливу) согласно стандарту NF M 03-004		Индекс вспучивания согласно стандарту NF M 11-001	
	Верхний предел	Нижний предел	Верхний предел	Нижний предел
Антрациты		≤8	Пылевидный остаток	
Тощий или антрацитовый	≥8	≤14	«	«
Тощий	≥12	≤16		<1,5
	≥13	≤16		
Полужирный	≥16	≤22	>1,5	<2,5
Жирный: короткопламенный	>18	<22	>2,5	
Жирный	>22	<27	>2,5	
Жирный: собственно жирный	>27	<40	>4	
Пламенный: жирный	>30	<40	>2	<4
Пламенный	>40			<4
Пламенный: сухой	>34		Пылевидный, либо ≤2	

Французская классификация по качеству.

2.3.1.2. Химический состав угля

Уголь содержит:

— органическую часть,
— минеральную часть (золу).

Органическая часть (которая обогащаема) содержит углерод, но также и водород, кислород, азот, серу, возможно немного хлора. Эти различные компоненты расположены в соответствии со строением макромолекул ароматического ряда. Для того, чтобы лучше себе представить относительную значимость каждого из компонентов, удобно использовать "сокращенную формулу" угля.

$$CH_{0,8}O_{0,1}N_{0,02}S_{0,02}Cl_6$$

Водород и кислород, а также азот, сера и хлор участвуют в процессе газификации. Последние из этих элементов лежат в основе нежелательных продуктов, содержащихся в газах, полученных из угля.

Минеральная часть угля (зола) может содержать в различных пропорциях пириты и тяжелые металлы.

2.3.2. Характеристика жидких нефтепродуктов.

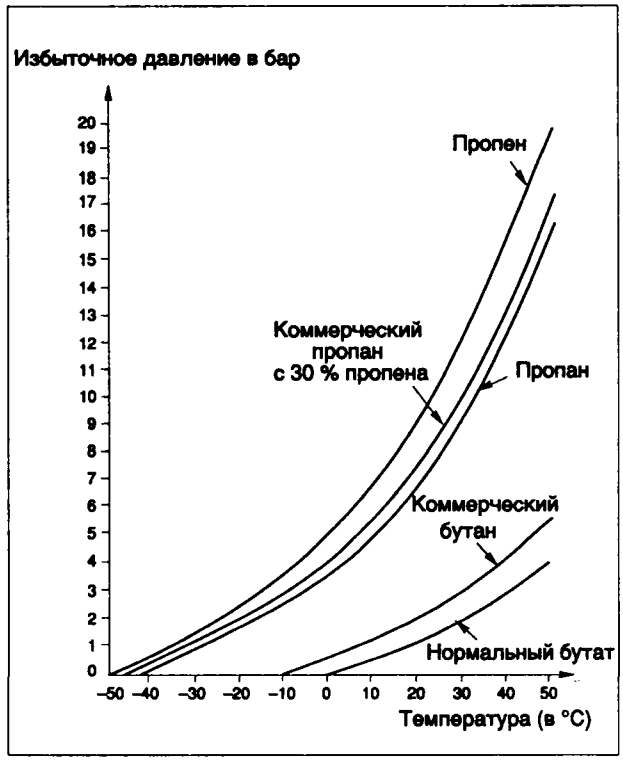
См. таблицу на стр. 310.

2.3.3. Характеристики коммерческих пропана и бутана.

См. разд. 5.1.1.2.

	Коммерческий пропан	Коммерческий бутан
C_2H_6 % объемные	0,2	–
C_3H_8 % объемные	85,6	12,3
C_3H_6 % объемные	13,6	3,6
C_4H_{10} % объемные	0,6	67,8
C_4H_8 % объемные	–	16,3
Высшая теплота сгорания, кВт · ч · м$^{-3}$	28,0	35,0
Низшая теплота сгорания, кВт · ч · м$^{-3}$	25,8	32,3
Относительная плотность	1,55	1,97

Характеристики коммерческих бутана и пропана: характерный пример.



Пропан-бутан. Давление паров сжиженных нефтяных газов.

Характеристика	Afnor или ASTM	Бензин авто NFM 15-001	Топливо высшего качества NF 15-005	Бензин H NFM 15-005	Уайт-спирт NFM 15-006	Ламповый керосин NF 15-003	Газойль (моторный) NFM 15-007	Мазут домашний NFM 15-008	Мазут легкий NFM 15-009	Мазут тяжелый №1 NFM 15-010	Мазут тяжелый №2	Мазут тяжелый №2 BTS
Зола	NF M 07-045						*не дозируема*					
Коррозия на медной пластинке	NF M 07-015	3 ч при 50°C 1b max	3 ч при 50°C 1b max	3 ч при 50°C 1b max	3 ч при 100°C 1a max	3 ч при 50°C 1b max						
Фракционный состав	NF M 07-002	10% или более при 70°C 50% или более при 140°C 95% или более при 195°C Температура выкипания ≤205°C, остаток < 2,5% по объему	10% или более при 70°C 50% или более при 140°C 95% или более при 195°C Температура выкипания ≤205°C, остаток < 3% по объему	10% или более при 70°C 50% или более при 140°C 95% или более при 195°C Температура выкипания ≤205°C, остаток < 2,5% по объему	Температура ≥135°C Температура выкипания ≤205°C, остаток <1,5% по объему потери ≤1% по объему	менее 90% при 210°C 65% или более при 250°C 80% или более при 285°C	менее 65% при 250°C 85% или более при 350°C	менее 65% при 250°C	менее 65% при 250°C менее 85% при 350°C	менее 65% при 250°C менее 85% при 350°C	менее 65% при 250°C менее 85% при 350°C	менее 65% при 250°C менее 85% при 350°C
Остаток по Конрадсону	NF T 60-116						0,35% (на остаток 1%)					
Серные соединения	NF M 07-029				Отрицательный							
Содержания воды	NF T 60-113											
Содержание смол фактическое	NF M 07-004	≤10 мг 100 см$^{-3}$	≤10 мг 100 см$^{-3}$	≤12 мг 100 см$^{-3}$			не нормируется	≤0,1% (в сумме)	≤0,50% (в сумме)	≤0,75% (в сумме)	≤1,5% (в сумме)	≤1,5% (в сумме)
Плотность	NF T 60-101	≤0,765 кг · л$^{-1}$ при 15°C	≤0,770 кг · л$^{-1}$ при 15°C	≤0,765 кг · л$^{-1}$ при 15°C			>0,810 кг · л$^{-1}$ <0,890 кг · л$^{-1}$ при 15°C					
Полная кислотность	NF T 60-112					≤3 мг · 100 см$^{-3}$	нулевая					
Свинец	NF M 07-043	max 0,4 г Pb · л$^{-1}$	max 0,4 г Pb · л$^{-1}$	отсутствует								
Температура вспышки по Абелю	NF M 07-011				≥30°C	≥38°C						
Температура вспышки по Люшеру	NF T 60-013						≥55°C <120°C	≥55°C	≥70°C	≥70°C	≥70°C	≥70°C
Температура застывания	NF T 60-015						≤−12°C от 1,10 до 31,3 ≤−7°C от 1,4 до 30,9	≤−6°C от 1,10 до 31,3 ≤−3°C от 1,4 до 30,9	0°C			
Точка дымления	NF M 07-011					≥21						
Давление пара по Рейду при 37,8°C	NF M 07-007	≤0,8 бар от 15,10 до 30,4 ≤0,65 бар от 1,5 до 14,10	≤0,8 бар от 15,10 до 30,4 ≤0,65 бар от 1,5 до 14,10	≤0,7 бар при 37,8°C								
Содержание воды и осадка	NF M 07-20							<0,10% в сумме				
Содержание осадка	NF M 07-10						нет					
Сера общая	NF T 60-142	≤0,2% в сумме	≤0,15% в сумме	≤0,2% в сумме	≤0,05% в сумме	≤0,13% в сумме	≤0,3% в сумме	≤0,3% в сумме				
Сера	NF M 07-025								≤2% в сумме	≤0,2% в сумме	≤4% в сумме	≤2% в сумме*
Вязкость	NF T 60-100						≤9,5 сСт при 20°C	≤9,5 сСт при 20°C	≤9,5 сСт при 20°C	≤15 сСт при 15°C	>100сСт при 50°C	>110сСт при 50°C
									≤15 сСт при 50°C	≤110сСт при 50°C	≤40 сСт при 100°C	<40 сСт при 100°C
Октановое число	NF M 07-026	между 89 и 92	между 97 и 99									
Цетановое число	ASTM D 613-65						≥50	≥40				

* Должна иметься возможность определения при 50°C по ASTM D 445.

Характеристики жидких нефтепродуктов.

2.3.4. Газ нефтезаводов

См. нижеприведенную таблицу.

Объемный состав, %	N_2		6,0	10,0	0,3	1,9
	O_2		–	–	–	–
	CO_2		–	0,5	–	8,2
	CO		1,6	2,5	0	2,2
	H_2		7,2	10,9	45,2	32,5
	CH_4		32,9	33,0	18,3	28,3
	C_2H_6		22,1	20,0	20,1	15,3
	C_2H_8		6,2	3,8	11,6	2,7
	nC_4H_{10}		0,2	0,7	3,3	0,6
	iC_4H_{10}		–	0,4	1,2	0,3
	nC_5H_{12}		–	–	–	–
	nC_6H_{14}		–	–	–	–
	nC_7H_{16}		–	–	–	–
	C_2H_4		13,0	10,6	–	4,9
	C_3H_6		10,8	6,8	–	3,1
	nC_4H_8		–	0,5	–	–
	iC_4H_8		–	0,3	–	–
	C_6H_6		–	–	–	–
Плотность, г · л$^{-1}$			1,138	1,074	0,804	0,853
Плотность по воздуху (d = 1)			0,880	0,831	0,621	0,660
Теплота сгорания высшая, кВт · ч · м$^{-3}$ (н)			15,23	13,45	12,52	10,14
Теплота сгорания низшая, кВт · ч · м$^{-3}$ (н)			13,96	12,31	11,34	9,19
Теплота сгорания высшая, кВт · ч · кг$^{-1}$			13,38	12,52	15,59	11,88
Теплота сгорания низшая, кВт · ч · кг$^{-1}$			12,27	11,46	14,41	10,77
Динамическая вязкость при 20°C, 10^6 Па · с			1 021	1 067	914	1 078
Отношение $\frac{C}{H}$ (весовое)			4,2	4,0	3,1	3,5
Стехиометрическое сгорание	сухой воздух для горения, м^3 · м$^{-3}$		12,73	11,24	10,32	8,36
	влажный дым, м^3 · м$^{-3}$		13,92	12,37	11,38	9,31
	состав влажного дыма в м^3 · м$^{-3}$	CO_2	1,56	1,37	1,11	1,00
		N_2 + H.	10,12	8,98	8,16	6,62
		H_2O	2,23	2,02	2,11	1,69
Температура горения, °C			1 978	1 969	1 965	1 954
Температура точки росы дыма при стехиометрическом горении, °C			55,77	56,1	58,7	58,3
Индекс Воббе полуисправленный, K_1, W			16,23	14,76	15,89	12,48
Индекс Воббу исправленный, W'			16,94	15,31	16,55	12,92
Потенциал горения			73,6	76,6	100,7	93,7
Индекс желтого язычка			227,3	199,6	205,3	146,3
Индекс обугливания			–	–	–	–
Псевдомасса молярная, г			25,32	23,92	17,89	19,03
Псевдообъем молярный, l · моль$^{-1}$			22,24	22,27	22,26	22,31
Псевдотеплота сгорания молярная, кВт · ч · моль$^{-1}$			310,7	274,2	252,3	205,0
Теплоемкость при постоянном давлении	кВт · ч · м$^{-3}$ (н)	0°C	0,538	0,514	0,521	0,467
		25°C	0,564	0,535	0,541	0,484
		100°C	0,645	0,606	0,608	0,535
	кВт · ч · кг$^{-1}$	0°C	0,533	0,509	0,524	0,464
		25°C	0,558	0507	0,535	0,480
		100°C	0,638	0,601	0,601	0,531
	кВт · ч · моль$^{-1}$	0°C	11,98	11,45	11,58	10,44
		25°C	12,53	11,92	12,05	10,79
		50°C	13,26	12,55	12,56	11,23
		100°C	14,36	13,51	13,55	11,95
Псевдокритические константы	Температура, °C		–30,83	–51,22	–99,62	–92,44
	Абсолютное давление, бар		42,92	42,03	30,90	37,71
	Плотность, г · л$^{-1}$		192,72	192,14	120,57	163,97

Характеристики газов нефтезаводов (для сведения).

2.3.5. Неочищенный природный газ

В нижеследующей таблице приведены средние по скважинам значения составов пластовых флюидов. В самом деле, газовые и нефтяные месторождения часто представлены в виде различных залежей, компонентный состав которых значительно отличается.

Эта таблица показывает большое разнообразие составов пластового газа различных месторождений:

— почти чистый метан (Уренгой, Фригг, Аляска),
— очень большое содержание кислых компонентов, таких как H_2S и CO_2 (Астрахань, Рисинус, Лак),
— большое содержание конденсата (Астрахань, Страхан, Хеймдаль),
— газ, не содержащий кислых компонентов (Северная Европа, Уренгой, Хасси Р'Мель).

	Европа						СССР			
	Лак Франция	Мейлон Франция	Гронинг Нидерланды	Фригг Северное море	Хеймдаль Северное море	Одоланов Польша	Оренбург	Астрахань	Уренгой 1	Уренгой 2
He	0	0	0,05	0	0	0,40	0	0	0	0
N_2	0	0,5.	14,3	0,7	0,09	40,73	4,5	2,4	1,2	0,4
C_1	68,9	77,4	81,2	94,2	86,2	58,14	82,4	49,8	98,0	85,0
C_2	2,9	3,6	2,9	4,6	6,4	0,44	5,2	1,6	0,2	5,8
C_3	0,9	1,2	0,4	0,1	2,7	0,02	1,8	1,0	0,1	5,3
C_4	0,6	1,0	0,15	0,02	1,1	0	1,0	0,5	0,1	2,4
C_{5+}	1,0	1,0	0,1	0,08	2,5	0	0,8	5,8	0	0,7
H_2S	15,9	6,0	0	0	0	0	2,7	24,6	0	0
CO_2	9,8	9,3	0,9	0,3	0,2	0,2	1,5	14,2	0,35	0,4

Составы природных газов различных месторождений Европы (включая Сибирь).

	Азия				Африка				Америка			
	Канган	Киркук Ирак	Вадак Индонезия	Хазика Индия	Хасси Р'Мель Алжир	Ливия	Мискар Тунис	Криби Камерун	Кепай Аляска	Рисинус Западная Канада	Страхан Канада	Венесуэла
He	0	0	0	0	0,19	0	0	0	0	0	0	0
N_2	4,9	0,03	0,05	0,01	5,80	0	18,5	0,7	0,4	0,3	0,4	0
C_1	85,5	56,6	87,0	78,1	53,00	68,5	61,0	84,8	97,55	56,4	80,3	75,30
C_2	4,1	17,1	4,6	6,8	7,10	15,4	2,9	7,0	0,05	0,6	3,6	9,04
C_3	1,4	8,7	2,8	4,1	2,25	7,6	0,7	3,8	0	0,05	1,3	6,19
C_4	1,2	3,5	1,2	1,7	1,00	3,3	0,4	1,7	0	0,03	0,9	2,95
C_{5+}	1,0	1,5	0,65	0,7	0,45	1,2	1,1	1,0	0	0,12	2,1	0,96
H_2S	0,05	6,8	0	0,12	0	1,5	0,18	0	0	35,0	9,3	0
CO_2	1,9	3,9	3,7	8,5	0,21	2,5	15,2	1,0	2,0	7,5	2,1	5,56

Составы природных газов различных месторождений мира (кроме Европы).

2.4. ДОБЫЧА ПРИРОДНОГО ГАЗА

2.4.1. Требования к товарным и сжиженным газам для транспорта

Товарные газы должны отвечать определенным требованиями, которые позволяют их транспортировку, использование бытовыми и промышленными потребителями. Однако имеется относительно мало регламентирующих требований и эти требования, в основном, связаны с транспортом.

2.4.1.1. Требования, связанные с транспортом в газообразном состоянии

При транспорте природного газа при давлениях выше 70 бар требования ужесточаются из-за недопустимости коррозии. Кроме того упругость паров воды должна быть такой, чтобы для любых возможных условий транспорта и снижения давления не появилась жидкая фаза.

Требования к товарному газу месторождения Лак были уточнены постановлением от 20 октября 1958 г. (см. таблицу на с. 313).

Постановление от 28 января 1981 г. расширило предыдущие требования с учетом качества вновь импортируемого газа и уточнило содержание серы и сернистых соединений в природном газе, транспортируемом по магистральному газопроводу:

Статья1: Транспортируемый газ не должен быть коррозионным, т.е. не должен вступать в химическую реакцию с материалами, составляющими магистральный газопровод, не менять физические характеристики этих материалов.

Статья 2: Газ считается некоррозионным, если его химический состав остается в тех же пределах, что и для газов, обычно транспортируемых по трубопроводам. Он считается также некоррозионным, если состав транспортируемого газа, качество используемых материалов, а также физические условия использования те же, что и для газа, транспортируемого в течение предшествующего периода (как минимум пяти лет) без проявления агрессивной коррозии.

Статья 3: Если предписания статьи 2 не выполняются, природные горючие газы, транспортируемые по трубопроводам, должны отвечать характеристикам следующей ниже таблицы.

	Постановление от 20.10.1958	Постановление от 20.01.1981
— Максимальное мгновенное содержание H_2S	5,7	15
— Максимальное содержание H_2S после 8 часов	–	12
— Среднее содержание H_2S за 8 дней	3,5	7
— Максимальное содержание CO_2	150	–
— Максимальное мгновенное содержание общей серы	50	150
— Среднее содержание общей серы Примечание: Содержания H_2S и CO_2 выражаются в мг · м$^{-3}$ (н)	30	–
— Точка росы газа (при рабочем давлении)	–12°C	–5°C

Требования к товарным газам.

Должны быть установлены контрольные приборы, позволяющие осуществлять последовательное определение содержания сероводорода, общей серы и влажности газа в местах добычи и в местах получения природного импортируемого газа, и должны быть предусмотрены устройства, позволяющие ежегодное изъятие во время эксплуатации контрольных элементов, подвергшихся напряжениям того же порядка величин, что и стенки трубопровода.

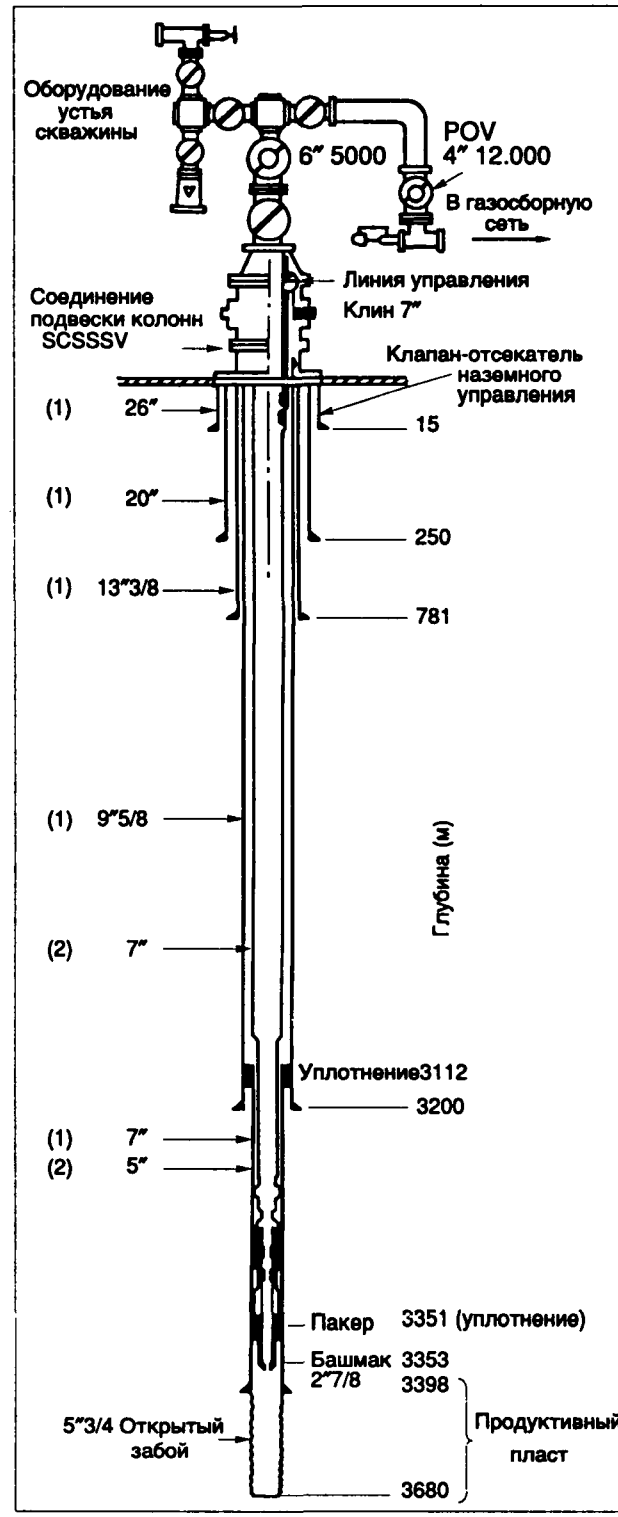
Требования других стран похожи: так, содержание H_2S лимитируется 22 мг · м$^{-3}$ в США; точка росы меняется от 0°C до –8°C в зависимости от территорий.

2.4.1.2. Требования, связанные с транспортом газа в жидком виде (С.Н.Г.)

Природный сжиженный газ для его транспорта в жидком виде не должен удовлетворять никаким регламентирующим требованиям; однако могут существовать договорные требования, связывающие различных партнеров одной сетью С.Н.Г.

Подготовка природного газа перед сжижением включает обязательно тщательное обезвоживание (осушку), извлечение углекислого газа и обессеривание, а также извлечение тяжелых углеводородов в такой мере, чтобы исключить их выпадение в твердой фазе; соответственно, после регазификации природный сжиженный газ должен удовлетворять всем требованиям трубопроводного транспорта.

2.4.2. Типовая схема эксплуатационной скважины



Типовая схема эксплуатационной скважины.

2.4.3. Типовая схема переработки

2.4.3.1. Цель переработки

Некоторые компоненты природного газа должны быть удалены, чтобы удовлетворить требованиям потребителя.

Другие могут быть извлечены для повышения стоимости. Можно привести в качестве примера:

— в первом случае:
  - H_2S : токсичный, коррозионно агрессивный и приводящий к хрупкости металла труб,
  - CO_2 : коррозионный в присутствии воды и имеющий нулевую теплотворную способность,
  - вода: приводит к образованию гидратов,
  - тяжелые углеводороды: конденсируются в распределительных сетях;
— во втором случае: этан, пропан, бутан.

2.4.3.2. Схема переработки

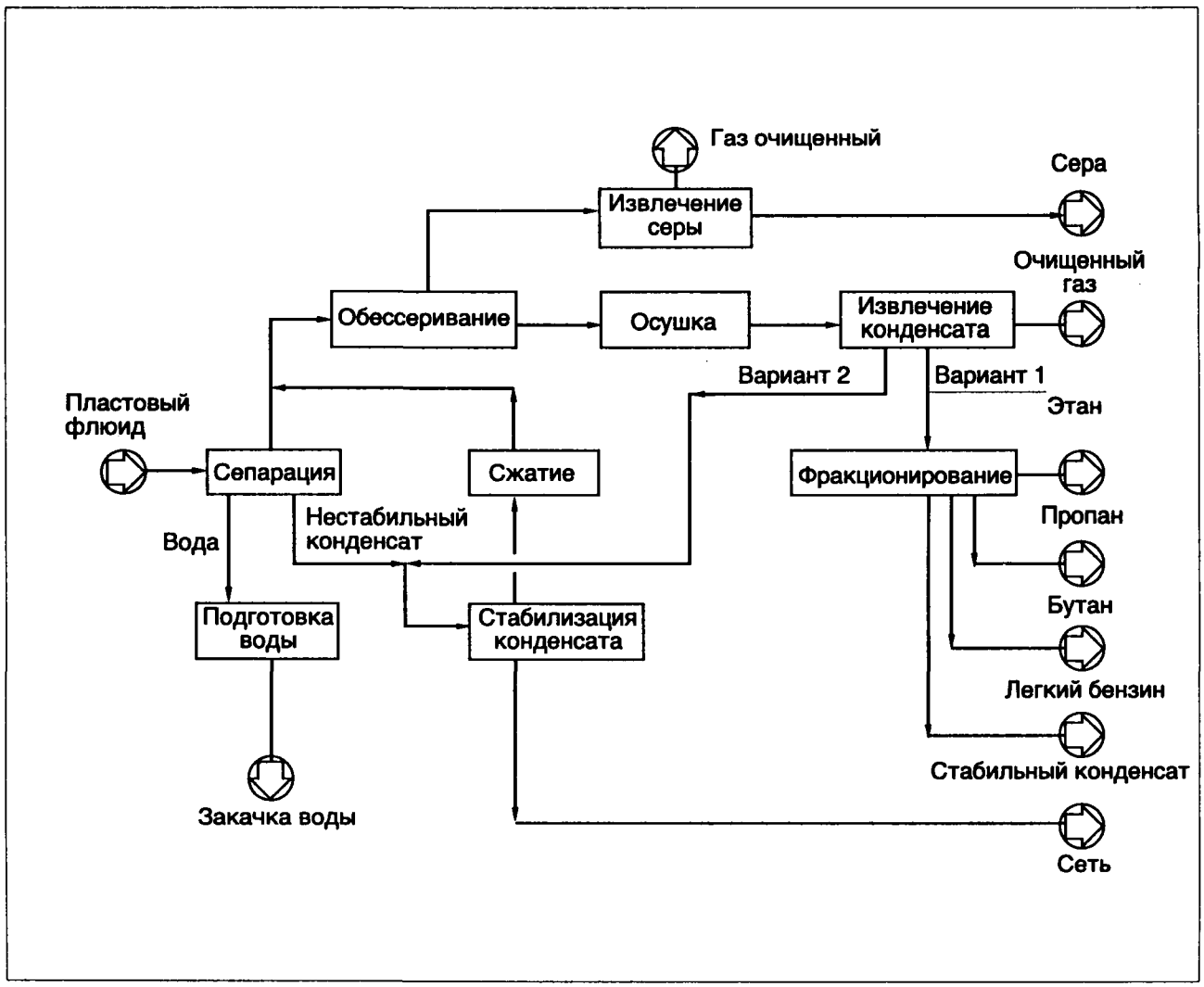
Полная переработка состоит из операций, приведенных ниже на блок-диаграмме:

Можно дополнительно указать еще две операции:

— извлечение азота, когда его содержание значительно, чтобы сделать газ сопоставимым с природными газами типа месторождения Лак,

— извлечение ртути до уровня микрограмм на $м^3$(н), если необходимо сжижать природный газ.

Наблюдается, в самом деле, воздействие амальгамы ртути на оборудование из алюминия. Само собой разумеется, что все описанные операции не обязательны, чтобы перерабатывать любой газ, но есть три основных процесса, необходимых практически в каждом случае, это – сепарация, осушка и простое отделение тяжелых углеводородов.



Типовая схема переработки.

2.4.4. Сепарация конденсата и воды

Природный сырой газ на забое скважины насыщен тяжелыми углеводородами и парами воды. Он содержит также жидкий конденсат. При расширении и охлаждении в штуцере на устье скважины и газосборных сетях происходит дополнительная конденсация. Вся жидкость (вода и жидкие углеводороды) должна быть отделена от газа перед его последующей переработкой.

2.4.4.1. Типы сепараторов

Чтобы разделить две фазы (газ–жидкость) или три фазы (газ–жидкие углеводороды–вода), используют горизонтальные или вертикальные сепараторы гравитационного или центробежного действия (циклон и гидроциклон).

Один из типов сепараторов, использующий простую гравитацию, рассмотрен ниже.

Горизонтальный сепаратор	Вертикальный сепаратор
Менее высокая стоимость	Более точный контроль уровня жидкости
Облегчены сборка и монтаж модуля	Облегчено удаление твердых осадков (песок, глина)
Лучшее отделение жидкость-жидкость	Небольшая площадь на поверхности (преимущество для морских платформ)

Преимущества каждого сепаратора.

2.4.4.2. Технический расчет сепараторов

Он базируется на законах Стокса и Ньютона с использованием эмпирических коэффициентов для учета распределения диаметров капелек и минимального времени пребывания.

2.4.4.2.1. Вертикальный двухфазный сепаратор

Минимальный диаметр сепаратора вычисляют по максимальной скорости газа:

$$V = C\left(\frac{\rho_ж - \rho_г}{\rho_г}\right)^{0,5}$$

по формуле

$$D = \left(\frac{0,052\,Q}{CK}\right)^{0,5}$$

принимая

$$K = \frac{P}{ZT}\left(\frac{\rho_ж - \rho_г}{\rho_г}\right)^{0,5}$$

V – максимальная восходящая скорость газа (в м · $с^{-1}$)

D – внутренний диаметр сепаратора (в м)

Q – дебит газа (в 10^6 $м^3$ · $сут^{-1}$)

P – абсолютное давление газа (в бар)

T – температура газа (в K)

$\rho_ж$ – плотность жидкости при P, T (в кг · $м^{-3}$)

$\rho_г$ – плотность газа при P, T (в кг · $м^{-3}$)

Z – коэффициент сжимаемости (значение для практических расчетов: 0,95)

C – коэффициент сепарации (экспериментальное значение: 0,06 - 0,12, в м · $с^{-1}$)

Высота сепаратора равняется сумме:

— высоты газовой сепарационной секции. Практически можно принять не менее 1,5 м,

— высоты жидкости, которая определяется исходя из времени пребывания в сепараторе 3 - 5 минут.

2.4.4.2.2. Вертикальный трехфазный сепаратор

Принципы расчета сохраняются. Принимают время пребывания жидкости 5 мин и регулируют границу раздела: углеводороды-вода, чтобы поддерживать время пребывания близкое к принятому. Уровни жидкости рассчитываются от нулевого уровня, находящегося на 20 см выше сварного шва нижнего днища обечайки сепаратора.

2.4.4.2.3. Двухфазный или трехфазный горизонтальный сепаратор

Расчет значительно усложняется, так как силы, действующие на частицы, не коллинеарны. Чтобы сделать, и тем более оптимизировать, технический расчет, необходимо использовать программы для вычислительных машин.

Несколько эмпирических упрощающих правил:

— практическое значение C меняется от 0,10 до 0,15 м · $с^{-1}$,

— отношение длина/диаметр сепаратора близко к 4,

— отношение высота уровня жидкости/диаметр никогда не превышает 0,7. На практике можно рекомендовать 0,5,

— скорость оседания капелек воды в нефти меняется от 0,05 до 0,1 м в минуту.

С учетом этих упрощений, уравнение для определения диаметра сепаратора становится:

$$D = \left(\frac{0,052\,Q}{CK}\right)^{0,5}$$

Горизонтальная скорость движения частичек нефти в воде будет:

$$V = 1,77 \cdot 10^{-3}\frac{(Q_н + Q_в)}{D^2}$$

$Q_н$ – дебит нефти (в $м^3 \cdot сут^{-1}$)

$Q_в$ – дебит воды (в $м^3 \cdot сут^{-1}$).

Положение уровня вода/нефть рассчитывается исходя из предположения, что наиболее мелкие капли воды достигнут этого уровня и не будут унесены.

2.4.5. Извлечение кислых компонентов

2.4.5.1. Критерии выбора метода извлечения кислых компонентов

Существует большое число используемых в промышленности методов, каждый из которых имеет

свою область применения, в принципе, более благоприятную или даже характерную.

Вообще известно, что для каждого конкретного случая можно использовать множество методов. Критерии оценки следующие.

2.4.5.1.1. Вид примесей, которые необходимо извлечь

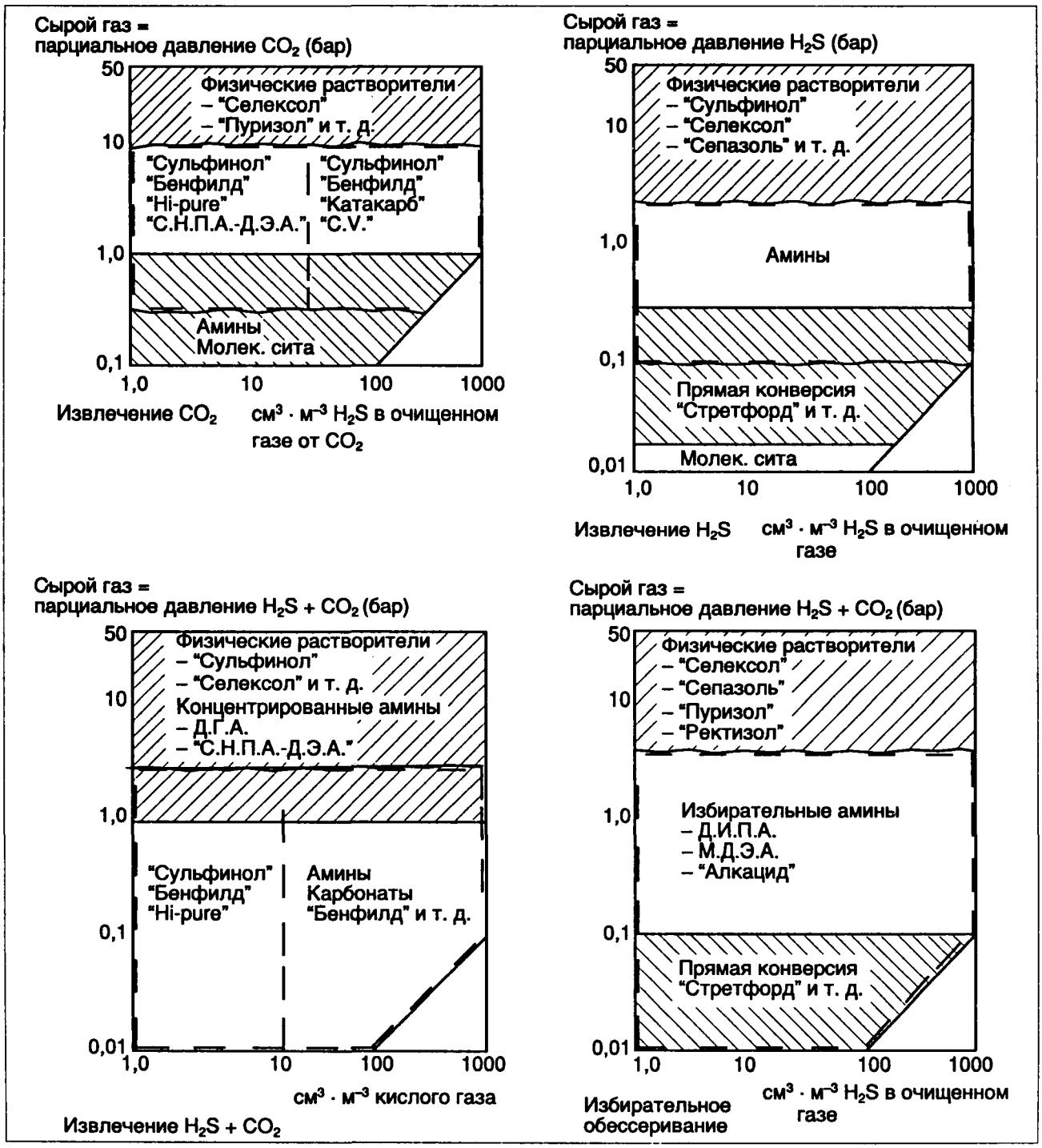
Обычно различают четыре следующих основных случая:

— извлечение CO_2,
— извлечение H_2S,
— извлечение H_2S и CO_2,
— избирательное извлечение H_2S (в присутствии CO_2).

На нижеприведенных рисунках даны показатели для первичного выбора метода.

Таблица на с. 317 дает представление о степени извлечения примесей различными методами.

Присутствие тяжелых и ароматических углеводородов имеет особое значение при производстве серы.



Извлечение кислых компонентов.

		COS	CS_2	RSH	NH_3	HCN	HC тяж.	H_2O	«Реклаймер»
I – *Химический растворитель*									
	М. Э. А.	С	С	Н	П	П	Нет	Нет	Да
	Д. Г. А.	П/С	П/С	С			Н	Нет	Да
Амин	Д. Э. А.	С		Н	П	П	Нет	Нет	Нет
	Д. Э. А.-С. Н. П. А.	С (2)	С	С/Н	П	П	Нет	Нет	Нет
	Д. И. П. А.	Н		Н	П	П	Нет	Нет	Нет
	М. Д. Э. А.	Нет		Нет	П	П	Нет	Нет	Нет
	«Катакарб»	П/С	П/С	Нет			Нет	Нет	Нет
Горячий поташ	«Бенфилд»	П/С	П/С	Н	Н	Н	Нет	Нет	Нет
	«Джаммарко-В»	С	С	Н		Н	Нет	Нет	Нет
	«Алкацид»	С	С	С		П	Нет	Нет	Нет
II – *Физический растворитель*									
	«Селексол»	П/С	П	П	П/С	П	П/С	П	Нет
	«Пуризол»	П	П	П			П/С	П	Нет
	«Ректизол»	П	П	П	С	П	П/С	П	
	«Сульфинол»	П		П/С	П	П	С/Н	Нет	Да
III – *Прямая конверсия*									
	«Стретфорд»	Нет	Нет	Н	С	П	(1)	Нет	
IV – *Твердый слой*									
	Молекулярные сита	П	П	П	П	П		П	
	«Айрон Странж»	П	П	Нет	П				

П – почти полное извлечение; С – приблизительно 50%; Н – слабое извлечение.
(1) – полученная сера загрязнена; (2) – может достигать 70 - 80%.

Поглощение примесей перерабатываемого газа.

2.4.5.1.2. Избирательность

Только несколько методов экономически предпочтительнее при извлечении H_2S по сравнению с CO_2.

Назовем селективные амины (М.Д.Э.А.) при низком и среднем парциальном давлении, физические растворители ("Селексол") при более высоком парциальном давлении.

2.4.5.1.3. Расход газа, подлежащего переработке. Давление, температура

При больших расходах подлежащего переработке газа некоторые методы становятся экономически менее предпочтительны по сравнению с молекулярными ситами.

Физические растворители ("Ректизол", "Пуризол") не применяются при низких давлениях и высоких температурах.

2.4.5.1.4. Извлечение серы

Состав кислого газа, подлежащего переработке в случае производства серы (отношение H_2S/CO_2), является важным фактором при выборе установок по получению серы. При отношении ниже 15 - 20% может быть рассмотрена селективная обработка для обогащения содержания по H_2S.

Физические растворители, абсорбирующие углеводороды, ухудшают качество серы, получаемой на установке Клауса.

2.4.5.1.5. Потребление энергии

Пар низкого давления (4 - 5 бар) используют для регенерации обогащенного раствора в большинстве процессов, особенно для аминового раствора.

Нужно:

— повысить температуру раствора в условиях низа абсорбера до температуры низа регенератора (используя возможный теплообмен),
— выделить кислый газ из раствора,
— произвести пар отпарки.

Количество используемого пара зависит от расхода циркулирующего раствора и степени очистки, которую необходимо достигнуть.

2.4.5.1.6. Соображения оперативные и экономические

Получение согласно требованиям содержания H_2S в 7 мг · м$^{-3}$(н) или 4 см^3 · м$^{-3}$ требует повышенного внимания операторов. Достаточно малейших нарушений регулировки, чтобы получить отклонение от требований.

Одним из критериев выбора того или иного процесса может быть и степень сложности установок и управления ими.

Кроме того, будем принимать во внимание:

— склонность растворов к образованию пены, разложению и их токсичность,
— проблемы коррозии и ее контроля,
— расход и стоимость растворителей, а также легкость их поставки (число и местоположение поставщиков),
— стоимость лицензий.

Процессы обычно защищены патентами. В противном случае рекомендуется использовать услуги опытных инженерных компаний.

2.4.5.2. Представление процессов извлечения кислых компонентов

Процессы извлечения кислых компонентов из газа обычно распределяются по четырем категориям (см. таблицу ниже).

I – Химическая абсорбция	Раствор
Раствор аминов	
М. Э. А.	Водный раствор 2,5 н
«U. C. A. R.»	Водный раствор 5 н М. Э. А. + + ингибитор
Д. Э. А.	Водный раствор 2 н
С. Н. П. А.-Д. Э. А.	Водный раствор 4 н
Д. И. П. А.	Водный раствор 2 н
М. Д. Э. А.	Водный раствор 2 - 4 н
Д. Г. А.	Водный раствор 6 н
Растворы щелочных солей	
Карбонат калия	Водный раствор 25 - 40% вес. K_2CO_3
«Катакарб»	K_2CO_3 + катализатор (борат амина)
«Бенфилд»	K_2CO_3 + катализатор (Д. Э. А.)
«Джаммарко-Ветрокок»	K_2CO_3 + катализатор (соль мышьяка)
«Алкацид-М»	Соль α-аминопропиновой кислоты
«Алкацид-ДИК»	Соль диметиламиноуксусной кислоты
II – Физическая абсорбция	
«Флюор»	Пропиленкарбонат
«Селексол»	Диметиловый эфир пропиленгликоля
«Ректизол»	Метанол
«Пуризол»	N-метилпирролидон
«Сульфинол»	Водный раствор Д. И. П. А. + + сульфолан
«Амизол»	Смесь М. Э. А. + Д. Э. А. с метанолом
«Сепазол»	Метилизопропиловый эфир олигоэтиленгликоля
III – Прямая конверсия H_2S	
«Стретфорд»	Карбонат + ванадат + дисульфоантрахинон натрия
«Такахакс»	Карбонат натрия + гидросульфонат нафтахинона
«Джаммарко-Ветрокок»	Карбонат калия + соль мышьяка
«Таунсенд»	Органический растворитель (Т. Э. Г.) + + растворенный SO_2
«ФИН-Фюгалол»	Органический растворитель (Э. Г.) + + катализатор
IV – Твердый слой	Набивка (наполнение)
«Айрон Стронж»	Древесные стружки + оксид железа
Молекулярные сита	Молекулярные сита
«Хайнес»	Молекулярные сита (регенерация с SO_2)
Активированный уголь	Активированный уголь

Прмышленные процессы извлечения кислых компонентов.

2.4.5.2.1. Процессы, базирующиеся на химическом равновесии, зависящем от давления и температуры

Эти процессы используют водные растворы амина или концентрированный раствор карбоната калия.

2.4.5.2.1.1. Аминовый процесс

Это базовый процесс, нашедший наибольшее применение для переработки больших количеств газа со слабым или средним содержанием кислых газов (от нескольких процентов до 40 - 45% объемных). H_2S и CO_2 абсорбируются.

Обычно используемые материалы:

— первичные амины: моноэтаноламин (М.Э.А.), дигликольамин (Д.Г.А.),
— вторичные амины: диэтаноламин (Д.Э.А.), диизопропаноламин (Д.И.П.А.),
— третичные амины: метилдиэтаноламин (М.Д.Э.А.).

Используют водные растворы более или менее концентрированные, но схема всегда одна и та же: барботаж газа в контакторе, затем регенерация раствора в колонне с выпариванием и орошением после снижения давления и теплообмена.

2.4.5.2.1.2. Процессы с использованием карбоната калия

Эти процессы, базирующиеся на использовании 30 - 40%-ного (масс) водного раствора карбоната калия, применяются для промывки газа с большим содержанием CO_2 (от 5 до 40% объемных) и высоким давлением (больше 20 бар).

Для газов, находящихся при высокой температуре, его преимущество заключается в проведении абсорбции при высокой температуре, приблизительно 110°C, т.е. того же порядка, что и регенерации. Это влечет за собой экономию теплообменников в цепи растворителя, а также значительный выигрыш в количестве пара ребойлеров.

При значительных содержаниях H_2S и CO_2, для достижения требований для газа, подаваемого в газовые сети, необходима окончательная обработка аминами.

Если газ, подлежащий обработке, содержит H_2S и малое количество (или полное отсутствие) CO_2, нельзя использовать этот процесс для извлечения H_2S, так как очень трудно регенерировать раствор в отсутствии CO_2.

Процессы с использованием карбоната калия применяются только для газов, отношение H_2S/CO_2 которых небольшое (например, 1 объем на 12 объемов).

2.4.5.2.2. Процессы, базирующиеся на физической абсорбции

Газы абсорбируются в зависимости от их парциального давления в сыром газе без химической реакции. По этой причине будут абсорбироваться H_2S, CO_2, R.H.S., а также не кислые примеси, такие как COS, CS_2, H_2O.

Наличие углеводородов, особенно ароматических, является главной помехой этих процессов (потери газа, производство серы).

Регенерация требует мало тепла или вообще не требует, давление является главным фактором.

Физическую абсорбцию применяют в следующих случаях:

— парциальное давление кислого газа выше 4 бар,
— значительное количество кислого газа,

— слабая концентрация тяжелых углеводородов в сыром газе,
— раствор может также осушить газ,
— селективная абсорбция для H_2S.

2.4.5.2.3. Процессы превращения H_2S непосредственно в серу

Они базируются на прямом окислении H_2S в жидкой фазе.

Эти процессы применяются только для сырого газа с низким содержанием H_2S и для не очень высоких дебитов. Они находят небольшое применение для природных газов.

Полученная сера часто загрязнена химическими продуктами, участвующими в процессе. Используемая вода требует особой обработки перед сбросом.

2.4.5.2.4. Процессы на твердом слое

Использование твердых тел для извлечения кислых компонентов из газов базируется на адсорбции кислых газов их поверхностью или на реакции с другим веществом на этой поверхности.

Областью применения этих процессов являются газы с низким и средним содержанием H_2S и меркаптанов. Они дают очищенный газ с очень слабым содержанием H_2S, который они абсорбируют обычно селективно. Расходы газа должны быть относительно небольшими (100 - 200 000 $м^3(н) \cdot сут^{-1}$) или газ должен иметь очень слабое парциальное давление кислых газов.

2.4.5.3. Аминовые процессы

Это базовые процессы, наиболее часто употребляемые для переработки больших количеств газа со слабой и средней концентрацией кислых газов.

Первичные амины имеют более высокую поглотительную способность, чем другие амины, но они более коррозионны и не могут применяться в присутствии таких примесей, как COS и CS_2. Их селективность H_2S/CO_2 слабая.

Вторичные амины менее активны, чем М.Э.А., но не имеют этих недостатков. Их селективность более высокая.

Третичные амины абсорбируют CO_2 с кинетикой реакции более медленной (промежуточное образование угольной кислоты) и поэтому они более селективны.

Основные характеристики аминов даны в двух нижеследующих таблицах.

	М. Э. А.	Д. Э. А.	Д. И. П. А.	Д. Г. А.	М. Д. Э. А.
Формула	$H_2NCH_2CH_2OH$	$HN(CH_2CH_2OH)_2$	$NH(CH_2CH(OH)CH_3)_2$	$H_2NCH_2CH_2OCH_2CH_2OH$	$CH_3N(CH_2CH_2OH)_2$
Молекулярная масса	61,08	105,14	133,19	105,14	119,16
Плотность 20°C/20°C	1,0719	1,0919 (30/20°)	0,989 (45/20°)	1,05	1,042
Температура кипения (°C, 1 013 мбар	170,4	268 (разлож.)	248,7	221	247
400 мбар	143	237	216	190	215
13 мбар	71	152	133	113	130
Упругость паров при 20°C (мбар)	1,3	<0,013	<1,3	<1,3	<1,3
120°C (мбар)	133	2,6		20	10,7
Вязкость при 20°C, сПз	24,1	867 (50°C)	198 (45°C)	40 (15,5°C)	100
Температура плавления, °C	10,3	28	42	−12,5	−21
Растворимость в воде при 20°C (масс)	полная	94,4% масс	87% масс		полная
Температуры вспышки (Cleveland), °C	93,3	138	127	127	126,7

Физические свойства аминов.

Первичные и вторичные амины		Третичные амины	
Реакция H_2S/амин: реакция мгновенная		Реакция H_2S/амин: реакция мгновенная	
$H_2S + R_2NH \rightleftharpoons HS^- R_2NH_2^+$	(1)	$H_2S + R_2R'N \rightleftharpoons HS^- R_2R'NH^+$	(1)
Реакция CO_2/амин:		Реакция CO_2/амин:	
Образование карбамата: реакция быстрая		Образование карбамата: реакция невозможная	
$CO_2 + 2R_2NH \rightleftharpoons R_2NCOO^- R_2NH_2^+$	(2)		
Образование углекислоты: реакция медленная		Образование углекислоты: реакция медленная	
$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$	(3)	$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$	(3)
$CO_2 + OH^- \rightleftharpoons HCO_3^-$	(4)	$CO_2 + OH^- \rightleftharpoons HCO_3^-$	(4)
Образование карбонатов и бикарбонатов		Образование карбонатов и бикарбонатов	
$2R_2NH + H_2CO_3 \rightleftharpoons 2(R_2NH_2^+)CO_3^{--}$	(5)	$2R_2R'N + H_2CO_3 \rightleftharpoons 2(R_2R'NH^+)CO_3^{--}$	(5)
$2(R_2NH_2^+)CO_3^{--} + H_2CO_3 \rightleftharpoons 2R_2NH_2^+ HCO_3^{--}$	(6)	$2(R_2R'NH^+)CO_3^{--} + H_2CO_3 \rightleftharpoons 2R_2R'NH^+ HCO_3^{--}$	(6)

Уравнения реакции H_2S/CO_2/амины.

2.4.5.3.1. Сравнение аминовых процессов

М.Э.А.

Применяется для одновременной и тонкой очистки от CO_2 и H_2S газов, свободных от посторонних примесей. Слабая концентрация (15 - 20%) и низкая степень насыщения, лимитируемая коррозионностью. Повышенное потребление энергии.

Д.Г.А.

Та же область применения, что и М.Э.А. Раствор более концентрированный, но и более дорогой. Скорость циркуляции более слабая и минимальное потребление энергии.

Д.Э.А.

Одновременная очистка от CO_2 и H_2S для природных газов высокого давления, можно использовать концентрированный раствор (до 40% массовых в процессе S.N.E.A.(P)). Небольшая скорость циркуляции и меньшие энергетические затраты по сравнению с М.Э.А.

Д.И.П.А.

Характеристики, сравнимые с Д.Э.А., но раствор менее дорогостоящий. Используется в комбинации с другими растворителями в процессах "Shell" ("Сульфинол", А.Д.И.П.).

2.4.5.3.2. Описание типовой установки

Приведено ниже на рисунке.

2.4.5.3.2.1. Качество серы

Большая часть углеводородов в парообразном состоянии отделяется от обогащенного амина в расширительном баллоне, содержание углеводородов в кислом газе обычно меньше 0,5%, что позволяет получать серу высшего качества при высокой и стабильной рентабельности.

2.4.5.3.2.2. Дополнительный контур

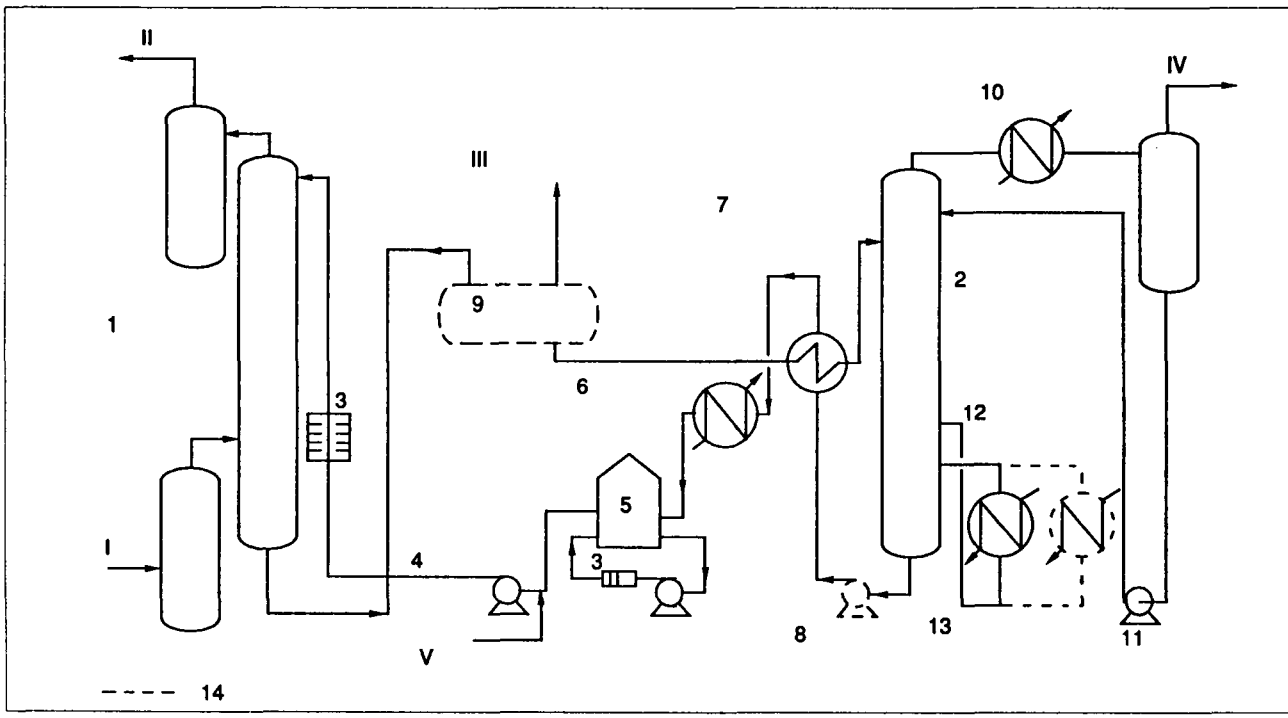
Приблизительно 10% расхода постоянно циркулирующего амина фильтруется через ацетатноцеллюлозные фильтры, чтобы отделить твердые частицы (оксид или сернистое железо), принесенные газом или являющиеся результатом эрозии. 10% этого расхода проходит затем через фильтры активированного угля, который абсорбирует тяжелые углеводороды, растворенные в амине, продукты разложения и другие химические примеси.

Для постоянного ввода небольшого количества антивспенивающего раствора (силикон) предусматривается система впрыска (с возможностью более значительного ввода в случае закупорки).

2.4.5.3.2.3. Экономия энергии

В случае высокого содержания кислых компонентов, требующего повышенного расхода амина, может быть предпочтительнее использовать, с помощью теплообмена амин/амин, потенциальную тепловую энергию, содержащуюся в потоке регенерированного амина. Это может быть осуществлено с помощью последовательного снижения давления амина и механического сжатия пара, полученного таким образом, чтобы ввести его в нижнюю часть колонны регенерации.

Например, снижение давления в две ступени со сжатием пара позволяет сэкономить 8,14 кВт · ч тепловой энергии на киловатт-час расхода механической энергии. Эта экономия пара составляет приблизительно 30% от потребления в классической установке.



Принципиальная схема установки очистки газа от кислых компонентов с помощью химической реакции. I – Сырой газ. II – Очищенный газ. III – Газ на топливо. IV – Кислый газ. 1 – абсорбер (7 - 100 бар абс.). 2 –регенератор (2 бар. абс). 3 – Фильтр. 4 – Насос. 5 – Емкость. 6 – Холодильник. 7 – Аминовый теплообменник (богатый / бедный). 8 – Приемный насос. 9 – Выветриватель. 10 – Конденсатор. 11 – Насос орошения. 12. – Рекуператор. 13 – Ребойлер. 14 – Дополнительное оборудование.

2.4.5.3.3. Основа технического расчета

Расход циркулирующего растворителя составляет основу технического расчета установки. Этот расход зависит от величин содержания H_2S, подлежащего извлечению; концентрации раствора Д.Э.А. и допустимой степени насыщения извлечения внизу абсорбера.

Концентрация может быть относительно высокой (до 40 массовых % в процессе С.Н.П.А.). Это позволяет одновременно снизить расход растворителя и потребление пара в ребойлере.

Степень насыщения растворов (H_2S или H_2S + + CO_2 – переменная величина) является основным фактором извлечения кислого газа. Движущей силой, определяющей массообмен, является, в самом деле, разность между парциальным давлением вещества в газовой фазе и упругостью паров его же в жидкой фазе.

Максимальные опытные значения приведены в нижеследующей таблице.

	Относительная селективность H_2S/CO_2	Теплота реакции (кВт · ч · кг$^{-1}$)	
		H_2S	CO_2
М. Э. А.	1,0	0,418	0,529
Д. Э. А.	2,5	0,319	0,418
М. Д. Э. А.	4,3	0,291	0,372

Абсорбционные характеристики аминовых растворов.

Изотермы равновесия, полученные экспериментально, являются предметом многочисленных публикаций (смотрите рисунки на с. 322) и более или менее точного моделирования.

Принимая некоторые меры предосторожности в концепции установок (скорость циркуляции, режим отпарки, устройство ребойлеров, максимальная температура и т.д.) можно использовать Д.Э.А. с повышенными концентрацией раствора и степенью насыщения кислыми газами.

	Нормальность раствора	Молярное отношение кислый газ/амин	кмоль кислого газа на м^3 раствора
М. Э. А.	2,5	0,4	1
Д. Г. А.	6	0,4	2,4
Д. Э. А.	2	0,4	0,8
С. Н. П. А.-Д. Э. А.	4	0,8	3,2
Д. И. П. А.	2	0,8	1,6
М. Д. Э. А. селективный	4	0,1 - 0,5	0,4 - 2,0
не селективный	4	0,3 - 0,8	1,2 - 3,2

Степень насыщения аминовых растворов (практический предел).

Использование низкоуглеродистой стали является правилом.

При расчетах аппаратов обращаются к специальным руководствам, несколько основных определяющих значений приводятся ниже.

Абсорбер

— с 20 тарелок возможно увеличение до 30 тарелок при более высоких требованиях по CO_2;
— степень насыщения амина: 80% от равновесного.

	М. Д. Э. А. чистый	Раствор 3 н	Раствор 4 н
Молекулярная масса	119,7		
Плотность (г · см$^{-3}$)			
при 20°С	1,042	1,035	1,040
при 60°С		1,0125	1,018
Температура кипения (°С)			
при 1 013 мбар (1 атм)	247	102	103
при 2 532,5 мбар (2,5 атм)	–	130	131
Вязкость (сПз)			
при 20°С	100	4,6	9
при 60°С	16	1,6	2,5
при 100°С	4	–	–
Температура плавления (°С)	–21	–6 (2 н)	–
Температура воспламенения («СОС»)* (°С)	126,7	–	–
Растворимость в воде	полная	–	–

* «С.О.С»: Cleveland Open Cup.

Физические свойства аминовых растворов (практический предел).

Регенератор

— 20 тарелок,
— потребление пара охлажденного, низкого давления: 80 - 130 кг · м$^{-3}$ раствора амина,
— не превышает 130°С внизу.

2.4.5.4. Процессы очистки карбонатом калия

2.4.5.4.1. Базовый процесс ("Горячий поташ")

Химические равновесия, в целом, следующие:

$$K_2CO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons 2KHCO_3$$

$$K_2CO_3 + H_2S \rightleftharpoons KHS + KHCO_3$$

Технологические схемы процессов сходны с аминовыми процессами. Основное отличие заключается в отсутствии теплообменника в системе раствора и присутствии теплообменника сырой газ/газ очищенный.

В зависимости от желаемого содержания CO_2 в очищенном газе различают следующие схемы (см. рисунки на с. 323):

— содержание от 1,5 до 2%:

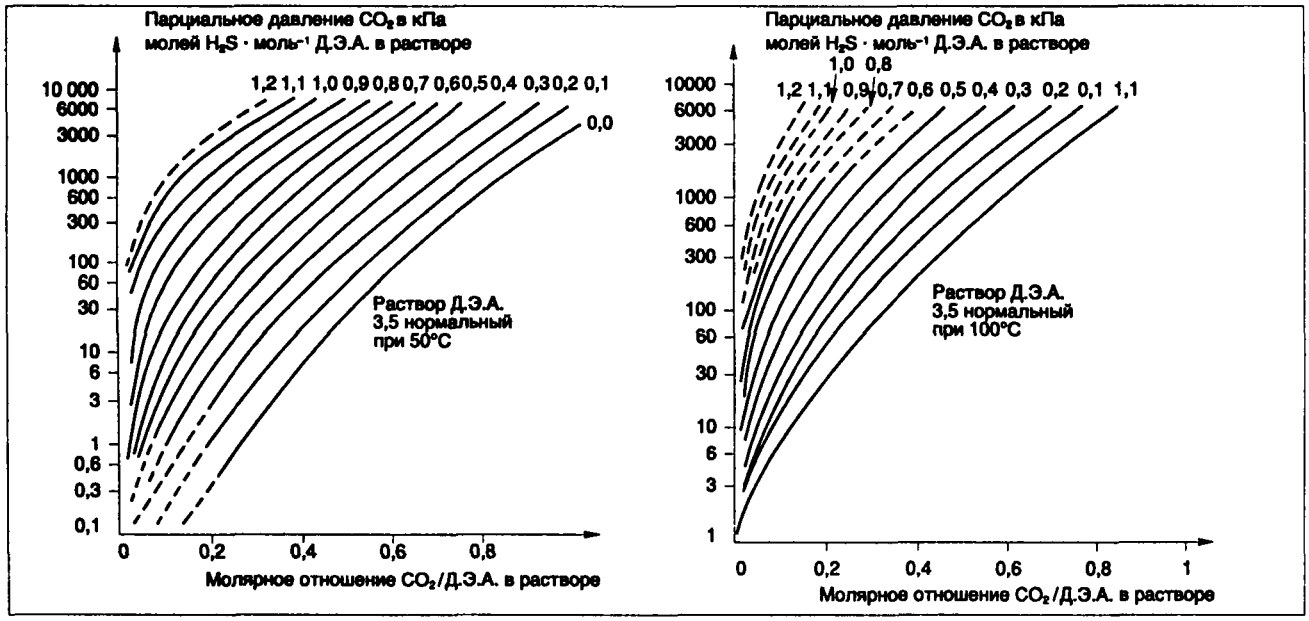
Единственный ввод регенерированного раствора. Давление регенерации от 0,2 до 0,7 бар. Число тарелок абсорбера от 20 до 25, десорбера - от 15 до 20;

— содержание от 0,8 до 1% ("Сплит-стрим"):

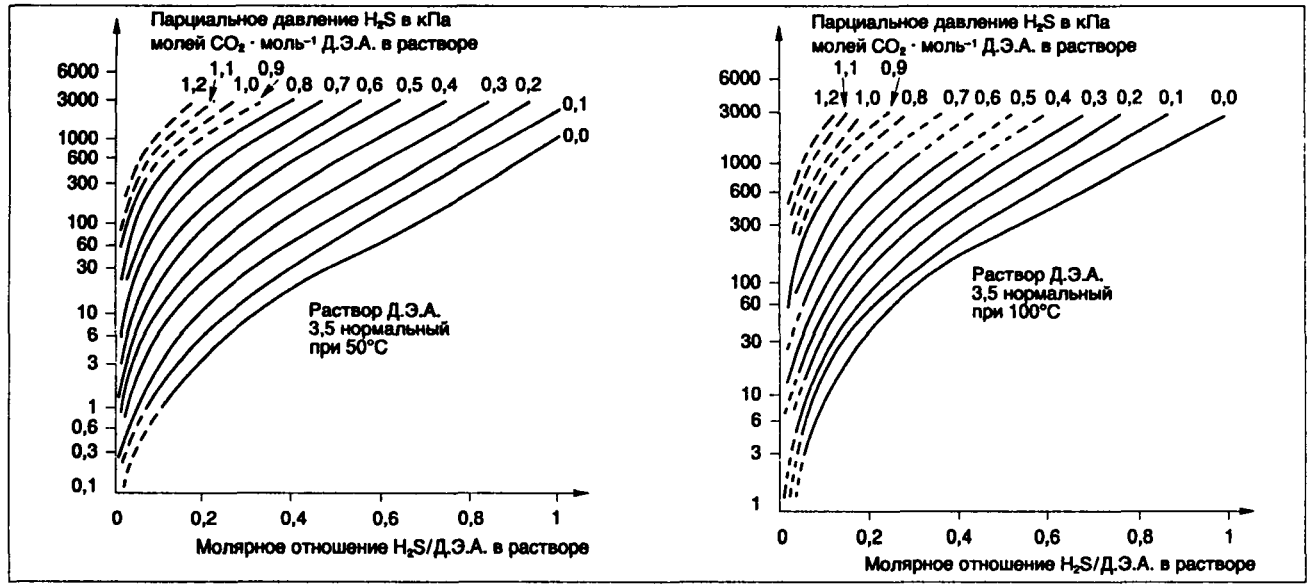
Приблизительно от 1/4 до 1/3 раствора охлаждается (80°С) и вводится в верхнюю часть, а остальная – на тарелку в середине абсорбера;

— содержание от 0,5 до 0,8%:

Часть грубо регенерированного раствора отбирается в средней части регенератора и направляется в промежуточную точку абсорбера. Остальной раствор из нижней части регенератора, более полно отрегенерированный, направляется из регенератора в верхнюю часть абсорбера.



Равновесие CO_2/Д.Э.А. в растворе.



Равновесие H_2S/Д.Э.А в растворе.

Это решение представляет интерес и для больших содержаний кислого газа, как более экономичное с точки зрения расхода тепловой энергии в ребойлере. Оно позволяет получить необходимое извлечение H_2S.

Другие реализуемые схемы:
— комбинация с промывкой водой на входе,
— окончательная очистка аминами в конце,
— ввод свежего раствора в верхнюю часть абсорбера до места ввода регенерированного раствора, – снижение давления регенерированного раствора и возврат паров воды в регенератор (экономия паров – приблизительно 50%).

Характерные данные.

Берем коэффициент абсорбции 20 м³ (н) CO_2 расход пара испарителя 85 кг · м$^{-3}$ циркулирующего раствора.

Коррозия.

Коррозия углеродистой стали может происходить везде, где выделяются кислые газы.

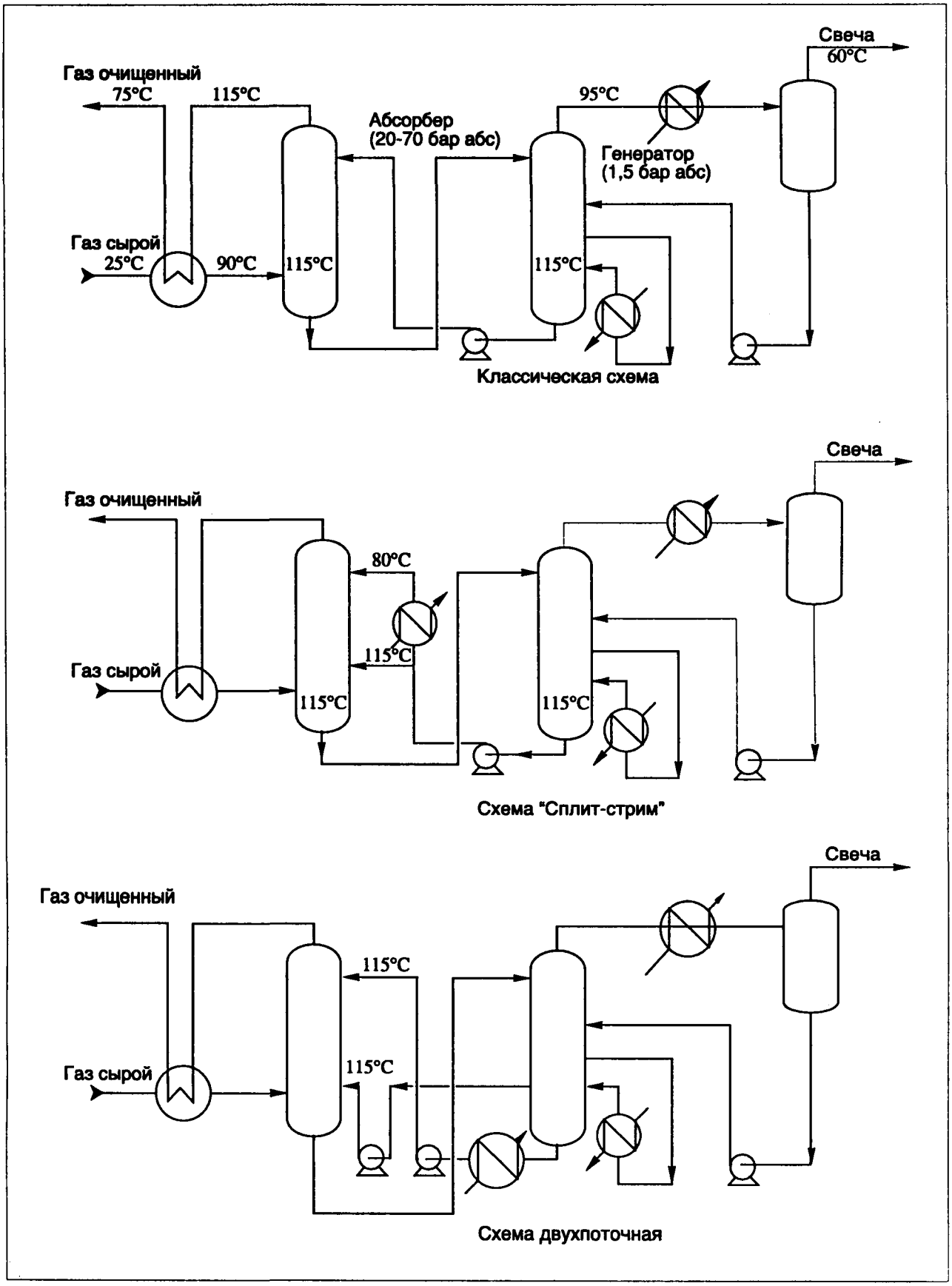
Углеродистая сталь с отжигом сварных швов используется во всех установках, за исключением, иногда, труб ребойлера.

Если присутствует только CO_2, то в качестве ингибитора коррозии используются хроматы. Они не могут употребляться в присутствии H_2S, так как их соли выпадают в осадок. Однако коррозия защищается сернистыми соединениями, если содержание сероводорода значительно.

Разное.

Раствор, покидающий регенератор при температуре насыщения, может испаряться на всасывании насоса для раствора. Используют насос с нижним наддувом N.P.S.H. перед насосом высокого давления, чтобы исправить эти недостатки.

Необходима также система фильтрации и система ввода антивспенивателя (силиконы).



Карбонатный процесс.

Процесс	Случаи использования	Достоинства	Примечания
«Катакарб»	Извлечение $H_2S + CO_2$	— Экономичность	H_2S может быть извлечен без CO_2
«Бенфилд»	Сырой газ с большим содержанием CO_2 или $H_2S + CO_2$	— Экономичность — Возможность получения содержания $CO_2 < 10$ см$^3 \cdot$ м$^{-3}$	
«Джаммарко-Ветрокок»	1-й процесс — Извлечение CO_2 из газа с большим его содержанием	— до 0,2 - 0,5%	Термическая (паром) регенерация или «стриппинг» воздухом
	2-й процесс — Извлечение $H_2S + CO_2$ или селективно H_2S из газа со слабым их содержанием	— до 1 ppm H_2S	Напряженная эксплуатация (катализатор – соли мышьяка)
«Алкацид-М»	— Извлечение CO_2 или $H_2S + CO_2$	— Экономичность	
«Алкацид-Д. И. К.»	— Селективное извлечение H_2S		

Основные процессы «Горячий поташ».

2.4.5.4.2. Различные процессы

Добавление катализаторов в растворы позволяет улучшить карбонатный процесс. Скорость реакции увеличивается в два - три раза, так же как и степень насыщения раствора. Схемы подготовки такие же.

Принципиальные характеристики различных процессов приведены выше в таблице.

2.4.5.5. Процессы с физическими растворителями

2.4.5.5.1. Характеристики физической абсорбции

2.4.5.5.1.1. Влияние давления и температуры

Это влияние проиллюстрировано значениями растворимости CO_2 в пропиленкарбонате (процесс "Флюор"), приведенными ниже, а также зависимостями на с. 325.

При использовании процесса "Селексол" снижение температуры низа абсорбера на 5°С приводит к снижению циркуляции растворителя на 15%.

	Парциальное давление CO_2 в бар				
		4,2	14	28	42
Температура в °С	26	26	90	327	бесконечн.
	45	17	52	107	223

Растворимость CO_2 в м^3 CO_2 на м^3 раствора.

Абсорбция проводится обычно при температуре окружающей среды или ниже, что требует применения холодильников в цепи растворителя и сырого газа.

2.4.5.5.1.2. Растворимость газов

Для всех физических растворителей растворимость увеличивается в следующем порядке: CH_4, CO_2, COS, H_2S, CH_3SH.

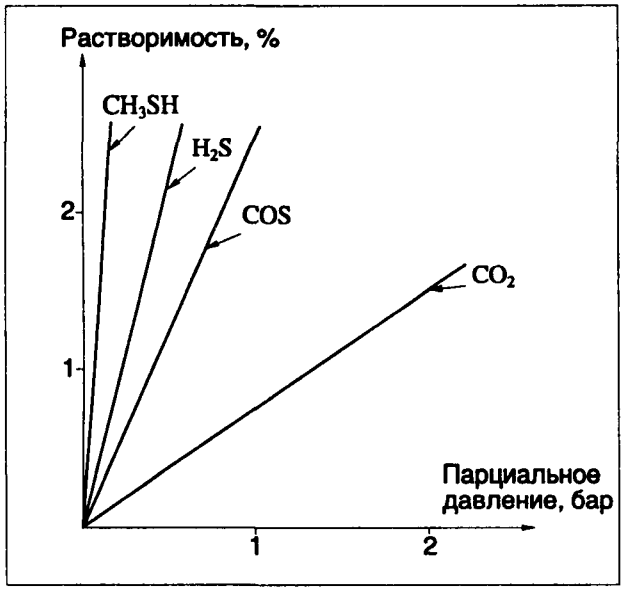
Это изменение растворимости для различных газов позволяет обеспечить селективную очистку H_2S по отношению к CO_2. Например, получают очищенные газы, содержащие 4 - 100 см$^3 \cdot$ м$^{-3}$ H_2S и 2% и более CO_2.

	T°C	Растворимость H_2S/CO_2 (объем/объем)
Вода	35	3
Пропиленкарбонат («Флюор»)	80	3,47
	27	3,63
Метанол («Ректизол»)	80	2,93
	–10	5,1
	–30	6,1
N-метилпирролидон («Пуризол»)	80	8,27
	35	8,30
Д. М. Э. П. Г. («Селексол»)	20	8,9

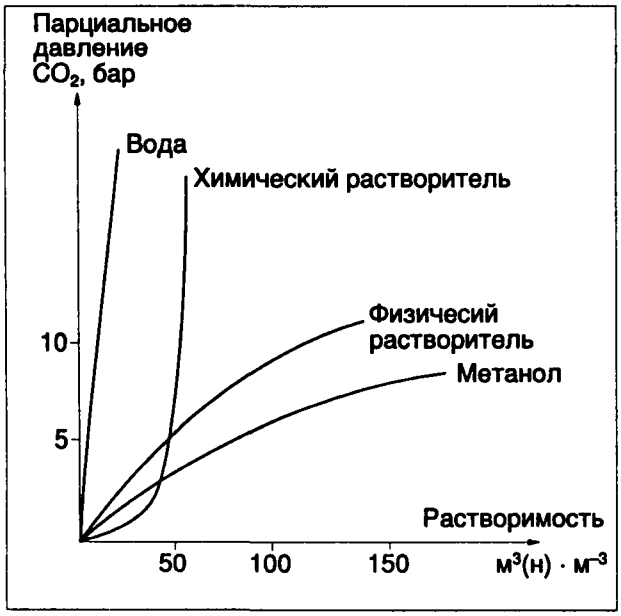
2.4.5.5.1.3. Регенерация растворителя

Последовательное расширение: в несколько ступеней снижают давление растворителя до атмосферного давления. Этот метод может быть использован для очистки газа с содержанием CO_2 в нем 2% и более.

Снижение давления, затем отдувка, если необходимо достигнуть более строгих требований (500 см$^3 \cdot$ м$^{-3}$ CO_2 или меньше, H_2S), после снижения давления следует отдувка инертным газом или



Растворимость газов в физических растворителях.



Сравнение растворимости в физических и химических растворителях.

водяным паром (в случае необходимости под вакуумом).

Очистка растворителя: можно обработать после отдувки часть растворителя, чтобы отделить от воды сырой газ, который был в ней растворен (случай использования метанола).

Газ отдувки не должен содержать CO_2. В случае очистки от H_2S газ не должен содержать кислород, так как это способствует образованию в растворителе элементарной серы. В этом случае нельзя использовать отдувку воздухом.

2.4.5.5.2. Характеристика физических растворителей

В принципе они должны иметь низкую упругость паров, чтобы избежать слишком больших потерь, и низкую температуру застывания, так как абсорбция осуществляется при низкой температуре.

В таблице ниже приведено сравнение наиболее часто используемых растворителей.

Промышленно используемые растворители должны иметь низкую коррозионную активность (использование углеродистой стали). Они устойчивы к пенообразованию. Последнее приводит к осложнениям в абсорбере, особенно в присутствии сернистого железа, тяжелых углеводородов, ингибиторов коррозии, унесенных сырым газом.

Устройства фильтрации и ввода антивспенивателей предусматриваются в случае необходимости.

2.4.5.5.3. Описание принципиальной схемы установки

См. рисунок на с. 326.

2.4.5.5.4. Промышленные процессы

Их преимущества заключаются в минимальном потреблении энергии и возможности извлечения некоторых примесей (COS).

Их главные недостатки заключаются в высокой стоимости растворителя и тенденции поглощать тяжелые углеводороды (C_{5+}).

Они хорошо применимы для извлечения больших количеств CO_2 при высоком давлении из газов, содержащих небольшое количество тяжелых углеводородов.

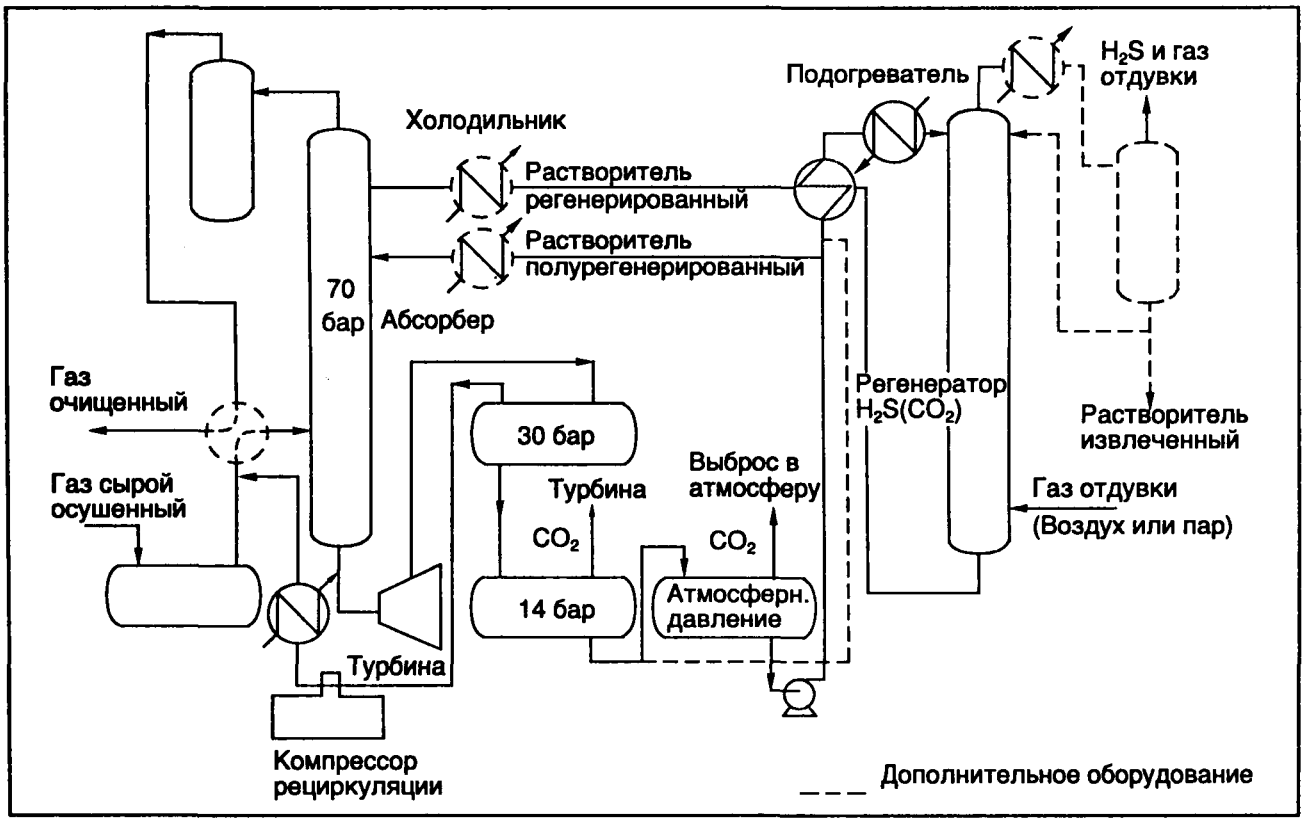
Основные процессы следующие:

— "Селексол" (Allied Chemical Corp.).

В качестве растворителя используется диметиловый эфир полиэтиленгликоля. Основное коммерческое применение относится к природным газам с высоким содержанием CO_2 и низким H_2S.

Легко достигаются требования к газу, связанные с транспортом. Газ одновременно может быть осушен, если вода удаляется при регенерации;

Растворитель	Метанол	Д. М. Э. П. Г.	N. M. P.	C_3HCO_3
Коммерческое название	(«Ректизол»)	(«Селексол»)	(«Пуризол»)	(«Флюор»)
Молекулярная масса	32	280	99	102
Плотность	0,79	1,035	1,027	1,2
Температура кипения, °C (при атмосферном давлении)	64	218	202	240
Температура застывания, °C (при атмосферном давлении)	–98	–30	–24	–48



Принципиальная схема извлечения из газа кислых компонентов физической абсорбцией.

— "Флюор" (Fluor Corp.).

В качестве растворителя используется пропиленкарбонат. Этот процесс применяется главным образом для извлечения CO_2.

— "Ректизол", "Пуризол" (Lurgi).

Процесс "Пуризол", который использует N-метилпирролидон, растворитель селективный в отношении H_2S, нашел применение для очистки природных и синтетических газов (производство водорода).

Процесс "Ректизол" использует в качестве растворителя холодный метанол. Сырой газ должен быть охлажден до –30°C, по причине упругости паров метанола.

Основное применение нашел при очистке газа синтеза и газа, получаемого при газификации угля.

Этот процесс включается в низкотемпературные процессы переработки газа (сжижение и фракционирование).

— "Сульфинол" (Shell).

Процесс "Сульфинол" использует смесь из физического поглотителя (сульфолан), вторичного амина (Д.И.П.А.) и воды в различных соотношениях.

Этот процесс достаточно похож на переработку аминами. Он нашел широкое применение в подготовке природного газа, где он позволяет легко достигнуть требований по H_2S и CO_2, предъявляемых к газу для его транспорта.

Сернистые компоненты (COS, RSH) извлекаются лучше, чем амином, но абсорбируются тяжелые углеводороды, что делает этот процесс более применимым при подготовке сухого газа, т.е. содержащего небольшое количество C_{5+}.

2.4.5.6. Процессы прямой конверсии

2.4.5.6.1. Общие характеристики

Эти процессы используются для сырых газов, содержащих максимум 1 - 2% H_2S. Это содержание может быть снижено до 1 vmp или 15 мг · м$^{-3}$ (н) в очищенном газе, в случае необходимости с использованием нескольких ступеней абсорбции. Рабочее давление меняется от 1 до нескольких десятков бар.

Основной принцип тот же самый, что и для всех процессов. H_2S абсорбируется щелочным раствором (углекислый натрий или нашатырный спирт), где находится растворенный окислитель. Затем H_2S окисляется в элементарную серу путем ввода воздуха в низ регенератора. Воздух служит также флотационным агентом для серы, которая отбирается в виде пены на поверхности.

Затем с помощью фильтрации и центрифугирования получают лепешки серы. Затем получают мягкую массу или сухую пудру. Лепешки могут быть расплавлены в автоклаве, чтобы получить жидкую серу.

COS, CS_2 и меркаптаны не конвертируются и остаются в газе. HCN абсорбируется и должен быть удален очисткой или обработкой на входе.

Гидросульфид натрия, который не вступил в реакцию, превращается в регенераторе в растворимый тиосульфат, что приводит к потерям серы и раствора.

2.4.5.6.2. Процесс "Стретфорд"

Представлен ниже на рисунке.

Щелочной раствор содержит соли дисульфоантрахиноновой кислоты (А.Д.К.) как окисляющий агент и соль ванадия как катализатор.

Добавка катализатора позволяет уменьшить время пребывания и увеличивает степень насыщения раствора по сравнению с процессом, протекающим без катализатора.

2.4.5.7. Процессы на твердом слое

2.4.5.7.1. Оксид железа

Это один из старейших процессов (введен в Великобритании в 1850 г.) также именуется "Айрон Спонж" или "Драй Боксес", использует твердый реагент в виде древесных стружек, пропитанных гидроокисью железа.

Система реакций сложная, но она сводится к двум следующим реакциям:

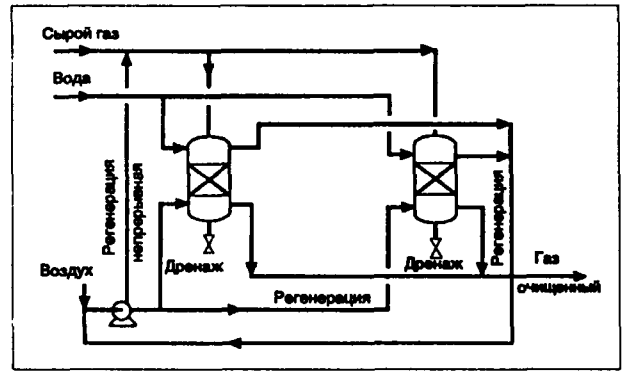
$$2Fe_2O_3 + 6H_2S \rightleftharpoons 2Fe_2S_3 + 6H_2O$$

$$2Fe_2S_3 + 3O_2 \rightleftharpoons 2Fe_2O_3 + 6S$$

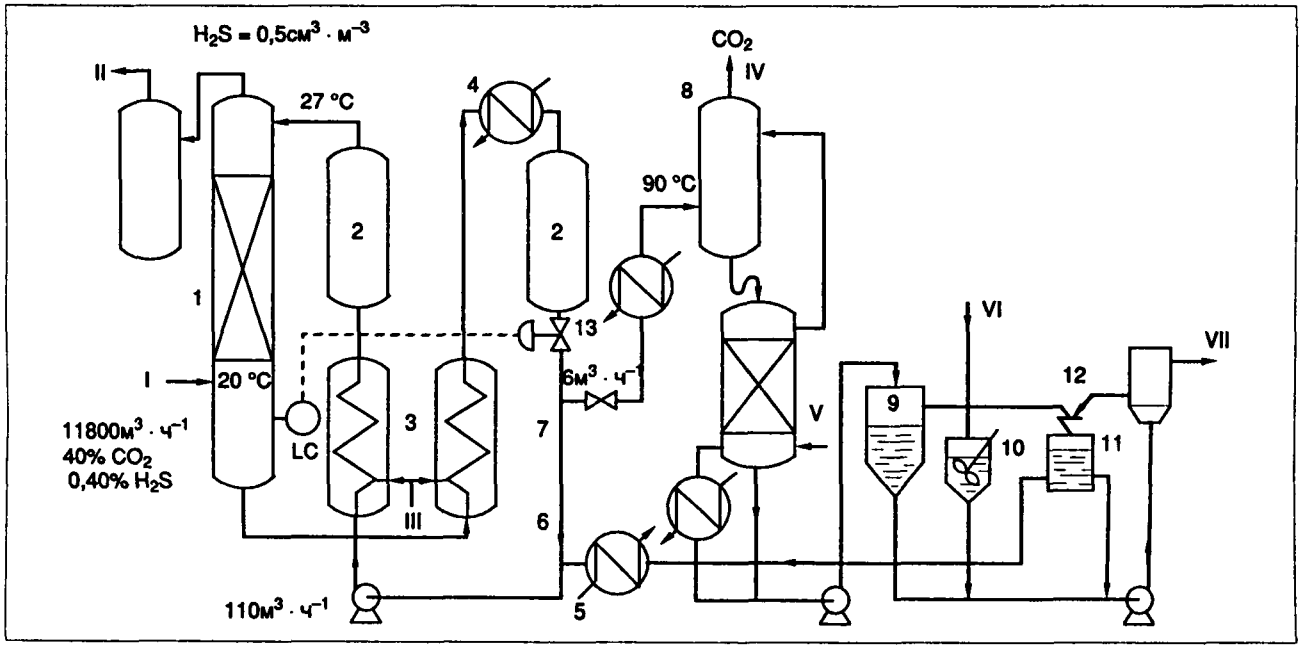
Ввод воздуха и регенерация можгут осуществляться непрерывно или периодически отключением одной из колонн и пропусканием воздуха через слой поглотителя.

Предусмотрен ввод воды, чтобы поддерживать оксид железа в активированном гидратированном виде. С помощью ввода углекислого натрия поддерживают параметр *pH* в диапазоне 8 - 8,5. Он создает вдоль слоя отложения серы, покрывая стружки и уменьшая их активность, что вынуждает проводить замену слоев приблизительно каждые два или три месяца.

Получение серы экономически нецелесообразно. Температура не должна превышать 40°C, чтобы исключить воспламенение смеси оксида железа и сульфида железа в присутствии воздуха.



Процесс с оксидом железа ("Айрон Спонж").



Процесс "Стретфорд". 1 – Абсорбер. 2 – Емкость. 3 – Окислительные реакторы. 4 – Подогреватель. 5 – Охладитель. 6 – Кипятильник. 7 – Колонна извлечения CO_2 (дополнительно). 8 – Выветриватель. 9 – Отстойник. 10 – Мешалка. 11 – Фильтр. 12 – Центрифуга. 13 – Предварительный подогреватель. I – Сырой газ. II – Газ очищенный H_2S = 0,5 см³ · м⁻³, III – Воздух. IV – CO_2. V – Воздух или пар. VI – Добавление раствора. VII – Сера на промывку.

Процесс идет также хорошо независимо от давления. При высоком давлении могут однако возникнуть проблемы с образованием гидратов, если температура газа становится слишком низкой (холодный климат).

Содержание H_2S сырого газа ограничивается приблизительно 1,5% (объемн.) и может быть снижено до значения ниже, чем 1 $см^3 \cdot м^{-3}$. Меркаптаны извлекаются селективно, COS и CS_2 частично.

CO_2 остается в газе.

2.4.5.7.2. Активированный уголь

Активированный уголь используют (например ACF2 в C.E.C.A.), насыщенным оксидом железа Fe_2O_3. Реакции такие же, как и для оксида железа. Газ, подлежащий обработке, должен иметь относительную влажность от 50 до 90%. Количество кислорода, который вводится одновременно с газом, должно быть заключено между 1,3 - 2 раза по стехиометрии. Рабочая температура меняется от 20 до 60°C. H_2S улавливается в виде элементарной серы в порах активированного угля.

Концентрация H_2S очищенного газа может достигнуть 0,1 $мг \cdot м^{-3}$ (н) при адсорбционной вместимости угля по сере 40 весовых %.

Регенерация:

Можно десорбировать находящуюся в порах серу при высокой температуре (350°C). Используют пар или горячий газ. Регенерируют на месте при содержании H_2S в сыром газе от 60 до 1000 $мг \cdot м^3$ (н). Начальная адсорбционная вместимость угля с 40% снижается после регенерации приблизительно до 25%. При содержании H_2S меньше 60 $мг \cdot м^{-3}$(н) использованный уголь выбрасывается или регенерируется в другом месте.

2.4.5.7.3. Молекулярные сита

Молекулярные сита (кристаллические алюмосиликаты) имеют при низкой температуре большое сходство для таких полярных молекул, как H_2S, H_2O и меркаптаны, и меньше для CO_2.

Вода всегда абсорбируется в первую очередь. В случае извлечения кислых компонентов из влажного газа необходимо снизить влагосодержание газа ниже 0,3 $г \cdot м^{-3}$, чтобы не увеличивать количество молекулярных сит.

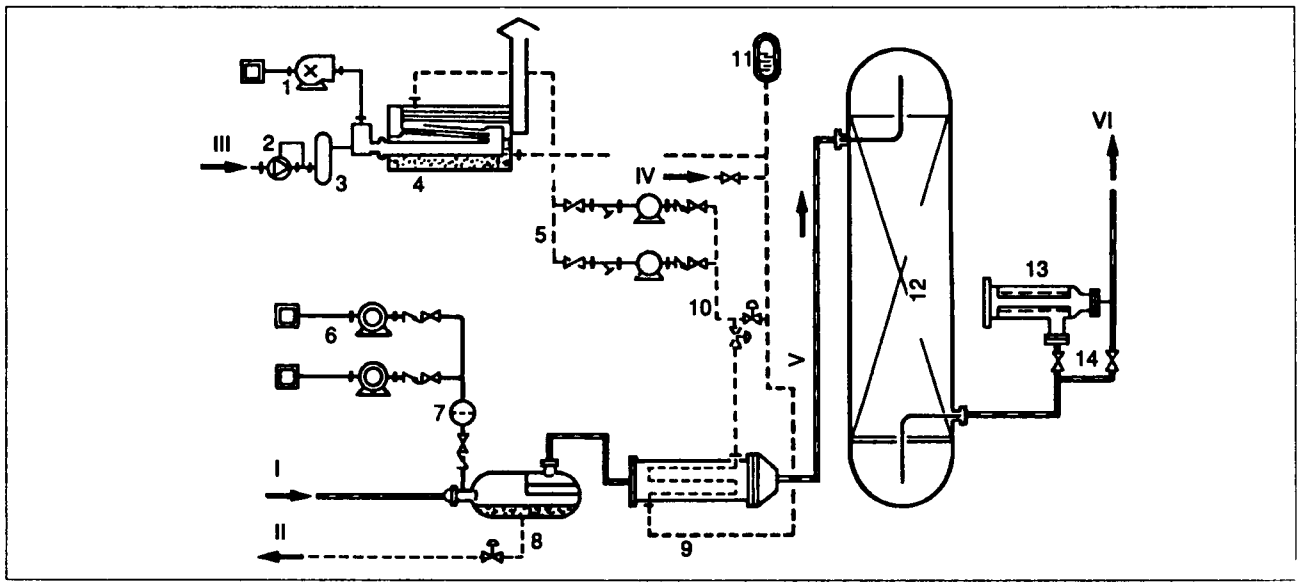
Применение	Тип
Снижение содержания тяжелых компонентов	5A
Извлечение CO_2 из природного газа	6A - 5A
Осушка природных газов	6A
Извлечение H_2S из природного газа	6A - 5A
Извлечение RSH из природного газа	13X
Снижение содержания кислых компонентов в С. Н. Г. ($H_2S + CO_2$)	13X
Снабжение Ж. П. Г.	6A - 5A

Различные типы сит используются в зависимости от примесей, которые необходимо извлечь, и их концентраций.

Обычно извлечение сернистых компонентов осуществляется из газа, неочищенного от CO_2. Извлечение CO_2 возможно из обессеренного газа, чтобы снизить его содержание с максимального значения в 1,5 объемных % до очень низких значений. H_2S извлекается до содержания меньше, чем 1 $см^3 \cdot м^{-3}$.

Принципиальная упрощенная схема представлена на рисунке с. 329. Может быть использовано несколько адсорберов, от двух до четырех и более. Каждый проходит полный цикл: абсорбция (20 - 40°C), регенерация (нагревание, затем десорбция при 300 - 350°C) и охлаждение. Последовательность работы может быть полностью автоматизирована.

Газ регенерации, от 5 до 15% сырого газа, должен быть сожжен на факеле или вновь направлен на установку для извлечения H_2S. Примеси, такие как тяжелые углеводороды, олефины, ароматические углеводороды, коадсорбируются и снижают эффективность извлечения H_2S.

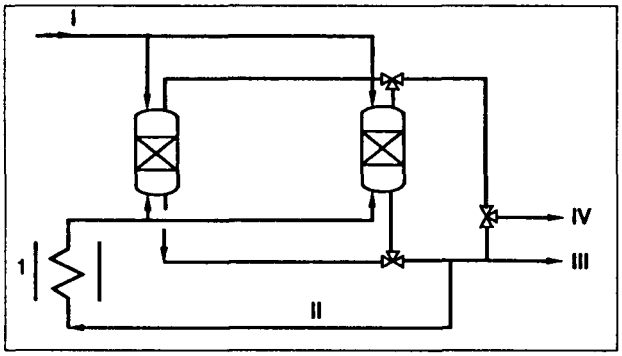


Обессеривание газа: способ осушки – адсорбцией активированным углем. I – Газ на обработку. II – Конденсат. III – Топливный газ. IV – Пополнение обработанной воды. V – Нагретый газ. VI – Газ очищенный. I – Подача воздуха в зону горения. 2 – Редуктор. 3 – Буферная емкость. 4 – Паровой котел. 5 – Циркуляционный насос. 6 – Воздушный компрессор. 7 – Фильтр. 8 – Сепаратор. 9 – Подогреватель газа. 10 – Байпасс. 11 – Расширительный сосуд. 12 – Адсорбер с активированным углем. 13 – Фильтр. 14 – Байпасс фильтра.

Молекулярные сита имеют высокую стоимость и их необходимо сменять через каждые три-пять лет. Их использование возможно для извлечения H_2S из газов, которые содержат 1% или меньше H_2S, при небольших расходах сырого газа.

Давление не оказывает заметного влияния на абсорбционную способность сит по H_2S. Она составляет несколько весовых процентов в зависимости от парциального давления H_2S.

Отмечают образование COS, если сырой газ содержит CO_2. Это образование может быть более или менее значительное в зависимости от типа сит.



Молекулярные сита. I – Сырой газ. II – Газ регенерации. III – Очищенный газ. IV – Газ регенерации. 1 – Печь для подогрева газа регенерации.

2.4.5.8. Список литературы

— A.L. Kohl et F.C. Riesenfeld. – Gas Purification. Gulf Publishing Cy. 4e ed. (1985).
— R.N. Maddox. – Gas and Liqued Sweetening. Campbell Petroleum Series, 3e ed., Tulsa, Oklahoma, Etats-Unis (1982).
— J.A. Lagas. – Selection of Gas Sweetening Processes. Comprimo Meeting. Amsterdam (november 1985).
— C. Blanc et J. Elgue. — M.D.E.A. Process selects H_2S. Hydrocarbon Processing, 60,8, 111-116 Texas, Etats-Unis, (aout 1981).
— P. Grancher. – Developpements recents dans la technologie de purification des gaz. Editeur Elf Aquitaine, Pau (1983).
— H. Dumay. Traitement des gaz au moyen de produits adsorbants. Congres du gaz, A.T.G. (1974 et 1976).
— G. Jaubertou, J. Elgue. – Desulfuration selective du gaz soutire d'un stockage souterrain. Congres du gaz, A.T.G. (1981).
— G.P.S.A. (Gas Processors Suppliers Association) "Engineering data Book", Etats-Unis (1980).

2.4.6. ТОЧКА РОСЫ ПО ВОДЕ

2.4.6.1. Поведение системы вода–углеводороды

2.4.6.1.1. Влагосодержание природного газа

Поведение воды в системе углеводородов мало зависит от ее природы. Растворимость воды в углеводородах слабая и для расчета содержания паров воды в природном газе можно практически полагать, что она нулевая. Соответственно, при небольших давлениях для определения парциального давления воды в паровой фазе можно применять закон Рауля. Оказывается, что это методика не дает хороших результатов, так как на самом деле природные газы есть смесь углеводородов, поведение которых в паровой фазе при увеличении давления не соответствует идеальному. Могут быть использованы различные формы расчета влагосодержания: представление в виде графиков, формулы или таблицы.

Цифры в квадратных скобках соответствуют номерам ссылок в списке литературы, который следует ниже.

2.4.6.1.1.1. Номограмма Мак Кита

Она позволяет рассчитывать влагосодержание газа в зависимости от давления и температуры.

2.4.6.1.1.2. Таблицы Бюкачека [1]

Были предложены различные аналитические формы. Влагосодержание (H_2O), выраженное в мг · м$^{-3}$ (н) при 0°C и 1013 мбар, определяется по формуле:

$$(H_2O) = \frac{A}{P} + B$$

где A и B – коэффициенты, которые зависят только от температуры; P – абсолютное давление в бар.

— между –40°C и +40°C

$A = 4\,926{,}5573\exp(0{,}0737433t - 0{,}00030673912t^2)$

$B = 44{,}8739\exp(0{,}053570327t - 0{,}00019866041t^2)$

— между 40°C и 90°C

$A = 6\,156{,}9611\exp(0{,}620686t - 0{,}00013096345t^2)$

$B = 40{,}5058\exp(0{,}055042799t - 0{,}00016553793t^2)$

— между 90°C и 130°C

$A = 6\,156{,}9611\exp(0{,}620686t - 0{,}00013096345t^2)$

$B = 70{,}0737\exp(0{,}032637894t)$

Необходимо отметить, что эти зависимости, применимые для метана или природных газов, свободных от примесей и инертных газов, становятся неприменимыми, если газ содержит значительные количества сероводорода (H_2S), углекислого газа (CO_2), азота (N_2) или тяжелых составляющих (C_4, C_5 и т.д.). Поправка также необходима, если газ находится в равновесии с минерализованным раствором.

Существует несколько методов, позволяющих оценить содержание паров воды в кислом газе в зависимости от его состава. Максимальное значение достигается комбинированием содержаний, определенных независимо для части углеводородов по данным Мак Кита, для CO_2 по графику Вайя и для H_2S согласно данным Селека, Гармиказля и Сейджа [3]

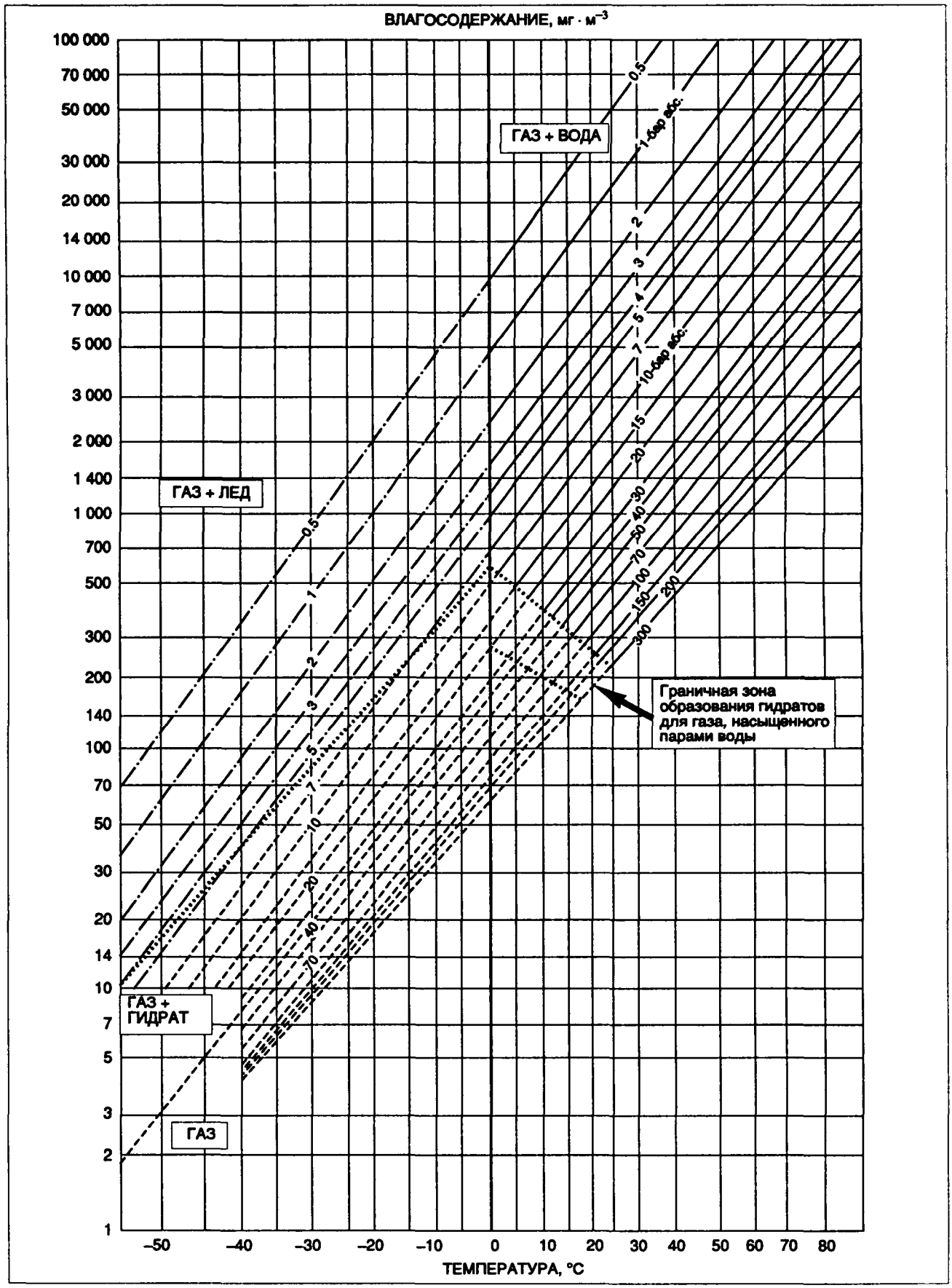
$$W = Y_{HC}W_{HC} + Y_{CO_2}W_{CO_2} + Y_{H_2S}W_{H_2S}$$

W – содержание влаги,

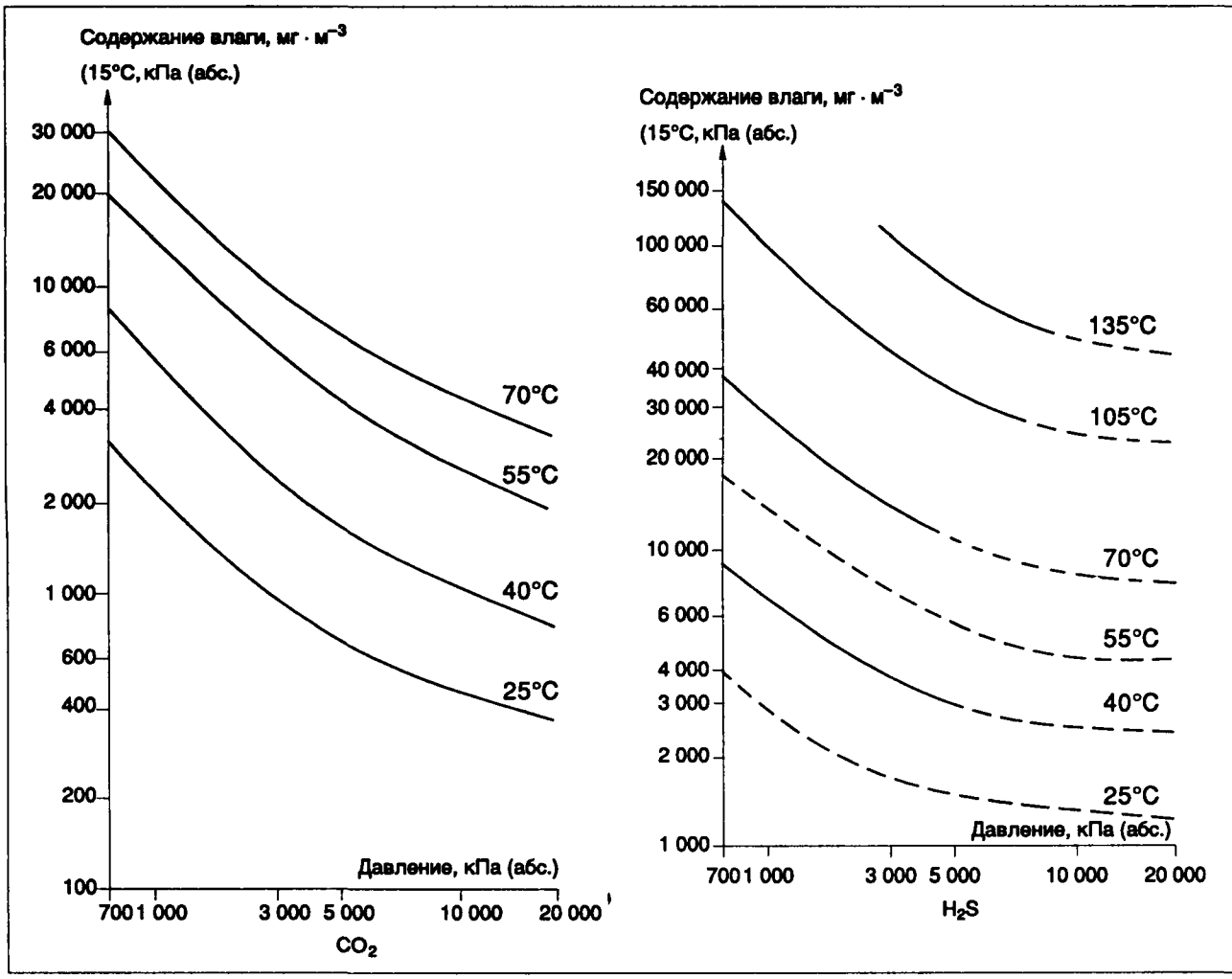
Y – молярная доля.

Если молярная доля сероводорода меньше 20%, то рекомендуется пользоваться методикой Шарма и Кэмпбела, используя соотношение

$$y = k(f_w/f)^z \text{ [4]}$$



Точка росы природного газа.



Корректировка точки росы

где:

y – молярная доля паров воды,

k – эмпирическая функция летучести паров воды и давления,

f_w – летучесть паров воды при определенной температуре и давлении, f – летучесть газа при определенной температуре и давлении,

z – уточненный коэффициент сжимаемости.

Совсем недавно была опубликована методика расчета влагосодержания кислых природных газов, базирующаяся на модификации уравнения состояния Редлиха-Квонга; она разработана Робинсоном и коллегами и может легко стать составной частью программы расчетов [5].

2.4.6.1.2. Гидраты

Гидрат – это твердое тело, образованное физическим соединением молекул воды и определенным числом молекул газа.

Молекулы после *n*-бутана слишком велики, чтобы проникнуть в полости кристаллической решетки, таким образом углеводороды выше *n*-бутана не образуют гидраты.

Единственное решение для предупреждения гидратообразования – это создание комплекса условий по температуре и давлению, возможно дальше отстоящих от условий их образования гидратов(т.е. снижение давления и увеличение температуры); разложение, по соображениям эффективности и безопасности, обычно осуществляется с двух сторон гидратной пробки.

Условия, необходимые для образования гидратов:

— присутствие свободной воды и газа ниже их точки росы,

— выполнение условий по температуре и давлению в зависимости от состава газа.

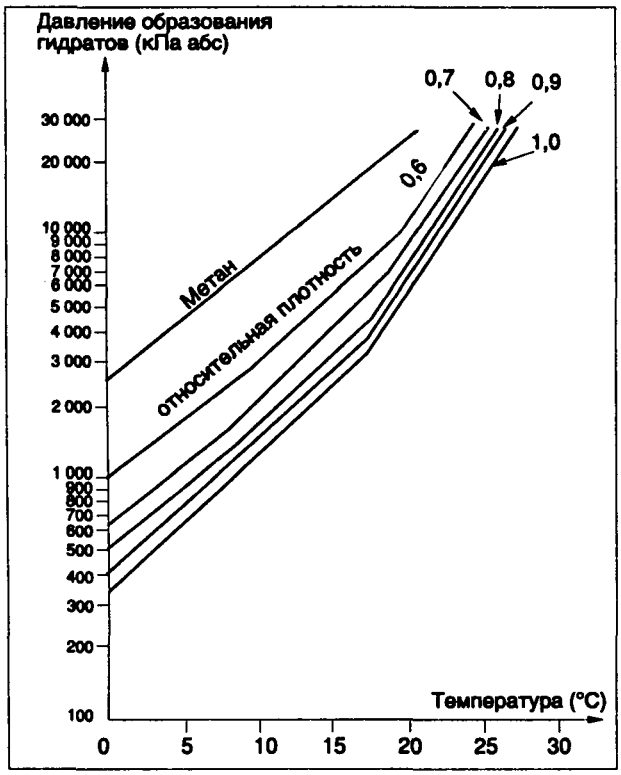
Ниже указаны различные методы определения по P–T области образования гидратов.

2.4.6.1.2.1. Метод Катца

Дается равновесная кривая в зависимости от относительной плотности газа по воздуху (см. с. 332) (приближенный метод) [6].

2.4.6.1.2.2. Метод Катца и Карсона

Этот метод вводит константы равновесия твердое тело – пар для каждой компоненты в зависимости от давления и температуры. Расчеты точки образования гидратов проводятся таким же образом, как и точки росы.



Образование гидратов (метод Катца)

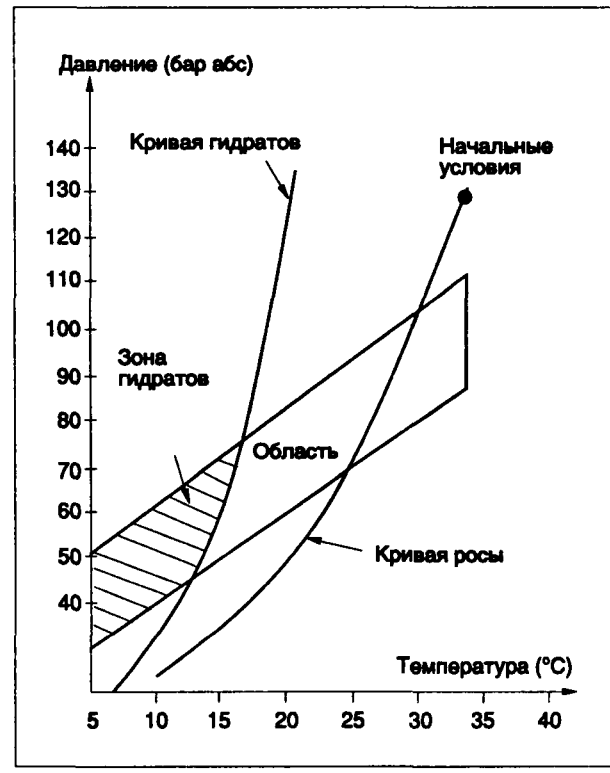


Диаграмма образования гидратов.

2.4.6.1.2.3. Метод Трекела и Кемпбела [4]

Этот метод использует серию кривых, которые позволяют осуществить графическое определение. Представляется однако, что его применение приводит к значительным ошибкам для газов с повышенным содержанием кислых газов. Эта корреляция имеет чисто эмпирическую природу и действительна строго только для тех областей, для которых они были получены.

Более точные результаты в настоящее время получены в работах Пенга и Робинсона. Их метод базируется на термодинамических соотношениях. Он представлен в виде программы [6].

2.4.6.1.3. Осушка природного газа

Доводы следующие:

— предупредить образование гидратов после обработки,
— удовлетворить требованию точки росы по воде,
— предупредить коррозию в присутствии кислых газов.
— Для предотвращения гидратообразования, когда параметры установки находятся в термобарических условиях гидратообразования, существует три способа решения проблемы (см. следующий рисунок);
— перемещение кривой образования гидратов: ввод ингибитора, который снижает температуру образования гидратов;
— перемещение кривой точек росы: абсорбция паров воды с помощью жидкого сорбента или адсорбция паров твердым осушителем;
— перемещение области функционирования: дегидратация путем охлаждения и расширения.

2.4.6.2. Ингибирование гидратов

Ингибиторами являются:

— спирты: метанол, этанол, изопропанол,
— гликоли: моноэтиленгликоль, диэтиленгликоль, триэтиленгликоль,
— аммиак.

2.4.6.2.1. Расход ингибитора

Количество ингибитора, которое необходимо ввести, можно определить с помощью экспериментального уравнения Гаммершмидта

$$W = \frac{100 \cdot d \cdot M}{K + d \cdot M}$$

где:

W – массовая доля ингибитора, % в смеси вода + ингибитор,
d – понижение температуры гидратообразования (°F),
M – молекулярная масса ингибитора,
K – коэффициент, зависящий от природы ингибитора.

Следующая таблица дает значения молекулярных масс и коэффициентов K для нескольких ингибиторов.

Ингибитор	Плотность при 15°C	Молекулярная масса	K
Метанол	0,796	32,04	2 335
Этанол	0,794	46,07	2 335
Изопропанол	0,789	60,10	2 335
Аммиак	0,617	17	2 335
Этиленгликоль	1,118	62,07	2 200
Пропиленгликоль	1,042	76,10	3 590
Диэтиленгликоль (Д. Э. Г.)	1,125	106,10	4 367
Триэтиленгликоль (Т. Э. Г.)	1,131	150,18	4 400

Эффективность ингибитора тем выше, чем меньше отношение $\frac{M}{K}$.

Количества ингибитора, определенные по уравнению Гаммершмидта, должны быть увеличены, чтобы учесть частичное испарение и/или растворение в жидкой углеводородной фазе.

Наиболее часто используемые ингибиторы – это метанол и гликоли (моноэтиленгликоль, диэтиленгликоль).

2.4.6.2.2. Различные типы используемых ингибиторов

2.4.6.2.2.1. Метанол

Он используется обычно без регенерации (потерянный метанол), но также может быть получен обратно с жидкой фазой и регенерирован с помощью перегонки (см. таблицу ниже).

Область применения:

— Небольшие установки охлаждения путем расширения.
— Периодическое (сезонное) впрыскивание в трубопроводы, охлажденные окружающей средой.
— Небольшое количество газа, подлежащего обработке.
— Точечные впрыскивания на установках для борьбы с гидратами, которые могут образоваться по некоторым обстоятельствам (падение давления, охлаждение и т.д.).

		Этиленгликоль	Диэтиленгликоль	Триэтиленгликоль	Тетраэтиленгликоль	Метанол
Химическая формула		HOC_2H_4OH	$HO(C_2H_4O)_2H$	$HO(C_2H_4O)_3H$	$HO(C_2H_4O)_4H$	CH_3OH
Молекулярная масса		62,07	106,12	150,17	194,23	32,04
Плотность при 20°C		1,1155	1,1184	1,1255	1,1257	0,7924
Изменение плотности на °C между 10 и 40°C		0,00070	0,00072	0,00078	0,00080	0,00094
Температура кипения в °C	при 1 013 мбар	197,6	245,8	288	Разложение	64,5
	при 400 мбар	168	213	252	291	43
	при 13 мбар	91	129	161	190	–16
Изменение температуры кипения в °C на мбар между 1 000 и 1 026 мбар		0,034	0,037	0,041	–	0,025
Упругость паров в мбар при 20°C		<0,13	<0,013	<0,013	<0,013	129
Поверхностное натяжение в $H \cdot м^{-1}$ при 20°C		$47 \cdot 10^{-3}$	$44,8 \cdot 10^{-3}$	$45,2 \cdot 10^{-3}$	–	$22,0 \cdot 10^{-3}$
Вязкость в пуазах (10 Па · с)	при 0°C	5,7	12,1	17,2	27	0,08
	при 20°C	2,1	3,6	4,9	5,5	0,06
	при 40°C	0,95	1,5	1,9	2	0,05
Температура застывания в °C		–12,7	–7,8	–4,3	–4,0	–97,7
Индекс рефракции M_0 при 20°C		1,4319	1,4474	1,4501	1,4598	1,3286
Изменение индекса рефракции на °C между 20 и 40°C		0,00028	0,00030	0,00030	0,00030	0,00040
Растворимость в воде при 20°C		Полная	Полная	Полная	Полная	Полная
Растворимость в органических растворителях в весовых % при 25°C	Ацетон	8	Полная	Полная	Полная	Полная
	Бензол	<0,1	3,4	Полная	Полная	Полная
	Четыреххлористый углерод	1,4	0,28	0,4	3,6	Полная
	Эфир	3,1	6,3	6	4,8	Полная
	Гептан	<0,2	0,02	<0,03	<0,02	2
	Метанол	Полная	Полная	Полная	Полная	Полная
Теплота парообразования в $кВт \cdot ч \cdot кг^{-1}$	при 1 013 мбар	0,0235	0,150	0,112	–	0,306
	при 400 мбар	0,245	0,158	0,119	–	–
Теплота сгорания в $кВт \cdot ч \cdot кг^{-1}$ при 25°C		5,343	6,164	6,466	6,653	6,294
Критическая точка (приближенное значение)						
Температура (°C)		372	408			240
Абсолютное давление (бар)		77	46,6	–	–	79,5
Удельный объем (литр на моль)		0,186	0,316	–	–	0,118
Удельная теплоемкость $C_p = A + Bt + Ct^2$						
Коэффициенты в $кВт \cdot ч \cdot кг^{-1}$ на °C	A	$0,625 \times 10^{-3}$	$0,585 \times 10^{-3}$	$0,575 \times 10^{-3}$	$0,558 \times 10^{-3}$	$0,664 \times 10^{-3}$
	B	$1,313 \times 10^{-6}$	$0,997 \times 10^{-6}$	$0,850 \times 10^{-6}$	$1,163 \times 10^{-6}$	$1,29 \times 10^{-6}$
	C	7×10^{-9}	$6,5 \times 10^{-9}$	$5,69 \times 10^{-9}$	$2,44 \times 10^{-9}$	$9,36 \times 10^{-9}$
Температура застывания, °C		116	143	166	182	14

Свойства гликолей и метанола.

Преимущества:
— Простота установок (для потерянного метанола).
— Небольшие инвестиции.
— Надежность защиты.

Недостатки:
— Коррозия в присутствии CO_2 и H_2S.
— Эксплуатационные расходы с связи с большими потерями могут быть значительными.
— Зависимость от хранения (летучесть, воспламеняемость).
— Присутствие метанола в газовой фазе может наносить вред некоторым способам дальнейшей обработки.
— В случае регенерации сложность установки.
— Токсичность.

2.4.6.2.2.2. Гликоли.

Гликоли очень часто используются для снижения температуры гидратообразования в установках подготовки газа охлаждением и в трубопроводах, транспортирующих влажный газ.

Они мало летучи, легко отстаиваются в жидких углеводородах и легко регенерируются (см. таблицу на стр. 333).

Используют водные растворы гликоля в диапазоне концентраций 60 - 80% весовых. Эта область концентрации соответствует точке эвтектики гликоль–вода, точка замерзания которого связана с низкой температурой. Использование растворов этой концентрации позволяет исключить замерзание гликоля.

Для эффективности ингибирования концентрации растворов, насыщенных и регенерированных, должны находиться в зоне эвтектики, чтобы температура застывания соответствовала уравнению Гаммершмидта.

Область применения:

М.Э.Г. используют преимущественно в установках подготовки, работающих при температурах ниже 0°С вследствие своей низкой вязкости и своей меньшей растворимости в жидких углеводородах (установки по извлечению конденсата, работающие до –30°С).

Д.Э.Г. почти не употребляется ниже 0°С (вязкость). Зато он широко используется в трубопроводном транспорте, обычно в наших (французских) регионах, работающих при температурах немного выше 0°С.

Преимущества:
— Небольшие потери (низкая летучесть).
— Простая регенерация.
— Безопасность хранения.

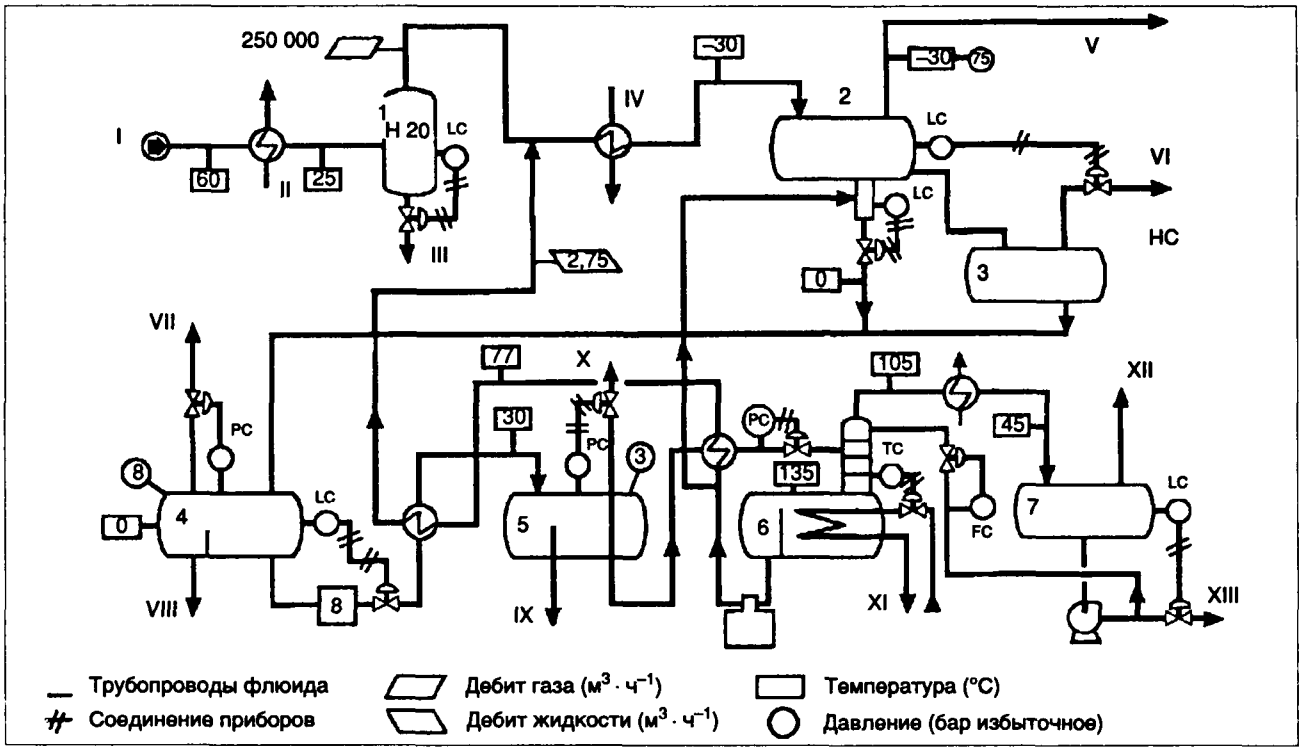
Недостатки:
— Трудности регенерации в присутствии минерализованной воды.
— Коррозия в присутствии CO_2 и H_2S.

2.4.6.2.3. Описание процесса ингибирования

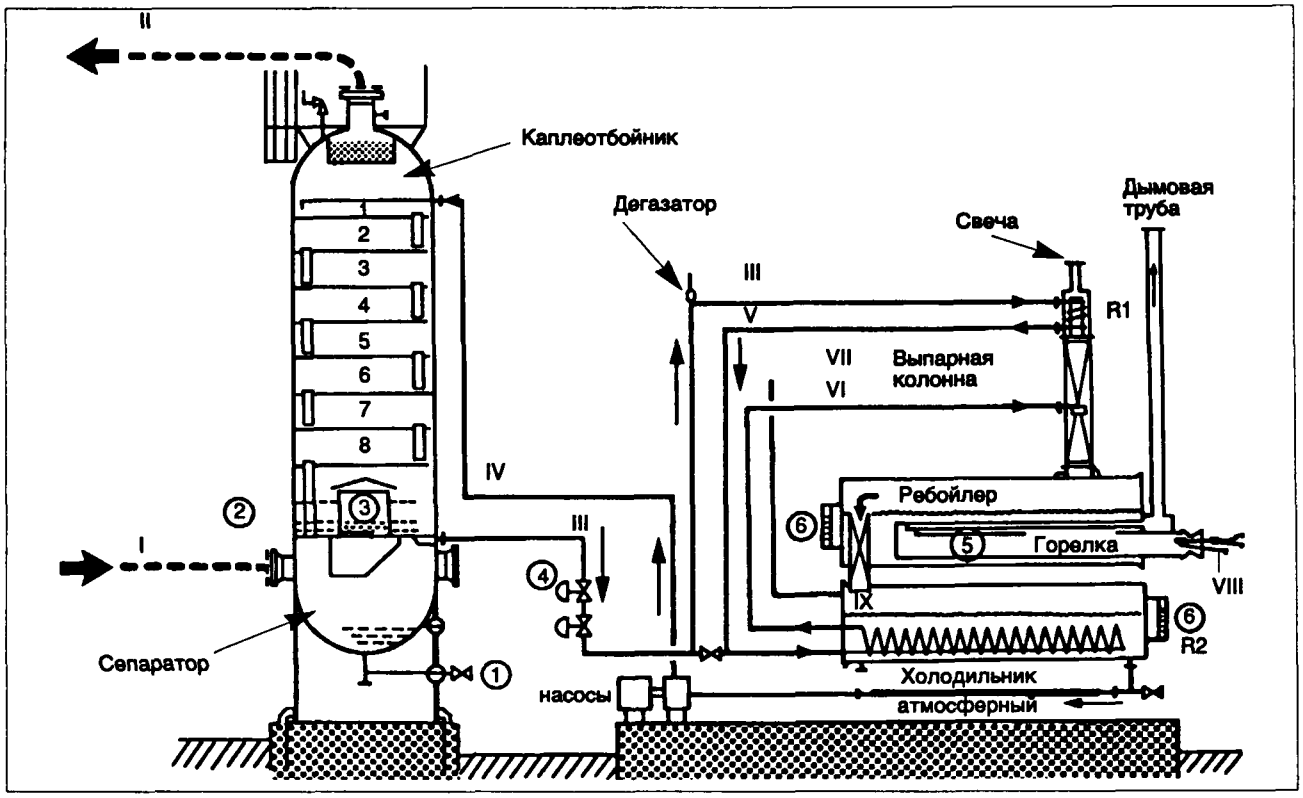
Описанная ниже установка находится на входе в установку извлечения конденсата абсорбционным методом, работающей при –30°С. Ингибирование осуществляется вводом М.Э.Г. с регенерацией раствора.

Гликоль должен вводиться в газ через форсунку, которая его распыляет.

Теплый гликоль вводится в отстойник трехфазного сепаратора, чтобы облегчить разделения системы углеводород–гликоль.



Ингибирование гидратов вводом М.Э.Г. I – Сырой газ. II – Вода. III – Удаление жидкости. IV – Пропан. V – Газ на переработку. VI – Нестабильный конденсат. VII – Топливный газ. VIII, IX – Удаление жидкости. X – Газ на свечу. XI – Пар 4 бар. XII – В атмосферу. XIII – Вода. 1, 4 – Сепаратор. 2 – Трехфазный сепаратор. 3 – Коалесцирующий фильтр. 5 – Дегазатор. 6 – Регенератор. 7 – Емкость рефлюкса. 8 – Фильтр.



Безопасность эксплуатации. I – Вход влажного газа. II – Выход сухого газа. III – Т.Э.Г. насыщенный холодный. IV – Т.Э.Г. регенерированный холодный. V – Т.Э.Г. теплый. VI – Т.Э.Г. нагретый. VII – Газ отдувки. VIII – Топливный газ. IX – Резерв регенерированного Т.Э.Г.

2.4.6.3. Абсорбция жидким растворителем

2.4.6.3.1. Различные типы растворителей

Наиболее применимые растворители для осушки газа это триэтиленгликоль (Т.Э.Г.), диэтиленгликоль (Д.Э.Г.) и этиленгликоль (Э.Г.).

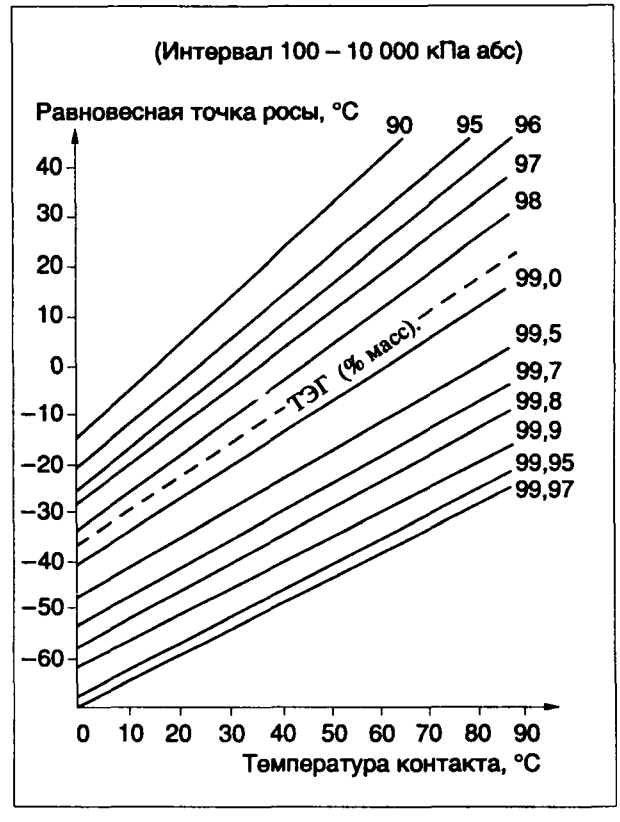
Обычно гликоли используются для получения точки росы обрабатываемого газа порядка от –20 до –40°С. Т.Э.Г. наиболее применим вследствие небольших потерь из-за испарения. Его физические свойства представлены в таблице на с. 333.

Экономические расчеты, когда речь идет об обеспечении требований по точке росы, обычно отдают предпочтение гликолевым абсорбционным установкам.

Установки просты, легко регулируются и вводятся в эксплуатацию и могут быть легко автоматизированы.

2.4.6.3.2. Описание установки гликолевой осушки

В регенераторе поглощенная гликолем вода выпаривается при атмосферном давлении с использованием тепла в ребойлере с огневым подогревом. Пары воды захватывают часть тяжелых углеводородов и сернистых соединений, если они присутствуют. После конденсации воды оставшийся газ сжигается в факеле свечи. Регенерированный гликоль охлаждается в теплообменнике "гликоль насыщенный–регенерированный" и затем вновь вводится в абсорбер с помощью насоса регенерированного гликоля (см. рисунок выше).



Равновесие вода–Т.Э.Г.

2.4.6.3.3. Условия работы и рабочие параметры

Снижение точки росы при использовании Т.Э.Г. может быть оценено с помощью графиков на стр. 335. На самом деле часто для расчета оборудования в первом приближении принимают 10°C.

Концентрацию гликоля выше 98,5% (весовых) можно получить путем ввода стриплинг-газа в низ регенератора или добавления небольшой отпарной колонны на выходе из регенератора. Порядок величины расхода газа отдувки дают следующие графики.

Абсорберы оборудованы тарелками от 4-х до 8-ми. Общая эффективность тарелок порядка 20 - 35%.

Расходы циркулирующего гликоля от 17 до 42 литров гликоля на $кг^{-1}$ извлекаемой воды (2 - 5 галлон Т.Э.Г. $фунт^{-1}$ извлекаемой воды в англосаксонских единицах).

Однако этот расход зависит от концентрации регенерированного гликоля и числа тарелок в абсорбере. Следующие дальше рисунки показывают влияние расхода Т.Э.Г. на снижение точки росы для различного числа контактных тарелок.

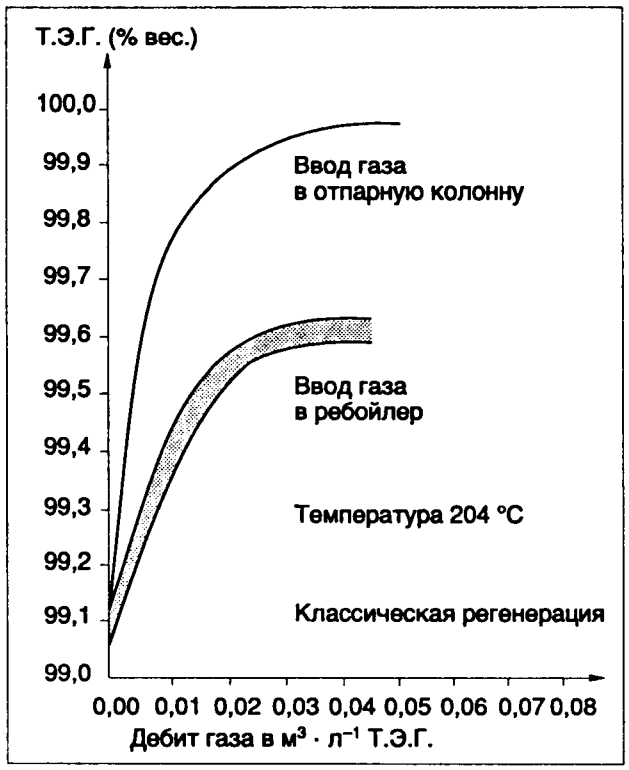
Разделение воды и гликоля в регенераторе легко осуществляется, и требуется только небольшой коэффициент орошения.

Регенераторы обычно оборудованы четырьмя тарелками и температура меняется от 190 до максимум 205°C.

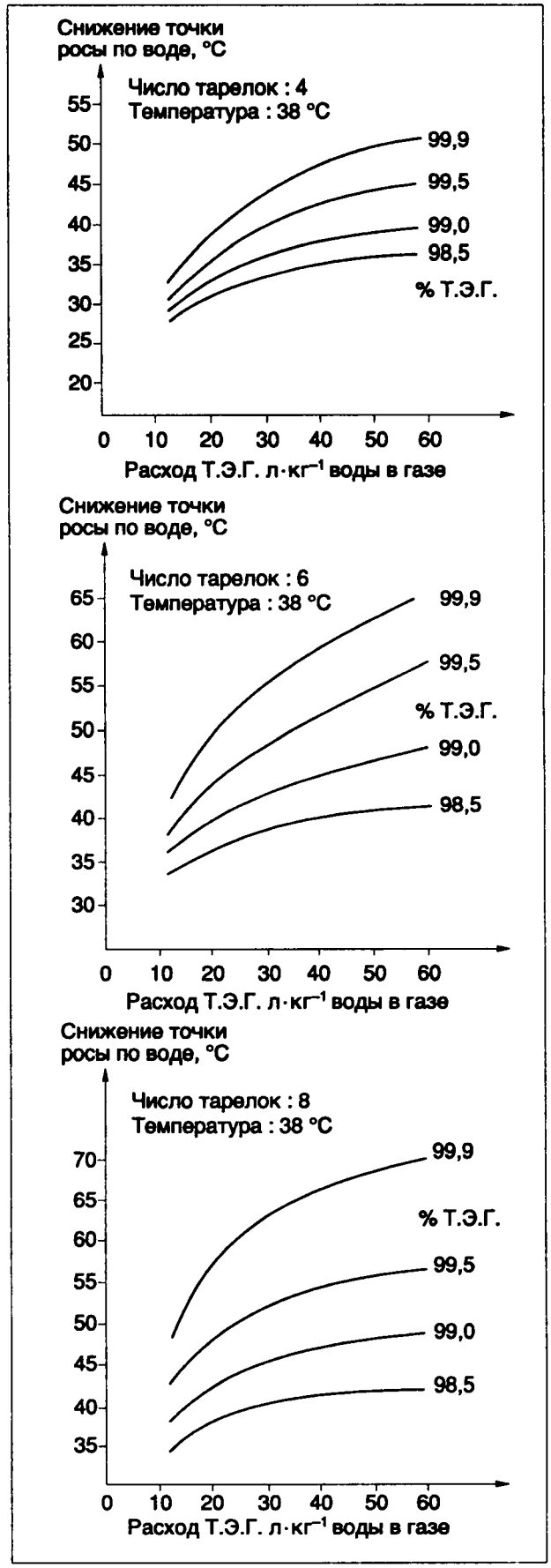
2.4.6.3.4. Проблемы использования

2.4.6.3.4.1. Абсорбция углеводородов

Увеличение количества углеводородов ведет к вспениванию и увеличению потерь гликоля.



Влияние ввода газа отпарки на концентрацию Т.Э.Г.



Снижение точки росы.

2.4.6.3.4.2. Потери гликоля

Они обычно порядка 0,0004 на 0,7 литра обрабатываемого газа (0,03 на 0,5 гал/MMSCF). Они могут быть определены как сумма: потерь в результате механического уноса осушенным газом, потери от испарения на выходе абсорбера и регенератора, механические потери в фильтрах.

2.4.6.3.4.3. Разложение гликоля

Оно является причиной термической нестабильности при высокой температуре в присутствии кислорода. Необходимо исключить очень высокие температуры в ребойлерах, это реализуется путем ограничения теплового потока и фильтрацией Т.Э.Г., для того чтобы исключить образование отложений в трубах. Контакт с воздухом должен быть также исключен.

2.4.6.3.4.4. Коррозия

Гликоли и их водные растворы не коррозионны. Если в данном типе установок наблюдается коррозия, это происходит из-за присутствия солей (по известным причинам увлекаемых вместе с водой) или органических кислот, получающихся в результате разложения гликоля.

Коррозию предотвращают, исключая разложение, как об этом говорилось выше, и контролируя *p*H раствора, который должен поддерживаться между 6 и 7,5.

2.4.6.3.4.5. Безопасность

Устройства, защищающие абсорбер:
- автоматическое удаление воды, скапливающейся внизу колонны;
- датчики верхнего и нижнего уровней на нижней тарелке, действующие соответственно на насосы и регулирующие задвижки или предохранительную задвижку;
- поддержание в колонне температуры с помощью внутренней циркуляции теплого Т.Э.Г., позволяющей исключить образование льда или гидратов, и которая может дополняться нагреванием с помощью электрического сопротивления.

Устройства, защищающие регенератор:
- предохранительные задвижки, управляемые регуляторами давления, помещенными на трубопроводы, и теплообменники (максимальное давление в несколько бар) или ребойлер, который работает практически при атмосферном давлении;
- датчики уровней в ребойлере и резервных емкостях, чтобы предупредить переполнение или отсутствие Т.Э.Г.

2.4.6.3.4.6. Автоматизация

Некоторые установки осушки состоят из абсорберов, связанных с ними их собственными насосами и регенераторами, и которые могут также соединяться с резервными нассосами и котлами.

В других случаях регенераторы и (или) насосы обезличены:
- или потому, что все они связаны с каждым из абсорберов,
- или потому, что они отделены от абсорберов буферными резервуарами регенерированного Т.Э.Г. и насыщенного Т.Э.Г.

Автоматизация может включать три уровня, согласно потребностям хранения:
- ввод в действие простых элементов, выбранных оператором: абсорбер, регенератор;
- ввод в действие цепи связанных между собой элементов (колонна, ее насосы и регенератор) по заказу оператора;
- выбор ввода в действие абсорберов, насосов и регенераторов, позволяющих оптимально обеспечить требуемый расход.

Эта версия, наиболее разработанная, заключается в облегчении выбора оператором, предлагая ему решение, которое он принимает или отвергает; или как независимо действующая система для внешнего воздействия.

2.4.6.4. Адсорбция твердым сорбентом

2.4.6.4.1. Осушка газов адсорбцией и различные типы адсорбентов

2.4.6.4.1.1. Осуществление адсорбции

Осушка газа осуществляется путем пропуска газа через колонну, заполненную адсорбентом, в контакте с которым он теряет свою влажность. Массопередача от газа к адсорбенту имеет место внутри зоны, где содержание воды адсорбента может увеличиваться до полного насыщения. Эта зона называется зоной массообмена, и фронт адсорбции перемещается в направлении газового потока. Когда фронт адсорбции достигает конца слоя, в этот момент, названный прорывом или точкой проскока, влагонасыщенность газа быстро увеличивается до влагонасыщенности перед обработкой.

Каждый адсорбент характеризуется коэффициентом поглощения (активность), который для определенной точки росы зависит от:
- природы адсорбента,
- скорости газа,
- скорости массообмена между газом и адсорбентом,
- относительной влажности и температуры газа.

Адсорбция – процесс экзотермический. Однако, когда количество влаги, которое должно быть адсорбировано, небольшое, увеличение температуры незначительно.

Насыщенный адсорбент должен быть регенерирован. Регенерация базируется на обратном условиям равновесия принципе.

Наиболее часто используемый процесс – это регенерация путем подвода тепла, осуществляемый с помощью потока горячего газа, который служит также средством эвакуации воды. Эта регенерация может осуществляться при том же давлении, что и процесс адсорбции, или при более низком давлении.

После регенерации слой сорбента должен быть охлажден, чтобы восстановить поглотительную способность. Эта операция осуществляется при помощи холодного газового потока.

Другой процесс состоит в снижении давления слоя при постоянной температуре. Используют газ с давлением, сниженным настолько, чтобы получить парциальное давление адсорбированного продукта, соответствующего чрезвычайно низкой адсорбционной способности. Требующиеся для этого процесса циклы очень короткие (несколько минут).

Осушка адсорбцией есть циклический процесс. Одна за другой следуют фазы адсорбции, регенерации и охлаждения.

Для непрерывного процесса осушки необходимо иметь в наличии как минимум две колонны: одну для адсорбции, другую для регенерации охлаждения.

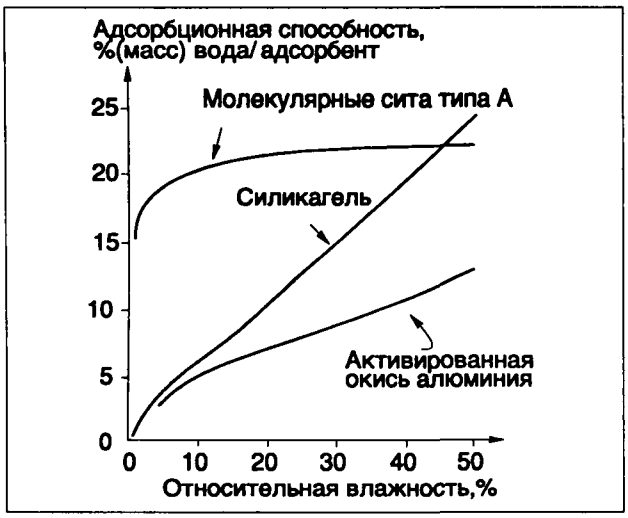
2.4.6.4.1.2. Адсорбенты

Имеются многочисленные адсорбенты, используемые для осушки газа, но наиболее часто используются следующие: активированная окись алюминия, силикагель и молекулярные сита. На рисунке на с. 338 приведено сравнение их адсорбционной способности.

2.4.6.4.1.2.1. Активированная окись алюминия

Очень хорошая активность. Позволяет получить точку росы H_2O до –75°C.

Легко адсорбирует из газа тяжелые углеводороды, без возможности десорбции путем регенерации.



Изотермы адсорбции паров воды.

Температура регенерации 175 - 300°C.

Щелочная по природе, предрасположена к реакции с возможными кислыми составляющими.

2.4.6.4.1.2.2. Силикагель

Очень хорошая активность.

Позволяет снизить влагосодержание газа приблизительно до 10 *ppm* или 8 мг · м$^{-3}$ (н).

Очень легко регенерируется. Температура 120 - 200°C.

Адсорбирует тяжелые углеводороды, но они десорбируются регенерацией.

Разрушается случайно принесенной капельной жидкостью, которая раскалывает гранулы.

Кислый по природе, реагирует с основаниями (сода, аммиак и т.д.).

2.4.6.4.1.2.3. Молекулярные сита

Наиболее активный адсорбент. Позволяет достичь содержания H_2O ниже 18 мг · м$^{-3}$ (н).

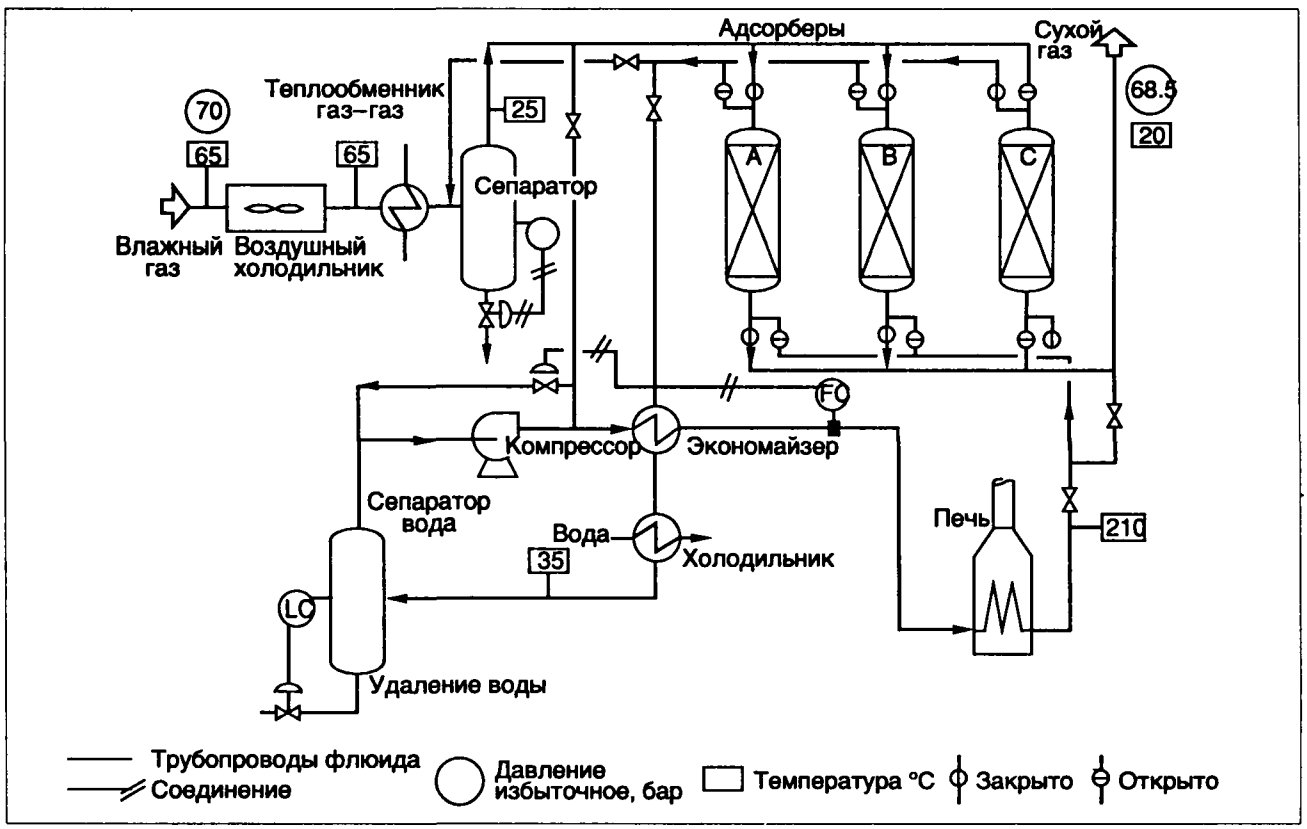
Высокая температура регенерации: 220 - 350°C.

Для осушки наиболее часто используется тип 4А. Диаметр его пор мешает адсорбции тяжелых углеводородов (C_{3+}).

Щелочные по природе, они чувствительны к кислотам.

Основные преимущества по сравнению с активированной окисью алюминия и силикагелем:

— возможна осушка при высокой температуре,
— возможно использование для очень низкого влагосодержания,
— управление коадсорбцией разумным выбором типа сит.



Осушка адсорбцией молекулярными ситами.

2.4.6.4.2. Описание установки осушки

Схема приведена на рисунке на с, 338.

2.4.6.4.3. Проблемы использования

Это проблемы, связанные с наличием воды, присутствием тяжелых углеводородов, которые могут быть адсорбированы и не десорбированы при регенерации.

Меры предосторожности, которые нужно принять, следующие:

— уменьшить количество воды, подлежащее адсорбции, с помощью охлаждения и сепарации на входе. Охлаждение может быть доведено до температуры приблизительно на 5°С выше температуры образования гидратов;
— исключить подтягивание жидкости к адсорберам (вода, углеводороды, сода и т.д.);
— обеспечить хорошую регенерацию сит, чтобы иметь по возможности меньшую насыщенность водой.

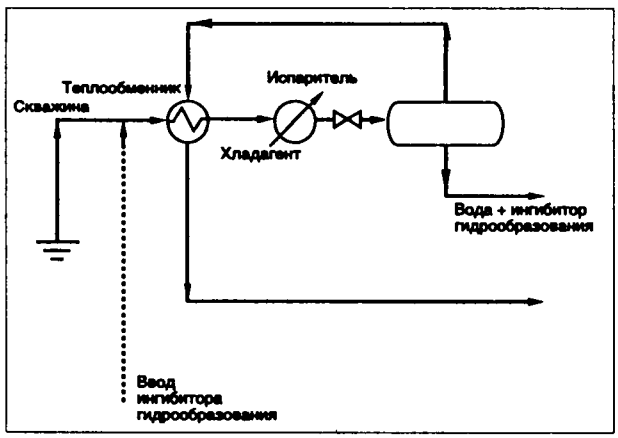
2.4.6.5. Обезвоживание охлаждением и снижением давления

Когда можно создать перепад давления для газа, который необходимо обработать, можно реализовать обезвоживание охлаждением и снижением давления.

Возможны два типа процессов: с применением или без применения ингибитора, в зависимости от того, могут или не могут образовываться гидраты во время охлаждения в теплообменниках.

Можно реализовать в данном типе установок точки росы порядка от –10 до –20°С.

Принципиальная схема установки дается ниже на рисунке. Этот тип установки предпочтительнее использовать тогда, когда хотят осуществить осушку газа и извлечение конденсата. К этому вернемся в § 2.4.7.



Осушка охлаждением-расширением.

2.4.6.6. Список литературы

[1] R.F. Bukacek. – *I.G.T. Research Bulletin*, n° 8, Chicago, Etats-Unis (1955).
[2] J. Saint-Just et D. Bomassy. – Point de rosee et teneur en eau: specificite du gaz naturel. *Gaz d'aujourd'hui*, p. 303 (octtobre 1984) A.T.G. Paris.
[3] F.T. Selleck, L.T. Carmichael et B.H. Sage. – *Ind Eng. Chem.*, vol. 44, 2219 Washington, Etats-Unis (1952).
[4] J. Campbell. – Gas Conditioning and Processing. Campbell Peetroleum Series, Oklahhoma, Etaat-Unis (1981).
[5] J.N. Robinson et E. Wichert. — Oil and Gas Journal. Tulsa, Oklahoma, Etats-Unis (6 fevreier 1978).
[6] D.L. Katz. – Handbook of Natural Gas Enggineering. McGraw Hill Company, Maidenheead, Grande-Bretagne.
[7] D.B. Robinsonm et D.Y. Peng. – I @ EC Fund, 15(1), 54-64. Washington, Etats-Unis (1976).

2.4.7. Точка росы по углеводородам и извлечение C_2, C_3, C_4

2.4.7.1. Введение

Цели поиска решений по извлечению тяжелых углеводородов и извлечению паров воды близки между собой (требования точки росы, теплота сгорания). Плюс к этому стоит задача более полного извлечения тяжелых углеводородов с целью повышения стоимости продукции фракций: этана, пропана, бутана.

Различные используемые решения выражены в диаграмме P–T уменьшением фазовой зоны определенного природного газа. Эти операции обычно называются извлечением тяжелых углеводородов.

Это проиллюстрировано на нижеследующем рисунке, где представленные фазовые кривые соответствуют следующим понятиям:

A – газ транспортабельный (т.е. который можно транспортировать по газопроводам),

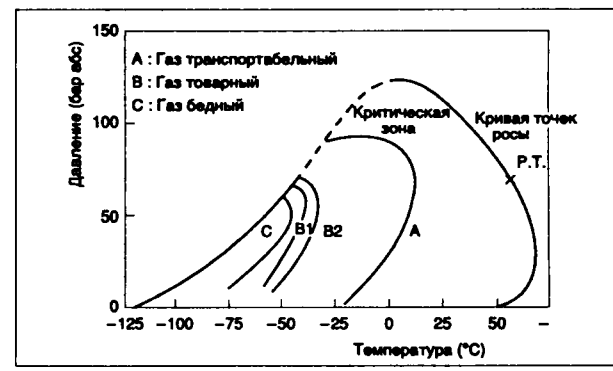
B – газ коммерческий,

C – глубокое извлечение С.Н.Г.

Используемая технология может быть классифицирована следующим образом:

— масляная абсорбция углеводородов,
— создание низких температур охлаждением и/или изоэнтальпийным, или политропным расширением,
— адсорбция углеводородов.

Расчеты, некогда долгие и скучные, могут быть в наши дни выполнены с помощью вычислительных машин и программ, моделирующих промышленные процессы.



Фазовая диаграмма (P–T).

2.4.7.2. Отбензинивание абсорбцией

2.4.7.2.1. Принцип и схема обработки

2.4.7.2.1.1. Принцип

Чтобы изменить равновесные условия и осуществить конденсацию углеводородов, которые необходимо извлечь, их вводят в контакт с растворителем в таких условиях по температуре и давлению, что они абсорбируются жидкой фазой.

Ввод в контакт газа, подлежащего обработке, с маслом осуществляется с помощью противоточной циркуляции в колоннах с тарелками или насадками. Механизм абсорбции имеет такую же диффузионную природу, как дистилляция, но массообмен совершается главным образом от паровой фазы к жидкой. Самые тяжелые компоненты газа абсорбируются маслом согласно законам термодинамического равновесия.

Из верхней части колонны выходит сухой газ, тогда как внизу отбирают богатое масло, содержащее тяжелые абсорбированные углеводороды. Затем снижают давление масла, нагревают и направляют его в колонну дистилляции или отпарки паром, чтобы извлечь абсорбированные углеводороды (регенерация).

Абсорбция осуществляется при высоком давлении и низкой температуре, регенерация – при низком давлении и высокой температуре, как это схематизировано на рисунке ниже.

2.4.7.2.1.2. Факторы, обусловливающие абсорбцию

Коэффициент извлечения абсорбцией зависит от следующих параметров:

— числа ступеней или тарелок,

— абсорбционного фактора $A_i = \frac{L}{G} K_i$, который должен быть по возможности более высокий,

где L и G есть молярные расходы жидкости и газа и K_i – константа равновесия компонента.

Для определенного расхода газа G выгодно иметь большее число молей масла, однако масла с низкой молекулярной массой.

Кроме того фактор A_i увеличивается с уменьшением K_i, т.е. с увеличением давления и уменьшением температуры, а также при использовании парафинистого абсорбента.

И наоборот, десорбция улучшается при снижении давления и повышении температуры, десорбционный фактор S_i ("стриппаж") имеет обратную зависимость.

2.4.7.2.1.2.1. Число тарелок

При увеличении числа теоретических тарелок от 7 до 10 коэффициент абсорбции увеличивается, но очень незначительно. Число реальных тарелок абсорберов для отбензинивания составляет порядка 20, т.е. эффективность реальной тарелки 4 - 50%.

2.4.7.2.1.2.2. Масло с низкой молекулярной массой

Существует два ограничивающих фактора:

— слишком большая летучесть вызывает повышенный унос паров с обработанным газом,

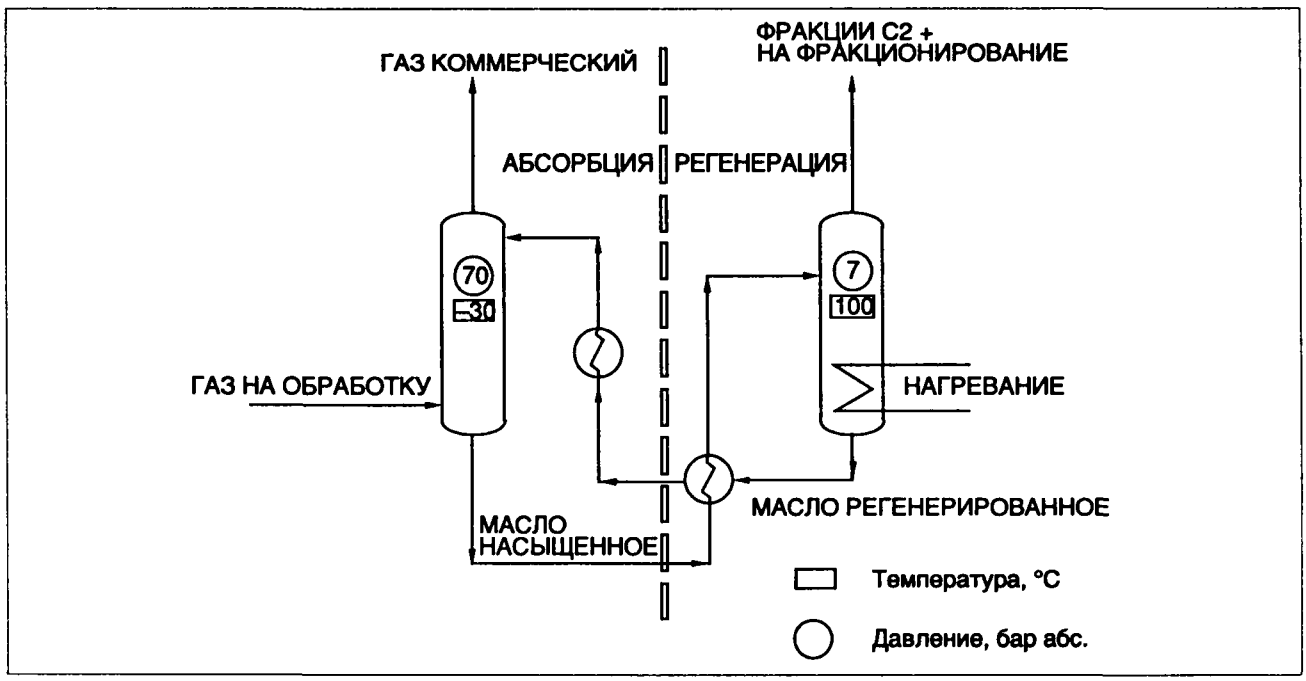
— абсорбент не должен содержать углеводородных фракций, которые хотят извлечь.

Два основных преимущества:

— массовый расход циркулирующего абсорбента меньше, чем для масла с большей молекулярной массой, поэтому снижаются эксплуатационные расходы,

— снижение вязкости способствует повышению эффективности тарелок.

В более эффективных процессах обычно используют фракции C_7 и C_{10}.



Принцип масляной абсорбции.

2.4.7.2.1.2.3. Высокое давление

Рабочее давление абсорберов для извлечения углеводородов очень часто немного выше давления в магистральных газопроводах, куда подается газ (величина порядка: 60 - 75 бар).

2.4.7.2.1.2.4. Низкая температура

Большинство новых установок работает при температурах от –10 до –30°C.

2.4.7.2.1.3. Этапы отбензинивания абсорбцией

Они следующие:

— осушка газа, обычно гликолем,
— охлаждение газа и растворителя холодильной установкой,
— абсорбция при высоком давлении,
— деэтанизация, предназначенная для освобождения растворителя от легких абсорбированных фракций (метана и этана), используемых как внутреннее топливо,
— стабилизация (регенерация), которая позволяет извлечь фракции С.Н.Г. и абсорбированный бензин.

Абсорбент направляется в абсорбер.

2.4.7.2.2. Описание установки

Описываемая установка позволяет осуществить глубокое извлечение.

После охлаждения и удаления воды вводят гликоль для предотвращения образования гидратов. Газ, охлажденный до –30°C, входит в абсорбционную колонну COl, противотоком стекает холодное абсорбционное масло. Наверху выходит газ, соответствующий требованиям транспорта.

Масло, содержащее абсорбированные углеводороды, вначале освобождается от растворенного метана с помощью снижения давления, затем, после подогрева, поступает в деметанизатор CO2. В верху колонны дополнительный поток холодного масла позволяет ограничить десорбцию этана и исключить десорбцию C_{3+}.

Масло, извлеченное с низа колонны, нагревается до 145°C перед тем, как его подать в колонну регенерации CO3, которая в верху отделяет абсорбированные компоненты от C_2 до C_6. Продукция низа рециркулируется; чтобы избежать накопления абсорбированных тяжелых углеводородов (C_6), осуществляется непрерывное их удаление.

2.4.7.2.3. Применение

2.4.7.2.3.1. Области применения

Расход обрабатываемого, в связи с необходимым инвестициями, газа должен быть относительно большим (1 - 5 · 10^6 м^3 (н) сут$^{-1}$).

Коэффициент извлечения может меняться от:

— C_2: 10 до 50%,
— C_3: 50 до 90%,
— C_4: 70 до 98%.

2.4.7.2.3.2. Преимущества

Основные преимущества масляной абсорбции заключаются в ее рабочих параметрах и надежно-

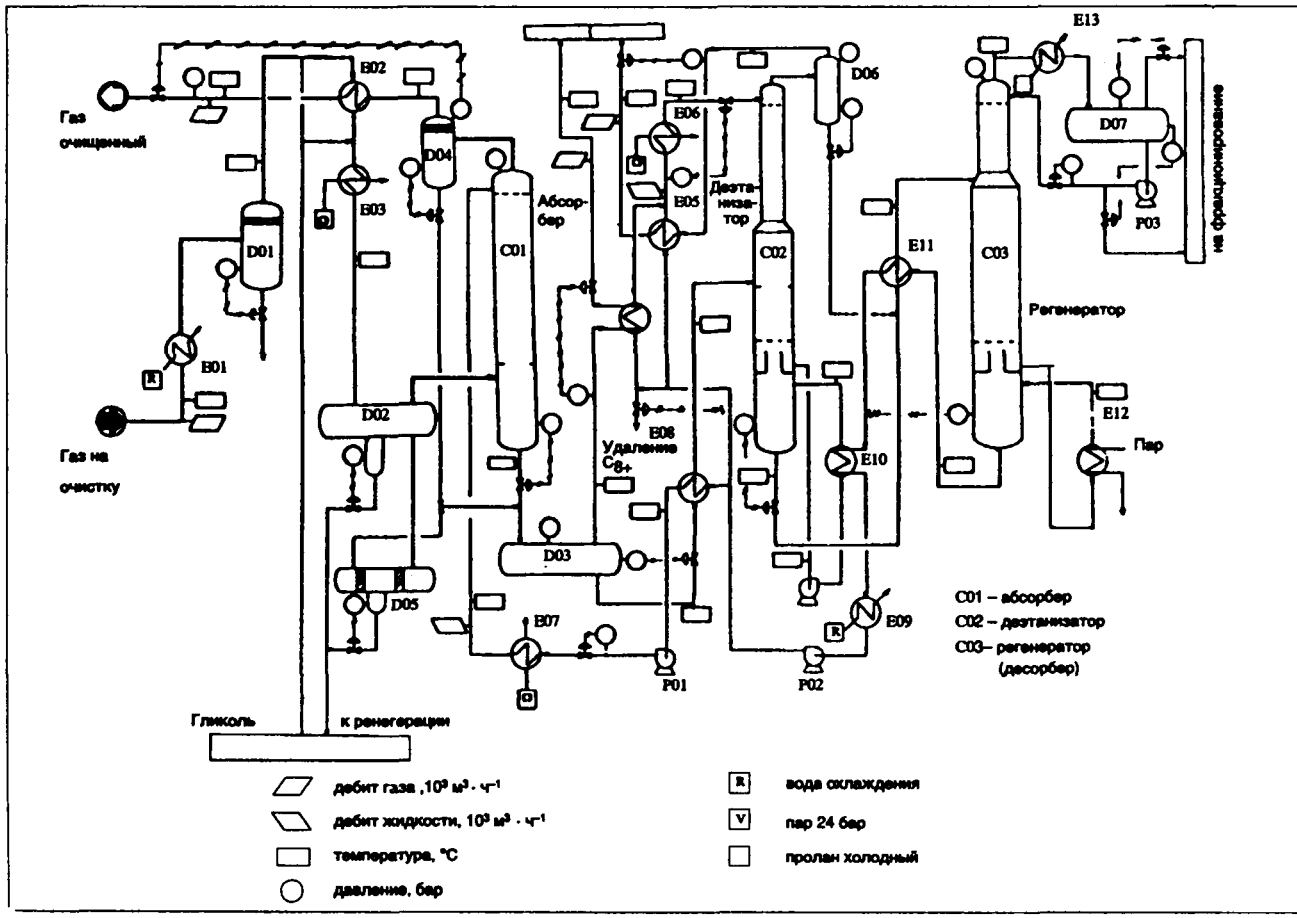


Схема процесса отбензинивания абсорбцией.

сти, ее гибкости и приспособленности к различным степеням извлечения. Работа при постоянном давлении не требует восстановления давления очищенного газа.

Температуры функционирования позволяют использование обычных сталей (–30°C).

2.4.7.2.3.3. Недостатки

К недостаткам относятся большие инвестиции (значительная холодильная установка), слабая селективность абсорбции, возможность присутствия растворителя в очищенном газе (унос в верху абсорбера).

2.4.7.2.4. Оперативные меры предосторожности

Должны быть приняты предосторожности, чтобы обеспечить хорошую сепарацию гликоль–жидкие углеводороды, так как температуры регенерации вызывают разложение захваченных частиц гликоля, а это ведет к коррозии и закупоркам.

Контроль качества циркулирующего абсорбционного масла должен быть строгим. Ингибирование гликолем должно быть таким, чтобы исключить образование гидратов.

2.4.7.3. Отбензинивание охлаждением

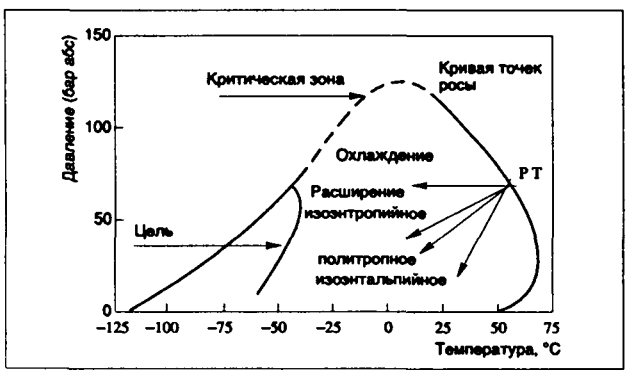
2.4.7.3.1. Принципы и различные процессы

Различные процессы отбензиневания охлаждением базируются все на одинаковом принципе: изменение равновесных условий, чтобы оказаться в зоне, дающей возможность конденсироваться углеводородам, которые необходимо извлечь. Это реализуется снижением температуры и, в случае необходимости, давления.

Имеется выбор между различными способами, которые отличаются в основном термодинамическими процессами, которые нужно осуществить, чтобы получить охлаждение газа:

— внешнее охлаждение холодильной установкой (пропан, фреон, аммиак, этан, этилен),
— изоэнтальпийное расширение (эффект Джоуля–Томсона), осуществленное в дроссельном вентиле,
— политропиное расширение, реализованное в турбине расширения (турбодетандер) с возвратом энергии,
— внешнее охлаждение совместно с процессами снижения давления для улучшения показателей.

Иллюстрация представлена на рисунке ниже.



Фазовая диаграмма (P–T).

Выбор процесса для конкретной задачи делается в зависимости от:

— показателей каждого процесса,
— инвестиций, которые необходимо вложить,
— эксплуатационных расходов, которые им соответствуют.

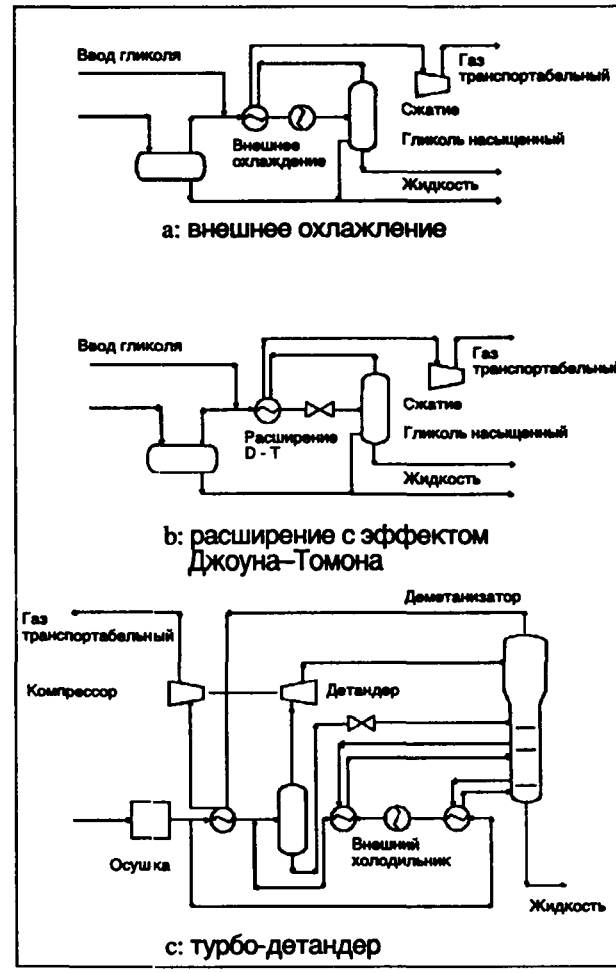
2.4.7.3.2. Внешнее охлаждение

Оно обычно используется для небольших расходов газа, особенно если его низкое давление не позволяет получить достаточное охлаждение путем расширения газа (см. ниже рисунок "a").

Его используют также для регулирования точки росы по углеводородам горючего газа (например: снабжение газовой турбины).

Этот тип установки имеет преимущества, т.к. позволяет исключить или снизить восстановление давления.

Большие инвестиции (холодильные установки) и повышенные эксплуатационные расходы (энергия для сжатия охлаждающего флюида).



Процессы отбензинивания.

2.4.7.3.3. Изоэнтальпийное расширение

2.4.7.3.3.1. Область применения и ограничения

Этот процесс очень широко распространен, когда имеется достаточно большое начальное

давление. Диапазон производительности очень широкий, от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч $м^3 \cdot (н)ч^{-1}$.

Самые простые установки, называемые обычно "Колд фрак" (см. рисунок "b" на стр. 342), используются для получения низких температур снижением давления с использованием теплообменника газ теплый / газ холодный и обработки небольших расходов газа.

Их главные преимущества следующие:

— установка несложная (например на разрабатываемом месторождении),
— небольшие инвестиции,
— нулевое энергетическое потребление, если нет восстановления давления газа,
— осушка с использованием ингибирования (метанол или гликоль),
— обычные материалы (углеродистая сталь).

И наоборот, имеются установки глубокой переработки, использующие дополнительно внешние каскадные холодильные циклы, значительной пропускной способности, которые позволяют извлекать бутан, пропан и даже этан. Схема установки приведена ниже.

Этот тип установок характеризуется значительными инвестициями и энергетическими затратами. Им предпочитают теперь процесс с политропным расширением и получением энергии.

2.4.7.3.3.2. Оперативные меры предосторожности

Необходимо обеспечить хорошую осушку газа, чтобы исключить образование гидратов в трубках теплообменников.

Так же важен контроль чистоты холодильных агентов (пропан, этан).

2.4.7.3.4. Политропное расширение в турбине

Политропное расширение, осуществляемое в турбине (турбодетандер), превращает внутреннюю энергию газа в работу и сопровождается получением холода. Если степень расширения большая, конечная температура может быть очень низкой.

2.4.7.3.4.1. Области применения

Имеющийся в наличии ассортимент мощностей турбодетандеров от нескольких киловатт до 7 мегаватт позволяет их использование в установках отбензинивания различного размера.

Однако процесс с турбодетандером более применим для больших расходов газа (несколько миллионов $м^3$ (н) · $сут^{-1}$) и особенно, когда необходимо добиться значительной степени извлечения С.Г.Н. (до 85% этана).

Применение низких температур требует глубокой осушки газа (молекулярными ситами).

Используемые материалы должны быть адаптированы к уровню температур на различных участках установки.

2.4.7.3.4.2. Описание установки отбензинивания

Можно рассматривать каждый случай как особенный, в сущности не существует стандартной установки.

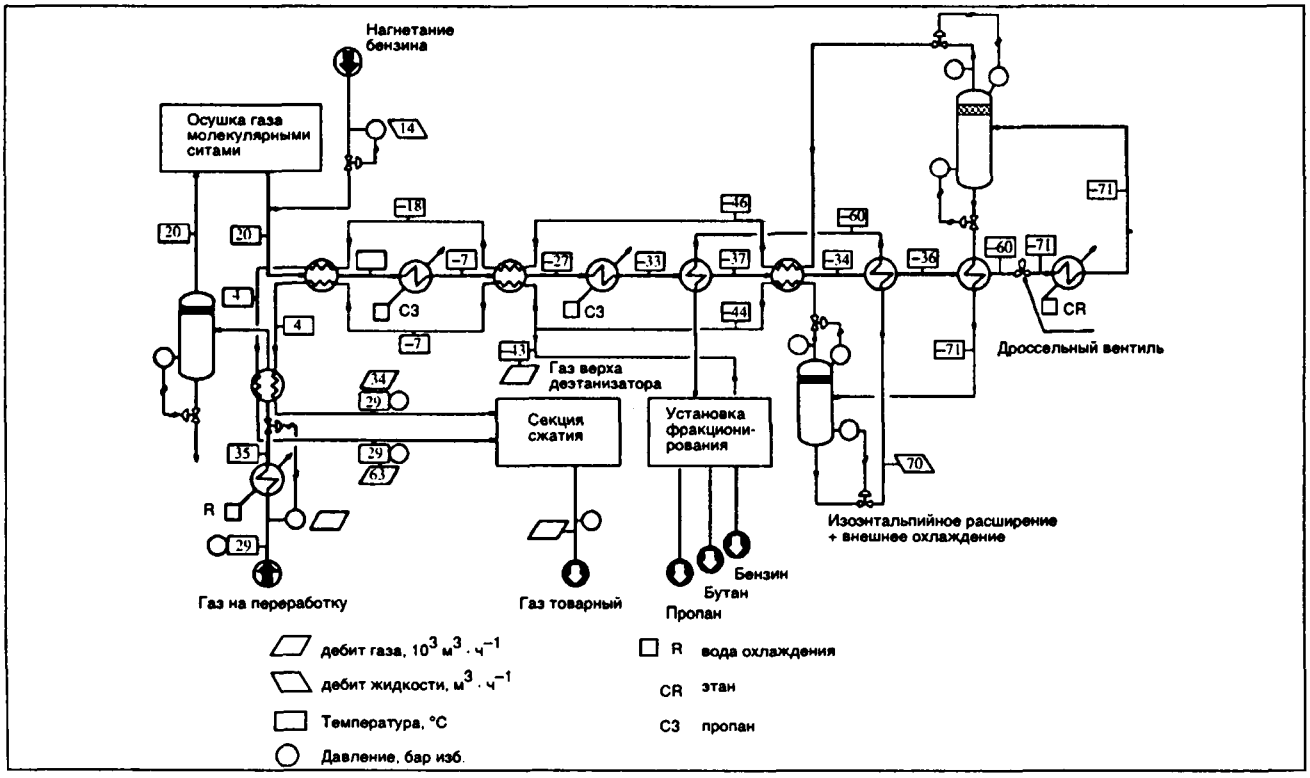


Схема процесса низкотемпературного отбензинивания: изоэнтальпийное расширение.

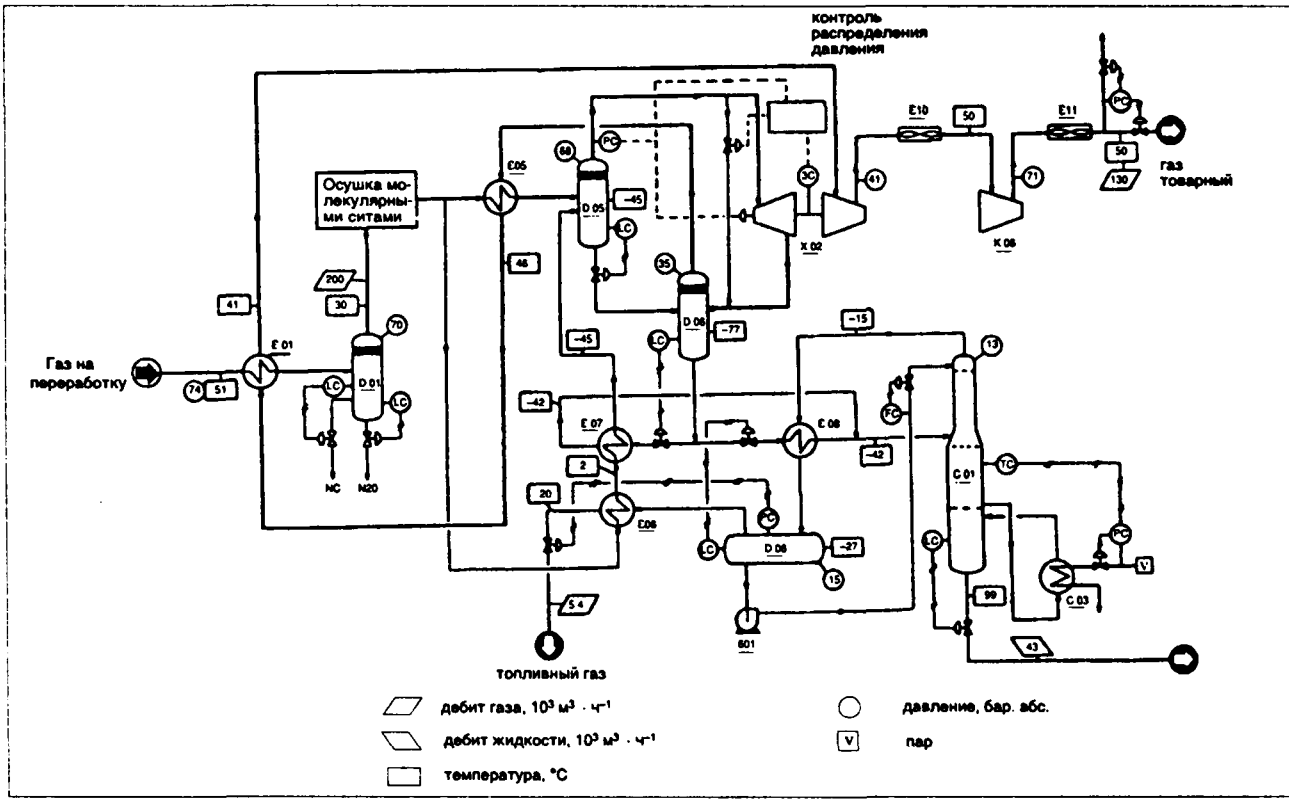


Схема процесса отбензинивания с турбодетандером.

Схемы процессов приведены на рисунке "b" на странице 342 и особенный случай (см. рисунок выше).

Процессы с турбодетандером характеризуются в основном:

— очень высокими показателями и высокими коэффициентами извлечения C_2, C_3, C_4,
— прекрасной надежностью,
— хорошей гибкостью, когда речь идет о производительности, но чувствительны к изменению давления,
— приемлемая конденсация, которая может достигать 40% (масс.), в зависимости от типов турбин,
— инвестиции и эксплуатационные расходы значительно меньше, чем при абсорбционных процессах,
— хорошая избирательность сепарации.

Использование турбодетандеров требует особого внимания к проблемам герметичности, вибрации (высокие скорости), регулированию, и обслуживание должно осуществляться работниками высшей квалификации.

2.4.7.3.4.3. Термический сепаратор

Оригинальная технология разработана во Франции "Société Bertin" при содействии "ElfAquitaine". Речь идет о термическом сепараторе, изготовляемом и поставляемом в продажу "Societé N.A.T." (Применение новых технологий).

2.4.7.3.4.3.1. Принцип

Охлаждение газа осуществляется с помощью политропического расширения без отбора механической энергии. Этот процесс сочетает преимущества и простоту расширения с использованием эффекта Джоуля–Томсона (статический аппарат) и термическую эффективность политропного расширения.

Самая большая построенная установка перерабатывает $2 \cdot 10^6$ м³ (н) · сут$^{-1}$ газа при давлении 10 бар и использует параллельно четыре термических сепаратора.

Аппарат, главным образом, может быть использован для максимального извлечения конденсата из попутного газа нефтяных месторождений.

2.4.7.3.4.3.2. Пуск в действие

См. рисунок на стр. 345.

Хладопроизводительность, вызванная термическим сепаратором, передается газовым теплообменником высокого давления, чтобы охладить и отделить тяжелые фракции.

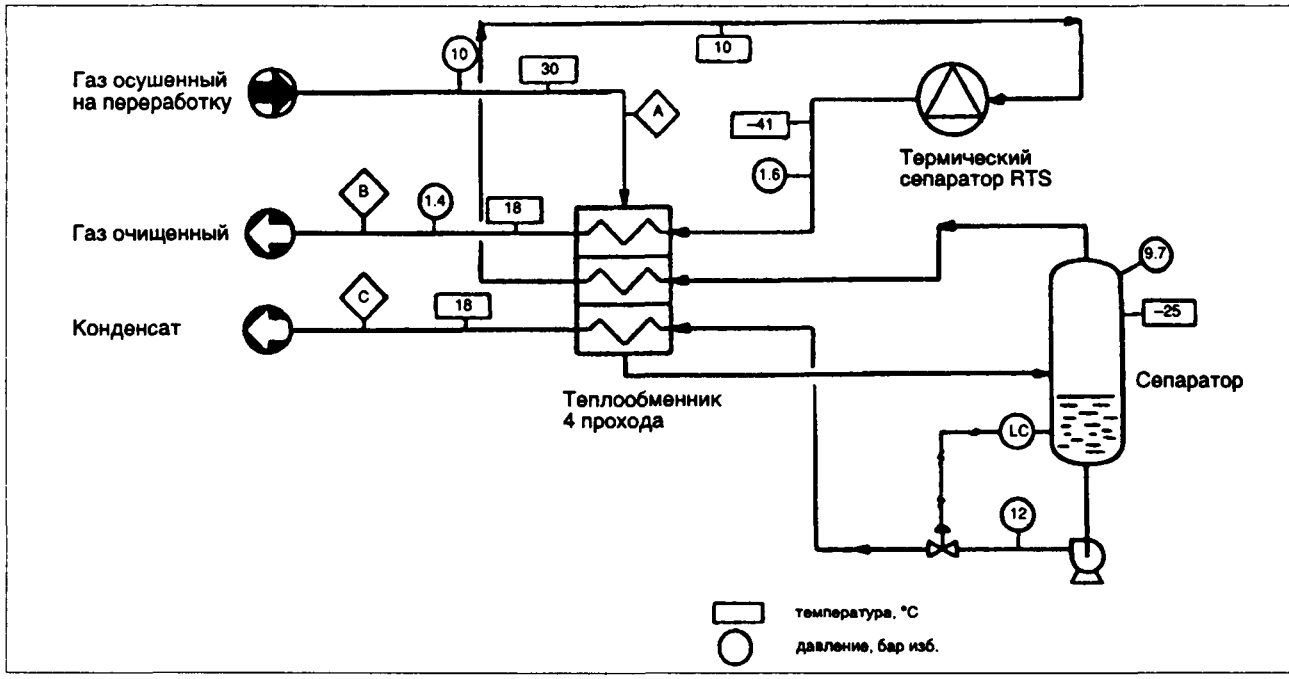
2.4.7.4. Отбензинивание адсорбцией

Процесс извлечения углеводородных компонентов адсорбцией осуществляется обычными адсорбентами, такими, как активированный уголь, оксид алюминия, силикагель и молекулярные сита.

2.4.7.4.1. Принцип. Адсорбция нескольких компонентов

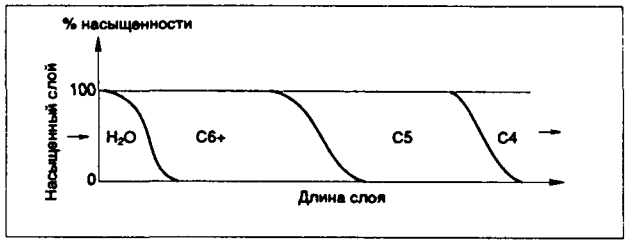
Все углеводороды, от метана и до более тяжелых, адсорбируются только по мере того, как газ проходит через слой, самые тяжелые углеводороды замещают более легкие, которые уже адсорбировались ранее.

Кроме того, адсорбенты, за исключением активированного угля, имеют очень большое сходство с парами воды. Она замещает адсорбированные углеводороды и эту способность используют для извлечения паров воды.



Принципиальная схема термического сепаратора RTS

Рисунок ниже показывает насыщенность слоя в момент проскока пентана. Он иллюстрирует последовательное перемещение компонентов одного за другим. Если цикл остановить в этот момент, выходящий газ не будет содержать ни пентана, ни гексана и будет частично обезвожен.



Схематический вид насыщенности слоя в момент проскока пентана.

2.4.7.4.2. Практические аспекты

Применение сопоставимо с извлечением из паров газа воды. Оно включает следующие особые проблемы.

Можно рассматривать осуществление одновременно на одной и той же установке извлечения паров воды и удаления тяжелых углеводородов, исключение составляет активированный уголь по причине своего слабого сходства с водой.

Регенерация осуществляется с помощью перегретого газа или пара в случае использования активированного угля. Необходимо отметить, что конденсаты не десорбируются с одной и той же скоростью: почти мгновенная десорбция для пентанов и более легких, более медленная для гексанов и более тяжелых. Состав газа регенерации меняется во времени.

Извлечение адсорбированных углеводородов осуществляется в процессе регенерации охлаждением газа и их конденсацией. Чтобы содействовать этой конденсации, выгодно свести к минимуму расход газа регенерации, чтобы увеличить концентрацию компонентов и содействовать таким образом конденсации.

Циклы обычно небольшой продолжительности – 20 - 30 минут. Для данного расхода и состава эта продолжительность зависит от времени проскока ключевого компонента, который необходимо извлечь.

Длина зоны должна быть достаточной, чтобы стабилизировать зону массопередачи.

Этот процесс используется главным образом в следующих случаях:

— пропускная способность: от 150 до 5000 × $\times 10^3$ м^3 (н) · сут$^{-1}$,
— незначительное содержание C_3,
— стремление получить необходимую точку росы для небольших месторождений, изолированных от других разрабатываемых месторождений;
— окончательная обработка газов, используемых как сырье для химической промышленности.

2.4.7.4.3. Обычные адсорбенты

Адсорбционная способность основных адсорбентов по углеводородам и воде (кроме активированного угля) в значительной степени идентична.

Отметим однако для каждого из них несколько особых аспектов:

— активированный уголь:
  · очень большое сходство для углеводородов,
  · обычно используется для осушенного газа,
  · возможность отбензинивания, депарафинизации, извлечения нафталинов,
  · температура регенерации: 300°C;
— активированная окись алюминия:
  · адсорбирует воду и углеводороды,
  · извлечение хуже по сравнению с активированным углем,
  · температура регенерации: 200 - 300°C;

— силикагель:
  · адсорбирует воду и углеводороды,
  · активность промежуточная между активированным углем и активированной окисью алюминия,
  · температура регенерации: 200 - 300°C;
— молекулярные сита:
  · используются в основном для глубокой осушки газа,
  · позволяют, при разумном подборе диаметра пор, осуществлять селективную адсорбцию (отделение парафинов нормального ряда от других углеводородов с боковыми и циклическими связями),
  · температура регенерации: до 350°C.

2.4.7.4.4. Описание установки

Установка, описанная ниже, обрабатывает газ, насыщенный парами воды, и должна обеспечить точку росы по воде (64 мг · м$^{-3}$ (н)), а также извлечь тяжелые углеводороды со следующими результатами:

Компоненты	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
Степень извлечения	3%	8%	40%	90%	100%

Установка включает четыре адсорбера, печь регенерации, воздушный холодильник и трехфазный сепаратор.

Адсорбция осуществляется параллельно в двух адсорберах продолжительностью 30 минут.

Регенерация и охлаждение производятся открытым циклом. Газ регенерации 58 000 м^3 (н) · ч$^{-1}$ отбирается от сырого газа, входящего в установку. Он проходит, чтобы его охладить, слой адсорбента, который был только что регенерирован, затем нагревается до 330°C в печи перед тем, как пройти через насыщенный слой, где он выпаривает адсорбированные воду и углеводороды.

Затем он охлаждается до 35°C в воздушном холодильнике, чтобы сконденсировать воду и углеводороды, которые он принес, и поступает в трехфазный сепаратор. Газ после сепаратора направляется на вход в адсорбер, который находится на стадии адсорбции. Вода и углеводороды разделяются отстаиванием и отправляются за пределы установки.

Законченная последовательность: адсорбция, регенерация, охлаждение, предполагает переключение адсорберов каждые 15 минут, следовательно, для каждого адсорбера:
— адсорбция: 30 минут,
— регенерация: 15 минут,
— охлаждение: 15 минут.

2.4.7.5. Особые аспекты некоторых процессов отбензинивания

Процессы извлечения из газа углеводородов, дающие лучшие результаты, это абсорбция охлажденным маслом и политропное расширение, позволяющие, наряду с высокой степенью извлечения C_{3+}, достигнуть извлечения из газа нежелательных сернистых компонентов, таких как: COS, меркаптаны, сернистые и несернистые соединения.

Условия (температура и давление), реализуемые в этих процессах, позволяют абсорбировать их нефтью или конденсировать одновременно с углеводородами, которые имеют близкую температуру кипения.

Серные компоненты тогда будут находиться во фракции С.Н.Г. и более тяжелых составляющих, которые затем обессериваются соответствующей переработкой (гидроочистка, щелочная очистка, процесс "Мерокс" и т.д.).

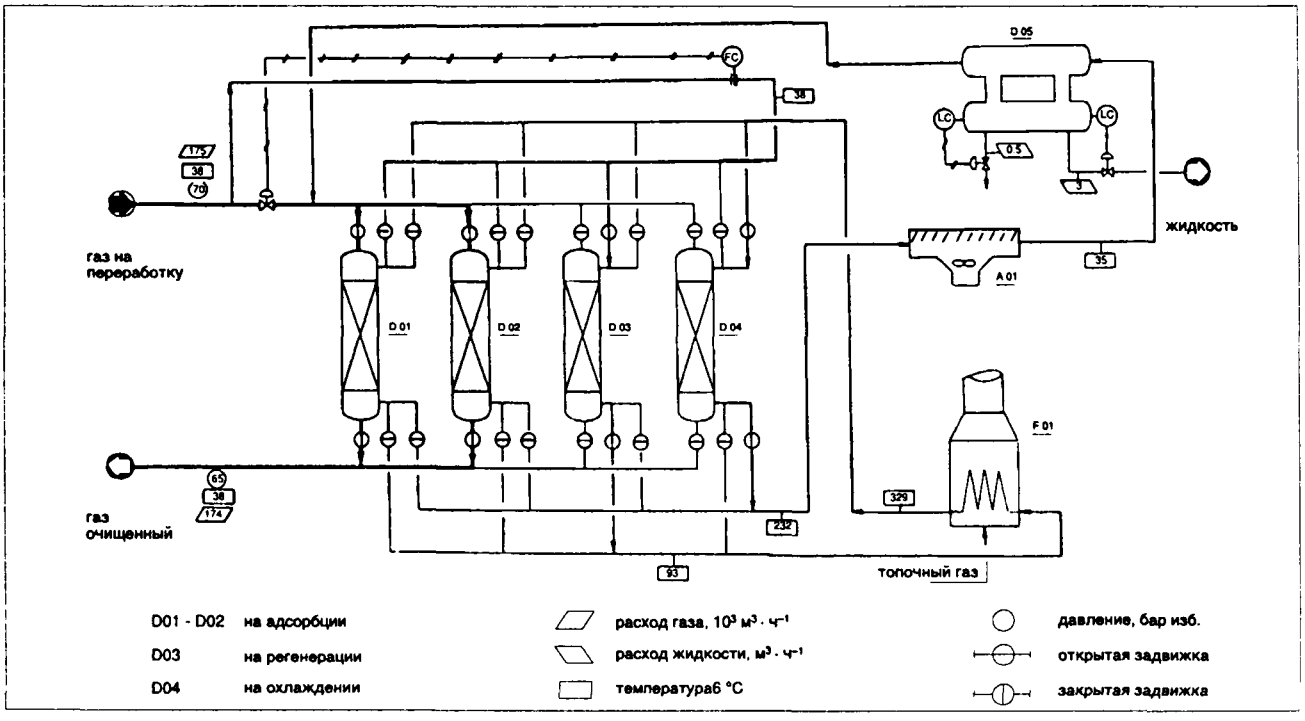


Схема процесса извлечения углеводородов адсорбцией силикагелем.

2.4.7.6. Список литературы

— Plant Processing of natural Gas. – Petroleum extension servicer. Univ. of Texas (1974).
— D.L.Katz. – Handbook of National Gas Engineering. McGraw Hill Company. Maidenhead, Grande-Bretagne.
— Gas Conditioning Fact Book. – The Dow chemical Company.
— J.Campbell. – GasConditioning and Processing. Campbell Petroleum Series (1981).
— Engineering Data Book. – Gas Processors Suppliers Association.
— W.C.Edminster. – Applied Hydrocarbon Thermodynamics. Gulf Publishing Company, Houston (Texas), Etats–Unis.
— R.,C.Reid, J.M.Prausnitz et T.K.Sherwood.– The Properties of Gases and Liquids. McGraw Hill Company, Maidenhead, Grande–Bretagne.

2.4.8. Извлечение ртути

2.4.8.1. Количество ртути, присутствующей в природном газе

Ртуть присутствует в элементарном виде.

Концентрации обычно заключены между 10 и 200 мкг · м$^{-3}$ (н). Они могут в некоторых случаях достигать и даже превышать 1 000 мкг · м$^{-3}$ (н).

Замечено, что газы, содержащие серные компоненты, не содержат ртути, так как в их присутствии легко образуется сульфид ртути.

2.4.8.2. На каком этапе необходимо извлекать ртуть?

2.4.8.2.1. Для распределительных сетей

Ртуть, поступающая с распределяемым газом, приводит при сгорании к загрязнению местности в силу своей токсичности. Максимально допустимая концентрация в воздухе составляет до 10 мкг · м$^{-3}$ в СССР и до 50 мкг · м$^{-3}$ в США. Эти нормы трудно перевести в определенные требования для товарного газа. Допустимым значением, кажется, будет 10 мкг · м$^{-3}$ для газа на входе в распределительные сети. Содержание ртути в распределяемом газе снижается по мере его продвижения в сети. Ртуть, поглощенная трубопроводами, считается безвредной для них.

2.4.8.2.2. Установки сжижения

Ртуть затвердевает и отлагается во время специального охлаждения в низкотемпературных теплообменниках из алюминия. Во время остановки установки для оттаивания ртуть оседает на дне. Если установку открывают для производства работ, влажная воздушная среда приводит к соединению ртути и алюминия в жидкую амальгаму, которая вызывает появление отверстий в стенках труб теплообменников. В этом случае ртуть должна быть полностью удалена перед охлаждением. Предполагают, что содержание 1 нг · м$^{-3}$ соответствует пределу чувствительности лучших аналитических методов.

2.4.8.3. Процессы извлечения ртути

2.4.8.3.1. Для распределительных сетей

Охлаждением и конденсацией ртути.

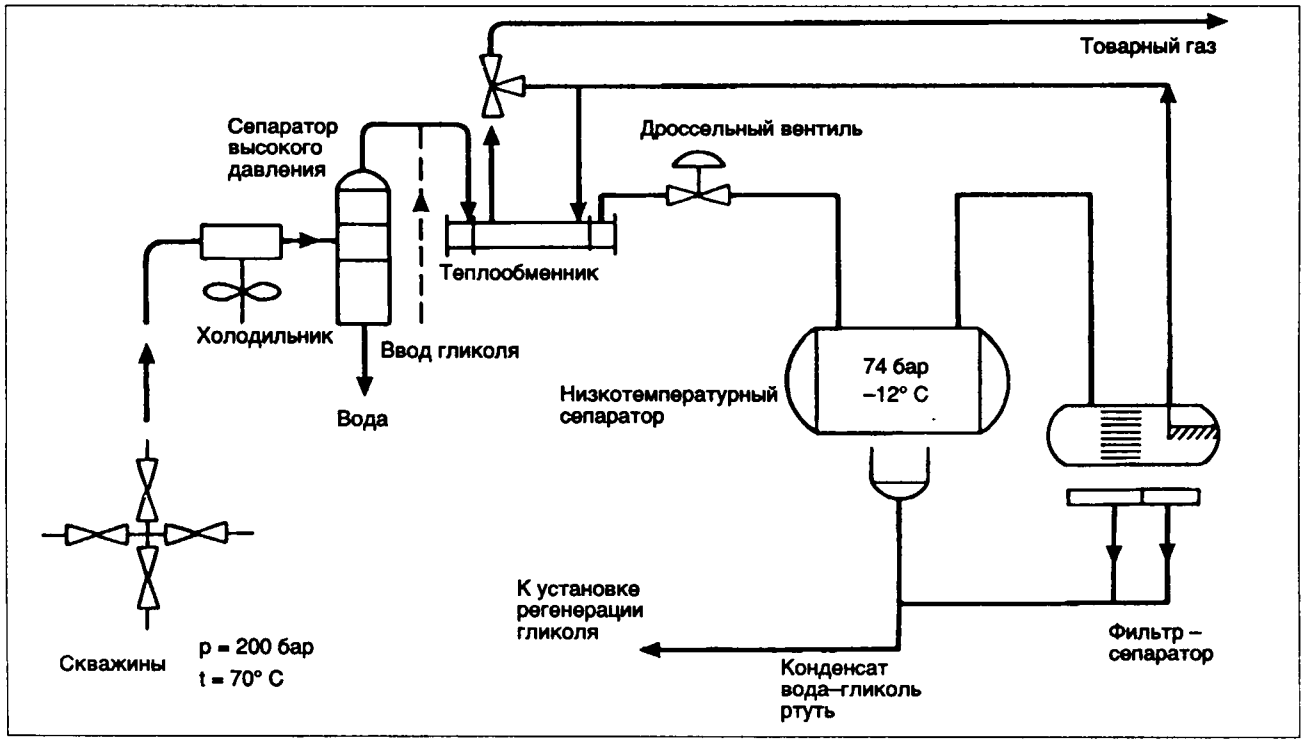


Схема установки на Гронинге.

Чтобы определить параметры установки извлечения ртути охлаждением и конденсацией ртути (см. рисунок на стр. 347), нужно определить, при какой температуре должен работать низкотемпературный сепаратор, чтобы газ на выходе из него содержал 10 мкг · м$^{-3}$ ртути.

Упругость паров ртути от –40 до 50°С (см. ниже).

t°C	Па	t°C	Па
–38	0,000193	+2	0,030400
–36	0,000263	+4	0,036800
–34	0,000355	+6	0,044667
–32	0,000479	+8	0,054133
–30	0,000637	+10	0,065333
–28	0,000840	+12	0,078400
–26	0,001104	+14	0,094133
–24	0,001440	+16	0,112800
–22	0,001867	+18	0,134533
–20	0,002413	+20	0,160133
–18	0,002747	+22	0,190133
–16	0,003973	+24	0,225467
–14	0,005067	+26	0,266667
–12	0,006413	+28	0,314533
–10	0,008080	+30	0,370267
–8	0,010160	+32	0,434800
–6	0,012720	+34	0,509733
–4	0,015867	+36	0,596133
–2	0,019867	+38	0,695867
0	0,024667	+40	0,810533
		+42	0,942267
		+44	1,093333
		+46	1,266267
		+48	1,464000
		+50	1,689333

В зоне очень низкой концентрации, которая соответствует рабочим условиям, можно считать ртуть как идеальный газ: на упругость паров не оказывает влияния присутствие других газовых компонентов.

Ввод гликоля перед охлаждением предназначен для предотвращения образования гидратов (см. осушку газа). Фильтр задерживает капельки ртути, захваченные газом из низкотемпературного сепаратора.

2.4.8.3.2. Перед сжижением газа

Используют твердые сорбенты, которые поглощают ртуть химически. Установка абсорбции может, в случае необходимости, располагаться после предыдущей установки, чтобы извлечь часть ртути. Далее, ввиду небольших количеств, которые надо извлечь, установка адсорбции не содержит устройства регенерации. Она состоит из одного реактора (или нескольких параллельно), содержащего сорбент, который заменяется по мере насыщения.

Коммерческие абсорбенты

— C.E.C.A.: AC35 (пропитанный активированный уголь),
— I.F.P.: CMG 271 (пропитанная окись алюминия),
— "Chemviron": HGR (пропитанный активированный уголь).

Расчет абсорбера

Необходимо знать:

— среднюю абсорбционную способность абсорбента до проскока по ртути С %,
— желаемый период времени между двумя сменами абсорбента (в часах).

Количество абсорбента, которое необходимо задействовать, будет:

$$10^{-7}\frac{Hg \times Q \times I}{C} = M$$

где:

Hg – содержание ртути в перерабатываемом газе в мкг · м$^{-3}$(н),

Q – расход перерабатываемого газа в м^3 (н) · ч$^{-1}$,

M – масса абсорбента в кг.

Диаметр абсорбера выбирают из расчета, чтобы иметь высоту слоя абсорбента приблизительно 1,50 м.

Метод анализа ртути в природном газе

Норма "ISO/TC 158/GT4 n° 47".

2.4.8.4. Список литературы

— A. Fröchen. – Seepparation de l'azote, de l'hhelium et du mercure (Cours au C.F.A.T.G.), A.T.G.,Paris.
— L.L. Phannenstiel. C. McKinley et J.C. Sorensen. - Mercury in Natural Gas. A.G.A. Operating Section Proceedings, New-York, Etats-Unis (1976).
— H. Kaast et F. Schlemm. – Bau und Betrieb der Stickstoffentzugsanlange Clenze. Erdol, Erdgas, Zeitschfirt. *Cahier*, 6, 197 - 204 (1977).
— J. Morisson. – NAM Recovers Mercury Produced with Dutch Natural Gas. *Oil and Gas Journal*, 72 - 73. Tulsa, Oklahoma, Etats-Unis (17 avril 1972).

2.4.9. Извлечение азота (дезазотирование)

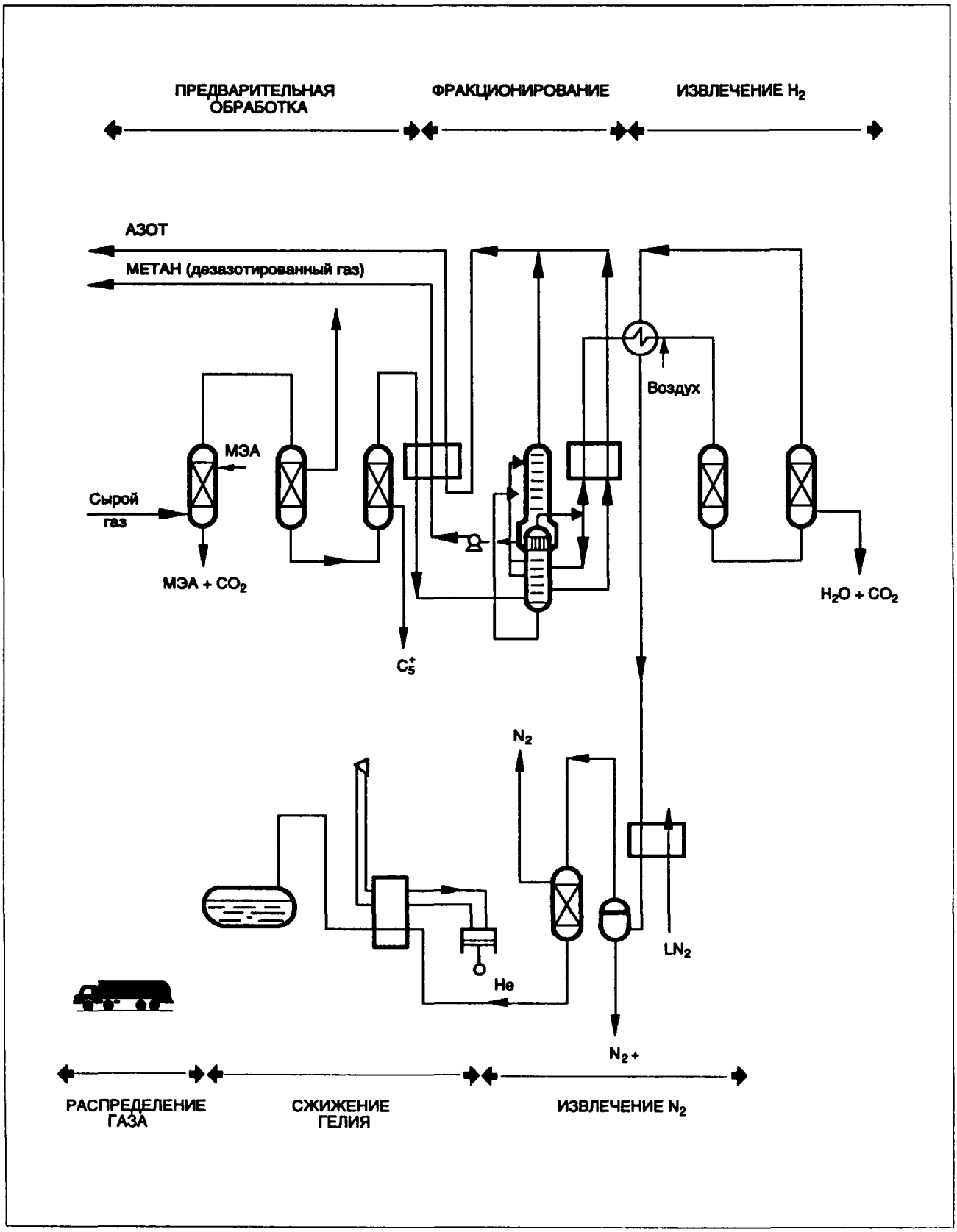
2.4.9.1. Определение

Это извлечение всего или части азота из природного газа. Операция включает сжижение газа, следующее за фракционной перегонкой. Чтобы исключить образование кристаллических продуктов, природный газ должен быть предварительно осушен, удален углекислый газ и очищен от углеводородов выше чем C_5.

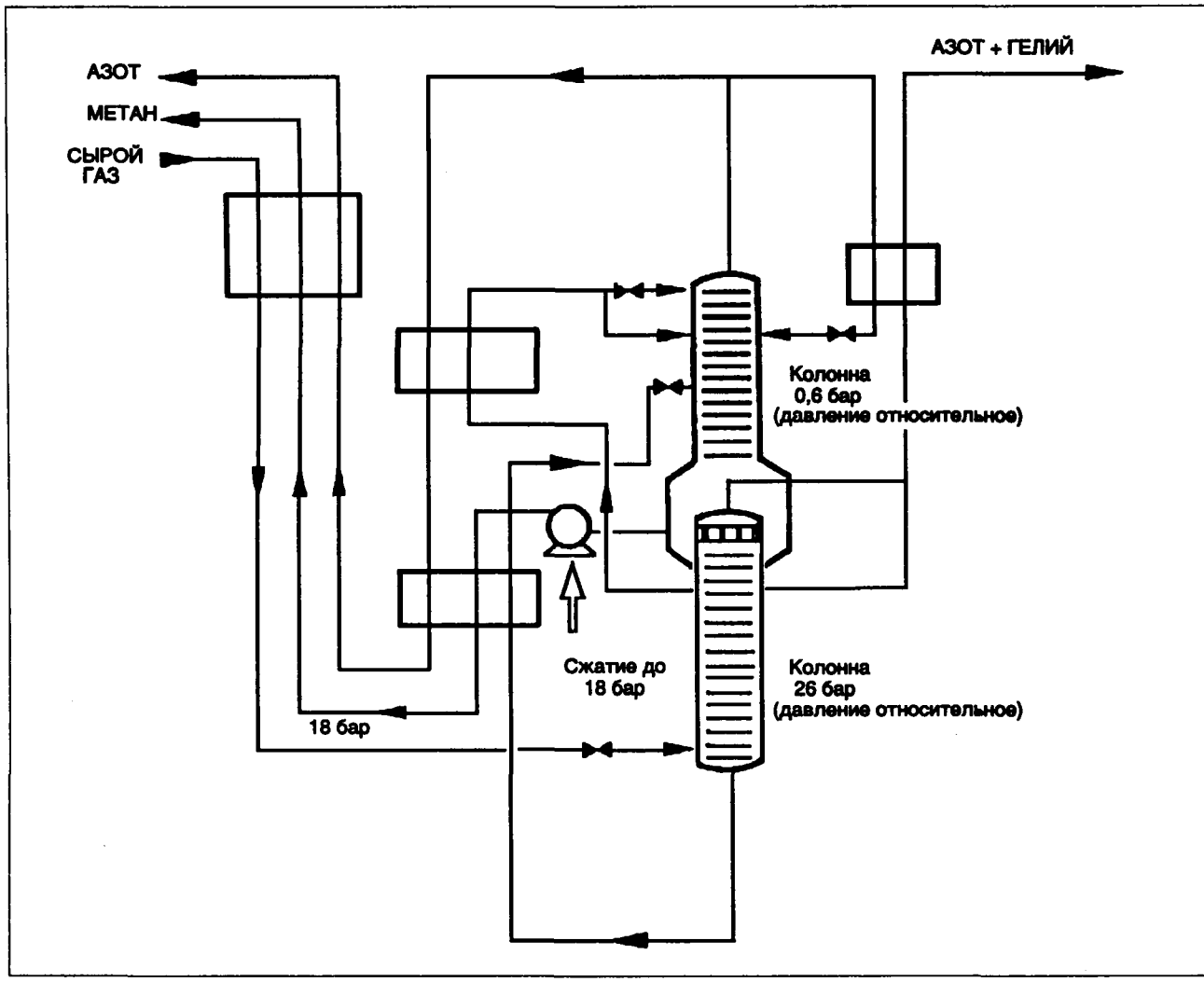
Холод, необходимый для сжижения, получают с помощью расширения газа. Предварительная ректификация осуществляется в фракционной колонне, которая работает при среднем давлении (приблизительно 25 бар); полученные продукты питают колонну окончательного фракционирования, функционирующую при низком давлении (давление близкое к атмосферному давлению). Это из этой колонны выходит жидкость, которая после повторного сжатия и испарения составляет дезазотированный газ и азот, который включает также содержавшийся в сыром газе гелий.

Дополнительная криогенная переработка позволяет извлечь гелий. Таким образом, природный газ с 1917 года является единственным коммерческим источником гелия.

2.4.9.2. Принципиальная схема классической установки извлечения гелия в жидком виде



2.4.9.3. Деталь части сжижения–дистилляции



Установка дезазотирования с извлечением гелия в жидком виде (деталь части сжижения – дистилляция).

2.4.9.4. Пример результатов, полученных на установке Одолянов ("Odolanov") (Польша)

	Мольные %
Гелий	0,40
Водород	100 $см^3 \cdot м^{-3}$
Азот	42,75
Метан	56,01
Этан	0,44
Пропан	0,02
Бутан	0,01
Пентан	600 $см^3 \cdot м^{-3}$
CO_2	0,30
Точка росы	0°C
Давление	50 - 55 бар
Температура	40 - 60°C

Характеристика сырого перерабатываемого газа.

	Сырой газ	Газ дезазотированный	Газ остаточный	Гелиевая продукция
Расход (10^6 $м^3$ (н) · $сут^{-1}$)	3,4	2,0	1,4	0,01
Состояние	газообразное	газообразное	газообразное	жидкое
Мольные %				
Гелий	0,40	–	0,09	100
Азот	42,75	4,0	98,95	
Метан	56,02	95,09	0,96	
Этан	0,53	0,91		
CO_2	0,30			

Расход и состав в различных точках установки.

2.4.9.5. Установка завода Альфортвиль ("Alfortville") для переработки газа Гронинга ("Groninque")

Сырой газ осушают, извлекают углеводороды выше C_5, но не извлекают углекислый газ. Диоксид углерода находится в растворенном виде в жидкостях внизу колонны фракционирования, работающей при среднем давлении благодаря процессам, осуществленным на входе в небольшой колонне фракционирования (названной колонны декарбонизации). Эта небольшая колонна работает при высоком давлении. Большую часть дезазотированного газа получают в колонне среднего давления, другую часть в колонне низкого давления.

Завод в Альфортвиле был окончательно завершен в 1985 году.

2.4.9.6. Список литературы

— A. Fröchen. – C.F.A.T.G., Session traitement du gaz de reseau. Separation de l'azote, de l'helium et du vercure. A.T.G., Paris.

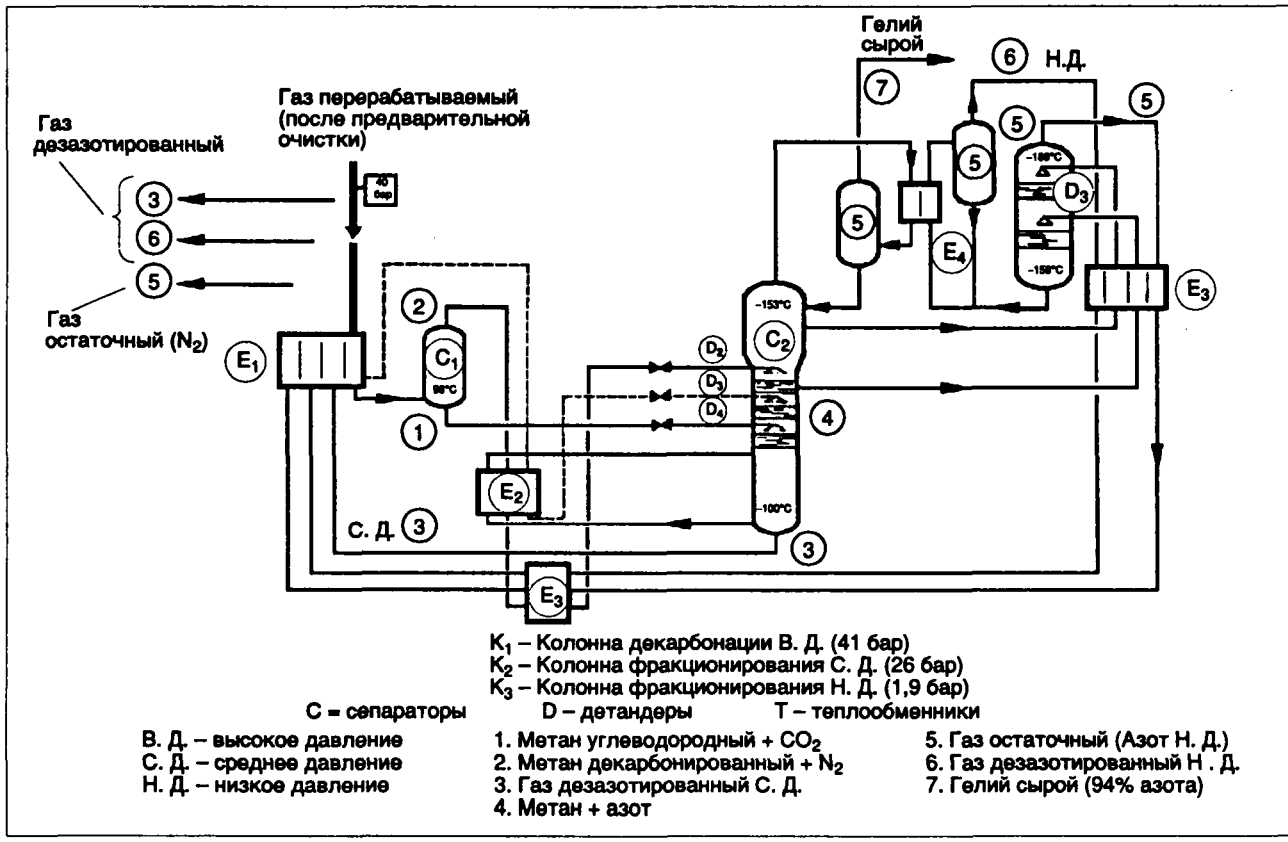


Схема установки Альфортвиля.

	Сырой перерабатываемый газ из Гронинга	Дезазотированный газ		Остаточный газ	Гелий
		В. Д.	Н. Д.		
Количество перерабатываемого газа или продукта (10^6 м^3 (н) · сут$^{-1}$)	1,56	0,98	0,38	0,20	0,0006
Абсолютное давление (бар)	41	25	1,1	1,1	350
Температура (°C)	30	23	23	23	–
CH_4	81,15	90,4	98	0,5	–
C_2H_6	2,9	4,6	–	–	–
C_3H_8	0,4	0,65	–	–	–
C_4H_{10}	0,2	0,30	–	–	
C_5H_{12}	0,1	0,15	–	–	
N_2	14,3	2,5	2	99,5	0,001
CO_2	0,9	1,4	–	–	–
He	0,05	–	–	–	99,999

Характеристика продукции установки в Альфортвиле.

2.5. ПРОИЗВОДСТВО ИСКУССТВЕННОГО ГАЗА

2.5.1. Общие соображения

Искусственные газы первоначально получались путем пирогенизации угля, затем добавилось производство газов различного состава путем воздействия воздуха и водяного пара, с целью получения бытового газа с постоянной теплотой сгорания (4500 ккал · м$^{-3}$, или 5,2 кВт · ч · м$^{-3}$).

В 1960-х годах природный газ постепенно заменил искусственный, и городские заводы были закрыты, однако производство различных газов, представляющих собой сырье для химического синтеза, еще реализуется в широких масштабах, несмотря на то, что для их получения часто предпочитают природный газ.

Процессы производства газа из угля тем не менее сохраняют актуальность в странах, имеющих большие запасы угля (Китай), и могут стать необходимыми в мировых масштабах, если снова появятся перспективы дефицита нефти и газа, и они будут более продолжительными, чем в 1945 и 1979 годах. Идет ли речь о пирогенизации твердых топлив (уголь, дрова, кокс), газификации или нефтяных продуктах, получаемые газы представляют собой сложные смеси, которые должны быть переработаны и очищены, так как отходы имеют иногда непренебрежимую коммерческую ценность.

	На тонну угля: подвергнутого длительной пирогенизации	
	при высокой температуре (1000°C)	при низкой температуре (5000°C)
Количество полученного продукта		
Газ . . . . . м^3(н)	300 до 330	50 до 100
кВт · ч · м^3 (н)	5,8	10,4
Смола . . . . . кг	45 до 70	95 до 120
Бензол или бензин . кг	8 (бензол)	10 (бензин)
Кокс . . . . . кг	650 до 750	720 до 800
Гидрат оксида аммония	3 приблизительно	1 приблизительно
Состав газа		
H_2 . . . . . %	45 до 50	16 до 20
CH_4 . . . . . %	35 приблизительно	50 до 60
CO . . . . . %	5 до 10	4 до 5
Углеводороды . . . %	3 приблизительно	3 приблизительно
CO_2 . . . . . %	5 приблизительно	6 до 10

Cf. Rapport de la commission goudrons et benzols, compte rendu du congres A.T.G. de 1928, p. 257.
A. Mailhe. – Contribution a la ditillation a basse temperature. Conpte rendu du congres A.T.G. de 1930, p. 176.
Courau et Besson. – Destillation des combustibles a basse temperature.

Влияние температуры.

2.5.2. Производство газов из твердых топлив

2.5.2.1. Производство газа пирогенизацией угля

Это значит простым нагреванием.

2.5.2.2. Газификация твердых минеральных топлив

2.5.2.2.1. Введение

Газификация твердых минеральных топлив имеет целью их превращение в газообразные топлива при помощи реакции с кислородом, водяным паром и диоксидом углерода.

	Вертикальные дискретные	Вертикальные непрерывные	Горизонтальные камеры
Область применения (производительность в 1000 м^3 (н) · сут$^{-1}$)	3 до 200	10 до 200	более 100
Единичная емкость камеры (т)	0,8 до 7,5	1,8 до 12	13 до 20
Длительность дистилляции (ч)	12 до 24	Непрерывный	18 до 30
Производительность по газу в м^3 (н) · т$^{-1}$ угля и высшая теплота сгорания	460 до 5,23 кВт · ч · м$^{-3}$ (н)	480 до 5,23 кВт · ч · м$^{-3}$ (н)	380 до 5,8 кВт · ч · м$^{-3}$ (н)
	660 до 4,42 кВт · ч · м$^{-3}$ (н)	660 до 4,42 кВт · ч · м$^{-3}$ (н)	
Потребление топлива в коксе (кг · т$^{-1}$)	190 до 320	130 до 280	120 или 0,64 кВт · кг$^{-1}$ угля
Производительность в м^3/сут на человека (потребность в раб. силе)	1 000 до 9 500	1 000 до 6 000	3 500 до 10 000
Срок службы	5 до 7 лет	5 лет	15 до 20 лет

Характеристика основных типов печей.

Это превращение имеет, или имело, интерес:

— для нагрева печей (металлургические заводы, коксовые батареи, стекольных заводов), или использования в качестве моторного топлива (автомобили);
— для изготовления бытового газа, когда контрактная теплота сгорания близка к 4500 ккал · м$^{-3}$;
— для приготовления синтетических газов – смесей CO и H_2 в различных пропорциях (NH_3, CH_3OH, Фишер Тропш, гидрогенизация угля, CH_4 и т.д.).

2.5.2.2.2. Основные реакции

Нет смысла их все перечислять, в особенности потому, что на эти реакции влияет состав твердых топлив, в частности, угля.

В представленных ниже таблицах приводится соответственно перечень основных реакций и констант равновесия для некоторых из них, в которых используются исключительно C, O_2, H_2O и CH_4. При желании рассчитать константы равновесия не надо забывать, что все эти реакции не являются независимыми.

Уравнения реакций	Измерение свободной энтальпии стандарт * ΔH°_{298}	Изменение свободной энергии стандарт * ΔG°_{298}
Гетерогенные реакции		
(1) $C + O_2 \longrightarrow CO_2$	−393,1	−394,0
(2) $C + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow CO$	−110,4	−137,1
(3) $C + CO_2 \longrightarrow 2\,CO$	+172,3	+119,7
(4) $C + H_2O \longrightarrow CO + H_2$	+131,8	+91,2
(5) $C + 2\,H_2 \longrightarrow CH_4$	−74,8	−50,7
Гомогенные реакции		
(6) $CO + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow CO_2$	−282,7	−256,9
(7) $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O$	−241,6	−228,4
(8) $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$	−41,2	−28,5
(9) $CO + 3\,H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$	−206,3	−142,0
* В кДж на моль, по отношению к водяному пару и графиту β.		

Реакции газификации.

2.5.2.2.3. Реакции газификации

Методы газификации многочисленны и разнообразны: они отличаются друг от друга:

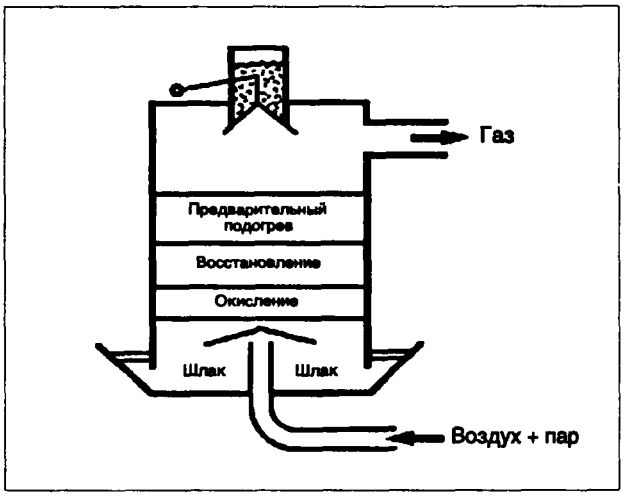
— природой твердого топлива: уголь, лигнит, кокс;
— природой флюида: кислород воздуха, водяной пар;
— используемой "схемой" газификации:
  · неподвижный слой (топливо в зернах),
  · кипящий слой (порошкообразное топливо и топливо в мелких зернах),
  · процесс под давлением, или при атмосферном давлении;
— наконец, по природе получаемого газа:
  · газ с низкой теплотой сгорания: 1 до 3 кВт·ч·м$^{-3}$,
  · газ с более высокой теплотой сгорания.

Общее замечание

Для всех этих типов газогенераторов необходимо отметить важность характеристик твердого топлива. Чем реакторы мощнее и автоматизированнее, тем важнее иметь топливо постоянного качества, допустимые пределы изменения свойств должны быть минимальными; необходимо, как только это возможно, избегать резких изменений.

2.5.2.2.4. Газогенераторы с неподвижным слоем, работающие на воздухе при атмосферном давлении

2.5.2.2.4.1. Газогенераторы на коксе



Температура (°C)	Реакции конверсии		Реакции метанизации	
	$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$ $K = \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}$	$C + CO_2 \longrightarrow 2\,CO$ $K = \frac{(P_{CO})^2}{P_{CO_2}}$	$C + 2\,H_2 \longrightarrow CH_4$ $K = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})^2}$	$CO + 3\,H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$ $K = \frac{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO} \cdot (P_{H_2})^3}$
300	38	$3{,}5 \times 10^{-7}$	210	$15{,}8 \times 10^{4}$
500	5,0	$4{,}5 \times 10^{-3}$	2,2	97,8
700	1,55	1,05	0,132	$81{,}1 \times 10^{3}$
900	0,755	39	$2{,}0 \times 10^{-2}$	679×10^{5}
1 100	0,47	$4{,}7 \times 10^{2}$	$5{,}1 \times 10^{-3}$	$23{,}1 \times 10^{6}$
1 300	0,337	$3{,}0 \times 10^{3}$	$1{,}85 \times 10^{-3}$	$1{,}83 \times 10^{6}$
1 500	0,265	$1{,}2 \times 10^{4}$		

Константы равновесия.

	Газогенераторы – производители пара (с ватер-жакетом)		Газогенераторы с жаропрочным покрытием
	низкого давления (0.3 бар)	среднего и высокого давления (до 10 бар)	
Диаметр решетки (м)	от 1,20 до 3	от 1,20 до 3	от 1,20 до 3
Часовое потребление кокса (кг · м$^{-2}$ решетки)	150 до 200	150 до 200	60
Паропроизводительность (в кг · кг$^{-1}$ кокса)	0,30 до 0,5	0,8 до 1,2	–
Количество инжектированного пара (в % от продукции)	100	50	–
Температура пара на выходе из газогенератора, °C	4 до 500	4 до 500	6 до 70
Высшая теплота сгорания произведенного газа в кВт · ч · м$^{-3}$ (н)	1,34 до 1,45	1,34 до 1,45	1,39 до 1,55

Характеристики работы газогенераторов.

Аппараты с неподвижной решеткой стоит упомянуть лишь для справки., Схема аппаратов, используемых для нагревания коксовых или металлургических печей, приведена на рис. стр. 353. Оболочка газогенератора изготавливается почти всегда из стали с двойными стенками, образующими котел (ватер-жакет) низкого или среднего давления. Это котел производит пар, необходимый для нагнетаемых соединений, а также как добавка для других применений.

Использовались также модели с жаропрочным покрытием без ватер-жакета; менее дорогие при покупке, они требуют, чтобы шлаки были относительно малоплавкими (риск зависания).

Рабочие характеристики представлены в вышеприведенной таблице.

Средний состав газа :

— CO_2 : 4,8 м$^{-3}$%,
— CO : 30,1 м$^{-3}$%,
— H_2 : 11,7 м$^{-3}$%,
— N_2 : 53,4 м$^{-3}$%,
— высшая теплота сгорания : 1,47 кВт · ч · м$^{-3}$.

2.5.2.2.4.2. Газогенераторы на угле

Тот же аппарат может быть использован для более или менее спекаемых углей. Этот уголь подвергается пирогенизации в верхнем слое. Из газа, верхняя теплота сгорания которого достигает 2,1 до 2,2 кВт · ч · м$^{-3}$ (н), должна быть удалена смола и он должен быть очищен.

2.5.2.2.5. Циклическая работа на воздухе

2.5.2.2.5.1. Водяной газ чистый ("голубой"), или карбюраторный

Идет ли речь о производстве газа 1-го семейства или синтетического газа, инжекция воздуха дает газ, в котором "балласт" азота является существенным препятствием, циклическая работа, отделяющая период нагрева (инжекция воздуха, реакции 1.2.3) от периода восстановления (инжекция пара), позволяет достичь желаемого результата.

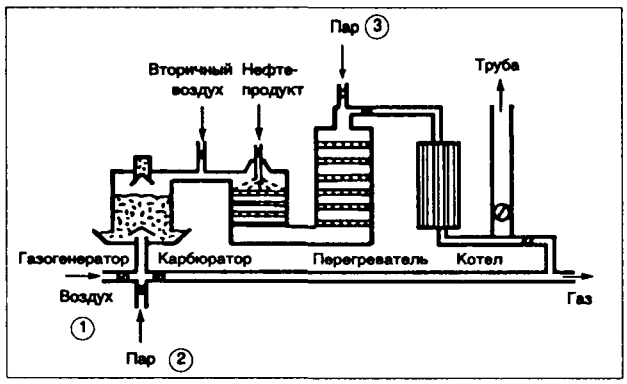


Схема линии по получению водяного газа: газовый центр, или завод по получению синтетического газа (NH3 в Тулузе.

Цикл состоит из:

— продувки реактора воздухом через ①. Вторичный воздух сжигает CO, содержащийся в обедненном газе. Насадки карбюратора и перегревателя находятся при высокой температуре. Теплота нагрева рекуперируется в котле перед сбросом в трубу;
— производства:
  · подача острого пара через ②, получение CO + H. Труба закрыта. Впрыск более или менее значительного количества нефтепродукта,
  · глухой пар проходит из ③ сверху вниз через пароперегреватель,
  · короткая продувка воздухом через ①.

Цикл продолжается примерно 180 секунд, продувка воздухом занимает примерно треть этого времени. Все операции автоматизированы.

Полученный газ имеет следующий состав:

— "голубой" водяной газ (без нефтепродуктов): CO_2 – 5%, CO – 40%, H_2 – 50%, N_2 – 5%, высшая теплота сгорания – 3,14 кВт · ч · м$^{-3}$ (*н*), плотность по воздуху – 0,54;
— карбюраторный газ.

В зависимости от количества введенных нефтепродуктов высшая теплота сгорания может колебаться от 3,15 до 5,8 или 6,0 кВт · ч · м$^{-3}$ (н). Используемые нефтепродукты представляют собой смесь синтетических этана, пропана и этиленовых углеводородов, мазут для домашнего употребления, парафиновые дистилляты. Наиболее тяжелые нефтепродукты приводят к осаждению копоти на насадках.

Газ с высшей теплотой сгорания, равной 5,23 кВт · ч · м$^{-3}$ (н), имеет состав:

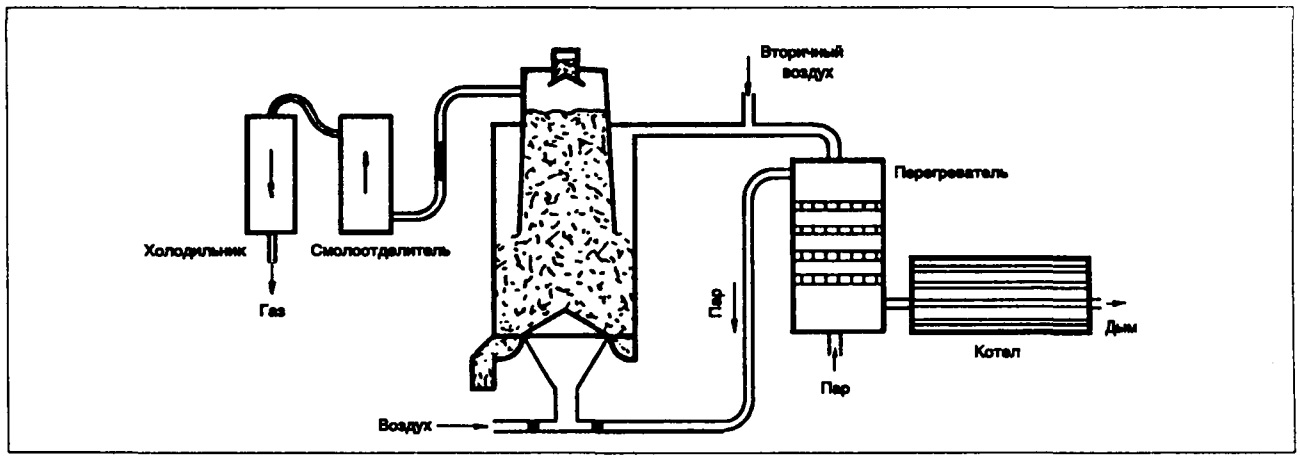
H_2 – 38%, CO – 33%, CH_4 – 11%, CO_2 – 5%, $N_2 + O_2$ – 6%,

высшие углеводороды – 7%.

Для 1000 м^3 произведенного газа можно привести следующий баланс:

	Водяной газ голубой	Водяной газ карбюраторный
Производство:		
Высшая теплота сгорания, кВт · ч · м$^{-3}$ (н)	3,14	5,23
Смола, кг	0	40
Потребление:		
– Связанный углерод, кг	470 - 500	400 - 450
– Насыщенный пар (15 бар), кг	700 - 750	600 - 850
– Энергия, кВт · ч	30	25
– Вода, м^3	10	10
– Домашний мазут, кг	0	280

Пар произведен в более или менее эквивалентном количестве на линиях с ватер-жакетом и рекуперационным паровым котлом.



Принципиальная схема газификации угля паром.

Степень разложения пара равна 50 - 70%.

2.5.2.2.5.2. Газификация угля паром

Так как кокс – дорогое топливо, были предприняты исследования по адаптации циклического процесса к газификации угля.

На нижеприведенном рисунке представлена схема таких установок.

Этот процесс может быть применен лишь к очень мало коксующимся топливам (исключение – процесс Le Gaz Integral Entreprise).

Цикл состоит из двух фаз:

— продувка воздухом; добавка вторичного воздуха дает возможность использовать полученный генераторный газ, который нагревает патрубки, а затем поступает в топку котла;
— перегретый пар проходит через зону коксования, а затем через нефтепродукты.

Газ должен быть обработан (удаление смолы, отмывка). Можно добавить крекинг нефтепродуктов для повышения теплоты сгорания газа.

2.5.2.2.6. Использование кислорода

В процессах, рассмотренных в 2.5.2.2.4., использование воздуха требует наличия азота. Циклическая работа позволяет устранить это неудобство ценой некоторого усложнения и ограничения производительности.

Использование кислорода позволяет получить непрерывный процесс. Во всех типах аппаратов используется уголь.

Реакторы могут быть классифицированы:

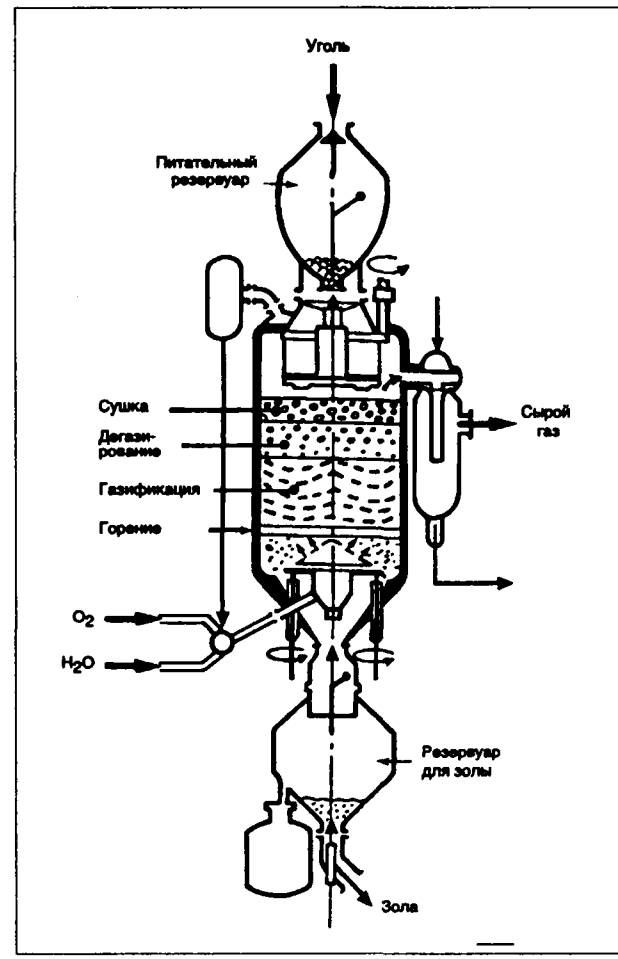
— неподвижный слой, хорошо калиброванное топливо (от 5 до 50 мм);
— кипящий (псевдоожиженный слой), топливо в гранулах) (от 4 до 8 мм);
— топливо, измельченное в порошок.

Процесс происходит при атмосферном давлении или под давлением; в последнем случае реакция благоприятствует образованию CH_4.

В случае неподвижного слоя характеристики используемых углей должны быть постоянными и тщательно контролироваться, тогда как для кипящего слоя или измельченного в порошок топлива вопросы плавкости или способности к коксованию не имеют особого значения.

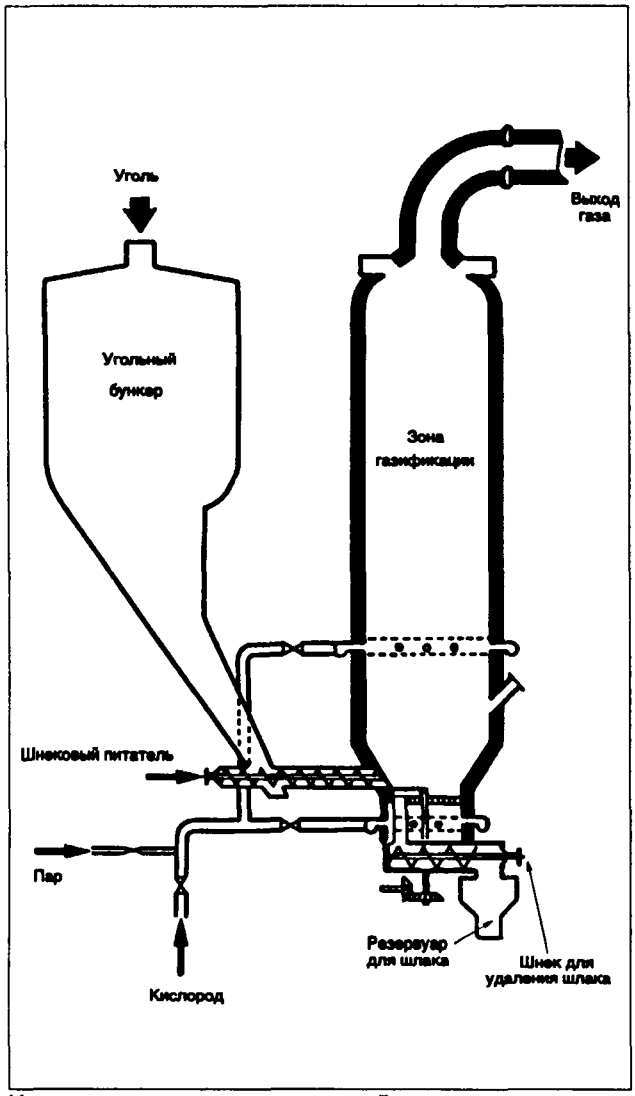
2.5.2.2.6.1. Неподвижный слой (процесс Лурги)

Этот тип реактора, созданный более 50 лет тому назад, был в последние годы предметом усовершенствования: увеличение давления до 100 бар, удаление шлаков в жидком виде.

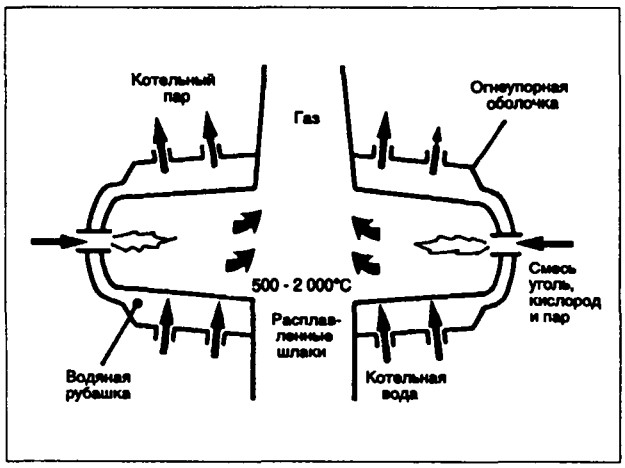


Упрощенная схема газогенератора Лурги.
Сухой сырой газ: CH_4 – 10 %; CO – 17 %; CO_2 – 32 %; H_2 – 39 %; разные – 2 %; смолы – 1* кг/100 кг угля; давление – 30 бар.

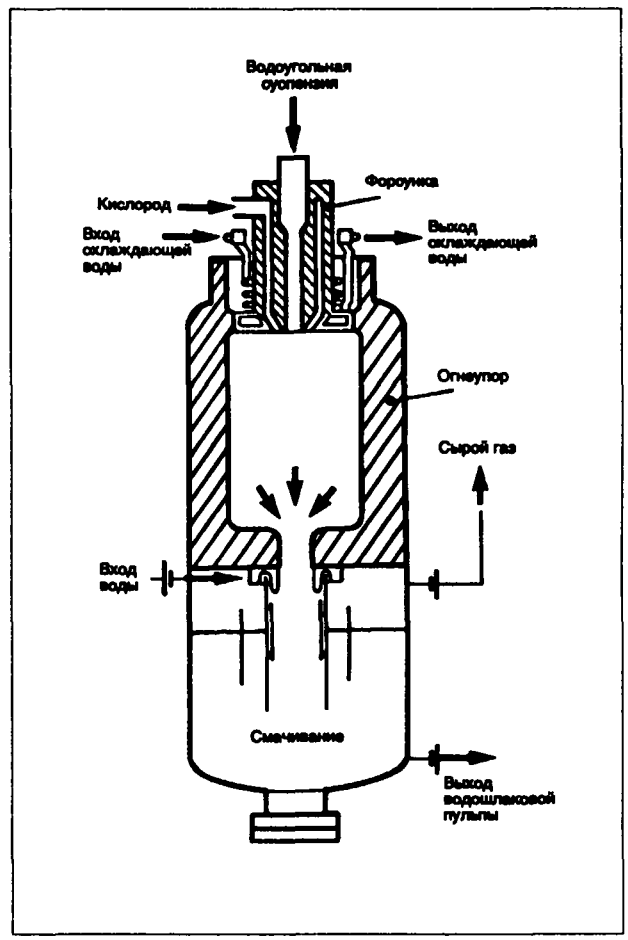
2.5.2.2.6.2. Кипящий слой (процесс Винклера)



Упрощенная схема газогенератора Винклера.
Сухой неочищенный газ: CO – 41 %; CO_2 – 17 %; H_2 – 38 %; CH_4 – 2 %; разные – 2 %; смолы – нет; давление атмосферное (или 10 бар в улучшенном варианте).



Упрощенная схема газогенератора Коппер-Тотцека.
Сухой неочищенный газ: CO – 53 %; CO_2 – 10 %; H_2 – 35 %; CH_4 – 0 %; разные – 2 %; смолы – нет; давление атмосферное.



Упрощенная схема газогенератора Техас.
Сухой неочищенный газ: CO – 42 %; CO_2 – 22 %; H_2 – 34 %; CH – 0 %; разные – 2 %; смолы – нет; давление до 80 бар.

2.5.2.2.6.3. Уголь, измельченный в порошок (процессы Копперс-Тотцек и Тексако)

2.5.2.2.6.4. Усовершенствование процессов

Каждый тип был предметом различных усовершенствований. В частности, реакторы для порошкообразных углей имеют различное устройство. В таблице на стр. 357 перечислены различные процессы в стадии разработки.

2.5.2.2.6.5. Примеры процессов

В каждом случае отношение $\frac{O_2}{H_2O}$ и температура введения флюида подбираются в зависимости от цели, для которой используется газ (химический синтез, газ 1-го семейства, изготовление смеси для приготовления газа 2-го семейства), и свойств угля.

В таблице на стр. 357 приведены примеры работы.

Работа под давлением облегчает получение газа (удаление CO_2 отмывкой) и уменьшает размеры установок.

	Процесс	Разработчик
1) Процессы, производные от прежних:	Stagging Gasifier	
Лурги	(жидкие шлаки)	Британская газовая корпорация
неподвижный слой	Рур 100	Ругаз–Руруголь
	(работа при 100 бар)	Стиг
Копперс	Шелл	Шелл
	(работа при 30 бар)	
	Пренфло	Крупп - Копперс
	(работа при 30 бар)	
Винклер	H. T. W.	Рейнские заводы бурого угля
	(работа при 10 бар)	
2) Новые процессы: кипящий слой	U-gas	Institute of Gas technology
	K.R.W. (Келлог Руст-Вестингауз)	Келлог Руст

Различные процессы.

		Лурги	Копперс–Тотцек	Винклер	Тексако
Потребность в кислороде и паре	Тонна пара /тонна угля	0,95	0,14	0,84	–
	Тонна кислорода / тонна угля	0,25	0,85	0,55	0,90
	Отношение $\frac{O_2}{H_2O}$	0,25	6	0,65	–
Выход	Выход газа	68	61	65	59
	Энергетический выход	79	70	76	73
	(давление газа в бар)	(26)	(1,4)	(1,2)	(82)
	Эффективность	99	96	80	96

Примеры работы.

2.5.3. Изготовление газа первого семейства из нефтепродуктов

2.5.3.1. Общие соображения

2.5.3.1.1. Принцип

Изготовление газа первого семейства (высшая теплота сгорания около 5,2 кВт · ч · м$^{-3}$ (н)), отвечающего различным критериям взаимозаменяемости, основанное на использовании каталитических процессов и селекционированном сырье от природных газов до легких нефтяных дистиллатов (D.P.L.).

2.5.3.1.2. Классификация и основные характеристики (см. таблицу на стр. 358)

2.5.3.2. Аутотермические процессы (1-я группа)

2.5.3.2.1. Общие соображения

2.5.3.2.1.1. Принципы

Непрерывный процесс при низком давлении, в котором обрабатываемые углеводороды подвергаются окислительному риформингу в присутствии водяного пара; эндотермичность реакций парового риформинга (1) и (2) компенсируется экзотермичностью реакций окисления кислородом (3) и (4).

	1-я группа	2-я группа	3-я группа
Название потока	Аутотермический	Циклический	Непрерывный под давлением
Давление	Атмосферное	Атмосферное	от 10 до 30 бар
Нагрев	Внутренний	Внутренний	Внешний, или в два периода, внешний затем внутренний
Окислитель: — основной — вторичный	 Воздух Водяной пар	 Водяной пар Воздух	 Водяной пар Воздух
Используемые нефтепродукты	Природный газ Заводской газ Пропан Бутан	Природный газ Заводской газ Пропан Бутан Легкие нефтяные дистиллаты	Природный газ Легкие нефтяные дистиллаты
Высшая теплота сгорания риформированного газа (без обогащения), кВт · ч · м$^{-3}$ (н)	от 1,91 до 2,15	от 2,80 до 4,9	от 2,9 до 4,2
Тип процесса	Grande Paroisse Ониа-Джади C. G. C. F. P2 (G. D. F.)	Ониа-Джади Штейн и Рубе U. G. I. P9 (G. D. F.)	Топс (газ цельный) Ониа-Джади I. C. I. Power Gas
Выход газа (риформированный газ) до обогащения Энергия произведенного газа (высшая теплота сгорания) Энергия, потребляемая в виде нефти	От 88 до 92% в зависимости от регулировки и величины рекуперации тепла	От 80 до 84% в зависимости от регулировки линий, содержащих рекуперационные котлы, или теплообменники. Может опускаться до 76% для некоторых, не имеющих никакой рекуперации	
Выход газа (обогащенный газ). Энергия произведенного газа (высшая теплота сгорания) Энергия, потребленная в виде нефти	От 93 до 97% в зависимости от регулировки и величины рекуперации тепла	От 88 до 93% в зависимости от регулировки линий, содержащих рекуперационные котлы, или теплообменники. Может опускаться до 85% для некоторых, не имеющих никакой рекуперации	Около 92% для установок производящих газ низкой калорийности (3,14 кВт · ч · м$^{-3}$ (н)), нуждающийся в значительном обогащении
Баланс газа	Установки автономные, или избыточные по пару	Установки автономные или избыточные по пару (за исключением не имеющих рекуперационных котлов	Установки автономные или избыточные по пару

Классификация и основные характеристики основных процессов производства газов 1-го семейства.

(1) $C_nH_m + nH_2O \rightleftharpoons \left[\frac{m}{2} + n\right]H_2 + nCO,$

(2) $C_nH_m + 2nH_2O \rightleftharpoons \left[\frac{m}{2} + 2n\right]H_2 + nCO_2,$

(3) $C_nH_m + \left[n + \frac{m}{4}\right]O_2 \rightleftharpoons nCO_2 + \frac{m}{2}H_2O,$

(4) $C_nH_m + \left[\frac{n}{2} + \frac{m}{4}\right]O_2 \rightleftharpoons nCO + \frac{m}{2}H_2O.$

Температура катализатора в головке печи удерживается с помощью регулировки расхода вступающего в реакцию воздуха в пределах от примерно 850 до 900°C. Состав смеси, подвергаемой рифомингу: пар – от 0 до 1 кг, воздух – 2,5 до 3 м^3 · кг$^{-1}$ углеводорода.

2.5.3.2.1.2. Оборудование

Линия аутотермического риформинга содержит в основном:

— устройство, позволяющее получить насколько возможно гомогенную реакционную смесь;
— печь для рифоминга, содержащую катализатор;
— аппараты, позволяющие рекуперировать возможное число калорий газа, выходящего из печи.

2.5.3.2.1.3. Неудобства

Необходимость использования достаточно легких и содержащих относительно мало серы углеводородов.

Иногда необходимость обессеривания углеводородов (например, для заводских газов с помощью пломбита натрия).

Производство газа, содержащего 40 - 45% азота, с невысокой высшей теплотой сгорания, повышенной плотности, не полностью заменяющего после обогащения бытовой газ.

2.5.3.2.1.4. Преимущества

Хороший выход (от 93 до 97%) из-за легкой рекуперации тепла.

Легкость подачи потребителю.

Малый вес установок и их быстрый запуск.

2.5.3.2.1.5. Использование

На больших заводах, где произведенный газ используется как резервный.

На малых заводах, где произведенный и обогащенный газ используется после соответствующей регулировки потребляющих его аппаратов.

Характеристики полученного газа (для сведения):

Непрерывный риформинг, каталитический при низком давлении пропана в аутотермической линии после обогащения.

Состав, (%): N_2 – 35,1; O_2 – 0,1; CO_2 – 4,3; CO – 16,70; H_2 – 31,60; CH_4 – 1,10%, C_3H_8 – 6,80; C_3H_6 – 4,4.

Относительная плотность – 0,766.

— Высшая теплота сгорания – 4,90 кВт · ч · $м^{-3}$.
— Низшая теплота сгорания – 4,52 кВт · ч · $м^{-3}$.

2.5.3.3. Циклические процессы (2-я группа)

2.5.3.3.1. Общие соображения

2.5.3.3.1.1. Принципы

В этих наиболее распространенных процессах цикл длится от 2 до 5 минут и содержит – за исключением P9 – две главные фазы, разделенные между собой периодами продувки паром.

Фаза производства:

— риформинг углеводородов в присутствии водяного пара (от 1,5 до 2,5 кг · $кг^{-1}$ углеводорода) и, при необходимости, небольшого количества воздуха (воздух процесса), на катализаторе, предварительно нагретом до температуры, обычно заключающейся между 750 и 850°C;
— основные реакции, обе эндотермические :

$$C_nH_m + nH_2O \longrightarrow \left[\frac{m}{2} + n\right] H_2 + nCO,$$

$$C_nH_m + 2nH_2O \longrightarrow [m + 2n]\, H_2 + nCO_2$$

с преобладанием реакции (1).

Фаза нагрева:

— необходимое для риформинга тепло передается катализатору за счет сжигания нефтепродукта, аналогичного используемому для риформинга, или другого; сжигание всегда осуществляется принудительно с большим избытком воздуха (от 1,5 до 2 раза больше потребного теоретически). Продукты сгорания выбрасываются через трубу;
— дистанционное управление затворами и клапанами с автоматической клавиатурой с механической, гидравлической , пневматической или электрической передачей команд;
— рекуперация возможного числа калорий из полученного газа и дыма в котле с получением пара давлением 5 или 15 бар; в случае линий большой производительности пар, поставляющий энергию для вращения вентиляторов, и пар низкого давления, образующийся при расширении, используются для риформинга и продувки. Линии автономны (и даже избыточны по пару). Они не потребляют электричества для получения воздуха под давлением, необходимого для горения.

2.5.3.3.2. Преимущества

Производство газа, взаимозаменяемого газом первого семейства.

Возможность использования на одной и той же установке либо остаточных газов нефтеперерабатывающих заводов, либо пропана, либо бутана, либо легких нефтяных дистиллатов.

Лучшая устойчивость катализатора, регенерируемого на каждом цикле в течение периода нагрева, к отравлению примесями, содержащимися в сырье, особенно серой.

Очень большая гибкость в работе.

2.5.3.3.3. Использование

На циклических линиях можно производить газ с оговоренной контрактом теплотой сгорания с помощью риформинга на катализаторе, содержащем 2 - 3% никеля. Этот способ применим только к легким нефтяным дистиллатам и употребляется все меньше и меньше из-за тенденции к образованию нитризированной смолы. Может также производиться газ с низкой теплотой сгорания, путем усовершенствованного риформинга на катализаторе с 4 - 6% никеля; произведенный газ затем обогащается с помощью нефтепродуктов до контрактной теплоты сгорания.

2.5.3.4. Непрерывные процессы под давлением (3-я группа)

2.5.3.4.1. Общие соображения

2.5.3.4.1.1. Принципы

Риформинг нефтепродукта, обычно в две стадии, дополняется третьей стадией, во время которой он обогащается.

1-я стадия (реализуется на всех установках)

Эндотермический риформинг в жароупорных стальных трубках с внешним обогревом, содержащих катализатор с 10 - 20% никеля, при значительном избытке перегретого пара.

Те же самые реакции, что и в циклических процессах; но из-за давления, которое имеет тенденцию их ограничивать, необходимо как можно ближе приближаться к теоретическому равновесию. Отсюда необходимо использование очень активного катализатора, повышенной температуры и большого избытка пара, так как необходимо избегать малейшего отложения углерода.

2-я стадия (на некоторых установках не реализуется)

Аутотермический риформинг на воздухе (post-combustion) в печи, содержащей слой катализатора, практически идентичный предыдущему: в зависимости от условий – дополнительное впрыскивание углеводорода на входе этого вторичного риформинга. Те же реакции, что и в аутотермических

Реформированный углеводород	Легкий нефтяной дистиллат (а)		Легкий нефтяной дистиллат (в)		Природный газ		Остаточный заводской газ		Пропан		Бутан		Легкий нефтяной дистиллат. Прямой газ от 4,65 до 4,68 кВт · ч · м$^{-3}$ (н)
Номер анализа	12	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Объемный состав, %													
N_2	4,00	20,00	4,00	20,00	4,00	20,00	4,00	20,00	4,00	20,00	4,00	20,00	10,70
O_2	0,38	0,31	0,34	0,27	0,34	0,27	0,41	0,33	0,34	0,27	0,26	0,21	0,30
CO_2	8,96	10,74	7,13	8,90	7,38	9,16	6,52	8,29	8,68	10,46	7,68	9,46	7,70
CO	18,92	15,05	21,35	17,08	14,47	11,57	18,09	14,50	19,42	15,47	20,61	16,46	16,40
H_2	64,00	50,93	63,07	50,46	65,34	52,23	63,22	50,66	62,43	49,71	63,70	58,88	51,00
C_2H_4	2,92	2,32	2,74	2,19	8,47	6,77	7,18	5,75	4,56	3,63	3,52	2,81	7,50
C_2H_6	0,22	0,17	0,15	0,12	–	–	–	–	0,46	0,36	–	–	1,30
C_3H_8	–	–	–	–	–	–	–	–	0,11	0,10	–	–	0,10
C_5H_{12}	–	–	0,08	0,06	–	–	–	–	–	–	–	–	0,40
C_6H_{14}	0,05	0,04	0,23	0,18	–	–	–	–	–	–	–	–	0,90
C_2H_4	0,44	0,35	0,57	0,46	–	–	0,58	0,47	–	–	0,15	0,12	2,70
C_3H_6	0,11	0,09	0,31	0,25	–	–	–	–	–	–	0,08	0,06	0,70
C_4H_8	–	–	0,03	0,03	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$C_6H_{6_2}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,30
Плотность, г · л$^{-1}$	0,56	0,727	0,567	0,727	0,501	0,675	0,526	0,693	0,566	0,732	0,549	0,714	0,725
Плотность по воздуху	0,433	0,563	0,439	0,562	0,388	0,522	0,407	0,536	0,438	0,566	0,425	0,553	0,561
Теплота сгорания, кВт · ч · м$^{-3}$ (н)													
высшая	7,43	2,73	3,67	2,94	3,77	3,01	3,78	3,02	3,52	2,80	3,42	2,73	5,00
низшая	3,03	2,42	3,27	2,62	3,30	2,64	3,34	2,67	3,12	2,48	3,02	2,42	4,51
Истинная удельная теплоемкость при постоянном давлении, кВт · ч · м$^{-3}$ (н)													
0°C	0,370	0,371	0,372	0,373	0,370	0,371	0,369	0,370	0,370	0,371	0,367	0,369	0,400
25°C	0,373	0,374	0,376	0,377	0,373	0,374	0,372	0,373	0,373	0,374	0,370	0,372	0,407
100°C	0,381	0,383	0,385	0,385	0,383	0,383	0,381	0,381	0,381	0,383	0,378	0,379	0,427

(а) с последующим обогащением природным газом.
(б) с последующим обогащением легким нефтяным дистиллатом.
Другие газы будут обогащены тем же углеводородом, что и реформированный.

Характеристика сырого газа-носителя, полученного на циклических линиях (с предельным содержанием азота)[1].

[1] Эти средние результаты анализов, полученные по результатам эксплуатации, относятся:

— с одной стороны, к 4% азота, процентное содержание, которое, в основном, соответствует приемлемому минимуму дыма, чтобы не терять газ через трубу в начале и конце фазы;

— с другой стороны, к 20% азота, процентное содержание, соответствующее наиболее тяжелым газам.

Процесс		Топс	Онна-Джеуци	ICI-Power Gas
Продукт после реформинга		Природный газ (Лак)	Легкий нефтяной дистиллат	Легкий нефтяной дистиллат
Состав в объемных %	N_2	17,6	10,1	0,1
	O_2	–	0,4	–
	CO_2	7,7	15,1	16,2
	CO	12,3	9,3	9,3
	H_2	56,8	56,2	59,9
	CH_4	5,6	8,3	13,1
	C_2H_6	–	0,6	1,4
Плотность по воздуху		0,477	0,514	0,468
Теплота сгорания высшая в кВт · ч · м$^{-3}$ (н)		3,07	3,36	4,17
Теплота сгорания низшая в кВт · ч · м$^{-3}$ (н)		2,69	2,94	3,67

Характеристика газов перед обогащением в линиях непрерывного риформинга, каталитических и под давлением (для сведения).

процессах. Регулировкой подачи воздуха поддерживается желаемая температура.

Для поддержания активности катализатора используемые углеводороды должны иметь содержание серы меньше миллионной (р. р. m.). Органические соединения серы и H_2S обычно удаляются путем адсорбции на активированном угле, либо путем каталитической гидрогенизации и фиксации образующегося H_2S на оксиде цинка.

3-я стадия

Обогащение и, при необходимости, впрыск инертных добавок для получения желаемых теплоты сгорания и характеристик взаимозаменяемости.

Рекуперация тепла из газовых и дымовых трактов с помощью котлов и теплообменников.

2.5.3.4.1.2. Преимущества

Малые габариты.

Получение газа под давлением, без расходов на компримирование (за исключением воздуха для post-combustion), могущего поставляться непосредственно в транспортные сети и распределительные сети среднего давления.

Очень хорошая производительность .

Модуляция режима производства примерно от 40 до 100%.

Производство взаимозаменяемого газа первого семейства.

2.5.3.4.1 3. Использование в газовой промышленности

Получение значительных объемов газа под давлением (до 30 бар) более экономичным способом, чем путем сжатия газа, получаемого на циклических линиях.

2.5.3.5. Выбор катализаторов

Катализаторы, используемые для риформинга жидких или газообразных углеводородов, принадлежат к комплексному типу[1], образованных наслоением:

— активного металла для риформинга, металла 8-й группы периодической системы с благоприятным электронным строением, особенно никеля;

— огнеупорной основы (соответственно разным пропорциям алюминия, магнезии или кремнезема), обеспечивающей хорошую дисперсию активного металла и увеличение поверхности контакта с реагирующими газами, а также создающей тепловую инерцию в циклических процессах и гомогенность температуры[2];

— некоторых структурных активаторов (модифицирующих электронную структуру основы, например, щелочных металлов, поддерживающих или создающих кристаллическую структуру и модифицирующую кислотность), или текстурных активаторов (замедляющих спекания, значит увеличение размеров кристаллитов, или состав основа + металл, как в случае CaO в алюминиево-никелевых катализаторах).

Выбор, являющийся функцией сырья и желаемого газа, зависит:

— от природы процесса.

Необходимо иметь в виду:

- резкие химические и термические нагрузки при циклических процессах, требующие очень высокой выносливости материалов, иногда даже в ущерб активности;
- необходимость избегать какого-либо отложения углерода в непрерывных процессах, так как регенерация происходит в разделенные между собой промежутки времени;
- большую или меньшую чистоту располагаемого сырья, главным образом, примесей в подвергнутых риформингу углеводородах;

— уровень температуры,

[1]Агломерация частиц и кристаллов (или некристаллических мицелл), образующих свободные или пористые пространства, характеризуемые распределением частиц и структурой пор (число, размер, извилистость).

[2]Основа может обладать каталитической активностью, например, алюминий по отношению к связям C–C.

Процесс		Топс с post-combustion	Топс с post-combustion	Топс без post-combustion	Ониа–Джеуци с post-combustion	ICI-Power Gas без post-combustion
Продукт после реформинга		Природный газ (Лак)	Природный газ (Гронинген)	Природный газ (Гронинген)	Легкий нефтяной дистиллат	Легкий нефтяной дистиллат
Состав в объемных %:						
	N_2	13,1	16,3	7,6	9,6	0,1
	O_2	–	–	–	0,2	–
	CO_2	5,6	5,2	7,9	12,3	16,1
	CO	9,1	8,4	6,5	7,3	9,2
	H_2	41,7	38,9	46,4	48,4	58,5
	CH_4	29,9	30,1	31,0	12,7	12,8
	C_2H_6	0,6	0,9	0,5	5,5	1,4
	C_3H_8	–	0,1	0,1	1,2	–
	nC_4H_{10}	–	0,1	–	0,1	0,3
	iC_4H_{10}	–	–	–	0,1	0,1
	nC_5H_{12}	–	–	–	–	1,5
	nC_6H_{14}	–	–	–	–	–
	nC_7H_{16}	–	–	–	–	–
	C_2H_4	–	–	–	1,3	–
	C_3H_6		–	–	1,3	–
Плотность по воздуху ($d = 1$)		0,501	0,525	0,468	0,570	0,511
Теплота сгорания высшая в кВт · ч · м$^{-3}$ (н)		5,23	5,25	5,43	5,44	4,94
Теплота сгорания низшая в кВт · ч · м$^{-3}$ (н)		4,65	4,67	4,81	4,88	4,38
Динамическая вязкость при 20°C, 10^6 Па · с		1 323	1 339	1 260	1 278	1 240
Отношение $\frac{C}{H}$ (весовое)		2,6	2,7	2,5	3,1	3,0
Стехиометрическое сгорание	Необходимый сухой воздух, м^3 · м$^{-3}$	4,16	4,20	4,32	4,25	3,76
	Влажный дым, м^3 · м$^{-3}$	4,90	4,97	5,06	5,03	4,46
	Состав влажного дыма:					
	CO_2	0,46	0,46	0,47	0,54	0,50
	$N_2 + A$	3,41	3,48	3,49	3,46	2,97
	H_2O	1,03	1,03	1,10	1,03	0,99
Температура горения (°C)		1 919	1 912	1 923	1 925	1 928
Температура точки росы дыма при стехиометрическом горении (°C)		61,5	61,1	62,3	60,8	62,7
Индекс Воббе, полуисправленный K_1, W		6 357	6 231	6 832	6 195	5 751
Индекс Воббе, исправленный W'		6 119	6 017	6 582	6 057	5 773
Потенциал горения C		81,0	74,1	88,5	83,5	98,7
Индекс желтого языка		44,6	46,7	48,1	59,6	45,8
Индекс обугливания		66,2	66,2	72,3	63,1	62,1

Характеристика газов после обогащения в линиях непрерывного риформинга, каталитических и под давлением (для сведения).

для непрерывных эндотермических процессов следует условиться выбирать катализатор повышенной активности, так как температура ограничена сопротивляемостью металлических трубок; в некоторых случаях этот выбор определяется даже желанием получить газ, отвечающий термодинамическому равновесию при относительно низких температурах (пример – гидрогазификация);

— величина давления,

процессы с повышенным давлением (несколько десятков бар) допускают использование микропористых катализаторов, в отличие от процессов при атмосферном давлении. Длина свободного пробега молекул есть обратная функция давления.

В таблице на стр. 363, приведенной для сведения, уточняются некоторые характеристики катализаторов, применяемых в газовой промышленности.

Катализатор		A	B	C	D	E	F	G
Тип реакции		Циклический риформинг				Непрерывный риформинг		Гидрогенизация непредельных
Используемое сырье		Легкие нефтяные дистиллаты, природный газ, газ заводской				Легкие нефтяные дистиллаты	Природный газ	Газ 1-го семейства
Давление использования		Атмосферное				30 бар		Атмосферное
Состав катализатора в %	Ni	4,2	6,4	6,6	4,6	22,3	9,7	–
	Al_2O_3	95,6	92,3	64,6	85,8	24,7	68,7	70,0
	SiO_2	0,1	0,6	25,5	6,4	17,8	0,2	15,7
	CaO	–	0,1	0,3	следы	12,6	0,1	2,0
	TiO_2	–	–	0,4	–	0,6	0,4	–
	Na_2O	–	0,2	1,2	1,1	1,1	0,8	2,9
	K_2O	–	0,1	1,1	0,1	8,8	0,3	0,4
	MgO	–	0,1	0,1	0,4	7,6	19,7	0,6
	Fe_2O_3	0,1	0,2	0,2	0,6	4,5	0,1	0,1
	Cr_2O_3	–	–	–	–	–	–	–
	Pd	–	–	–	–	–	–	0,5
	Связующие	–	–	–	–	–	–	7,8
	(графит)	–	–	–	–	–	–	–
	S	–	–	–	–	–	–	–
Форма		Шарики	Шарики	Кольца	Цилиндры	Кольца		Маленькие кольца
Размеры (мм)	Наружный диаметр	20 до 30	20 до 30	43 до 46	15	17	19	3
	высота			43	15	17	19	4,5
	толщина	–	–	12	–	5	5	–
Насыпной вес ($т \cdot м^{-3}$)		1,6	1,4	0,8	1,5	1,2	0,9	0,8
Удельная поверхность ($м^2 \cdot г^{-1}$) . . .		1	2,4	4,7	1,5	22,4	3,0	–
Суммарная пористость (%)		32	40,0	47,0	35,0	34,0	50,0	–

Характеристики некоторых катализаторов.

1. Непрерывный эндотермический риформинг под давлением	Удельная поверхность: от нескольких квадратных метров до нескольких десятков квадратных метров на грамм. Содержание никеля: от 10 до 25%. Средний размер: от 10 до 100 нм
2. Циклический риформинг при низком давлении	Удельная поверхность: от 1 до нескольких квадратных метров на грамм. Содержание никеля: от 2 до 10%. Средний размер пор: несколько десятков мм
3. Аутотермический риформинг при низком давлении	Значительный слой катализатора. Повышенная температура в зоне реакции. Характеристики ближе к (2), чем к (1)

Различные процессы производства и используемые катализаторы.

2.5.3.6. Тяжелые нефтепродукты

Тяжелые нефтепродукты, такие как остатки дистилляции под давлением, могут служить сырьем для изготовления более легких углеводородов и синтез-газа. Легкий крекинг позволяет получить легкую фракцию и из остатка (смола) можно путем окисипарогазификации получить синтез-газ. Некоторые из этих процессов описаны в Hydrocarbon Processing, V.65, № 9 (сентябрь 1986 года). Сюда можно добавить процесс Cherry d'Osaka Gas.

2.5.4. Переработка искусственного газа

Кроме основных составляющих (C, H, O) уголь содержит гетероатомы (присоединенные к основным углеводородам) N, S, Cl. Золы содержат кроме того вредные элементы: S, Cl, тяжелые металлы и т.д. В процессе газификации способствуют образованию:

— азотистых соединений NH_3, NO_x, цианидов;

— сернистых соединений H_2S, COS.

Кроме того, в зависимости от условий производства в газе можно обнаружить смолы, фенолы и т.д. Наконец, сырой газ содержит в виде суспензии твердые частицы (пыль).

Переработка будет иметь двойную цель:

— удалить из сырого газа нежелательные компоненты. Это этапы отмывки (обезпыливание, очистка от смолы и т.д.), обессеривания, детоксикации (удаление CO конверсией), и т.д.;

— модифицировать состав газа для того, чтобы сделать его пригодным для намеченного употребления. Это этапы удаления углекислого газа, конверсии CO и т.д.

2 ДОБЫЧА И ПЕРЕРАБОТКА

Переработка искусственных газов, полученных из нефтепродуктов или природного газа, проще, так как сырье менее сложно (меньше гетероатомов, меньше химических соединений, меньше химических функций).

Следующие параграфы касаются:

— очистки сырого газа,

— конверсии CO,

— раскисления (удаление углекислого газа, обессеривание).

2.5.4.1. Переработка угольного газа

Цепь переработки угольного газа имеет целью удаление конденсирующихся составляющих (гудрон, бензол, нафталин), аммиака и, возможно, всех или некоторых сернистых соединений. В приведенной ниже таблице даны состав примесей, которые необходимо удалить из сырого газа на выходе из коксовой печи, а также спецификация очищенного газа в 1 м³ (н).

	Угольный газ сырой, г	Очищенный газ, мг
Гудрон	200	10
Нафталин	5 - 6	50
Аммиак	8 - 10	150
Бензол	40	0,004
Сера	3	–

Как видно из приводимого ниже рисунка, классическая цепь переработки угольного газа содержит четыре этапа.

2.5.4.1.1. Охлаждение и смолоотделение

Охлаждение позволяет сконденсировать пары воды и смол. Конденсаты отстаиваются для отделения смол, и вода частично возвращается в цикл для отмывки и охлаждения газа. Смолоотделение дополняется электростатическим смолоотделителем.

2.5.4.1.2. Сепарация нафталина

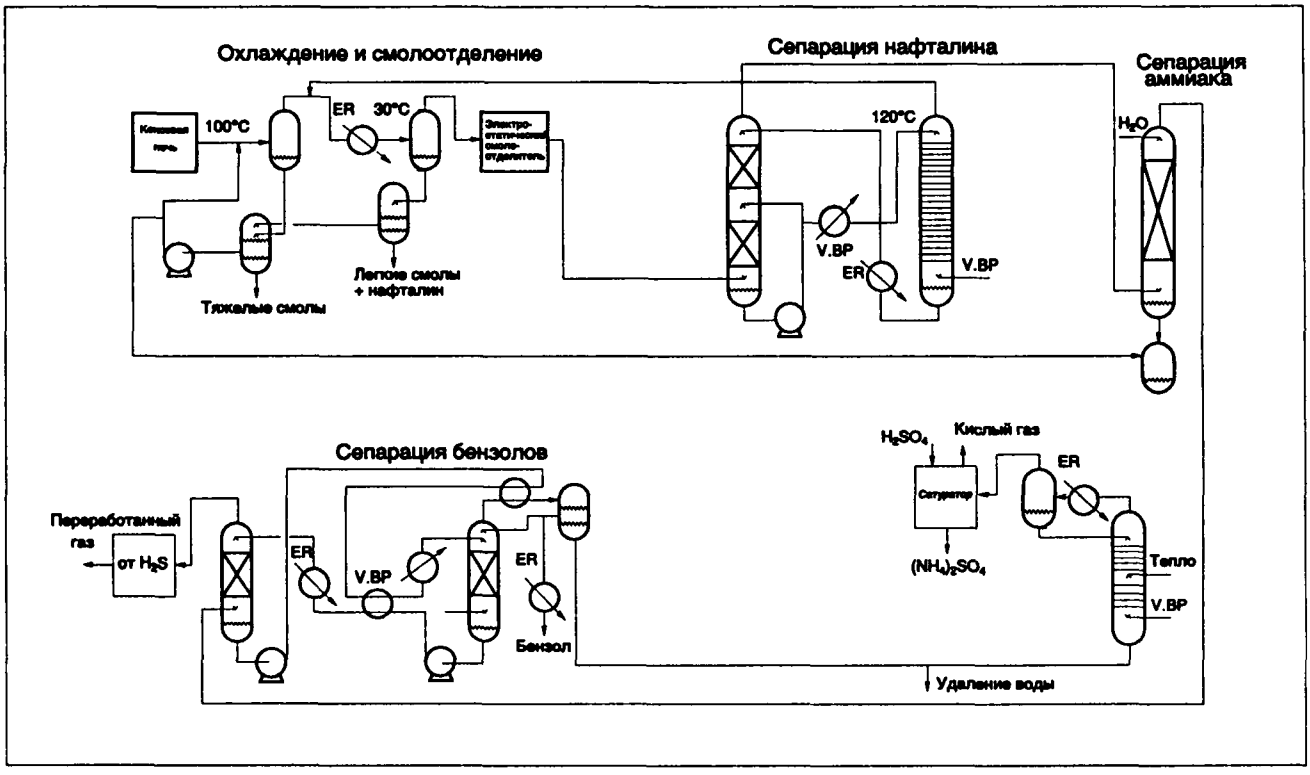
Большая часть нафталина уже сконденсировалась вместе со смолами. Сепарация дополняется отмывкой минеральными маслами, регенерируемыми отгонкой легких фракций при помощи водяного пара. Газообразный нафталин и водяной пар, полученные в колонне для отгонки легких фракций, возвращаются обратно к началу процесса очистки.

2.5.4.1.3. Сепарация аммиака

Аммиак, очень хорошо растворяющийся в воде, уже частично собран в водных конденсатах. Это дополняется пропуском газа через одну или несколько колонн водной отмывки, расположенных последовательно. Аммиачные воды подвергаются отгонке легких фракций с помощью водяного пара и обрабатываются теплом, так что дегазируется летучий аммиак. Затем аммиак собирается в виде соли аммония после нейтрализации сильной кислотой.

2.5.4.1.4. Сепарация бензолов

Бензол удерживается отмывкой минеральным маслом, регенерируемым отгонкой паром легких фракций. Эта установка по отмывке может также удерживать сероуглерод (CS_2) при условии ее соответственного увеличения.



Переработка угольного газа.

2.5.4.2. Конверсия CO водяным паром (или Шифт конверсия)

2.5.4.2.1. Общие соображения

Реакция конверсии монооксида углерода водяным паром, называемая также Шифт конверсией, дающая диоксид углерода (CO_2) и водород (H_2), стала одной из базовых реакций химической индустрии.

Применение

Использована впервые в 1912 году Бошем и Вильдом для увеличения содержания водорода в водяном газе.

Изготовление синтез-газа путем адаптации относительных содержаний водорода и CO в газах, полученных паровым риформингом, или частичным окислением углеводородов, или газификацией угля:

— синтез аммиака (производство водорода);
— синтез метанола;
— производство ЗПГ[1].

Детоксикация угольного газа.

2.5.4.2.2. Термодинамический аспект

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2.$$

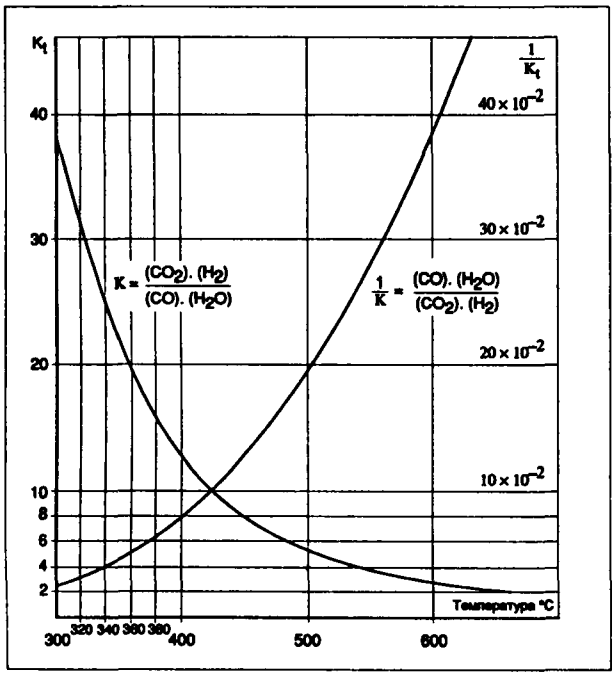
Реакция экзотермична. Константа равновесия

$$K\theta = \frac{(CO_2)\,(H_2)}{(CO)\,(H_2O)}$$

уменьшается с ростом температуры

$$\lg K\theta = -4{,}35369 + 4593{,}16/T, \qquad \text{где T в °K.}$$

[1] ЗПГ – заменитель природного газа. – Прим. ред.



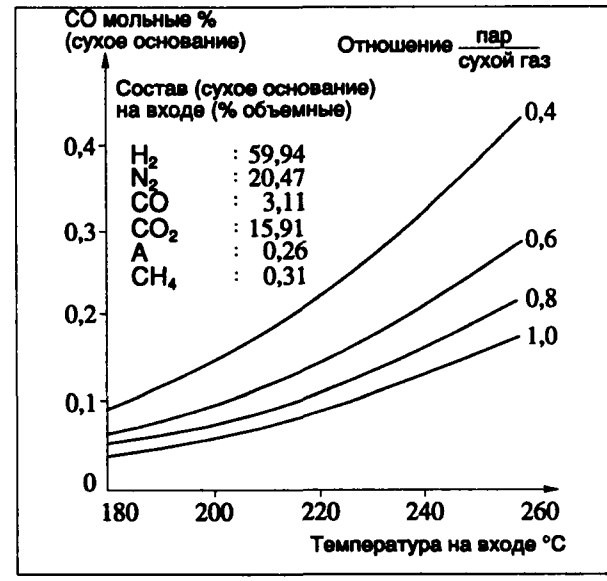
Константы равновесия в реакции $CO + H_2O = CO_2 + H_2$.

Практически реакция реализуется в присутствии соответствующих катализаторов.

Скорость реакции внутри конвертера зависит от:

— давления;
— состава (сухое основание) реакционной смеси;
— температуры операции;
— отношения расходов $\frac{\text{пар}}{\text{сухой газ}}$.

На представленном ниже рисунке приведена для примера концентрация CO при равновесии в зависимости от температуры на выходе из реактора и отношения $\frac{\text{пар}}{\text{сухой газ}}$ для газа заданного состава.



Остаточное содержание CO при равновесии.

С термодинамической точки зрения очевидно, что лучшая конверсия CO достигается при низких температурах и повышенных отношениях $\frac{\text{пар}}{\text{сухой газ}}$; даже при отношении $\frac{H_2O}{CO}$, равном 3, необходимо работать при температурах ниже 250°C для того, чтобы конверсия оксида углерода была практически полной.

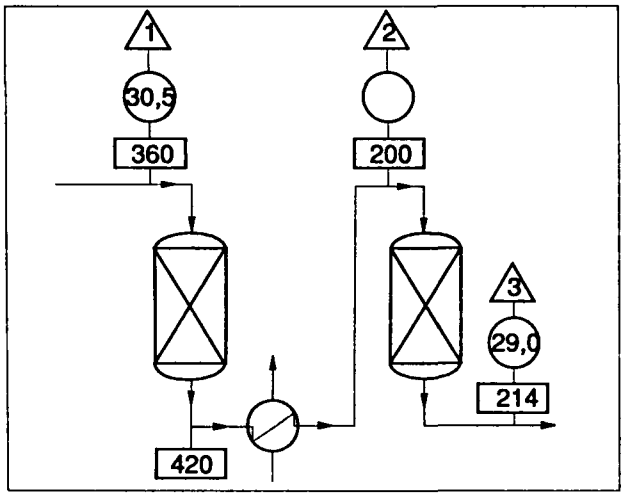
Однако при таких температурах и, особенно, при малых отношениях $\frac{H_2O}{CO}$ заметным образом развиваются нежелательные побочные реакции, при которых образуются метан и углерод. Для ограничения действия этих реакций необходимо использовать активные селективные катализаторы, дезактивирующиеся при высоких температурах.

На практике общепринятым решением является конверсия монооксида углерода в два этапа с промежуточным охлаждением и добавкой пара на входе во вторую ступень:

— при конверсии, проводимой при высокой температуре, избегают образования свободного углерода;
— конверсия, осуществленная при низкой температуре, позволяет активизировать трансформацию CO и свести его содержание в сухом газе до 0,06 - 0,1% объемных.

Во избежание вредного для долговечности катализаторов перегрева реакции производятся в адиабатических реакторах. Естественное повышение температуры составляет примерно 7°C на 1% молный (сухое основание) конвертированного CO.

Приведенная ниже для сведения схема иллюстрирует условия проведения операции в установке конверсии CO, функционирующей при 30 бар.



□ – *t °C*; ○ – *избыточное давление (бар).*

	1	2	3
H_2	33,83	39,45	40,85
N_2	13,46	13,46	13,46
CO	7,11	1,49	0,09
CO_2	5,38	11,00	12,40
Ar	0,16	0,16	0,16
CH_4	0,18	0,18	0,18
H_2O	39,88	34,26	32,88

Газ, полученный паровым риформингом из природного газа.

Приводимый ниже пример представляет два случая процесса при 2 и 11 бар:

	Случай 1		Случай 2	
	первая ступень	вторая ступень	первая ступень	вторая ступень
Загрузка (% объемные):				
CO	17,0	2,0	11,70	2,0
CO_2	6,3	18,3	10,90	18,15
H_2	72,4	75,9	76,15	78,75
CH_4	4,3	3,8	1,25	1,10
H_2O (сухой газ)	0,55	0,35	1,6	–
Температура на входе (°C)	290	290	375	300
Температура на выходе (°C)	390	300	–	310
Абсолютное давление (10^6 Па)	0,2	0,2	1,1	1,1
Продукт (% объемные):				
CO	2,0	0,8	2,00	0,3
CO_2	18,3	18,4	18,15	19,5
H_2	75,9	76,9	78,75	79,1
CH_4	3,8	3,9	1,10	1,1
H_2O (сухой газ)	0,35	0,33	–	–

Типичные условия:

— 1-й реактор: 10 - 60% CO (на входе), 400°C;
— 2-й реактор: 1 - 4% CO (на входе); 0,06 - 0,8 CO (на выходе).

2.5.4.2.3. Каталитический аспект

2.5.4.2.3.1. Катализаторы конверсии при высокой температуре

Этот тип катализаторов с давних пор имеется на рынке. Наиболее используемыми в промышленности являются катализаторы на магнетитовой базе (закись–окись железа Fe_3O_4 – 80 - 95% весовых), стабилизированные хромом (Cr_2O_3 – 5 - 10% весовых).

Условия применения:

— температура 300 - 400°C;
— максимально допустимая температура 550 - 600°C (предел стабилизации);
— объемная скорость V.V.H.:

$$300 \text{ до } 400\ ч^{-1}\ \left(\frac{\text{расход влажного газа}}{\text{объем катализатора}}\right);$$

— яды – соединения, содержащие серу.

2.5.4.2.3.2. Катализаторы конверсии при низкой температуре (170 - 275°C)

Используемые в промышленности с 1965 года катализаторы состоят из оксидов меди CuO (15 - 30% весовых) и цинка ZnO (40 - 50% весовых), нанесенных на глинозем Al_2O_3 (дополнение).

Условия применения:

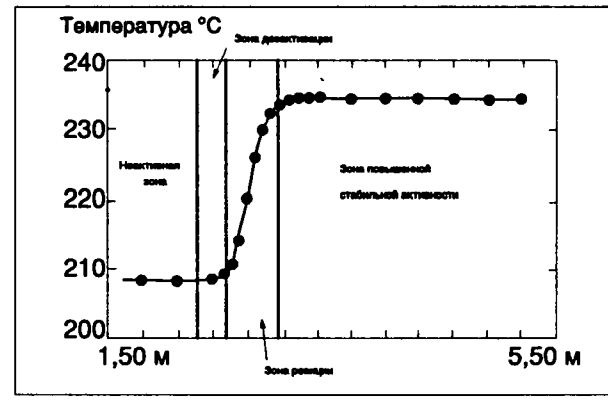
— температура – 170 - 275°C;
— объемная скорость V.V.H. – от 1000 до 6000 $ч^{-1}$.

Каталитические системы, активность которых пропорциональна содержанию меди, очень чувствительны к примесям, особенно к соединениям серы и галогенов. Поэтому им, как правило, предшествуют защитные слои (подложки, пропитанные окисью цинка).

На практике диапазон разрешенных температур определяется точкой росы пара на входе в реактор и операции производятся при температурах на 10 - 15°C выше точки росы входной смеси из-за проблем пуска, экстренной остановки и эффекта Кельвина в твердых пористых телах.

Профиль температур внутри слоя указывает на положение различных зон реакции.

На приведенном ниже рисунке представлен типичный профиль внутри реактора, снабженного катализатором для низких температур.



Термический профиль вдоль реактора.

Наблюдение за фронтом реакции, так же как скорость перемещения горячей точки, позволяет судить о дезактивации катализатора.

Измерение эффективности катализатора конверсии может быть осуществлено путем определения времени, в конце которого становится невозможных удержать конверсию вблизи термодинамического равновесия.

Регенерация катализатора:

— низкое давление, температура между 150°C и 250°C;
— V.V.H. – от 200 до 500 $ч^{-1}$;
— от 1 до 2% водорода в инертном газе (N_2).

2.5.4.2.3.3. Тиорезистентные катализаторы конверсии

Некоторые каталитические системы, используемые с 1974 года и основанные на использовании кобальта и молибдена или других переходных металлов VIII группы, обладают хорошей сопротивляемостью сере (для содержаний от 10 p.p.m. до 3%), и интерес к ним основан на упрощении процесса. Действительно, они не требуют предварительного удаления сероводорода, который может быть извлечен в дальнейшем при помощи единственной операции удаления кислых газов.

Тиорезистентные катализаторы конверсии могут быть использованы от 200 до 500°C, что означает, что они являются одновременно низкотемпературными и высокотемпературными катализаторами.

Для поддержания активности эти катализаторы нуждаются в минимальном содержании серы (в виде H_2S) в загрузке. Это вызвано тем, что активная фаза образована сульфидом молибдена, получающимся после активизации катализатора под действием смеси ($H_2 + H_2S$).

Яд: HCl представляет собой единственный известный серьезный яд для этого типа катализатора.

Вторичная реакция:

сероокись углерода, присутствующая в загрузке, конвертируется в соответствии с реакцией

$$COS + H_2O \longrightarrow H_2S + CO_2.$$

Содержание COS на выходе из реактора соответствует равновесному.

Константы равновесия, полученные расчетом с помощью таблиц Жанафа[1], для этой реакции равны

Температура, K	500	600	700	800
Kp	2 857	719,4	267,9	127,1

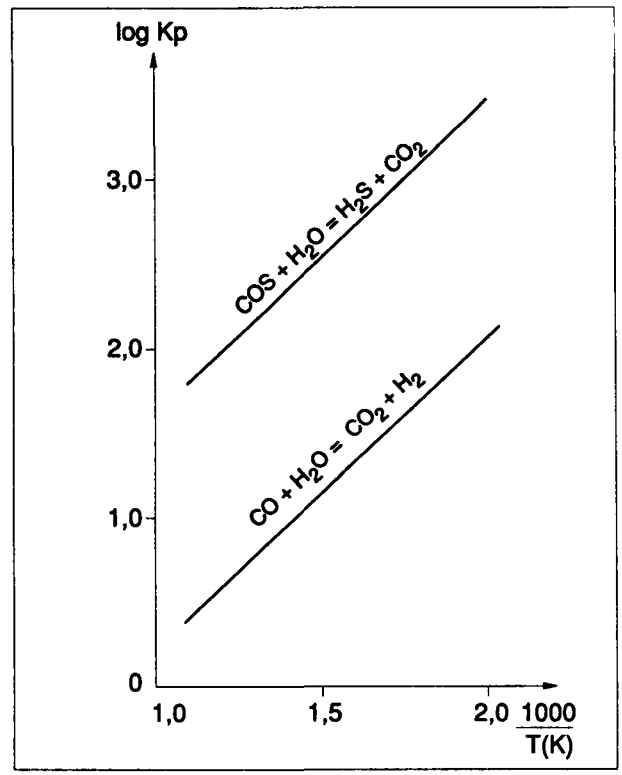
На рисунке напротив показано влияние температуры на константы равновесия двух реакций.

В таблице напротив представлены некоторые типичные условия для реакторов тиорезистентной конверсии для трех различных случаев, при которых используется загрузка, полученная газификацией угля с помощью процесса Тексако. Состав этой загрузки имеет вид

H_2 – 35%, CO – 52%, CO_2 – 11%.

Другие: H_2S, NH_3, COS, H_2S, N_2, Ar – 2%.

[1] *Janaff: Thermochemical tables, 2e edition, U. S. Deppartment of Commeerce, National Bureau of Standdaards, N.S.R.D.S N.B.S. 37 (1970).*



Влияние температуры на константы равновесия.

Искомый конечный продукт	Аммиак	Водород	Метанол
Число слоев	3	2	1
Температура на выходе из последнего слоя °C	227	272	463
Состав в % сухого основания на выходе:			
H_2	54,4	54,1	50,8
CO	0,4	1,4	11,5
CO_2	43,6	43,1	36,3
H_2S	0,4	0,4	0,8
Инертные	1	1	1
Отношение $\frac{\text{сухой газ}}{\text{пар}}$	1,92	3,12	3,33

Типичные условия для реакторов тиорезистентной конверсии.

2.5.4.3. Список литературы

— G.R. Newsome. – Co Shift catalyst poisoning. *Gas World*, 208 - 209. Londres, Grande-Bretagne (10 fevrier 1968).
— G.R. Newsome. – Shift catalyst poisoning. *Gas Journal*, 293-296. Londres, Grande-Bretagne (13 mars 1968).
— A.P. Ting, Shen Wu Wan. – Sizing CO shift converters. *Chemical Engineering*, Washington, Etats-Unis (19 mai 1969).
— G.A. Karim. – Kinetic investigation of the water gas-shift reaction. *Journal of the Institute of fuel*, 219-223. Londres, Grande-Bretagne (decembre 1974).
— W.F. Podolsski. – Modeling the water gas shift reaction., *Ind. Eng. Proc. Des. Dev.*, vol. 13, n° 4, 415-421. Washington, Etats-Unis (1974).

— N.W. Wilson. – Shift conversion of synthesis ggas. *Ind. Eng. Proc. Des. Dev.*, vol. 7, 586. Washington, Etats-Uniss (octobre 1969).
— J.-P. Leonard. – Economic Appraisals. *Chemical Engineering*, 183-186. Washington, Etats-Unis (26 mars 1979).
— P.N. Hawker. – Shift CO plis steam to H_2. *Hydrocarbon processing*, 183. Houston, Taxas, Etats-Unis (avril 1982).
— Sulfur tolerant shift. *Hydrocarbon processing*, 101. Houston, Texas, Etats-Unis (avrril 1984).

2.5.4.4. Раскисление (обезуглероживание, обессеривание)

Процессы раскисления газов были рассмотрены в § 2.4.5. Они приложимы к газам, полученным с помощью газификации угля.

Для проведения некоторых каталитических процессов (например, классической метанизации, см. § 2.5.5.1.2.) необходимо предварительное тщательное обессеривание. Для этого, вообще, используется процесс отмывки физическим (Селексол–Рестизол), или химическим (Бенфилд) растворителем и последующей защитой катализатора с помощью окиси цинка от последних следов серы.

Если газ должен быть поставлен в сеть, то требуемые спецификации достигаются отмывкой амином.

2.5.5. Производство З.П.Г.

Искусственный газ, заменяющий природный, неточно называют З.П.Г.

Производство З.П.Г. может осуществляться либо из жидких нефтепродуктов, либо из твердых топлив.

Существует два возможных пути:

— один, представляющий собой комбинацию из действия паром на загрузку (паровая газификация угля, или риформинг нефтепродуктов) и метанизации;
— другой, основанный на прямой гидрогенизации загрузки.

2.5.5.1. Газификация паром, или риформинг и метанизация

2.5.5.1.1. Риформинг и метанизация

Основные реакции

(1) $C_nH_{2m} + H_2O \longrightarrow CO + H_2$ (эндотермическая),

(2) $CO + 3H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$ (экзотермическая)

загрузка: натуральный газ, легкий нефтяной газ, нефть, керосин;

давление: 20 - 50 бар (выбор из экономических соображений).

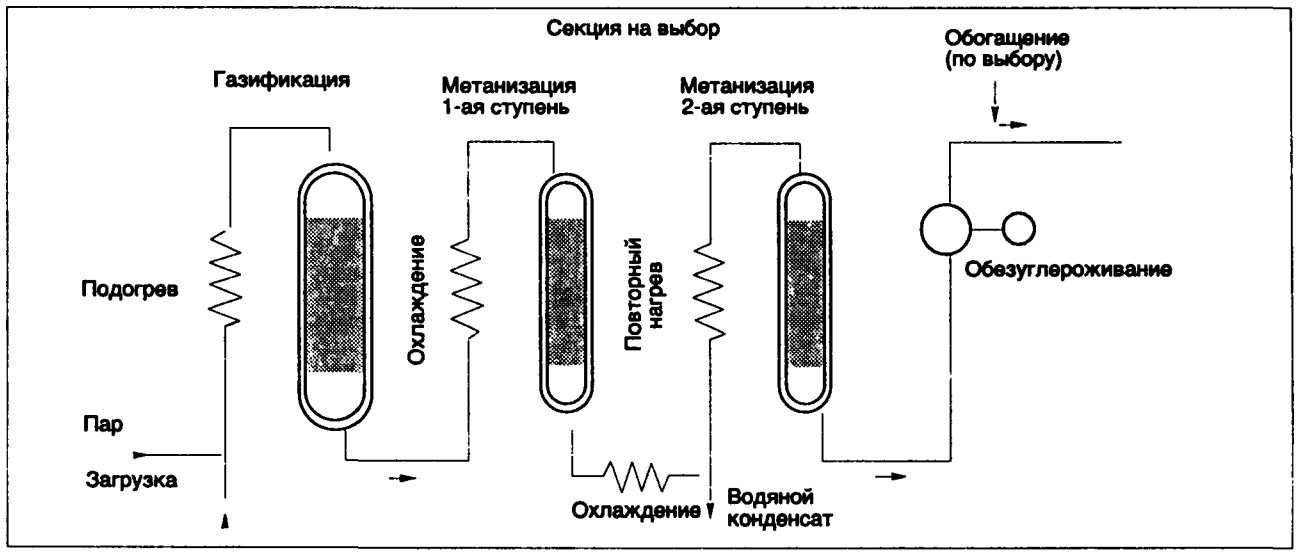
Реакции осуществляются в нескольких последовательных реакторах:

— в первом реализуется риформинг (реакция 1) и, возможно, в большей или меньшей мере возбуждается реакция (2). Полученный газ требует существенного обогащения для достижения спецификаций З.П.Г.;
— в одном, или нескольких, последующих реакторах продолжается метанизация, что избавляет от необходимости слишком большого обогащения нефтяных газов.

Используемые катализаторы очень активны; содержание никеля в них может быть порядка 75%.

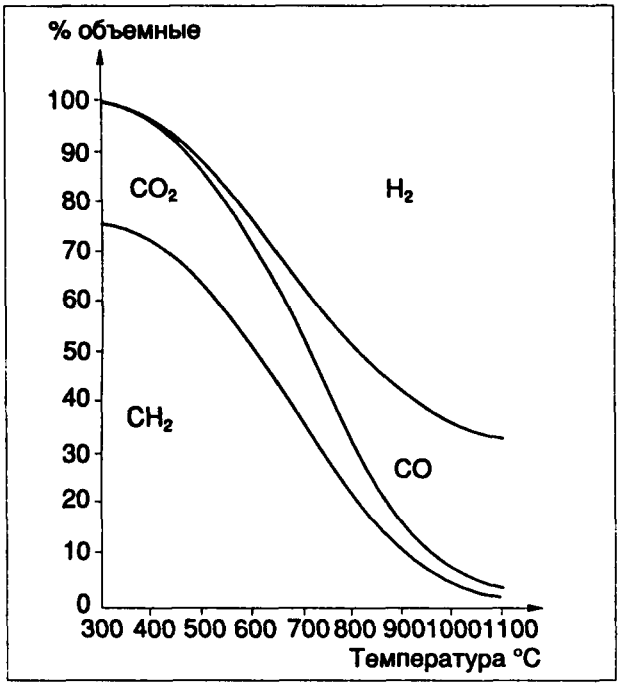
Загрузка	Легкий нефтяной газ, природный газ, нефть
Давление (бар)	20 - 30 +
Температура подогрева, °C	350 - 450 +
Отношение пар–загрузка (кг · кг$^{-1}$)	1,6 - 1,7 +
Температура метанизации (°C) (вход–выход)	
1-я ступень	300/400
2-я ступень	250/300

Режим производства газа.



Принципиальная схема установки реформинга и газификации.

Состав полученного на стадии газификации газа зависит от условий процесса.



Пример: кривые равновесия.

Типичный состав (% объемные)	Выход после газификации	Выход после метанизации		После обезуглероживания
		1-я ступень	2-я ступень*	
CO_2	11 - 13	12 - 15	22	0 - 1
CO	0,5 - 1	0,2	0	0
H_2	7 - 15	2 - 10	0 - 5	1 - 3
CH_4	30 - 40	35 - 45	76 - 80	97 - 99
H_2O	35 - 45	40 - 45	–	–

* Сухой газ.
Среди процессов, базирующихся на этих принципах, C.R.G. (British Gas), M.R.G. (Japan Gas Association, вариант C.R.G.), O.G. (Osaka Gas).

2.5.5.1.2. Реакция метанизации и производство З.П.Г.

При производстве З.П.Г. на основе заводского газа требуется заключительный этап метанизации, для которого существует два пути:

— классический путь, уже использованный для очистки синтетического газа от аммиака (полное удаление CO);
— другой путь, который в противоположность первому, будем называть новым.

2.5.5.1.2.1. Классический путь

Водород и оксид углерода, содержащиеся в сыром газе, конвертируются в метан в соответствии с реакцией, приведенной на стр. 353.

Развитие этой реакции, которой благоприятствуют повышение давления и снижение температуры, нуждается по причинам кинетического и избирательного характера в присутствии катализатора. В настоящее время наиболее активными являются катализаторы на никелевой основе (содержание Ni может варьировать в пределах от 10 до 70%). Эти катализаторы хрупки и необходимость их защиты создает некоторые проблемы при осуществлении метанизации.

Действительно, катализаторы очень чувствительны к :

— отложению свободного углерода, который может забить поры;
— температурному эффекту, который может привести к спеканию активной фазы;
— отравлению, особенно соединениями серы.

Для метанизации заводского газа необходимо:

— воздействовать на газ, очищенный от всяких сернистых соединений;
— умерить рост температуры в реакторе, что, имея в виду сильную экзотермичность реакции, приводит к необходимости установки мощного теплообменника, либо ограничению развития реакции путем рециркуляции газа или впрыска пара.

Кроме того, перед метанизацией необходимо путем конверсии избыточного CO довести отношение $\frac{H_2}{CO}$ до значения равного 3, диктуемого стехиометрией реакции.

2.5.5.1.2.2. Новый путь

Упомянутые выше ограничения диктуют необходимость достаточно сложной обработки газа, что влияет не только на стоимость инвестиций, но и на производительность преобразования.

Поэтому появилась идея разработать катализаторы, устойчивые к сере. Эти катализаторы не содержат никеля.

Известен состав на базе молибдена на подложке из оксида церия или циркония.

Имеет место реакция

$$2CO + 2H_2 \longrightarrow CH_4 + CO_2.$$

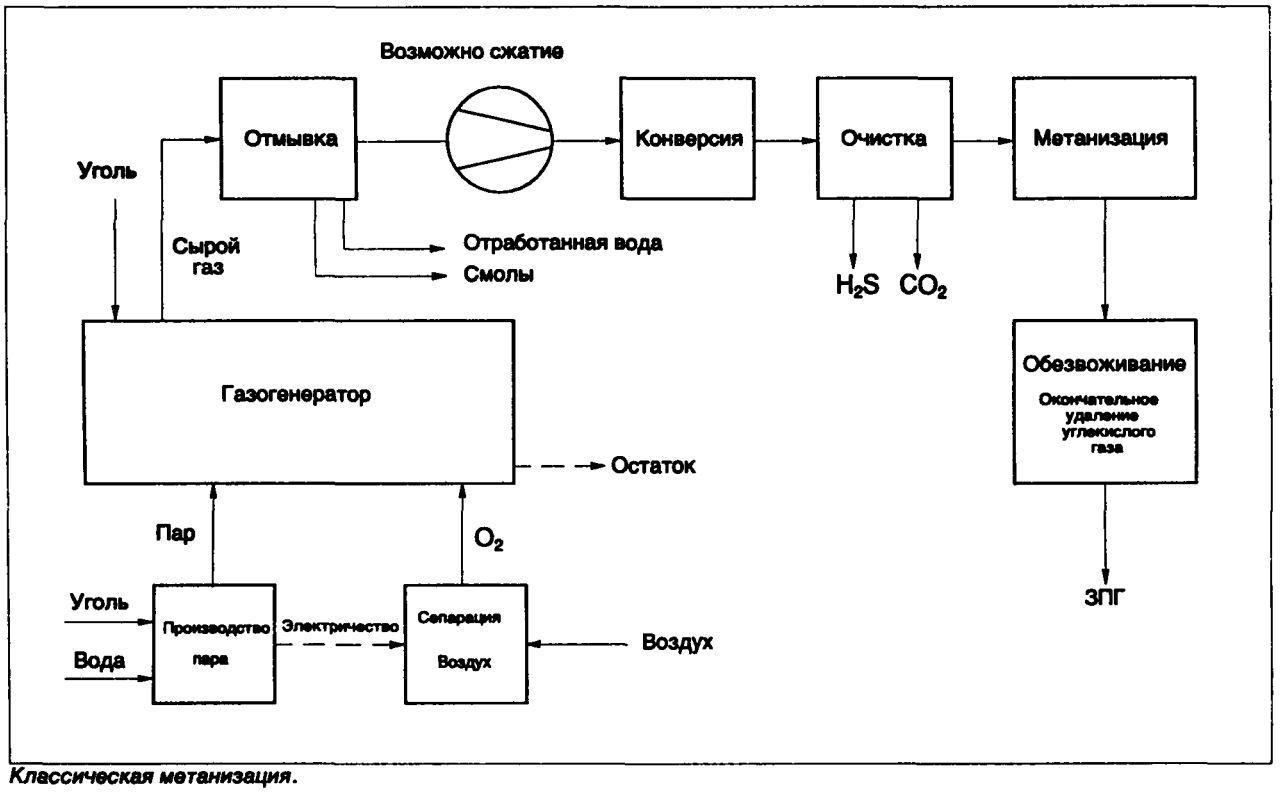
В настоящее время только Gas Research Institute и Gas de France (процесс Méthio) углубленно изучили этот путь.

2.5.5.1.2.3. Блок-схема установки производства З.П.Г. из угля (см. схему на стр. 370)

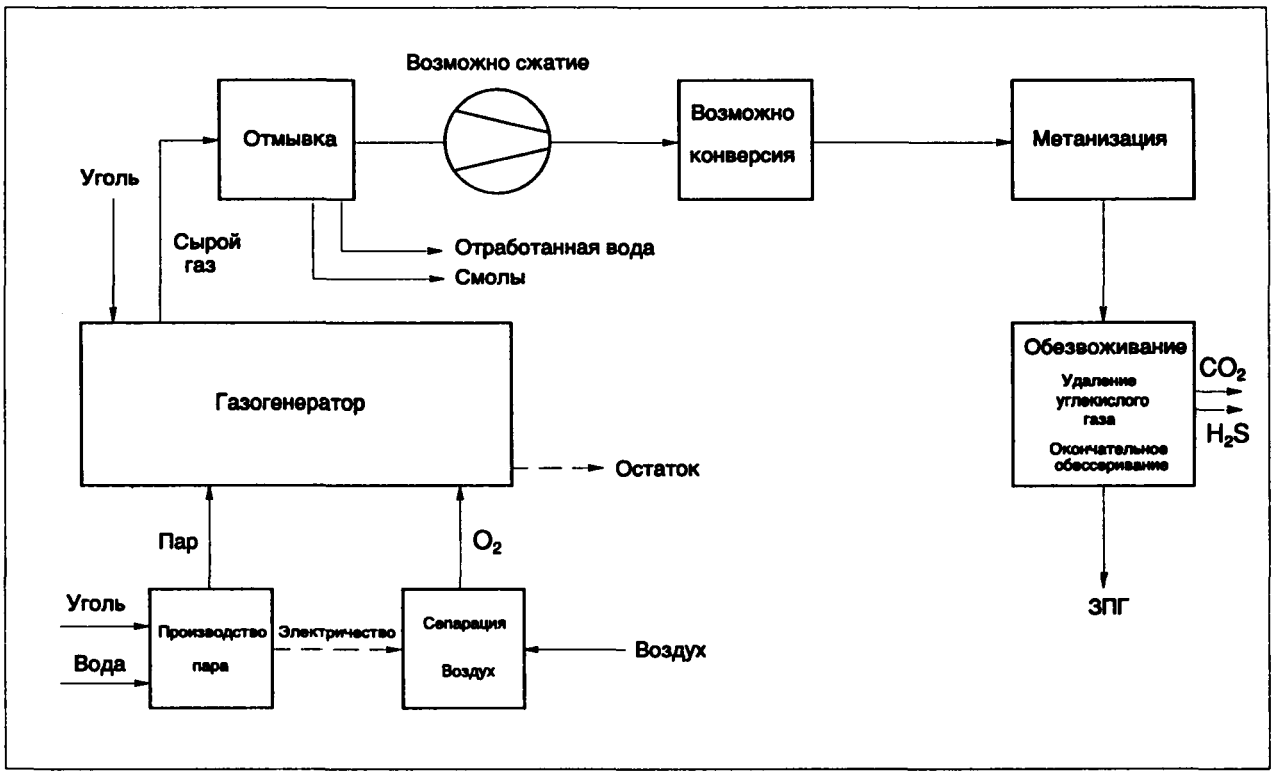
2.5.5.2. Производтсво З.П.Г. гидрогенизацией

2.5.5.2.1. Гидрогенизация жидких углеводородов

Принцип состоит в действии гидрогенизирующим газом на углеводород при температуре 700 - 800°C и давлении от 10 до 30 бар. Гидрогенизирующий газ получается паровым риформингом исходя из конечного газа, полученного метана, конверсией CO и удалением оксида углерода; он содержит пары воды.



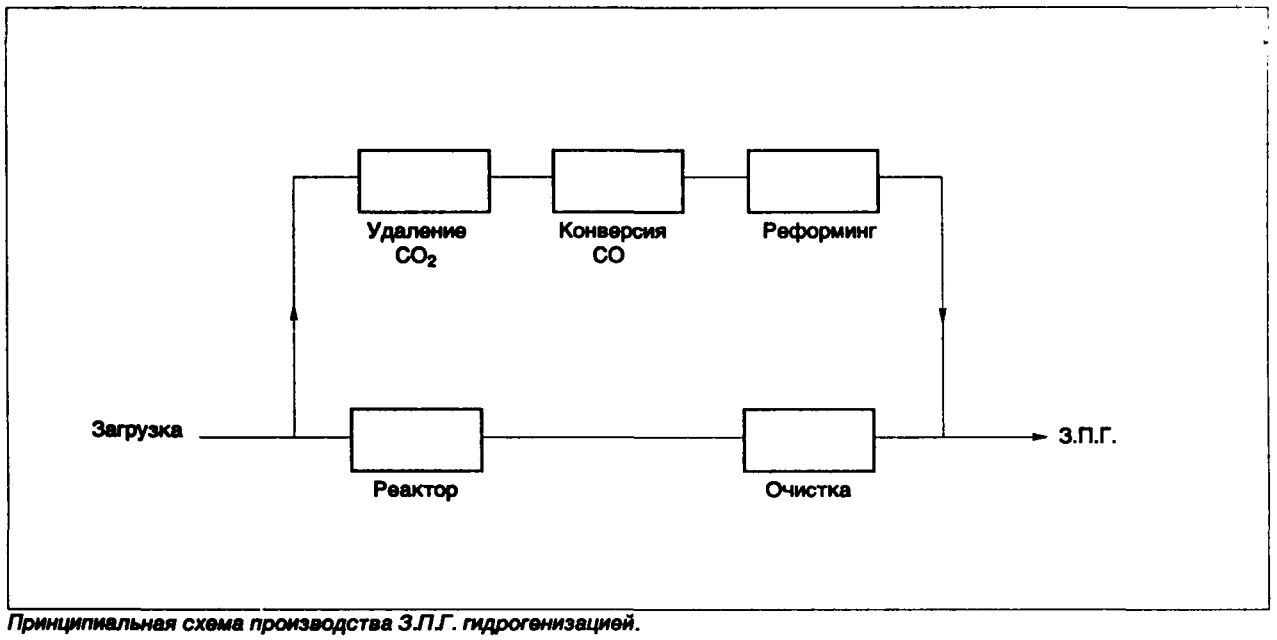
Классическая метанизация.



Тиорезистентная метанизация.

Несмотря на то, что процесс был хорошо изучен для продуктов с высоким отношением C/H, малопригодных для каталитической газификации, он отлично функционирует с более легкими загрузками (см. процессы Gas Recycle Hydrogenator и Fluidised Bed Hydrogenator de British Gas).

	G. R. H.	F. B. H.
Загрузка	Легкие нефтяные дистиллаты (C_4 C_5)	Нефть, легкое сырье
Давление	10 до 30 бар	
Температура	750°C	



Принципиальная схема производства З.П.Г. гидрогенизацией.

2.5.5.2.2. Гидрогенизация угля

Существует два возможных пути:

— гидрогенизация в жидкой фазе,
— гидрогенизация "flash".

2.5.5.2.2.1. Гидрогенизация в жидкой фазе

Уголь смешивается с рециркулируемыми продуктами гидрогенизации, затем в присутствии водорода подвергается высокому давлению (более 100 бар) при температуре около 450°C. На выходе из реактора получается смесь, которая после сепарации дает:

— газы;
— жидкие продукты (из которых одна фракция служит для образования угольной суспензии);
— твердые продукты (в том числе зола).

Процесс является каталитическим. Катализатор может представлять собой окись железа, смешанную с углем (потерянный катализатор), как в старых германских процессах, либо образован из более благородных и дорогих металлов (кобальт–молибден, никель–молибден). В последнем случае он используется в виде неподвижного слоя и служит как для гидрогенизация сольванта, так и для получения водорода из угля: процессы Exxon Donor Solvant, H.R.I., S.R.C. и т.д.

Газы и жидкие продукты после физической очистки и возможного химического обогащения позволяют получить в различных вариациях З.П.Г., горючее и нефтяные основания.

Реакторный водород получается либо путем паровой газификации остатка,либо паровым риформингом жидких или газообразных продуктов реакции. Этот второй путь изучался особо с целью использования тепла атомных реакторов системы H.T.R. (риформинг эндотермичен).

2.5.5.2.2.2. Гидропиролиз "flash"

Принцип состоит в резком нагреве (не менее 1000°C) частиц угля в присутствии водорода. Получаются З.П.Г. и бензол в различных пропорциях в зависимости от времени пребывания в реакторе (от 1 до 2 секунд для З.П.Г., от 5 до 6 секунд для бензола), а также твердый остаток.

Процесс был изучен Рокуэллом в Соединенных Штатах (процесс F.H.P. Rockwell - C.S.R.).

Гидрогенизация угля дала толчок промышленным приложениям в Германии для производства топлива во время второй мировой войны (процессы Bergius, Pott–Broche); мир и энергетическое изобилие привели к тому, что они были оставлены. *Последние нефтяные кризисы придали новый импульс исследованиям с целью уменьшения стоимости получаемых продуктов, которая, даже при самом высоком курсе нефтяного сырья, была далеко не конкурентоспособной.*

2.5.5.3. Список литературы

Для получения более подробной информации, касающейся процессов, а также для расчет а оборудования, следует обращаться к специальным работам по инженерной химии и переработке газов. Среди них можно, в частности, сослаться на:

— P.J. Wilson et J.H. Wellss. – Charbon, coke et sous-produits (traduit de l'anglais par H. Bresson). Editions C. Beranger (1953).

— J. Meunier. – Gazeification eet oxydation des combustbles. Editions Masson. Paris (1958).

— A. Kohl et F. Riesenfeld. – Gas Purification. Gulf Publishing Company, Houston.

— H.H Lowry. – Chemistry of Coal Utilization. John Weley and Sons Inc., New York (1945).

— G.V. Hopton. – The coking, washing and purification of coal gas. Londres, North Thames Gas Board (1953).

2.6. Новые производственные процессы

2.6.1. Производство водорода путем электролиза

2.6.1.1. Общие соображения

Существование во Франции значительного количества атомных электростанций повлечет за собой в конце концов вне часов пик большой наличный потенциал электроэнергии. Могут быть рассмотрены различные пути образования цены этой электроэнергии, среди них производство водорода путем электролиза.

Этот водород, который можно хранить, может быть использован в газовых сетях либо самостоятельно, либо в смеси с природным газом. Функционирование аппаратов для электролиза только в течение части времени вынуждает искать пути снижения размеров инвестиций, даже ценой некоторой потери эффективности (электроэнергия вне часов пик стоит дешево).

2.6.1.2. Принцип

Разложение воды может быть осуществлено приложением разности потенциалов между двумя электродами, опущенными в электролит. Электролит обычно представляет собой щелочной раствор (водный раствор калийной соли и никелевые электроды).

Процесс имеет следующий вид:

— на катоде

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$

— на аноде

$$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$$

Итог этих двух реакций имеет вид

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$$

Во избежание смешения кислорода и водорода между анодом и катодом устанавливается диафрагма. Диафрагма должна допускать обмен ионами OH^- между двумя отделениями ячейки.

Количество полученного водорода определяется законом Фарадея

$$Q = \frac{Itv}{2F} \text{ м}^3\text{(н)} \cdot \text{ч}^{-1}$$

где:

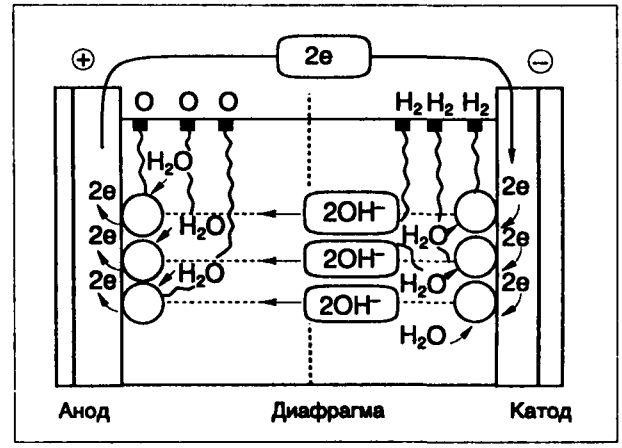
I – сила тока в электролите (А),

t – продолжительность электролиза (ч),

v – молярный объем ($м^3 \cdot моль^{-1}$),

F = 26,8 А · $ч^{-1}$ (96 500 кулонов).

Таким образом, для ячейки площадью в 1 $м^2$, функционирующей при 1 А · $см^{-2}$ в течение одного часа, объем водорода, полученный в нормальных условиях, равен 4,2 $м^3$ (н).



2.6.1.3. Промышленные электролизеры

Промышленные электролизеры для производства водорода бывают двух типов:

— монополярные – электроды питаются параллельно в одной и той же емкости;

— биполярные – электроды питаются последовательно (электрод с одной стороны поверхности является анодом, а с другой – катодом) и образуют укладку ячейки.

Для обоих типов установок необходимо поддерживать:

— равенство давлений водорода и кислорода;

— равенство концентраций калийной соли в обоих отделениях ячейки.

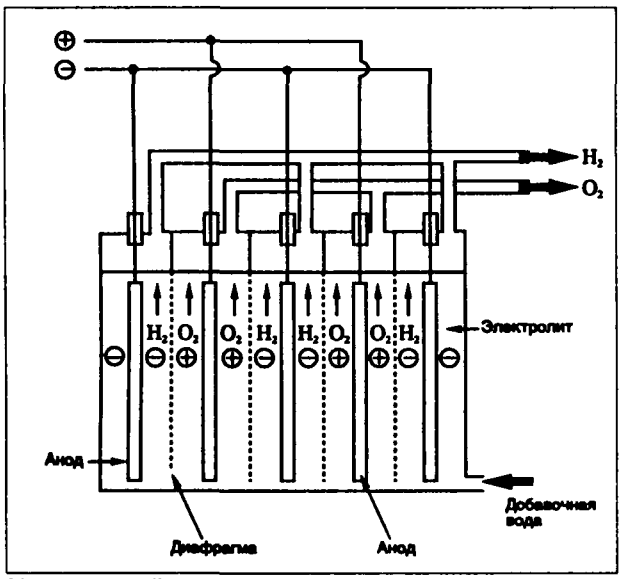
Преимущества биполярных электролизеров, которыми являются компактность и более высокие параметры, привели к более широкому распространению этих установок; ниже описываются только эти аппараты.

Принципиальная схема установки для электролиза воды приведена на нижеследующем рисунке.

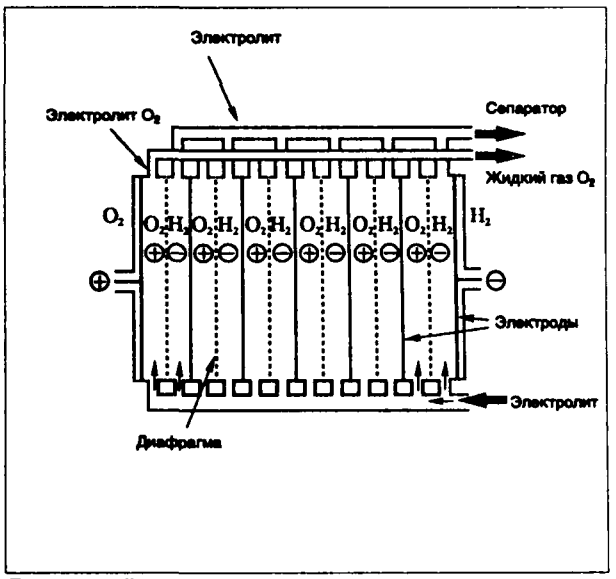
Циркуляционный насос перекачивает электролит, который насыщается пузырьками водорода или кислорода в зависимости от тех или иных отделений ячеек. На выходе из них двухфазные смеси собираются и сепарируются.

Полученные газы охлаждаются, анолит и католит смешиваются, затем охлаждаются и снова подаются в насос.

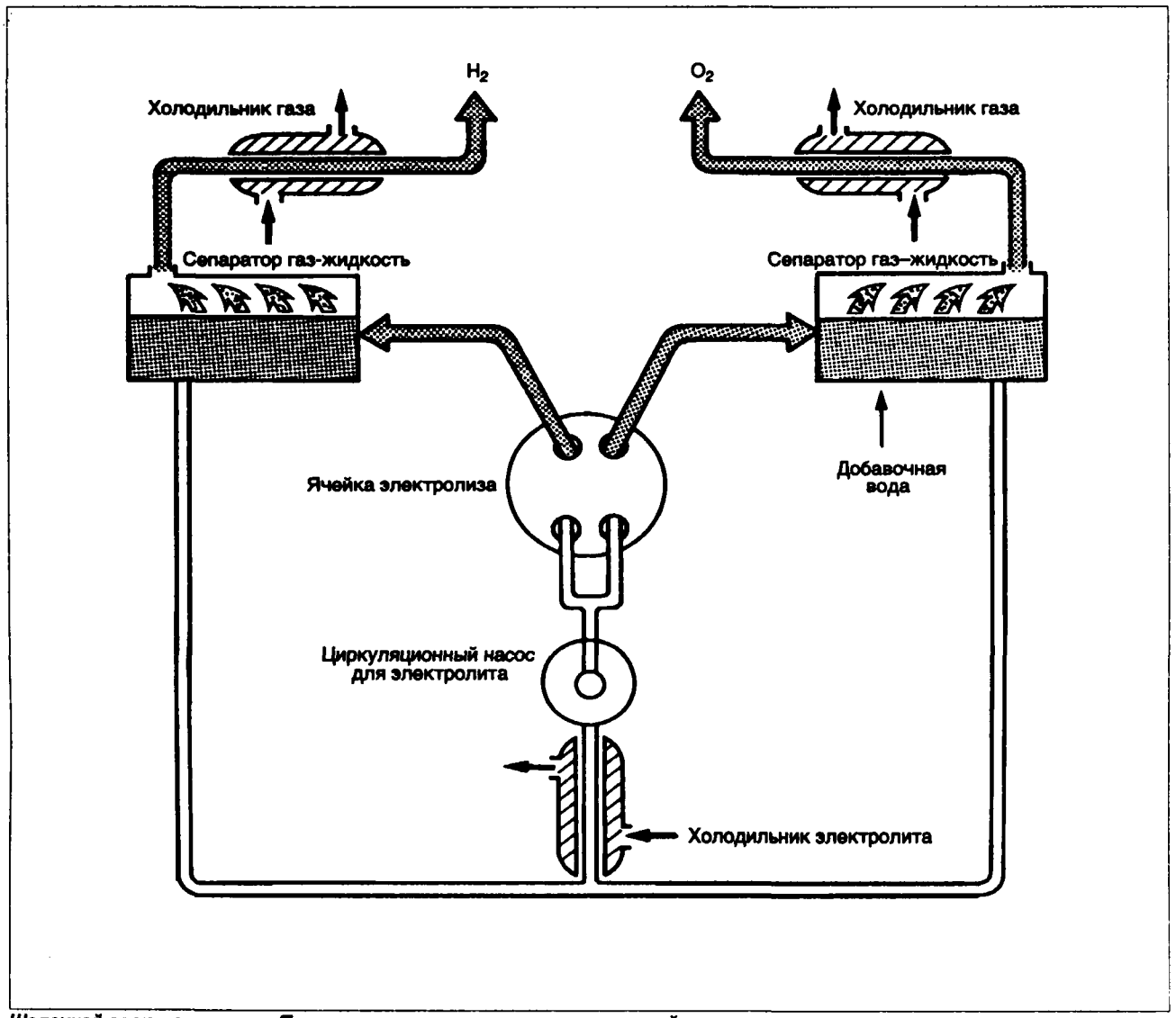
Резерв деминерализованной воды обычно получается в сепараторах. Питание постоянным током осуществляется от сети высокого напряжения через трансформатор-выпрямитель.



Монополярный электролизер.



Биполярный электролизер.



Щелочной электролиз воды. Принципиальная схема электролитической установки.

2.6.1.4. Условия работы и результаты

Электролизеры используют калийную соль с 25 - 30% массовым содержанием и их характеристики приведены ниже.

	Существующие электролизеры	Передовые электролизеры
Плотность тока, $мА \cdot см^{-2}$	200	500 - 1 000
Напряжение в ячейке, В	2	2,1
Давление в бар	атм	30 - 70
Температура, °С	80	до 160
Потребление $кВт \cdot ч \cdot м^{-3}$ (н) H_2	5	5,2
Отдача по высшей теплоте сгорания, %	71	68

Повышение температуры свыше 105°С вынуждает к работе под давлением и увеличивает коррозионную активность раствора калийных солей, что делает необходимым пересмотр концепции электролизеров и применяемых материалов.

2.6.2. Подземная газификация угля

Разжижение или обогащение нефтепродуктов и природного газа возобновили интерес к углю. Развитию его использования наверняка благоприятствовало бы непосредственное превращение в энергоноситель, хорошо поддающийся массовому хранению и экономичной транспортировке, например, в заменителе природного газа.

Если национальные резервы угля, могущие эксплуатироваться шахтным способом, ограничены, то сумма французских резервов значительна и может стать доступной благодаря новому процессу извлечения, осуществляющему подземную газификацию.

Принцип подземной газификации заключается в соединении угля и потока окислителя для получения газа, способного к метанизации. Газовый поток циркулирует в пласте между двумя скважинами, пробуренными на этот пласт.

На больших глубинах, намеченных во Франции для подземной газификации, угли очень малопроницаемы и сообщение между скважинами должно создаваться искусственно.

Приспособление современной нефтедобывающей техники наклонного и горизонтального бурения к тонким угольным пластам сможет, при продолжении уже имеющих программу исследований, оказать решающую поддержку для этого нового процесса эксплуатации угольных месторождений.

2.6.2.1. Рассматриваемые процессы и основные технические проблемы

Схематически процесс содержит следующие последовательные стадии:

— бурение и обрудование двух скважин на угольный пласт в точках, отстоящих друг от друга на несколько десятков метров;

— создание в пласте между двумя скважинами связи достаточно проницаемой для того, чтобы между ними мог циркулировать газообразный флюид со значительным расходом без неприемлемой потери давления;

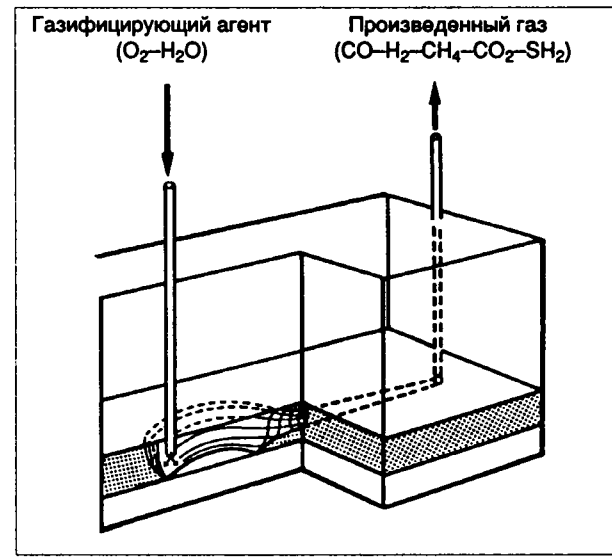
— газификация угля благодаря инжекции окислителя (смесь кислорода и водяного пара) в первую скважину с отбором произведенных газов через вторую скважину.

В действительности надо упомянуть, что:

— процесс касается больших глубин; необходимо достаточно хорошо знать геологию месторождения (глубину, падение пласта, толщину и однородность пласта, состав и характеристики угля). Доступные в настоящее время методы исследований, порядок точности которых связан с толщиной угольных пластов, использующие для необходимых уточнений бурение и сейсмику отраженных волн, находятся на пределе разрешимости для рассматриваемых в Европе глубин (1000 - 1200 м);

— глубокозалегающие угли практически непроницаемы, следовательно, предварительно необходимо создать связь между нагнетательной и продуктивной скважинами, позволяющую циркуляцию флюидов газификации;

— элементарные реакции соединения угля с газифицирующими агентами одинаковы, независимо от того, происходит ли газификация в реакторе на поверхности или в пласте (см. нижерасположенный рисунок). В последнем случае процессы развиваются естественным образом, конфигурация реактора изменяется в процессе эксплуатации и возможности его поведения достаточно лимитированы.



Операция подземной газификации угля.

2.6.2.2. Краткая история

Начиная с 1935 года опыты по газификации угля на малых глубинах осуществлялись в СССР. В годы с 1945 по 1955 различные опыты на малых глубинах были осуществлены в Соединенных Штатах и в Марокко с помощью подземных горных выработок.

В 1960 году в СССР был введен в эксплуатацию ряд действующих до настоящего времени объектов. Предприятия также относятся к неглубоким пластам (200 м).

Быстрое развитие в это время использования природного газа сопровождается в западных странах исчезновением интереса к подземной газификации. Необходимо было дождаться второго нефтяного кризиса 1973 г., чтобы в Соединенных Штатах возобновились различные опыты с неглубоко залегающими углями. Эти усилия инициировали возобновление интереса в Европе, где Бельгия и ФРГ подписали соглашение о сотрудничестве, касающееся старых и глубокозалегающих углей, на глубинах 1000 м и более. Этой бельгийско-немецкой группе удалось осуществить связь между скважинами путем механического бурения с помощью весьма специализированного устройства.

Французской группировке "Группа изучения подземной газификации" на двух разных объектах удалось установить связь при помощи гидроразрыва.

Операции с противоточным горением, предназначенные для создания циркуляционного канала, были начаты на двух различных объектах, но не дали окончательных результатов.

2.6.2.3. Перспективы

Снижение цены на нефть и, как следствие, на газ заставляют отложить на довольно длительное время усилия по проведению исследований и экспериментов, необходимых для разработки подземной газификации, весьма специфического процесса извлечения национальных угольных ресурсов. Значительные технические надежды могут быть связаны с процессами направленного и горизонтального бурения, процессами, в которых нефтяная индустрия добилась в последние годы реализации решительного прогресса.

2.6.3. Биогаз

2.6.3.1. Определение, общие соображения, история

Биогаз – горючий газ, полученный разложением органического вещества.

Основная составляющая биогаза: метан, идентифицированный Вольта в 1776 г. и долгое время известный под названием болотный газ.

Другие названия (в зависимости от субстрата): навозный газ, мусорный газ, очистной газ.

Впервые использование биогаза было осуществлено в Германии накануне первой мировой войны (Имхофф), где газ, выделенный в экстракторах ассенизационных станций, был использован для их обогрева. Это использование развилось в 1920-х годах, и теперь нельзя себе представить более или менее крупную городскую очистительную станцию без рекуперации биогаза, используемого на месте в процессе обработки.

Перед второй мировой войной исследователи (Дуселье и Исманс) создали маленькие ферментаторы навоза для производства биогаза (навозный газ), используемого для сельскохозяйственных нужд. Эти установки не пережили послевоенного снижения цен на горючее, и потребовался энергетический кризис 1970-х годов для того, чтобы снова возник интерес к биогазу и возможным способам его производства. Тем не менее одна из главных проблем, с которой сталкивается метановая ферментация, связана с дисперсностью сырья.

2.6.3.2. Производство

2.6.3.2.1. Механизмы

Метаногенез (получение метана) представляет собой результат анаэробной ферментации органических веществ.

Действительно, процесс может быть рассмотрен в четыре этапа в зависимости от последовательности и сочетания действий различных типов микроорганизмов:

— гидролиз органического вещества (протеины, липиды, глюциды и, особенно, целлюлоза) реализуется путем аэробной преферментации, за которой следует анаэробная фаза, и заканчивается образованием мономеров (сахара, жирных кислот и аминокислот);
— ацидогенез в анаэробной среде, в результате которого получаются спирты (этанол, пропанол, бутанол) и органические кислоты с более длинными цепями (уксусная, молочная, валериановая, бутановая, пропиновая и т.д.);
— ацетогенез в анаэробной среде, преобразующий их в ацетаты, форматы, CO_2 и H_2;
— метаногенез в строго анаэробной среде является конечной ступенью и превращает перечисленные составляющие в CH_4 и CO_2.

Ферментация, в зависимости от бактериальных семейств, может происходить при различных температурах:

— в психрофильном режиме от 10 до 20°C с малой отдачей;
— в мезофильном режиме между 35 и 40°C (оптимум 37°C), используемом чаще всего;
— в термофильном режиме около 60°C, используемом гораздо реже.

Ферментационная среда должна поддерживаться при *p*H несколько выше 7. Более высокие значения благоприятствуют образованию H_2S, а при более низких значениях происходит накопление жирных кислот.

Ферментация начинается после латентной фазы, продолжающейся от одной до шести недель, но которая может быть упразднена засеиванием, либо происходит непрерывно. Рост образования метана происходит очень быстро, максимальная скорость достигается за несколько дней. Затем она сохраняется, после чего медленно убывает.

Продукция составляет порядка от 0,3 до 0,5 м³(н) биогаза на килограмм органического вещества.

2.6.3.2.2. Субстраты

Метановая ферментация применяется к совокупности веществ животного и растительного происхождения, образующих биомассу, конкретнее, к включенным в нее органическим отбросам.

Среди основных субстратов находятся кухонные отбросы, которые содержат в наших странах от 35 до 70% (в среднем 45%) по весу веществ, поддающихся ферментации, в основном целлюлоза. Сортировка кухонных отбросов с удалением инертных и абразивных (стекло) продуктов позволяет улучшить производительность ферментации.

На практике в семье из трех-четырех человек за год образуется тонна кухонных отбросов.

— Средний массовый состав во Франции (источник A. N. R. E. D.)	
· Бумага-картон	от 20 до 35%
· Растительные и животные вещества	от 15 до 35%
· Стекло	от 5 до 10%
· Железосодержащие металлы	от 5 до 8%
· Пластики	от 3 до 6%
· Текстиль	от 1 до 6%
· Мелочь	от 10 до 20%
· Разные	Дополнение до 100%
— Плотность	от 0,2 до 6 т · м$^{-3}$
— Сухое вещество (В. С.)	от 55 до 65%
— Органическое вещество (В. О.)	от 40 до 60%

Состав кухонных отбросов меняется в зависимости от:

- географического положения;
- времени года;
- вида населения;
- степени урбанизации.

— К основным субстратам принадлежат также жидкие отходы животноводства двух типов:
  - стоки, образованные при содержании без подстилки, и содержащие поэтому лишь испражнения животных и воды для мытья стойл (содержание свиней, птицы, телят); содержание сухого вещества (В.С.) от 5 до 10%;
  - навоз животных, содержащихся на подстилках (обычно солома): содержание сухого вещества 20 - 25% (В.С. в соломе – 90%).

Рогатый скот	12 т/год на животное (В. С. в испражнениях 13%)
Свиньи	1,5 т/год на животное (В. С. в испражнениях 7 - 10%)
Овцы	0,5 т/год на животное
Куры	3 т/год на 100 животных
Куры (без подстилки)	0,5 т/год на 100 животных

Среднее годовое производство навоза в зависимости от типа содержания.

Жидкие городские стоки или шламы очистных станций, образованные взвешенными в воде органическими веществами. Прогрессирующая урбанизация (и вред, который она приносит) влечет за собой развитие таких станций и тоннаж, подвергаемый метанизации, непрерывно возрастает. В настоящее время 40% жителей нашей страны подключены к какой-либо очистной станции.

— Стоки агро-пищевых предприятий представляют собой отборный субстрат для анаэробной ферментации из-за:
  - большого содержания в них органического вещества,
  - их способности к быстрому и полному биорасщеплению,
  - их температуры, лежащей между 40 и 80°С (особенно бланшировочные жидкости).

Предыдущее перечисление не является исчерпывающим. Многие другие отбросы содержат в заметных количествах органические вещества, пригодные для ферментации. Однако некоторые растительные вещества богаты лигнином, разрушение которого с помощью анаэробной ферментации невозможно.

2.6.3.2.3. Режимы созревания. Системы ферментации

Субстраты, способные к ферментации, разделяются на две категории:

— жидкие отбросы, в которых органическое вещество находится в виде суспензии. Речь идет о продуктах, пригодных к перекачке, в которых содержание сухого вещества не превышает 10%;

— твердые отбросы с большим содержанием сухого вещества, обращение с которыми менее удобно.

Основные параметры системы метановой ферментации следующие:

— время пребывания вещества в экстракторе, которое зависит от принятого процесса ферментации, термического режима и способности органического вещества к биорасщеплению;

— объемная загрузка органического вещества, которая представляет собой количество вещества, вводимого ежедневно в непрерывный процесс или при каждом заполнении при дискретном процессе, отнесенная к полезному объему экстрактора;

— биологическая отдача – количество газа, полученное на единицу массы введенного органического вещества;

— техническая отдача – количество газа, произведенное на единицу объема бродильни в день;

— поддержание гомогенной фазы в экстракторе путем механического (лопасти), гидравлического (насос и рециркуляция) или пневматического (инжекция газа) перемешивания;

— температура в экстракторе, которая должна поддерживаться на оптимальных значениях (от 35 до 40°С в мезофильном режиме). При использовании газа для нагревания экстрактора его потребление на эти нужды может достигать 30% от произведенного, откуда интерес к хорошей теплоизоляции, особенно в холодных регионах.

Ферментация может проводиться как непрерывно, так и дискретно.

2.6.3.2.3.1. Непрерывный режим

Этот режим характеризуется регулярным введением в большой объем (экстрактор) среды, находящейся в процессе ферментации, органического вещества с долей субстрата, вызывающего соответствующую экстракцию продуктов ферментации. Он применяется в средних и крупных установках. В наиболее распространенном сейчас процессе, называемом "бесконечное перемешивание", вещество, находящееся в экстрак-

торе, непрерывно перемешивается либо механическим образом, либо с помощью рециркуляции произведенного газа. Существует также два других процесса: процесс с "фиксированной культурой", в котором бактерии помещены внутри экстрактора на инертной подложке или на подложке в виде мелкой суспензии (ожиженная подложка), и процесс "анаэробного контакта", в котором микроорганизмы, рекуперированные из экстракционных соков, возвращаются в экстрактор; эти методы позволяют улучшить выход продукции.

Пример:

В процессе Valorga (рисунок на стр. 378), разработанном с помощью G.D.F., перерабатываются продукты с большим содержанием твердого вещества – порядка от 30 до 35%. Загрузка, приготовленная путем сортировки кухонных отбросов или любых других остатков с высоким содержанием органических веществ, вводится в экстрактор с помощью насоса, где перемешивается путем нагнетания газа. Остаточное сухое вещество образует продукт, хорошо поддающийся ферментации. Метанизация производится в мезофильном режиме. Процесс сродственен "бесконечному перемешиванию".

Характерные параметры завода Valorga:

— период пребывания – 15 суток;

— объемная загрузка – от 12 до 16 кг/м³ в день, либо полный суммарный полезный объем экстракторов установки, перерабатывающей Мт кухонных отбросов в год, равный $M \cdot k^{-1}$, k изменяется от 12 до 15;

— биологическая отдача – 140 м³ (н) биогаза на тонну использованного органического вещества.

Размеры установок по приему и дроблению должны учитывать недельное распределение сбора.

2.6.3.2.3.2. Прерывистый режим

Экстрактор заполняется в одну операцию, масса отбросов целиком или полностью погружается в остатки, находящиеся в чане (сок), образованные во время предыдущего цикла ферментации и служащие для засева. Разгрузка следует после более или менее полной деградации субстрата. Для регулирования производства биогаза необходимо несколько чанов.

Прерывистый режим годится только для малых установок.

2.6.3.2.4. Особые случаи свалок

Кухонные отбросы, выброшенные на свалку, подвергаются ферментации и выделяют биогаз, который из санитарных соображений обычно вынуждены рекуперировать и сжигать, даже если их термическое использование невозможно.

Проникновение воды на свалку является важным фактором ее продуктивности.

Свалка образует обширный естественный реактор, однако очень несовершенный, в котором реакции протекают очень медленно. Счет идет на годы, и требуется от 10 до 30 лет, чтобы свалка почти полностью произвела свой газ.

Можно оценить производство рекуперируемого газа величиной порядка от 50 до 100 кВч в год на тонну кухонных отбросов. Для новой свалки эта производительность будет достигнута за десяток лет.

Для закрытых свалок можно принять, что доля наиболее отдаленных лет уменьшается (вдвое за 10 лет).

Приведенные выше значения дают лишь порядки величин. Возможности рекуперации свалки уточняются систематическим зондированием, измерениями расхода и объема рекуперированного газа, регулярными анализами и, наконец, изучением продуктов, выброшенных на свалку.

Техника рекуперации биогаза использует совокупность вертикальных колодцев, соединенных между собой сетью горизонтальных коллекторов, в конце которой извлекается биогаз. Вакуум всасывания на колодцах должен быть на достаточно малом уровне во избежание или для уменьшения подсоса воздуха через защитное покрытие свалки.

2.6.3.3. Состав и характеристики биогаза

Приводимые ниже значения даны для сведения. Могут наблюдаться значительные отклонения.

Основные составляющие:

CH_4 – 60%,

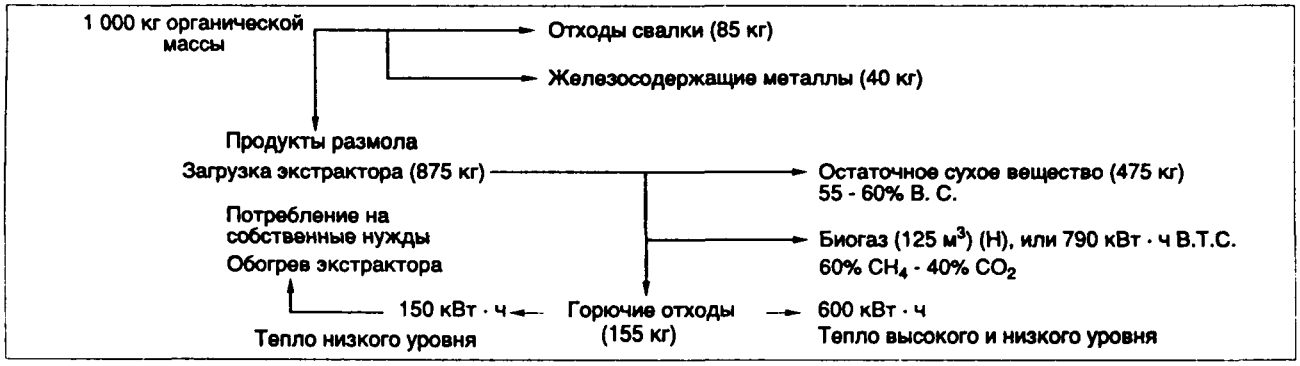
CO_2 – 40%.

Второстепенные составляющие:

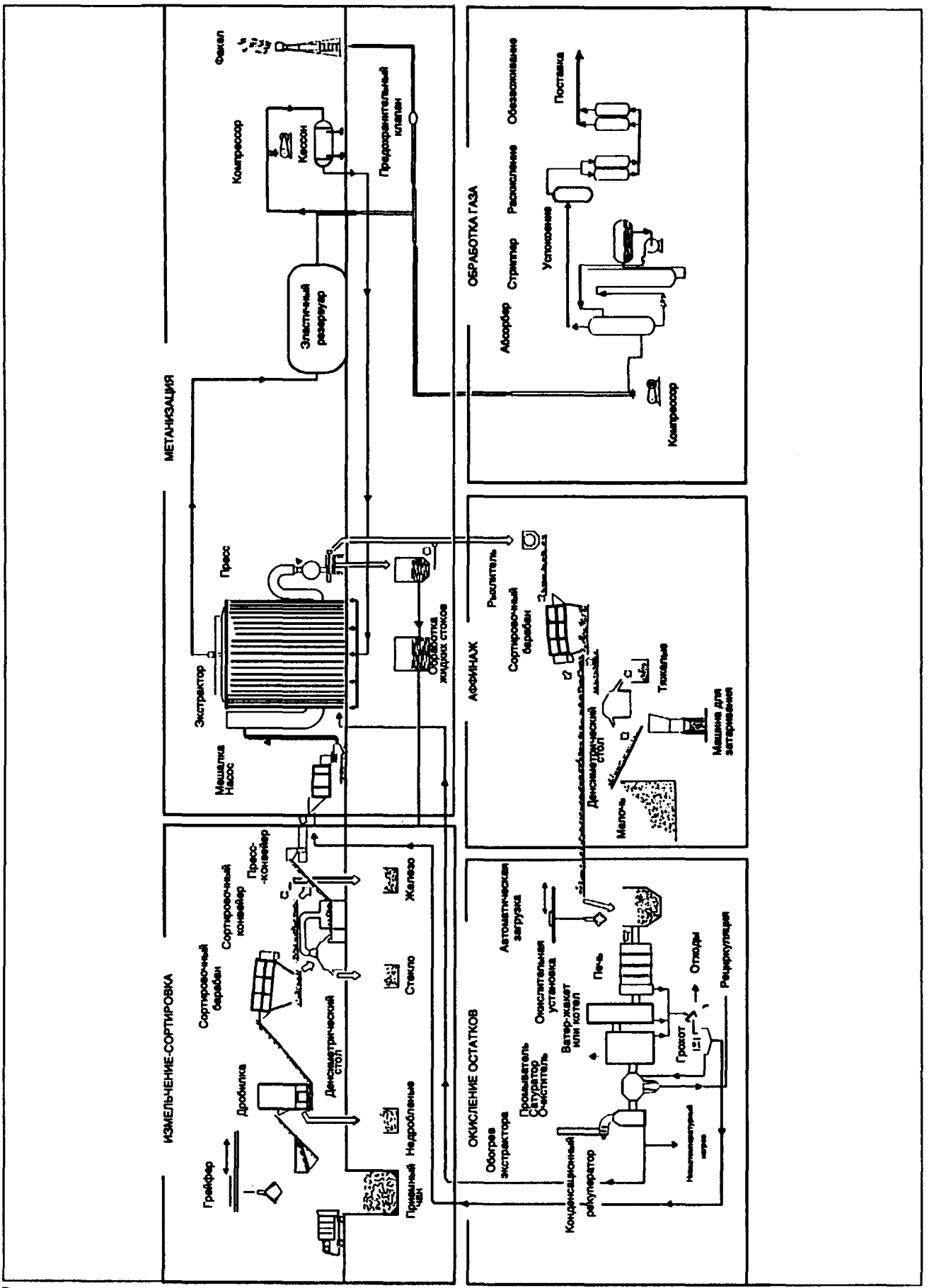
H_2S – от нескольких сот до нескольких тысяч p.p.m.,

H_2O – в виде пара при условии насыщения,

C_nH_m – несколько p.p.m.,



Баланс вещества и энергии завода Valorga.



Валоризация городских отбросов на линии Valorga.

Хлористый винил – следы в биогазе со свалок,

Фреон – следы в биогазе со свалок,

N_2, O_2 – в биогазе со свалок (зависит от режима засасывания),

P.S.C. (высшая теплота сгорания) – от 6,4 до 6,6 кВт · ч · м$^{-3}$ (н),

W – от 7 до 7,5 квт · ч · м$^{-3}$ (н),

C – от 18 до 20.

Температура пламени T°C:

1 960 – 4,1 X(CO_2) = 1 796°C для X(CO_2) = 40.

Скорость дефлаграции V:

$$V: 35{,}1 \frac{1{,}5}{100} X(CO_2) = 14 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1} \text{ для } X(CO_2) = 40$$

2.6.3.4. Использование биогаза

Ценность биогаза основывается на следующих соображениях:

— речь идет о горючем газе, ритмом производства которого можно управлять в незначительной степени;

— характеристики биогаза отличаются от характеристик классических газов. Его непосредственное использование в нормализованных домашних приборах невозможно без их адаптации.

Зато в индустриальном секторе и сфере услуг горелки часто могут использовать газы различных составов, и его применение в чистом виде или в смеси становится возможным.

Из сказанного следует, что:

— биогаз, предназначенный к использованию в общественных распределительных сетях, должен быть подвергнут обработке так, чтобы его добавление не изменяло совсем, или в очень малой степени, характеристики газа, распределяемого через рассматриваемую сеть. На практике обработка нужна для удаления более или менее большой фракции CO_2, так же как и H_2S и влаги. В случае необходимости для повышения калорийности нужна добавка пропана;

— нет необходимости в такой полной обработке биогаза, предназначенного для одного или нескольких определенных потребителей при условии, что у них имеются адаптированные горелки. Однако, так как адекватность производства и потребления не может осуществляться все время, необходимо предусматривать возможность использования другого горючего; природный газ, вообще говоря, обеспечит необходимое поступление. Характеристики смеси варьируются, но существует оборудование, позволяющее адаптироваться к этим изменениям.

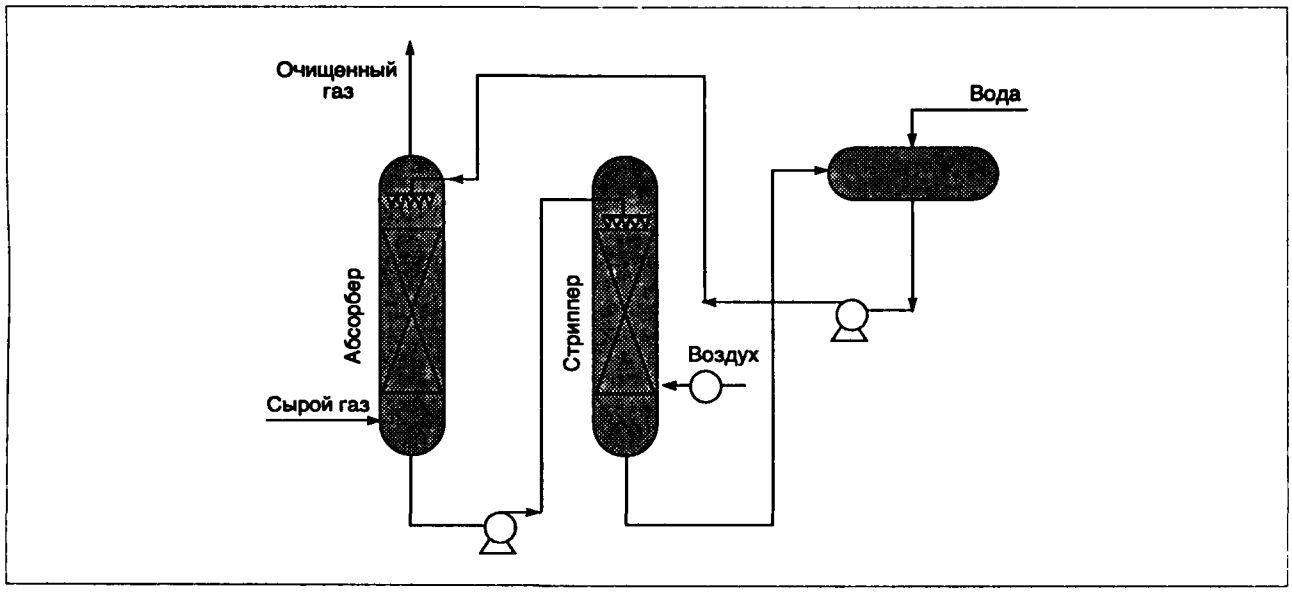
Наконец, биогазы после очистки могут использоваться как горючее в приспособленных для этого двигателях внутреннего сгорания. В некоторых случаях их обработка будет необходимой, а именно, в случае хранения под давлением.

Биогаз может также использоваться для производства электроэнергии.

2.6.3.5. Обработка биогаза

Для подачи биогаза в распределительные сети применимо большинство способов его обработки. Однако дебиты, подлежащие обработке, диктуют необходимость прибегать к простым и экономичным методам, таким как отмывка водой под давлением, что позволяет раздельно проводить удаление углекислого газа и обессеривание. Окончательное обессеривание может быть выполнено с помощью окиси железа или активированного угля.

В процессе отмывки водой газ проходит через абсорбер, где он отдает загрязняющие вещества воде, которая рециркулирует после воздушной регенерации в "стриппере" (см. нижеприведенный рисунок). Характеристики зависят от давления при обработке. Особенно это касается удаления CO_2 (см. таблицу на странице 380).



Биогаз – схема водной отмывки.

Абсолютное давление 20 бар		Биогаз		Вода (25°C)	Воздух для «стрипажа»	Размеры			
		Вход	Выход			Абсорбер		«Стриппер»	
Расход, $м^3$ (н) · $ч^{-1}$		1 150	650	120	2 300	Ø (м)	h (м)	Ø (м)	h (м)
CH_4	%	59,9	98,1			0,9	6,5	1,35	3,55
CO_2	%	39,4	1,4						
H_2O	%	0,2	0,2						
O_2	%	–	0,1						
N_2	%	–	0,2						
H_2S	p.p.m.	5 000	25						

Абсолютное давление 20 бар		Биогаз		Вода (25°C)	Воздух для «стрипажа»	Размеры			
		Вход	Выход			Абсорбер		«Стриппер»	
Расход, $м^3$ (н) · $ч^{-1}$		1 800	1 130	560	1 500	Ø (м)	h (м)	Ø (м)	h (м)
CH_4	%	59	89			1,9	3,7	2,1	4,35
CO_2	%	40	9,8						
H_2O	%	0,6	0,6						
O_2	%	–	0,2						
N_2	%	–	0,4						
H_2S	p.p.m.	4 000	300						

Абсолютное давление 20 бар		Биогаз		Вода (25°C)	Воздух для «стрипажа»	Размеры			
		Вход	Выход			Абсорбер		«Стриппер»	
Расход, $м^3$ (н) · $ч^{-1}$		75	60	70	400	Ø (м)	h (м)	Ø (м)	h (м)
CH_4	%	62,5	73,94			0,75	3,1	0,9	5,5
CO_2	%	34	21,40						
H_2O	%	3,35	3,35						
O_2	%	–	0,4						
N_2	%	–	0,9						
H_2S	p.p.m.	1 500	100						

Отмывка биогаза водой. Результаты и основные характеристики в функции давления (пример).

2.6.3.6. Список литературы

— La fermentation methanique des fumiers et lisiers. Rapport A.T.G., Paris (1984).

— La fermenntation methanique des ordures menageres, des boues des sites d'epuration et des dechets agro-alimentaires. Rapport A.T.G., Paris (1985).

— Le transport du biogaz. Rapport A.T.G., Paris (1985).

— L'epuration du biogaz. Rapport A.T.G., Paris (1986).

— L'utilisation du biggaz. Rapport A.T.G., Paris (1987).

— C. Mouton et J.-P. Lasneret. -La production et la recuperation du methane dans les decharges d'ordures menageres. 98e Congres du gaz A.T.G., Paris (1981).

— M. Heduit, J.-P. Lasneret, J.-P. Perret, V. Daillenccq et J.C. Sourie. – Le biogaz. 101e Congres du gaz, A.T.G., Paris (1984).

— E. Jungmann. – Par l'entremise du gaz de ville, l'utilisatiion du biogaz recupere a Santiago du Chili est totale. 102e Congres du gaz, A.T.G. (1985).

— R. Scriban et coll. – Biotechnologie. Ed. Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 3e edition (1988).

— MM. A. Demeyer, F. Jacob, M. Jay, G. Menguy et J. Perrier. – La conversion bioenergetique du rayonnement solaire et les biotechnologies. Ed. Techniques et Documentation Lavoisier. Paris (1981).

— F. Edeline. – L'epuration biologique des eaux residuaires. Ed. C.E.B.e.D.O.C., Techniques et Documentation, Paris (1980).

— Weill et coll. – Biochimie generale. Expose universsitaire de la biochimie generale, niveau 1er et 2e cycle. Masson, Paris, 3e edition (1974).

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1.1. Роль подземных хранилищ

Как для всех продуктов, потребление которых зависит в большой степени от климата, необходимо, чтобы распределители природного газа или сжиженного нефтяного газа располагали значительными хранилищами, позволяющими противостоять случайности потребления.

Однако необходимо различать случаи природного газа и С.Н.Г. Если для последнего проблемы предельного потребления и неравномерности потребления разрешимы большей частью наличием баллонов и резервуаров у потребителей, то для природного газа это неприемлемо.

Для последнего внутрисуточная неравномерность между "часами пиковой нагрузки и часами провала" не создает особых проблем, так как газ, находящийся в трубопроводах, играет роль буферного запаса, установленная часовая пиковая нагрузка для крупной транспортной сети составляет только порядка двадцать третью часть от дневного потребления.

Зато другое регулирование неравномерностей потребления делает неизбежным применение различных способов для приведения в соответствие ресурсов и потребностей. Эти способы следующие:

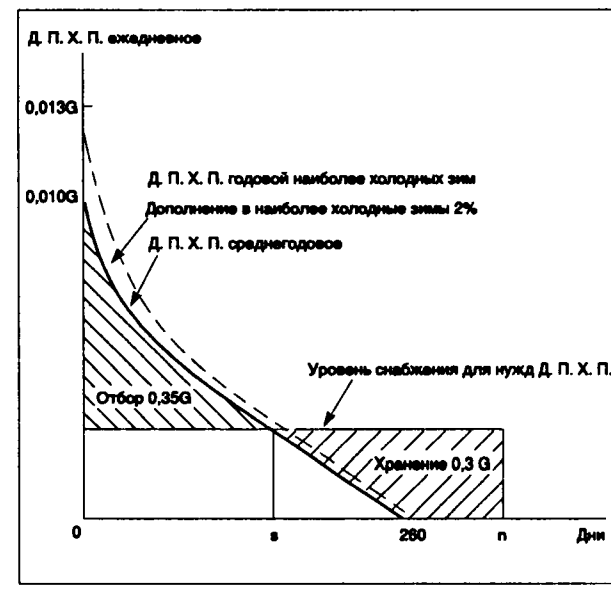
— хранение сжиженного природного газа (С.П.Г.), который можно легко испарить в больших количествах во время пиковых нагрузок;

— "стирание" некоторых поставок промышленным потребителям или наоборот дополнительные поставки потребителям, которые "очень нравятся";

— подземное хранение газа: эта технология позволяет обеспечить:

· покрытие пиков потребления: так 4 - 5 января 1987 г., день самый напряженный зимы 1986 - 1987 г., нагрузка на подземные хранилища "Gaz de France" достигла 91,4 гм^3 (н), составив почти 54% от общих нагрузок;

сезонную неравномерность, т.е. позволяет при почти постоянном в течение года потреблении реализовать более значительное потребление газа зимой, потому что во Франции более 30% количества продаваемого ежегодно газа идет для отопления. Обычно различают нагрузки, меняющиеся в зависимости от температуры, или "нагрузки отопления"; или еще "дополнительное" потребление в холодный период (Д.П.Х.П.)", нагрузки независимые от температуры, названные "исключая дополнительное потребление в холодный период



Классифицированные нагрузки Д.П.Х.П.
G – Д.П.Х.П. среднегодовое;
n – длительность снабжения газом для отопления, предполагаемая регулярной (340 - 350 дней).

(И.Д.П.Х.П.)", соответствующие в основном промышленным потреблениям;

- количество газа, извлекаемое из подземных хранилищ, эксплуатируемых "Gaz de France", в течение отопительного периода зимой 1985 - 1986 достигло 5000 гм^3 (н), составляет приблизительно 15% от годового национального потребления;
- создание резервов безопасности, предназначенных восполнить случайные частичные нарушения снабжения: "технические" резервы (опоздание метановозов из-за шторма или технических происшествий), стратегические резервы (частичные нарушения снабжения по политическим или экономическим причинам).

Соответствующий расчет и продуманное управление подземными хранилищами позволяют обеспечить одновременно потребность неравно-мерности нагрузки в зависимости от климати-ческих условий, таким образом, широко открывая природному газу рынок отопления, и позволяют сглаживать последствия временного дефицита ресурсов.

Потребности хранения обычно выражаются в количестве полезного газа (см. § 3.2.3.5.: "Дыхание") в желаемой географической зоне, вблизи районов значительного потребления газа и транспортных магистралей в пиковом расходе.

3.1.2. Различные типы подземных хранилищ газа

	Приемная среда для газа	Создание хранилища	Способ эксплуатации	Преимущество	Недостатки	Использование и доля на рынке сбыта
Истощенные месторождения углеводородов	Геологические формации пористые и проницаемые, первоначально насыщенные углеводородами и водой (месторождения), или водой (водоносный горизонт)	Сжатие и вытеснение газом флюида (ов), первоначально находившихся в пласте	Сжатие и расширение газа в сочетании с эффектом сжимаемости и подвижности воды и углеводородов	Значительная вместимость. Возмещение инвестиций (разведка, скважины и т. д.) и существующих сооружений (газосборные сети и т.д.)	Проблемы герметичности скважин, особенно для нефтяных месторождений. Петрофизические характеристики часто посредственные. Приток воды и/или углеводородов при отборе. Образование сероводорода. Газ неизвлекаемый, полностью потерянный	Сезонная неравномерность. Стратегические резервы (надежность). Мир: 70%. Франция: 0%.
Водоносные горизонты	То же	То же	То же	Значительная вместимость	Издержки и непредвиденные случаи эксплуатации	Сезонная неравномерность. Стратегические резервы (надежность). Мир: 25%. Франция: 94%
Соляные полости	Соляные отложения (мощные пласты или купола), в которых полости сделаны промывкой водой	Извлечение рассола вытеснением газом или насосом	Сжатие и расширение, или замещение рассолом (редко)	Высокий процент отбора (отношение расход/запасы)	Затруднения нахождения естественного сброса (море) или потребителя (промышленного) рассола. Уменьшение объема полости из-за текучести. Случайные вещества	Неравномерность суточная, недельная или сезонная. Техника безопасности. Мир: 2%. Франция: 6%
Заброшенные шахты, галереи или горные выработки	Пустоты (галереи, камеры), образованные разработкой месторождений	После заполнения извлечение воды с помощью вытеснения газом или насосом	Сжатие и расширение, или замещение водой	Высокий процент отбора (отношение расхода/активный объем)	Трудно осуществить герметичность ствола скважин	Неравномерность суточная, недельная или сезонная. Техника безопасности. Мир: ε. Франция: 0

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ

3.2. ХРАНЕНИЕ В ВОДОНОСНОМ ПЛАСТЕ

3.2.1. Основы хранения в водоносном пласте. Геологические данные. Эксплуатация

Создание хранилища базируется на использовании природной способности приема микроскопическими пустотами, существующими в естественном состоянии в подземных пористых и проницаемых отложениях (пласт-резервуар, пласт-коллектор). Эти пустоты или поры заполнены пластовой водой, пресной или минерализованной. Создание хранилища состоит в частичном вытеснении газом воды из верхней зоны ловушки на периферию. Необходимо, чтобы в одном и том же месте имели место следующие геологические факторы:

— структура в виде свода, имеющая непроницаемый экран, достаточный, чтобы гарантировать необходимую емкость хранения;

— пласт породы, обладающей достаточными пористостью и проницаемостью, чтобы обеспечить желаемые емкость и продуктивность;

— комплекс непроницаемых пород – покрышку, перекрывающий непосредственно этот резервуар, чтобы исключить вертикальную миграцию газа.

Создание подземного хранилища в водоносном пласте не сопровождается никакой подземной горной проходкой, в противоположность другим способам (каверны или галереи). Речь идет о создании искусственного месторождения газа.

Разведка подземной структуры относится к геологии, которая объединяет различные отрасли знаний (минералогию, петрографию, геохимию, геодинамику, литологию, стратиграфию, палеонтологию, тектонику), которые подкрепляют друг друга и иногда взаимно переплетаются.

3.2.1.1. Геология и хранение в водоносном пласте

Формации, благоприятные для реализации хранения в водоносном пласте, ограничиваются осадочными породами.

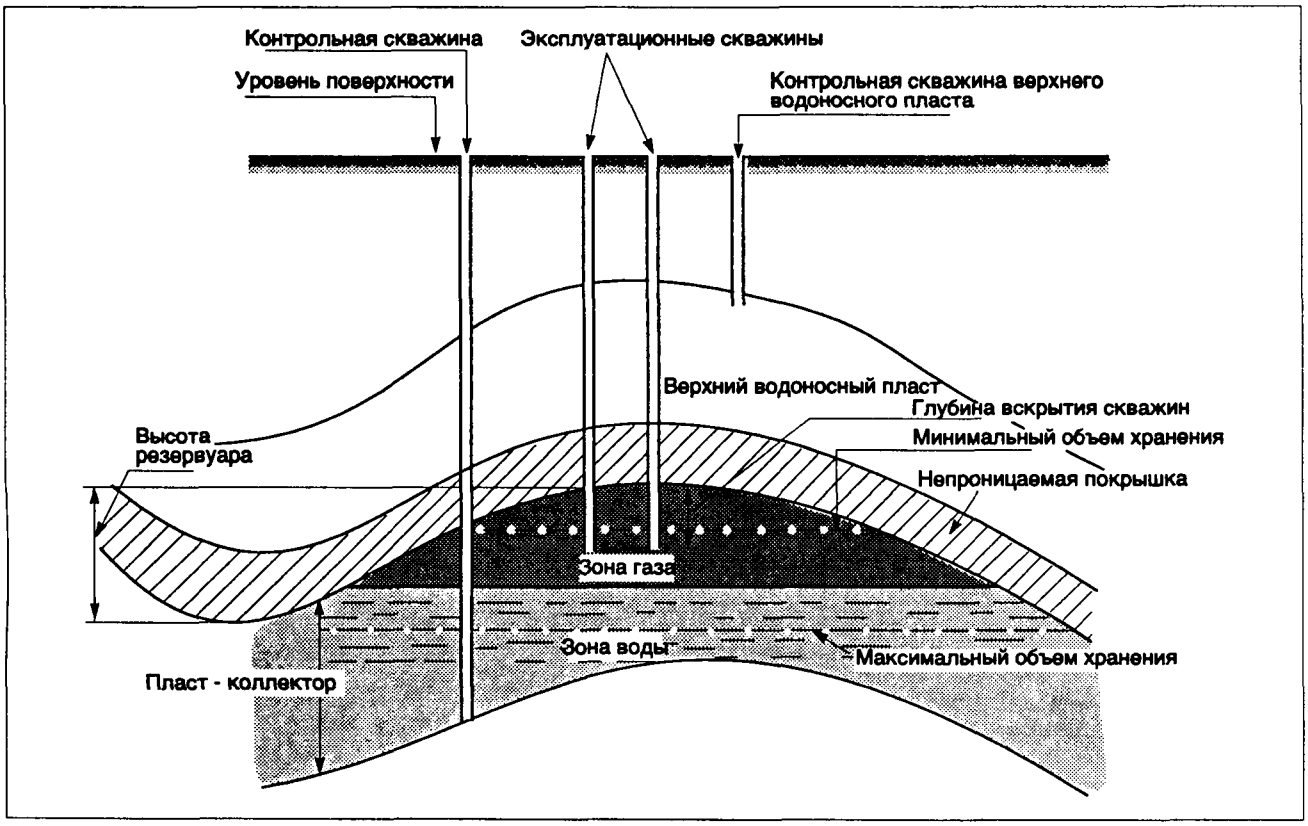
3.2.1.1.1. Петрография

Непроницаемая покрышка водоносных пластов: глины или мергели.

Отложения коллекторов:

— пески;

— чистые песчаники, состоящие из зерен песка (кварц-кремний), связанных друг с другом кварцевым цементом (цемент связывает зерна одни с другими, но не заполняет пространство между зерен); коллекторские отложения из чистых песчаников достаточно редки: чистые песчаники часто перемежаются с "грязными" песчаниками (глинистые или известковые) и глинистыми пропластками;



Принципиальная схема подземного хранилища в водоносном пласте

— известняково-доломитово-меловые (карбонатный коллектор); карбонатные отложения менее исследованы, чем песчанистые коллекторы, так как они часто имеют значительные горизонтальные изменения и трудно предвидимые фации (петрофизические характеристики), особенно проницаемость, кроме того размеры пор у них очень изменчивые, приводящие к защемлению (неизвлекаемый газ) иногда значительного количества газа.

3.2.1.1.2. Стратиграфия

Это учение о земных пластах, их ваимном расположении, их возрасте.

Коллекторские отложения французских и американских подземных хранилищ	Перечень стратиграфических ярусов			
	Четвертичный			Третичная
	Калабрийский	2 Млет	Плиоцен	
	Астийский			
	Плезанский			
	Понтический	7 Млет		
	Тортонский		Миоцен	
	Гельветский			
	Бурдигалийский			
	Аквитанский	25 Млет		
	Стампийский		Олигоцен	
	Саннуазский			
	Лудский			
	Бартонский	35 Млет		
	Лютетский			
Изот Люссанет	Ипрский		Эоцен	
	Танетский			
	Монтский			
	Датский	70 Млет		
	Сенонский			
	Туронский			
	Сеноманский			
	Альбский			
	Алтский		Мел	
	Барремский			
Жермигни Бейн-верхний	Вельдский			
	Готеривский			
	Валанжинский			
	Берриасский			
	Портландский	140 Млет		
	Кимериджский			Мезозой
Сант-Иллиег Бейн глубокий Гурней	Секванский			
	Лузитанский			
Сент-Клер	Роракский			
	Оксфордский			
	Келловейский			
	Батский		Юра	
	Байосский			
	Ааленский			
	Тоарский			
	Чармутский	Лиас		
	Лотарингский			
	Синемюрский			
	Геттангский			
Шемери	Рэтский			
	Кейпер	170 Млет	Триас	
	Мунилькальк			
Велен	Пестрый песчаник	225 Млет	Пермь	
	Саксонский			
	Отюнен	280 Млет	Карбон	
	Стефанский			
	Вестфальский			
	Динантский	350 Млет		
	Фаменский			
	Франский		Девон	
	Живетский			
	Эйфельский			
	Кобленцский			Палеозой
	Жединский			
	Готландский	400 Млет	Силур	
	Ордовик			
	Потсдамский	490 Млет		
	Акадийский		Кембрий	
	Георгийский	580 Млет		
Американское хранилище в Иллинойсе		Докембрий		

Перечень подземных горизонтов, используемых во Франции и США.

3.2.1.1.3. Тектоника: структурная геология

Слои осадочных пород, которые отлагались за небольшим исключением горизонтально, были, вследствие колебательных движений земной коры преобразованы в структуры, которые, в слабо нарушенных зонах осадконакоплений, образовали складки; складка представляется волнообразной поверхностью, включающей антиклинали и синклинали (см. рисунок ниже).

Почти вся совокупность разведанных для подземного хранения структур представляет собой антиклинали.

Высота – вертикальное расстояние между кровлей резервуара в "макушке" (вершине) антиклинали и первой точкой возможной утечки газа: синклиналь или негерметичное нарушение (см. рисунок ниже).

Нарушения – это разломы горных отложений, приводящие к относительному перемещению одной части поверхности излома относительно другой.

Несколько определений:

— *абсолютная отметка и глубина*: абсолютные отметки обычно определяются по отношению к уровню моря; глубины – по отношению к поверхности земли;

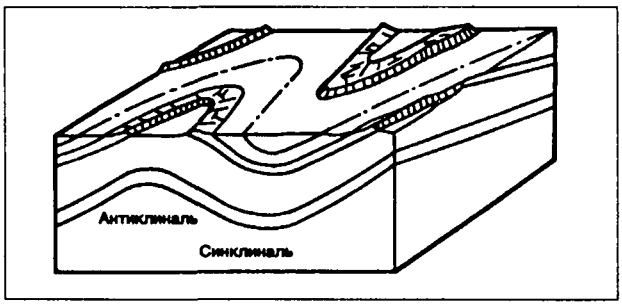
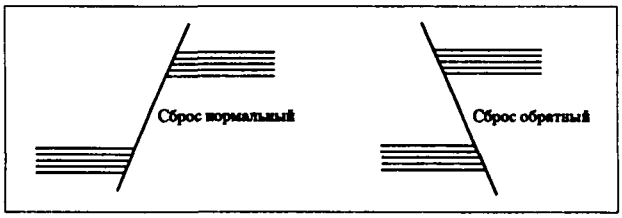
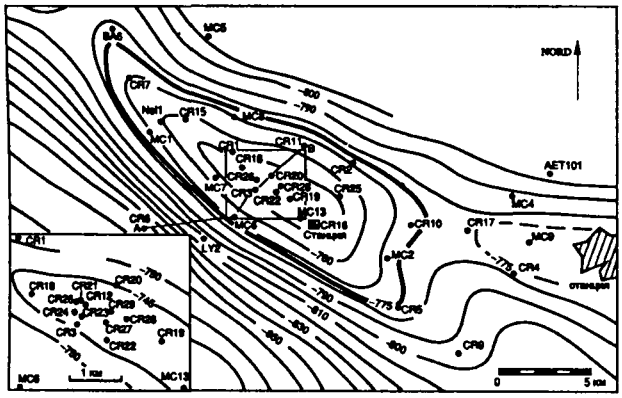


Схема складки



Виды встречающихся сбросов



Подземное хранилище Жермина-су-Куломб: изобаты по кровле вельдского яруса

— *кровля пласта*: граничная поверхность между продуктивным пластом и вышележащим пластом;
— *подошва пласта*: граничная поверхность между продуктивным пластом и нижележащим пластом;
— *изобаты*: линии, соединяющие точки с одинаковыми абсолютными отметками (– м/уровень моря) кровли или подошвы пласта;
— *изопахиты*: линии одинаковой толщины пласта или газоносной его части.

3.2.1.2. Разведка структур, пригодных для хранения в водоносном пласте (методология)

— Изучение документов (поисков нефтяных месторождений и рудников, диссертаций, других работ).
— Подготовка программы изыскания и исследований, чтобы получить "картину" недр, каждый этап позволяет уточнить и пополнить предшествующие знания.
— Сейсморазведка методом отраженных волн.
— Разведочное бурение, чтобы сопоставить с сейсмикой и иметь первоначальные данные по резервуару:
  · геофизические методы исследования скважин;
  · исследования извлечением воды;
  · отбор керна.
— Новое бурение.

На каждом этапе делается обобщение и анализ собранных данных, чтобы сделать оценки все более и более точных параметров хранилищ или прекращения его разведки.

Мощные математические методы позволяют автоматически осуществить обобщение данных и построить наиболее вероятные карты изобат, изопахит, одинаковых петрофизических характеристик и т.д. Их использование и особенно анализ приводят к углублению геологических знаний и непрерывному пересмотру необходимых данных по мере развития разведочных работ.

Геологическое изучение хранилища не заканчивается закачкой газа, а может быть продолжено дополнительными научными исследованиями при расширении газонасыщенной зоны в процессе эксплуатации. Анализ результатов исследований некоторых скважин, пробуренных для эксплуатации, может также привести к углублению или поставить под угрозу представление о геологической структуре.

3.2.2. Физические механизмы течения в пористых средах

Породы, которые образуют водоносный горизонт, состоят из твердых, более или менее сцементированных частиц, между которыми существуют связанные между собой пространства, что позволяет циркулировать воде и газу: говорят, что порода пористая и проницаемая.

Эти два свойства недостаточны, чтобы характеризовать пласт, и необходимо также знать капиллярные свойства, которые зависят не только от породы, но и от свойств флюидов, которые на-

ходятся в пласте и от истории их взаимного перемещения в породе.

Чтобы предвидеть механизм вытеснения воды и газа в пористой среде, необходимо характеризовать породу с трех точек зрения:

— пористость;
— проницаемость (абсолютная и относительная для различных возможных насыщенностей);
— капиллярные давления.

Изучение свойств пород обеспечивается благодаря бурению, которое позволяет отбирать образцы (керны) и проводить некоторые замеры в скважине (каротаж).

Здесь речь идет об изучении, ограниченном скважиной (или непосредственно прискважинной зоны в случае каротажа). Специальные исследования, продолжительные испытания, исследования интерференции скважин позволяют получить обширную информацию о зоне вокруг скважины или в пространстве между двумя скважинами.

3.2.2.1. "Гидравлические" свойства пород: пористость, проницаемость и сжимаемость

3.2.2.1.1. Пористость

Полная пористость =

$$= \frac{\text{Полный объем пустот (или пор)}}{\text{Полный объем породы}} = \Phi_п.$$

Пористость "открытая", или "полезная" =

$$= \frac{\text{Полный объем пустот (или пор), связанных между собой}}{\text{Полный объем породы}} = \Phi.$$

Пористость "закрытая", или "не полезная" =

$$= \frac{\text{Полный объем пустот (или пор) изолированных}}{\text{Полный объем породы}} =$$

$$= \Phi_п - \Phi.$$

Эти макроскопические определения имеют значение только при рассмотрении достаточного объема породы (как минимум несколько кубических сантиметров).

Породы	Порядок величин средней пористости (%)		
	$\Phi_п$	Φ	$\Phi_п - \Phi$
Граниты-базальты	0 - 1	0 - 1	0 - 1
Пемза	87	0	87
Соль (галит)	0 - 1	0 - 1	0 - 1
Глины-мергели	30 - 50	0	30 - 50
Известняки-мел	0 - 50	0 - 50	слабая
Чистый песчаник	3 - 30	3 - 30	слабая
Пески	20 - 40	20 - 40	0

Полезная пористость (Φ), соответствующая объему пустот, способных служить приемной средой для флюидов, является вместе с прочицаемостью главной характеристикой пласта-резервуара, предназначенного для хранения газа. Её величина должна быть достаточной (10 - 30%).

Примечание:

Даже с очень низкими пористостью и проницаемостью (см. § 3.2.2.1.2.) некоторые трещиноватые породы могут быть пригодны для хранилищ.

3.2.2.1.2. Проницаемость характерная или абсолютная

Проницаемость – это характерное свойство материалов и пород для подземных хранилищ допускать движение флюидов; схематично она характеризует, таким образом, вид материала, поры которого связаны между собой. Хотя проницаемость и полезная пористость есть два различных параметра, порода, обладающая хорошей полезной пористостью, имеет, как правило, и хорошую проницаемость.

Закон Дарси.

При небольших скоростях течения скорость фильтрации флюида в пористой среде пропорциональна приложенному градиенту давления

$$\vec{u} = -\frac{\overline{\overline{k}}}{\mu}(\overrightarrow{\text{grad}}\, p - \rho\vec{g})$$

$\vec{u}$ – скорость фильтрации (м · с$^{-1}$);
μ – динамическая вязкость флюида (Па · с);
ρ – плотность флюида (кг · м$^{-3}$);
$\vec{g}$ – ускорение силы тяжести (м · с$^{-2}$);
$\overrightarrow{\text{grad}}\, p$ – градиент давления (Па · м$^{-1}$);
$\overrightarrow{\text{grad}}\, p - \rho\vec{g}$ – градиент потенциала (Па · м$^{-1}$);
$\overline{\overline{k}}$ – тензор абсолютной проницаемости (м^2).

При этом:
— нет химической реакции между флюидом и породой;
— присутствует только один флюид.

Проницаемость относится к понятию, имеющему статистический характер, который необходимо всегда рассматривать связанным с элементом поверхности, размеры которой значительно больше поперечного сечения каналов, связывающих поры между собой, и размеров пор.

В системе СИ единица проницаемости есть квадратный метр, но обычно используется единица Дарси (Д): проницаемость такой пористой среды, которая в секунду пропускает 1 см^3 флюида, динамическая вязкость которого 1 сП, под действием градиента давления 1013 мбар на сан-тиметр, через площадь 1 см^2

$$1\ Д = 0{,}9869 \cdot 10^{-12}\ м^2.$$

1 Дарси соответствует высокой проницаемости, поэтому чаще используют миллидарси (1 мД = $= 10^{-3}$ Д = 0,9869 · 10^{-15} м^2).

Абсолютная проницаемость зависит от многочисленных факторов (природы, горной породы, глинистости, микротрещиноватости и т.д.); дадим для сведения порядок величин:
— глины и мергели: 0 - 1 мД;
— соль (галит): 10^{-5} - 10^{-2} мД;
— известняки: 0 - 2 000 мД
(несколько мД в известняковых коллекторах на большой глубине – газовые месторождения у подножия Пиринеев – до нескольких тысяч мД в доломитовых коллекторах – Парантис – или меловых, Экофиск);
— алеврит, чистый очень мелкозернистый песчаник; песчаник чистый, не очень мелкозернистый: 5 - 100 мД (рэтские отложения, бассейн Парижа);
— песчаник средний, достаточно чистый, конгломераты: 100 - 1500 мД (Кейпер, бассейн Парижа);
— песок, крупнозернистый чистый песчаник: 500 - 15000 мД (Люссанет–Изот).

Абсолютная проницаемость коллекторов, используемых для подземных хранилищ газа, порядка 300 - 5000 мД.

Если два флюида одновременно присутствуют в пористой среде (двухфазное течение), можно применять закон Дарси для каждого из двух флюидов при условии замены абсолютной проницаемости эффективной проницаемостью, которая зависит от распределения этих двух флюидов в пласте, и принятия градиента потенциала для рассматриваемой фазы флюида.

Относительная проницаемость (K_o) для одного флюида в присутствии другого, это отношение эффективной проницаемости (для данного флюида) к абсолютной проницаемости.

3.2.2.1.3. Сжимаемость

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial P},$$

ρ – плотность (кг · м$^{-3}$);
P – давление (Па);
β – коэффициент сжимаемости при постоянной температуре (Па$^{-1}$).

3.2.2.1.3.1. Сжимаемость пород

Различают сжимаемость образца (β_0), полученную с помощью экспериментальных исследований, в котором в зависимости от эквивалентного давления определяется изменение среднего напряжения, и сжимаемость матрицы ($\beta_м$), соответствующую материалу породы без учета пустот и пор.

Порядок величин:

$$\beta_0 = 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-4} \text{ бар}^{-1};$$

$$\beta_м = 10^{-6} - 10^{-5} \text{ бар}^{-1}$$

3.2.2.1.3.2. Сжимаемость флюидов ($\beta_ф$)

Вода пресная: $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ бар$^{-1}$.

Рассол насыщенный NaCl: $2{,}8 \cdot 10^{-5}$ бар$^{-1}$.

Природный газ: для идеального газа $\beta_г = P^{-1}$, для $P = 100$ бар: $\beta_г = 10^{-2}$ бар$^{-1}$.

3.2.2.1.3.3. Кажущаяся сжимаемость

Изучение фильтрации флюида в пористой среде приводит к рассмотрению фильтрации флюида с кажущейся фиктивной сжимаемостью ($\beta_к$) в недеформируемой среде

$$\beta_к = \beta_ф + \frac{\beta_0}{\Phi} - \beta_м \frac{1+\Phi}{\Phi} \simeq \beta_ф + \frac{\beta_0}{\Phi}.$$

3.2.2.2. Влияние одновременного присутствия двух флюидов (вода и газ) в пористой среде (насыщенность, капиллярное давление, гистерезис)

3.2.2.2.1. Насыщенность

Насыщенность пористой среды флюидом - это отношение объема этого флюида к объему содержащих их пор.

Насыщенность газом: $S_г$.

Насыщенность водой: $S_в$.

$$S_г + S_в = 1.$$

3.2.2.2.2. Капиллярное давление

Вследствие малости размеров пор и каналов, которые их соединяют, капиллярные явления и связанные с ними понятия поверхностного натяжения и смачиваемости играют большую роль в распределении флюидов внутри порового массива. В самом деле, при внедрении газа в поровый канал для преодоления действия поверхностного натяжения на поверхности раздела газ–вода необходимо, чтобы газ имел давление выше, чем вода. Избыточное давление, соответствующее величине, названной капиллярным давлением, зависит от радиуса рассматриваемого порового канала и обратно пропорционально ему. Капиллярное давление достигает нескольких десятков миллибар для пор, имеющих радиус порядка десятой доли миллиметра; оно превышает 100 бар для капилляров незначительных размеров (порядка 0,01 мкм), в глинистых покрышках поровых резервуаров. Необходимо отметить, что это действие капиллярных сил обеспечивает герметичность покрышек, которые в строгом смысле никогда не могут быть полностью непроницаемыми. Однако при больших площадях (несколько десятков квадратных километров) покрышек и значительном избыточном давлении заметная фильтрация флюида возможна.

Принимают, что капиллярное давление $P_к$ для системы вода–воздух (очень близкое к сочетанию вода–природный газ) определяется по "мнемотехническому" соотношению:

$$P_к \text{ (в бар)} = \frac{1{,}46}{\text{радиус канала (выраженный в мкм)}}.$$

На практике капиллярное давление для условий создания хранилища – это перепад давления между газовой фазой и водяной фазой; это понятие локальное, макроскопическое и статистическое, так как оно включает всю сложность распределения пор и поровых каналов пористой среды.

3.2.2.2.3. Гистерезис гидравлических свойств

Капиллярное давление и водо- (или газо-) насыщенность связаны соотношением, которое не однозначно, так как элементарный объем пористой среды может для одной и той же насыщенности быть пропитан по-разному: это явление гистерезиса капиллярых давлений (см. рисунок на стр. 388).

Несколько определений:

— *первое дренирование*: процесс, во время которого несмачивающий флюид (газ) заполняет пористую среду, насыщенную первоначально смачивающим флюидом (водой);
— *дренирование*: процесс, во время которого насыщенность несмачиваемым флюидом увеличивается;
— *пропитывание (впитывание)*: процесс, во время которого насыщенность смачивающим флюидом увеличивается (обратный дренированию);
— *давление вытеснения*: самое низкое избыточное давление, выше которого возможно внедрение газа в образец пористой среды, первоначально насыщенного водой (лабораторное);
— *пороговое давление*: самое низкое избыточное давление (выше давления вытеснения), позволяющее газу пройти через образец (лабораторное);
— остаточная вода: вода не может быть полностью вытеснена газом, она соответствует от-

носительно небольшой (10 - 20%) водонасыщенности в породах с хорошей проницаемостью; она может достичь 60% в породах с низкой проницаемостью;

— защемленный газ: к концу пропитки остаточная газонасыщенность остается порядка 15 - 30% в зависимости от горной породы; этот газ, "попавший в ловушку" или остаточный, представляет довольно значительную часть (30 - 60%) буферного газа в подземном хранилище.

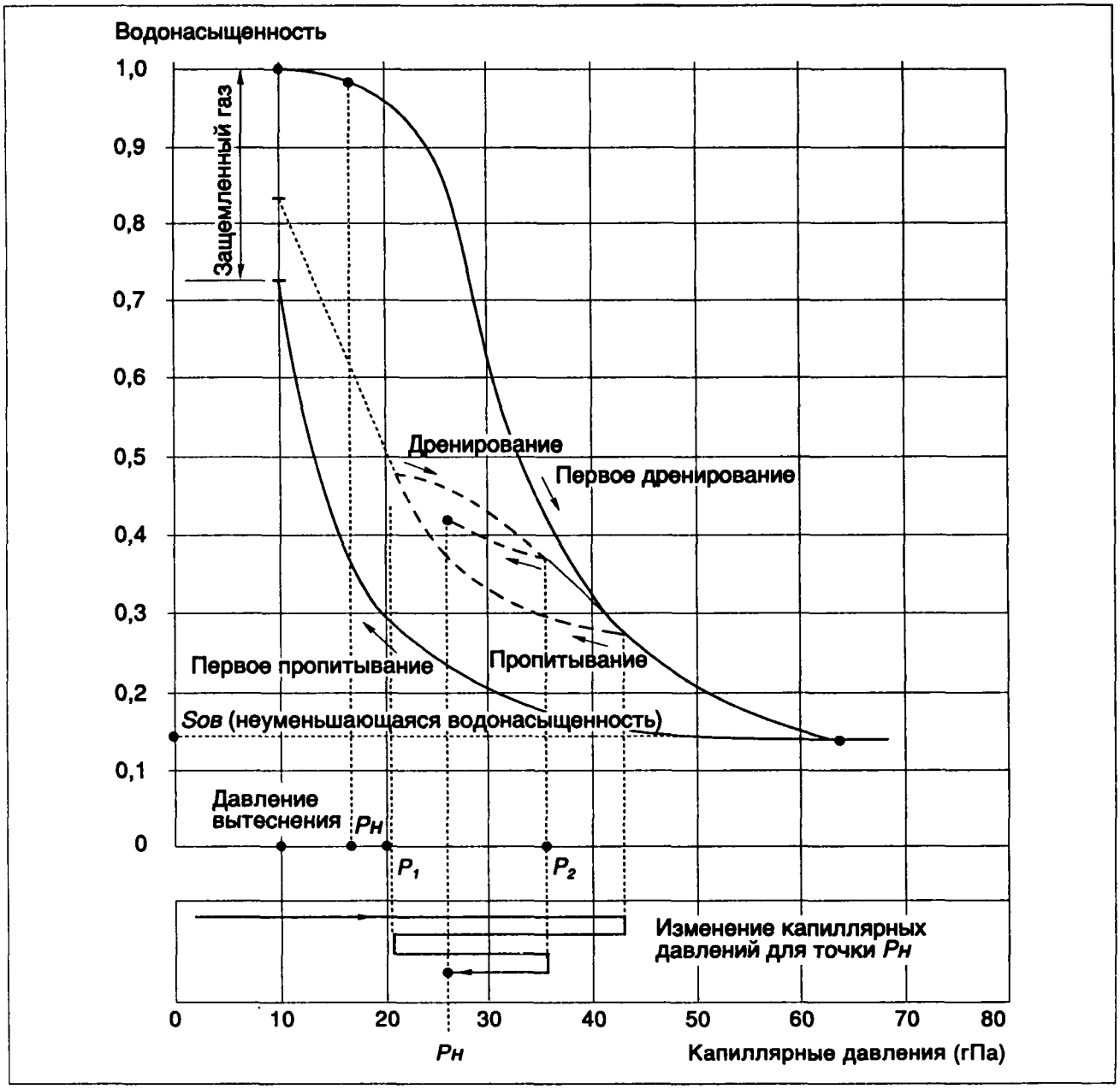
Примечание:

Относительные проницаемости для газа и для воды зависят от насыщенности. Так же как и для капиллярного давления, существует гистерезис относительных проницаемостей.

3.2.3. Поведение водоносного горизонта, используемого для хранения газа; технический расчет хранилища газа в водоносном горизонте

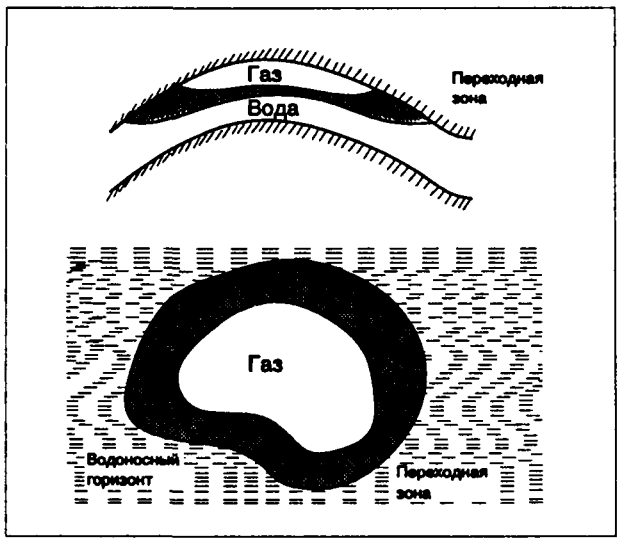
Большинство исследований, связанных с созданием и эксплуатацией хранилищ газа в водоносном пласте, используют знание физических механизмов течения флюидов в пористой среде:

— первоначальная оценка геолого-физических данных;



Изменение зависимости "капиллярное давление–насыщенность" с изменением капиллярных давлений

— определение и расчет основного оборудования;
— предварительное изучение состояния и изменения параметров пластового резервуара в процессе эксплуатации;
— изучение коллектора переводом (например, с газа "Н" на газ "В", и наоборот);
— изучение закачки инертного газа (например азота) в качестве части буферного газа (см. § 3.2.6.);
— выбор и технический расчет дополнительного оборудования в процессе эксплуатации;
— во время разведки перед закачкой газа: гидродинамические исследования скважин (см. § 3.7.1. Оценка водоносного коллектора с помощью гидродинамических исследований; исследования интерференции скважин):
  · цель: определение средних значений; опробывание и испытание скважины или прискважинной зоны; исследования интерференции двух или нескольких скважин, гидродинамические характеристики пласта, в основном, проницаемость и пористость);
  · техника: наблюдение изменения давления в одной или нескольких скважинах, вызванного фонтанной или насосной добычей воды из водоносного пласта одной или несколькими скважинами;
  · тип течения: однофазное;
  · интерпретация: обратная модель или "развертывание";
— во время закачки газа и эксплуатации изучение фильтрации позволяет рассчитать пространственно-временное распределение давления и насыщенности и, тем самым, определить рабочие характеристики и границы хранилища.



Виды течения в подземном хранилище в водоносном горизонте

Примечание:

Схематично течение будет (см. рисунок выше):

— однофазное – воды в периферийной зоне;
— двухфазное – воды и газа в промежуточной зоне, называемой переходной зоной или капиллярном поясом;
— однофазное – газа в центральной зоне (остаточная вода, защемленная при минимальной насыщенности).

Расчеты фильтрации в пористой среде сложны и требуют мощных средств: сеточная модель – малые разности или малые элементы – требует крупных вычислительных машин. Посредством некоторых допущений, использование упрощенных моделей или даже аналитических решений позволяет упростить проблему и качественно оценить отдельные процессы или порядок величин, таких как:

— среднее давление в газовом пузыре (упрощенные модели прогнозирования давления);
— скорость перемещения контура газ–вода;
— давление при первой закачке и т.д.

3.2.3.1. Основные уравнения двухфазного изотермического течения в пористой среде

3.2.3.1.1. Несмешивающиеся течения

Для каждого из двух флюидов (вода и газ) располагают двумя следующими уравнениями:

— скалярное уравнение неразрывности (см. § 3.2.2.1.2.):

$$\mathrm{div}(\rho\vec{u}) + \frac{\partial(\rho S\Phi)}{\partial t} - q = 0,$$

q – термин "источник" – массовый расход (для одной скважины), отнесенный к единице объема пористой среды;

— закон Дарси (векторное уравнение):

$$\vec{u} = -k_0\frac{\bar{k}}{\mu}(\overrightarrow{\mathrm{grad}}\, p - \rho\vec{g})$$

или для каждого флюида четыре скалярных уравнения для пяти неизвестных: p, S, U_x, U_y, U_z (ρ и μ – функции p; k_0 - функция S).

В общей сложности, для двух флюидов (вода и газ), располагают восьмью скалярными уравнениями с десятью неизвестными.

Два дополнительных уравнения связи:

— капиллярное давление: $P_к = P_в - P_г$;
— насыщенности: $S_в + S_г = 1$.

Примечание:

При однофазном течении, S = 1; неизвестные: p, U_x, U_y, U_z – четыре, как и число скалярных уравнений (неразрывности и закон Дарси).

3.2.3.1.2. Смешивающиеся течения

Газовая фаза содержит как минимум два газа.

Уравнение неразрывности (сохранения массы) для каждого компонента газа (индекс "i"):

$$\mathrm{div}(\rho C_i\vec{u} - \rho D\overrightarrow{\mathrm{grad}}\, C_i) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho S\Phi C_i) - q_i = 0,$$

C_i – концентрация i-го "компонента";

q_i – термин "источник": массовый расход компонента "i", отнесенный (для одной скважины) к единице объема,

$D = D + \alpha\vec{u}$,

α – тензор дисперсности,

или для n составляющих смешиваемого газа, n + четыре скалярных уравнения:

— n – скалярных уравнений неразрывности;

— три скалярных уравнения (закон Дарси для газовой фазы (см. § 3.2.3.1.1));

— одно уравнение, связывающее концентрации:

$$\sum_{i=1}^{n} C_i = 1$$

для n + пяти неизвестных: (C_i, $i \in [1, n]$, p, S, U_x, U_y, U_z).

Для водной фазы (см. § 3.2.3.1.1) в общей сложности располагают n + восмью уравнениями для n + десяти неизвестных.

Выражение для капиллярного давления и отношение, связывающее насыщенности газом и водой, образуют два дополнительных уравнения.

3.2.3.2. Максимальное давление

Давление в газовом пузыре, если оно слишком высокое, приводит к утечке в вышележащие горизонты или вдоль крепления ствола скважины, или через покрышку. Максимальное значение, определенное экспериментально, более высокое в коллекторах с толстыми покрышками, образованными пластичными глинистыми породами, чем в коллекторах с покрышками небольшой толщины из хрупких пород. Оно соответствует давлению столба высотой, равной высоте вершины ловушки, заполненного жидкостью плотностью от 1,3 до 1,46; эта фиктивная плотность часто в нефтяной промышленности называется "градиентом".

3.2.3.3. Максимальный темп закачки при первом заполнении

Темп закачки газа может быть ограничен одним из двух следующих феноменов.

3.2.3.3.1. Критическая скорость

Подвижность газа ($k_{0г}\frac{k}{\mu_г}$) гораздо выше подвижности воды, газ имеет тенденцию "уходить" вдоль кровли пласта. Таким образом в мало структурированных ловушках с плохой проницаемостью газ рискует достичь высоты ловушки раньше, чем будет достигнут максимальный, теоретически определенный, объем хранения (см. § 3.2.3.4).

Порядок величины критической скорости перемещения контакта газ–вода может быть получен по формуле Диетца:

$$V_к = \frac{k_{0в} \cdot k \cdot \rho_в \cdot g \cdot \sin\alpha}{\mu_в},$$

$k_{ов}$ – относительная проницаемость для воды;

α – падение кровли коллектора (угол, образованный кровлей с горизонталью).

3.2.3.3.2. Предельное давление

Заполнение хранилища сопровождается, даже если оно слабо структурировано, избыточным давлением, которое тем выше, чем выше расход нагнетаемого газа.

Порядок величины этого избыточного давления может быть посчитан с помощью соотношения Колонна–Чарного:

$$\Delta p = \frac{\mu_в q}{4\pi h k_в} e^{\frac{q}{4\pi h k_в \Phi\sigma}} E_i\left(-\frac{q}{4\pi h k_в \Phi\sigma}\right),$$

h – толщина коллектора (м);

$k_в = k_{ов}\frac{k}{\Phi\mu_в\beta_к}$ – коэффициент пьезопроводности ($м^2 \cdot с^{-1}$);

q – расход нагнетаемого газа (в условиях забоя);

σ – коэффициент эффективности вытеснения воды газом (меньше 1);

$\beta_к$ – определена в § 3.2.2.1.3.3;

$E_i(-x) = \int_x^{\infty} u^{-1} \cdot e^{-u} \cdot du$ (интегральная показательная функция).

Это соотношение позволяет оценить максимально допустимый расход нагнетания, определяемый максимальным избыточным давлением:

Δp_{max} + начальное пластовое давление = p_{max}.

Этот максимальный дебит тем меньше, чем меньше толщина и проницаемость коллектора.

3.2.3.4. Максимальная емкость хранилища

Максимальный теоретический объем открытых пор определяется по:

$$V1_{max} = \int_0^F A(h) \cdot \Phi \cdot (1 - S_{в/}) \cdot dh,$$

$A(h)$ – разность площадей изобат по кровле и по подошве по отметкам глубин h ($м^2$);

F – высота (м);

Φ – средняя пористость коллектора ($м^3 \cdot м^{-3}$);

$S_{в/}$ – остаточная водонасыщенность ($м^3 \cdot м^{-3}$).

Примечание:

Если отметки изобат по подошве больше отметок изобаты высоты, $A(h)$ равна площади изобат по кровле.

Максимальная теоретическая емкость хранилища S_{max} при условии достижения максимального объема при максимальном давлении равна:

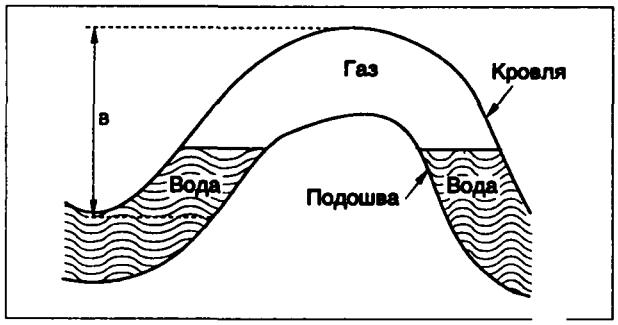
$$S_{max} = V1_{max} \cdot p_{max} \cdot \frac{1}{p_0} \cdot \frac{1}{Z(p_{max}, T)} \cdot \frac{T_0}{T}.$$

Полученная по формуле величина S_{max} является завышенной, т.к.:

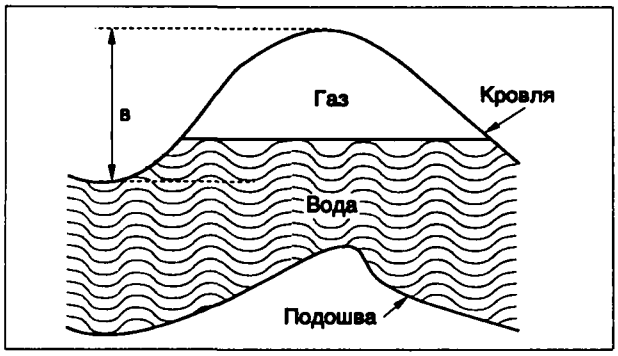
— некоторый интервал безопасности должен быть соблюден между поверхностью воды и поверхностью изобаты высоты ловушки;

— газоводяной контакт редко бывает горизонтальным;

— максимальное давление, определенное по градиенту 1,3 - 1,46, не может быть достигнуто (случай ловушки большой протяженности, мало структурированной, с хорошими характеристиками);



Коллектор с "сухой подошвой" (небольшой толщины, хорошо структурированный)



Коллектор с затопленной подошвой (слабо структурированный и/или толстый

— максимальное давление может быть достигнуто до того, как газ достигнет высоты (случай ловушки хорошо структурированной или ограниченной протяженности).

В ловушке ограниченной протяженности (коллектор линзовидный, рифовый, непроницаемый барьер, выклинивающийся и т.д.) почти всегда максимальное давление ограничивает емкость хранилища:

$$V_{1max} = \beta_к \cdot V \cdot (p_{max} - p_н),$$

V – объем пор водоносного пласта;

$p_н$ – начальное пластовое давление.

Чтобы использовать такие закрытые коллекторы для хранилища, необходимо предусмотреть откачку части воды, которую они содержат.

3.2.3.5. "Дыхание"

"Дыхание" R – это отношение количества извлекаемого газа, называемое еще полезный объем $V_п$ или активный объем, к максимальному достигнутому эффективному объему газа $V_м$:

$$R = \frac{V_п}{V_м}.$$

Буферный газ – это, по определению, газ, который не участвует в "дыхании" (разница между максимально достигнутым объемом и полезным объемом).

Две величины – газ буферный и полезный объем зависят от свойств водоносного пласта (качества коллектора, выраженности структуры) и от того, как их используют.

Определение для данного хранилища объема буферного газа и полезного объема требует моделирования полной истории работы хранилища с начала первой закачки газа и на перспективу с учетом сезонной неравномерности потребления и надежности его работы (продолжительность, расход).

Основные факторы, ограничивающие "дыхание" хранилища, следующие:

— защемление газа в порах в процессе продвижения воды (см. § 3.2.2.2.3);

— добыча воды скважинами в процессе отбора приводит к снижению давления на устье скважин и делает неизбежным их остановку, когда дебит воды становится слишком большим, порядка $м^3 \cdot ч^{-1}$;

— предусмотренная продолжительность для закачки газа (продиктованная неравномерностью потребления); если она слишком короткая, восстановление хранилища невозможно (темп закачки ограничен предельным давлением), отсюда следует ограничение отбора в предвидении последующей закачки.

В начале эксплуатации хранилища толщина коллектора, занятая газом, небольшая, "дыхание" в этом случае среднего размера, особенно по причине притока воды в скважины.

По мере приближения объема хранилища к своему теоретически максимальному значению (см. § 3.2.3.4), возможности "дыхания" увеличиваются.

Для сезонной неравномерности потребления порядок величины "дыхания" составляет от 40 до 50% общего объема.

"Дыхание" хранилища растет с увеличением числа эксплуатационных скважин и зависит от свойств пласта-коллектора, а также технико-экономических показателей.

3.2.3.6. Пиковый расход

Для хранилища, используемого для покрытия сезонной неравномерности потребления газа, самые значительные отборы случаются в течение наиболее холодных дней зимой, когда значительная часть полезного объема газа уже извлечена. Пиковый расход есть, по определению, максимально возможный дебит, когда определенная часть полезного объема уже извлечена.

Во Франции принимают, что пиковым расходом может быть назван отбор 15 февраля, когда уже отобрано, начиная с 1 ноября предыдущего года, 70% полезного объема ("газовая" зима N-го года продолжается с 1 ноября N – 1 года до 31 марта N-го года).

Можно также характеризовать этот пиковый расход, сравнивая его с полезным объемом:

$$\frac{V_п}{Q_{пр}} = n \text{ дней};$$

n может изменяться для подземных хранилищ в водоносном горизонте от 40 до 150 дней.

Не надо путать пиковый расход, определенный таким образом, и максимальный теоретический расход, который подземное хранилище может поставить (обычно при максимальном объеме газа в хранилище и при максимальном давлении).

3.2.4. ОБОРУДОВАНИЕ ХРАНИЛИЩ

3.2.4.1. Скважины

3.2.4.1.1. Основные функции скважин

3.2.4.1.1.1. Разведочная скважина

Разведка водоносных пластов осуществляется с помощью глубоких скважин, которые позволяют получить данные о глубине залегания пластов и о характеристиках резервуара-коллектора, покрышек с помощью:

— отбора образцов пород из разведываемых горизонтов (пласт-коллектор, покрышка, выше-лежащий водоносный пласт);
— замеров (геофизические исследования, сейсмокаротаж и т.д.);
— исследований на продуктивность и на интерференцию (взаимодействие).

В заключение отметим, что разведочные скважины могут быть использованы в дальнейшем для контроля или эксплуатации резервуара-коллектора.

3.2.4.1.1.2. Эксплуатационная скважина

Связанные со станцией, они обеспечивают одновременно закачку и отбор газа.

В течение первых лет эксплуатации могут быть вынуждены осуществлять избирательную закачку на различную глубину с целью максимального использования пространства хранилища, предоставляемого структурой; для обеспечения такой закачки потребуется специальное оборудование (перекрытие труб).

3.2.4.1.1.3. Контрольная скважина

3.2.4.1.1.3.1. Контрольная скважина в газовом пузыре

Они располагаются в газовой зоне на границе газового пузыря и позволяют замерять положение уровня вода–газ.

3.2.4.1.1.3.2. Скважина периферийного контроля

Они располагаются вне газового пузыря или на его границе и позволяют делать замеры давления в зоне, заполненной водой, или отбирать пробы воды. Некоторые из них, расположенные на критическом направлении расширения газового пузыря, служат "часовыми": когда газ их достигнет, необходимо замедлить или остановить закачку.

3.2.4.1.1.3.3. Скважина контроля вышележащего горизонта

Если вышележащие пласты пористые и проницаемые, необходимо в них расположить скважины, позволяющие обнаружить в них возможное появление газа. Контроль осуществляется с помощью постоянного наблюдения за давлением, переток из рассматриваемого горизонта газа приводит немедленно к увеличению давления.

3.2.4.1.1.3.4. Скважина геофизического контроля

На некоторых хранилищах в центральной части структуры оборудуют одну или несколько "глухих" скважин (колонна в зоне пласта не перфо-рирована) для измерения газонасыщенности на различных глубинах газохранилища с помощью нейтронного каротажа и обнаружения случайных скоплений газа в вершинной части вышележащего водоносного горизонта.

3.2.4.1.2. Бурение и крепление скважин

Буровые работы предназначены для создания сообщения между поверхностью и резервуаром-коллектором.

Бурение скважины включает различные периоды. Каждый период характеризуется диаметром долота (обычно трехшарошечное долото) и помещением в скважину зацементированных обсадных колонн, предназначенных для закрепления ствола скважины и изоляции отложений друг от друга.

Период	Диаметр долота	Диаметр обсадной колонны	Примечание
0	–	Направление 20"	Направление углубляется ударным бурением до 10 - 15 м
1	17" 1/2	13" 3/8	
2	12" 1/4	9" 5/8	
3	8" 3/4	7"	
4	6" 1/4	Открытый ствол	В дальнейшем оборудуется фильтром (непрочные коллекторы)

Пример программы бурения скважины (диаметр дается в дюймах: 1" = 25,4 мм).

Качество цементирования последней обсадной колонны является решающим, так как оно должно препятствовать любой миграции газа в вышележащие пласты.

Оно контролируется с помощью акустического каротажа (Cement bond log, variable density, CBL-Vd).

3.2.4.1.3. Освоение скважин (complétion)

Слово "complétion" (освоение) – это английское слово, которое используется в нефтяной промышленности, чтобы обозначить комплекс операций, выполненных для определенного продуктивного пласта, который начинается с вскрытия этого пласта и заканчивается вводом в окончательную эксплуатацию. Это слово используется также, чтобы обозначить комплекс операций, выполненных в скважине после окончания бурения с использованием необходимого для этого оборудования. Вошло в обычай применение выражения "освоить скважину".

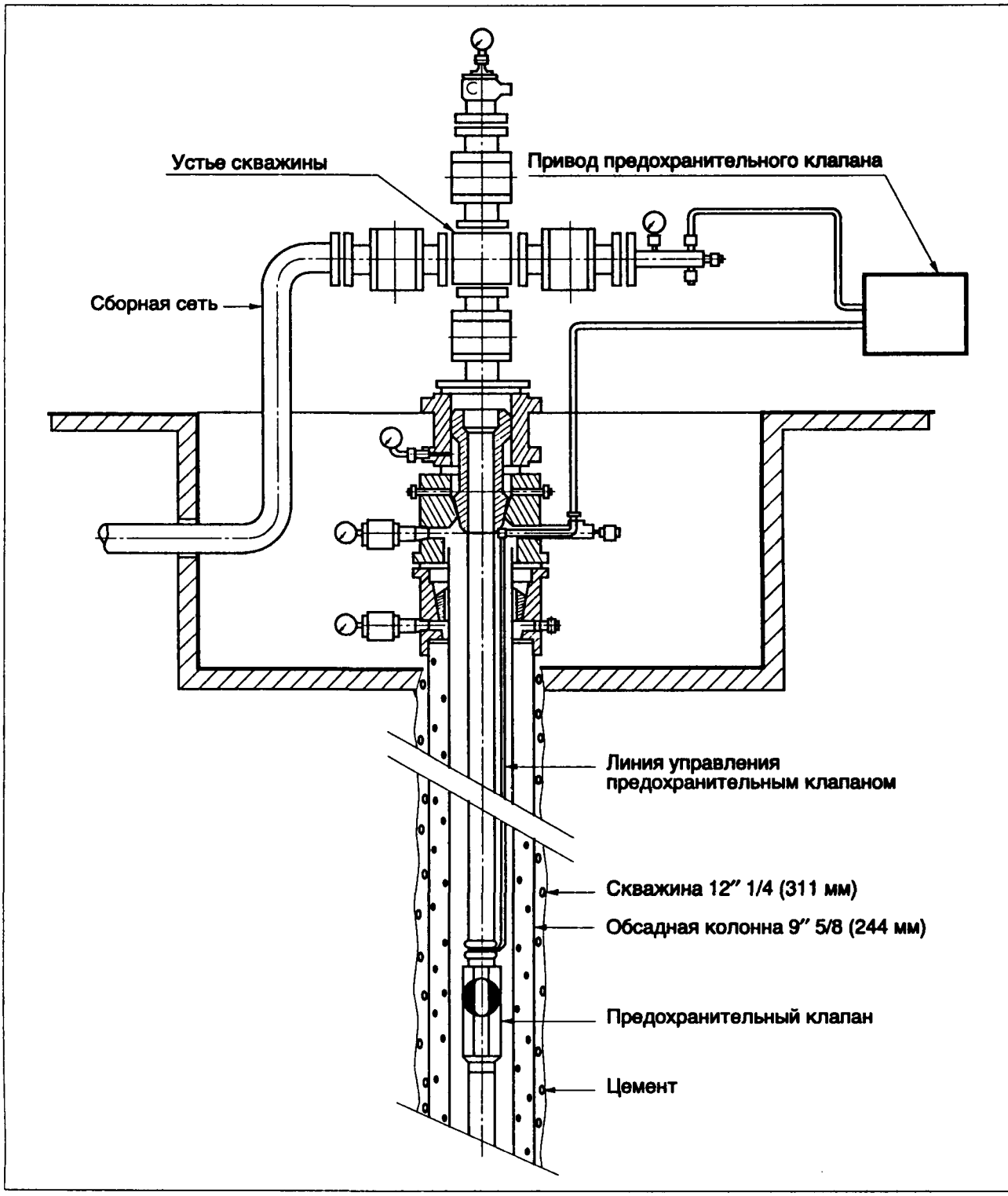
Освоение состоит в спуске забойного оборудования, необходимого для надежного использования скважины в течение всего периода эксплуатации или контроля. Схематично оборудование скважины включает (снизу вверх):

— фильтры, назначение которых – задерживать самые мелкие частицы рыхлых коллекторов;

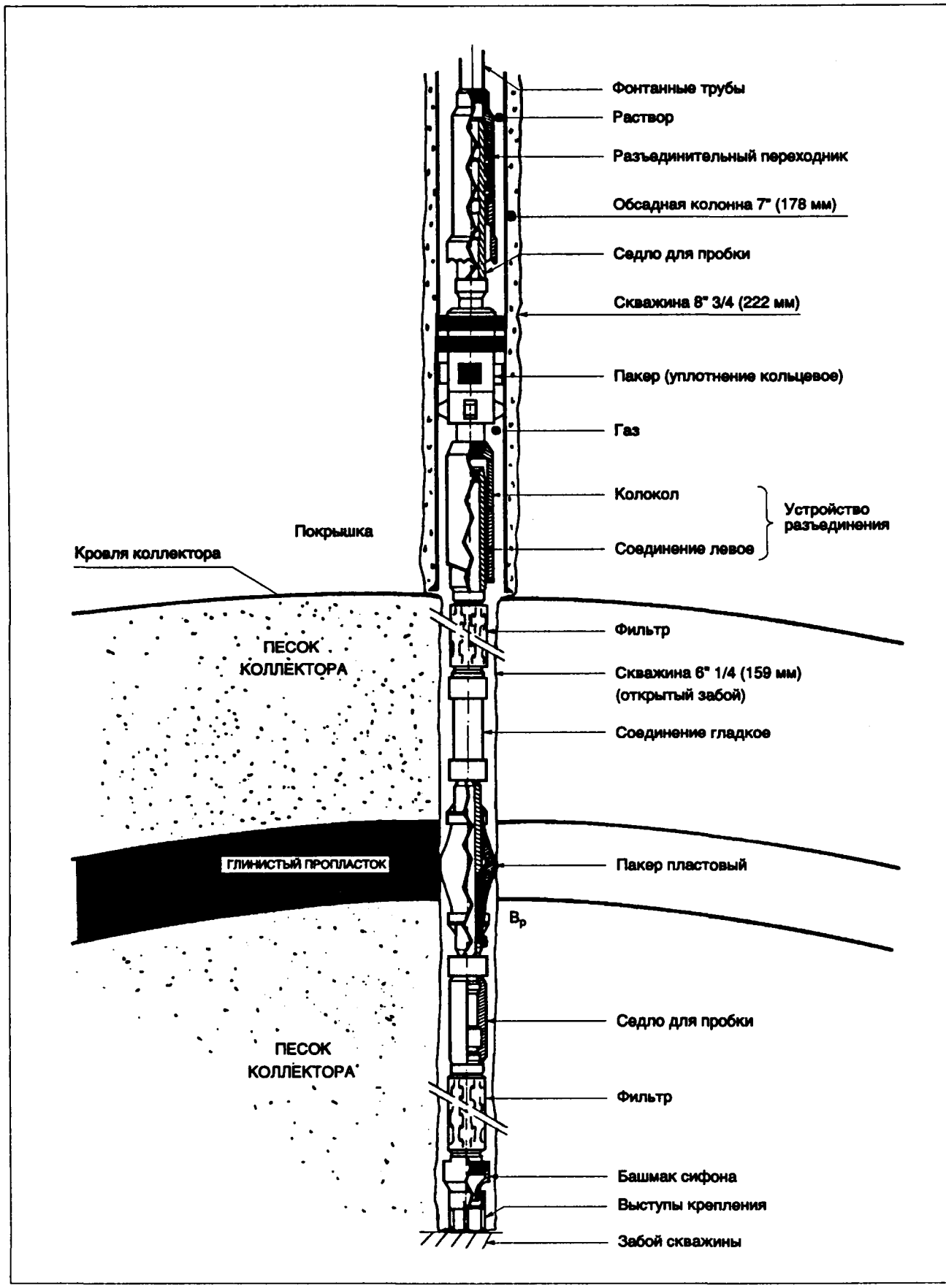
— спуск труб, дублирующих последнюю обсадную колонну и изолирующих ее от пластового флюида; пространство между ними заполняется нейтральной жидкостью плотностью от 1 до 1,2, предназначенной для обеспечения относи-тельного равновесия давления на глубине забойного оборудования (пакер или кольцевое уплотнение);

— предохранительный клапан (задвижка) (10 - 30 м от поверхности), предназначенный для предупреждения любого фонтанирования в случае очень мало вероятном – когда устье скважины будет сильно повреждено;

— устье скважины связано фланцем с системой подвески обсадных колонн.



Устье эксплуатационной скважины



Оборудование забоя эксплуатационной скважины с фильтрами (случай коллектора с двумя горизонтами)

3.2.4.2. Наземное оборудование

Его роль обеспечить главным образом:

— транспорт газа между скважинами и центральной станцией (газосборная сеть заглублена);
— обработка извлеченного газа:
  · удаление воды, добываемой некоторыми скважинами (сепараторы располагаются на площадках скважин и/или на центральной станции);
  · осушка газа: колонны гликолевой осушки на центральной станции; для того чтобы предупредить образование гидратов в сборном коллекторе, вводят метанол на устье скважин (см. § 2.4.6.);
  · удаление сероводорода; образование сероводорода в подземных коллекторах может быть результатом гидролиза или разложения сернистых соединений нагнетаемого газа (одоризация), бактериального восстановления пород, содержащих сульфаты (бактерицидная обработка коллектора при закачке исключила добычу H_2S в Люссанете), или восстановление пиритов, присутствующих в пластах-коллекторах.
  Установки обессеривания представляют собой или колонны диэтаноламиновой очистки для газа, не содержащего CO_2, или установки с активированным углем;
  · фильтрование газа, чтобы удалить мелкие твердые частицы, которые могут быть пропущены в некоторых случаях забойными фильтрами (см. § 2.4.5.);
  · другие обработки в соответствии с особенностями посторонних примесей, если подземные хранилища созданы в старых нефтяных месторождениях (углеводороды и т.д.);
  · контроль запаха и возможная одоризация;
— сжатие: для технического расчета компрессоров необходимо знать возможности пластового коллектора и как они будут использованы и тем самым, режим пластового давления, опре-деленный для различных сценариев использования, рассмотренных на имитационных моделях, так же как и режим давления в сети (закачка–отбор);
— учет (площадка учета):
  · на каждой площадке скважин на выходе из сепаратора (учет по скважинам);
  · централизованный на станции после осушки (общий учет);
— замеры давлений и температур на устье скважин для того, чтоб контролировать состояние скважин и коллектора.

3.2.5. Общие соображения по эксплуатации хранилищ

Эксплуатация хранилища включает, с одной стороны, операции по наблюдению и контролю за собственно пластовым резервуаром и окружающим его пространством и, с другой стороны, уход и содержание в порядке забойного и поверхностного оборудования для того, чтобы хранилище могло обеспечить с полной надежностью все функции, для которых оно было разработано.

Осуществляются контроль и поддержание в порядке подземных комплексов (пластовый резервуар и скважины).

3.2.5.1. Контроль

3.2.5.1.1. Обычные наблюдения

Скважины, числом в несколько десятков, размещаются на поверхности в несколько квадратных километров. Периодическая проверка осуществляется на всех скважинах для того, чтобы обнаружить в них любые отклонения и осуществить необходимые мероприятия (наиболее часто давление на устье).

3.2.5.1.2. Распространение газового пузыря

Наблюдение за распространением газового пузыря производится особенно тщательно во время закачки газа:

— замерами давления в контрольных скважинах, открытых в пластовом резервуаре; любое резкое увеличение давления на устье вызывается появлением газа;
— замерами границы раздела вода–газ в контрольных скважинах;
— нейтральными методами в контрольных скважинах.

Используя эту информацию, оценивается с особым вниманием продвижение головного фронта, особенно в критических направлениях. Если он слишком приблизился к высоте ловушки, необходимо замедлить или даже остановить закачку газа.

3.2.5.1.3. Потенциал резервуара: давление в недрах газового пузыря; продуктивность скважин

В первом приближении считают, что давление ($P_{пл}$) в недрах газового пузыря одинаково (ввиду небольшой вязкости газа).

Его величина определяется с помощью замеров, произведенных на скважинах:

— наиболее часто путем регулярного определения давления на устье остановленных скважин; забойное давление (равное среднему давлению в недрах газового пузыря, так как дебит равен нулю) рассчитывается с помощью уравнения равновесия:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho g$$

и уравнения состояния газа:

$$\frac{P}{\rho} = RZT;$$

— непосредственных замеров глубинным манометром, автономно спущенном на кабеле (механическом, например "Амерада", или электрическом) на забой скважины, или каротажным зондом;
— если все скважины находятся в стадии добычи или закачки, замеры давления на устье позволяют определить приближенное значение среднего давления в газовом объеме, учитывая, с одной стороны, потери давления в скважине, и, с другой стороны, потери давления в пласте в призабойной зоне.

3.2.5.1.3.1. Потери давления в призабойной зоне скважины, продуктивность скважины

Скорости движения газа в пористой среде вблизи эксплуатационных скважин значительны, и они приводят к потерям давления в призабойной зоне, равным при отборе, разности между давлением в газовом объеме ($P_{пл}$) и давлением на забое скважины, или забойным давлением ($P_з$).

Зависимость между $P_{пл}$ и $P_з$ записывается в виде:

$$P_{пл}^2 - P_з^2 = AQ + BQ^2,$$

Q – дебит скважины, выраженный для нормальных условий по температуре и давлению.

Коэффициент продуктивности скважины определяется по соотношению:

$$I_п = \frac{P_{пл}^2 - P_з^2}{Q} = A + BQ.$$

Примечание:

В нефтяной промышленности коэффициент продуктивности скважины определяется:

$$IP = \frac{Q}{P_{пл} - P_з}.$$

Коэффициенты A и B определяются экспериментально: в невозмущенном пласте осуществляют установившиеся отборы с постоянными дебитами, ожидая для каждого из них стабилизацию забойного давления; используя экспериментальные значения Q и $P_з$, полученные таким образом, определяют (методом наименьших квадратов) значения коэффициентов A и B.

3.2.5.1.3.2. Потери давления в скважине

Точный расчет изменения давления и температуры газа в эксплуатационной скважине осуществляют с помощью относительно сложных программ, учитывающих теплообмен между потоком газа и породами.

Некоторые гипотезы – адиабатическое течение (высокий дебит), изотермическое течение (низкий дебит), температура потока газа получается путем линейной интерполяции между забойной температурой (равной температуре на глубине пласта при отборе) и температурой на устье (замеренной) – значительно упрощают расчеты (использование возможностей миниЭВМ).

На участке скважины, имеющем одинаковые геометрические характеристики, соотношение, свя-зывающее величины давлений на концах (з – внизу и у – вверху), будет:

$$P_з^2 = EP_y^2 + (E-1) \cdot F \cdot Q^2,$$

где

$$E = \exp\left(6{,}843 \cdot 10^{-2} \frac{d_0 \cdot L}{\bar{z} \cdot \bar{T}} \cos\psi\right),$$

$$F = \eta \cdot 5{,}41 \cdot 10^{-14} \cdot (\bar{z} \cdot \bar{T})^2 \cdot \frac{1}{\cos\psi} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{D \cdot A^2},$$

$P_з$, P_y – давление (бар);

d_0 – плотность газ/воздух;

Q – дебит ($м^3$ (н) $\cdot ч^{-1}$);

$\bar{z}$ – средний коэффициент сжимаемости газа;

$\bar{T}$ – средняя температура газа (К);

ψ – угол между вертикалью и осью скважины (°);

L – длина участка (м);

$D = \frac{4A}{P}$ – гидравлический диаметр (м);

A – проходное сечение ($м^2$);

P – омываемый периметр (м)

(для круглого канала гидравлический диаметр – это внутренний диаметр; при течении в кольцевом пространстве между наружным диаметром (D_1) внутренней трубы и внутренним диаметром внешней трубы (D_2): $D = D_2 - D_1$);

η – +1: течение з ⟶ у (отбор)

–1: течение у ⟶ з (закачка);

$\bar{\lambda}$ – средний коэффициент гидравлического сопротивления

$$\frac{1}{\sqrt{\bar{\lambda}}} = -2\log_{10}\left(\frac{2{,}51}{Re \cdot \sqrt{\bar{\lambda}}} + \frac{\varepsilon}{3{,}71 \cdot D}\right)$$ Формула Колбрука,

где:

ε – шероховатость стенки (м);

$Re = 3{,}59 \cdot 10^3 \frac{d_0 QD}{\mu A}$ (число Рейнольдса);

μ – динамическая вязкость газа (мПа)

(порядок величины $\bar{\lambda}$: $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ - $2 \cdot 10^{-2}$).

3.2.5.1.3.3. Продуктивность скважины и приток воды

Основным следствием появления воды в продукции скважины является снижение ее продуктивности, в самом деле потери давления в призабойной зоне и скважине в этом случае значительно возрастают (двухфазное течение).

Если в резервуаре с хорошо выраженной структурой вода появляется в скважинах только после отбора значительного количества полезного объема, то далеко не то же самое будет в случае резервуара со слабо выраженной структурой или небольшой толщиной газового пузыря.

Снижение давления в призабойной зоне в процессе отбора изменяет положение контакта вода–газ; он образует конус воды (water-coning), который, начиная с некоторой предельной величины дебита, названной "критическим дебитом", достигает забоя скважины. Продукция скважины становится двухфазной.

3.2.5.1.3.4. Продуктивность скважин и вынос песка

При отборе газа в резервуарах песчаных или образованных из мелкозернистых слабо сцементированных песчаников наиболее мелкие частицы песка увлекаются продукцией.

Чтобы предотвратить любое появление песка в продукции, забой скважины в зоне пласта-резервуара оборудуется фильтрами, они играют двойную роль: закрепить открытый ствол и обеспечить фильтрацию через естественный фильтрующий массив. Наиболее крупные частицы песка или искусственный фильтрующий слой (фильтры с двойными стенками, содержащие искусственные фильтрующие элементы или также крупнозернистый песок, закачанный между фильтром и открытым стволом: "gravel-pack" или "aquapack") увеличивают эффективность щелей фильтров.

Существует максимальный дебит, при превышении которого фильтры не могут эффективно выполнять свою роль и рискуют быть испорченными. Этот дебит определяется спецификацией изготовителя максимальным значением скорости течения в щелях.

3.2.5.2. Ремонт скважин

3.2.5.2.1. Легкий ремонт

3.2.5.2.1.1. Работа на кабеле ("wire-line")

Эта техника состоит в проведении работ в скважине под давлением различными инструмен-

тами, которые подвешиваются на стальном тросе высокой прочности.

Этот процесс позволяет осуществлять вмешательства, которые могут быть разделены на две большие группы:

— *замеры*: поверхности контакта вода–газ, температуры, давления, контроля забоя скважины;
— *ремонтные работы*: постановка или извлечение изолирующих пробок, работа в скважине желонкой с целью извлечения осадков, скопившихся на забое скважины, постановка на место или замена съемных предохранительных клапанов, труб, перекрывающих фильтр.

3.2.5.2.1.2. Работа под давлением "snubbing"

Технология "snubbing" состоит во введении и извлечении из скважин под давлением колонны полых элементов небольшого диаметра, которая позволяет осуществить через элементы оборудования скважины (оборудование) различные операции, среди которых наиболее часто выполняются:

— промывка отложений, скопившихся на забое скважин, и их подъем с помощью циркуляции флюида;
— закачка на забой скважины различных веществ, предназначенных для стимуляции притока;
— извлечение различных инструментов, упавших или заклиненных на забое скважин.

3.2.5.2.1.3. Намотанная труба ("coil-tubing")

Технология "coil-tubing" (намотанная труба) состоит во введении в скважины под давлением полой непрерывной трубы небольшого диаметра.

Она позволяет осуществить различные операции, целью которых является получение циркуляции жидкого или газообразного флюида (обработка, эрлифт, разбуривание отложений с помощью турбины и т.д.).

3.2.5.2.1.4. Ремонт устьев скважин

Эта операция состоит в проведении стандартной замены неисправных задвижек на устье скважин, приведение их в исправность и их повторное испытание в мастерских.

3.2.5.2.1.5. Проверка предохранительных клапанов и их поверхностных аппаратов управления и контроля

Периодические исследования позволяют проверить хорошую работу предохранительных клапанов.

В случае нерабочего состояния или нарушения герметичности самих клапанов встречаются два варианта:

— клапан объединен с оборудованием, тогда необходимо заглушить скважину, чтобы извлечь трубы, прежде чем заменить клапан (см. § 3.2.5.2.2);
— клапан устанавливается с помощью кабеля; вмешательство на кабеле позволяет быстро его заменить.

3.2.5.2.2. Капитальный ремонт

В следующих случаях:

— газопроявление в затрубном пространстве по причине нарушения герметичности скважинного оборудования;
— значительный вынос песка по причине повреждения фильтров;
— замена предохранительного клапана, объединенного с оборудованием скважины, и т.д.;

необходимо переоборудовать скважину.

Эта работа, названная "work-over", состоит в задавливании скважины с помощью промывочной жидкости соответствующей плотности, снятии фонтанной арматуры, прежде чем поднять все или часть оборудования скважины с помощью установки "servicing", объединенной с легкой буровой установкой.

3.2.6. Стоимость хранения в водоносном горизонте

Четыре самых значительных статьи расхода в себестоимости хранения газа в водоносном горизонте, в порядке уменьшения значения:

— буферный газ.

Можно уменьшить эту статью расхода, заменив часть природного газа инертным газом (закачкой перед природным газом в случае создания хранилища в новой структуре; закачкой на периферии газовой зоны для уже созданного хранилища: заменяя часть природного газа инертным газом). Этот инертный газ, в основном состоящий из азота, получают:

- или сжиганием природного газа (воздух, поддерживающий горение);
- или фракционной перегонкой воздуха (чтобы извлечь кислород).

Себестоимость 1 м^3(н) инертного газа, помещенного в пласт, составляет треть стоимости газа;

— разведка.

Чтобы найти структуру, пригодную для хранения, нужно, в среднем, разведать пять структур, выявленных сейсморазведкой, пробурить десяток разведочных скважин;

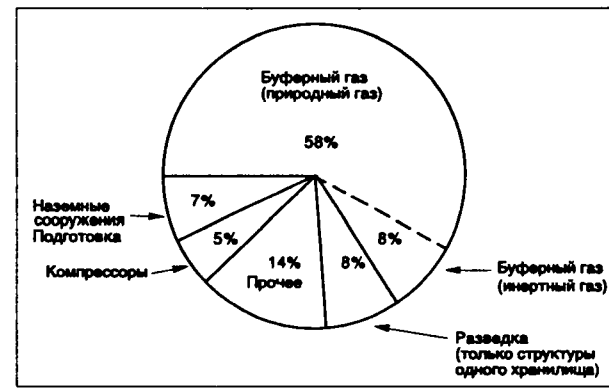
— контрольные и эксплуатационные скважины.

Их число составляет порядка от 20 до 70 в зависимости от значительности структуры; себестоимость одной оборудованной скважины меняется от 5 до 10 миллионов франков; она зависит, в основном, от глубины резервуара (обычная глубина: 400 - 1200 м);

— компрессоры.

Дальше идут наземные сооружения, газосборные сети, учет и т.д.

Для того чтобы иметь возможность "выбрать", с экономической точки зрения, структуру, пригодную для хранения в водоносном горизонте, среди других технически осуществимых решений: другой водоносный горизонт, другой тип подземного или наземного хранения, прерывающийся контракт, и т.д., определяют стоимость одного кубометра (н)



Распределение затрат на подземное хранение газа в водоносном горизонте

созданного полезного (активного) объема, т.е. отношение суммы капитальных вложений к сумме прироста дополнительно созданного полезного (активного) объема.

Для резервуара (фиктивного) с хорошими петрофизическими и структурными характеристиками, используемого для покрытия изменения сезонного потребления газа, полезного (активного) объема равного 1 миллиарду кубических метров (н), буферного объема равного 0,54 миллиарда кубических метров (н) и состоящего из 0,44 миллиарда кубических метров (н) природного газа и 0,1 миллиарда кубических метров (н) инертного газа, со средней глубиной равной 700 м, получают следующее распределение приведенных затрат с коэффициентом приведения разновременных затрат 9% (см. рисунок на стр. 397).

3.2.7. Список литературы

3.2.7.1. Книги

— P.C. Carman. – L'ecoulement des gaz a travers les milieux poreux. I.N.S.T.N. et P.U.F., Paris (1961).
— Carslaw and Jaeger. – Conduction of heat in solids. Oxford University Press, Oxford (1959).
— J.-P. Delhomme. – Application de la theorie des variables regionalisees dans les sciences de l'eau. These, Universite Pierre-Curie, Paris (1967).
— Gas technology (recueil collectif en deux volumes) : S.P.E. reprint series n° 13 published by the Society of Petroleum Engineers of A.I.M.E., Etats-Unis (1977) : tome 1 : Reservoir Engineering, Gas Well Test Analysis, P.V.T.; tome 2 : Gas Storage, Pipeline Gathering System and Multiphase Flow, Well Completion.
— A. Houpeurt. – Elements de mecanique des fluides dans les milieux poreux. Ed. Technip, 2e edition mise a jour, Paris (1974).
— A. Houpeurt. – Mecanique des fluides dans les milieux poreux. Critiques et recherches, Ed. Technip, Paris (1974).
— A. Houpeurt (sous la direction de). – Cours de production. Ed. Technip. Paris, tome1 : Caracteristiquws des roches reservoirs. Analyse dew carottes par R. Monicard (1965); tome 3: Ecoulement monophasique des liquides dans les milieux poreux par P. Chaumet (1965); tome 4 : Les ecoulements polyphasiques en milieu poreux par C. Marle (1965 et 1972).
— R. Ifly. – Solutions numeriques des problemes d'ecoulement monophasique en milieu poreux. Ed. Technip, Paris (1964).
— Katz and Coats. – Underground storage of fluids. Ulrich's books Inc., Etats-Unis (1968).
— Katz, Tek, Coats, Jones and Miller. – Mouvment of underground water in contact with natural gas, A.G.A., New York, Etats-Unis (1963).
— P. Lafitte (ouvrage collectif publie sous la direction de). – Traite d'informatique geologique. Ed. Masson. Paris (1972).
— Les ordinateurs en geologie petroliere et dans les etudes de production. Ed. Technip, Paris (1968).
— Manuel des essais de puits. Chambre cyndicale de la recherche et de la production du petrole et du gaz naturel. Ed. Technip, Paris (1972).
— G. Marsily. – De l'identification des systemes hydrogeologiques. Thése d'État, Universite Paris VI (1978).
— G. de Marsily. – Hydrogéologie quantitative. Masson et Cie, Paris (1981).
— G. Matheron. – Éléments pour une theorie des milieux poreux. Masson et Cie, Paris (1967).
— Mathews C.S. and Russel D.G. – Pressure Buildup and Flow Tests in Well. Society of Petroleum Engineers of A.I.M.E., États-Unis (1967).
— P. Mondrain. – Cours abrégé de production. Ed. Technip, Paris (1966).
— Muskat. – Physical Principles of Oil Production. Mc Graw-HillBook Company Inc., Oxford (1949).
— Muskat. – The flow of homogeneous fluids through porous media. Edwards Inc. (1946).
— Tek and Wilkes. – New concepts in underground storage of natural gas. A.G.A., New York, États-Unis (1966).
— I.A. Tcharnyl et coll. – Le stockage du gaz dans les couches aquifères horizontales ou légérement inclinees. Ed. Nedra (1968) *(texte russe).*
— Witherspoon, Javandel, Newman and Freeze. – Interpretation of aquifer gas storage condition from water pumping tests. A.G.A.. New York, États-Unis (1967).

3.2.7.2. Сообщения

— M. Boucher et J. Marrast. – Etudes sur modeles numerique et physuque des possibilités de stockage de gaz naturel en couches hprizontales. *Revue de l'I. F.P.* (1969).
— H. Bresson et G. Donat. – Recherches de structures geologiques pour le stockage souterrain de gaz en nappe aquifere. A.T.G. (1963).
— J.-F. Carriére et P. Bia. – Stockage souterrain de Saint-Clair-sur-Epte. Etudes prealables a la mise en gaz et au develppement des reservoirs Sequanien et Rauracien. A.T.G. (1980).
— J-F. Carriere, G. Fasanino, G. de Marsily, G. Lavedan. – Identitication des caracteristiques hydrogeologiques d'un réservoir en nappe aquifere. A.T.G. (1983).
— J-F. Carriere, A. Collomb, G. Meunier et F. Velard. – Application de l'informatique dans le domaine des stockages souterrains de gaz en nappe aquifere. Colloque informatique de l'industrie du gaz en Europe. Gatwick (1984).
— Chambre syndicale de la recherche et de la production du petrole et du gaz naturel. – Comite des techniciens. Manuel d'acidification des reservoirs. Ed. Technip. Paris (1983).
— A. Choquel et G. Fasanino. – Les réservoirs multigaz. A.T.G. (1985).
— E. Clarac et L. Socrate. – Les conditions de fonctionnement et equipement du reservoir de Lussagnet. A.T.G. (1959).
— J. Colonna. – Problémes généraux d'utilisation du reservoir et conditionnement des poits dans le stockage souterrain de gaz de cokerie de Beynes, A.T.G. (1962).
— J. Colonna, R. Iffly et J. Isson. – Contribution a l'étude de la conversion du réservoir de Beynes au gaz naturel. A.T.G. (1965).

— J. Colonna, R. Iffly et J-L. Millet. – Waterconing dans les reservoirs souterrains de gaz. *Revue de l'I.G.P.* (Janvier 1969).

— J. Colonna. – Orientations nouvelles dans l'utilisation du concept des permeabilites relatives. *Revue de l'I.F.P.* (avril 1969).

— J. Colonna. – Etudes et utilisations des rexervoirs souterrains de gaz en nappes aquiferes. *Annales des mines* (novembre 1969).

— J. Colonna et D. Vernet. – Premiéres injections à Chemery. Quelques problèmes rencontrés dans la mise en exploitation des réservoirs souterrains de gaz en aquifère. A.T.G. (1969).

— J. Colonna et B. Potvin. – Entretien des puits des réservoirs souterrains en nappes aquiferes. A.T.gG. (1970).

— J. Colonna et J-L. Millet. – Effet des deplacements diphasiques alternes sur les proprietes hydrodynamiques des roches. Colloque de l'A. R. T. E. P. (1971).

— J. Colonna, J-P. Bues et B. Sauvage. – Injections experimentales d'air dans une nappe souterraine en vue de l'étude du stockage de gaz en couches aquiferes non structurees. A. T. G. (1975).

— J. Colonna et M. Dussaud. – Remplacement partiel du gaz coussin traditionnel par du gaz inerte dans les stockages en aquifere. Conference mondiale de l[energie (Istanbul, 1977).

— J. Colonna et D. Legros. – Les stockages souterrains de gaz naturel dans la gestion d'un ensemble national d'approvisionnement et de transfert. U. I. I. G., Rio de Janeiro (octobre 1983).

— A. B. Densham, J. Isson et C.-B. Roux. – Comportement dans les stockages souterrains du gaz naturel contenant un odorisant ou de l'air. A. T. G. (1966).

— E. Diekmann. – Le "neutron log" dans le stockage souterrain pour la recherche des contacts gaz-eau. A. T. G. (1964).

— S. Diot et M. Delpit. – Détermination des résrves d'un gisement de gaz soumis à une poussee d'eau. A. T. G. (1971).

— M. Dussaud et J-F. Carrière. – Utilisation des modeles mathematiques de simulation pour la prevision et le controle du comportement des stockages souterrains en nappe aquifere. A. T. G. (1979).

— R. Fort. – La gestion des reservoirs saisonniers de gaz et la recherche operationnelle. *Revue francaise de l'énergie* (juin 1967).

— R. Fort. – L'interêt du stockage lors d'une alimentation en gaz naturel. *Bulletin mensuel de la Societe suisse de l'industrie du gaz et des eaux* (decembre 1968).

— R. Fort. – Aspects economiques du stockage souterrain de gaz. *Revue francaise de l'énergie* (novembre 1985).

— R. Fort. – Facterus techniques influant sur la rentabilite des stockages souterrains de gaz en nappe aquifere. *Revue de l'I. F. P.* (fevrier 1958).

— M. de Gelia. – Douze ans d'exploitation de stockage souterrain dans le Sud-Ouest. Perspectives economiques. *Revue de l'Association francaise des techniciens du petrole* (septembre - october 1969).

— M. Guy, P. Bia et P. Thiberge. – Previsions de production d'un gisement de gaz peu permeable (Leeuwarden) à partir d'un modele mathematique. A. T. G. (1972).

— B Leblanc and M. Dussaud. – The French natural gas underground storage technique. Present works and perspectives. *Pétrole Information International* (fevrier 1984).

— M. Leblanc, O.Marcel et J. E. Molinard. – La modelisation du reservoir souterrain de Germigny-sous-Coulombs. A. T. G. (1984).

— Y. Lerambert-Potin. – Mesure des debits de gaz humide aux puits du stockage souterrain de Saint-Illiers. A. T. G. (1974).

— J-L. Millet. – Études economiques au cours de la recherche et de l'équipement des stockages souterrains en nappe aquifere. A. T. G. (1969).

— J-L. Millet, J.J. Cheron et H. Ferrand. – Quelques applications de l'électronique au controle et à l'acquisition de données sur les puits de reservoirs souterrains. A. T. G. (1975).

— J-L. Millet et R. Lezer. – Conversion du reservoir souterrain de Beynes au gaz manufacture en gaz naturel. A. T. G. (1976).

— A. Million, G. Maune et J-L. Millet. – Experience d'automatisation complète sur un calculateur numerique de installations de stockage souterrain de Velaine. A. T. G. (1976).

— B. Pied. – Etude qualitative des reservoirs naturels du gaz par les diagraphies neutron. A. T. G. (1965).

— L. Richard et P. Bouraly. – Le stockage souterrain de gaz de cokerie à Beynes. Premiers resultats d'exploitation. A. T. G. (1958).

— L. Richard et P. Chaumet. – Etude et prevision des variations de pression dans les stockages souterrains de gaz en exploitation. *Revue de l'I. F. P.* (janvier 1961).

— MM. C-B. Roux et J. Balazuc. – Role et implantation des stockages. souterrains de gaz. *Annales des mines* (decembre 1970).

— C-B. Roux et M. Graille. – Automatisation des stockages souterrains de gaz naturel en nappe aquifere. A. T. G. (1972).

— C-B. Roux. – Le stockage souterrain du gaz naturel. *Revue du Palais de la decouverte* (mai 1976).

— M. Ternot. – Traitement des informations en provenance des stations de stockages souterrains. A. T. G. (1978).

— J. Toche. – Reconnaissance de la structure de Saint-Illiers- la-Ville. A. T. G. (1965).

— J-P. Valet et B. Potvin. – Progres dans la recherche de l'utilisation optimale des structures souterraines en nappes aquiferes pour le stockage de gaz naturel. A. T. G. (1983).

— D. Vernet. – Reservoir de Saint-Illiers-la-Ville. Premiers resutats de la mise en gaz. Problemes de controle du reservoir. A. T. G. (1968).

— D. Vernet, J-L. Millet et J-M. Ccueignoux. – Le controle par ordinateur des stockages souterrains du Gaz de France. A. T. G. (1970).

— D. Vernet. – Stockages souterrains de gaz et conservation des nappes aquiferes, Societe hydrotechnique de France (mai 1971).

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ

3.3. ХРАНЕНИЕ В СОЛЯНЫХ ПОЛОСТЯХ

3.3.1. Геологические данные. Разведка

3.3.1.1. Геология и соленосные отложения

Под термином соляные или эвапоритовые породы объединяются все минералы, происходящие от испарения морской воды. Более тридцати видов минералов, соответствующих различным спонтанным совокупностям элементов, представленных в водах: Ca, Na, Mg, Ba, K, CO_3, SO_4, Cl, включаются в это понятие.

В том, что касается создания полостей, в основном, принимает участие поваренная соль, или галит (NaCl), так как она единственная одновременно присутствует в изобилии в осадочных бассейнах и растворима в воде. Она встречается в пластах большей или меньшей толщины, достигающих и превосходящих тысячу метров или в куполах вертикального направления, часто довольно значительных (несколько тысяч метров).

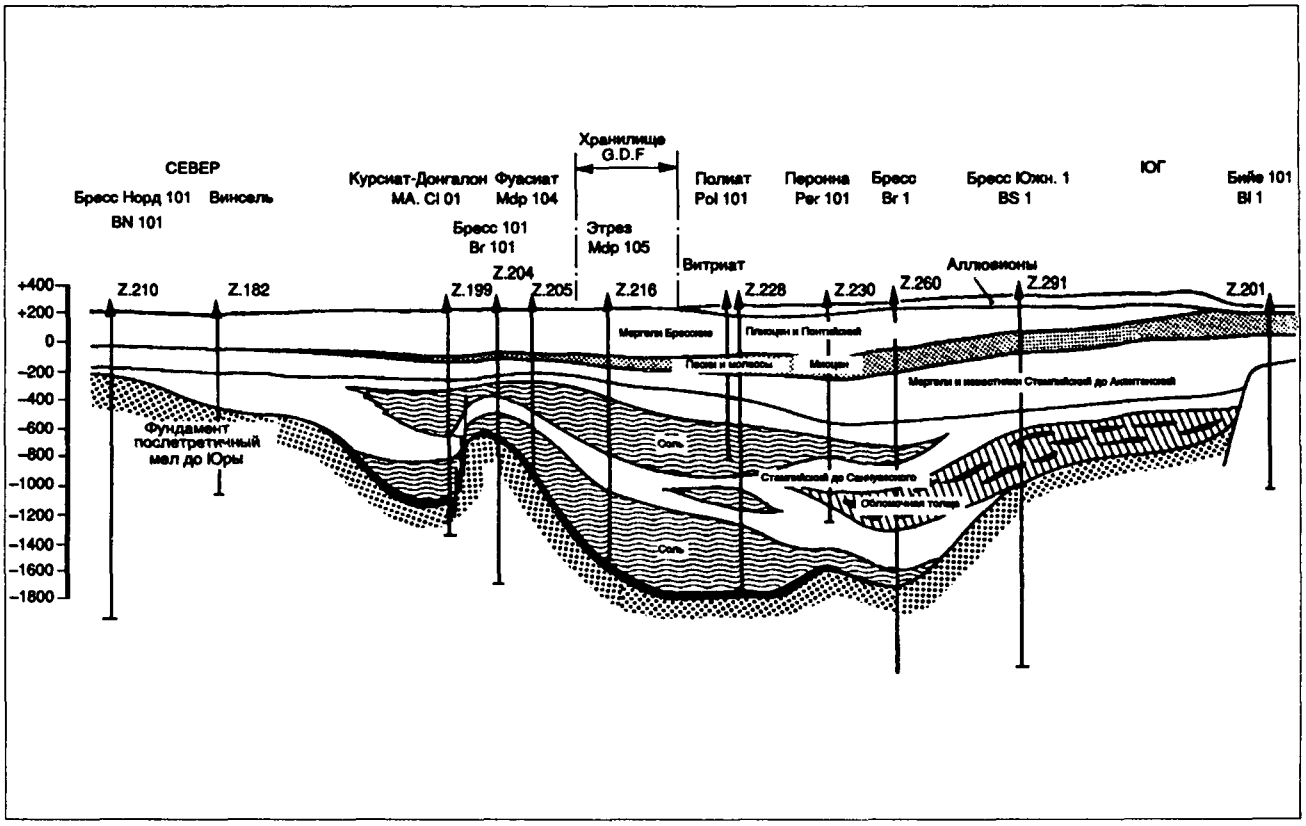
Два характерных признака определяют пригодность соли для создания хранилищ:

— ее растворимость в воде; это свойство используется для создания полостей (вымывание);

— ее пористость очень низкая (ниже процента) и закрытая (речь идет не о порах, а о пустотах) и ее проницаемость, практически неизмеримая (ниже 10^{-3} м$^{-2}$, или 10^{-3} миллидарси); эти свойства повышают герметичность полостей, выполненных в соляных отложениях. Обычно поваренная соль сопровождается нерастворимыми породами (или малорастворимыми): в основном глины, мергели и ангидрид ($CaSO_4$).

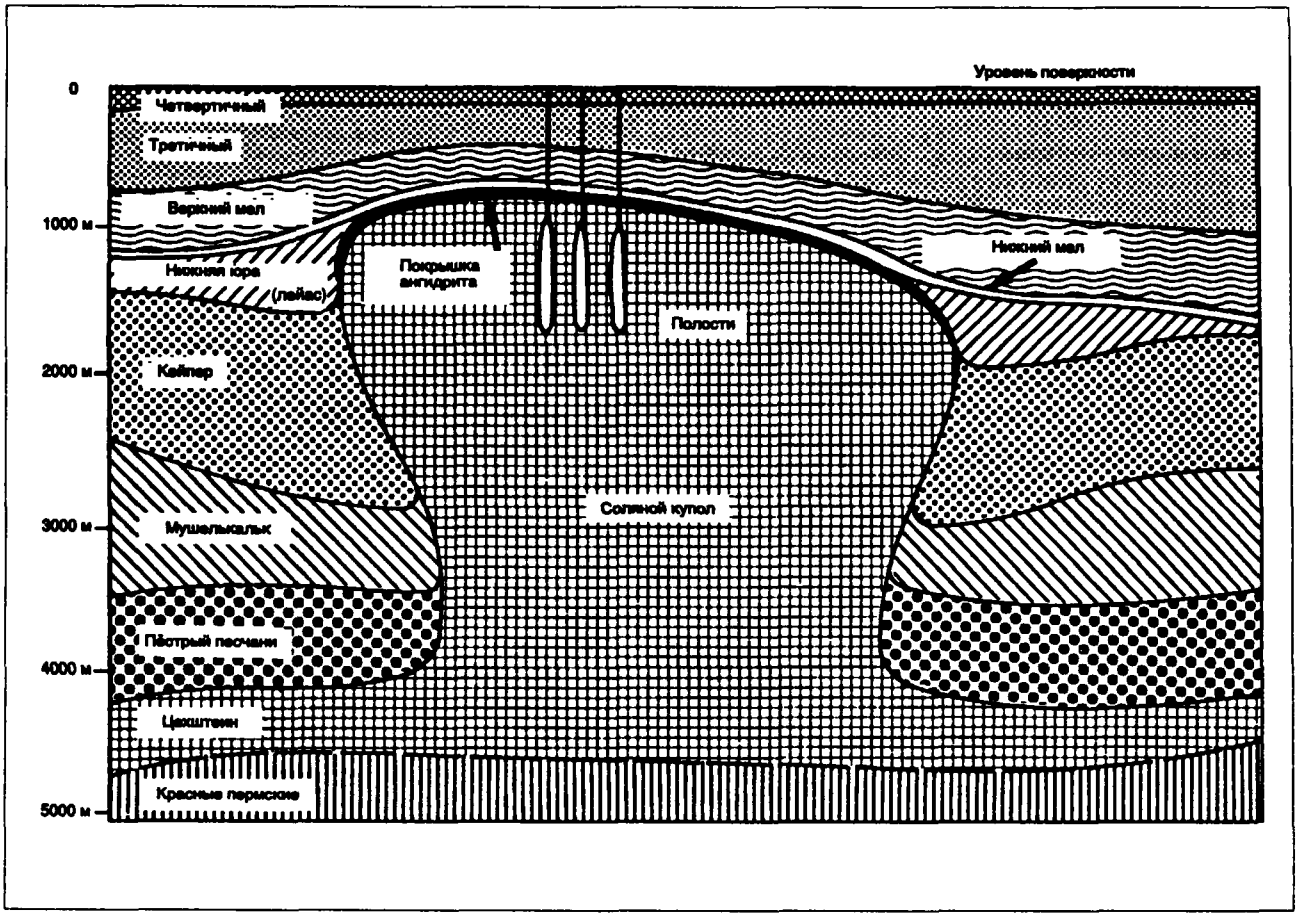
В толще соляных массивов нерастворимые породы распределены в виде пропластков и конкреций (особенно ангидриды); они могут быть также в ней распространены более или менее равномерно (особенно глина).

Пропластки очень хорошо растворимых солей: ископаемые соединения калия (сильвин или сильвит – KCl, карналит), соли магния, которые включены иногда в соляную толщу, имеют большую товарную стоимость и они добываются рудным способом. Их присутствие, даже в виде пропластков очень небольшой толщины, является неблагоприятным для создания полостей вымыванием (преимущественное трудноконтролируемое растворение).



Соленосные пластовые отложения: разрез соленосного бассейна олигоцена под Брессом (горизонтальная протяженность соленосного бассейна 40 км, комплекса пластов соли порядка 1000 м)

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ



Схематическое изображение соляного купола с полостями хранилищ в Северной Германии (горизонтальный и вертикальный масштаб одного порядка)

Определение факторов	Почему?
Соленосный массив	
· Пласт или купол (шток).	
· Достаточная толщина (минимум 100 м).	Создание полостей значительного объема (100 000 - 400 000 м^3).
· Глубина от 700 до 1 700 м (оптимальная между 1000 и 1300 м).	Максимальная емкость хранилища пропорциональна глубине, но большие глубины не рекомендуются (уменьшение объема полостей из-за ползучести или текучести соли), давление намного выше давления газопровода.
· Нет нерастворимых пропластков значительной толщины (более 5 м).	Создание полостей промывкой.
· Мало нерастворимых пропластков.	
· Среднее содержание нерастворимых включений ниже 25%.	
· Нет значительных пропластков солей калия.	Запасы для рудничной эксплуатации.
Вода пресная или слабо соленая	
· Море.	Размыв полостей; необходимо 7 - 9 м^3 пресной воды для размыва 1 м^3 поваренной соли.
· Река или поток.	
· Водоносный горизонт.	
Дренаж для рассола	
· Море.	Размыв полостей сопровождается добычей 7 - 8 м^3 рассола на 1 м^3 растворенной соли.
· Производство хлористого натрия.	
· Водоносный горизонт, содержащий соленую воду непригодную для потребления.	
· Соленосный массив.	
Большие газовые магистрали	Заброшенные шахты.

Факторы, позволяющие выбрать местоположение подземного хранилища.

3.3.1.2. РАЗВЕДКА

3.3.1.2.1. Задачи

Поиск благоприятного места для хранения природного газа в соляных полостях нацелен на отыскание факторов, определенных в табл. на с. 401.

3.3.1.2.2. Программа разведки соленосных отложений

3.3.1.2.2.1. Гравиразведка

Речь идет об измерении гравитационных аномалий, связанных с присутствием поваренной соли, плотность которой меньше, чем других пород (2,16 против в среднем 2,3). Она позволяет обнаружить значительные соленосные массивы в мало разведанных районах.

3.3.1.2.2.2. Сейсморазведка

Пласты глины в эвалоритах вызывают положительную аномалию; пропластки ангидрита порождают сильные и постоянные отражения; соленосные массивы создают отражения только от их кровли; пласт соли характеризуется отсутствием сейсмических контрастов (глухая зона).

Порода	Скорость распространения, м · с$^{-1}$	Плотность, кг · м$^{-3}$
Галит	4 900	2 165
Ангидрит	6 500	2 960
Гипс	6 200	2 320
Глина	2 000 - 5 000	2 200 до 2 900

Даже если гравиметрия и сейсмика позволяют хорошо локализовать купола соли, этого обычно недостаточно, чтобы установить с уверенностью пласты, даже толстые, эвалоритов.

3.3.1.2.2.3. Разведочное бурение

Прежде чем объявить, что данный район пригоден для создания хранилища в соляных полостях, необходимо осуществить бурение хотя бы одной скважины для того, чтобы:

— подтвердить, уточнить и "подклинить" гравиметрическую и сейсмическую информацию (составление и уточнение карт изобат и изопахит),
— оценить распределение галогенных формаций на соли растворимые и нерастворимые и определить также зоны, благоприятные для размыва полостей (в толще галогенных формаций Бресса, мощность которых составляет 1250 м в скважине под Этрец, только два горизонта имеют сразу достаточную единичную мощность (150 - 200 м) и содержание нерастворимых включений достаточно слабое, чтобы в них можно было размыть полости),
— отобрать керны, на которых можно осуществить в лаборатории замеры различных параметров (скорость растворения, механическую прочность и т.д.), знание которых обязательно для управления углубления размывом и определения предела стабильности.

3.3.1.2.2.4. Постоянное изучение (в процессе бурения)

Скорость проходки (высокая в галите и медленная в ангидрите), изучение обломков выбуренной породы ("cuttings").

3.3.1.2.2.5. Изучение кернов

Фотографирование и визуальное обследование перед следующими исследованиями с разрушением образца:

— Минералогический анализ:
  · плотность,
  · химический анализ после растворения в воде,
  · оценка нерастворимых включений (взвешивание после сушки, содержание карбонатов с помощью воздействия кислотой, отделение ангидритов и глины и т.д.),
  · спектроскопия.
— Скорость растворения.
— Механические испытания (прочность на разрыв, текучесть и т.д.).

3.3.1.2.2.6. Различные геофизические методы исследований (в конце проходки)

Геофизические методы исследования, обычно используемые для соленосных толщ, это радиоактивные каротажи, позволяющие определить плотность, водородо-нейтронный показатель, скорость звука. Они имеют хорошую литологическую разрешающую способность. Спектральный анализ гамма-излучений дает важные дополнения для определения свойств и местоположения солей калия.

В общем, разведочная скважина исследуется таким образом, чтобы иметь все, что может пригодиться впоследствии для размыва и эксплуатации полости.

3.3.2. Основные положения эксплуатации хранилища газа в соляной полости

После бурения скважины, которая служит одновременно для размыва и эксплуатации, различные этапы пуска в эксплуатацию полости схематизированы на рисунке стр. 403.

Почти все хранилища в полостях эксплуатируются циклами сжатие–расширение газа между минимальным (P_m) и максимальным (P_M) давлениями, определяемыми критериями стабильности и герметичности.

Минимальные запасы (S_m) при минимальном давлении определяются из уравнения состояния газа:

$$S_m = V \cdot \frac{P_m}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_m} \cdot \frac{1}{Z(P_m, T_m)}$$

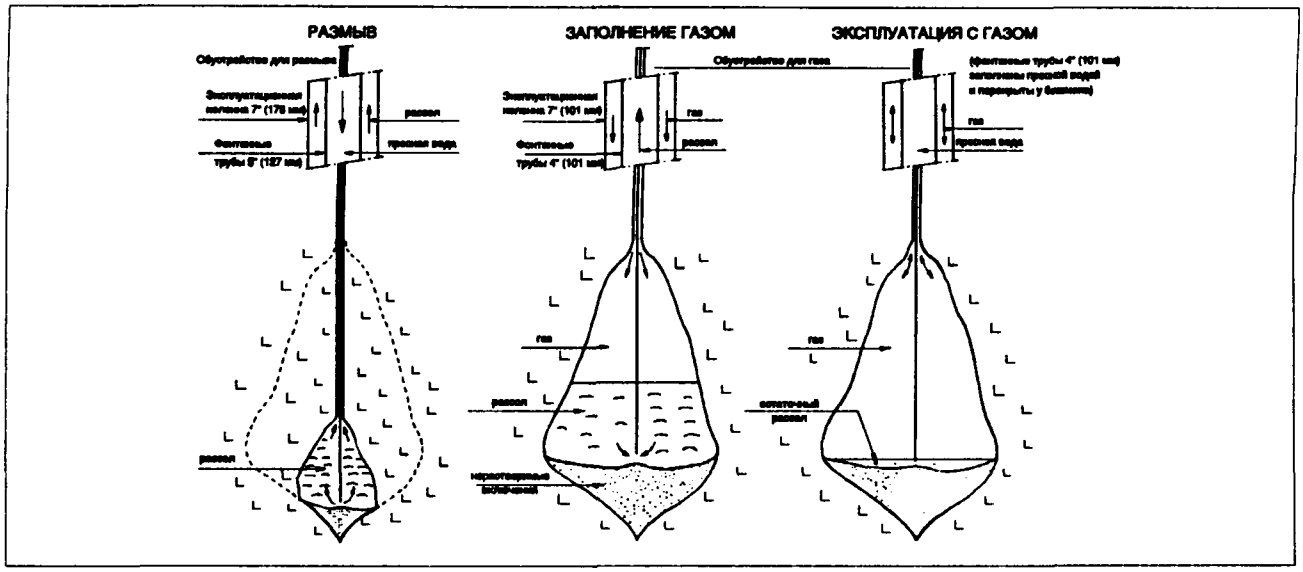
(V – свободный объем газа в полости).

Аналогично максимальные запасы (S_M) при максимальном давлении

$$S_M = V \cdot \frac{P_M}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_M} \cdot \frac{1}{Z(P_M, T_M)}.$$

Таким образом, полезные запасы определяются из выражения

$$\Delta S = S_M - S_m = V \cdot \frac{T_0}{P_0}\left[\frac{P_M}{Z(P_M, T_M) \cdot T_M} - \frac{P_m}{Z(P_m, T_m) \cdot T_m}\right]$$



Этапы пуска полости в эксплуатацию.

Примечание:

Другой принцип эксплуатации, – "уравновешивание рассолом", состоящий в компенсации количества извлекаемого газа рассолом, и наоборот, обязательно используется для хранения малосжимаемых флюидов (жидкие углеводороды, С.Н.Г. и т.д.) и очень мало применим для газа ввиду больших неудобств: необходимость располагать, в случае возможного отбора, объемом рассола, равным объему полости.

Минимальные запасы, или буферный газ, равны нулю, а полезные запасы соответствуют максимальным запасам, когда почти весь рассол вытеснен газом и когда, кроме того, газ сжат до максимального давления, определяемого критериями герметичности.

Потенциальный дебит хранилища газа в соляной полости ограничивается только потерями давления в скважине, в поверхностных сетях и способностью поддержания давления, если это необходимо.

В зависимости от объема полости (от 100 000 до 300 000 м^3) и принятого типа обустройства минимальная продолжительность, необходимая для выпуска почти всех полезных запасов, будет порядка от одной до пяти недель.

При обустройстве кольцевого типа уменьшенных диаметров (см. § 3.3.7.1.2), используемом "Gaz de France" в Этреце и Терсанне, максимальный дебит извлечения газа, соответствующий максимальному давлению, будет порядка 2 гм^3 (н) в сутки на одну полость; пиковый дебит, возможный дебит, когда отобрано 70% полезных запасов, будет порядка 1 гм^3 (н) в сутки на одну полость.

Обустройство значительного диаметра, без центральной колонны (см. § 3.3.7.1.2), допускает дебиты значительно более высокие: 5 - 10 гм^3 (н) в сутки на полость для максимального дебита, 2 - 3 гм^3 (н) в сутки на полость для пикового дебита.

Хотя большинство хранилищ в полостях предназначены для покрытия нужд сезонной неравномерности потребления, они особенно хорошо применимы для покрытия нужд еженедельной неравномерности потребления (более значительное потребление газа в отдельные дни) и для обеспечения надежности снабжения (прекращение добычи газа из морских месторождений в случае ураганов, опоздания метановозов из-за непогоды, происшествие на компрессорной станции и т.д.).

В своей основе эксплуатация полости аналогична эксплуатации баллона сжатого газа. Эта видимая простота скрывает особые проблемы этого типа хранения:

— проблемы механической устойчивости, создание полости, нарушающей естественное "геостатическое" равновесие горных пород,

— термодинамические проблемы, связанные с величиной расхода и скоростью движения газа, приводящие к значительным изменениям давления и температуры, с риском в процессе отбора газа, образования гидратов (газ насыщается парами воды во время пребывания в полости, см. § 3.3.4).

3.3.3. Устойчивость полостей

Создание полости нарушает природное "геостатическое" равновесие горных пород (*).

Из этого следует механическая неустойчивость, проявление которой выражается в различных повреждениях:

— уменьшение объема в результате текучести (способность соли течь);

(*) При глубине больше нескольких сот метров естественное состояние напряжений в массивах соли соответствует в значительной мере гидростатическому (горизонтальные и вертикальные напряжения одинаковые); оно соответствует тяжести пород. "Геостатическим" (горным) давлением ($P_{гр}$) называют давление, противодействующее начальному напряжению

$P_{гр} = \rho g H$,

g – ускорение силы тяжести (м · с$^{-2}$),

ρ – плотность пород (кг · м$^{-3}$),

H – глубина (м).

Плотность пород составляет порядка 2300 кг · м$^{-3}$, горное давление увеличивается приблизительно на 0,23 бар на метр глубины, на глубине 1000 м оно будет приблизительно равно 230 бар.

— оседание поверхностных отложений, связанных с уменьшением объема полостей;
— в редких случаях (нарушение требований к размерам или эксплуатации) наблюдаются местные провалы.

3.3.3.1. Изменение объема полостей; текучесть каменной соли

Соль представляет собой материал, способный к большим деформациям без разрушения. Область упругости очень ограничена – каменная соль подвержена остаточным деформациям под действием малейшего девиатора напряжений (s):

$$s = \sigma - \frac{1}{3} \cdot \mathrm{Tr}(\sigma) \cdot I,$$

где σ – тензор напряжений,
$\mathrm{Tr}(\sigma)$ – след тензора σ (сумма диагональных элементов),
I – единичный тензор.

Геологический закон (изотермическая вязкопластичность), наиболее употребительный для каменной соли, имеет вид

$$\dot{\varepsilon} = \frac{3}{2} \cdot \frac{s}{\sqrt{3J_2}} \cdot \frac{d}{dt}(\xi_\alpha),$$

$$\dot{\xi} = \left(\frac{\sqrt{3J_2}}{K}\right)^{\beta/\alpha}, \quad \text{(формулы Леметра, Менцеля и Шрейнера)}$$

где J_2 – второй инвариант девиатора напряжений,
ξ – внутренняя переменная пластичности,
$\dot{\varepsilon}$ – тензор скоростей деформации; $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$,
α, β, K – параметры, зависящие от свойств соли (кристаллизация, примеси и т.д.).

Обычно

$$0{,}2 < \alpha < 0{,}5$$
$$2{,}0 < \beta < 4{,}0$$

Значения параметров (α, β, K) получаются при обработке экспериментов по ползучести цилиндрических образцов, выточенных из центральной части кернов, полученных при бурении скважин. Эксперимент по ползучести состоит в определении продольной деформации (относительного удлинения) как функции времени при постоянных, но различных между собой, продольном и поперечном направлениях.

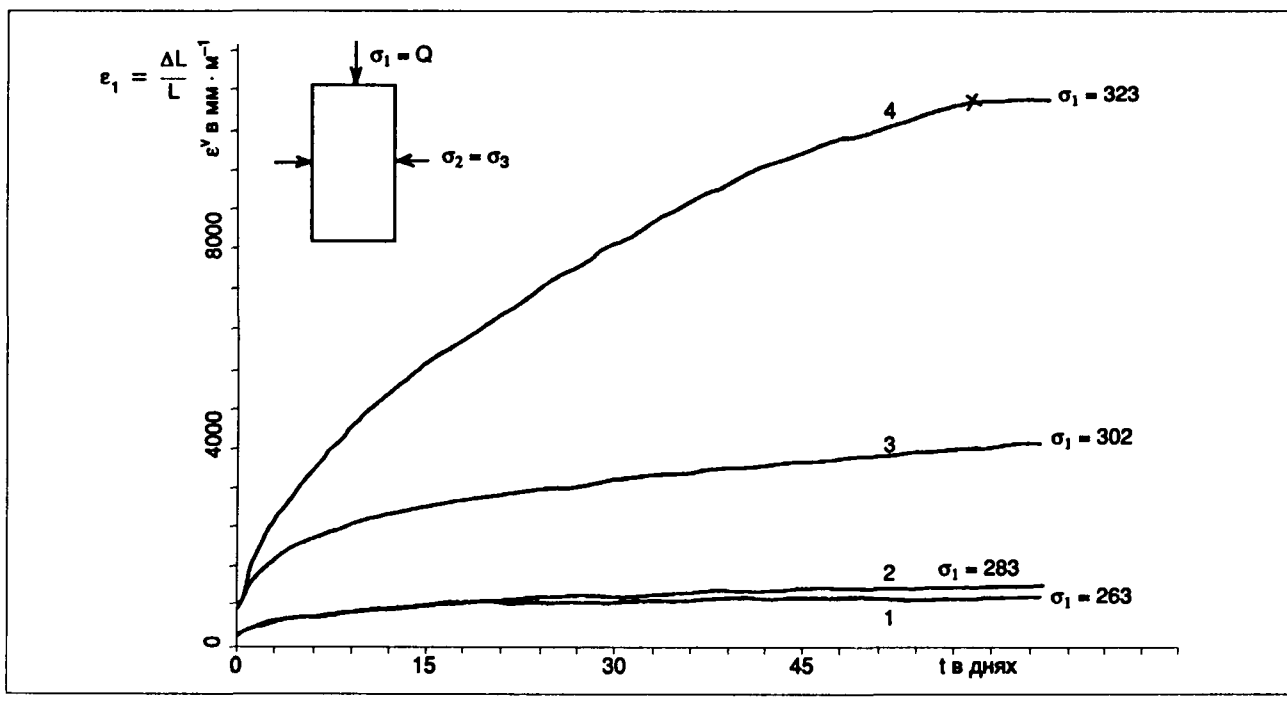
Для эксперимента по ползучести (s = const) закон Леметра, Менцеля и Шрейнера принимает вид

$$\dot{\varepsilon} = \frac{3}{2} \frac{s}{\sqrt{3J_2}} \cdot \left(\frac{\sqrt{3J_2}}{K}\right)^{\alpha} \cdot t^{\alpha} \quad \text{(формула Леметра, Борези и Деера).}$$

Значения параметров (α, β, K) находятся с помощью экспериментальных кривых (см. приведенный ниже график).

Исходя из закона Леметра, Менцеля и Шрейнера и используя метод трехмерных, или чаще всего двумерных осесимметричных конечных элементов (полости, как правило, обладают осевой симметрией с осью, совпадающей с осью скважины), можно рассчитать эволюцию полости под действием заданного закона изменения давления.

Машинное время ЭВМ, то есть стоимость моделирования, из-за сильной нелинейности реологического закона весьма велико. Поэтому предпочтительнее использовать приближенные аналитические зависимости, заменяя полость сферой или цилиндром.



Текучесть соли (нижняя соль Этрез, 1400 м, 55°C, $\sqrt{3I} = \rho_1 - \rho_2 - Q - P$

Изменение объема изолированной сферической полости в бесконечном изотропном пространстве, подчиняющемся закону Леметра, Менцеля и Шрейнера, описывается уравнением

$$\frac{dV}{V dt} = -\alpha\left(\frac{P_\infty - P}{A}\right)^{\beta/\alpha}\left(-\frac{\Delta V}{V}\right)^{\frac{\alpha-1}{\alpha}},$$

где

$$A = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{\beta+1}{\beta}} \cdot K \cdot \beta,$$

P_∞ – геостатическое давление на уровне центра полости,

P – среднее давление внутри полости,

$$\frac{\Delta V}{V} = \int_0^t \frac{dV}{V du} du,$$

V – полный объем полости (сумма объемов отстойника, остаточного рассола и свободного объема газа).

Это аналитическое выражение для вязкопластического случая дает хорошее представление об изменении объема полости за исключением периода сильного изменения давления, или сразу после него.

Различными авторами предложены другие менее простые аналитические решения для нелинейной вязкопластичности.

Лабораторные эксперименты выполняются по необходимости на гетерогенных образцах; таким образом, параметры реологических законов, основанные на этих экспериментах, имеют дисперсный характер. Поэтому необходимо выполнять эксперименты непосредственно на месте.

Эти эксперименты состоят в измерении дебита жидкости из полости при более или менее постоянном давлении (испытания на жидкости), либо при возрастании давления (испытания на газе). Из этих экспериментов, после расчетной оценки паразитных эффектов (дополнительное растворение после выщелачивания, термическое расширение), определяется скорость изменения объема полости. Значения параметров получаются путем сопоставления с аналитическим решением (сферическая полость).

Замечание: упругость каменной соли.

Полная деформация складывается из упругой и вязкопластической деформаций. Упругая деформация связана с напряжением соотношением

$$\varepsilon_e = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma - \frac{\nu}{E} \cdot Tr(\sigma) \cdot I,$$

где

E . 250 000 бар (модуль Юнга),

ν . 0,3 (коэффициент Пуассона).

Относительное изменение сферической полости за счет упругости равно

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3(1+\nu)}{2E}(P - P_\infty).$$

По своей величине (порядка тысячных долей) оно пренебрежимо мало по сравнению с предыдущей, могущей достигать десятков процентов.

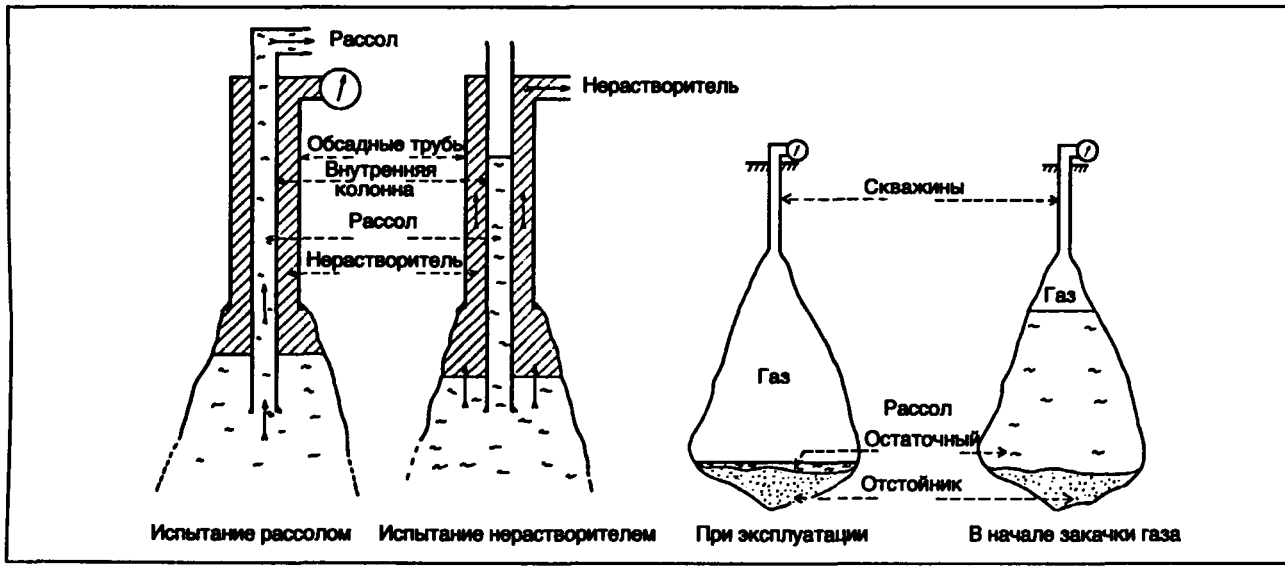
3.3.3.2. Размеры и расположение полости в пространстве

Размеры подземных полостей по экономическим соображениям определяются необходимостью одновременно обеспечить:

— устойчивость сооружения,

— герметичность резервуара,

— сохранение потенциальной емкости хранилища (сокращение потерь объема из-за текучести).



Испытания на месте

3.3.3.2.1. Устойчивость в отношении предупреждения разрушений

3.3.3.2.1.1. Учет опасностей

Массивная структура соли иногда кажется очень однородной, вместе с тем она бывает неоднородной, если содержит нерастворимые блоки, такие как мергели или ангидрид, или, если она представлена слоистыми пропластками. Поэтому условимся отличать проблемы устойчивости, связанные с солью как таковой, от тех, которые вызваны неоднородностью материалов и расположением вблизи пород, вмещающих массив соли.

3.3.3.2.1.1.1. Разрушение соли как таковой

Соль является материалом очень тягучим, который может выдерживать значительные деформации без разрыва, однако разрушение становится возможным:

— если минимальное давление в полости слишком низкое,
— если снижение давления в полости слишком быстрое,
— если деформация превосходит некоторый предел. Эта последняя предельная точка спорная и никогда не будет установлена в полостях хранилищ, даже в таких, которые представлены очень значительной конвергенцией (случай Эминанса). Разрушения опор шахт после сильной деформации наблюдаются часто, но необходимо отметить, что в этом случае противодавление нулевое и степень извлечения (отношение вынутого объема к полному объему) часто очень высокая.

3.3.3.2.1.1.2. Разрушение, связанное с неоднородностью и расположением вблизи вмещающих пород

Если не соблюдена достаточная "перемычка" соли на стенке или на кровле (или еще и сбоку, в случае полостей, расположенных на окраине купола), то по этой причине возможно "сдувание" (обваливание в связи с плохим сопротивлением растяжению вмещающих пород, особенно ангидритов).

В полостях хранилищ, где это явление наблюдалось, последствия были очень незначительными, но в случае эксплуатации галерей на небольшой глубине нередки разрушения вплоть до полного обрушения поверхности. При таких разрушениях могут иметь место непоправимые последствия в результате взаимодействия соли с водоносным горизонтом.

3.3.3.2.1.2. Требования к размерам с точки зрения предупреждения разрушения

Форма: избегать плоской кровли большой протяженности, выбирать компактную геометрию (близкую к сфере) или слабое радиальное распространение (вертикальные цилиндры).

Коэффициент извлечения, расстояния между полостями: часто дают определение типичного критерия: отношение расстояния между осями двух соседних полостей к сумме их наибольших горизонтальных протяженностей должно быть больше определенной величины, зависящей от инженерно-геологических характеристик массива.

Достаточная перемычка соли между полостью и породами, вмещающими массив соли.

Надлежащее расстояние между полостями и водоносными горизонтами.

Не слишком низкое минимальное давление.

Ограниченная скорость снижения давления.

3.3.3.2.2. Герметичность

Герметичность хранилищ углеводородов в соляных полостях обеспечивается непроницаемостью больших массивов соли. Максимальное давление хранимого флюида должно быть ниже давления гидроразрыва у башмака обсадной колонны. Это давление гидроразрыва может достигать градиентов порядка от 2,2 до 2,3 а с учетом коэффициента запаса максимальное давление хранимых флюидов соответствует градиентам, обычно заключенным между 1,6 и 2.

3.3.3.2.3. Сохранение потенциальной емкости хранилища

Соляные полости испытывают потери объема (вероятно слишком малые, чтобы быть заметными в короткий срок, принимая во внимание геологический масштаб времен) вследствие тягучести каменной соли. Это то, что называют неудачным образом явлением текучести. Скорость уменьшения объема зависит от разности между горным и внутренним давлениями. Эта разность обычно пропорциональна глубине, не следует размещать полости на слишком большой глубине.

Однако лабораторные испытания и испытания на объектах показали, что тягучесть соли, которая имеет естественную склонность к текучести, значительно меняется для различных массивов.

В заключение инженер, занимающийся размещением соляных полостей, должен для постоянства емкости сооружения заботиться о:

— размещении полостей в массивах мало тягучей соли; испытания на текучесть, проведенные в лаборатории на образцах, отобранных во время бурения разведочных скважин, позволяют получить параметры закона устойчивости, например, типа закона Леметра, Менцеля и Шрайнера, необходимые для любой модели прогнозирования текучести полостей,
— не выбирать слишком большие глубины: каковы бы ни были свойства хранимого углеводорода, 2000 м представляются максимальными (глубина полостей для хранения газа обычно заключается между 700 и 1700 м),
— назначать минимальное рабочее давление достаточно высоким,
— исключать бесполезный простой каверны при низком давлении (правила эксплуатации).

3.3.4. Термодинамические аспекты хранения газа в полостях: модель эксплуатации

Особый темп эксплуатации полостей; высокая амплитуда изменений давления, значительные темпы отборов, вызывают несколько технических про-

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ

	Теплопроводность ($Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$)	Удельная теплоемкость ($Дж \cdot кг^{-1} \cdot К^{-1}$)	Плотность ($кг \cdot м^{-3}$)
Сталь (трубы)	48	430	7 800
Цемент (затвердевший раствор)	1 - 1,5	1 000 - 1 700	2 000 - 3 000
Осадочные породы (соли, ангидрид, исключая кварцит)	1,4 - 2,5	700 - 1 500	1 500 - 2 500
Каменная соль (галит)	5 - 6 при 30°C 4 - 5 при 70°C	880	2 165
Ангидрид	4,7	520	2 960

Технические характеристики различных материалов скважин и пород.

Местность и горизонт	Приблизительные глубины (в м, от поверхности земли)	Геотермический градиент ($К \cdot м^{-1}$)	Теплопроводность ($Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$)
Терсанн:			
Поверхность – кровля стампийского яруса	0 – 900 - 1 050	0,035	2,2
Стампийский ярус	900 - 1 050 – 1 390 - 1 550	0,05	1,54
Сануазский ярус (серия соляных горизонтов A и B)	1 390 - 1 550 – 1 510 - 1 700	0,0168	4,66
Этрец:			
Поверхность – кровля верхней соли H4	0 – 650 - 700	0,045	1,9
Верхняя соль, кровля H4 – кровля промежуточной серии	650 - 700 – 1 100 - 1 150	0,015	5,7
Промежуточная серия - кровля нижней соли H6	1 100 - 1 150 – 1 300 - 1 350	0,027	3,15
Сануазский ярус (нижняя соль)	1 300 - 1 350 – 1 900 - 2 000	0,017	5

Теплопроводность и геотермический градиент отложений районов Этрец и Терсанн.

блем. Эти проблемы, характерные для хранилищ газа в полостях, эксплуатируемых при снижении давления, проявляются при отборах газа с высоким темпом снижения давления и температуры в полости и усугубляются в скважинах потерями давления и риском образования гидратов. В самом деле, газ увлажняется во время пребывания в полости в связи с присутствием остаточного рассола на дне полости. Эксперимент показывает, что влагосодержание (200 - 400 мг на $м^3$ (н)), замеренное на устье скважины при отборе газа остается ниже влагоемкости в условиях дна полости (500 - 1500 мг на $м^3$ (н)); сильная гигроскопичность хлористого натрия в основном объясняет этот результат. Высокие требования транспорта (50 мг на $м^3$ (н)) требуют обязательное использование колонн гликолевой осушки.

Для того чтобы предусмотреть, а затем и оптимизировать рабочие характеристики полостей, можно применять модель эксплуатации, позволяющую рассчитывать изменение:

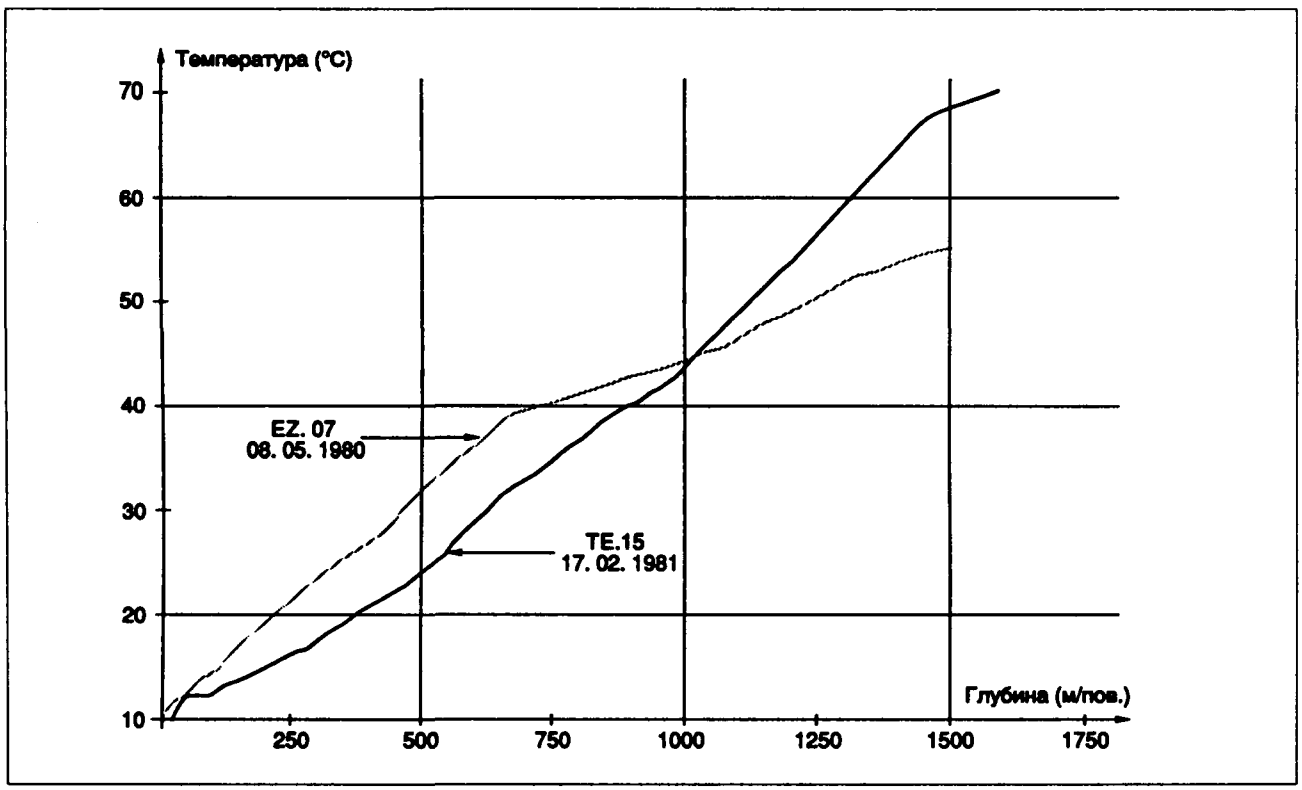
— объема свободного газа в полости (механический аспект, см. § 3.3.3.1),

— средних давления и температуры в полости,

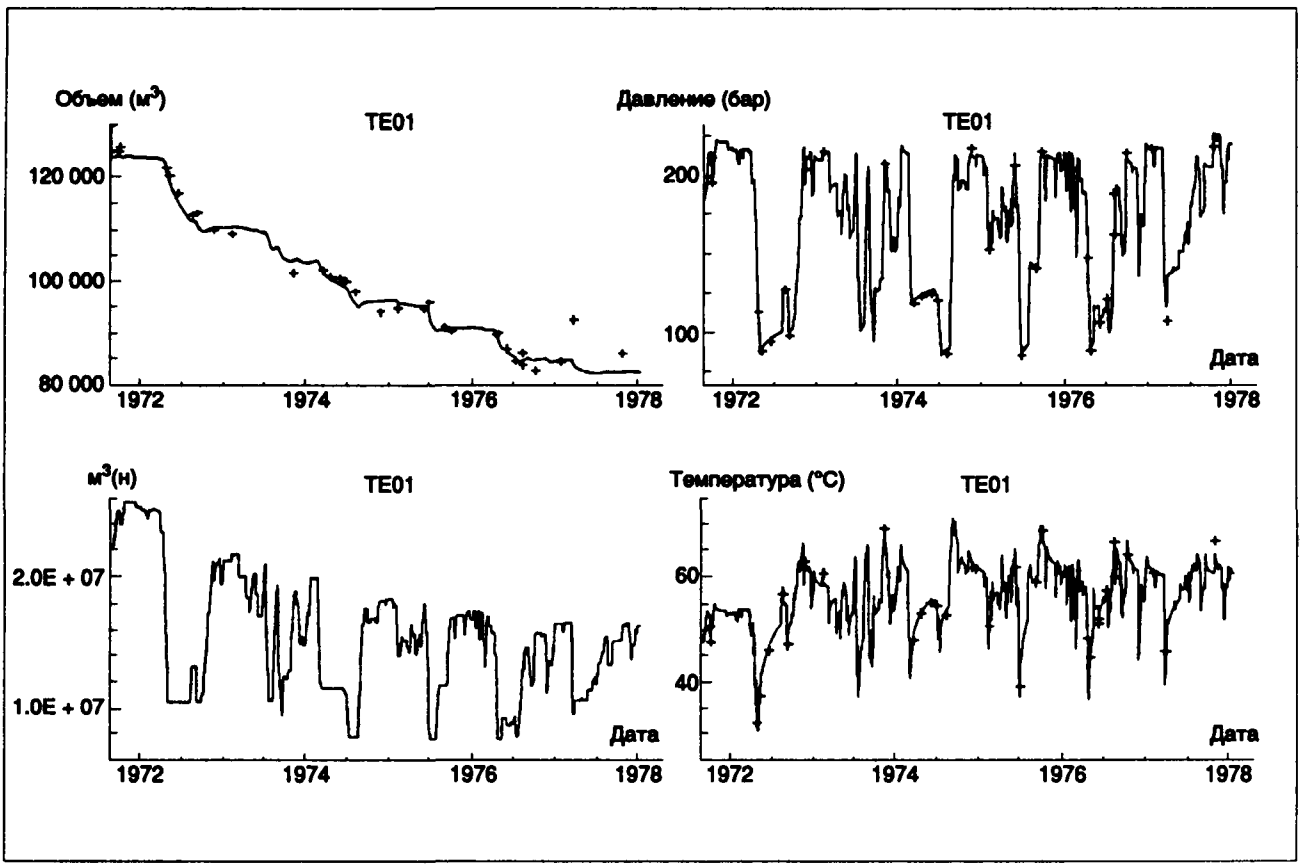
— давления и температуры в любой точке скважины.

Такая модель должна учитывать теплообмен между газом и породами. Необходимо решение уравнения теплопроводности (теплоотдача через проводимость в породах) и достоверное знание геотермического градиента (полученного путем термометрии, выполненной через несколько недель после окончания бурения скважин), тепловых свойств пород и технических элементов скважин.

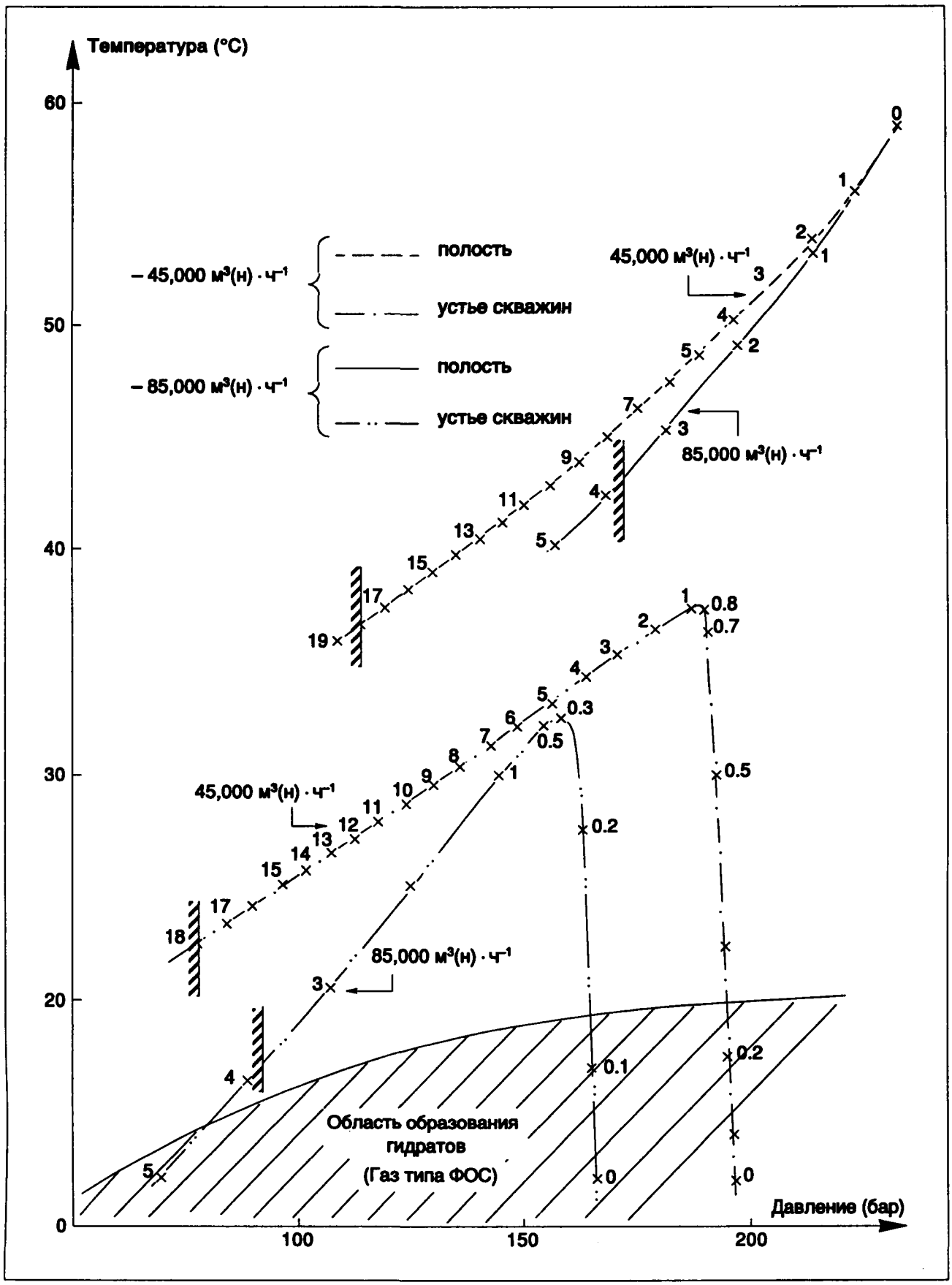
Примеры результатов моделирования с помощью такой модели представлены на рисунках с. 408.



Приближенный профиль геотермического градиента в Этрец и Терсанн



Термодинамическое моделирование эксплуатации полости, (+) замеры давления и температуры в полости; объем по уравнению состояния газа



Полость Терсанн (свободный объем газа – 204000 м³). Графики эксплуатации: изменение давления и температуры в полости и на устье скважин при отборе с постоянным дебитом (градуировка показывает продолжительность в днях с начала отбора).

3.3.5. Наблюдение за полостями; контроль за эксплуатацией

Эксплуатационный контроль состоит в замере различных величин (например, давления и температуры на устье скважины), от которых зависит хорошая работа установок на поверхности (осушка, компрессия и т.д.), а также в более специфических замерах, чтобы обеспечить целостность подземного сооружения, и в наблюдении за изменением его свободного для газа объема.

Свободный для газа объем может быть получен из уравнения состояния газа:

$$P \cdot V = S \cdot \frac{P_0}{T_0} \cdot Z \cdot T$$

с:

— замерами средних для полости давления и температуры газа (каротаж),

— учетом того, что запасы (S) – есть интеграл замеренных расходов газа.

Ввиду погрешностей измерения (порядка процента), погрешность запасов увеличивается приблизительно с 1% в конце создания хранилища (первая закачка газа) до почти 20% в конце десятого полного цикла закачка–отбор.

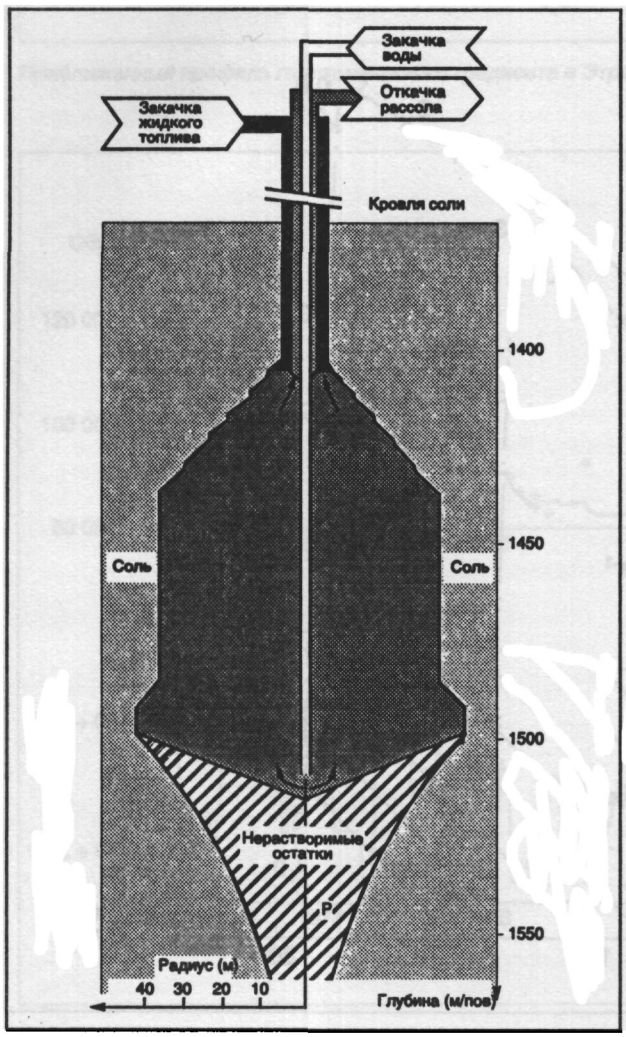
Метод мечения газа индикатором (например, водородом) позволяет получить непосредственно запасы с погрешностью порядка процента.

Исходя из погрешностей измерения давления (порядка 1%), абсолютной температуры (несколько тысячных долей) и особенно коэффициента сжимаемости газа (от порядка 1 - 2% для давлений порядка 100 бар, до 5% для давлений выше 200 бар), погрешность определения объема составит от 5 до 7% (по сравнению с запасами, полученными индикаторными методами).

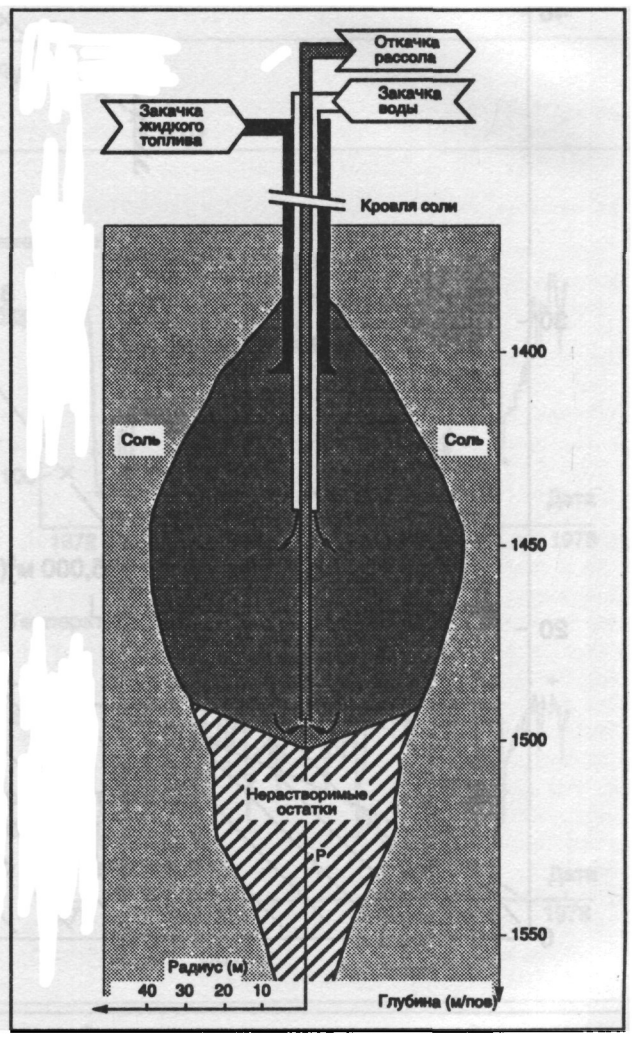
Начальный свободный объем газа (в конце первой закачки газа) может быть оценен тремя методами:

— эхометрия (замер формы локатором), осуществляемая перед закачкой газа (полость с рассолом); замер положения границы раздела газ-рассол в конце закачки газа (γγ-каротаж и инклинометрия) позволяет по объему, определенному с помощью эхометрии, определить свободный объем газа (погрешность до 6%),

— учет извлекаемого рассола,



Размыв прямой.



Размыв обратный.

— уравнение состояния газа с учетом количества газа и замером давления и температуры в конце закачки газа (погрешность 7%).

Примечание:

Можно проводить эхометрию во время эксплуатации (эхометрия в газе) в полостях, центральные трубы которых, необходимые для извлечения рассола во время закачки газа, извлечены под давлением ("snubbing") или опущены на дно.

3.3.6. Размыв полостей

Вымывание полостей осуществляется пресной или слабо соленой водой начиная от скважины, которая в дальнейшем используется для эксплуатации.

Два процесса размыва схематизированы на стр. 410.

Глубины башмаков колонн для закачки воды и возврата рассола должны время от времени уменьшаться в соответствии с подъемом уровня нерастворимых остатков, которые осаждаются на дно полости, размыв организуется отдельными "проходами" путем маневрирования трубами, осуществляемого с помощью легкой буровой установки ("pulling unit"). Эхометрия (замер формы локатором), осуществляемая после окончания определенного этапа размыва, позволяет контролировать развитие полученной формы (см. рисунок напротив).

Изменение формы кровли контролируется с помощью инертного флюида, находящегося в контакте с солью (жидкое топливо или пропан).

Программы расчета, более или менее сложные, позволяют моделировать развитие формы плоскости. Они базируются на изучении конвекционного движения (развивающегося с начала закачки воды); баланса масс (воды и соли) и кинетики растворения хлористого натрия.

По своему принципу обратный размыв позволяет получить рассол с более высоким содержанием хлористого натрия (290 - 310 кг · м$^{-3}$) по сравнению с техникой прямого размыва (230 - 285 кг · м$^{-3}$).

Продолжительность размыва одной полости объемом 300000 м^3 может изменяться от 1,5 лет при расходах воды 300 м^3 · ч$^{-1}$ до приблизительно 5 лет при расходах порядка 90 м^3 · ч$^{-1}$.

Лучше проводить размыв полостей одновременно, чем последовательно (выше коэффициент увеличения объема и меньше потери напора).

Примечание:

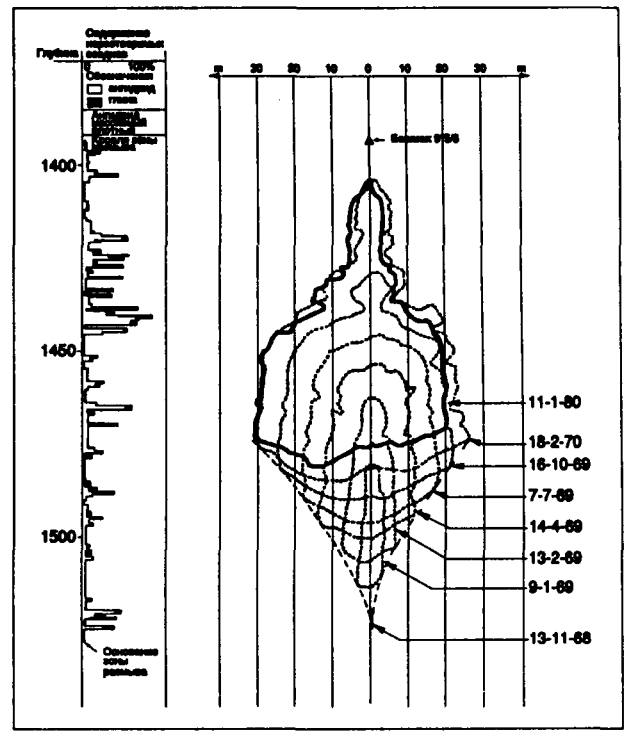
Расход получаемого рассола немного ниже расхода нагнетаемой воды (приблизительно 97%).

3.3.7. Эксплуатационное газовое оборудование

3.3.7.1. Скважины

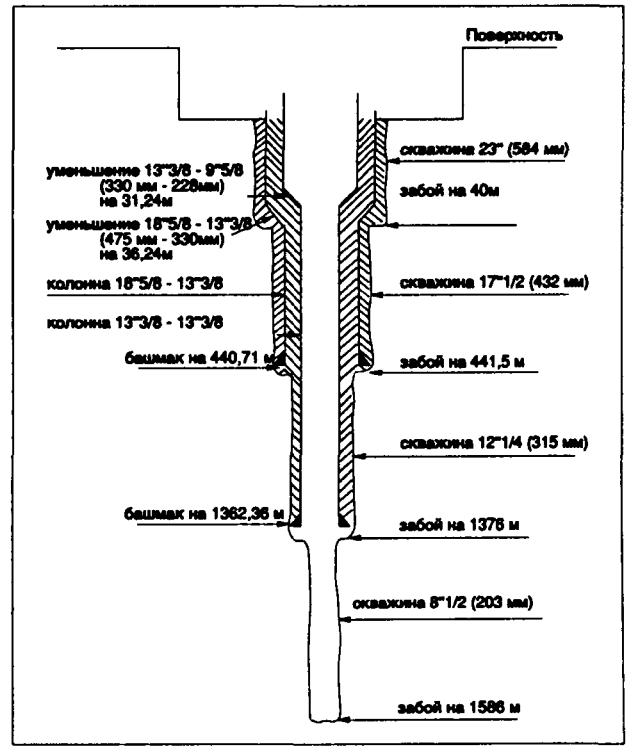
Полость характеризуется одной скважиной, которая служит одновременно для ее размыва и газовой эксплуатации.

Нет контрольной скважины.



Последовательные эхометрические измерения полости TeO_2.

При условии соответствующих размеров (диаметр эксплуатационной скважины должен быть значительным, в частности, для того чтобы ограничить потери давления при размыве и эксплуатации), разведочная скважина может быть использована для сооружения полости.



Пример технического разреза скважины (G.D.F., Этрез, Терсанн).

	Размещение – функция	Оборудование
Контур воды	· Источник пресной или слабосоленой воды — море, океан, река — водоносный горизонт · Транспорт воды от источника до центральной станции размыва · Центральная станция — Возможное отделение песка — Буферное хранение (необязательно) — Общий учет воды — Нагнетание — Учет по скважинам · Распределительные линии: центральная станция – скважины	— погружной центробежный насос — скважины, оборудованные погружными центробежными насосами — 1 или несколько водоводов (1 на водяную скважину) — песколовка (необязательна) — бассейн или емкость под давлением с инертным газовым покрытием (азот) — Счетчик — Центробежный насос, увеличивающий давление для преодоления динамических потерь давления в распределительных линиях и скважинах, и статических потерь давления соответствующих разности плотностей воды (1) и рассола (1, 2) в скважинах — Счетчики — 1 линия водовода на полость.
Полость–скважины	— Площадка — Скважины	— Устройство для закачки инертного флюида для контроля кровли полости — Обустройство состоит из двух концентрических колонн; вода направляется в межтрубное пространство между этих двух колонн, рассол по внутренней колонне или наоборот; инертный флюид (жидкое топливо) подается между внешней колонной и обсадной эксплуатационной колонкой
Контур рассола	· Соединительные линии скважины – центральная станция · Центральная станция — Учет по скважинам — Фильтрация и общий учет рассола — Отстаивание — Буферное хранение — Транспортировка · Удаление рассола · Сброс	— 1 линия рассоловода на полость — Счетчики — Фильтр, счетчик — Бассейн или емкости под давлением — Бассейн или емкости под давлением (азотное покрытие) — Центробежный насос — Рассоловод — Океан, море, водоносный горизонт воды непригодной для потребления или промышленный потребитель

Оборудование необходимое для размыва.

3.3.7.1.1. Бурение и крепление

Последняя обсадная колонна должна быть значительного диаметра (9" 5/8 во Франции (приблизительно 230 мм), 13" 3/8 (приблизительно 330 мм) в ФРГ и Соединенных Штатах).

Ее цементирование и проходка контролируются каротажем CBL-Vd.

3.3.7.1.2. Обустройство газовой скважины

Для первой закачки газа она должна состоять из двух концентрических колонн. Газ закачивается по межтрубному пространству между двух колонн, а рассол извлекается обратно по центральной колонне, башмак которой должен находиться в полости как можно ниже.

Центральная колонна становится ненужной после первой закачки газа, она часто (в Соединенных Штатах и ФРГ) извлекается под давлением ("snubbing" большого диаметра); эта операция ставит несколько проблем безопасности (отсутствие предохранительного клапана при закачке газа и операции "snubbing"), впоследствии предохранительный клапан может быть установлен на кабеле. Преимуществом этого типа обустройства является максимальное снижение потерь давления при эксплуатации (в качестве примера, при обустройстве с помощью "snubbing" -операции 7", приблизительно 178 мм, коэффициент m будет в десять раз меньше, чем при обустройстве с эксплуатацией по межтрубному пространству 7" × 4", или приблизительно 178 мм × 102 мм):

$$P_y^2 = \lambda P_3^2 \pm \mu Q^2.$$

При втором типе обустройства, "кольцевом" (как практикует "Gaz de France"), потери давления будут значительными; кроме того такое обустройство будет достаточно сложным (предохранительный клапан в центральной колонне и в межтрубном пространстве).

3.3.7.2. Поверхностное оборудование

Его роль аналогична роли, указанной в § 3.2.4.2 для хранилищ в водоносном горизонте. Однако отсутствует необходимость обессеривания.

Схема на стр. 413 предполагает, что сжатие газа при отборе необязательно (минимальное давление в полости выше давления в газопроводе).

Осушка газа может быть централизованной на станции, одна установка, обрабатывающая продукцию нескольких полостей; устройство для ввода метанола на устье скважин позволяет исключить образование гидратов на участке скважины–станция. Учет расходов для каждой полости осуществляется в этом случае на входе в установку осушки.

3.3.8. Стоимость хранения в соляной полости

Эксплуатация группы полостей для нужд подземного хранения требует меньших затрат, по сравнению с хранением в водоносных пластах поскольку:

— более легкое определение местоположения куполов соли и пластов большой толщины гравиметрией или сейсмикой,

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ

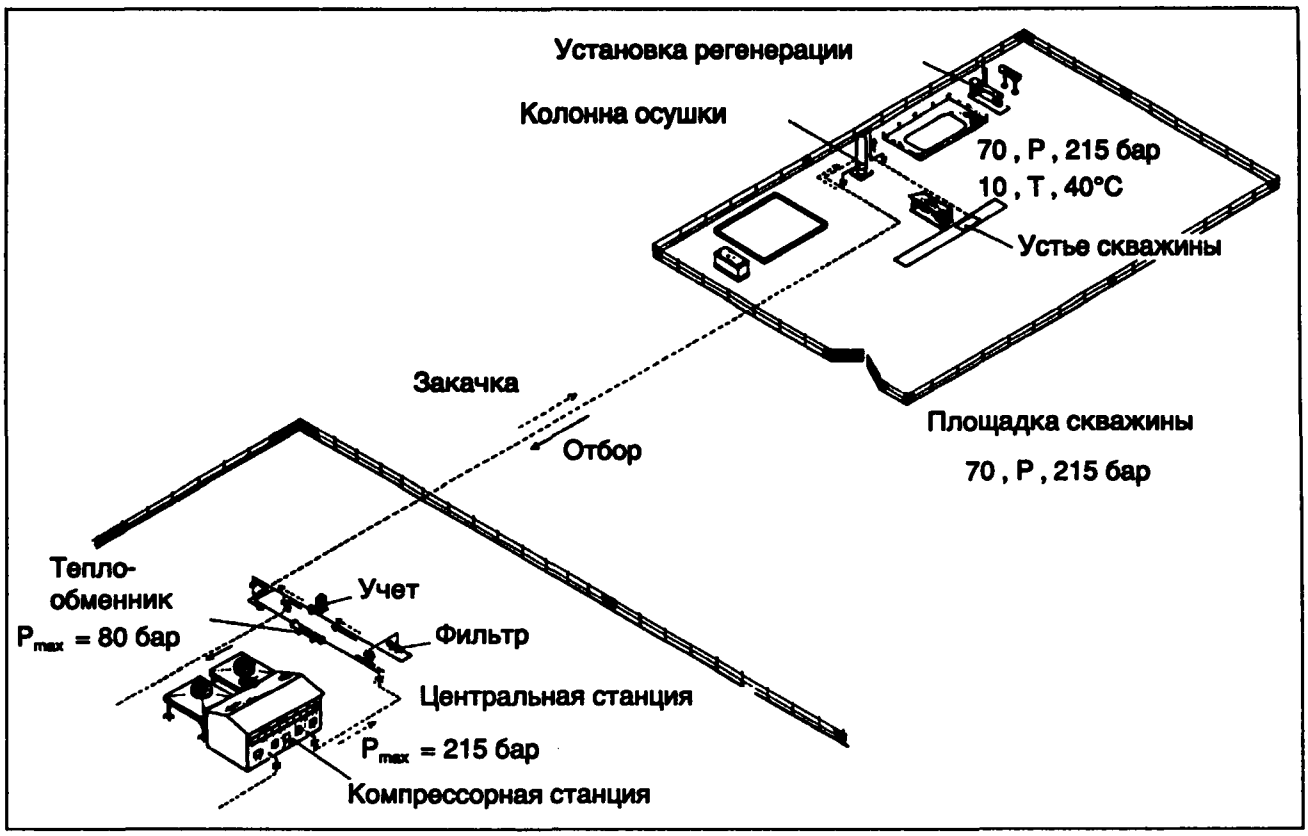


Схема оборудования для одной полости.

— меньше число разведочных скважин, используемых впоследствии для эксплуатации,
— наиболее крупные залежи соли уже эксплуатируются в горнодобывающей промышленности (в основном разведка поташа и каменной соли).

Характерное оборудование, применяемое для проходки полостей (водяные скважины, коллекторы воды и рассола, насосные установки, бассейн для резервных запасов, рассолопровод):

— относительно простое, если район находится около моря (вода для размыва и сброс для рассола),
— весьма сложное, если район удален от места сброса (море, заброшенные рудники, пласты минерализованной воды и т.д.) или от промышленных предприятий, использующих рассол.

Капитальные вложения, предшествующие на несколько лет вводу в эксплуатацию первой полости, увеличивают их влияние на стоимость нормального кубометра полезного объема. Однако,если установки для размыва сооружены, выгодно максимально развивать емкость хранилища по причине снижения второстепенных затрат в дополнительные полости (часто не ниже,чем затраты в другие виды хранения).

Оптимальная глубина для размещения полостей находится между 1 000 и 1 300 м; она получается в результате компромисса между максимальными запасами, которые в основном пропорциональны глубине, и минимальными запасами (буферными), соответствующими минимальному давлению, определенному по критериям устойчивости.

Распределение основных статей расходов для двух хранилищ "A" и "B", расположенных на различных глубинах (без учета стоимости оборудования, которая значительно меняется в зависимости от местоположения, общих установок для размыва) приводится ниже.

Несмотря на различия, стоимости этих двух хранилищ имеют один и тот же порядок величин.

A%		B%
16	Буферный газ	37
25	Размыв	21
25	Скважины	22
13	Подготовка-учет	13
21	Сжатие	7

930	Глубина (м)	1 430
20,7	Полезные запасы (гм^3 (н))	27
6	Буферный газ (гм^3 (н))	17
30	Минимальное давление (бар)	80
133	Максимальное давление (бар)	237
205 000	Свободный объем газа (м^3)	205 000

(*) Сжатие при закачке и отборе (давление в газопроводе: 80 бар пиковый расход: 1 гм^3 (н) в сутки на полость).

3.3.9. Список литературы

3.3.9.1. Конгрессы

— Symposium on salt. – 1. Cleveland, Ohio, États-Unis (1962); 2. Cleveland, Ohio, États-Unis (1965); Cleveland, Ohio. États-Unis (1969); 4. Houston, Texas, États-Unis (1973); 5. Hambourg, République fédérale d'Allemagne (1978); 6. Toronto, Canada (1983). Edité par The Northern Ohio Geological Society, Inc (États-Unis).

— Rockstore, subsurface space. – 1.Stockholm, Suede (1977); 2. Stockholm, Suède (1980). Ed. Pergamon Press.

— Congrès international de mécanique des roches. International Society for Rock Mechanics (I. S. R. M.). – Congrés annuels et congrés international tous les 3 ans. Ed. A. A. Balkema (Rotterdam).

— Solution Mining Research Institute. – 812 Muriel Street Woodstock, Illinois 60098, États-Unis. Manchester, Grande-Bretagne (1983).

— Symposium international sur la reconnaissance des sols et des roches par essais en place. – B. R. G. M., B. P. 6009, 45060 Orléans Cedex, Paris (1983).

— Association technique de l'industie du gaz en France (A. T. G.). – Congrès annuels.

— World Gas Conference (union internationale de l'inustrie du gaz, Grütlistrasse, 44-CH 8027 Zurich BP 658).

— The Mechanical Behavior of Salt. – Proceedings of the conferences. Trans Tech Publications. P. O. Box 266, D-3392 Claustal-Zellerfeld, République fédérale d'Allemagne. 1. Pensylvania, États-Unis (1981); 2. Hannover, République fédérale d'Allemagne (1984).

3.3.9.2. Журналы

— International Journal of Rock Mechanics and mining science and geomechanics abstracts. Ed. Pergamon Press.

— Revue francaise de géotechnique. – Ed. Association amicale des ingenieurs anciencs élèves de l'École nationale des Ponts-et-Chaussées, 28, rue des Saints-Peres, 75007 Paris.

— Industrie minérale, mines et carrieres. – 19, rue du Grand Moulin, 42029 Saint-Étienne Cedex.

3.3.9.3. Книги

— C. A. Baar. – Applied Salt. Rock Mechanics. The *in situ* Behavior of Salt Rocks. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. Oxford, New York (1977).

— W. Dreyer. – Underground Storage of Oil and Gas in Salt Deposits and Other Non-Hard Rocks. halsted Press, New York, Wiley Ltd., Chichester (1982).

— L. H. Gevanthan et J. Lorenz, U. S. Department of Commerce. – National Bureau of Standard; Physical Properties Data for Rock: Salt, États-Unis (January 1981).

— K. H. Lux. – Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen in Saltz, kavernenbau. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1984).

— H. Reginald Hardy. Jr. – theorical and Laboratoty Studies Relative to the Design of Salt Caverns for the Storage of Natural Gas (1982).

— Stockages souterrains de gaz. Manuel pour le transport et la distribution du gaz, titre XIII, A.T.G., Paris (1987).

3.3.9.4. Сообщения

— M. Boucher, D. Boulanger, J-P. Saintives et P. Kuntz. – Lacunae and inclusions in the halite from Valence and Bresse saliferous basins. 5th Symposium on Salt. Hambourg (1978).

— M. Boucher, P. Boucly et J. Carrière. – Problèmes posés par le comportement mécanique du sel dans la création et le contrôle des cavités de stockage de gaz naturel. Congrès U. I. I. G., Toronto (1979).

— P. Boucly et J. Legreneur. – Hydrocarbon storage in cavities leached out of salt formation. Rock-store 80. Stockholm (1980).

— P. Boucly. – Comportement mécanique des cavités dans le sel. État actuel de nos connaissances. A. T. G. (1981).

— P. Boucly. – *In situ* experience and mathematical representation of the behaviour of rocksalt used in storage of gas. 1re Conférience sur le comportement mécanique du sel. Pennsylvania State University Trans Tech Publications (November 1981).

— P. Boucly. – Expérience *in situ* et modélisation du comportement des cavités salines utilisées pour le stockage du gaz. *Revue francaise de géotechnique.* №18 (février 1982).

— M. Duchassin, M. Dussaud et B. Hugout. – Natural Gas Underground Storage in Salt Cavities. *Pétrole Informations* (7 juin 1984).

— M. Dussaud et J-P. Coquand. – Détermination du stock en place dans une cavité de stockage naturel par une méthode de tracage chimique à l'hydrogène. A. T. G. (1977).

— J. Fine, S. M. Tijani, G. Vouille, P. Boucly. – Détermination expérimentale de quelques paramètres élastoviscoplasiques des roches. Application aux cavités de stockage de gaz en couches salines profondes. 4e Congres international de mécanique des roches. Société internationale de mécanique des roches. Ed. A. A. Balkena. Rotterdam (1979) et Montreux (1979).

— B. Hugout. – Comportement thermodynamique du gaz dans les cavités de stockage et dans les puits de production. A. T. G. (1982).

— B. Hugout and M. Dussaud. *In situ* study of mechanical behaviour of storage cavities leached out of salt. Symposium international "Essais en place". Paris (1983).

— B. Hugout, E. Pernette and M. Dussaud. – *In situ* studies of the mechanical comportment of solution mined cavities. 6e Symposium sur le Sel. Toronto (1983).

— B. Hugout. – Mechanical behaviour of salt cavities; *in situ* tests; model for calculation the cavity volume evolution. Deuxième conférence sur le comportement mécanique du sel. Hanovre (1984).

— B. Hugout. – Comportement mécanique des cavités salines: essais en place; modèle de calculde l'évolution du volume des cavités. *Revue Industrie minérale, mines et carrières* (janiver 1985).

— J-P, Lasneret et D. Vernet. – Le stockage souterrain d'Etrez. Aménagements de lessivage et premiers résultats. A. T. G. (1978).
— Pernette et M. Dussaud. – Tersanne and Etrez underground storages. Leaching forecast and simulation of cavities in salt layers with insolubles. Solution, Mining Research Institute Meeting. Manchester (1982).
— M. Pottier ét J. Leguillette. – Le stockage souterrain de gaz naturel dans le sel. Réalisation de Tersanne, A. T. G. (1971).
— M. Pottier et B. Estève. – Simulation of gaz storage cavity creation by numerical methods. Symposium on Salt. Houston (1973).
— M. Potier et M. Dussaud. – Problemès de métrologie dans la surveillance des cavités de stockage dans le sel. A. T. G. (1975).
— C-B. Roux et M. Pottier. – Études relatives à la création et à l'exploitation de cavités de stockage de gaz dans des couches de sel. Congrès U. I. I. G. Nice (1974).
— S. M. Tijani, G. Vouillé, B. Hugout. Le sel gemme en tant que liquide visqueux. 5e Congrès international de mécanique des roches. Societé internationale de mécanique des roches. Ed. A. A. Balkema. Rotterdam (1983) et Melbourne (1983).

3.4. ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ С.Н.Г.

Что касается пропана и бутана, то использование подземного пространства позволяет располагать в экономически выгодных условиях обширными объемами хранения в условиях большой безопасности, связанных с использованием недр.

Используются два вида хранения:

— в соляных полостях,
— в искусственных выработках.

В обоих случаях пропан и бутан будут храниться в почти жидкой форме, при 15°C достаточно достигнуть соответственно давления в 1,1 бар и 2,3 бар, чтобы получить сжижение, это давление легко получить в недрах на глубине порядка сотни метров.

3.4.1. Хранение в соляных полостях

3.4.1.1. Проходка полостей

Используемая техника и встречающиеся проблемы те же самые, что были описаны в разделе 3,3, однако следует отметить, что глубины обычно меньше и объемы менее значительные.

Кроме того, так как эксплуатация всегда осуществляется под давлением колонны рассола (см. § 3.4.1.2), проблемы устойчивости каверн практически не возникают и изменения формы менее важны.

В конце размыва, как и для природного газа, производят испытания на герметичность в соответствии с правилами.

3.4.1.2. Эксплуатация

Чтобы помещать и извлекать С.Н.Г. в жидком виде, необходимо, чтобы полость была всегда заполнена рассолом и С.Н.Г., разделение между двумя несмешиваемыми флюидами происходит легко в связи с различными плотностями. Давление будет соответствовать давлению колонны рассола над поверхностью раздела.

На поверхности необходимо располагать запасами насыщенного рассола, объем которого равен объему полостей.

Эта манипуляция с насыщенным рассолом ставит многочисленные проблемы (отложения соли в случае перенасыщения, разбавление рассола дождями).

Можно также предусмотреть эксплуатацию с помощью пресной воды, регулярно контролируя с помощью эхометрии форму и размеры полости. Это решение позволяет увеличивать емкость хранилища.

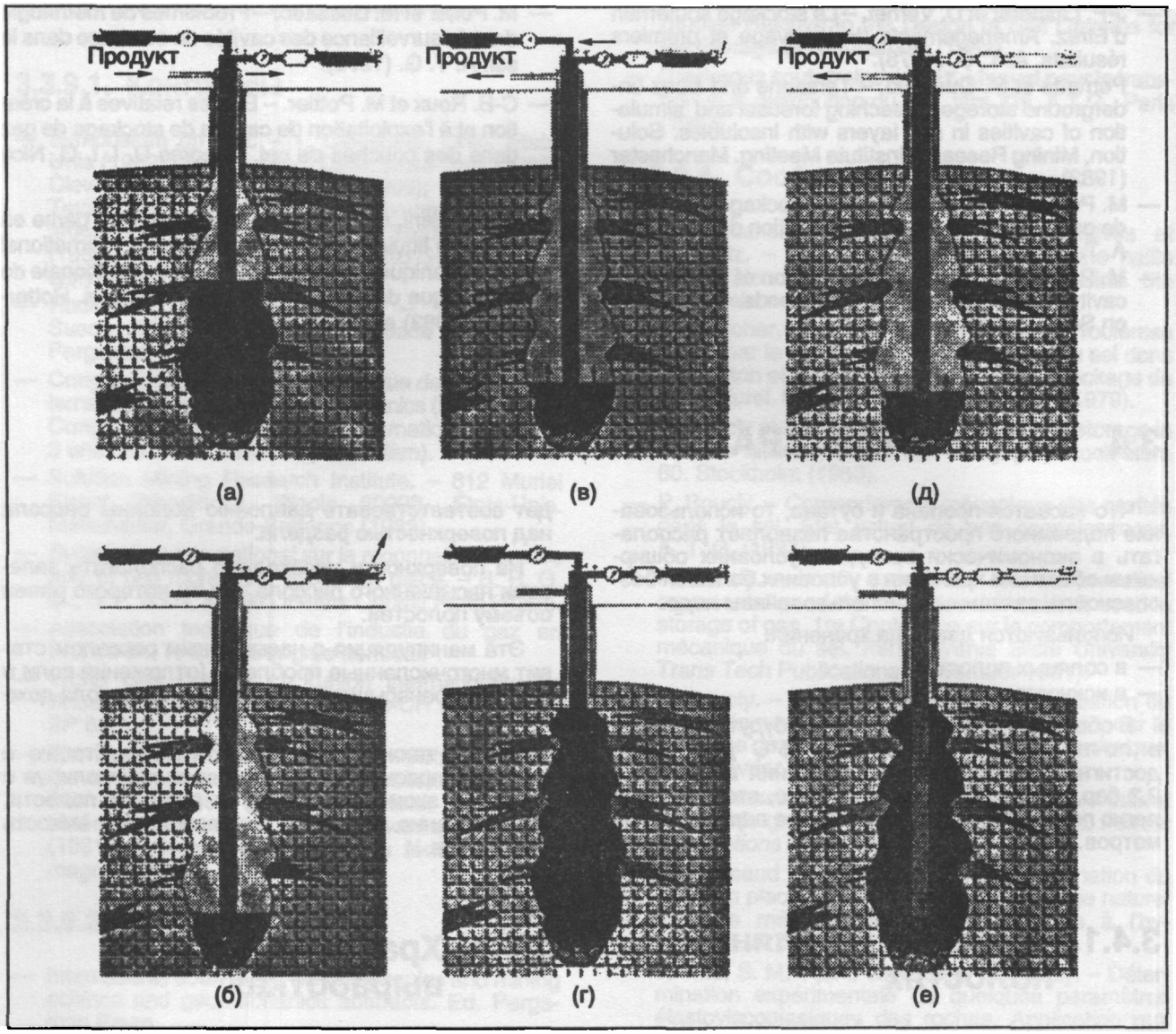
3.4.2. Хранение в горных выработках

3.4.2.1. Условия хранения

Необходимо на достаточной глубине (давление паров продуктов) иметь герметичные, устойчивые полости, порода не должна взаимодействовать с продуктом. Полости в соли отвечают этим условиям и, особенно, благодаря своей пластичности, порода совершенно непроницаема. Не то же самое для других пород: гранит, известняк, глина, которые могут быть трещиноватыми, проницаемыми или легко деформируемыми. Кроме того, необходимо, чтобы проходка велась в экономически приемлемых условиях. Необходима тщательная геологическая разведка района.

3.4.2.2. Динамическая герметичность

За исключением соли и пластических глин, встречающиеся в недрах породы, которые могут легко поддаться проходке и давать устойчивые выработки, обычно проницаемы (мел, известняк) и/или трещиноваты (гранит).



Эксплуатация размытых полостей: а и б – хранение; в и г – отбор с рассолом; д и е – отбор с водой

Герметичность выработки (или точнее камеры) будет получена, если поместить ее ниже гидростатического уровня воды (зеркала грунтовых вод).

Комплексное изучение (моделирование, исследования взаимодействия между скважинами) распределения давления и движения воды вокруг полостей должно быть выполнено с учетом сезонного изменения пьезометрического уровня. В случае необходимости можно рассмотреть подпитку водой (закачка через скважины).

3.4.2.3. Проходка

Используемая техника та же, что и при горных работах (прохода туннелей и рудников). Изучение устойчивости должно установить размеры камер и галерей и целиков, которые их разделяют.

Удаление обломков может осуществляться через скважины или наклонные галереи, отверстия, которые служат также для введения машин для проходки и транспортирования.

В случае герметичных, пластичных пород (глина) должна быть рассмотрена необходимость крепления (бентонитовый камень).

3.4.2.4. Эксплуатация

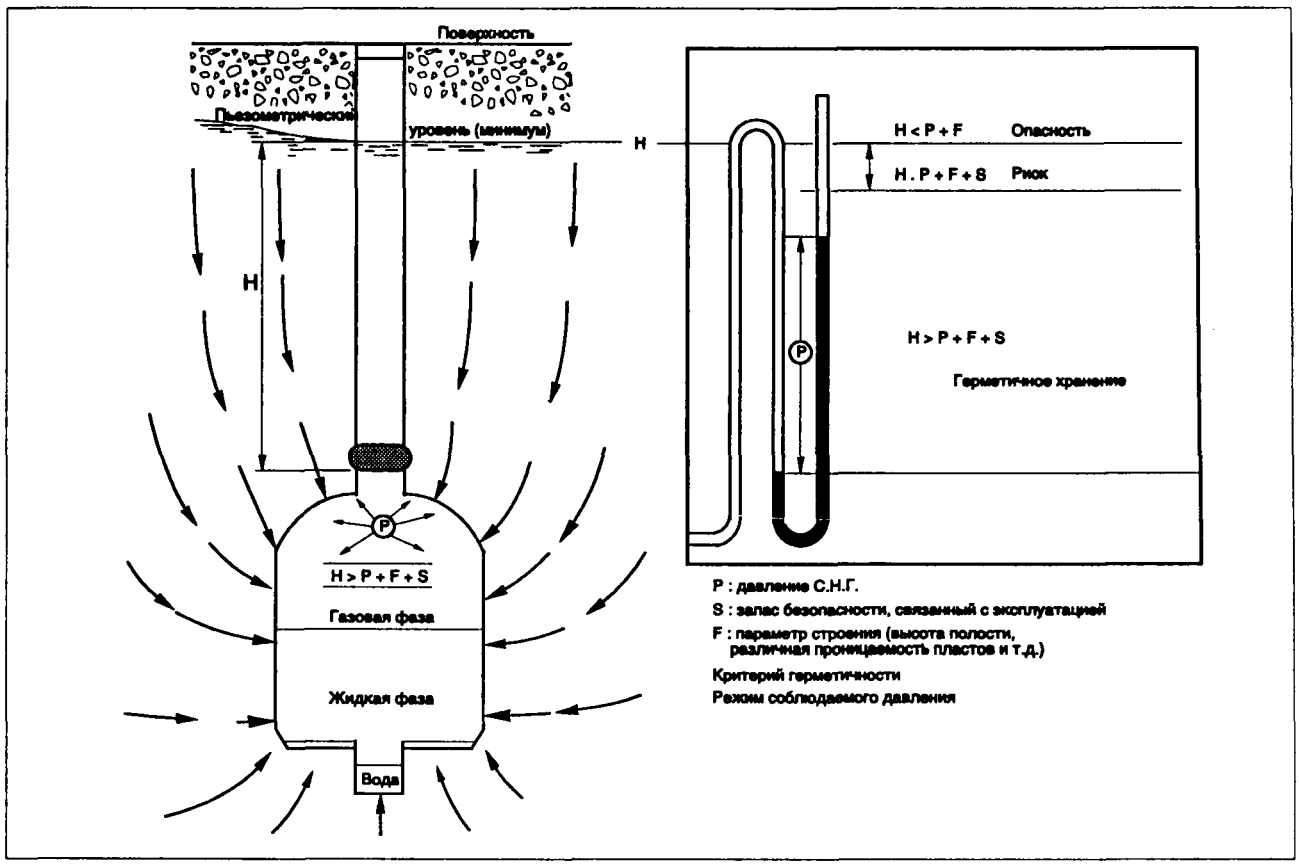
В случае проницаемых пород будет постоянное поступление воды в хранилище (динамическая герметичность).

Эксплуатация будет происходить:

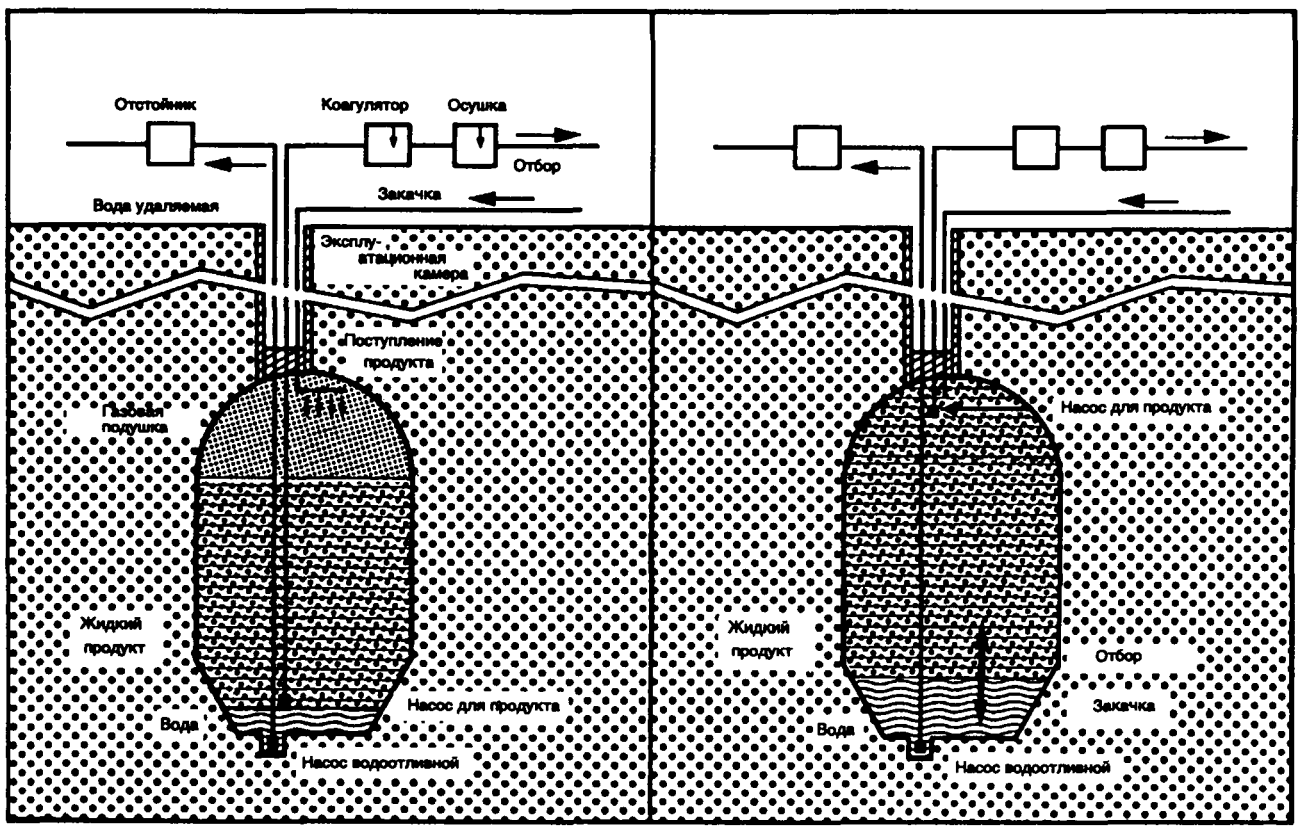
— или при постоянном уровне воды с зоной газа над углеводородами,
— или при меняющемся уровне воды, выработка всегда заполнена С.Н.Г. + вода. Тогда при отборе необходимо иметь запас воды для закачки.

Контрольные скважины позволяют постоянно следить за изменением пьезометрического уровня.

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ



Определение критерия герметичности хранения в горной выработке



Два способа эксплуатации: в выработке с постоянным уровнем воды (слева) с изменяющимся уровнем воды (справа).

3.5. ДРУГИЕ ВИДЫ ХРАНЕНИЯ

Как указано ниже в таблице, можно использовать старые шахты. Имеется два хранилища в Бельгии в старых угольных шахтах.

Очевидно, нужно проверить герметичность будущего хранилища, что само по себе тонкое дело, так как шахтная добыча вызвала значительное перемещение пород.

В Андерлю рабочее давление, определенное вначале в 2,5 бар, через два года разработки стало 3,5 бар.

В результате адсорбции метана углем объем хранения почти в четыре раза больше объема пустот и отбор осуществляется при почти постоянном давлении, но необходимо отметить задерживание более тяжелых углеводородов природного газа и снижение его теплотворной способности.

В Перонне, где пласты залегают глубоко, давление достигло 20 бар после периода эксплуатации с эффективным давлением в 7 или 8 бар.

Очивидно, что значительные инженерно-строительные работы должны быть предприняты, чтобы закрыть стволы шахт и обеспечить, чтобы поставленные "пробки" хорошо противостояли давлению как газа, так и воды вышележащих водоносных горизонтов.

Дата пуска в эксплуатацию	Местоположение	Тип хранения	Продукт	Емкость в настоящее время ($м^3$)
1961	Салье-де-Беарн (Атлантические Пиренеи)	Полости, размытые в соли	Пропан	44 000
1966	Птит-Куронн (Приморская Сена)	Шахтная выработка	Пропан и бутан	63 000
1971	Лавера (Буш-дю-Рон)	Шахтная выработка	Пропан	123 000
1977	Гарженвиль (Ивелин)	Шахтная выработка	Пропан	130 000
1977	Донж (Анлантическая Лаура)	Шахтная выработка (гранит)	Пропан	80 000
1977	Лавера (Буш-дю-Рон)	Шахтная выработка	Бутан	170 000
			Всего:	610 000 (*)
(*) Итого около 0,5 миллионов тонн С.Н.Г. или 6 миллиардов киловатт-часов.				

Подземные хранилища С.Н.Г. во Франции.

3.6. ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ – ПРАВИЛА

3.6.1. Тексты, относящиеся к работам по поискам, оборудованию и эксплуатации подземных хранилищ

Приведенные ниже тексты определяют юридический порядок работ по поискам, оборудованию и эксплуатации подземных хранилищ газа, а также отношений с третьими владельцами поверхностных земель или лицами, занимающимися горным отводом:

— указ № 58-1132 от 25 наября 1985 г., относящийся к подземным хранилищам газа,

— постановление № 68-1296 от 6 ноября 1962 г., формулирующее статус общественной администрации при применении этого указа в том, что касается подземного хранения горючего газа, дополненное постановлением № 77-1141 от 12 октября 1977 г., принятого для применения статьи 2 закона № 76-629 от 10 июля 1976 г. по вопросу об охране природы,

— постановление № 88-220 от 7 марта 1988 г., принятое для применения закона от 12 июля 1983 г., связанного с демократизацией общественных опросов и защитой окружающей среды, и изменяющее постановление от 6 ноября 1962 г. по вопросу о подземном хранении горючего газа.

3.6.2. Общие тексты

Тексты, приведенные ниже, не применяются только для подземных хранилищ и касаются в основном области отношений с общественностью:

— циркулярное письмо премьер-министра от декабря 1981 г., связанное с комиссиями по информации о крупном энергетическом оборудовании,
— циркулярное письмо премьер-министра от 31 июля 1982 г. по вопросу о гласности исследований о воздействии на окружающую среду и процедуре общественных опросов,
— закон № 83-63 от 12 июля 1983 г. по вопросу о демократизации общественных опросов и защите окружающей среды (постановление о применении вырабатывается).

3.6.3. Декларация на изыскание и разрешение на изыскание

Декларация на изыскание и разрешение на изыскание имеют цель разрешить производство работ по разведке (в основном эксплуатационное бурение) в соответствии с действующим законодательством.

Каждое подсоединение к газопроводной сети зависит от выдачи "разрешения на хранение".

Основные документы дела по заявке включают в том числе сведения, показывающие опасности и изучение их воздействия на окружающую среду.

Инструкция предусматривает опрос общественного мнения.

После межведомственных всесторонних совещаний выносят решение на запрос о разрешении на создание хранилища постановлением Государственного Совета; заключения Высшего совета общественной гигиены Франции и Генерального совета горной промышленности получают предварительно.

Испытания по закачке и отбору могут быть предприняты перед началом нормальной эксплуатации или автором изыскания, в этом случае без подключения к сети, или владельцем разрешения на создание хранилища. Это зависит от предварительного одобрения соответствующего министра.

Обладатель разрешения на хранилище направляет региональному руководителю по промышленности и исследованиям не менее чем за четыре месяца перед началом нормальной эксплуатации хранилища проект пуска в эксплуатацию.

Обладатель разрешения на изыскание и обладатель разрешения на создание хранилища могут занимать временно, в рамках законных процедур, предусмотренных для этого типа операции, внутри периметра хранилища частные владения, необходимые для проведения работ по разведке, обустройству и эксплуатации хранилища.

3.6.4. Правила, связанные с подземными водами

Тексты, приведенные ниже, определяют правила, относящиеся к подземным водам:

— указ-закон от 8 августа 1935 г. об охране подземных вод (департаменты парижского региона),
— постановление от 4 мая 1937 г., формулирующее статус общественной администрации при применении указа-закона от 8 августа 1935 г. об охране подземных вод,
— постановление, распространяющее положения указа-закона от 8 августа 1935 г. об охране подземных вод:
  - на департаменты Северный и Па-де-Кале (постановление от 3 октября 1959 г.),
  - на департамент Жиронда (постановление от 21 апреля 1959 г.),
  - на департамент Гваделупа (постановление от 11 марта 1960 г.),
  - на департамент Реюньон (постановление 61-1542 от 30 декабря 1961 г.),
  - на департаменты Буш-дю-Рон, Кальвадос, Восточные Пиренеи, Приморская Сена и область Бельфор (постановление № 73-200 от 21 февраля 1973 г.),
  - на департаменты Мозель и Вогезы (постановление № 81-619 от 18 мая 1980 г.).

Кроме того, сюда следует добавить, для памяти, постановление № 73-219 от 23 февраля 1973 г., излагающее применение статей 40 и 57 закона № 64-1245 от 16 декабря 1964 г. по вопросу о режиме и распределении вод и борьбе с загрязнением.

Никаких копаний колодцев или бурения скважин глубже чем:

— 80 метров глубиной в департаментах Эсон, Сена, Сена и Марна, О-де-Сен, Сен-Сан-Дени, Валь-де-Марн, Валь-д'Уаз и Ивелин,
— 60 метров глубиной в департаменте Жиронда,
— 30 метров глубиной в департаменте Восточные Пиренеи,
— 10 метров глубиной в департаментах Северный, Па-де-Кале, Приморская Сена, Реюньон и в области Бельфор,
— 5 метров глубиной в департаменте Гваделупа,
— 2 метра глубиной в департаментах Буш-дю-Рон и Кальвадос,
— 40 метров глубиной в департаментах Мозель и Вогезы,

не может быть предпринято без предварительного разрешения, даже если колодец или скважина не имеет целью отбор подземных вод.

3.6.5. Статья 131 Горного кодекса

На основании статьи 131 Горного кодекса любое лицо, осуществляющее бурение скважин, подземную работу, работу, связанную с раскопкой с какой бы то ни было целью, глубина которой превосходит 10 м ниже уровня поверхности, должно быть в состоянии доказать, что разрешение на это получено у регионального руководителя по промышленности и исследованиям.

3.6.6. Случай полостей, сделанных в соли

Для емкостей в полостях, сделанных в соли, необходимо получить *разрешение на горную разработку.*

3.6.7. Тексты по вопросу о защите природы и окружающей среды

Тексты, приведенные ниже, определяют правила, относящиеся к защите природы и окружающей среды:

— закон от 31 декабря 1913 г. по вопросу об исторических памятниках и тексты его определяющие,
— закон от 2 мая 1930 г. по вопросу о защите природных памятников и местностей, имеющих художественный, исторический, научный, легендарный и живописный характер,
— закон № 76-629 от 10 июля 1976 г. по вопросу о защите природы,
— закон № 76-663 от 19 июля 1976 г., относящийся к установкам, предназначенным для защиты окружающей среды,
— постановление № 77-1133 от 21 сентября 1977 г., принятое для применения закона № 76-663 от 19 июля 1976 г.,
— постановление № 77-1141 от 12 октября 1977 г., принятое для применения статьи 2 закона № 76-629 от 10 июля 1976 г.,
— постановление № 80-330 от 7 мая 1980 г. по вопросу о горнотехнической и карьерной инспекции,
— циркулярное письмо премьер-министра, датированное 31 июлем 1982 г., по вопросу о гласности исследований о воздействии на окружающую среду и процедуре общественных опросов,
— закон № 83-63 от 12 июля 1983 г. по вопросу о демократизации общественных опросов и защите окружающей среды.

3.6.8. Другие процедуры, пригодные для применения

Это:

— правила, относящиеся к классификации установок,
— процедура, вытекающая из Кодекса по градостроительству,
— разрешение по производству строительных работ,
— разрешение строить ограды,
— изменения документации по градостроительству,
— разрешение на распашку (раскорчевку),
— разрешение на рубку в зарегистрированном лесном массиве,
— особые процедуры для работ, проводимых в местности, находящейся на учете,
— особые процедуры для работ, проводимых в зарегистрированной местности,
— особые процедуры для работ, проводимых в охраняемой местности,
— особые процедуры для работ, проводимых в периметре горного отвода, владельцем которого является третье лицо,
— особые процедуры для работ, проводимых в местности общих достояний.



Путь следования декларации и разрешения на изыскание

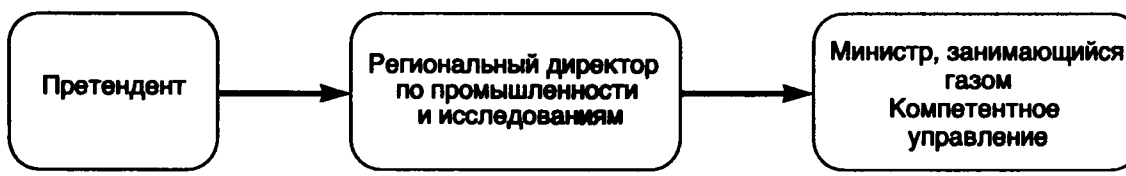


Путь следования запроса о разрешении на хранилище

Случай, когда запрос касается только одного департамента

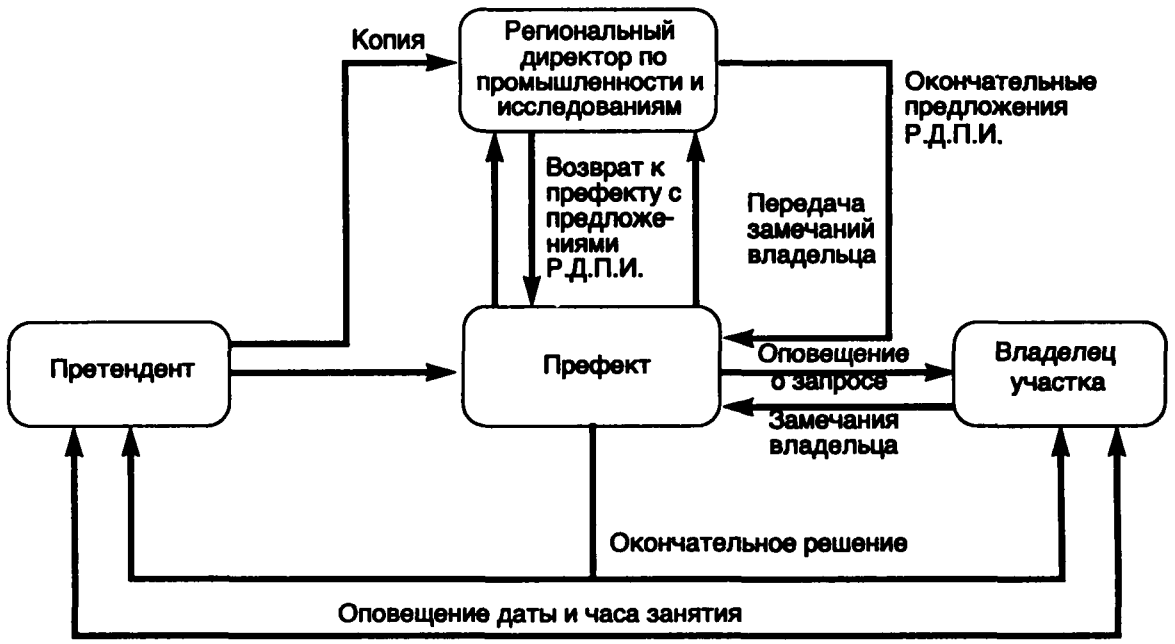


Путь следования запроса на испытание по закачке и отбору

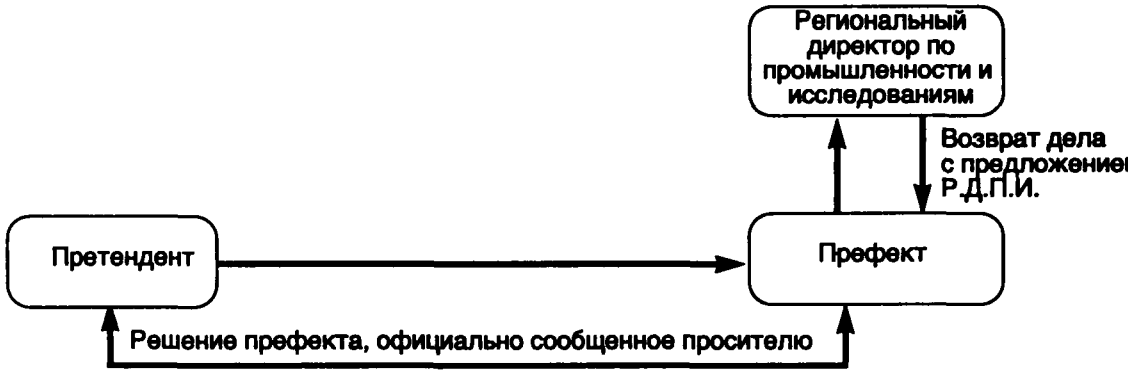


Отсутствие ответа в течении трех месяцев с даты получения запроса региональным директором по промышленности и исследованиям расценивается как одобрение предложенной программы

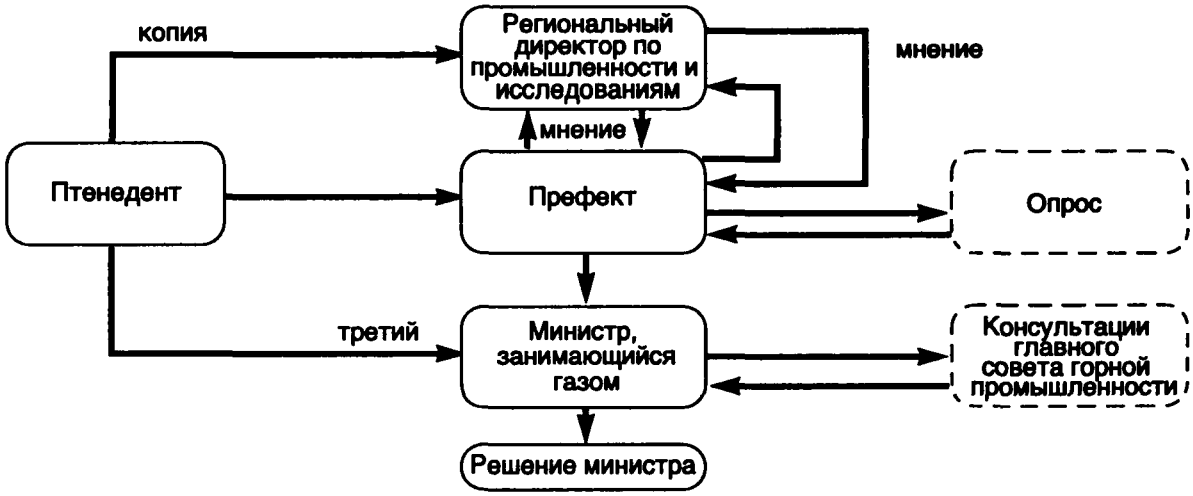
Путь следования запроса при временном занятии



Путь следования запроса на разрешение бурения
Случай, когда бурение не имеет целью отбор подземных вод



Путь следования запроса учреждения горного отвода
Разрешение на эксплуатацию - случай соляных шахт



3.7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

3.7.1. Определение параметров водоносного пласта по данным гидродинамических исследований: исследования взаимодействия скважин

3.7.1.1. Исследования скважин

Цель: оценить основные характеристики коллектора в призабойной зоне скважины (проницаемость, проводимость и т.д.).

Принцип: замер изменения давления на забое работающей скважины – добыча воды (фонтанная или насосная) из той же скважины – и последующее восстановление давления после остановки.

Интерпретация: интегрирование уравнений однофазного течения в пористой среде: сеточная модель (конечных разностей, конечных элементов); аналитические точные и приближенные решения.

Исследования скважин при постоянном дебите

Предположение 1: коллектор однородный и изотропный, бесконечной протяженности, постоянной толщины:

— точное решение: Ван Эвердингена и Херста,

— приближенное решение ($Kt \cdot a^{-2} > 100$) Якоба:

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{4\pi hk}\left(\ln\frac{Kt}{a^2} + C\right) \quad (C = 0{,}809),$$

P – забойное давление (Па),

$P_н$ – начальное давление в водоносном пласте (Па),

Q – дебит воды ($м^3 \cdot с^{-1}$),

h – толщина отложений (м),

a – радиус скважины (м),

t – время, отсчитываемое с момента пуска скважины (с),

k – проницаемость ($м^2$),

$K = \dfrac{k}{Ф\mu\beta_к}$ – пьезопроводность ($м^2 \cdot с^{-1}$),

μ – динамическая вязкость воды (Па · с),

$Ф$ – пористость ($м^3 \cdot м^{-3}$),

$\beta_к = \beta_в + \dfrac{\beta_п}{Ф}$ – кажущаяся сжимаемость ($Па^{-1}$),

$\beta_в$ – сжимаемость воды ($Па^{-1}$),

$\beta_п$ – сжимаемость породы ($Па^{-1}$).

Предположение 2: коллектор однородный и изотропный, бесконечный по протяженности, постоянной толщины, но ограниченный *непроницаемым сбросом или непроницаемым экраном на расстоянии d от скважины:*

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{4\pi hk}\left[\ln\left(\frac{Kt}{a^2}\right) + C - E_i\left(\frac{d^2}{Kt}\right)\right],$$

$$E_i(-x) = \int_x^{\infty} u^{-1} \cdot e^{-u} du.$$

Для $t > 100\dfrac{d^2}{K}$ приближенное решение следующее:

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{2\pi hk}\left(\ln\frac{Kt}{2ad}\right) + C.$$

Предположение 3: коллектор однородный и изотропный, бесконечной протяженности, простоянной толщины, но ограниченный *сбросом не герметичным, соединяющим коллектор с другим водоносным пластом большой толщины и с очень хорошими параметрами:*

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{4\pi hk}\left[\ln\left(\frac{Kt}{a^2}\right) + C + E_i\left(\frac{d^2}{Kt}\right)\right].$$

Приближенное решение $t > 100\dfrac{d^2}{K}$ при постоянном режиме:

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{2\pi hk}\left(\ln\frac{2d}{a}\right).$$

Исследование скважины, работающей с любым дебитом

С учетом предположения 1, приближенным решением будет:

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{4\pi hk}\int_{-\infty}^{t} Q(t-u)\frac{dF}{du}du$$

с: $F(u) = \ln\left(\dfrac{Ku}{a^2}\right) + C$

(очевидно обобщение для других предположений).

В частности, для обработки кривой *восстановления давления*, перед закрытием скважина работала с постоянным дебитом в течение периода τ:

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{4\pi hk}\ln\left(\frac{t}{t-\tau}\right).$$

3.7.1.2. Исследования взаимодействия скважин

Цель: оценить основные параметры коллектора между скважинами и на расстоянии от них.

Принцип: замер изменения давления на забое одной или нескольких скважин во время или после остановки добычи на одной или нескольких других скважинах.

Интерпретация: интегрирование уравнений однофазного течения в пористой среде с сеточной моделью; при некоторых предположениях можно найти аналитическое решение (см. ниже):

Исследование взаимодействия с постоянным дебитом

Предположение 1: коллектор однородный и изотропный, бесконечной протяженности, постоянной толщины; одна скважина работает:

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{4\pi hk}E_i\left(-\frac{r^2}{4Kt}\right),$$

r – расстояние между возмущающей скважиной и скважиной реагирующей.

Приближенное решение для $t > 100\dfrac{r^2}{K}$:

$$P(t) - P_н = \frac{\mu Q}{4\pi hk}\left(\ln\frac{Kt}{r^2} + C\right).$$

Исследования взаимодействия с переменным дебитом

С учетом предположения 1:

$$P(t) - P = \frac{\mu}{4\pi hk}\int_0^t Q(t-u)\frac{dG}{du}du,$$

где:

$$G(u) = -E_i\left(\frac{r^2}{4Ku}\right).$$

3.7.2. Основные геофизические методы исследований в конце бурения (см. таблицу ниже)

Вид	Каротаж	Состояние скважины (ствол)	Метод	Цель
Электрический	Самопроизвольной поляризации (П.С.)	Открытый	Разность потенциалов самопроизвольной поляризации между электродом на поверхности и электродом на забое	Показатель глинистости
	Боковой (Б.К.) Экранированных микрозондов Микрозондов Время распространения электромагнитных волн	Открытый	Измерение сопротивления пород между двумя электродами в скважине Электромагнитная релаксация	Пористость (если сопротивление воды известно и Sb = 1) Корреляция от скважины к скважине Газонасыщенность
	Пластовый наклономер	Открытый	Измерение микросопротивлений (4 ползуна под 90°), направление (наклон и азимут)	Измерение падения отложений и ориентация осадочных образований
	Изображение микроэлектрическое	Открытый	Микросопротивление между многочисленными электродами	Изображение стенок скважины
	Акустическая локация стенок скважины	Открытый	Измерение времени пробега и частоты ультразвуковых сигналов между излучателем и приемником	Изображение стенок скважины
Радиоактивный	Гамма-каротаж (Г.К.)	Открытый Обсаженный	Измерение естественного γ-излучения горных пород	Показатель глинистости (глина радиоактивна); (показания искажаются тяжелыми минералами, содержащимися в песчаниках)
	Спектрометрия естественной радиации	Открытый Обсаженный	Выделение радиоактивных минералов (калия, тория, урана). Спектроскопия природного гамма-излучения	Исправление показаний гамма-каротажа, оценка содержания глины в коллекторах глинисто-песчаных и глинисто-песчанистых
	Нейтронный (Н.К.)	Открытый Обсаженный	Измерение тепловых нейтронов (замедленных атомами водорода). Излучения вызваны источником нейтронов	Прекрасно измеряет полную пористость (при отсутствии газа) Определение газонасыщенности (необходима коррекция на глину)
	Плотность отложений	Открытый	Измерение γ-излучения. Излучения вызываются источником; затухание пропорционально плотности отложений	Определение плотности пород Обнаружение присутствия легких углеводородов в пористых отложениях
Акустический	Акустический	Открытый	Измерение времени пробега ультразвукового сигнала между генератором и приемником	Хороший инструмент для определения пористости в сцементированных отложениях
	Сеймозондирование (отбор керна, сейсмика и т.д.)	Открытый Обсаженный	Измерение времени пробега сигнала между излучателем на поверхности, расположенном не очень далеко от скважины, и приемником на забое	Корректировка сейсмики на маркерах (контрастность акустических сопротивлений)
	Характеристики качества цементного кольца	Обсаженный	Измерение акустического сигнала, который затухает тем сильнее, чем лучше качество цементирования	Определение качества цементирования ствола скважины

3.7.3. Основные геофизические методы при эксплуатации

Каротаж	Метод	Основное назначение
Термометрия	Регистрация изменения температуры в зависимости от глубины	Геотермический профиль Температура отложений (водоносный горизонт) Определение отношения запасы/объем по уравнению состояния газа (полости)
Давление	Регистрация изменения давления в зависимости от глубины.	Давление в пласте-коллекторе (водоносный горизонт) Определение потерь давления в отложениях (водоносный горизонт) Гидродинамические исследования (обработка кривой восстановления давления) В сочетании с термометрией определение отношения запасы/объем по уравнению состояния газа (полости)
Дебитометрия	Счетчик (наиболее часто с турбинкой), позволяющий измерить расход флюида в зависимости от глубины	Продуктивность пласта-коллектора в зависимости от глубины (водоносный горизонт) Выявление местного кольматажа (водоносный горизонт)
Каверномер	Отходящий в сторону рычаг, находящийся в контакте со стенками скважины	Определение изменения диаметра оборудованной скважины. Диаметр выработки (полости).
Гамма-гамма	Ослабление искусственного гамма-излучения, которое увеличивается с увеличением плотности	Поверхность раздела газ–вода (водоносный горизонт), газ–рассол (полости), жидкое топливо–рассол (полости)
Нейтронный	Измерение нейтронов, замедленных атомами водорода (излучение вызвано источником нейтронов)	Оценка газонасыщенности Определение поверхностей раздела в затрубном пространстве

3.7.4. Технические данные парка подземных хранилищ газа, используемых во Франции

Во Франции эксплуатируются тринадцать подземных хранилищ (1988 г.):

— 9 хранилищ в водоносных горизонтах в большом Парижском бассейне, эксплуатируемых "Gaz de France",

— 2 хранилища в водоносных горизонтах в Аквитанском бассейне, эксплуатируемых национальным обществом "Elf Aquitaine",

— 2 хранилища в соляных полостях в регионе Брес-Рона-Альпы, эксплуатируемых "Gaz de France".

Основные данные хранилищ, эксплуатируемых "Gaz de France", представлены в таблицах на с. 426 и 427.

Хранилища в водоносных горизонтах позволяют обеспечить 90% полезного объема и 65% пиковых расходов, необходимых для комплекса хранилищ, эксплуатируемых "Gaz de France", хранилища в соляных полостях – 10% полезного объема и 35% пиковых расходов.

Некоторые данные для двух хранилищ в водоносных горизонтах Аквитанского бассейна, Люссанет (Ланд) и Изот (Жер):

— отложения, называемые люссанетские пески, ниже молассовый водоносный горизонт Аквитанского бассейна,

— прекрасная характеристика коллектора:
  · значительная высота структуры (несколько сотен метров)
  · проницаемость (несколько дарси),
  · пористость (30%),

— прекрасные данные, использование которых ограничено избыточным давлением в водоносном бассейне,

— объем хранения в 1985 г. приблизительно 2,5 миллиарда м³ (н).

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ

	Бенн верхний	Сен-Иллиер	Шемери	Велен	Бейн глубокий	Гурнай-сюр-Аронд	Сент-Клер-Сюр-Эпт	Суаньан-Солонь	Жермини-су-Коломб
Географическое положение	Ивелин	Ивелин	Луар-Э-Шер	Мерт-Э-Мозель	Ивелин	Уаз	Валь-д'-Уаз	Луар-Э-Шер	Сен-Э-Марн. ЭСН, Уаз
Год ввода в эксплуатацию	1956	1965	1960	1970	1975	1976	79 инертный 81 природный	1981	82 инертный 83 природный
Характеристика залежи									
Ярус	Вельдский	Секванский	Триас	Песчаник Вольтзиа	Секванский	Секванский	Роракский	Триас	Вельдский
Минимальная толщина покрытия (м/пов.)	395	470	1 085,8	467,5	740	717	742,5	1 138	848
Абсолютная отметка вершины (м/море)	–306	–339	–973,5	–195	–635	–630	–704	–1 031	–738,5
Средняя толщина покрышки (м)	9	180	120	80	150	180	30	78	3 - 6
Доказанная высота ловушки (м)	25	120	94,5	85	25	70	36	29	36,5
Замкнутая поверхность ($км^2$)	9,2	6	29	23,2	8,6	41	16	7	100
Толщина коллектора (м)	30	30	41	70	37	45	32	33	80
Эффективная толщина (м)	21	30	30	60	21	25	30	21	30
Замкнутый матричный объем ($10^6 м^3$)	71	277	750	545	100	1 200	240	100	1 300
Пористость (%)	27	25	20	17	25	20	20	14	18
Проницаемость (Д)	5	1	1,4	0,2 - 1	1	1	0,7	0,6	0,46
Температура залежи (°С)	27	30	56	30	38	35	38	54	35
Отметка приведения давления (м/море)	–320	–360	–1 000	–210	–640	–650	–710	–1 050	–750
Абсолютное начальное давление (бар)	38,2	46,8	115,8	43,5	78,5	78	83	122,5	83,2
Абсолютное максимальное давление (бар)	49	69,5	150	61	98,5	106	145	160	123,5
Градиент давления (безразмерное)	1,24	1,49	1,40	1,31	1,34	1,49	1,43	1,42	1,47
Максимальные ожидаемые достижения									
Хранимый объем ($10^6 м^3$ (н))	475	1 260	7 000	1 375	800	3 100	600	700	2 200
Полезный объем ($10^6 м^3$ (н))	210	560	3 228	630	370	1 430	275	320	1 010
Пиковый расход ($10^6 м^3$ (н) · $сут^{-1}$)	4,5	14	38	12	9,6	17	4	3,6	3,8
Предусмотренное оснащение									
Форма газосборных сетей	кольцевая	лучевая	лучевая	лучевая	кольцевая	лучевая	лучевая	лучевая	кустовая
Число эксплуатационных скважин	14	28	55		24	40	13	8	27
Число контрольных скважин	14	16	21	15	11	18	17	17	26
Мощность компрессоров (кВт)	9 700	23 810	29 100	18 700	3 300	14 100	5 100	7 200	14 400

Общие данные по подземным хранилищам в водоносных горизонтах, эксплуатируемым "Gaz de France" (январь 1988 г.).

3 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ

Местоположение	Терсанн	Этрез
Географическое положение	Дром	Эн
Год ввода в эксплуатацию	1970	1979
Характеристики соляного массива ((1) – общие; (2) – на глубине сануазского яруса)		
(1) Формация	Пласт	Пласт
(2) Ярус	Сануазский	Сануазский стампийский
(1) Максимальная горизонтальная протяженность L x 1 (км)	35 x 10	40 x 20
(1) Максимальная толщина (м)	500	1 250
(2) Альтитуда от уровня поверхности (м/море)	265 - 355	209 - 230
(2) Глубина кровли (м/пов)	1 350 - 1 550	1 250 - 1 350
(2) Температура на уровне кровли (°C)	70	54
(2) Содержание нерастворимых включений (%)	10	15
Характеристики полостей (*)		
Свободный объем газа ($м^3$)	50 000 - 200 000	190 000 - 300 000
Число полостей	14	24
Глубина кровли (м/пов)	1 400 - 1 600	1 300 - 1 350
Высота свободной для газа зоны (м)	70 - 110	90 - 130
Максимальный диаметр (м)	90	90
Отношение между толщиной целиков, разделяющих две соседние полости, и среднеарифметическим максимальным диаметром полостей (минимальное значение)	2,9	5,5
Максимальное рабочее давление (бар)	270	237
Минимальное рабочее давление (бар)	80	80
Максимальный градиент рабочего давления	1,8	1,8
Хранимый объем/полость (максимальный) (10^6 $м^3$ (н))	39	61
Полезный объем/полость (максимальный) (10^6 $м^3$ (н))	25	36
Максимальные ожидаемые достижения		
Хранимый объем (10^6 $м^3$ (н))	450	1 000
Полезный объем (10^6 $м^3$ (н))	270	600
Пиковый расход (10^6 $м^3$ (н) · $сут^{-1}$)	20	35

(*) (Этрез: полости расположены в сануазском ярусе; возможно распространение в стампийском ярусе между 830 и 1020 м).

Общие данные по подземным хранилищам в соляных полостях, эксплуатируемым "Gaz de France".

3.7.5. Список литературы

Annales des mines. Numéro spécial sur l'utilisation de l'espace souterrain. 1er volet: stockage d'hydrocarbures, 190e année, n° 5-6 (mai-juin 1983).

GAZ *d'aujourd'hui.* Numéro spécial sur les tockages souterrains de gaz (p. 265 à 336), n° 9 (septembre 1981).

— R. Desbrandes. – Théorie et interprétation des diagraphies. Ed. Technip, Paris (1968).

— R. Radone et R. Desbrandes. – Notions de diagraphies. Ed. Technip, Paris (1968).

— E. Blondin et M. Boucher. – L'apport des diagraphies à l'exploration, l'équipement et l'exploitfion des stockages souterrains de gaz. A. T. G. (1972).

— O. Serra. – Diagraphies différées (Bulletin des centres de recherche exploration production, tome 1). Elf Aquitaine, Pau (1979).

— J-C. Lioret. – Trois nouveaux outils de mesure pour le contrôle des reservoirs souterrains. A. T. G. (1985).

— R. Sorel. – L'entretien des puits en cours d'exploitation. Ed. Technip, Paris (1965).

— Formulaire du producteur. Ed. Technip, Paris (1970).

— Dictionnaire technique des termes utilisés dans l'industrie du pétrole. Ed. Technip, Paris (1963).

— Le langage Pétrolier. Ed. Gauthier-villars, Paris (1964).

— Dictionnaire de géologie. – A. Foucault, J-F. Raoult. Ed. Masson, Paris (1984).

4 СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ (СПГ)

4.1. Этапы развития промышленности СПГ и типы установок сжижения

4.1.1. Этапы развития

Основные даты в истории производства СПГ указаны ниже.

1877: Первые капли жидкого метана получены французом Кайете и женевцем Пикте.

1915 - 1930: Проекты и различные промышленные установки, использующие сжижение газа для выделения из него определенных компонентов: извлечение гелия из природного газа (Техас), извлечение водорода из коксового газа.

1936 - 1940: Исследования в Великобритании, затем в США в области создания установок, позволяющих сгладить пиковые нагрузки газопотребления, основанных на сжижении газа и его хранении в жидком виде.

1940: Сооружение в Корнуэлле (Соединенные Штаты) компанией "Хоуп Нейчурел Гэз Компани" первой опытной установки сглаживания пиковых нагрузок газопотребления, проработавшей четыре месяца.

1941: Пуск первой промышленной установки сглаживания пиковых нагрузок в Кливленде (США) компанией "Ист Огайо Гэз Компани", установка включала в себя:

— блок сжижения производительностью 200 м³/сут. СПГ, использующий холодильный каскадный цикл (аммиак–этилен–дросселирование), предложенный инженером Ли Твомей (Lee Twomey);
— блок хранения в трех сферических резервуарах емкостью 2500 м³ и одном тороидально-цилиндрическом емкостью 4500 м³;
— блок регазификации паровым подогревом, производительностью 85000 ст.м³/ч.

Ввод в эксплуатацию, в тот же период времени, установки со схожими показателями (за исключением блока хранения меньшего объема) в Москве (СССР).

20 октября 1944 г.: Практически мгновенное разрушение резервуара емкостью 4500 м³ на заводе в Кливленде, вызвавшее вследствие пожара значительные материальные потери и приведшее к многочисленным человеческим жертвам. Основной причиной катастрофы был неправильный выбор марки стали для внутренней оболочки резервуара, которая стала хрупкой при низких температурах.

1949 - 1952: Проект инженера Мориссона (Morisson) по сжижению природного газа в Луизиане, транспорту его по рекам Миссисипи и Иллинойс, регазификации в Чикаго для компании "Юньон Стокъярд энд Транзит" (Union Stockyard and Transit).

1954 - 1960: Научные работы и эксперименты в США, Великобритании и во Франции по проектам импорта в Европу в жидком виде больших количеств природного газа из Венесуэлы или из Ближнего Востока.

1959: Первый эксперимент по транспорту морским путем СПГ: рейсов метановоза "*Метановый Пионер*" (Methan Pioneer) из Лэйл Чарльз (Луизиана) в Канвей Исланд (Великобритания).

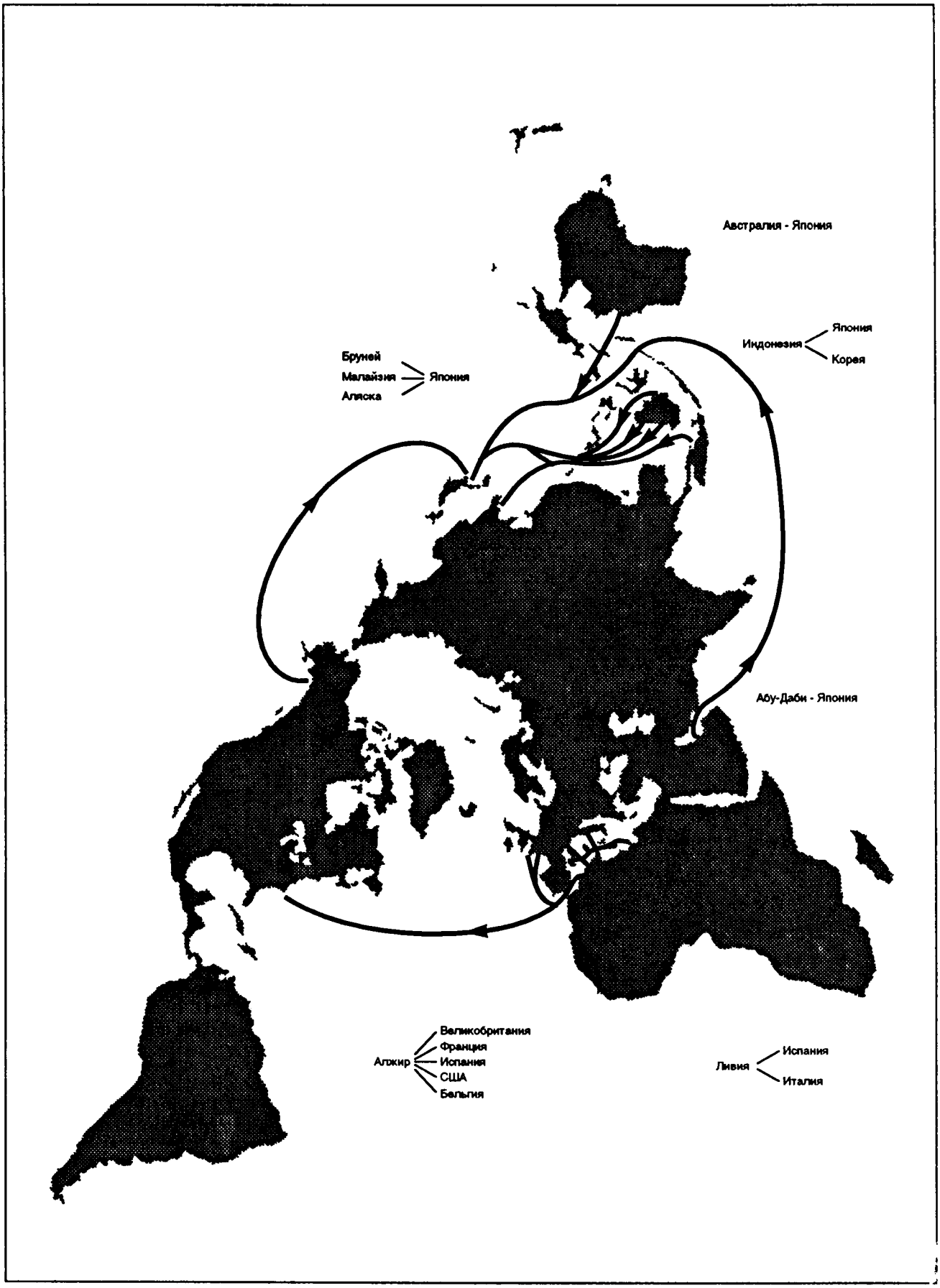
С 1960 по 1962: Пуск в эксплуатацию в Нанте компанией "Газ де Франс" опытной установки, состявшей из блоков сжижения, хранения (500 м³) и регазификации. Морские испытания метановоза "*Бовэ*" (экспериментальное судно).

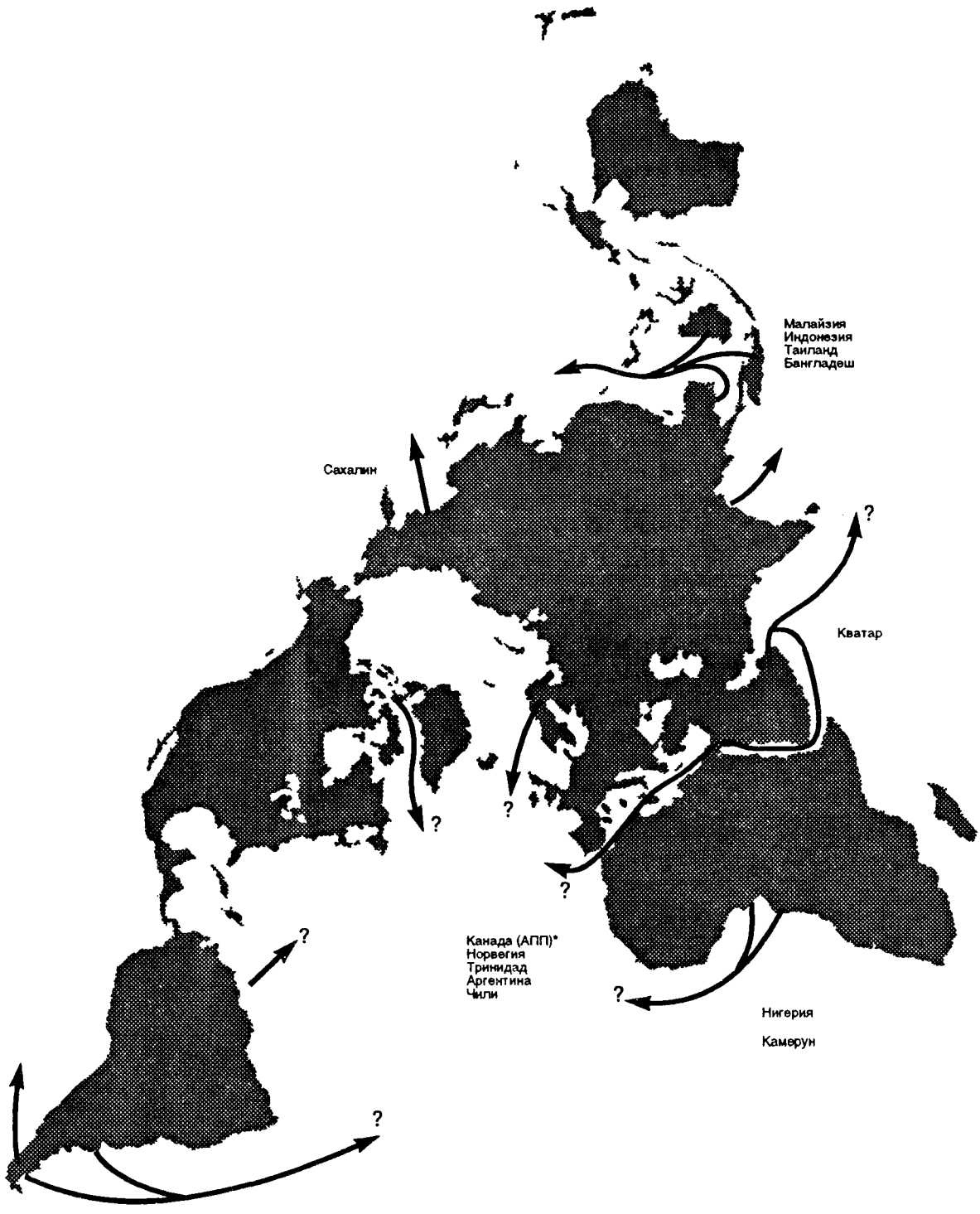
1961 - 1962: Принятие Великобританией, а затем Францией, проекта импорта природного газа из месторождения Хасси Р'Мель (Алжир). Проект был разработан соответствующими организациями в обеих странах.

1964 - 1965: Пуск в эксплуатацию первой коммерческой системы транспорта СПГ в больших количествах, состоящей из:

— завода сжижения фирмы "Кэмел" в Арзеве (Алжир);
— британских метановозов "*Принцесса метана*" и "*Прогресс метана*" и французского метановоза "*Жюль Верн*";
— британского терминала в Канвей Исланд и французского в Гавре.

1964 - 1965: Сооружение в США и в Канаде многочисленных установок сглаживания газопотребления.


Австралия - Япония
Индонезия
Япония
Корея
Бруней
Малайзия
Аляска
Япония
Абу-Даби - Япония
Алжир
Великобритания
Франция
Испания
США
Бельгия
Ливия
Испания
Италия



* Арктический полярный проект

На рисунке с. 430 представлены сводные картографические данные по тринадцати коммерческим системам транспорта СПГ в больших объемах, созданным в период с 1964 по 1989 г., то есть регулярным (постоянным), нерегулярным и прерванным и заброшенным. К ним добавлена система Австралия–Япония, находящаяся в стадии оборудования.

На рисунке с. 431 представлены потенциальные системы снабжения СПГ.

4.1.2. Типовые схемы установок СПГ

4.1.2.1. Завод сжижения и метановый терминал

Сжижение природного газа позволяет хранить его и перевозить на судах в плотном виде (малом объеме) в подходящих технико-экономических условиях.

Действительно, если сжижают природный газ под атмосферным давлением, то получают около 1 м^3 жидкости из примерно 580 ст.м^3 природного газа, которая весит менее 500 кг и транспорт которой не требует создания структуры, более сложной, чем для перевозки воды.

Метановоз (судно для перевозки СПГ), способный перевозить 130 000 м^3 СПГ, имеет массу только 30 000 тонн в незагруженном виде (корпус, танки и оборудование), в то время как такое же судно для перевозки сжатого газа имело бы гораздо большую массу, чем сам газ (один баллон сжатого газа емкостью 10 ст.м^3 природного газа или массой газа примерно 7 кг весит около 70 кг).

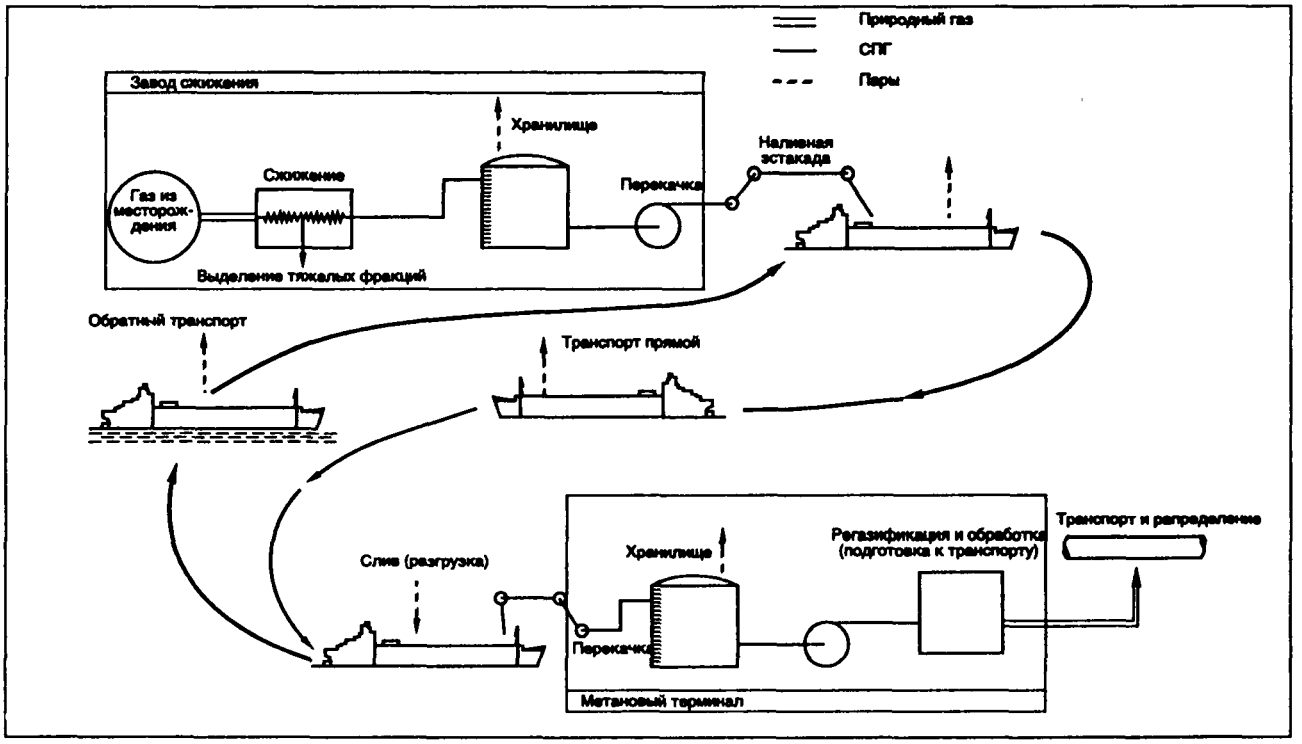
На заводе сжижения различные технологические процессы обработки природного газа и его сжижение реализуются под высоким или средним давлением, полученный СПГ хранится под давлением, близким к атмосферному в ожидании перекачки и загрузки (налива) в метановоз.

В метановом терминале (порту приема) СПГ перекачивается из метановозов в резервуары – хранилища, похожие на те, что имеются на заводах сжижения, затем его перекачивают к установкам регазификации и превращают в газ высокого или среднего давления. Таким образом, СПГ в газообразном виде направляется в газотранспортную или распределительную сеть, питаемую терминалом.

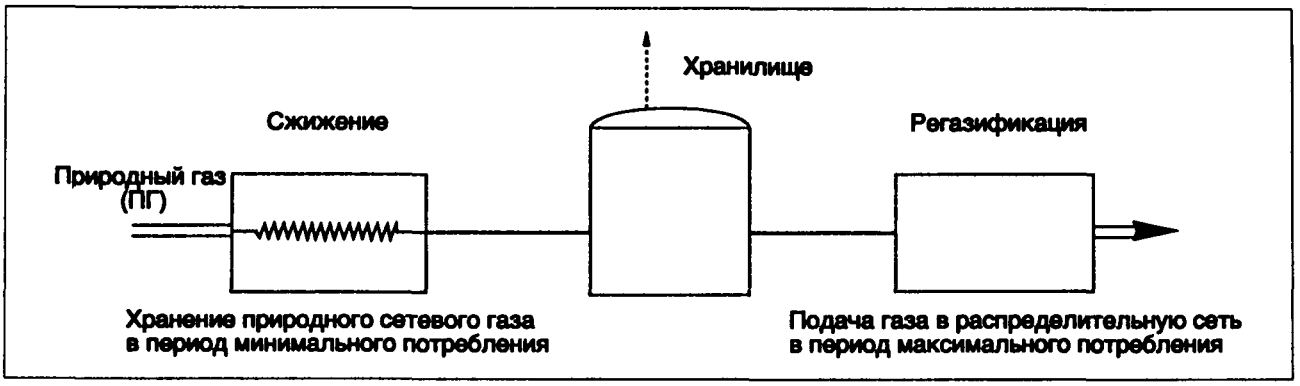
4.1.2.2. Станция сглаживания пиковых нагрузок ("пик-шейвинг")

В том случае, когда район большого газопотребления удален от источника газа и когда его потребление испытывает большие колебания (пример: большие сезонные колебания), лучше хранить газ вблизи района его потребления, чем сооружать газопроводы с диаметром трубы, рассчитанным на пиковые нагрузки. Если необходимые объемы хранения ограничены, или если геологические условия района потребления не позволяют сооружать подземные хранилища, хранение газа в сжиженном виде является решением проблемы: подсоединяют к одному или нескольким бакам хранения СПГ одну установку сжижения, которая работает в периоды слабого газопотребления, и одну установку регазификации, которая используется в периоды пиковых нагрузок.

Помимо этих технико-экономических соображений, могут быть другие, приводящие к рассмотрению вопроса о сооружении станции сглаживания пиковых нагрузок.



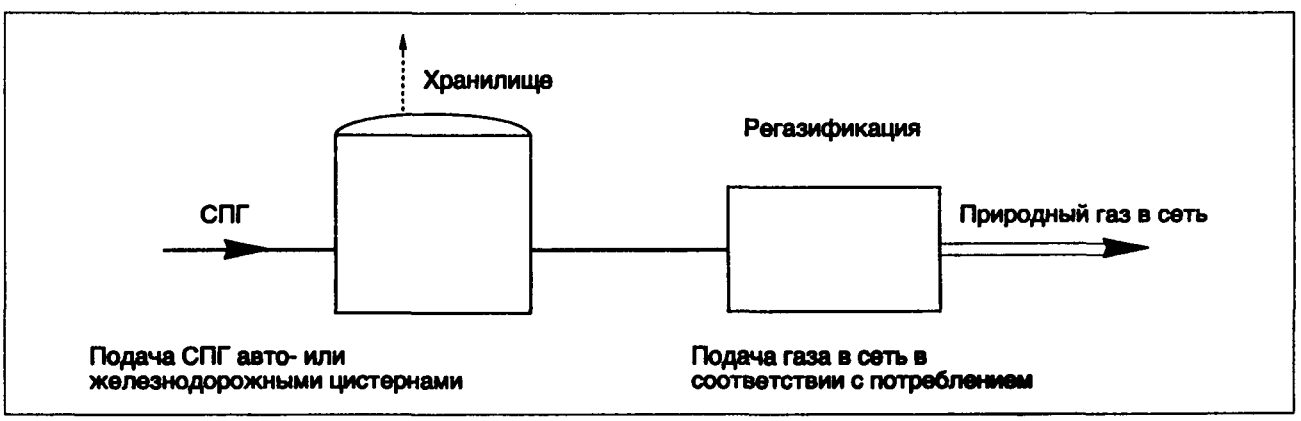
Завод сжижения и метановый терминал,



Станция сглаживания пиковых нагрузок.

4.1.2.3. Вспомогательная (спутниковая) станция СПГ

Можно также использовать СПГ (производимый на станции сглаживания пиковых нагрузок или хранимый в метановом терминале) для подачи с помощью авто- или железнодорожных цистерн на "спутниковую станцию", предназначенную для хранения и регазификации, которая питает небольшую изолированную распределительную сеть.



Вспомогательная (спутниковая) станция СПГ.

4.1.3. Установки и морской транспорт СПГ в мире

	Тип установки	Количество	Установленная производительность по сжижению, $м^3$/сут	Установленная емкость хранения СПГ, $м^3$	Установленная производительность регазификации, ст. $м^3$/сут	Примечание: большая часть резервуаров имеет объем хранения, $м^3$
В мире	Заводы сжижения	11	376 000	3 200 000	–	80 000
	Метановые терминалы	22 из них 12 в Японии	–	10 100 000 из них 80% в Японии	395 000 000	70 000
	Станции сглаживания газопотребления	68 из них 58 в США	21 000	4 000 000	372 500 000	42 000
	Спутниковые станции	54 из них 21 в США	–	143 300	13 800 000	4 700 в США, 100 в других странах
Во Франции	Метановые терминалы	3	–	546 000	129 360	–

Установки СПГ и объем морских перевозок СПГ (данные 1986 г.).

Метановозы			
Вместимость, м³	Количество	Число сделанных рейсов	Количество перевезенного СПГ
от 25 00 до 35 000	4	962 в Японию	
40 000	4	585 в Японию	$84 \cdot 10^6$ м³
50 000	1 («Декарт»)		
от 70 000 до 80 000	9	374 в Европу	
87 600	2	2 в Корею	
125 000	20	1 в США	
от 126 000 до 132 000	10		

Морской транспорт в 1986 г.

4.2. Термодинамика и метрология СПГ

4.2.1. Термодинамика

Раздел 1.7: Термодинамика главы 1 (общая часть) содержит основные понятия для изучения СПГ, в частности:

— уравнения состояния реальных смесей газов (см. § 1.7.2.2.1.1);
— описание фазовых равновесий природного газа и расчеты точки кипения и конденсации (точки росы) – см. § 1.7.2.2.1.3.

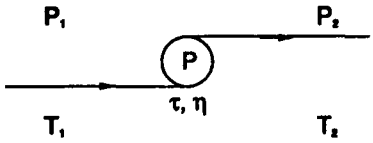
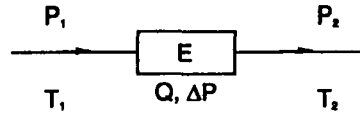
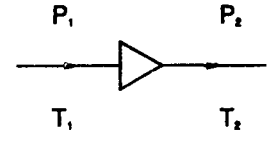
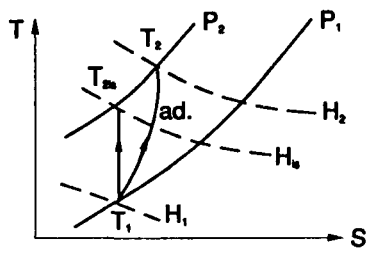
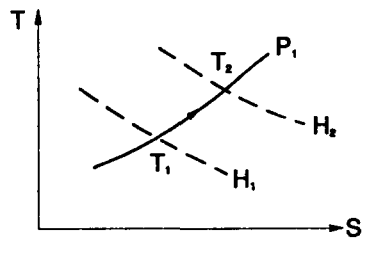
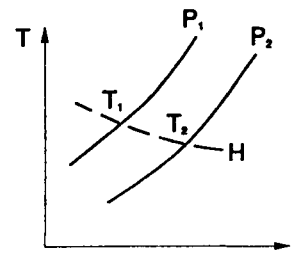
и представляет также некоторые физические свойства СПГ, такие как:

— плотность (см. § 1.7.2.2.3);
— вязкость (см. § 1.7.2.2.6.2),
— теплопроводность (см. § 1.7.2.2.6.2).

Ниже приводятся для практических целей термодинамические диаграммы для метана, которые могут быть эффективно использованы в первом приближении для СПГ с большим содержанием метана для расчетов фазовых переходов системы природный газ/СПГ, которые имеют место на установке сжижения:

— диаграмма энтропии (T, S) (см. рисунок с. 440);
— диаграмма энтальпии (H, P или log P) (см. рисунок с. 441);
— диаграмма Молье (H, S) (см. рисунок с. 442).

Упрощенные примеры таких расчетов даны в нижеследующей таблице.

	Перекачка СПГ	Сжижение или регазификация	Расширение, контактная конденсация
Схема			
Соотношение	Обратное адиабатическое сжатие: $\Delta S = 0$ $S(P_1, T_1) = S(P_2, T_{2is})$ $\Delta H_{is} = H(P_2, T_{2is}) - H(P_1, T_1)$ Реальное адиабатическое сжатие: $\eta = \frac{\Delta H_{is}}{\Delta H}$ $\Delta H = H(P_2, T_2) - H(P_1, T_1)$ $\Delta H = \tau$	$\tau = 0$ $\Delta H = Q$ $P_2 = P_1 - \Delta P$ $\Delta H = H(P_2, T_2) - H(P_1, T_1)$	$\tau = 0$ $Q = 0$ $\Delta H = 0$ $H(P_1, T_1) = H(P_2, T_2)$
Диаграмма			

Упрощенные примеры фазовых превращений газа в установках.

4.2.2. Метрология

Используются различные средства метрологии:

— с одной стороны, для оценки количества транспортируемой энергии;
— с другой стороны, для обеспечения эксплуатации установок СПГ в оптимальных технико-экономических условиях.

4.2.2.1. Измерение давления

Наиболее часто используемые для СПГ датчики давления:

— тензометрические датчики;
— дифференциальные трансформаторы;
— переменные емкости.

4.2.2.2. Измерение температуры

Для измерения низких температур СПГ применяются два типа датчиков:

— медно-константановая термопара;
— платиновый термометр сопротивления, чаще всего 100 ом при 0°С.

4.2.2.3. Замер и обнаружение уровня СПГ в резервуаре

4.2.2.3.1. Измерители уровня

4.2.2.3.1.1. Емкостные измерители с постоянным изменением (вариацией)

Датчик обнаружения уровня состоит из последовательности одинаковых емкостных элементов, диэлектрик которых представлен газовой или жидкой фазой резервуара. Электронная схема определяет количество погруженных в жидкость емкостных элементов.

4.2.2.3.1.2. Ультразвуковые измерители

Пьезоэлектрический преобразователь, расположенный в верхней части резервуара, излучает ультразвуковую волну, которая распространяется в газовой среде и отражается от поверхности раздела газ–жидкость. Измеряется время, прошедшее между моментом излучения волны и приемом преобразователем отраженного ультразвукового сигнала. Расстояние, пройденное волной, и, следовательно, уровень СПГ могут быть определены при условии, если точно известна скорость звука в газе.

4.2.2.3.1.3. Измерители на основе измерения давления

Если взять столб жидкости высотой h, то давление, которое она оказывает, определяется формулой $P = \rho g h$. Определение высоты требует знания плотности ρ. Без точного знания плотности жидкости три типа нижеописанных измерителей являются скорее указателями уровня, чем датчиками его высоты:

— *пневматические измерители*
Датчик измеряет давление, необходимое для нагнетания газа, несмешивающегося с СПГ, такого как азот, через погружаемую в СПГ трубку;
— *измерители на базе прямого замера давления*
Внешний датчик измеряет разность давлений между дном и верхом резервуара;
— *измерители с погруженным датчиком давления*
Как видно из названия, датчик погружен в СПГ и находится на дне резервуара.

4.2.2.3.1.4. Поплавковые измерители уровня (уровнемеры)

Исторически в промышленности СПГ использовались два типа поплавковых уровнемеров: механические и с сервоприводом (электромеханические).

4.2.2.3.1.4.1. Механические поплавковые уровнемеры

Это оборудование состоит из трех основных элементов:

— поплавок, частично погруженный в СПГ, направляемый тягами или успокоительной трубкой с отверстиями;
— перфорированная лента, поддерживаемая в натянутом состоянии пружиной, соединяющей поплавок с головкой измерителя, расположенной на крыше резервуара;
— система зубчатых колес, приводимых во вращение перфорационными отверстиями ленты, измеряющая перемещение последней и, соответственно, уровень СПГ.

Счетчик снаружи резервуара и система дистанционной передачи данных дополняют это оборудование, которое, тем не менее, имеет некоторые недостатки:

— возможность обрыва ленты;
— невозможность замены измерителя в случае, если резервуар заполнен СПГ, если только не оборудовать головку измерителя специальной камерой для работы под давлением;
— необходимость подъема (вручную) поплавка, когда уровень СПГ сильно изменяется (налив в наземный резервуар, метановоз в море).

4.2.2.3.1.4.2. Поплавковые измерители с сервоприводом

Принцип их работы тот же, что и измерителей предыдущего типа, то есть поплавок частично погружен в СПГ, но его уравновешенное положение в результате действующих сил определяется системой автоматического регулирования с обратной связью (сервосистемой).

Различают два типа поплавков с сервоприводом:

— классический поплавок на конце кабеля подвески, испытывающий нагрузки от:
  · собственного веса,
  · силы Архимеда,
  · силы, которая действует на него от кабеля подвески.

Эта последняя может быть создана:

— парой сил магнитного сцепления и изменением уровня, определяемого угловым смещением между намоточным барабаном и сервомотором;
— пружинами и изменением уровня, ощущаемого емкостным детектором между намоточным барабаном и сервомотором.
Детекторная головка поддерживается постоян-

но на поверхности жидкости с помощью перфорированной ленты, обеспечивая также электропитание датчика. Эта детекторная головка (датчик) снабжена небольшим пальцем, магнитно уравновешенным, который поддерживает ферритовое кольцо, перемещающееся внутри катушки (обмотки). Изменения уровня, переводимые в изменение импеданса (полного сопротивления) измеряются электронным блоком, который приводит во вращение сервомотор, управляющий подъемом или спуском головки датчика.

4.2.2.3.2. Сигнализаторы предельного уровня

Измерители уровня могут служить в качестве сигнализаторов предельного уровня, но есть специальные аппараты для этих целей, которые определяют этот уровень и включают звуковую или визуальную сигнализацию и для которых надежность работы более важна, чем точность измерения.

4.2.2.3.2.1. Поплавковые сигнализаторы предельного уровня

Поплавок проходит только определенную часть возможного вертикального перемещения и на определенном уровне включает электрическое реле.

4.2.2.3.2.2. Сигнализаторы уровня ультразвуковые

Два пьезоэлектрических элемента установлены по обе стороны от паза: один излучает ультразвуковую волну, которая достигает второго элемента только в том случае, когда паз заполнен СПГ. Эта волна преобразуется в электрический сигнал, включающий реле.

4.2.2.4. Измерение объемов

Объемные измерения СПГ необходимы:

— в процессе налива и слива СПГ из метановоза для количественного определения перевезенного СПГ по разнице объемов, измеренных в танках метановоза перед и после операций загрузки и разгрузки (коммерческие операции требуют высокую точность);
— в процессе определения хранимого количества (запаса) СПГ на заводе сжижения или в терминале (порту выгрузки метана) в данный момент времени или в ходе расчета изменения хранимого количества при составлении баланса.

Эти измерения осуществляются по соотношению: высота жидкости – объем, устанавливаемому калибровкой (тарировкой) соответствующей емкости хранения.

Для емкостей (танков) метановоза процедура тарировки в общем случае сложна, учитывая то, что форма емкостей редко цилиндрическая (сферическая или чаще всего призматическая) (см. § 4.6.1) и состоит в следующем:

— определение размерных характеристик (макрометрология, лазерный теодолит) и (или) координат большого количества точек на поверхности емкости (размерный лазерный теодолит, фотограмметрия);
— обработка этих данных на ЭВМ для моделирования емкостей и получения калибровочных таблиц, (связь высота–объем);
— определение таблиц поправок, которые для повышения точности учитывают влияние различных параметров (температура газовой фазы СПГ, плотность СПГ, крен и осадка судна и др.), влияющих на форму емкостей или замеры уровня СПГ..

Для наземных резервуаров процедура тарировки аналогична предыдущей, но более проста по причине, в том числе, их цилиндрической формы.

Методы, используемые для замеров на метановозах, позволяют получить в общем случае относительную ошибку при замере объема, указываемую в измерительных таблицах (поправочных), в пределах не более ±0,2%, которая может достигать ±0,05%. Оценивая неточности отсчета и измерений, предельная ошибка, которая может быть допущена при определении объема перевозимого СПГ, может быть в пределах ±0,3%.

4.2.2.5. Измерение расходов СПГ и холодного газа

Используются следующие типы дебитомеров:

— сужающие устройства (диафрагмы, трубки Вентури);
— турбины;
— ультразвуковые зонды;
— вортексные дебитомеры (Vortex).

Использование этих приборов для СПГ и холодного газа сложно из-за указанных в нижеследующей таблице трудностей:

Тип дебитомера	Использование для СПГ	Использование для холодного газа
Сужающие устройства	— колебания уровня жидкости в устройствах замера давления — локальные скачки давления из-за испарения СПГ в устройствах замера давления	— потери давления в измерительных диафрагмах, которые могут отразиться на работе газораспределительных сетей низкого давления
Турбинный	— малое сопротивление при сверхскоростном режиме, возникающем при двухфазном течении — пуск замерного устройства преимущественно после захолаживания установки	— необходимость использования крыльчатки турбины с частичным потоком при использовании больших диаметров, что дает хорошие результаты только в узком диапазоне дебитов
Импульсный ультразвуковой	— предварительные испытания на работоспособность в условиях необходимых низких температур (исследование на удлинение) — нарушение измерений при двухфазном течении — применимость для диаметров меньше 12 дюймов (около 305 мм)	— более приспособлены для газа высокого давления
Вортексный дебитомер	В стадии разработки	

4.2.2.6. Определение состава СПГ

Определение состава СПГ требует выполнения следующих операций:

— отбор проб СПГ;
— анализ образца (хроматография в газовой фазе).

4.2.2.6.1. Отбор проб СПГ

Он состоит в отборе из СПГ пробы газовой фазы, состав которой идентичен составу СПГ и заключается в следующих операциях:

— отбор пробы жидкости;
— полное испарение жидкости;
— приведение к стандартным условиям полученной газовой пробы.

Различают два способа отбора проб.

4.2.2.6.1.1. Непрерывный отбор пробы

Пробоотборное устройство может быть в виде пробоотборного вентиля на трубопроводе СПГ или в виде пробоотборного зонда в форме трубки Пито, отбирающего пробу СПГ из центра трубопровода, имеющего изоляцию, предотвращающую нагрев пробы перед ее испарением.

Испаритель должен быть выполнен или в виде электрического устройства, использующего тепло, производимое за счет эффекта Джоуля для быстрой регазификации СПГ во избежание фракционной дистилляции, или в виде устройства, использующего пар, горячую воду или даже работающего при температуре окружающей среды для регазификации пробы за счет теплообмена.

Полученная таким образом проба газа может быть:

— или направлена прямым путем в газоанализатор посредством трубок малого диаметра, позволяющий делать анализы, например, в течение всего времени погрузки или разгрузки судна – метановоза;
— или отобрана порционно в бутылки (пробоотборники);
— или может храниться в емкости – газометре в течение всей операции погрузки–разгрузки с тем, чтобы получить в конце операции представительную пробу СПГ, перекачанного во время операции, отбирая в газометр ряд проб с помощью бутылок.

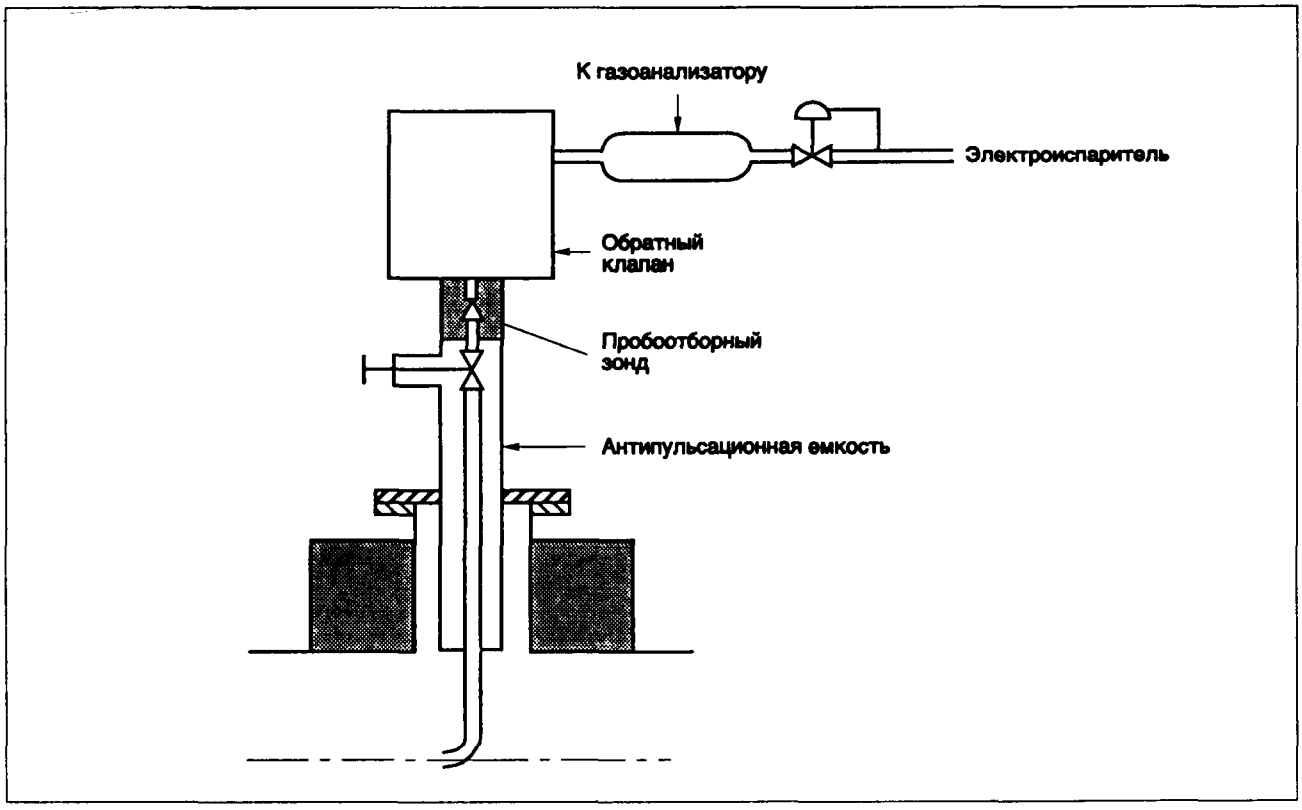
Примеры непрерывного отбора проб:

— Пробоотборное устройство системы "Газ де Франс" (Gaz de France).

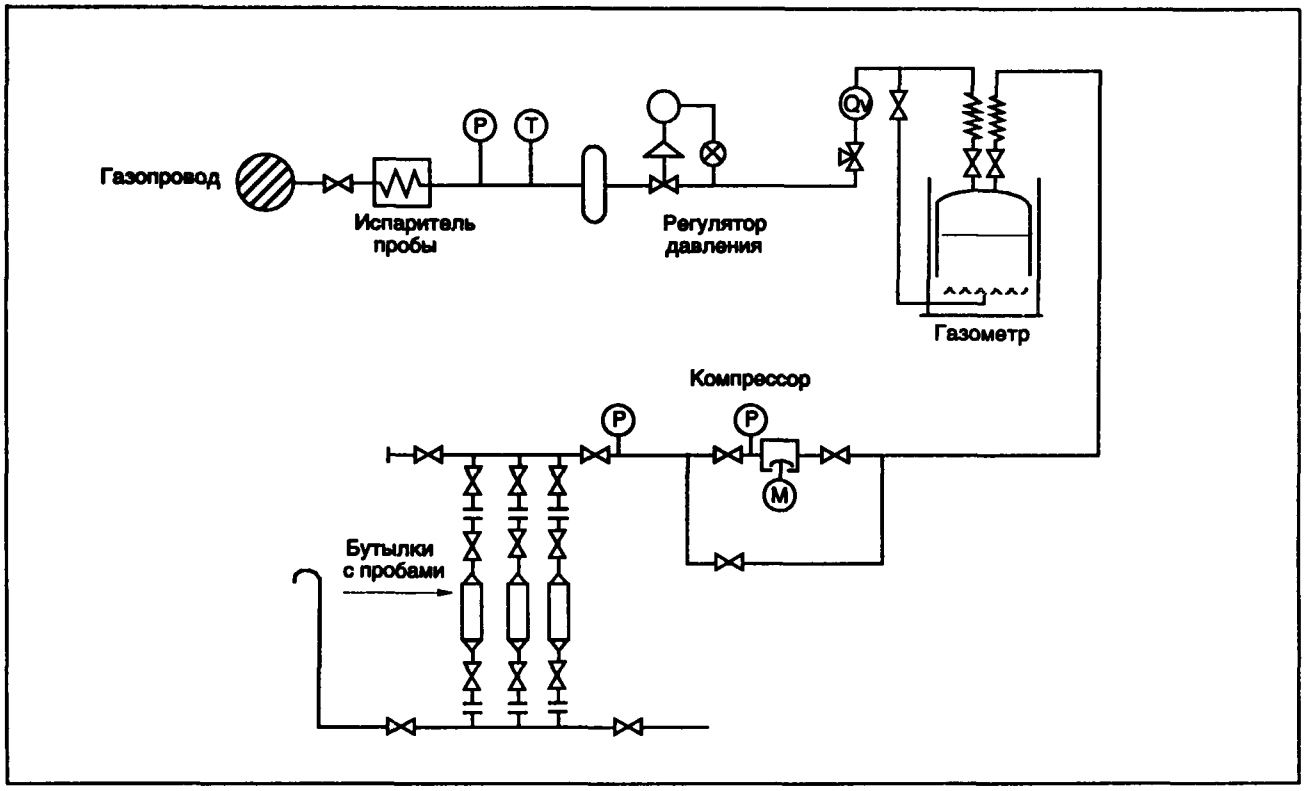
Нижеприведенный рисунок показывает устройство для отбора проб, содержащее пробоотборный зонд и электрический испаритель.

Антипульсационное устройство, дополняющее прибор, позволяет избежать пульсаций, вызываемых фазовыми переходами (жидкость–газ), которые могли бы нарушить процесс анализа.

Пробоотборное устройство имеет систему безопасности, которая предохраняет его в случае повышенного давления, внезапной остановки отбора и т.д.



Пробоотборное устройство типа GDF (Газ де Франс).



Пробоотборное устройство с газометром

Проба газа направляется непосредственно в газоанализатор.

— Пробоотборное устройство с газометрической емкостью

На рисунке с. 438 представлена пробоотборная система с пробоотборным вентилем на трубопроводе СПГ, снабженная паровым испарителем пробы СПГ и газометрической емкостью; большое количество проб газа отбирается в бутылки для анализа.

4.2.2.6.1.2. Точечный (разовый) отбор проб

Он может быть реализован отбором определенного объема СПГ в специальный контейнер, который предварительно вакуумируется. Проба СПГ испаряется полностью в контейнере, из которого в последующем можно отбирать пробы газа на анализ.

4.2.2.6.2. Система анализа

В общем случае это хроматографический анализ. В нижеследующей таблице представлены основные характеристики газоанализаторов, наиболее используемых на заводах и терминалах СПГ.

Хроматографы чаще всего соединены с ЭВМ для хранения результатов анализов, для расчетов свойств, таких как теплота сгорания, плотность и др. (§ 4.2.3).

Газ-носитель	Гелий или водород				Гелий	
Тип детектора	Катарометр				Катарометр	
Число хроматографов	3			1	1	
	1й аппарат	2й аппарат	3й аппарат		1я колонка	2я колонка
Анализируемые компоненты	CH_4	C_2H_6 C_3H_8 C_4H_{10} C_5H_{12} C_{6+} CO_2	O_2 N_2	CH_4 N_2 C_2H_6 C_3H_8 C_4H_{10} C_5H_{12}	N_2 CH_4 C_2H_6 CO_2	C_3H_8 C_4H_{10} C_5H_{12} C_{6+}

Основные характеристики газоанализаторов, наиболее используемых на заводах и терминалах СПГ.

4.2.2.7. Измерение плотности

Датчики плотности помещаются непосредственно в СПГ.

Существуют три типа датчиков, приводимых ниже в соответствии с их принципом работы:

— Архимедова сила:
плотность рассчитывается по замеру силы Архимеда, действующей со стороны жидкости на чувствительный элемент, выполненный так, что его плотность по величине близка к плотности данного СПГ;

— емкостной эфект:
плотность определяется по замеру диэлектрической постоянной СПГ с помощью емкостного цилиндра;

— вибрация тонкой пластины или трубки:
плотность определяется по резонансной частоте чувствительного элемента, погруженного в СПГ (пластина или трубка), доведенного до частоты собственного резонанса в воздухе.

Этот метод измерения наиболее распространен.

Датчики плотности или денсиметры мало используются для замеров плотности в процессе перекачки СПГ по трубопроводам, чаще всего для оценки изменения величины этого параметра по высоте резервуара, заполненного СПГ по причинам безопасности (см. § 4.10.2).

Разработаны так называемые мобильные денсиметры, которые определяют вместе с плотностью температурный профиль СПГ в резервуаре.

Мобильный денсиметр, состоящий из чувствительного элемента, представленного вибрирующей трубкой, и терморезисторного зонда, перемещается в вертикальном направлении с помощью ленты и электрического кабеля, которые приводятся в движение одним или двумя электромоторами, расположенными в измерительной головке, смонтированной на крыше резервуара. Эти приборы управляются дистанционно из поста управления, где размещены электронные блоки.

Результаты замеров, такие как плотность, температура и положение датчиков, воспроизводятся на цифровых экранах и регистраторах или непосредственно подаются на вход ЭВМ, которая обеспечивает их обработку.

Точность наиболее распространенных датчиков плотности составляет несколько кг/м^3 с порогом срабатывания 0,1 кг/м^3, точность датчиков температуры составляет около 0,1°C.

4.2.2.8. Измерение теплоты сгорания

Прямое измерение теплоты сгорания СПГ невозможно, но оно может быть сделано на газообразных пробах СПГ с помощью обычных калориметров для природного газа. В этом случае точность замера зависит главным образом от качества проб, то есть от качества используемых пробоотборных устройств (см. § 4.2.2.6).

4.2.2.9. Внутренний осмотр резервуаров, наполненных СПГ

В настоящее время имеется устройство, предназначенное для детальной экспертизы, которое позволяет контролировать:

— состояние стенок (сварные швы, оболочки, трещины и др.);

— положение систем безопасности (донный клапан и др.);

— состояние измерительной аппаратуры (измеритель уровня и др.).

Прибор состоит из:

— осмотровой камеры, то есть неподвижного линзового эндоскопа, состоящего из окуляра, телескопических труб и объектива; призмы, расположенной перед объективом и позволяющей за счет изменения ее угла наклона переходить от аксиального обзора к горизонтальному;

— осветительной аппаратуры, состоящей из галогенных ламп на низкое напряжение с пучком света, направленным и управляемым дистанционно по кабелю, а также трубчатых телескопических элементов, позволяющих перемещать лампы на желаемую глубину;

— системы защиты, представленной камерой для работы под давлением, продуваемой подогретой сухой и инертной средой, для каждого из вышеописанных аппаратов, которая их изолирует от холодной среды газового пространства резервуара (проблемы обмерзания и электробезопасности).

4.2.3. Расчет физических свойств СПГ

Если известен состав СПГ, определяемый с помощью измерительных средств, описанных в § 4.2.2.6, методы расчета, основанные на уравнениях состояния смесей углеводородов или эмпирических уравнениях в зависимости от конкретного случая, позволяют определить:

— плотность данного СПГ в состоянии равновесия пар–жидкость, кг/м^3;

— плотность данного СПГ в регазифицированном виде (кг/ст. м^3) и его теплоту сгорания (кВт · ч/кг).

Наиболее часто используются следующие расчетные методики:

— метод Клозека Маккинли (Klosek MacKinley);

— правила ISO 6976.

Другие физические свойства, такие как вязкость, теплопроводность, могут быть рассчитаны по соответствующим формулам.

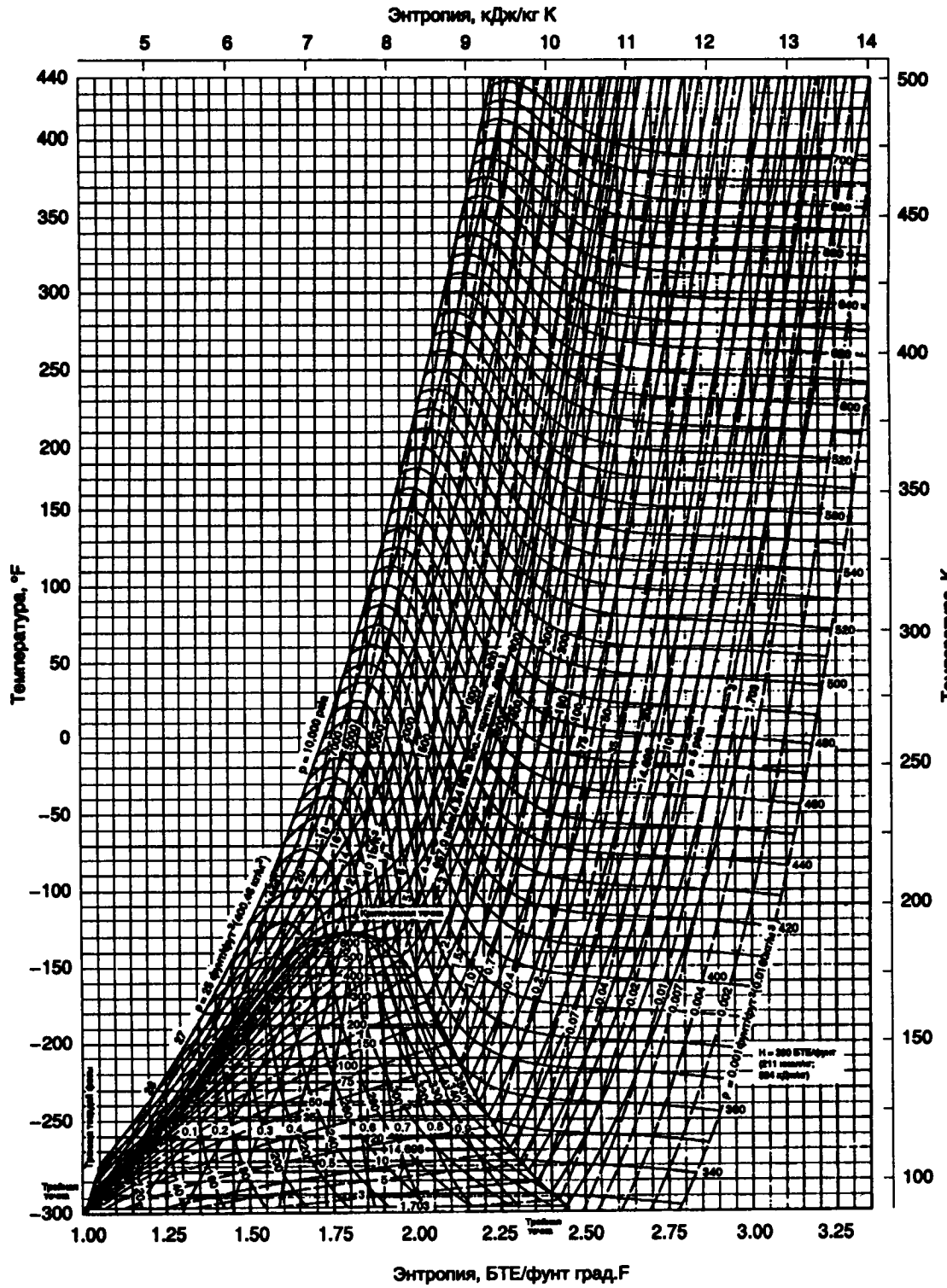
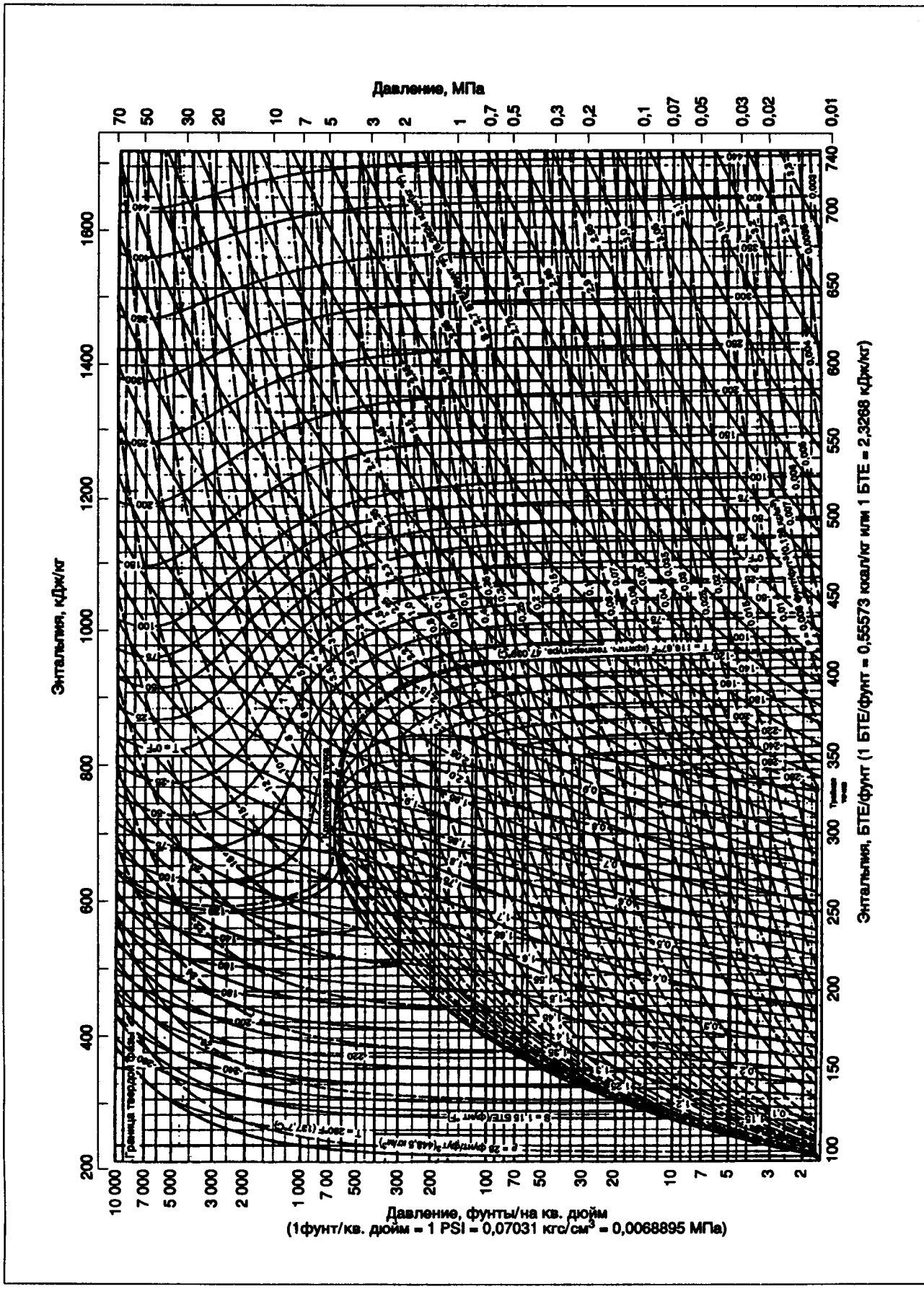


Диаграмма энтропии (T, S).



Энтальпийная диаграмма (H, P) (оригинал – N.B.S.).

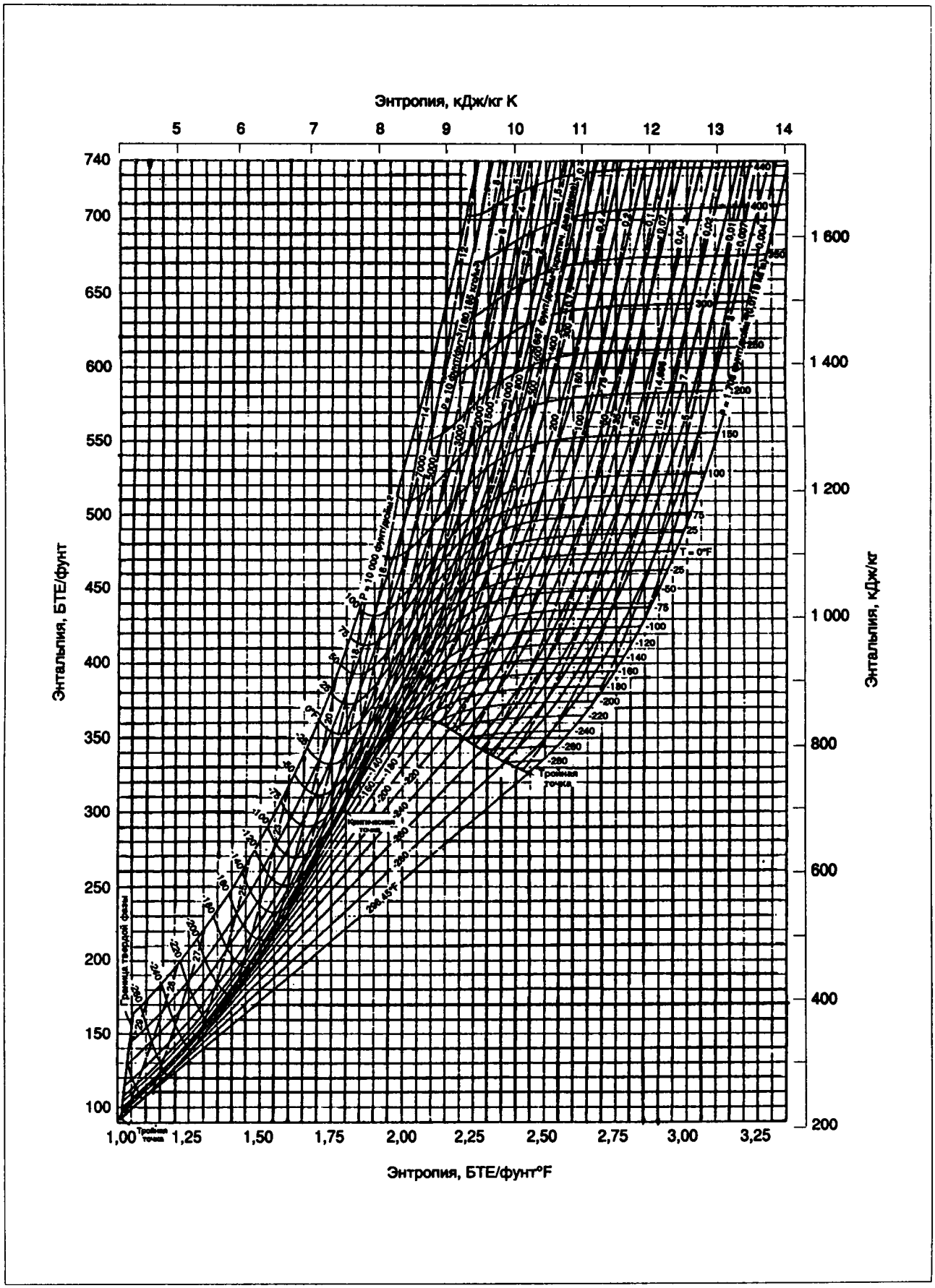


Диаграмма Молье (H, S) (источник – N.B.S.).

4.3. Поведение материалов при низких температурах

4.3.1. Металлы и низкотемпературные (криогенные) сплавы

4.3.1.1. Металлургия и низкие температуры

Некоторые результаты, полученные в металлургии, важные в криогенной технике, перечислены ниже:

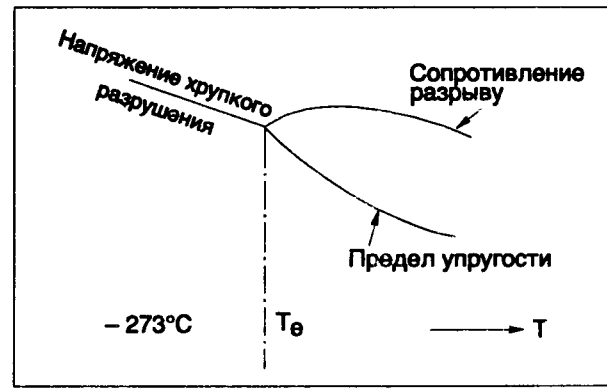
— кристаллическая система металла или сплава прямо влияет на их способность к пластическим деформациям, в зависимости от наличия или отсутствия плоскостей скольжения;
— температура может изменить кристаллическое состояние некоторых металлов или сплавов и, следовательно, их механические свойства;
— различают два типа разрыва под нагрузкой:
  · пластичный разрыв, характерный для металлических материалов, способных к значительным деформациям перед разрывом, который распространяется по линиям скольжения кристаллической системы;
  · хрупкий разрыв (разрушение), соответствующий двум формам разрушения:
— разрушение расслоением, которое распространяется с большими скоростями без видимой деформации по особым кристаллическим плоскостям;
— межгранулярный разрыв, характеризующийся межгранулярными связями кристаллической системы.

Температура является тем параметром, который вызывает ту или иную форму разрушения. В частности, если изучают сопротивление металлических материалов при понижении температуры при медленном нагружении, сопротивление разрыву (предел прочности) и предел упругости имеют тенденцию к сближению и сталь способна разорваться без пластической деформации по типу хрупкого разрушения.

Из этого следует, что при использовании металлических материалов в криогенных условиях, где необходимы большие температурные циклы, мера их хрупкости должна быть определена: это определение состоит в уточнении опытным путем "зоны перехода пластичности" этих материалов.

Были проведены многочисленные более или менее сложные [illegible], давшие приближенные значения температуры, при которых появляется риск развития хрупкого разрушения в данной реальной структуре.

Самое простое, но далеко не самое используемое испытание, это испытание на пластичность, которое заключается в испытании на удар посредством маятникового молота по образцу металла, опирающемуся на концевые опоры и имеющему вырез в форме V. Для того, чтобы построить кривую пластичности, достаточно разрушить серию образцов при понижающихся температурах опыта, начиная с температуры окружающей среды, и зарегистрировать для каждого значения температуры энергию, поглощенную при разрушении (эта энергия определяется по углу подъема маятника-молота, при опускании которого образец разрушается).



Механические характеристики металлических материалов при понижающихся температурах и медленном нагружении

В области СПГ используются металлы и сплавы, имеющие и не имеющие зону перехода пластичности.

Кстати, физическое свойство, которое в первую очередь следует принимать во внимание при решении вопроса о применимости металлов при низких температурах, есть их теплопроводность.

4.3.1.2. Металлы и сплавы без зоны перехода пластичности

Это семейство состоит из:

— меди и ее сплавов;
— алюминия и его сплавов;
— никеля и его сплавов;

а также аустенитных сталей *.

4.3.1.2.1. Медь, алюминий, никель

В таблице на с. 444 указаны металлы и сплавы, используемые в установках СПГ, а также их механические статические и динамические свойства при температурах от комнатной до –196°C (температура жидкого азота), то есть тех температурах, при которых по причинам удобства эти характеристики измеряются.

В практике СПГ не применяются обычные сплавы, такие как:

— бронзы на основе олова;
— латуни с содержанием цинка более 35%;
— сплавы алюминиево-цинковые;
— все сплавы, подвергнутые холодной прокатке.

Температура, °C	Теплопроводность, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$	Температура, °C	Теплопроводность, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$
–260	149,8	20	217,6
–230	350,3	100	218,9
–193	256,2	200	224,3
–166	250,3	500	208,9
0	210,1	600	150,7

Таблица теплопроводности алюминия.

Сплав AG 4 MC очень широко используется, в частности, для сооружения криогенных резервуаров.

Предпочтительная область применения семейства алюминиевых – это теплообменники.

* Ранее и здесь в тексте: испытание KCV – удельная нагрузка деформации по Шарпи V (Charpy V). Прим. ред.

Металл или сплав, наименование	Химический состав	Термообработка	Средние механические характеристики							
			разрывная нагрузка, МПа		предел упругости, МПа		удлинение, %		плотность KCV декаДж/см^2	
			20°C	−196°C	20°C	−196°C	20°C	−196°C	20°C	−196°C
— Никель	Ni 99,8	Отжиг	470	590	130	150	45	48	38	40
Монель*	Ni 70 · Cu 30		520	770	200	350	28	33	36	36
Инконель*	Ni 78 · Cr 15 · · Fe 7		620	800	500	600	42	55	38	34
— Алюминий	Al 99,8		80	150	30	40	40	55	3	4
Ag 4 MC	Al 95 Mg4 Mn 0,4 Cr 0,2		250	380	110	130	25	40	4	3,5
AG 3	Al 97 Mg3		200	300	60	90	30	45	4	4
AM 1	Al + 1,25 Mn		120	220	40	60	40	48	3	3,5
— Медь	Cu 99,8		240	360	70	80	50	60	8,5	10
Алюмомедь	Cu 91 Al 9		450	560	140	170	36	43	8	–
Латунь	Cu 70 Zn 30		360	450	200	220	48	75	13	14
Медь-никель	Cu 70 Ni 30		380	580	150	220	52	63	18	21

* Коммерческое наименование.

Средние механические характеристики металлов и сплавов, не имеющих зоны перехода пластичности.

4.3.1.2.2. Аустенитные стали

В нижеследующей таблице даны средние механические характеристики наиболее часто используемых для СПГ аустенитных сталей, в которых содержание железа превышает 50% и которые, если их используют для изготовления листовых материалов (корпуса резервуаров), подлежат французской нормализации: NFA 36209 – "Листы стальные аустенитные для аппаратов под давлением при низких и сверхнизких температурах".

Тем не менее настоятельно рекомендуют использовать для СПГ аустенитные стали с добавкой азота в условиях, когда напряжения под нагрузкой остаются ниже 80 МПа или даже 120 МПа.

Сталь Z2CN 18-10 по американским нормам именуется 304 L.

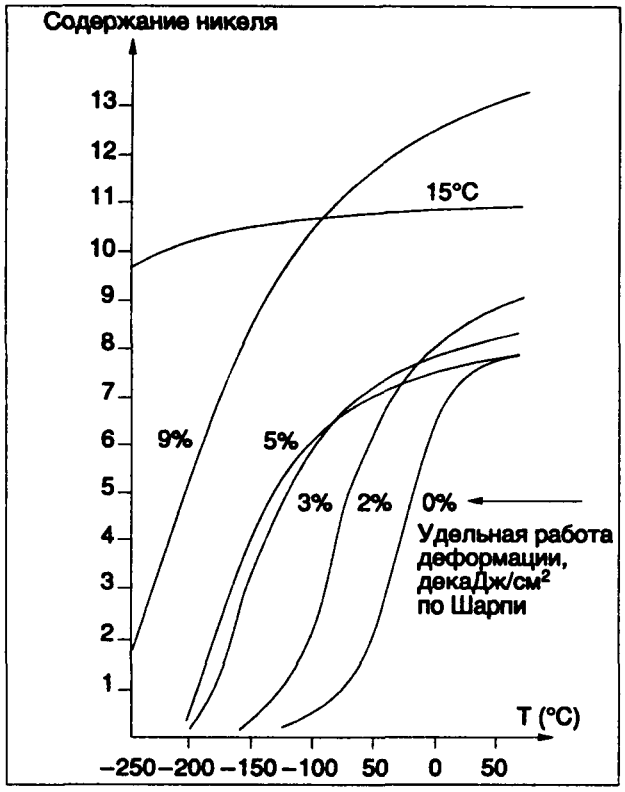
Сталь Z2N 36 известна под коммерческим названием Инвар. Она обладает очень низким значением коэффициента расширения в зависимости от температуры: $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} в интервале между −180 и 0°C, или примерно 1/10 этой величины для стали 304L. Используется эта сталь, в частности, для изготовления внутренних емкостей некоторых метановозов (см. § 4.6.1) и некоторых наземных резервуаров (см. § 4.8). Ее теплопроводность изменяется от 8.36 Вт·м$^{-1}$·K^{-1} при минус 160°C до 14.63 Вт·м$^{-1}$·K^{-1} при 20°C.

Нормализация (Afnor)	Нормальный состав	Средние механические характеристики							
		разрывная нагрузка, МПа		предел упругости, МПа		удлинение, %		удельная работа деформации, дека Дж/см^2	
		20°C	−196°C	20°C	−196°C	20°C	−196°C	20°C	−196°C
Z10 CN 18-08	Cr 18, Ni 8, C < 0,10	550	1 300	250	350	60	35	18	18
Z 2 CN 18-10	Cr 18, Ni 10, C < 0,03	450	1 050	220	300	70	40	20	20
Z10 CNO 17 12-3	Cr 18, Ni 12, Mo 3, C < 0,10	580	1 100	270	450	65	55	14	12
Z 2 CNO 17 12-3	Cr 18, Ni 12, Mo 3, C < 0,03	500	1 000	260	400	62	54	16	14
Z10 CNT 18-11	Cr 18, Ni 11 + титан	600	1 400	270	450	60	45	16	12
Z10 CNO 18-11	Cr Ni + ниобий	560	1 250	270	420	63	47	16	14
CN 25-20	Cr 25, Ni 20	560	1 200	210	470	60	80	20	18
Z 2 CN 18-10 Az	Cr 18, Ni 10 + азот	600	1 400	290	650	50	40	20	13
Z 2 N 36	Ni 36	480	870	290	620	35	35	22	14

Средние механические характеристики аустенитных сталей.

4.3.1.3. Металлы и сплавы, имеющие зону перехода пластичности

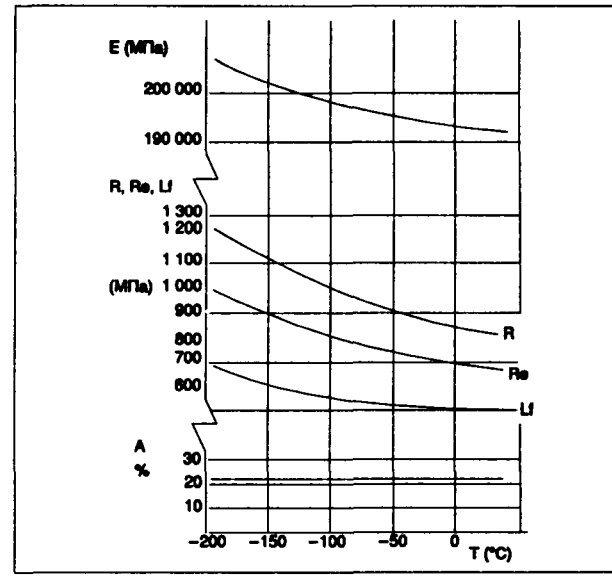
Это семейство объединяет обычные нелегированные или легированные железистые стали, которые прошли термообработку и в которых снижена концентрация примесей, и особенно стали с добавкой никеля. В этих сталях происходит смещение зоны перехода пластичности в сторону низких температур. Кривые, на приведенном ниже графике, показывают характер изменения перехода зоны пластичности для различных типов сталей с содержанием никеля от 0 до 15%.



Изменение удельной работы деформации по Шарпи V для различных сталей с содержанием никеля от 0 до 9% в зависимости от температуры.

Для использования в области СПГ рекомендуется только сталь с 9% никеля: зона перехода пластичности ее находится ниже минус 186°C, механические характеристики лучше, чем у других сталей (см. рисунок) и она достаточно экономична в производстве.

Обычно выплавляемая в электропечах, эта сталь должна иметь строго определенный состав,



Механические характеристики сталей с содержанием 9% никеля: E – модуль упругости; R – сопротивление разрыву; Re – предел упругости; Lf – предел усталости от переменного изгиба; A, % – удлинение при разрыве.

Минимальные значения механических свойств		ASTM A 553 (американские нормы)		Afnor NF A 36208 (французские нормы)
				Лист толщиной $e \leq 30$ мм
Сопротивление на разрыв при 20°C (МПа)		690 - 825		≥686
Предел упругости при 20°C (МПа)		585		588
Удлинение при 20°C (%)		20		19
Уд. работа деформации по Шарпи V при –196°C по длине, мин (дека Дж/см²)				индивидуальное значение: 5 среднее значение: 6
Уд. работ деформации по Шарпи V при –196°C в поперечном направлении, мин (дека Дж/см²)				6
Химический состав:		Тип I	Тип II	
Углерод	%	0,13	0,13	0,12
Никель	%	8,4 - 9,6	7,4 - 8,6	8,5 - 9,5
Кремний	% макс.	0,13 - 0,32	0,13 - 0,32	0,35
Сера	% макс.	0,040	0,040	0,035
Фосфор	% макс.	0,035	0,035	0,035
Магний	% макс.	0,98	0,98	0,8
Хром	% макс.			0,20
Молибден	% макс.			0,10

Спецификации прокатной стали с содержанием 9% никеля.

если хотят придать ей улучшенные механические свойства, и нижеприведенная таблица уточняет минимально необходимые механические свойства, требуемые нормами (ASTM - ASME - Afnor).

Сталь с 9% никеля используется преимущественно для изготовления криогенных емкостей и трубопроводов или арматуры, где встречаются трудности изготовления сложных по форме изделий. Ее теплопроводность изменяется от 19,23 при –150°C до 29,26 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} при 25°C.

4.3.1.4. Частный случай сталей со структурным отвердением

Мартенситные стали, имеющие характеристики между аустенитными и легированными никелем сталями, структурные отвердения, могут быть использованы в криогенной технике, в частности сталь KS1140, механические характеристики которой приведены в нижеследующей таблице.

4.3.1.5. Сварка металлов и сплавов, используемых в области СПГ

4.3.1.5.1. Медь и медные сплавы

Они всегда свариваются классическими способами с использованием припоев с составом, аналогичным составам основных материалов.

4.3.1.5.2. Алюминий и его сплавы

Эти материалы должны свариваться электросваркой в атмосфере инертного газа, лучше всего автоматическим или полуавтоматическим способом.

Сплав AG 4MC, не так часто используемый, должен свариваться с алюминиево-магниевым припоем с содержанием 5% магния (испарение магния).

4.3.1.5.3. Аустенитные стали

Свариваемые элементы и припои должны выбираться преимущественно из марок с очень низким содержанием углерода и с минимальным содержанием примесей для того, чтобы эти материалы, имеющие тенденцию к миграции в соединениях зерен, были бы достаточно надежного качества, чтобы не возникало межзерновой хрупкости.

4.3.1.5.4. Стали с 9% содержанием никеля

Для сварки этих сталей рекомендуется в качестве припоя сплав типа инконель, статические механические свойства которого и коэффициент расширения близки к аналогичным характеристикам указанных сталей и который, кроме того, не имеет зоны перехода пластичности.

4.3.2. Другие криогенные материалы

Кроме металлов многие другие материалы имеют подходящие характеристики в точно определенной области – при низких температурах:

— земля (грунт),
— бетоны,
— дерево,
— пластмассы.

4.3.2.1. Земля

Первый материал, который можно рассматривать как подходящий при строительстве криогенных установок, – это сама земля. В самом деле, замерзание воды, насыщающей грунт, придает ему механическую прочность, позволяющую использовать его в качестве хранилища. Механическая прочность замороженного грунта зависит не только от температуры, но и от насыщенности водой. Необходимо отличать мгновенную прочность от сопротивления ползучести (текучести), которое во много раз меньше по величине. Это различие объясняется наличием льда, который служит цементом между частицами грунта и обуславливает пластичность и ползучесть замороженных грунтов.

Некоторые грунты типа глинистых вспучиваются при замерзании за счет впитывания воды, другие, как, например, песчаники, не имеют этой особенности. Значительное вспучивание, наблюдаемое при замораживании глинистых грунтов, объясняется не замерзанием первичной воды, а поступлением в грунт воды в результате уменьшения парциального давления паров воды на границе промерзания.

Грунт в криогенной технике используется в двух случаях:

— подземные резервуары, в которых СПГ хранятся прямо в полостях, вырытых в замороженном грунте. Эта техника, представляющая интерес

Состав, %		Механические характеристики				
		Предел прочности (разрывная нагрузка) при 20°C, МПа	Предел текучести при 20°C, МПа	Удлинение, %	Удельная работа деформации по Шарпи V, дека Дж/см^2	
					20°C	–196°C
Углерод	<0,03	1 400 - 1 540	1 330 - 1 470	14 - 16	9 - 16	5 - 8
Никель	17 - 19					
Кобальт	8 - 9					
Молибден	3 - 3,5					
Титан	0,15 - 0,25					
Сера	<0,01					
Магний	<0,1					
Фосфор	<0,01					

Механические характеристики стали KS 1140.

с точки зрения безопасности, была использована в некоторых сулчаях в шестидесятые годы (хранилища в Канвей Исланде в Англии и в Арзеве в Алжире), но от нее отказались по двум причинам: вокруг хранилищ происходит подвижка грунта; потери на испарение слишком велики (теплопроводность грунта заключена в пределах от 1 до 2 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$);
— противопожарные рвы, окружающие наземные резервуары, – хранилища СПГ.

4.3.2.2. Бетоны

Бетоны являются криогенными материалами, их механические свойства: сопротивление сжатию, модуль упругости, сопротивление разрыву, коэффициент Пуассона, увеличиваются при низких температурах, в то же время ползучесть уменьшается. С другой стороны, циклы нагрев–охлаждение им противопоказаны: бетон повреждается тем быстрее и больше, чем больше влажность и чем больше термический шок (амплитуда колебаний температуры).

Теплопроводность растет в интервале температур от 20°С до –170°С на 30 - 60% для влажного бетона и на 5 - 20% для сухого бетона. С другой стороны, теплоемкость бетона уменьшается с понижением температуры, это понижение возможно составляет около 50% при –170°С.

Обычно применяют армированные бетоны. Поэтому в каждом случае необходимо учитывать структурное поведение системы бетон–арматура. При охлаждении благодаря разной степени сжатия бетона и стали образуются внутренние напряжения: в первой фазе замораживания влажный бетон расширяется благодаря образованию льда, во второй фазе сокращает свой объем, и при –165°С существует значительное отклонение в степени деформации бетона и стали. Термические циклы в интервале +20°С и –165°С вызывают более или менее значительное повреждение бетона.

В криогенной технике бетон используется по двум направлениям:

— как первичный механический барьер для содержания СПГ (пример – резервуары в Барселоне). От этой технологии постепенно отказываются, так как, поскольку бетон плохо переносит циклы нагрева–охлаждения, эти резервуары могут быть разогреты только в очень редких случаях;
— как вторичный барьер, предназначенный для содержания СПГ в случае аварии в первичном барьере. Эта технология в значительной степени увеличивает безопасность наземных резервуаров.

Одно из побочных применений бетона состоит в использовании его в качестве изолирующего материала (например, коллоидный бетон) на поверхности рвов или ловушек, предназначенных для приема СПГ в случае розлива из наземного резервуара.

Во всех перечисленных случаях применения чувствительность бетона к термическим циклам не является проблемой, а его прочность к ударам, огнестойкость и прочность при низких температурах делают его идеальным материалом.

4.3.2.3. Древесные материалы

Все свойства древесных материалов улучшаются с понижением температуры, и эти материалы не отличаются особой хрупкостью в криогенных условиях. Поэтому деревянные отсеки используются в качестве изоляции, когда хотят одновременно получить достаточную механическую прочность и небольшую теплопроводность.

Тем не менее древесные материалы, используемые в этом качестве, имеют три дефекта в криогенных условиях:

— они растрескиваются;
— их механические характеристики разбросаны;
— их усадка в десять раз больше в поперечном направлении, чем в направлении волокон (размерная нестабильность).

Чтобы избавиться от этих дефектов, часто применяют древесные материалы в виде фанеры, изготовленной в виде листов древесины, склеенных так, что в соседних листах направления волокон ориентированы различно. Свойства клеев, используемых при низких температурах, определяют свойства фанеры, в криогенной технике применяют всегда морские клеи.

Как положительный факт следует отметить, что теплопроводность фанеры сильно уменьшается с понижением температуры и что при –160°С ее значение примерно вдвое меньше теплопроводности при комнатной температуре.

Во всех метановозах, танки которых изготовлены по мембранной технологии, фанера используется как изолирующий материал и механическая опора, а одна из технологий использует фанеру как материал для вторичного барьера (см. § 4.6.1.2.1).

Материалы	Плотность, кг/м^3	Теплопроводность, Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$
Дерево плотное	800 - 1 000	0,29
Лиственные среднеплотные (дуб, бук)	600 - 750	0,23
Лиственные легкие (липа, береза, клен)	450 - 600	0,15
Хвойные легкие (сосна), лиственные очень легкие (тополь)	300 - 450	0,12
Бальсовое дерево	60 - 120	0,052
Фанеры	350 - 530	0,12 - 0,15

Свойства древесных материалов при комнатной температуре.

4.3.2.4. Пластмассы для стыковых соединений и арматуры

Каучук, который становится хрупким при низких температурах, не может быть использован в криогенной технике. Вместо него в качестве прокладок в соединениях и арматуре используют следующие материалы:

— смеси синтетических эластомеров и асбеста: это изделия, названия которых в коммерческой практике оканчиваются на "ит.": перманит, вулкорит, клингерит и т.д. Наличие асбеста накладывает определенные ограничения в использовании, такие как запрещение абразивной обработки;
— политетрафторэтилен (ПТФЭ), используемый или в чистом виде (коммерческое название – тефлон) или смешанный со стекловолокном (коммерческое название – Кел Ф).

4.3.3. Изолирующие материалы

Неоходимость термоизоляции оборудования, содержащего СПГ, показана в § 4.4.1.3.4.

4.3.3.1. Критерии выбора термоизоляции в криогенной технике

Хорошая изоляция должна отвечать пяти типам критериев:

— физическим;
— механическим;
— безопасности;
— конструктивным;
— экономическим.

4.3.3.1.1. Физические критерии

4.3.3.1.1.1. Коэффициент теплопроводности

Изолирующие материалы, используемые в криогенной технике, имеют в большинстве случаев величину коэффициента теплопроводности меньше 0,050 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}. Численное значение этой характеристики зависит от температуры.

4.3.3.1.1.2. Непроницаемость

В отличие от паропроводов холод в случае СПГ находится внутри трубопровода; влага воздуха имеет тенденцию к проникновению внутрь теплоизоляции с образованием инея или льда. Коэффициенты теплопроводности этих веществ имеют средние значения (λ = 0,6 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} для воды и λ = от 2 до 3,5 Вт · м$^{-1}$ · K^{-1} для льда в диапазоне от 0 до −100°C), поэтому общее качество теплоизоляции уменьшается.

Следовательно, необходимо использовать непроницаемую теплоизоляцию или предохранить ее от проникновения воды посредством водонепроницаемого покрытия или предохранить изолируемое пространство от проникновения воды, создав в нем избыточное давление с помощью сухого газа.

4.3.3.1.1.3. Старение

Помимо проникновения влаги процесс старения обусловлен тем, что некоторые виды теплоизоляции вследствие внутренних химических изменений (очень медленные вторичные реакции, миграция компонентов) или внешних (изменения структуры из-за воздействия ультрафиолетового излучения солнца, например) воздействий подвержены трансформациям, которые ухудшают их первоначальные изоляционные свойства. Применение таких материалов требует особых мер предосторожности при строительстве криогенных сооружений, срок службы которых превышает 20 лет.

4.3.3.1.2. Механические критерии

4.3.3.1.2.1. Плотность

Хорошая термоизоляция должна быть как можно более легкой для того, чтобы не перегружать сооружения (резервуары, трубопроводы и т.д.), на которые она наносится.

4.3.3.1.2.2. Термическая усадка

Если изолирующий материал и изделие, на которое он нанесен, имеют различные коэффициенты термоусадки, теплоизоляция должна иметь термокомпенсирующие вставки (соединения).

4.3.3.1.2.3. Жесткость

Интересно отметить, что, в случае, например, полиуретана, жесткость материала компенсирует утяжеление из-за нанесения теплоизоляции.

4.3.3.1.2.4. Ударопрочность

Этот критерий важен в особенности для трубопроводов. Монтаж предварительно покрытых изоляцией участков трубопроводов или особых узлов вызывает необходимость использования грузоподъемных механизмов, которые могут вызвать удары, поэтому хорошая теплоизоляция не должна быть хрупкой.

4.3.3.1.3. Критерии безопасности

По очевидным причинам для объектов газовой промышленности термоизоляция должна быть огнестойкой.

Нормы Afnor классифицируют различные теплоизоляционные материалы в соответствии с их огнестойкостью.

4.3.3.1.4. Эксплуатационные критерии

Теплоизоляция должна не только легко наноситься но и быть легко контролируема, в частности в особых точках, таких как, например, задвижки, компенсаторы, опоры трубопроводов.

4.3.3.1.5. Экономические критерии

Эти критерии, естественно, различны для различных видов теплоизоляции. Расходы на оплату труда при покрытии теплоизоляцией трубопроводов СПГ пластинками предварительно изготовленного полиуретана могли бы быть здесь определяющим параметром (см. § 4.3.3.2.3).

4.3.3.2. Различные типы теплоизолирующих материалов

Теплоизоляция может быть классифицирована в четыре большие группы:

— многослойная теплоизоляция, называемая также суперизоляцией;
— волоконные материалы;
— насыпные материалы;
— жесткие материалы.

4.3.3.2.1. Многослойные теплоизолирующие материалы

Суперизоляция получается наложением слоев материалов с высокой отражающей способностью (таких как алюминиевые листы, медные листы, алюминированный милар) на материалы с низкой теплопроводностью, например, нейлон. В случае поддержания в теплоизолируемом пространстве давления ниже 1300 Па, можно получить очень низкое значение коэффициента кажущейся теплопроводности, порядка 2 · 10^{-5} Вт · м$^{-1}$ · K^{-1}.

Этот вид теплоизоляции очень дорогой и применяется главным образом в лабораторной технике и в метрологии (измерительной технике).

4.3.3.2.2. Насыпные и волоконные материалы

Из сыпучих материалов наибольшее распространение нашли перлит и вермикулит, которые могут накладываться в виде секционированных объемных блоков для предотвращения конвективного переноса тепла:

— перлит получают из вулканических горных пород типа силиката алюминия. Нагретые до 800°С, эти алюмосиликаты теряют связанную воду в паровой фазе. Остающиеся твердые частицы раздуваются, образуя шарики, средний размер которых порядка 0,5 мм. Более тонкие порошки могут быть получены механическим дроблением;

— вермикулит состоит из расслоенной слюды, т.е. разделенной на микроскопические пластинки.

Наиболее часто используемыми волокнистыми материалами при строительстве зданий и в криогенной промышленности являются стекловолокно и минеральная вата.

Оба материала в качестве общего недостатка способны сорбировать влагу и поэтому должны быть помещены в пространстве под давлением сухого газа или изолированы от влаги и находиться под небольшим абсолютным давлением.

Для справки:

— общий (кажущийся) коэффициент теплопроводности ($\lambda_к$) некоторого пространства под давлением в криогенной технике составляет:

$$\lambda_к = \frac{\lambda_г}{1 - r\left(1 - \frac{\lambda_г}{\lambda_т}\right)},$$

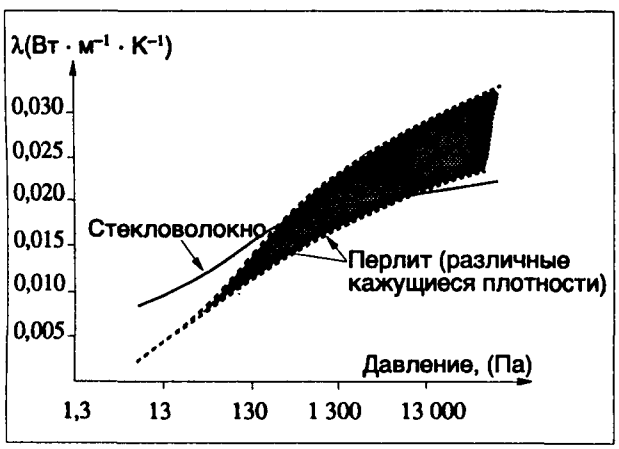
где

$$r = \frac{\text{объем твердой фазы}}{\text{полный объем}};$$

$\lambda_г$ – коэффициент теплопроводности газа;

$\lambda_т$ – коэффициент теплопроводности твердой фазы;

— коэффициент теплопроводности насыпных и волоконных материалов может быть значительно уменьшен, если в теплоизолируемом пространстве поддерживать небольшое абсолютное давление (1 300 Па) (см. нижеследующий график).



4.3.3.2.3. Жесткие материалы

Если исключить пробку, которая является природным материалом, используемым в промышленности СПГ с ее зарождения, другие применяемые материалы являются промышленными с закрытой структурой.

4.3.3.2.3.1. Пенополистирол

Эта пластмасса производится в виде предварительно подготовленных блоков, получаемых на основе этилена и бензола, и она имела бы хорошие теплоизолирующие свойства, если бы не поглощала столько воды. Тем не менее легкость нанесения полистирола способствует иногда его использованию в качестве временной изоляции трубопроводов, но никогда для постоянной теплоизоляции. К тому же он легко возгорается (класс М5). Его термоусадка колеблется около $7 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$ в интервале –30 - +30°С, что в пять раз выше малоуглеродистых сталей.

4.3.3.2.3.2. Пеностекло

Этот материал, представляющий собой абразивные остроугольные частицы с неприятным запахом, получают нагнетанием сероводорода в стекломассу. Пеностекло абсолютно влагостойко и огнеупорно (плавится около 550°С), но хрупко, тяжело (160 кг/м^3) и не удобно в применении.

4.3.3.2.3.3. Поливинилхлорид (ПВХ)

Этот термопластический материал, более известный под коммерческим названием Клежесель (Klegecel), формируется под давлением 20,0 - 30,0 МПа при 175°С. Пенообразователь, вводимый в форму при 90°С, при твердении геля позволяет получить пену с закрытыми ячейками.

Этот способ изготовления термоизоляции может быть использован только в заводских условиях.

4.3.3.2.3.4. Пенополиуретаны

Этот продукт имеет наилучшие свойства. Полиуретан получается в результате реакции между изоцианатами и полиолями (производными спиртов) в присутствии пенообразователя (фреона), катализаторов и различных добавок, среди которых огнеупоры, придающие полиуретану свойство самогашения.

Полиуретан может быть применен непосредственно на стройплощадке (отлит на месте) или предварительно изготовлен на заводе. Он или прямо напыляется на трубопровод или предварительно отливается на заводе в виде блоков в форме раковин.

Измеренный в лаборатории коэффициент теплопроводности полиуретана равен 0,017 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$; его значение стабилизируется на уровне 0,026 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$ в конце второго года. Плотность колеблется в пределах между 40 и 90 кг/м^3. Пористость порядка 5%.

Опыты, проведенные на образцах промышленных размеров, показывают, что полная изоляция, сделанная из пенополиуретана, имеет следующие значения коэффициента теплопроводности:

— отлитые на месте образцы:
  - новые: 0,030 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$;
  - после выдержки в несколько недель: 0,032 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$;

— предварительно изготовленные на заводе образцы:
  - новые: 0,034 Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$;
  - после выдержки в несколько недель: Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$.

4.3.3.2.4. Сравнение теплопроводностей различных теплоизолирующих материалов

В нижеследующей таблице приведены значения коэффициентов теплопроводности различных материалов – металлов, газов, жидкостей.

Материал	Плотность, кг/м^3	Теплопроводность, Вт · м$^{-1}$ · К$^{-1}$
Медь		145
Алюминий		200
Нержавеющая сталь		10
Нейлон		0,4
Бетон		1,74
Стекловолокно	150	0,046
Пеностекло (–160°С)	160	0,042
Пенополистирол	300	0,040
Поливинилхлорид		0,020
Полиуретан	50	0,030
Перлит (–160°С)	30	0,025
	80	
Вода (0°С)	1 000	0,6
Лед (0°С)		2,25
Снег (0°С)		0,45
Метан (–160°С)	0,7	0,013
Воздух (–160°С)		0,011

Коэффициенты теплопроводности различных материалов – металлов, газов, жидкостей.

4.3.3.3. Примеры применения теплоизолирующих материалов в промышленности СПГ

4.3.3.3.1. Трубопроводы

Полиуретановая пена часто используется для теплоизоляции трубопроводов СПГ или холодного газа. Толщина слоя изоляции выбирается на основе технико-экономических расчетов. На вышеупомянутых трубопроводах теплоизоляция может выполнять следующие функции:

— или минимизировать поступление тепла в трубопроводы при приемлемой стоимости;
— или поддерживать эти трубопроводы в условиях, не допускающих их обмерзания для того, чтобы не утяжелять трубы ледяной шубой (в этом случае величина теплопритока в трубопровод не играет роли).

Полиуретановая пена чаще всего покрыта паронепроницаемой оболочкой, выполненной из слоя битума, нанесенного между двумя листами алюминия, усиленного стекловолокном против проникновения влаги и металлической оболочкой для предохранения от случайных внешних ударов.

Примечание: Теплоизоляция трубопроводов СПГ является одновременно эффективным противопожарным покрытием (см. § 4.10.1.6).

4.3.3.3.2. Резервуары малой емкости

Резервуары малой емкости, такие как продувочные емкости установок СПГ, обычно теплоизолированы слоем полиуретана, напыленного на месте или в заводских условиях. Техника покрытия такая же, как и для трубопроводов.

Автоцистерны (см. § 4.6.2) могут быть теплоизолированы таким же способом или изолированы перлитом, поддерживаемым под небольшим абсолютным давлением (1 КПа).

4.3.3.3.3. Хранилища

4.3.3.3.3.1. Мембранные резервуары (см. § 4.8.3)

Теплоизолирующий материал наносится на внутреннюю поверхность внешней оболочки.

Внутренняя емкость прикреплена к слою теплоизоляции.

— *Метод Текнигаз (Tachnigaz)*

Теплоизоляция изготавливается из материала Клежесель (поливинилхлорид) общей толщиной 168 мм и из облицовки толщиной 12 мм, нанесенной на мембрану для стенок обечайки и днища. Крыша изолирована слоем стекловолокна толщиной 300 мм.

— *Метод Газотранспортной компании (Gaz Transport)*

Теплоизоляцией является перлитовый порошок, который находится внутри водонепроницаемых камер морского типа.

Теплоизолирующее пространство или находится под небольшим абсолютным давлением (0,1 - 1,0 КПа) или, наоборот, находится под давлением (испарением из емкости с азотом) для предохранения порошка перлита от проникновения влаги.

4.3.3.3.3.2. Резервуары с плавающей крышей (см. § 4.8.3)

Теплоизоляция осуществляется перлитом для корпуса, пеностеклом для днища и стекловолокном для крыши, если последняя подвешена.

4.4. Сооружение объектов СПГ

4.4.1. Проблемы, связанные с термодинамическим состоянием СПГ

Различают проблемы, связанные с тем, что СПГ:

— есть жидкость в состоянии, близком к точке кипения;
— есть смесь простых (чистых) веществ;
— находится при низкой температуре.

4.4.1.1. Испарение

Любой приток тепла в устройство, содержащее СПГ, приводит к частичному испарению последнего, и если СПГ находится в закрытом объеме, теплопритоки, которые неизбежны, приводят к быстрому возрастанию давления.

Для емкостей СПГ небольшого объема (например, отрезок трубопровода между двумя задвижками), предохранительные клапаны сбрасывают избыточное давление.

Количества испарившегося продукта (потери на испарение) на установке СПГ быстро становятся значительными, их энергетической ценностью пренебречь нельзя, поэтому в общем случае для улавливания и обратного сжижения этих испарений используются следующие средства:

— улавливание (обычно созданием давления) с судна, находящегося под загрузкой, на завод или для возврата на судно, находящееся под разгрузкой (сливом), с терминала (см. § 4.6.1.3.2);
— откачка компрессорами для возврата на вход установки сжижения, для перекачки в систему распределения терминала, для внутреннего энергетического потребления (топливный газ) установки сжижения или для рекуперации (см. § 4.7.1.2.1).

4.4.1.2. Старение СПГ

СПГ, будучи смесью простых веществ, образует пары состава, отличающегося от состава жидкости, в парах представлены больше всего легколетучие углеводороды. Таким образом, состав остаточного СПГ изменяется в сторону обогащения высококипящими компонентами, и это явление называется старением СПГ: теплотворная способность и число Воббе увеличиваются.

Примеры:

— для СПГ, содержащего азот, компонент более летучий, чем углеводороды, испарения будут состоять, главным образом, из метана и азота; СПГ с содержанием 1% азота равновесен с паровой фазой с содержанием 20% азота;
— старение первоначального объема 50000 м^3 хранимого СПГ состава: 1% азота, 89% метана и 10% тяжелых углеводородов приводит к увеличению высшей теплотворной способности на 3 ватт-час в сутки и числа Воббе для среднего объема испарений 2000 нм^3/час.

Особые случаи:

— старение и усадка СПГ в хранилищах (см. § 4.10.2);
— старение в пониженных точках сети СПГ (продувочные резервуары и т.д.) в зависимости от времени пребывания СПГ в этих местах. В результате может произойти полное испарение метана, разогрев жидкости выше –80°С, опасность замерзания оставшихся тяжелых углеводородов во время прохождения порции свежего СПГ и, как следствие, забивка твердой фазой фильтров СПГ. Следовательно, важно следить за периодическим обновлением СПГ в пониженных точках системы.

4.4.1.3. Температура СПГ и оборудование, в котором он находится

4.4.1.3.1. Осушка оборудования после гидравлических испытаний и перед пуском в эксплуатацию

Эта сушка должна быть особо тщательной в связи с необходимостью предупреждения повреждения движущихся деталей (штанги, запорные элементы задвижек, оси насосов и т.д.) образующимся льдом.

Осушка обычно производится циркуляцией азота при температуре окружающей среды, что исключает образование мертвых зон и осушает все детали трубопровода (отводы и т.д.). Процесс осушки контролируется замерами точек росы по воде во многих точках системы, они должны быть ниже –30°С.

4.4.1.3.2. Захолаживание и поддержание холода

Захолаживание оборудования (в процессе первого запуска, после ремонта, аварийного разогрева и т.п.) является нестационарным процессом и требует соблюдения следующих предосторожностей:

— для оборудования, имеющего небольшую массу, и для трубопроводов внутренним диаметром менее 600 мм захолаживание производится прямым способом, и темп их заполнения СПГ лимитируется только общими механическими соображениями, изложенными ниже;
— для массивного оборудования захолаживание должно быть постепенным, рекомендуется градиент температуры порядка 3 - 5°С в час для резервуаров и больших емкостей, а также для трубопроводов больших диаметров. Равномерное захолаживание реализуется с помощью пульверизаторов, распределяющих СПГ – охладитель перед собственно наполнением системы СПГ.

В любом случае необходимо контролировать:

— деформации (перемещения) трубопроводов, сравнивая их с теоретическими значениями;
— свободу движения подвижных опор;
— захолаживание подвижных деталей, особенно в соединениях (неравномерное захолаживание подвижного фланца может вызвать утечки);
— общий объем испарений.

В процессе нормальной эксплуатации элементы оборудования по возможности поддерживаются в захоложенном состоянии или циркуляцией или испарением СПГ. Захолаживание испарением должно сопровождаться дополнительными предосторожностями:

— периодическая замена СПГ во избежание слишком быстрого старения (разогрев оборудования и опасность замерзания тяжелых углеводородов при контакте со свежим СПГ;
— наблюдение за работой дегазирующих устройств во избежание опасности проникновения жидкости в систему, питаемую газом.

4.4.1.3.3. Соединения между нагретыми и холодными частями

Некоторые элементы оборудования (такие как краны и задвижки) имеют одну часть, работающую при температуре СПГ, и другую, находящуюся при температуре окружающей среды. Температурное разделение обеспечивается длиной частей, поэтому необходимо следить за качеством изоляции и отсутствием утечек, которые могли бы изменить температурный градиент.

Это касается также некоторых типов насосов, у которых вал имеет переменную температуру: удлинение деталей и хорошее состояние криогенных уплотнений являются объектом постоянного контроля.

4.4.1.3.4. Теплоизоляция элементов оборудования

Эта теплоизоляция выполняет две функции:

— с одной стороны, роль механической защиты против перегрузки, возможной при формирова-

нии слоя конденсационного льда и возможной деформации;
— с другой стороны, ограничение теплопритоков, вызывающих испарения, – роль, превалирующая для элементов оборудования сетей СПГ, не предназначенных для регазификации.

4.4.2. Проблемы чисто газовые

4.4.2.1. Техника безопасности в области СПГ

Проблемы безопасности на установке СПГ решаются соответствующим выбором следующих элементов:

— криогенных материалов (см. § 4.3);
— типов оборудования, в котором содержится СПГ (см. § 4.5 - 4.9);
— способов и средств борьбы с авариями, вызванными СПГ (см. § 4.10).

Кроме этого, руководствуются правилами техники безопасности.

Бдительность обслуживающего персонала, например, должна быть повышенной в случаях:

— работ, таких как отключение участка трубопровода для производства работ, имея в виду, что задвижки всегда в какой-то степени пропускают (см. § 4.9.4);
— работ, производимых в загазованной среде, из-за возможности отравления метаном или азотом – продуктами, широко используемыми в установках СПГ.

4.4.2.2. Качество газа

— Случай метанового терминала:

Постоянные значения теплотворной способности и числа Воббе природного газа, направляемого в распределительную сеть, не могут гарантироваться постоянно на уровне их максимальных значений, после того как продолжительность хранения составит определенный срок (старение).

Корректировка их значений может быть достигнута:

— смешением в жидкой фазе с менее богатым СПГ;
— добавкой инертного газа (азота, воздуха) или извлечением фракции пропан–бутан (см. § 4.7.1).

Независимо от способа корректировки, автоматизация процесса требует предварительного расчета и сооружения цепи автоматического регулирования с обратной связью, учитывая, что время реагирования системы автоматического регулирования обычно больше, чем время прохождения газа от точки отбора из хранилища до точки подачи в распределительную сеть. Эта система автоматического регулирования должна быть продублирована автоматикой остановки быстрого действия.

4.4.2.3. Одоризация газа

Поскольку СПГ не содержит пахучих компонентов, для метанового терминала или для станции покрытия пиковых нагрузок в общем случае предусматривается одоризация после регазификации (пример: введение Т.Н.Т. – одоранта и т.д.).

4.5. СЖИЖЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

4.5.1. Особенности сжижения природного газа

Поскольку сжижение метана под атмосферным давлением происходит при –161°С, необходимо достигнуть примерно –160°С для сжижения природного газа, в котором метан является главным компонентом.

Кроме особенностей, касающихся применяемых материалов, изложенных в разделе 4.3, и проблем пуска в эксплуатацию сооружений, заполняемых природным холодным и сжиженным газом, изложенных в разделе 4.4., существуют определенные аспекты, связанные с низкой температурой:

— необходимость выделения на предварительной ступени охлаждения определенных веществ, содержащихся в пластовом газе, которые при –160°С конденсируются в твердой фазе и образовали бы твердые осадки в теплообменниках холодильных машин (испарителях);
— необходимость извлечения ректификацией тяжелых углеводородов (C_{5+}), которые тоже конденсируются при низких температурах; эти углеводороды извлекаются в большом количестве (C_3, C_4 и даже C_2), если возможна прямая коммерциализация (продажа);
— необходимость сооружения больших энергетических установок для сжижения.

4.5.2. Процессы сжижения природных газов

4.5.2.1. Общие сведения о процессах

В типичной ситуации имеют сырой природный газ высокого давления при температуре окружающей среды (40 бар, +20°С). Сжижение производится в серии теплообменников (испарителей холодильных машин), которые обеспечивают последовательное охлаждение, полное сжижение и некоторое переохлаждение. Очистка и фракционирование (см. § 4.6.2.5) реализуются, как и основная доля охлаждения, под высоким давлением.

Холод производится одним или несколькими холодильными циклами, позволяющими снизить температуру от +20 до –160°С; количество необходимого холода рассчитывается по энтальпийным диаграммам для природного газа (см. диаграмму на стр. 441).

Сжижение завершается однократной сепарацией (изоэнтальпийное расширение после регулируемого штуцера) для снижения давления СПГ до атмосферного.

Выбор холодильных циклов связан с термодинамическими и экономическими соображениями, а также с развитием техники (конструкция и максимальные размеры оборудования, расчет процесса на ЭВМ).

Установки сжижения являются большими потребителями энергии.

Эта энергия обычно производится за счет потребления части сжижаемого газа (в тепловом эквиваленте около 12%). На практике в режиме нормальной работы в общем случае используются вместе сырого газа один или несколько производных продуктов, получаемых обязательно при фракционировании (C_{5+}, газ сепарации – $CH_4 + N_2$ и т.п.).

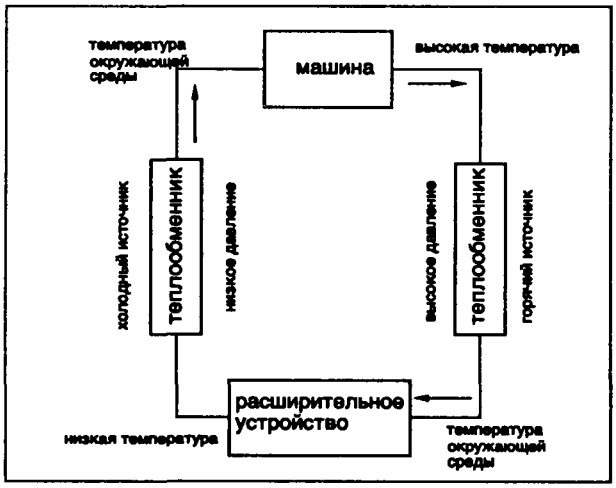
Эти производные продукты по количеству и качеству подбираются исходя из состава сырого газа, из выбора коммерциализуемых продуктов фракционирования (т.е. реализуемых на рынке).

Величины температуры и давления, при которых должно происходить фракционирование, важны с точки зрения выбора процесса сжижения.

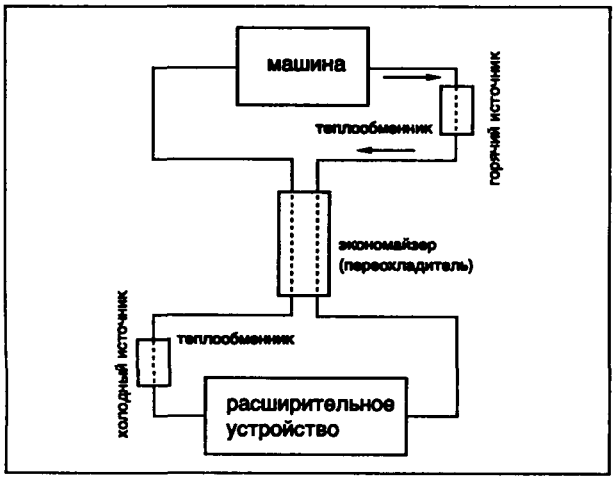
4.5.2.2. Принципиальные схемы холодильных циклов

Холодильный цикл есть система, состоящая, в основном, из:

— холодильного агента, который подвергается ряду термодинамических превращений и обеспечивает передачу тепла;



Холодильный цикл.



Холодный цикл с экономайзером.

— теплообменника-холодильника, который обеспечивает при постоянном давлении передачу тепла горячему источнику;
— расширительного устройства, снижающего температуру и давление холодильного агента;
— теплообменника-нагревателя, позволяющего при постоянном давлении перенос тепла к холодному источнику.

Теплый источник – это обычно флюид в неограниченном количестве, такой как вода или воздух. Холодный источник – это то, что нужно охладить, в данном случае сжижаемый природный газ.

Характеристики цикла улучшают, добавляя в схему теплообменник-экономайзер, который переохлаждает флюид перед дросселированием.

4.5.2.2.1. Циклы с чистым веществом и фазовым переходом

Для применяемых флюидов и их термодинамических характеристик эти циклы позволяют достигнуть температуру только приблизительно до –50°C.

Флюид	CO_2, NH_3, C_3H_8, фреон
Машина	Компрессор
Охладитель	Конденсатор воздушный или водяной
Расширение	Дроссель (изоэнтальпийный)
Нагреватель Экономайзер	Испаритель под атмосферным давлением Переохладитель жидкости

Действительно, не существует чистых веществ, которые имели бы одновременно температуру кипения при атмосферном давлении ниже 50°C и критическую температуру выше 40°C – условия, необходимые для работы испарителя и конденсатора (см. рисунок с. 454).

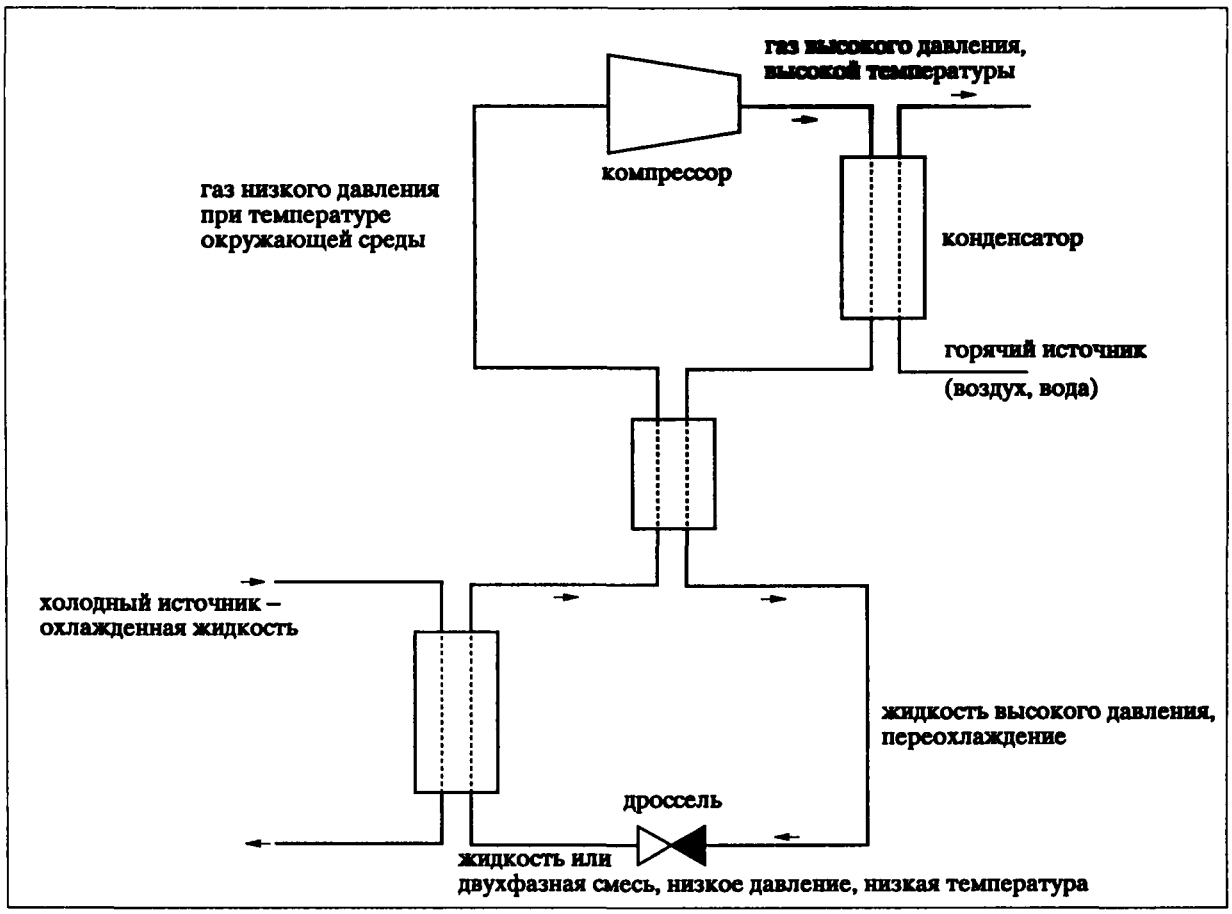
Эти циклы могут быть соединены в каскады таким образом, что каждый цикл образует холодный источник предыдущего цикла, а критическая температура флюида цикла (n + 1) была бы всегда выше температуры кипения флюида цикла n: это позволяет достичь более низких температур.

Например,температура –160°C может быть получена тремя хорошо подобранными циклами с пропаном, этиленом и метаном (см. рисуноки с. 454 и 455).

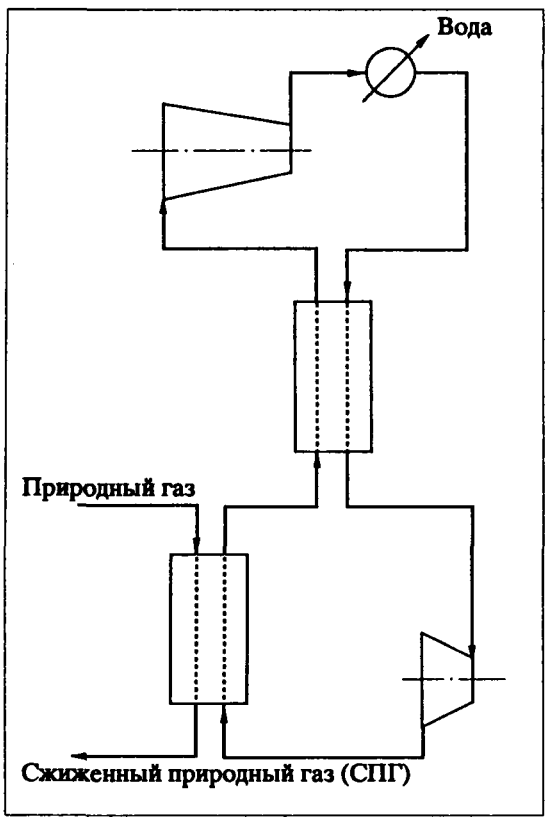
4.5.2.2.2. Газовые циклы с расширительной машиной

Они позволяют получить напрямую в одном цикле очень низкую температуру.

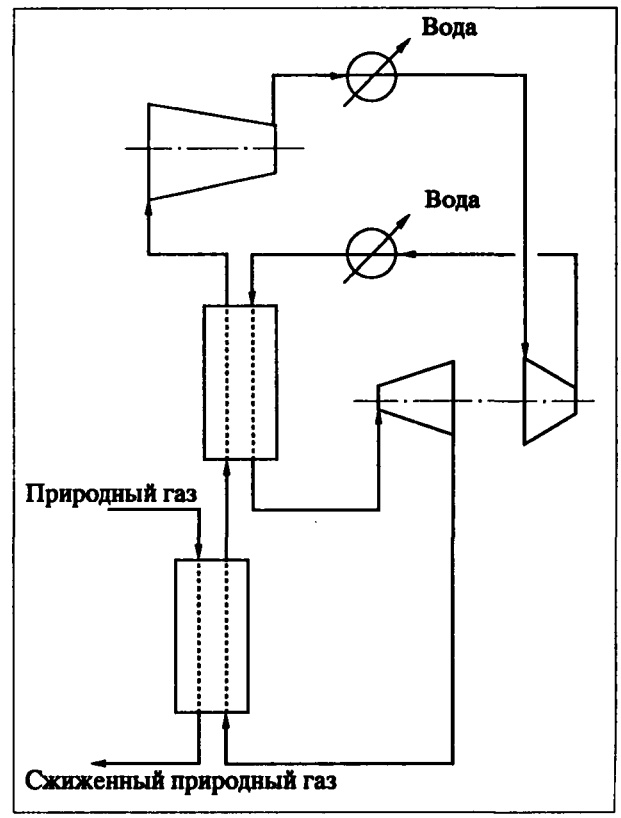
Флюид	Идеальный газ (критическая температура ниже или равна –50°C), такой как азот, воздух, метан
Машина	Компрессор
Охладитель	Охладитель после компрессора
Расширение	Изоэнтропическая расширительная турбина
Нагреватель Экономайзер	Теплообменник природного газа



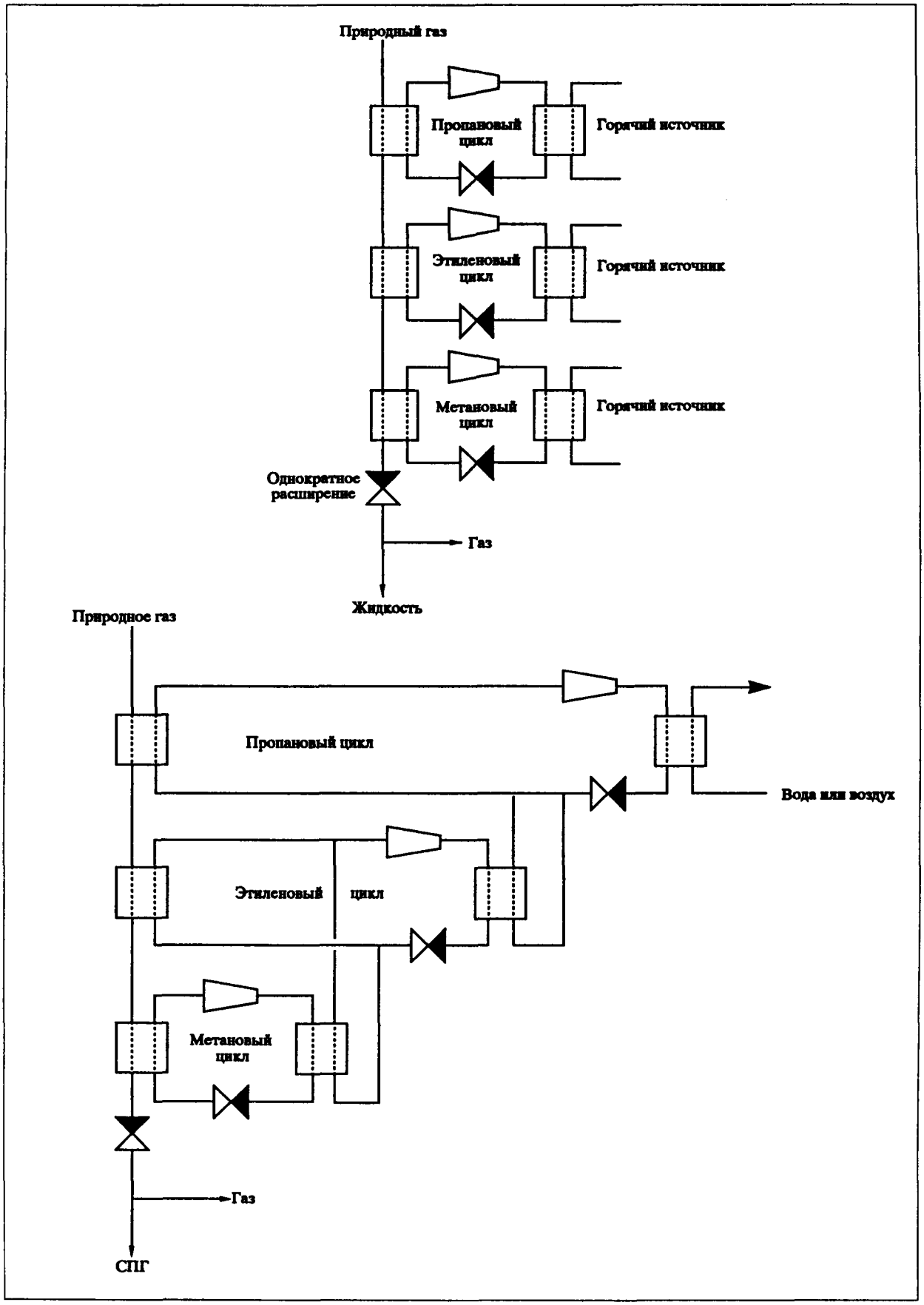
Цикл с простым веществом и фазовым переходом



Цикл с азотом и простой расширительной трубкой.



Цикл с азотом и детандером – турбиной.



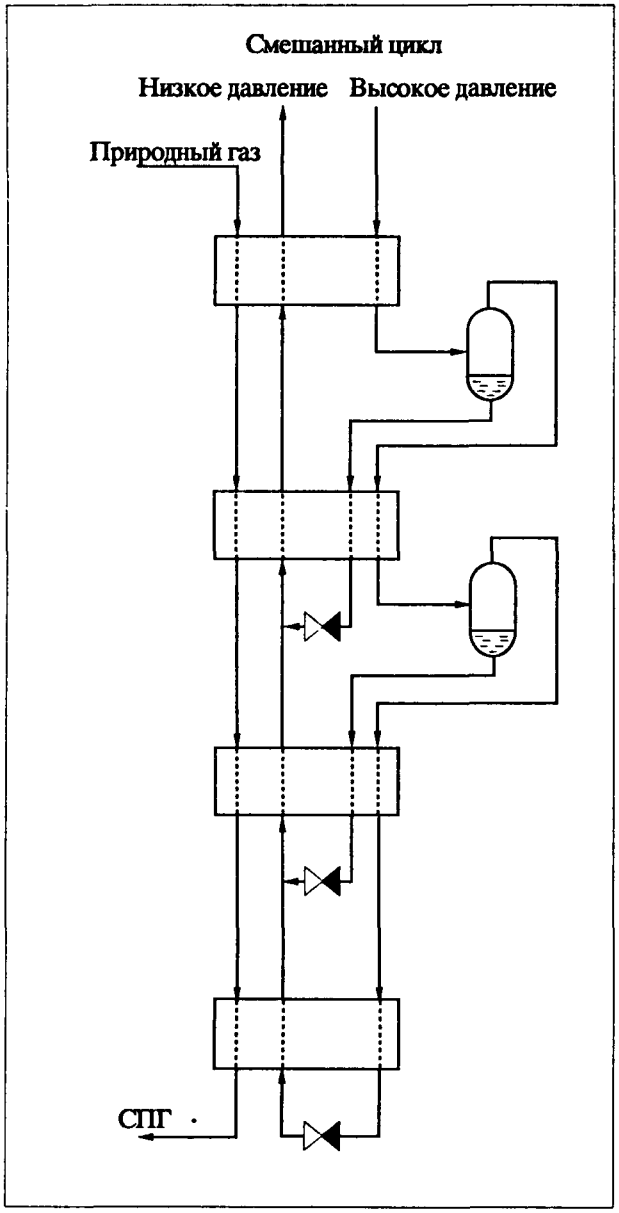
Каскадные холодильные циклы

Рекуперация механической энергии, производимой расширительной турбиной, может производиться компрессором торможения: соосный агрегат часто называют "турбодетандерным агрегатом" (см. рисунок с. 454).

4.5.2.2.3. Циклы со смесью флюидов

Развитие вычислительной техники позволило рассчитывать процессы (циклы) с фазовыми переходами, в которых хладоагент представлен смесью, а не чистым веществом. Этот флюид подобран строго так, что энтальпийная кривая холодильной системы охватывает энтальпийную кривую сжижаемого природного газа.

Эти циклы, называемые также "со встроенным каскадом" (см. нижеследующий рисунок с. 456) и процессы, в которых они используются, требуют точных расчетов, особенно при разработке больших компрессоров для газовых смесей и больших многофазных теплообменников с процессами сжижения в определенных секциях теплообменников и испарением в других.



Цикл со встроенным каскадом

4.5.2.3. Критерии выбора холодильных циклов

4.5.2.3.1. Термодинамическая эффективность

Выбирают, с одной стороны, машины (компрессоры, турбины), имеющие наилучшую эффективность (КПД), с другой стороны – циклы, в которых теплообменники имеют наилучшее приближение температуры (особенно в области низких температур, поскольку холод в виде механической энергии стоит тем дороже, чем ниже температура). В действительности теплообменники часто являются комбинированными: один многофазный теплообменник может выполнять одновременно функцию экономайзера или главного теплообменника – передатчика холода к сжижаемому газу.

4.5.2.3.2. Капитальные вложения

Капитальные вложения ограничиваются, выбирая:

- циклы с фазовыми переходами;
- наиболее простые и немногочисленные машины.

4.5.2.3.3. Простота и гибкость эксплуатации

Простые и немногочисленные машины облегчают эксплуатацию, тем более что обслуживающие системы просты и немногочисленны.

К тому же, хороший процесс должен обладать гибкостью, чтобы работать в условиях изменяющегося дебита и состава сжижаемого природного газа. Под гибкостью следует понимать одновременно техническую способность функционировать в изменяющихся условиях и простоту для операторов изменять режим работы.

Первый из трех критериев, естественно, противоречит двум остальным и в соответствии с мощностью установки сжижения и ее местоположением должен быть найден компромисс.

Циклы со смешанным хладоагентом позволяют часто наилучшим образом найти компромиссное решение, ЭВМ позволяют в настоящее время точно рассчитать теплообменники и сами процессы.

4.5.2.4. Основные применяемые циклы

4.5.2.4.1. Газовые циклы с турбодетандером

Такие циклы (см. рис. стр. 454) на чистом азоте (в закрытом цикле) или на метане, производимом в процессе фракционирования сырого газа, используются только на станциях сглаживания пиковых нагрузок. Их преимущество состоит в простоте схемы и работы.

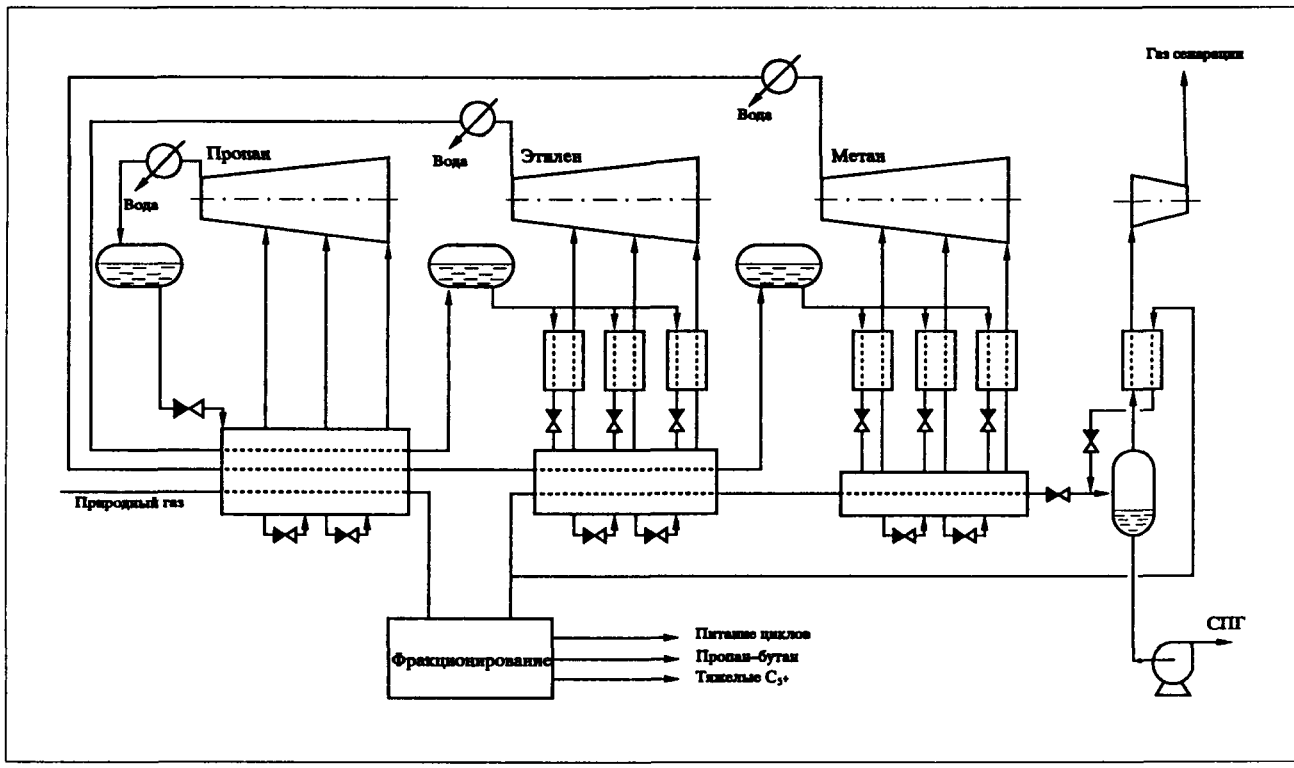
Однако их термодинамический КПД невелик, а капвложения повышены (турбина, система газовых коммуникаций большого проходного сечения и т.д.).

4.5.2.4.2. Классические газовые циклы

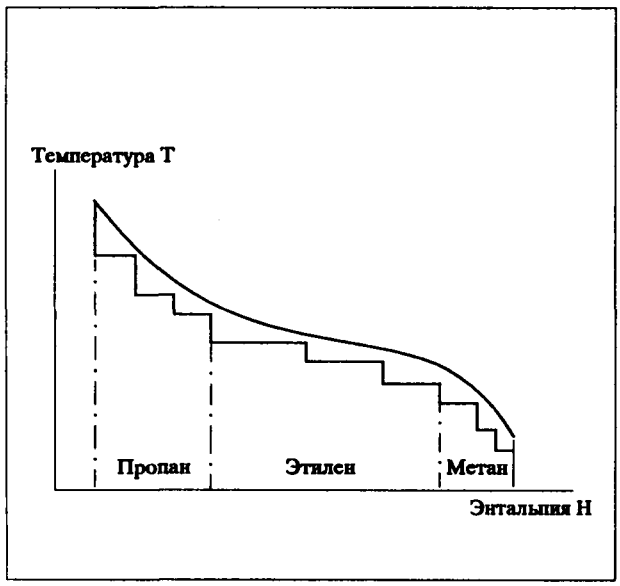
Такие циклы с использованием пропана, этилена и метана были разработаны для двух первых заводов сжижения для экспорта сжиженного газа в Арзеве (завод Кэмел GL4Z) в Алжире и в Кенаи (Kenai) на Аляске. И[преимущество состоит в том, что они позволяют должным образом следовать поведению энтальпийной кривой сжижаемого природного газа посредством достаточного количества ступеней для каждого цикла.

В то же время их недостатки заключаются в следующем:

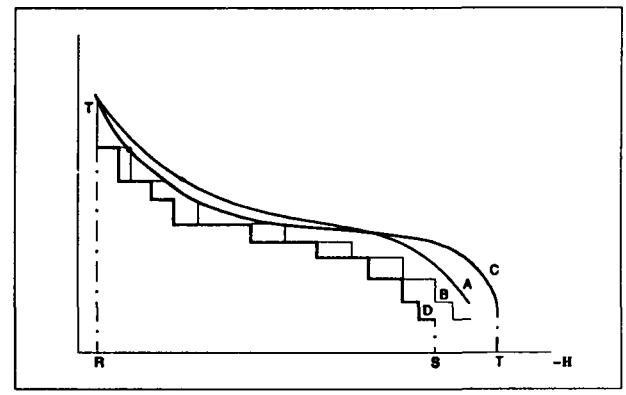
— повышенные капитальные вложения (много теплообменников и обвязки);
— недостаточная гибкость, так как они плохо адаптируются к изменениям качества природного газа, поскольку каждый теплообменник характеризуется двумя предопределенными параметрами (температура и тепловая нагрузка), к тому же потоки флюидов на различных ступенях одного и того же компрессора строго фиксированы (см. рисунки ниже).



Сжижение природного газа по классической каскадной схеме



Классический каскад. Изменение качества природного газа.



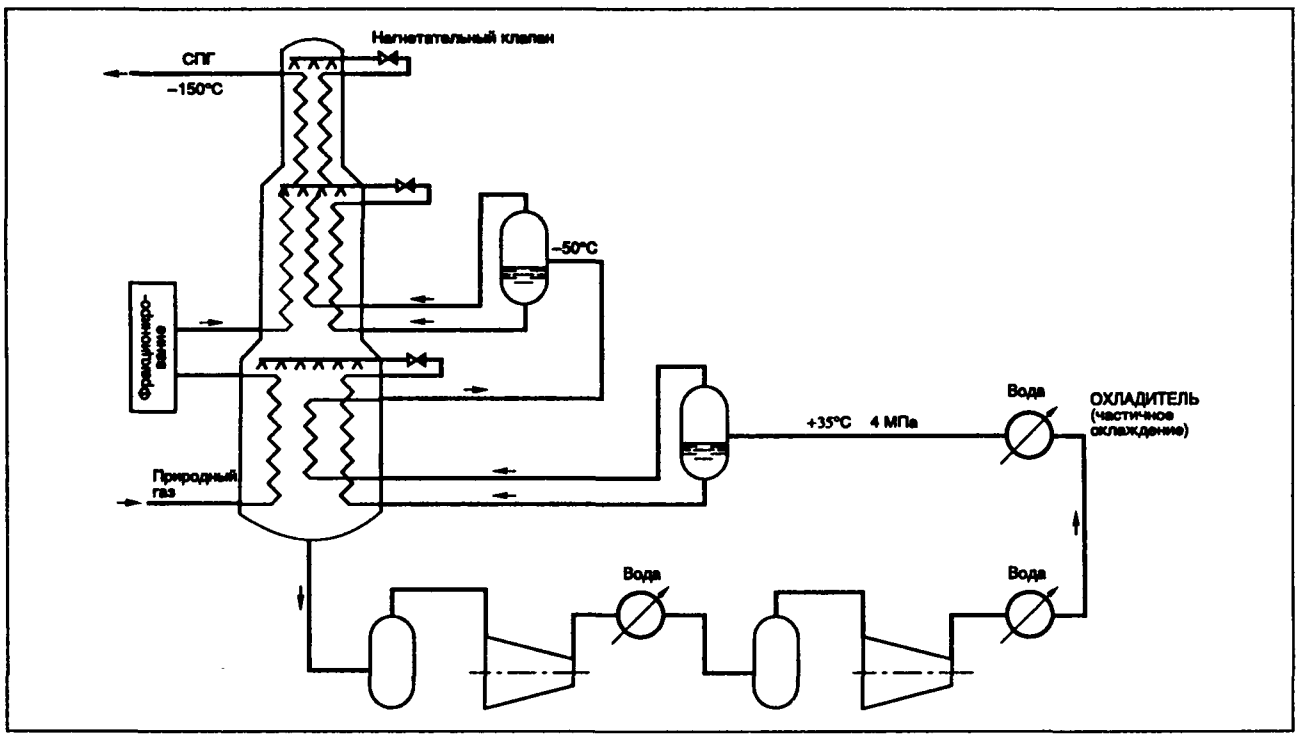
Классический каскад. Энтальпийная диаграмма.

Завод рассчитан (ступени B) для одного из природных газов (энтальпийная кривая A). Если обрабатываемый природный газ меняет свой состав (кривая C) и если не изменяют рабочие давления машин (то есть температуры ступений), завод произведет холод в соответствии со ступенями D, у которых ступени на своей максимальной высоте равны ступеням B. Завод не сможет, таким образом, ожижить весь газ, а только долю RS/RT от номинала.

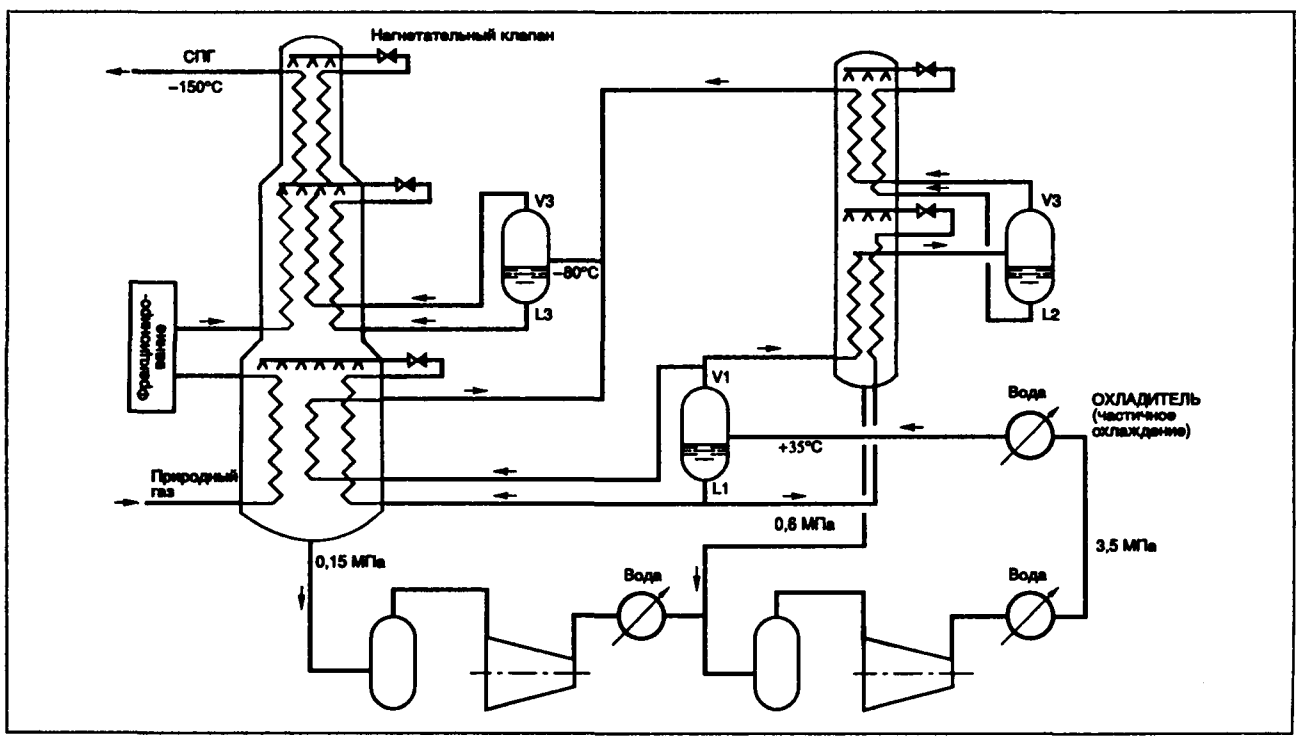
4.5.2.4.3. Смешанные циклы

Такие циклы в начале были реализованы широко и в различных вариантах на заводах сжижения для экспорта в процессах с одним циклом, в дальнейшем – в процессах с двумя циклами; в цикле с наименьшим холодом использовался пропан или смешанный трехкомпонентный флюид, в цикле с низкой температурой использовался трехкомпонентный смешанный флюид.

Развитие процессов, использующих эти циклы, связано главным образом с необходимостью адаптации к специфическим условиям проектируемых заводов (состав сжижаемого газа и производительность завода) и с прогрессом в области вычис-



Смешанный цикл с одним давлением.



Смешанный цикл с двумя давлениями (Тиал).

лительной техники и конструкций компрессоров и теплообменников.

Эта эволюция показана на схемах процесса на рисунках с. 458, 459 и 460, где также указаны названия проектных организаций, разработавших эти процессы.

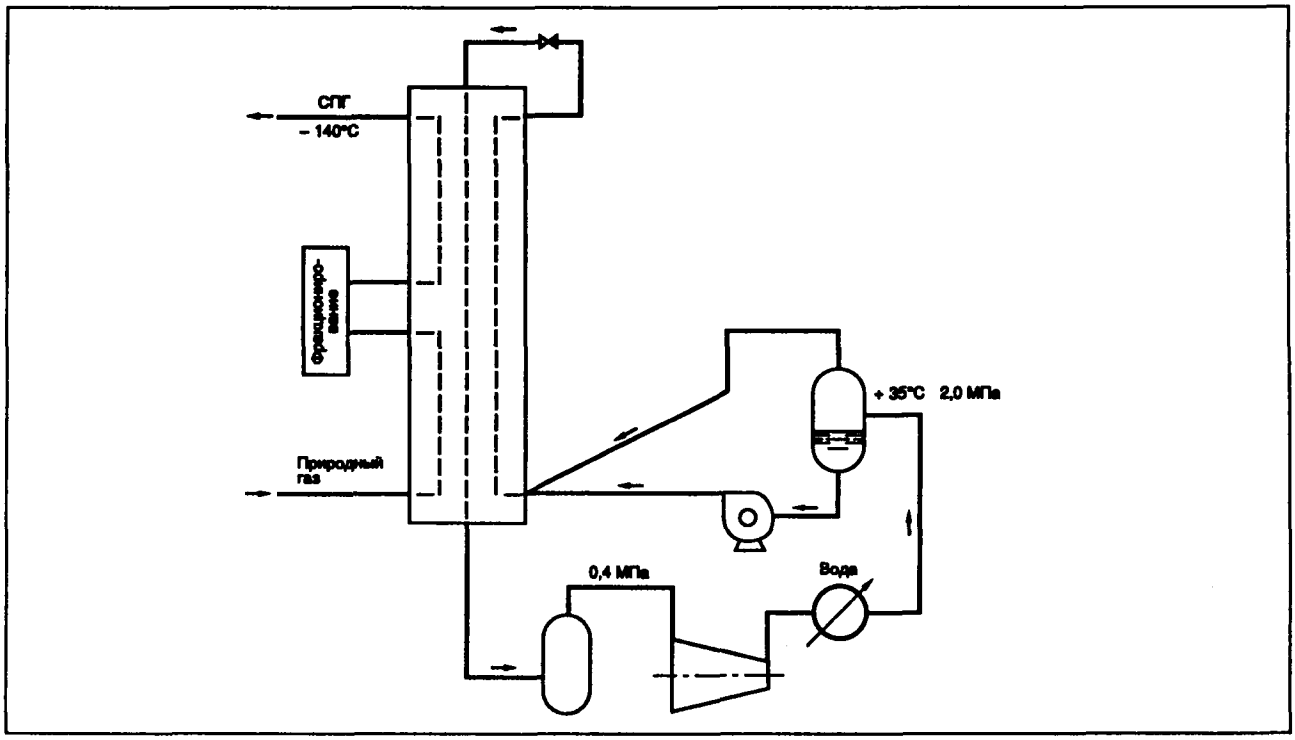
Преимущества смешанных циклов заключаются в следующем:

— хорошее приближение к рабочей температуре теплообменников;

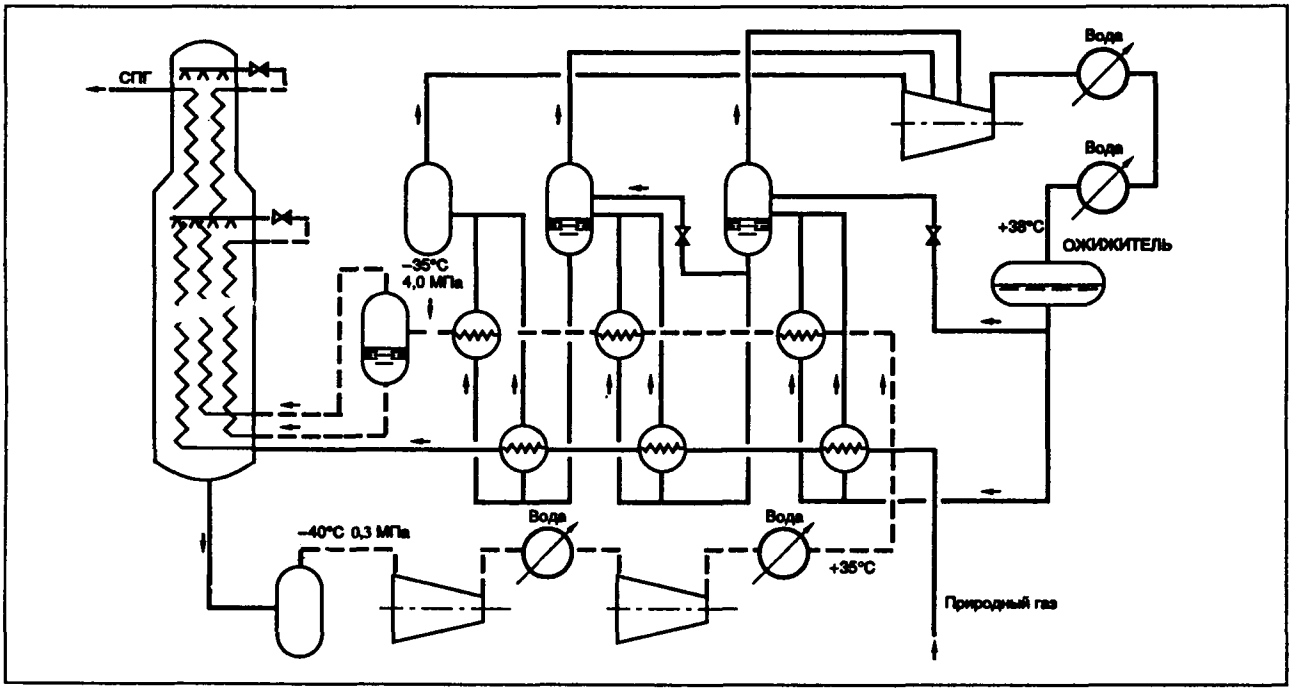
— небольшое число компрессоров и теплообменников;

— простота работы;

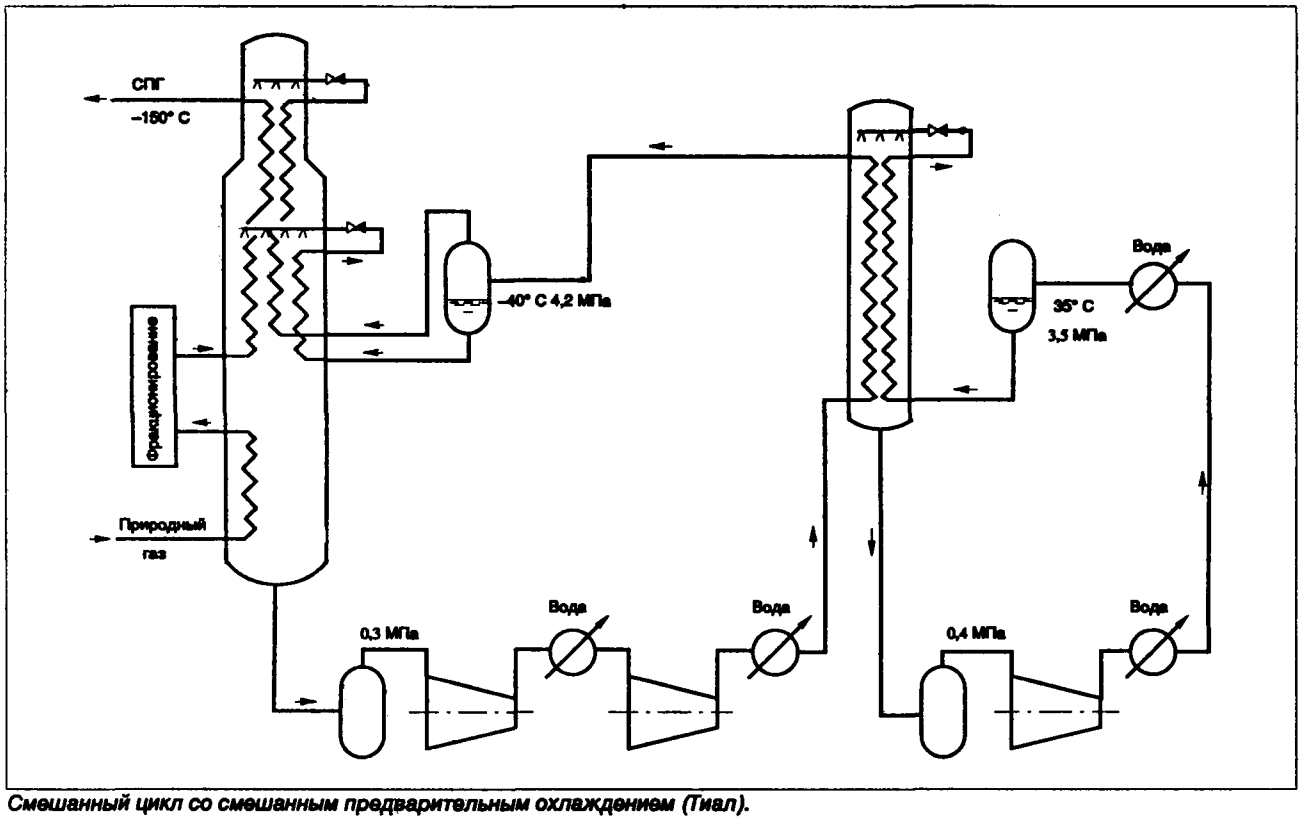
— возможность адаптации к изменениям в составе газа, изменениям расхода, давления и состава хладоагента.



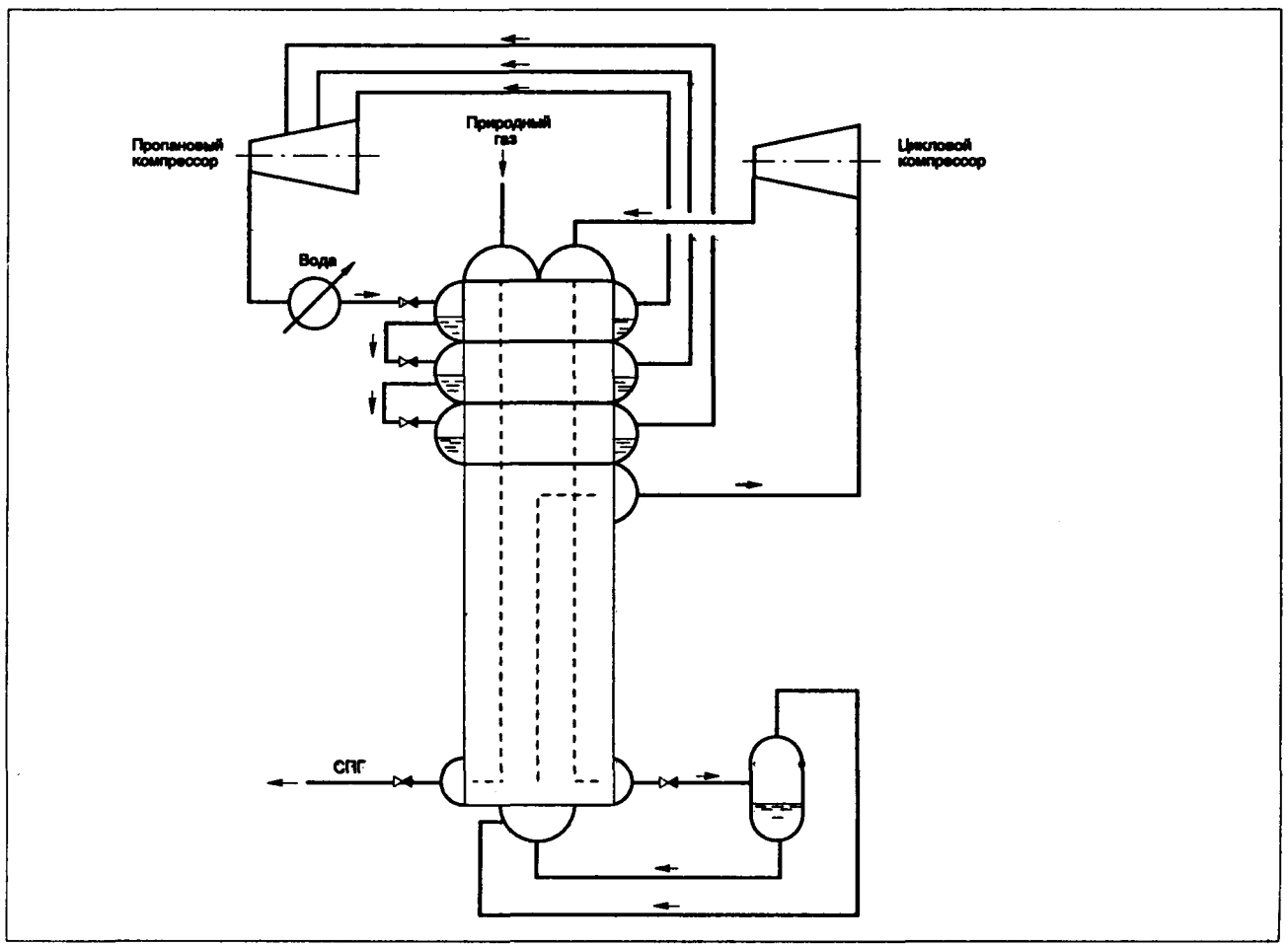
Смешанный "интегральный" цикл с одним давлением без промежуточной закачки (ПРИТЧАРД).



Смешанный цикл с предварительным охлаждением с пропаном (APC1 Эр Продактс энд Кемикалс Инк.).



Смешанный цикл со смешанным предварительным охлаждением (Тиал).



Смешанный цикл с предварительным охлаждением пропаном и интегральным пластинчатым теплообменником (Эрликид).

4.5.2.5. Очистка и фракционирование

В общем случае в установке сжижения блок фракционирования предусмотрен для:

— очистки природного газа перед сжижением;
— производства флюидов холодильных циклов;
— по коммерческим соображениям (продажа производимых на газофракционирующей установке продуктов);
— энергетических нужд завода.

4.5.2.5.1. Осушка

Влага, содержащаяся в природном газе при температурах и давлениях, создаваемых в процессе сжижения, образовывала бы гидраты с углеводородами и происходило бы образование гидратных пробок в дроссельных устройствах, если бы газ не осушался до уровня примерно 1 v.p.m. (одна часть на миллион по объему).

4.5.2.5.2. Очистка от углекислого газа

По тем же причинам диоксид углерода CO_2 образует углеродный лед. CO_2 плохо растворим в углеводородах (слега растворим в бутане), поэтому необходимо удалять CO_2 до уровня v.p.m. (несколько десятков v.p.m., если извлекают пропан–бутан).

4.5.2.5.3. Извлечение сероводорода

Сероводород и другие кислые газы должны быть также удалены.

4.5.2.5.4. Другие компоненты

Следы ртути, даже минимальные, опасны для теплообменников и должны быть тщательно удалены. Наконец, тяжелые углеводороды C_{5+} могут также вызвать образование пробок, поэтому конденсат должен быть выделен в процессе охлаждения.

Эти различные темы, касающиеся очистки газа, освещены в разделе. 2.4. Добыча природного газа.

Что касается насыщенных углеводородов (алканы от C_1 до C_5), они при необходимости могут быть выделены сепарацией и ректификацией для восполнения циклового газа (компенсация потерь и продувок). Как об этом уже говорилось, если компоненты C_2–C_3–C_4–C_5 входят в состав природного газа в значительных количествах, их выделяют для продажи по хорошим ценам.

Все, что выделяется сверх потребностей (например, этан, если продают только пропан и бутан), или подается в поток сжижаемого газа или используется на месте для производства энергии.

Кстати, инертные газы, азот и гелий, которые могут в небольших количествах находиться в природных газах, их сжижение вместе с метаном стоит дорого с точки зрения затрат энергии; их транспорт метановозами стоит дорого из-за занимаемого ими объема, их присутствие в составе СПГ при регазификации уменьшает теплотворную способность. Следовательно, желательно их выделить перед сжижением.

Газ сепарации после однократной конденсации содержит весь гелий и весь или почти весь азот в смести с метаном. Этот газ сепарации считают сбросным, достаточно бедным газом и используют преимущественно для производства энергии, необходимой заводу.

Если гелия достаточно много, можно предусмотреть его выделение, производя сепарацию в две ступени и таким образом, чтобы смесь He + N_2 выделялась бы в одной ступени сепарации.

Примечание.

Нет норм на состав СПГ. Существуют только особые спецификации у потребителя сырья, которые, например, на заводах сжижения для экспорта газа связаны с контрактами на постановку (в частности, с теплотворной способностью).

Следовательно, остаточные газы, используемые для производства энергии, разные по составу в разных местах.

4.5.3. Оборудование установок сжижения

4.5.3.1. Теплообменники

4.5.3.1.1. Теплообменники с горячим источником в окружающей среде

Теплообменники – холодильники холодильного цикла, в которых реализуется теплообмен с горячим источником в окружающей среде, бывают различного типа соответственно с природой этого источника – водой или воздухом:

— если используется вода, это теплообменники классического типа с трубным пучком (вода циркулирует по трубкам пучка);
— если используется воздух, это батареи воздушных холодильников (АВО).

Использование морской воды в качестве горячего источника широко распространено на расположенных на берегу моря заводах сжижения газа на экспорт. Особые меры защиты должны быть приняты для теплообменников против коррозии или морских отложений (специальные покрытия, катодная защита, хлорирование морской воды и т.д.), также как и для устройств водозабора.

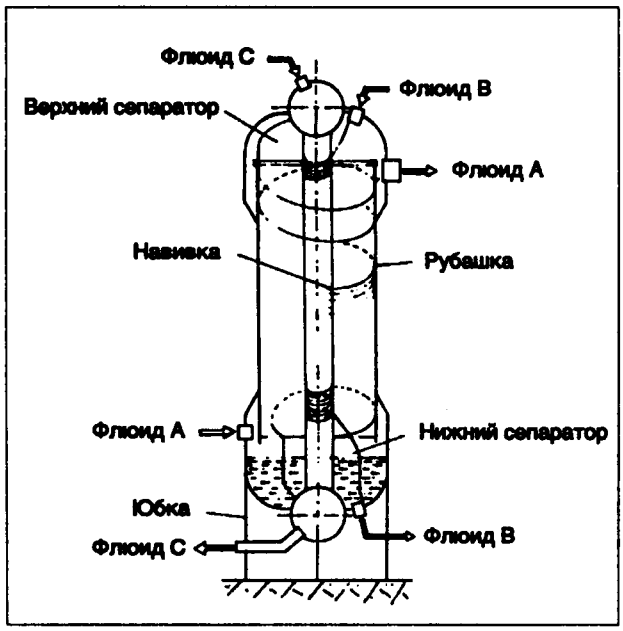
4.5.3.1.2. Криогенные теплообменники

Эти аппараты, в которых совершается теплообмен между сжижаемым природным газом и (или) хладоагентами, изготавливаются из криогенных металлов, в основном из алюминия и его сплавов (см. § 4.3.1.2.1).

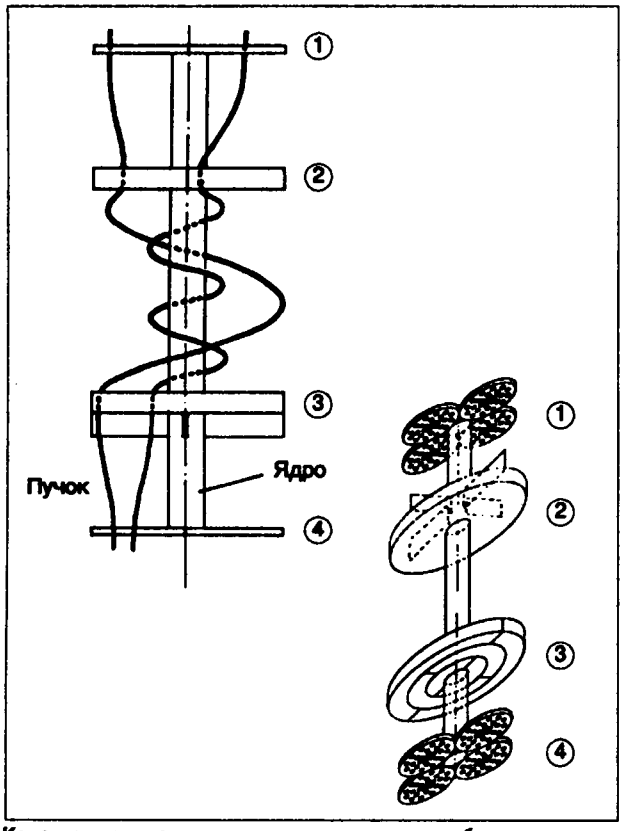
С целью обеспечения значительной экономии для заводов сжижения газа на экспорт и упрощения обвязки были разработаны специальные большие теплообменники многоходовые с большой поверхностью теплообмена, которые делятся на два вида: "теплообменники с навитыми трубками" и "пластинчатые теплообменники". Конструкции обоих типов требуют умения в изготовлении и особых материалов.

4.5.3.1.2.1. "Навитые теплообменники"

Они являются разновидностью кожухотрубчатых теплообменников. Аппарат вертикального типа, несколько тысяч тонких трубок (6 - 10 мм диаметром) навиты геликоидально по перекрестной сетке. Можно сконструировать теплообменник для нескольких флюидов, чередующихся по трубкам различных пучков в одной сетке. Перекрестные сетки дают эффект отражающихся перегородок



Навитой теплообменник.



Конструктивные элементы навивного теплообменника.

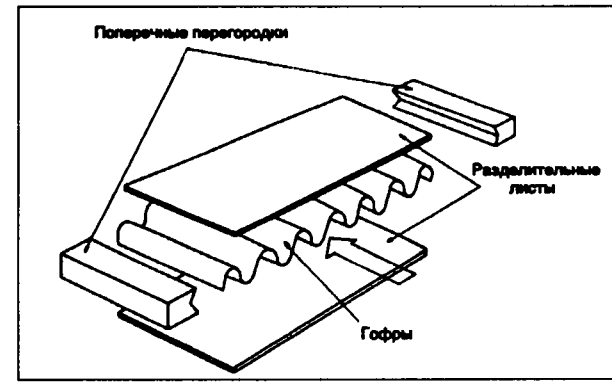
для двухфазного флюида низкого давления, который охлаждает пучок испарением в процессе циркуляции в вертикальном направлении в каландре. Каландр выполнен из нержавеющей стали, навивные пучки из алюминия. Навивка дает гибкость, необходимую для компенсации термических удлинений и укорочений. По причине сложности конструкции и размеров изготовление таких теплообменников требует длительных сроков и дорого, а их транспортировка затруднительна.

4.5.3.1.2.2. Теплообменники алюминиевые пластинчатые, паянные с погружением в баню

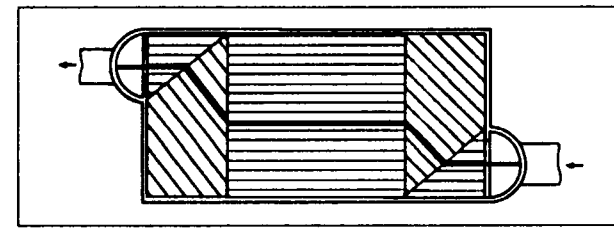
Эти теплообменники, используемые также в других областях, таких, как фракционирование воздуха, выделение этилена и др., сконструированы в виде сэндвичей, в которых начинка находится в форме плоских полнотелых листов, гофрированных листов и поперечных перегородок.

4.5.3.1.2.2.1. Описание

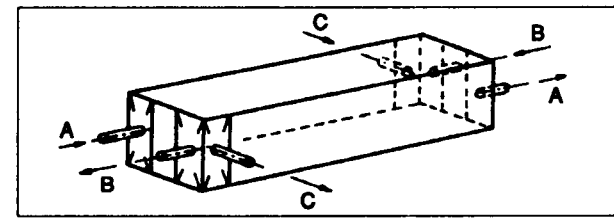
При каждом ходе флюид циркулирует между двумя плоскими листами и двумя перегородками в пространстве, заполненном гофрированным листом: циркуляция флюида происходит по обе стороны гофрированного листа, параллельно образующим.



Пластинчатый теплообменник – общий вид одного хода между двумя плоскими перегородками.

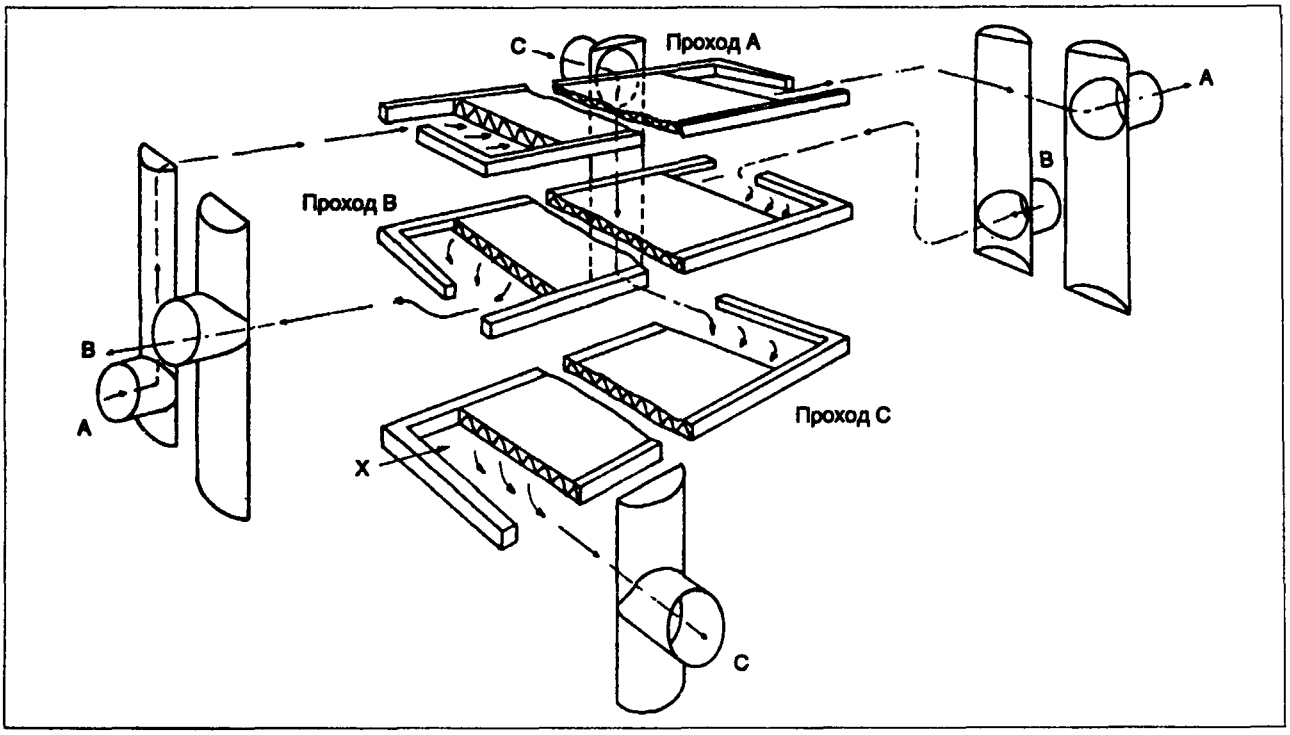


Пластинчатый теплообменник – вид одного хода между двумя пластинами.



Пластинчатый теплообменник – общий вид.

Таким образом, каждая полнотелая пластина - перегородка разделяет два флюида и таким образом является поверхностью теплообмена между двумя флюидами. Гофрированный лист выполняет роль, аналогичную лопаткам или пчелиным ячейкам в других типах теплообменников, в то же время он служит опорным элементом, помогающим пространству, ограниченному двумя пластинами и двумя перегородками переносить нагрузки от циркулирующих флюидов. Пакет из полнотелых плоских листов, гофрированных листов и поперечных перегородок сварен: все образующие вершины волны листа приварены к полнотелым горизонтальным листам.



Пластинчатый теплообменник – разрез.

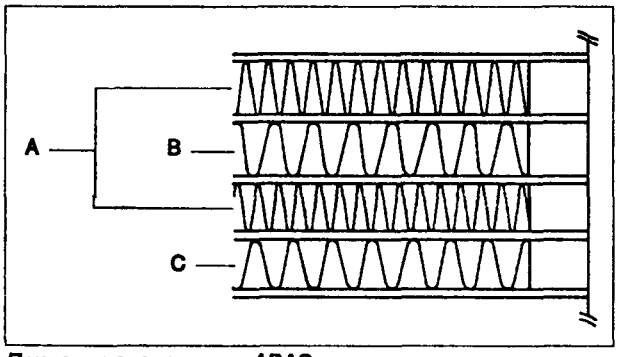
Теплообменник собирают сложением секций, собранных вышеописанным способом. Для каждой секции в поперечных перегородках устраивают проход для флюида, который движется через секцию.

Секции чередуются в зависимости от числа флюидов, например:

ABABAB – для двух флюидов;

ABCDABCD – для четырех флюидов;

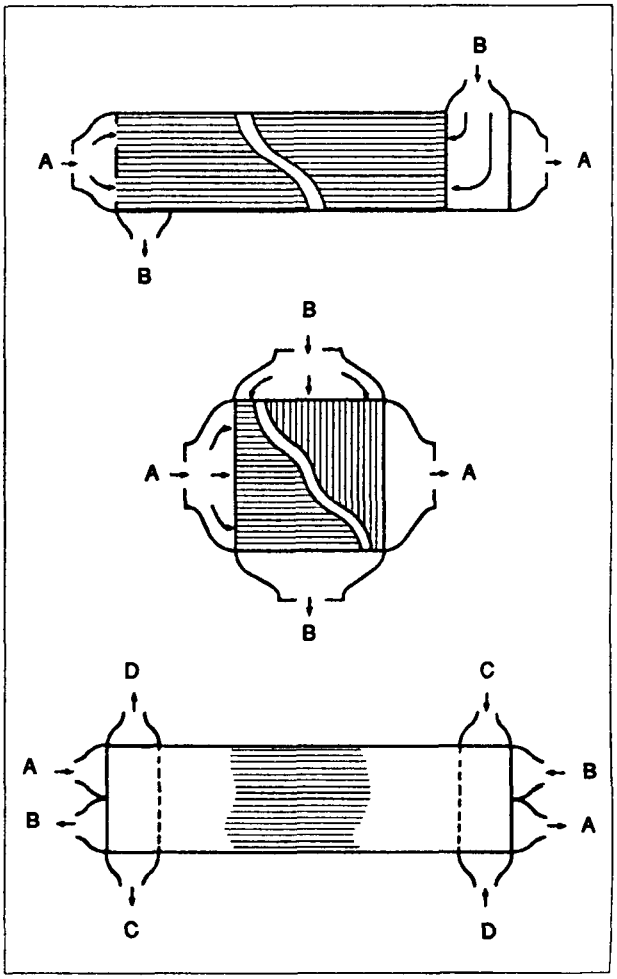
ABCDEABDEABCDEABDE – для пяти флюидов, один из которых с небольшим расходом.



Пример чередования ABAC проходов в пластинчатом теплообменнике.

Выбирая расположение отверстий в поперечных перегородках и головок присоединенных коллекторов, а также ориентацию гофрированных листов в ходах, можно сконструировать теплообменники с противотоком, с перекрестным током, многофлюидные и т.д.

Можно соединить в один блок теплообменники, которые, если бы они были кожухотрубчатого типа, были бы соединенными последовательно многочисленными теплообменниками, это приводит к значительной экономии в трубопроводах обвязки и теплоизоляции.



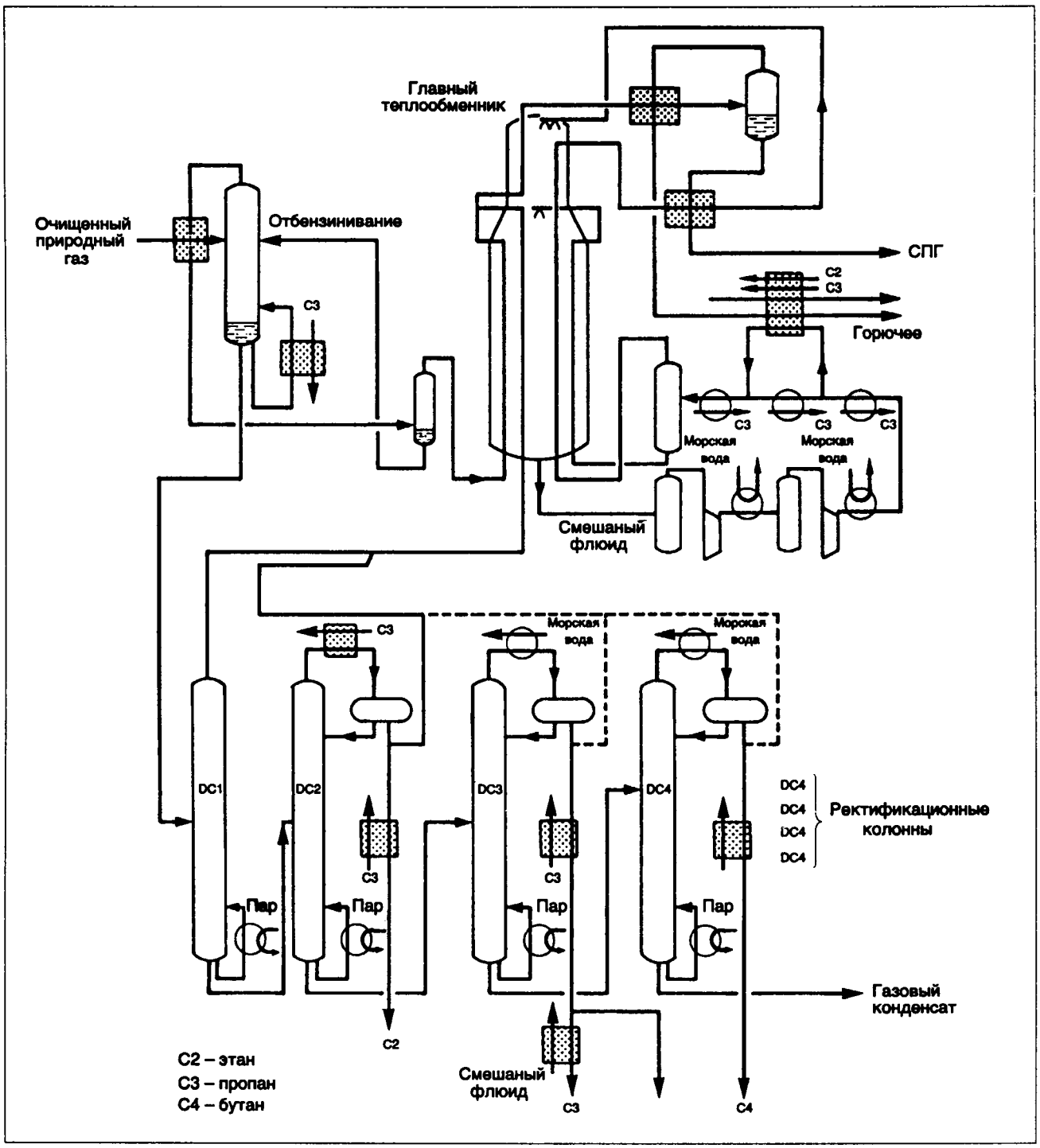
Пластинчатый теплообменник – противоточный, с перекрестным током, многолоточный.

4.5.3.1.2.2.2. Изготовление

Полнотелые плоские пластины изготовлены из слаболегированного магнием алюминия (точка плавления, F = 660°C), покрыта слоем сплава с кремнием (F = 600°C), поперечные перегородки и гофрированные листы изготовлены из того же легированного магнием сплава (F = 660°C), что и плоские пластины.

Набирают листы в пачку, сжимают в струбцине и все погружают в баню, заполненную расплавленной солью (фтористые и хлористые соли) при температуре между 600 и 660°C для пайки без деформации и размягчения материалов. Соли снимают слой окиси: моноблок теплообменника таким образом сварен за один раз. Затем приваривают головки коллектора.

Если требуется очень большая поверхность теплообмена, можно соединить несколько теплообменников параллельно, в батарею, но при этом не-



Основное оборудование сжижения и фракционирования в процессе TPC1 (смешаный цикл с предварительным охлаждением пропаном). Теплообменники, показанные серым цветом, – пластинчатого типа. Главный теплообменник навивного типа. Остальные теплообменники классические кожухотрубные.

обходимо уравнять расходы флюидов через теплообменники.

По причине хорошего соотношения между площадью теплообмена и объемом, занимаемым аппаратом, пластинчатые теплообменники в будущем должны бы вытеснить теплообменники других типов во всех областях криогенной техники и позволить разработку проектов, таких как процесс на смешанном хладоагенте с предварительным пропановым охлаждением с использованием "интегрального" теплообменника (см. рисунок с. 460).

Рисунок на с. 464 показывает различные типы теплообменников, используемых в отдельных процессах.

4.5.3.2. Компрессоры

На заводах сжижения природного газа для экспорта холодильные циклы требуют применения компрессоров, способных сжимать как чистые вещества, так и газовые смеси от давления, близкого к атмосферному, до давления около 4 МПа с производительностью сотни тысяч нм^3/ч. Компрессоры могут иметь установленную мощность 20, 30 или даже 80 МВт.

Компрессоры такой мощности применяются для перекачки воздуха или более легкого газа. Однако для перекачки тяжелых смесей более или менее переменного состава эти машины не подходят.

Выявились два направления в подходе к процессу сжижения для того, чтобы приспособиться к оптимальному конструированию нужных компрессоров машин:

— или разделить общую мощность, необходимую для сжижения, на два или три цикловых компрессора для использования центробежных компрессоров (надежность в работе) и идентичных приводных машин (рациональность в питании и обслуживании);

— или использовать аксиальные, позволяющие использовать одну машину в цикле сжижения, с лучшим КПД, но более деликатные, чем центробежные компрессоры.

Большая часть заводов сжижения газа для экспорта была сооружена с применением центробежных компрессоров в холодильных циклах.

Привод компрессоров осуществляется или паровыми турбинами с их котлами, являющимися классическим оборудованием, или газовыми турбинами.

Газовые турбины, также как и котлы паровых турбин, должны быть оборудованы форсунками и камерами сгорания, приспособленными к имеющимся видам горючего: розжиг необходим на сыром газе, далее работа на остаточном газе (газ сепарации, конденсат и т.п.), что делает сложными конструкцию, регулирование и эксплуатацию этого оборудования.

4.6. ТРАНСПОРТ СПГ

4.6.1. Морской транспорт

4.6.1.1. Общие соображения

Метановозы фактически являются плавучими резервуарами хранилищами СПГ и, как и наземные резервуары (см. § 4.8.1), они перевозят СПГ в переохлажденном виде (около –160°С) и под давлением, несколько большим атмосферного: два важных эксплуатационных параметра существуют для них – относительное давление в танках СПГ и суточные потери на испарение. Ниже излагаются особенности этих судов, как с точки зрения конструкции, так и с точки зрения эксплуатации.

4.6.1.2. Технические характеристики метановоза

Прежде всего, метановозы характеризуются особой конструкцией их грузового отсека: танков, содержащих СПГ.

4.6.1.2.1. Конструкция криогенных танков

Начиная с 50-х годов были разработаны и классифицированы по международным кодам многочисленные конструкции танков метановозов. Эти типы танков и их основные характеристики описаны ниже.

4.6.1.2.1.1. Мембранные танки

Это резервуары, имеющие тонкую непроницаемую стенку (мембрану), скрепленную через слой теплоизоляции с элементами корпуса судна.

Мембрана сконструирована таким образом, что способна компенсировать термические сжатия и расширения и представляет первичный барьер, который должен быть продублирован полным вторичным барьером, способным удержать СПГ в случае разрыва танка.

Две французские конструкторские группы являются лидерами в сооружении танков призматической формы: "Технигаз" и "Газ Транспорт" (см. рисунок с. 468).

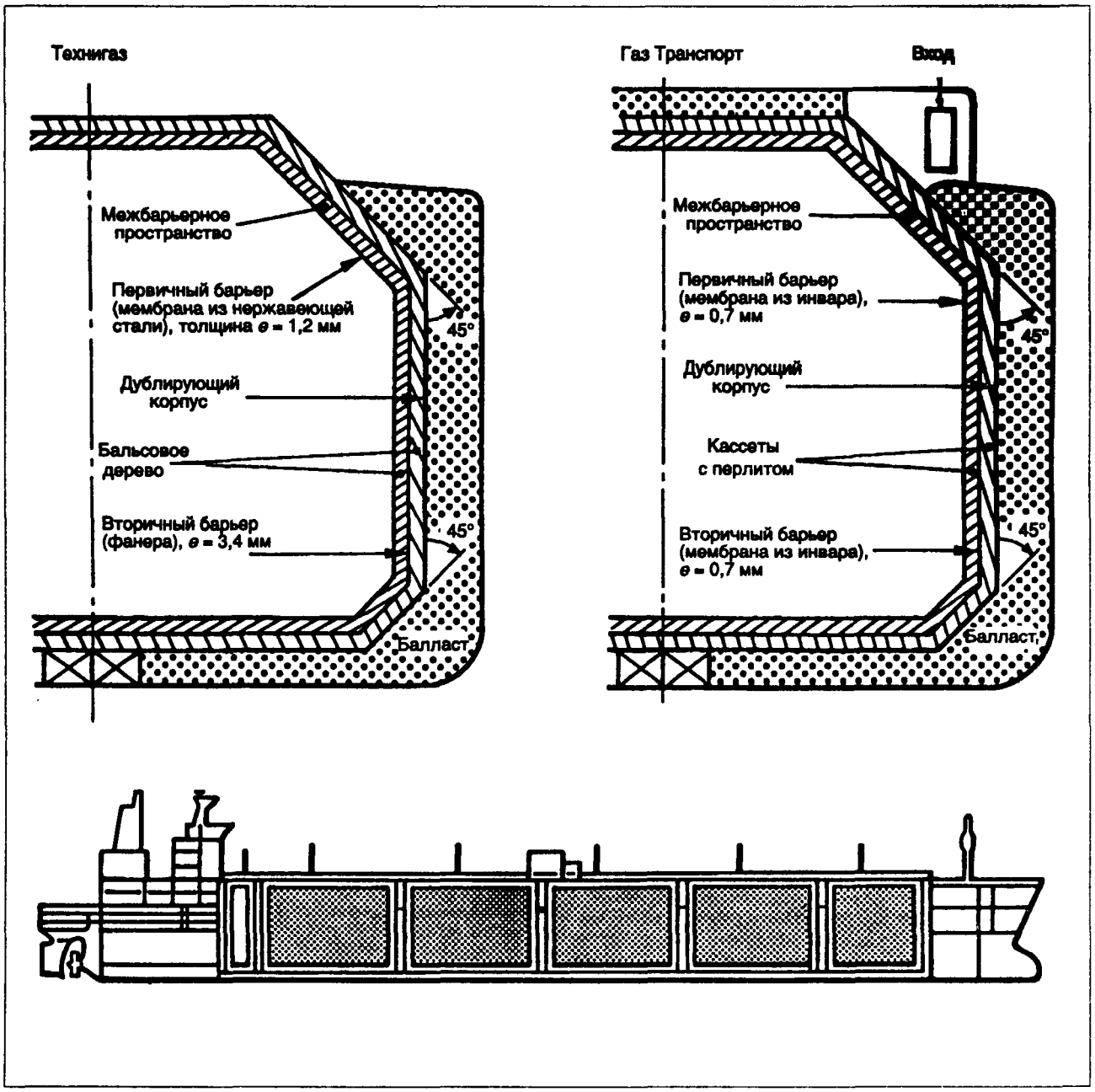
4.6.1.2.1.2. Самонесущие или независимые танки

Это танки, которые не являются составной частью корпуса и не способствуют прямо его прочности.

Различаются две категории среди этих танков в соответствии с тем, имеют они или нет полный вторичный барьер (см. рисунок с. 467, 468, 469). Танки с полным вторичным барьером в настоящее время не выпускаются.

Исследования уровня напряжений, срока службы до усталостного разрушения и распространения трещин позволили разработать танки с частичными вторичными барьерами сферической формы, которые не могут иметь в принципе больших утечек в случае разрыва трещин и которые смонтированы на специальной поддерживающей юбке.

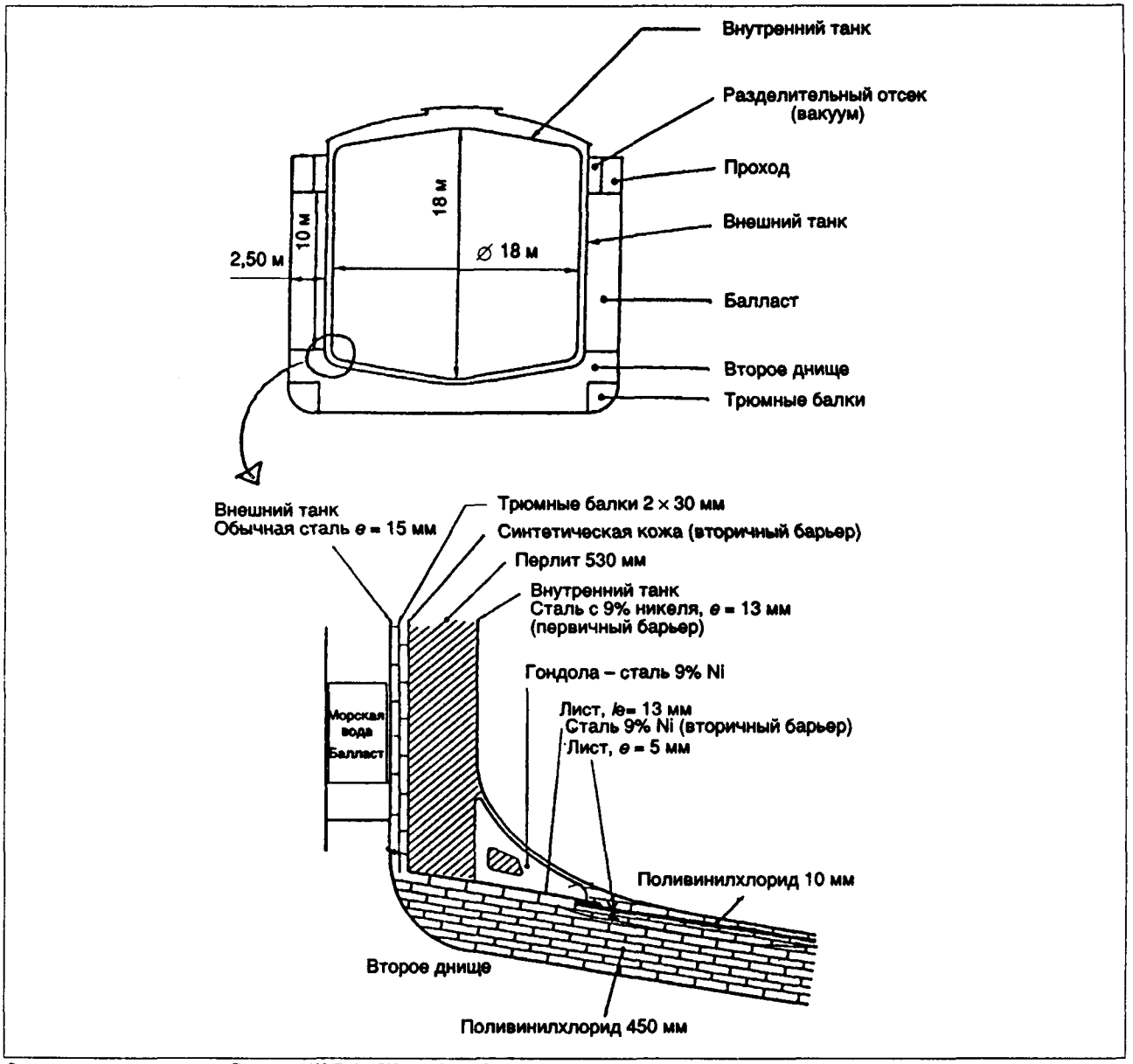
Были изучены многие другие технологии для изготовления танков метановозов (полумембранные, самонесущие без вторичного барьера, с внутренней изоляцией и т.п.), но они не нашли распространения. В 1986 г. действующие метановозы были в равной степени созданы по технологиям фирм Газ Транспорт и Мосс (Moss), затем следовала технология Технигаз.



Мембранные танки.

Конструктор	Первичный барьер	Вторичный барьер	Теплоизоляция
Технигаз Марк I	Гофрированная мембрана с двумя сериями прямоугольных волн из нержавеющей стали 18/8, толщина e = 1,2 мм	Фанера из клена, толщина e = 3,4 мм	Бальсовое дерево
Технигаз Марк III (проект)		Композит из алюминия между двух слоев стекловолокна	Полиуретан и стекловолокно
Газ Транспорт классический вариант	Мембрана с одним видом волн из инвара с 36% никеля, толщина e = 0,7 мм	Идентичен первичному барьеру – из инвара	Два слоя кассет из фанеры, наполненных перлитом
Газ Транспорт (проект)			Три слоя из кассет улучшенной структуры

Технология изготовления танков призматической формы.



Самонесущие танки типа Вормс – Ж.Д.Ф. (Жюль Верн).

Конструктор	Первичный барьер	Полный вторичный барьер	Теплоизоляция	Примечания
Вормс - А. Ц. С. М. Газ де Франс	Сталь с 9% Ni 9 мм < e < 15 мм	Сталь с 9% никеля e = 4 мм на днище, С302 на корпусе	ПВХ и перлит	— Применен только на метановозе *Жюль Верн* — Танки цилиндрические
Конч I	Сплав алюминия 5083	Фанера	Бальсовое дерево и стекловолокно	— Применен на *Метан-Принцесс* и *Метан Прогресс* *
Конч 2	Сплав 5083	Фанера	Полиуретан, стекловолокно	— Применен на трех судах *Эль Пасо* *
Эссо	Сплав алюминия 5083	То же, что и в первичном барьере	ПВХ и бальсовое дерево	— Применен на четырех судах
* призматический танк.				

Самонесущие танки с полным вторичным барьером.

Существующие метановозы имеют уровень испарения в среднем около 0,25%, технический прогресс в теплоизоляции танков позволяет рассчитывать на средний уровень испарений порядка 0,10% на будущих судах.

4.6.1.2.2. Общая конструкция метановозов

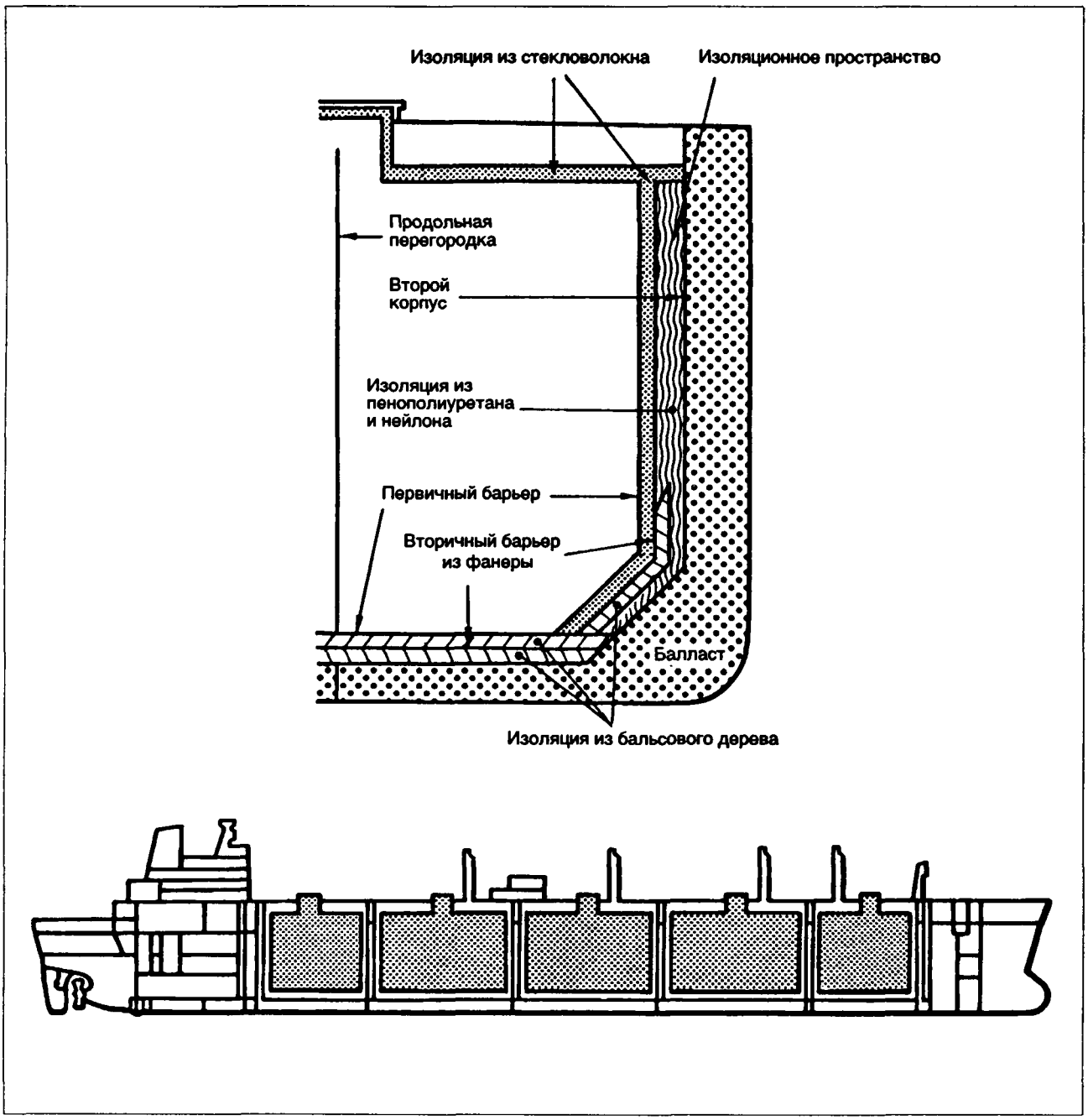
4.6.1.2.2.1. Грузовой отсек

Метановозы имеют в своей грузовой части два корпуса, что является важным элементом безопасности в части механической прочности структур и такая конструкция распространяется на суда, перевозящие химические продукты и нефтетанкеры. Пространство между корпусом и дублирующим корпусом заполнено балластной морской водой, которая стабилизирует качку пустого судна.

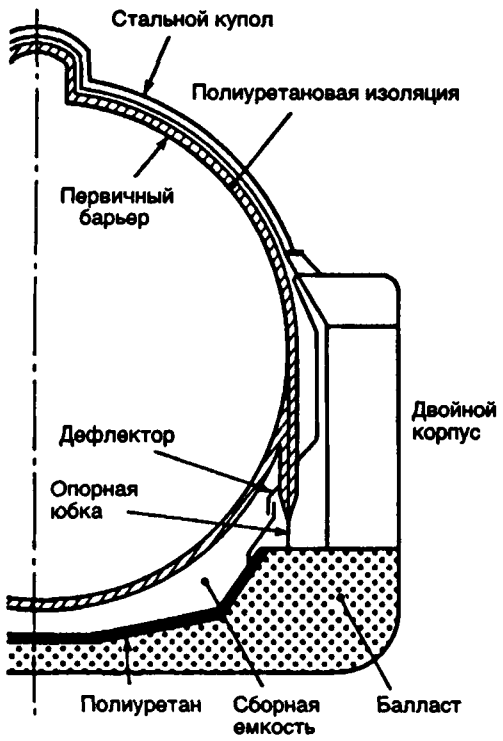
4.6.1.2.2.2. Двигательные установки

Они состоят из двух паровых котлов, приводящих в действие группу турборедуктора (наличие двух котлов позволяет судну маневрировать или произвести разгрузку в случае выхода из строя одного из котлов).

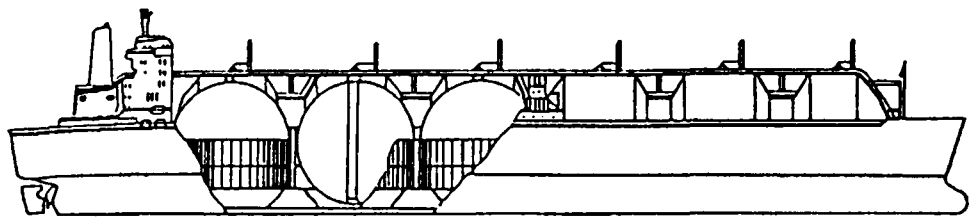
Котлы питаются газом испарения из танков СПГ совместно с мазутом или без него: это решение спо-

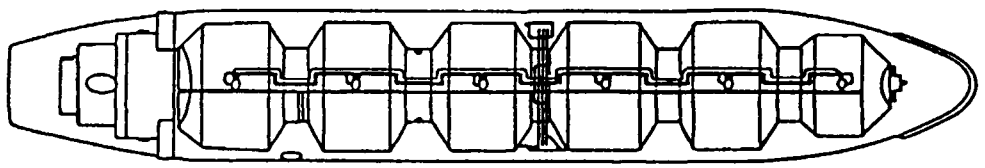


Самонесущие танки типа Конч 2.









Конструктор	Первичный барьер	Вторичный барьер	Теплоизоляция
Мосс и варианты, разработанные по лицензии Мосс	Сплав алюминия или сталь с 9% никеля	— Сборник СПГ под танком из сплава алюминия — Алюминиевые отражательные листы, покрывающие изоляцию сверху	Различные варианты: — ПВХ — полиуретан и стекловолокно — полистирол и стекловолокно

Самонесущие танки типа Мосс с полным вторичным барьером.

соба питания котлов дает большую гибкость в плане экономии затрат на энергию в соответствии с ценами на природный газ или мазут. На будущее и по тем же причинам цен на топливо для котлов была изучена возможность использования тихоходных дизелей с питанием мазутом или сжиженным обратно испарившимся из танков газом, но склоняются скорее использовать группы двигателей с двойным питанием мазут–газ, учитывая технические характеристики, которые эти двигатели могут иметь. Кроме того может быть предусмотрено питание сжиженным испарившимся СПГ.

4.6.1.2.2.3. Вспомогательное оборудование танков

На палубе находятся траверсы слива и налива (природный газ и СПГ), трубопроводы газовые и жидкостные и система трубопроводов для захолаживания танков.

В каждом танке многочисленные трубопроводы, секционированные задвижками и снабженные предохранительными клапанами:

— один трубопровод для налива СПГ;
— два для слива СПГ с погружным насосом;
— один для осушки СПГ с насосом;
— один, служащий для слива или налива со съемным погружным насосом;
— один для сбора газов испарений, соединенный с газовой линией на палубе или с мачтой дегазации судна через предохранительный клапан;

Установлены два или три компрессора сжатия газов испарения для подачи газа в котлы после их разогрева и для подачи на берег этого же газа в случае необходимости при наливе или захолаживании оборудования. В оборудование входит так же регазификатор СПГ в случае необходимости питания котлов газом.

Имеется установка сжиженных испарений в зависимости от способа питания котлов.

Трубопроводы для перекачки груза отличаются друг от друга в зависимости от фазы – газ или жидкость. В процессе эксплуатации в танках все время поддерживается газовая атмосфера, что исключает всякую возможность образования взрывоопасных смесей. Танки, впрочем, оборудованы различными приборами, контролирующими давление, температуру и уровень СПГ (см. § 4.2.2), а также системой безопасности, позволяющей избежать внезапного повышения или понижения давления.

4.6.1.2.2.4. Оборудование безопасности

Установленное оборудование противопожарной безопасности включает в себя систему пожаротушения – порошковую, иногда пенную, устройства орошения морской водой для предохранения от теплового излучения палубных сооружений судна и т.д. (см. § 4.10).

4.6.1.3. Эксплуатация метановозов

4.6.1.3.1. Контрактные вопросы

Судовладельца и фрахтователя связывают различные типы контрактов, называемые чартер - партиями: судовладелец (фрахтодатель) предоставляет грузоподъемность своего судна в распоряжение того, кто хочет перевозить свой товар (фрахтователя) и обязуется совершить определенное плавание при условии оплаты фрахта (груза).

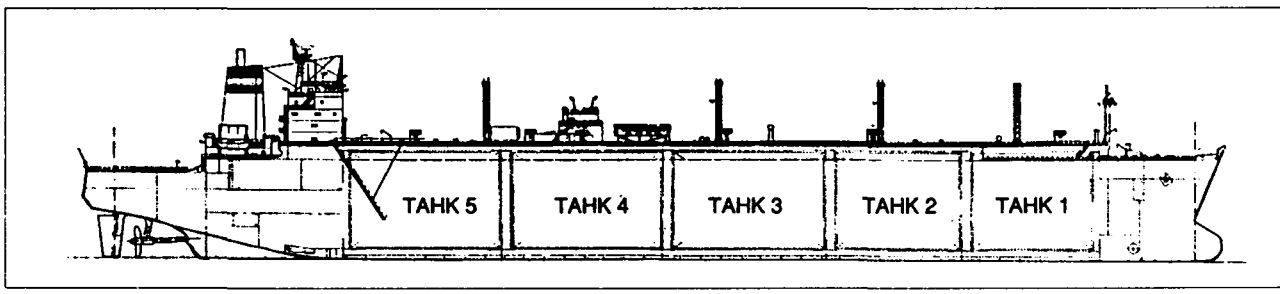
Статьи чартер-партии составляются по усмотрению двух сторон и предусматривают различные вопросы распределения технических и коммерческих сторон, касающихся судна и его груза: чартер-партия плавания (маршрута), чартер-партия времени, чартер-партия корпуса судна и т.п.

Эти технические и экономические вопросы включают:

— поддержания "уровня" судна, то есть соответствие судна своду международных правил по его конструкции и безопасности, гарантирующих его классификацию и касающихся главных частей: корпуса, танков, грузовых помещений, двигательной установки и т.д.;
— вооружение судна, то есть организацию экипажа и его жизни на борту, снабжение расходными материалами (топливо, масла, азот и т.д.) и эксплуатационными материалами;
— содержание судна или одновременно текущий ремонт и технические остановки, которые имеют место в среднем через каждые 18 или 24 месяца и во время которых на верфи производится осмотр подводной части судна, ревизия двигателей, вспомогательного оборудования, ремонт покрытий, различных трубопроводов и т.д.

Фрахтователем может, в зависимости от обстановки, быть покупатель СПГ или его отделение, продавец СПГ или его отделение или независимый перевозчик продавца или покупателя. Это зависит, в частности, от типа контракта покупки СПГ. Различают следующие контракты покупки:

— FOB (свободный борт), где груз СПГ покупается на месте его погрузки на заводе сжижения.



Метановоз Эдуард Л.Д. (129500 м³).

— CIF (стоимость, страховая премия, фрахт), где груз СПГ покупается в месте выгрузки в метановом терминале.

Для контракта купли FOB фрахтователь является покупателем СПГ (случай системы Алжир–Франция, где фрахтователем является Газ де Франс). Для контрактов купли CIF фрахтователем является продавец СПГ или независимый перевозчик (случай системы, поставляющей СПГ в Японию).

4.6.1.3.2. Различные фазы эксплуатации

Полная ротация метановоза, эксплуатирующегося в одной из сетей СПГ, состоит из:

— стоянки под загрузкой,
— пути с грузом туда;
— стоянки под разгрузкой,
— пути обратно без груза.

Совершаются определенные эксплуатационные работы, в частности во время технических стоянок:

— заполнение танков воздухом;
— захолаживание танков под воздухом.

4.6.1.3.2.1. Процедура стоянки метановоза

Стоянка метановоза для обычной загрузки или разгрузки хронологически складывается из следующих процедур и операций:

— конец свободного пути и прибытие на рейд;
— постановка на якорь;
— вход в порт;
  · взятие на борт лоцмана;
  · маневрирование с буксиром;
— причаливание;
— подключение равнопотенциальных кабелей и переговорно-противопожарной связи;
— швартовка судна;
— составление контрольной документации судно-порт по прибытии;
— опознавание груза;
— подключение газового стояка и стояка СПГ, продувка стояков азотом;
— проверка противопожарного оборудования на судне и в порту;
— погрузка или разгрузка;
  · захолаживание разгрузочного стояка СПГ с небольшим расходом;
  · постепенное увеличение расхода до нормального;
  · постепенное уменьшение расхода и окончание операции;
  · анализ СПГ и газа;
  · одновременное снятие или взятие балласта, соответственно;
— опознавание груза и определение объема и чистой перекачанной энергии, составление контрактных документов;
— продувка и разогрев разгрузочных стояков СПГ, демонтаж стояков;
— загрузка судна пищевыми продуктами, горючим, азотом и т.д.;
— демонтаж газового стояка и линий электросвязи судно-берег;
— взятие на борт лоцмана;
— снятие с якоря, маневрирование на буксире;
— выход в море после снятия лоцмана.

4.6.1.3.2.2. Особенности операций налива

4.6.1.3.2.2.1. Перед прибытием судна на завод сжижения

На судне: часть СПГ, хранимого на дне танков откачивается и распыляется по поверхности СПГ в танках для их охлаждения перед разгрузкой.

На заводе: запуск наливной эстакады и ее захолаживание.

4.6.1.3.2.2.2. Перекачка СПГ

Осуществляется с помощью насосов завода сжижения: забор из резервуаров завода и подача в наливные трубопроводы на суше и стояки к танкам метановоза.

Для поддержания номинального давления в танках газы, образовавшиеся при перекачке жидкости и при испарении в танках, откачиваются на берег по газовому стояку.

Заполнение танков производится, как правило, на 98 - 98,5% от их вместимости.

4.6.1.3.2.2.3. Сброс балласта

Движение груза (слив – налив СПГ) компенсируется движением морской воды (слив – налив) в двойном днище корпуса судна, используемом как балластная емкость.

Сброс балласта означает опорожнение морской воды из балластных камер насосами во время операции налива СПГ. Ход этой операции контролируется таким образом, чтобы сохранять осадку судна постоянной и достаточную устойчивость не допуская предельнодопустимых напряжений на корпусе судна.

4.6.1.3.2.3. Особенности операции слива

4.6.1.3.2.3.1. Перед прибытием судна в терминал

Наливные средства наземных резервуаров захолаживаются.

4.6.1.3.2.3.2. Перекачка СПГ

Погружные насосы танков метановоза обеспечивают перекачку СПГ к стоякам и системам на земле. Поддержание давления в танках обеспечивается откачкой газа испарения из терминала через разгрузочный газовый стояк. В зависимости от соотношения давлений в танках судна и резервуарах терминала и потерь давления в коммуникациях перекачка осуществляется или самотеком или газодувками, установленными на суше.

В случае невозможности такой перекачки перепад давления в танках судна может быть компенсирован с помощью газификационной установки СПГ, установленной на борту некоторых метановозов.

Загрузочные насосы отличаются, когда уровень СПГ достигает фиксированного значения постоянного объема, хранимого на дне танка. Этот объем определяется таким образом, чтобы перед следующей загрузкой на дне танка оставалось бы измеряемое количество СПГ, а температура на дне была бы ниже –155°C.

4.6.1.3.2.3.3. Взятие балласта

Заполнение балластных отсеков морской водой производится одновременно с откачкой продукта СПГ.

4.6.1.3.2.4. Расчет количеств энергии

4.6.1.3.2.4.1. Опознавание груза

Определение объема СПГ, находящегося в танках судна, производится во время операции, называемой "опознавание груза", перед и после слива или налива. Расчет производится с учетом претензий заинтересованных сторон (продавец, покупатель, перевозчик) и состоит в регистрации следующих параметров:

— давление в танках;
— температуры газовой и жидкой фаз в каждом танке;
— уровни жидкости в каждом танке;
— позиция судна (крен, посадка).

Замеры уровней пересчитываются в объемы по замерным таблицам (составляются официальными представителями во время постройки судна), при этом вносятся поправки в зависимости от положения судна и усадки замерных лент (в случае лент из нержавеющей стали). Разность объемов между началом и концом операции перекачки составляет чистый объем перекачанного СПГ.

4.6.1.3.2.4.2. Количество энергии, заключенной в перекачанном СПГ

Оно равно произведению:

$$Q_{СПГ} = V_{СПГ} \cdot \rho \cdot P_{ВТС}.$$

где

$Q_{СПГ}$ – чистый объем СПГ, перекачанного в м³;

ρ – плотность СПГ при равновесных давлении и температуре в танке в кг/м³, рассчитанная по методу Клозека–Мак Кинли или КМК (NBS, техническая записка 1030 от 1980 г.) по составу СПГ и его температуре;

$P_{ВТС}$ – высшая массовая теплота сгорания жидкости (кВт/кг), рассчитывается по составу СПГ.

4.6.1.3.2.4.3. Количество энергии, заключенное в возвратном газе во время налива

$$Q_Г = V_Г \cdot P_{ВТСГ}$$

где

$V_Г$ – объем газа, эквивалентный объему СПГ выгруженного, приведенный к нормальным условиям в м³;

$P_{ВТСГ}$ – высшая объемная теплота сгорания газа кВт/нм³.

4.6.1.3.2.4.4. Количество чистой перекачанной энергии

На практике все расчеты энергии производятся на ЭВМ (см. рисунок с. 473).

4.6.1.3.2.5. Плавание с грузом

Во время этого плавания главным объектом работ является поддержание постоянного давления в танках, слегка больше того давления, под которым СПГ хранился в резервуарах на берегу на заводе сжижения и, если возможно, ниже величины давления в резервуарах, в которые СПГ будет перекачан в терминале. Это нужно для того, чтобы ограничить объем испарений, которые могут произойти во время перекачки и плавания.

По этой же причине это давление во время плавания регулируется в абсолютных единицах, чтобы оно не зависело от атмосферного давления. Поскольку транспортное давление фиксировано, остается удалять испаряющийся газ.

Суточный расход испарений метановоза зависит, помимо его размера (отношение поверхности обмена танков к объему груза) и используемой теплоизоляции, от климатических и морских условий (температура воды, воздуха, состояние моря и т.д.) и термодинамических характеристик загруженного СПГ (глубина переохлаждения и др.). Для памяти, численные значения испарений изменяются от 0,18 до 0,25% для сооружаемых в настоящее время метановозов и могут измениться до 0,10% для метановозов будущего, снабженных более совершенной теплоизоляцией.

Испарившийся газ, после сжатия и разогрева, в общем случае подается в котлы, где он используется как горючее с дозой мазута (см. § 4.7.1.2.2) и для внутренних нужд судна (производство электроэнергии и т.д.). Поддержание постоянного давления в танках осуществляется следующим образом:

— изменяя скорость судна в зависимости от расхода испаряющегося газа, если руководство газотранспортной компании это санкционирует;
— или поддерживая постоянную скорость судна, но меняя расход горючего, сброс избытка испарений в конденсатор или сброс избытка газа в атмосферу (когда это разрешено);
— осуществляя обратное сжижение испарений (частичное) на нескольких метановозах, которые оборудованы соответствующими установками.

4.6.1.3.2.6. Обратное плавание

Перед этим плаванием часть СПГ сохраняется на борту для поддержания холода в танках перед последующей загрузкой. Это количество (избыток) рассчитывается с учетом испарений во время этого плавания и предвидимых ожиданий (остановок).

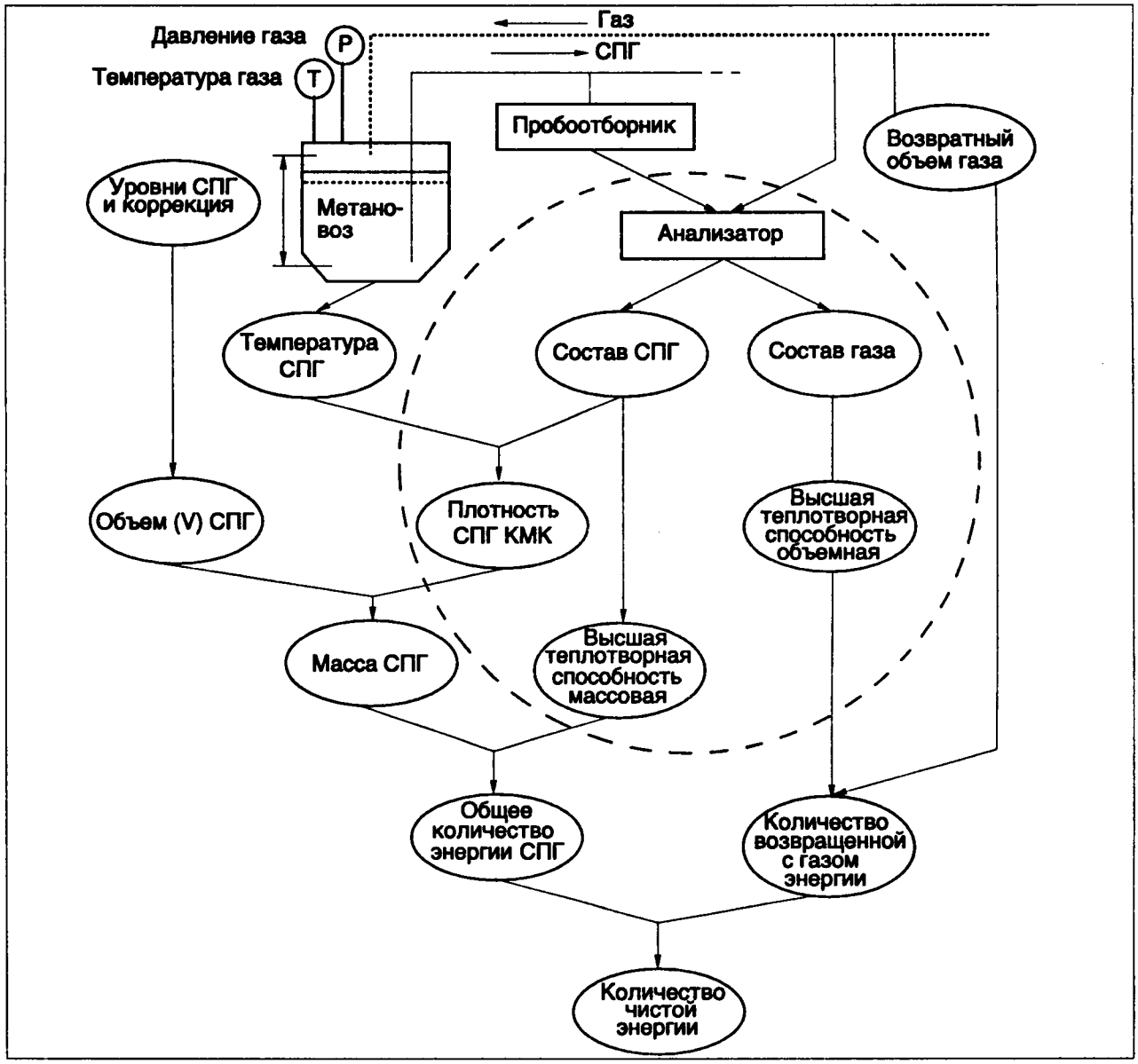
В общем случае можно допустить некоторые изменения давления в танках во время обратного плавания. Принцип использования газа для двигателей тот же, что и во время плавания под грузом. Отметим, однако, что если количество испарений будет мало, может оказаться необходимым увеличить расход топлива или регазифицировать часть СПГ в зависимости от желаемой скорости движения.

Примечание:

Технология фирмы Газ Транспорт, использующая мембранные танки из сплава инвар и усиленную теплоизоляцию, позволяет отказаться от сохранения холода в танках.

4.6.1.3.2.7. Некоторые особые операции

Эти операции заключаются в кондиционировании танков и производятся, по крайней мере частично, на причале терминала разгрузки или загрузки.



Общая схема расчета энергии.

4.6.1.3.2.7.1. Создание воздушной атмосферы в танках СПГ

Этапы этой операции:

— Осушка танков.

Она заключается в наибольшем понижении уровня СПГ во время слива и производится с помощью главных разгрузочных насосов. Затем, когда уровень станет минимальным, СПГ откачивается с помощью насосов, называемых осушительными, у которых допустимое давление всасывания ниже, также как и расход;

— Разогрев танков.

В конце осушки неоткачиваемое количество жидкости, оставшееся на дне танков, испаряется нагнетанием горячего газа.

— Создание инертной атмосферы.

В случае, когда создается риск образования смеси воздуха и паров углеводородов, эта операция состоит в создании инертной газовой среды в танках: газообразного азота из подогревателя жидкого азота, установленного на берегу, или дыма (азота и CO_2), получаемого от сжигания газойля или пропана на судовой установке.

Признаком инертности атмосферы в танке является содержание менее 3% природного газа по объему;

— Создание воздушной атмосферы.

Инертный газ вытесняется воздухом до получения концентрации кислорода более 20% по объему и исчезновения токсичных газов.

4.6.1.3.2.7.2. Захолаживание танков после создания в них воздушной атмосферы

В этом случае работы состоят из следующих этапов:

— Осушка продувкой сухим воздухом до получения точки росы менее –30°C перед захолаживанием;

— создание инертной атмосферы для улучшения осушки танков и доведения содержания кислорода менее 5% по объему;
— закачка газа: удаление инертного газа закачкой газа с берега или испарением природного газа на борту судна (газ подается в жидком виде из терминала). Точка росы по влаге должна быть менее –30°С, а содержание CO_2 менее 1% по объему;
— захолаживание: постепенное охлаждение танков разбрызгиванием СПГ до доведения температуры на дне танков ниже –155°С перед загрузкой СПГ.

4.6.2. Наземный транспорт

Сухопутные перевозки СПГ во всем мире производятся автоцистернами и реже железнодорожными цистернами (Токио Газ и Линде), наиболее часто для газоснабжения сателлитных (периферийных) станций от метановых терминалов или станций покрытия пиковых нагрузок газопотребления.

Такие перевозки получили наибольшее распространение в США (сотни тысяч тонн в 1984 г.), далеко впереди по сравнению с Японией и Европой (соответственно менее 30 000 и около 40 000 тонн).

Типовая вместимость автоцистерны – 45 м³ в США, от 30 до 40 м³ в Европе и 15 м³ в Японии.

Чаще всего емкость, содержащая СПГ, установленная на полуприцепе автомобиля, двухкорпусная с вакуумной теплоизоляцией:

— внутренний корпус стальной или из криогенного сплава;
— внешний корпус не обязательно из нержавеющей стали или из алюминия, она может быть изготовлена из обычной стали;
— теплоизоляция поддерживается под вакуумом и может состоять из комбинации различных классических изоляционных материалов: полиуретана, перлита, стекловолокна и др.

СПГ перевозится под небольшим давлением – от 0,25 до 0,5 МПа.

4.7. РЕГАЗИФИКАЦИЯ

4.7.1. Принцип и технологический расчет

Регазификация СПГ обычно производится в теплообменниках, где СПГ подогревается горячим теплоносителем и которые рассчитываются исходя из:

— расхода СПГ, который необходимо регазифицировать;
— температуры и давления, требуемых в газораспределительной системе.

В метановом терминале наиболее часто в качестве теплоносителя используется морская вода, а теплообменники типа "регазификатор с орошением" (морская вода стекает вдоль вертикальных трубок, в которых СПГ циркулирует под давлением и постепенно испаряется снизу вверх в этих трубках).

Необходимость корректировки параметров природного регазифицированного газа в соответствии с условиями распределительной сети, в которую он поступает, и возможность рекуперации холода СПГ являются двумя критериями, которые благодаря их комбинации позволяют сооружать различные установки регазификации как с точки зрения способа регазификации, так и с точки зрения используемых теплообменников.

4.7.1.1. Корректировка параметров распределяемого газа

Независимо от необходимости согласования давления и температуры на выходе из регазификаторов с давлением и температурой в газораспределительной сети, качество газа также должно быть соответствующим образом отрегулировано.

Для этого могут быть использованы различные способы как до, так и после регазификации:

— обеднение закачкой жидкого азота в СПГ, закачкой воздуха или извлечением тяжелых углеводородов после регазификации;
— обогащение закачкой пропан-бутановой фракции после регазификации.

4.7.1.2. Рекуперация холода из СПГ

По соображениям рационализации производства и экономии энергии в процессе регазификации можно рассмотреть различные способы утилизации холода СПГ в потребляющих холод отраслях промышленности вместо того, чтобы просто выпускать его в окружающую среду.

Анализ энтальпийной диаграммы одного из СПГ при данном давлении позволяет оценить количество тепла, необходимого для его разогрева, или наоборот, количество холода, которое он может отдать.

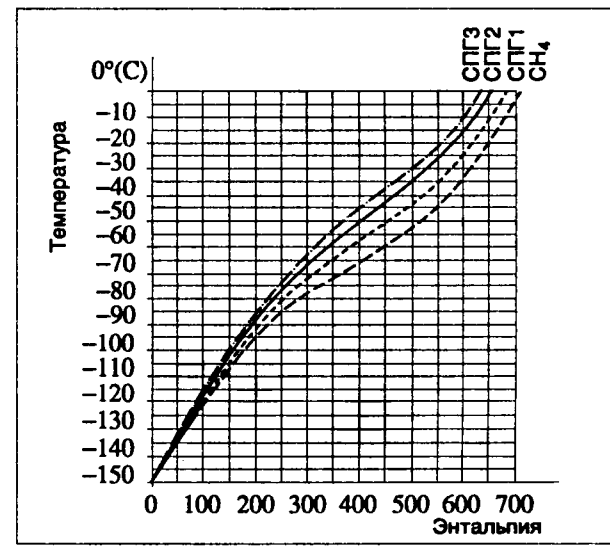


Диаграмма энтальпия–температура при давлении 9,0 МПА.

			CH_4	СПГ 1	СПГ 2	СПГ 3
Состав, ммоль %	Азот	N_2	0	0,20	0,30	1,40
	Метан	C_1	100,00	96,60	91,125	36,40
	Этан	C_2	0	3,20	5,35	8,50
	Пропан	C_3	0	0,00	1,50	2,30
	Изобутан	iC_4	0	0,00	0,26	0,33
	н-бутан	nC_4	0	0,00	0,35	0,52
	Пентан	C_{5+}	0	0,00	0,115	0,00
Объемная масса, кг · м$^{-3}$				430,5	454,3	473,2

Характеристики различных СПГ

Это количество холода зависит от состава СПГ, его давления и температуры, при которых снимается холод. Это количество:

— больше при низком, чем при высоком давлении;

— при данном давлении зависит от уровня температуры; изменение энтальпии СПГ в зависимости от температуры нелинейно.

Холод, заключенный в СПГ, может быть:

— использован для охлаждения другого тела непосредственно теплопередачей.

Эта отдача тепла может быть напрямую оценена по изменению энтальпии СПГ. Доля холода от заключенного в СПГ общего его количества, которая может быть рекуперирована на трех температурных уровнях, показана в нижеследующей таблице:

Пределы изменения температуры СПГ, °С	Доля холода, которая может быть рекуперирована теплопередачей при давлении 9,0 МПа, %
–150 - –100	24
–100 - –50	34 - 42
–50 - 0	33 - 42

— превращен в работу в термодинамическом цикле с двумя изотермами между температурой холодного источника, которым является СПГ, и температурой горячего источника. Максимальное значение рекуперируемой работы может быть рассчитано, принимая в качестве горячего источника окружающую среду с температурой 25°С, что идеально подходит для температуры СПГ, исходя из второго начала термодинамики:

$$dW = dQ\left(1 - \frac{T_0}{T}\right),$$

где

T – температура СПГ ($T < T_0$);

dQ – теплота, переданная в цикле;

$dW < 0$, так как вырабатывается в цикле, по абсолютному значению

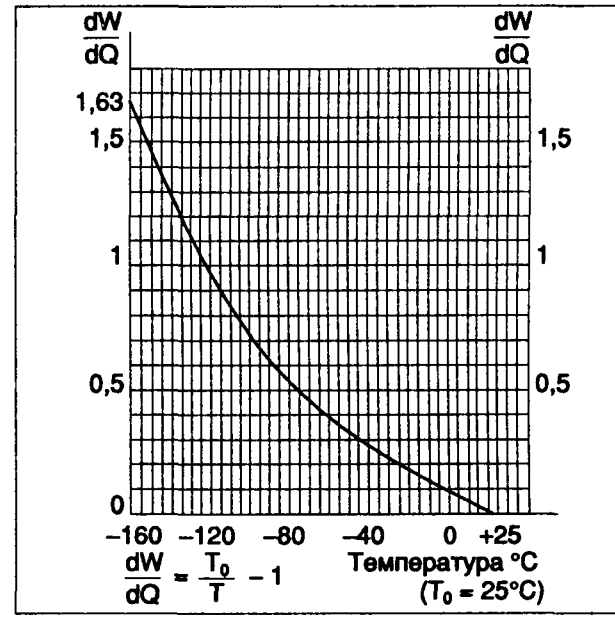
$$R = \frac{dW}{dQ} = \frac{T_0}{T} - 1.$$

Эффективность R превращения холода СПГ в работу уменьшается с увеличением температуры СПГ и, следовательно, это превращение более рентабельно для СПГ на самом низком температурном уровне.

Пределы изменения температуры СПГ, °С	Доля от общего количества холода СПГ, рекуперируемая превращением холода в работу при давлении 9,0 МПа, %
–150 - –100	48
–100 - –50	33 - 38
–50 - 0	14 - 18

В заключение отметим, что при очень низких температурах количество располагаемого холода не очень значительно (1/4 располагаемого количества между –150°С и –100°С), но позволяет получить большую часть полной работы, которая может быть рекуперирована (1/2) (P = 9,0 МПа).

Имеются способы утилизации холода СПГ по каждому из таких двух путей – теплопередачей или преобразованием в работу, которые являются внутренними или внешними по отношению к собственно регазификации СПГ.



Работа, эквивалентная одной фригории, в зависимости от температуры.*

4.7.1.2.1. Основные внутренние способы

4.7.1.2.1.1. Перекачка СПГ под высоким давлением

В случае, если подача испаренного газа должна производиться под большим давлением (случай терминала, работающего в газораспределительную сеть), можно поступить следующим образом:

— или регазифицировать СПГ под низким давлением и компремировать испаренный газ;

— или перекачивать СПГ под большим давлением и затем регазифицировать.

Учитывая низкую температуру СПГ, второй способ позволяет сэкономить существенное количество энергии при получении высокого давления сетевого газа и к тому же получить экономию при регазификации СПГ под высоким давлением.

4.7.1.2.1.2. Рекуперация испарений

Как показано в § 4.4.1.1, в случае, если испарения не могут быть утилизированы локально, для

* Фригория – единица холода. Прим. ред

внутреннего энергетического потребления или подачи в сеть, их рекуперация экономически желательна.

Холод СПГ позволяет осуществить эту рекуперацию:

— или прямым растворением испарений в СПГ, слегка предварительно охлажденном при извлечении из резервуаров перед перекачкой и регазификацией, реализуемой в колонне, в которой организована достаточная поверхность массообмена жидкость–газ;
— или обратным ожижением после компрессии в теплообменнике с СПГ при высоком давлении. Сжиженные таким способом испарения направляются обратно в резервуары.

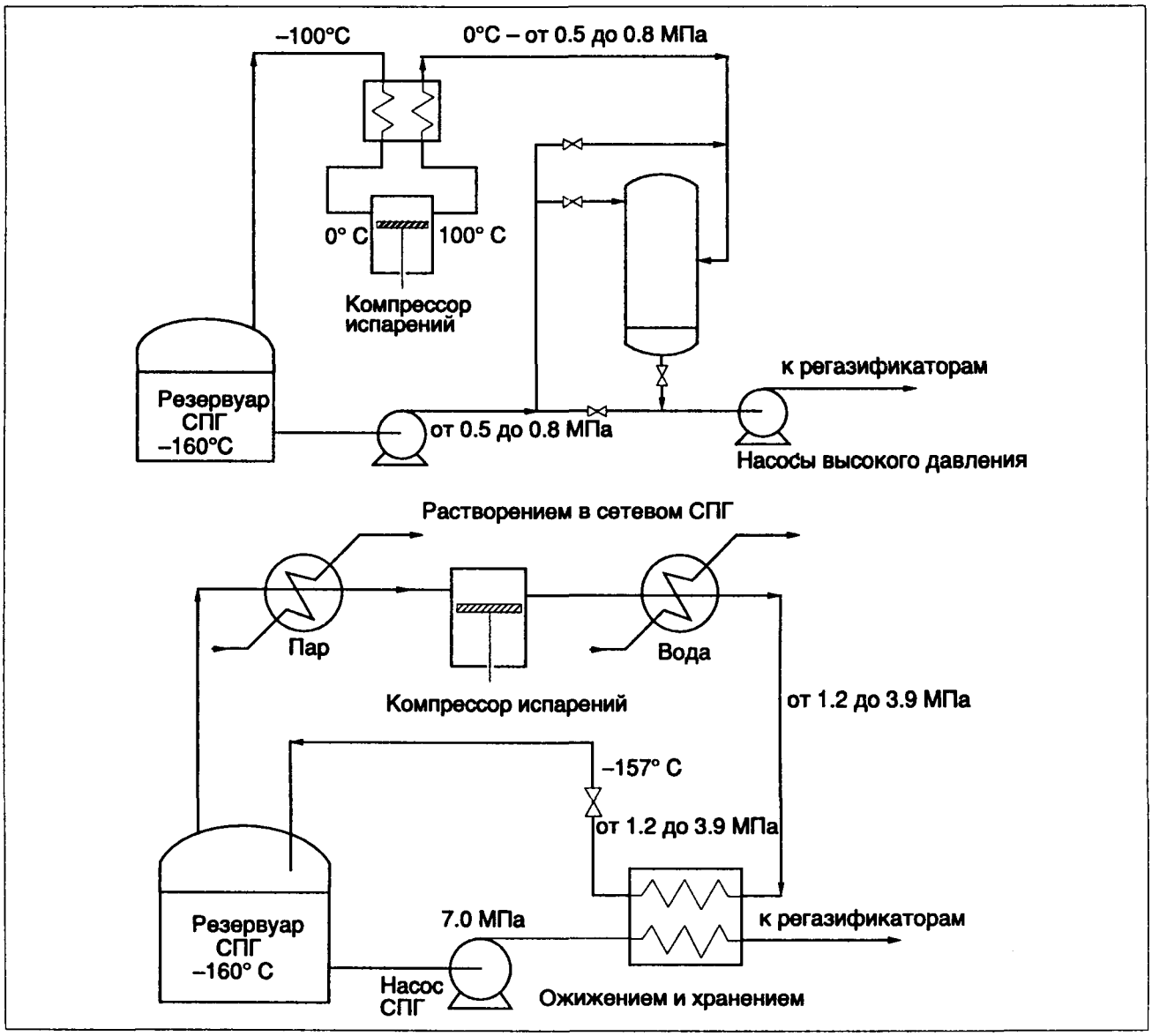
4.7.1.2.1.3. Регулирование качества сетевого газа

Обеднение добавкой азота или извлечением тяжелых углеводородов, описанное в § 4.7.1.1, позволяет использовать холод СПГ:

— прямая подача азота может быть реализована растворением в СПГ в переохлажденном виде в той же колонне, где производится рекуперация испарений;
— извлечение тяжелых углеводородов вызывает необходимость фракционирования СПГ, в некоторых случаях риформинг СПГ, если хотят получить газ с наинизшей теплотой сгорания, или захолаживание извлеченных компонентов – операция, в которой СПГ может служить холодным источником (случай метановых терминалов в Барселоне и Ла Специи).

4.7.1.2.2. Основные внешние способы

Ниже упоминаются только главные пути использования, которые могут быть объектами реализации в области СПГ.



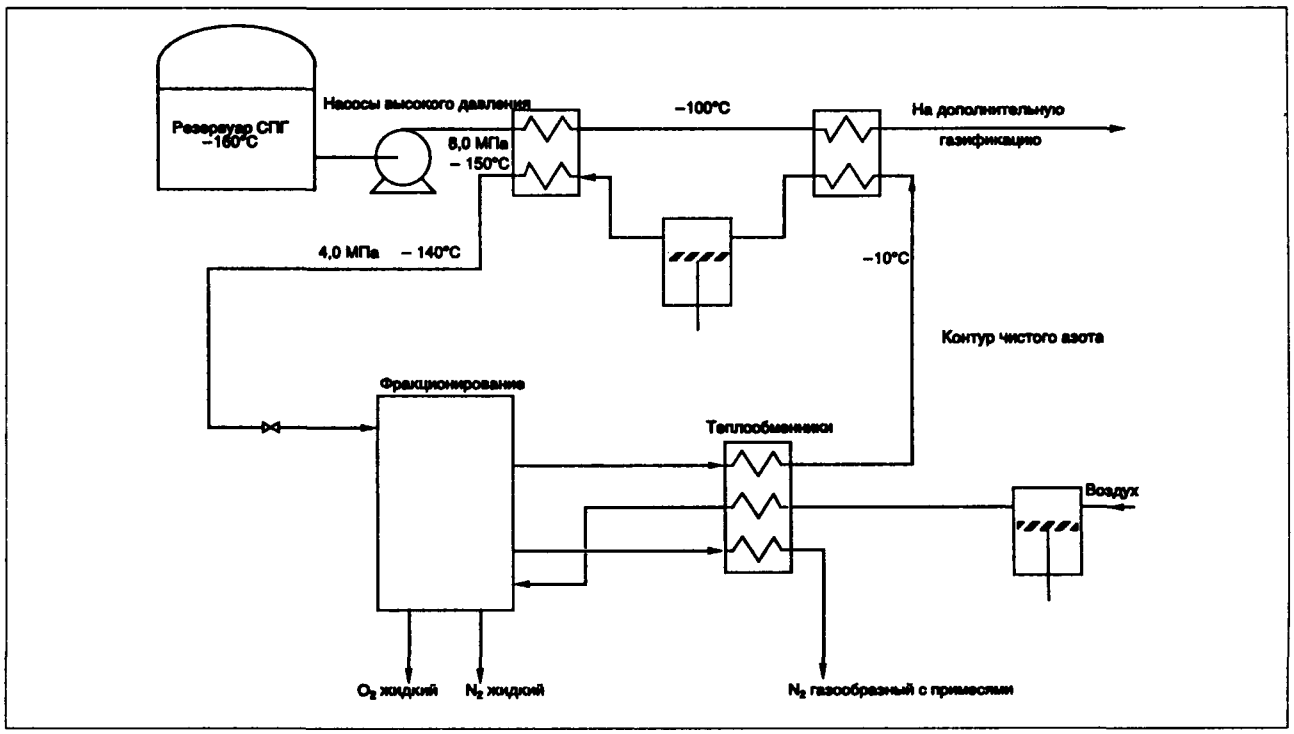
Рекуперация испарений.

4.7.1.2.2.1. Сепарация и ожижение компонентов воздуха

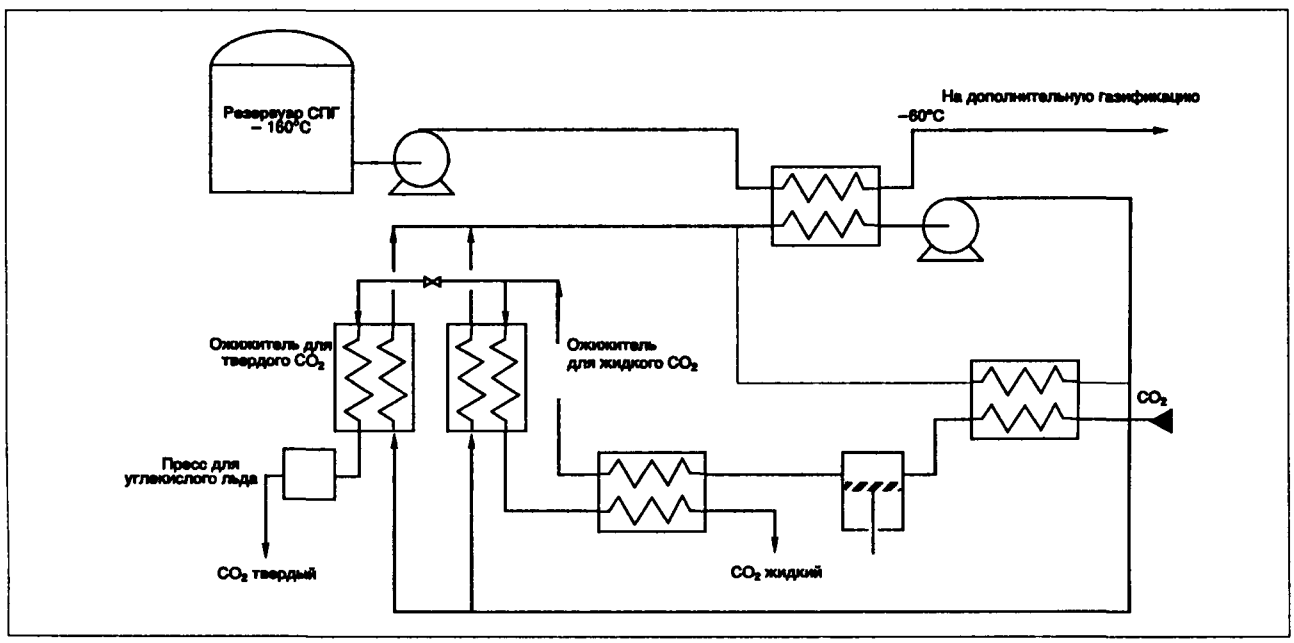
В классическом способе используется азотный цикл, включающий компрессию, охлаждение и дросселирование, позволяющий получить необходимое количество холода. Использование холода СПГ дает возможность исключить из цикла охлаждение и дросселирование и позволяет реализовать прямое охлаждение циклового азота в теплообменниках с помощью СПГ (см. нижеследующий рисунок).

4.7.1.2.2.2. Сжижение и получение твердого диоксида углерода

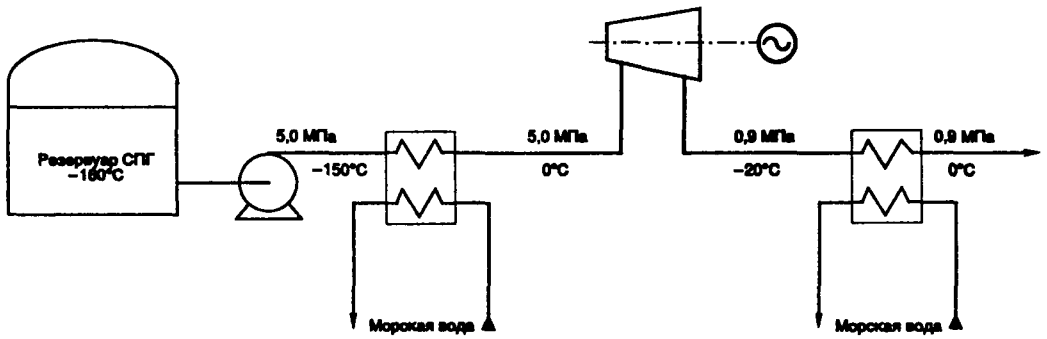
Утилизация холода СПГ позволяет исключить классический цикл компрессии и дросселирования, который обеспечивает сжижение CO_2 и перевод в твердую фазу, и заменить его фреоновым контуром (см. рисунок).



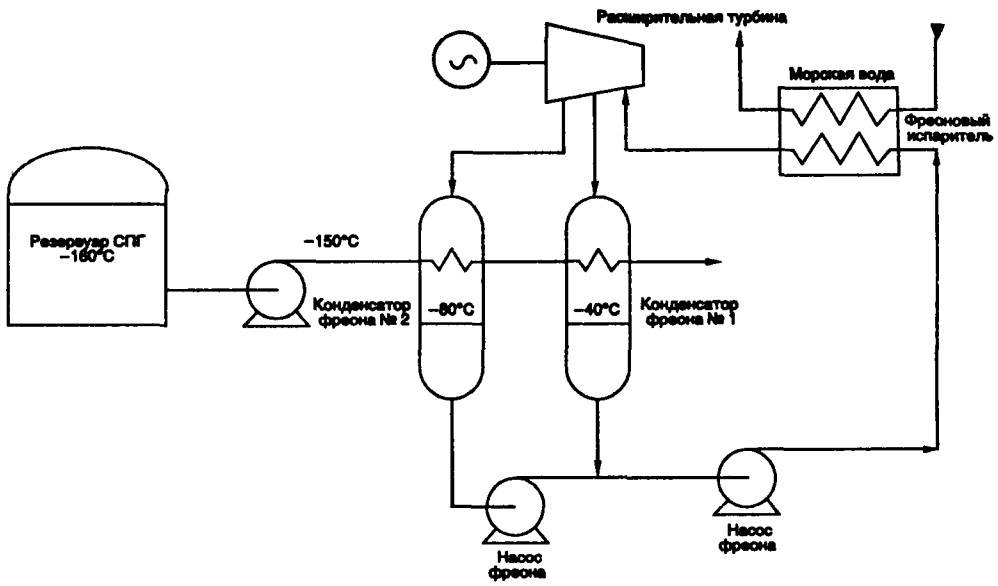
Супарация и сжижение компонентов воздуха.



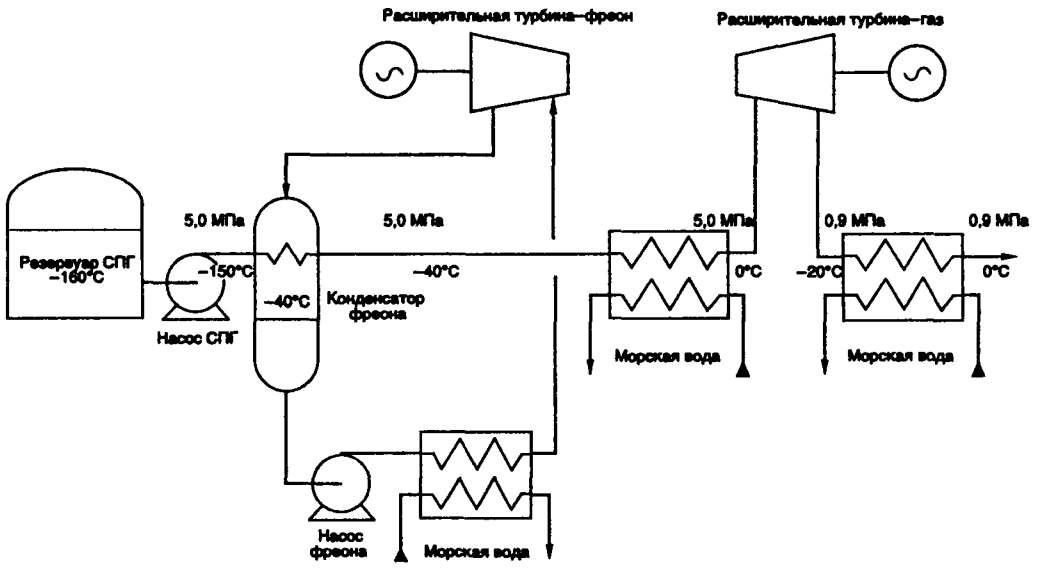
Сжижение и перевод в твердое состояние CO_2.



Цикл с прямым дросселированием



Цикл Рэнкина



Комбинированный цикл (Рэнкина и непосредственное расширение)

Производство электроэнергии.

4.7.1.2.2.3. Замораживание и низкотемпературное хранение пищевых продуктов

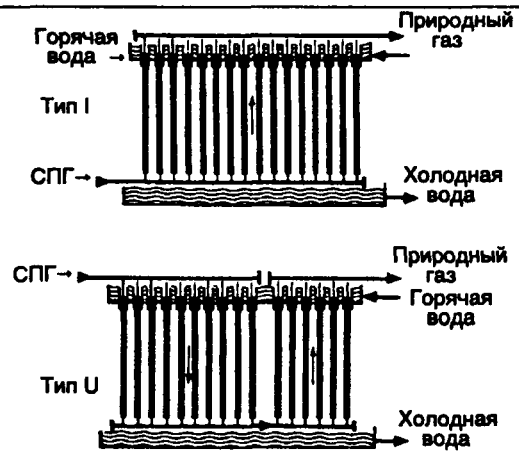
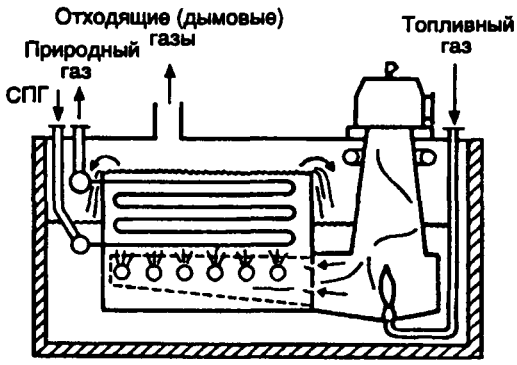
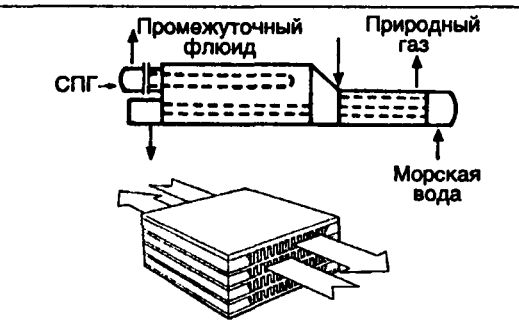
В эти случаях холод СПГ может заменить классический холодильный цикл одним контуром холодильного агента между теплообменником СПГ и теплообменником с окружающим воздухом, помещенным в холодильную камеру.

4.7.1.2.2.4. Производство электроэнергии

Холод СПГ может быть превращен в работу для привода электрогенератора. Были реализованы различные способы, представленные кратко ниже (см. рисунок с. 478), однако много других способов было предметом изучения, в частности, способы, в которых использовались бы горючие ископаемые (мазут или природный газ) для наилучшего применения холода СПГ по примеру классических схем теплоцентралей.

4.7.1.2.2.4.1. Циклы с непосредственным расширением

Если давление в газораспределительной сети невелико (около 1,0 МПа), можно дожать СПГ и испарить его до его расширения в турбине, которая приводила бы в действие генератор. Как и во внутреннем процессе перекачки СПГ под высоким давлением, этот цикл позволяет рекуперировать в форме электроэнергии разности энергий сжатия газа в жидком и газообразном состоянии между давлениями сжатия и подачи в газораспределительную сеть.

Тип регазификатора	Схема	Описание. Эксплуатационные характеристики
Регазификатор с водяным орошением		— СПГ распределяется коллектором по вертикальным трубкам, собранным в пакет, по высоте которого стекает оросительная вода. Эта вода сверху подается в сливные трубы и собирается внизу в общий коллектор. — Теплообмен вода – СПГ осуществляется по схеме противотока (сборка труб по типу 1) или по схеме противотока и прямотока (сборка труб в форме U), профиль труб оребренный для улучшения теплообмена. — Схема простая, поэтому эксплуатация и обслуживание относительно просты (наружный осмотр трубок доступен). — Стабильность механизма теплообмена. — Возможность больших объемов регазификации увеличением числа сборок труб. — В случае использования морской воды необходимо ее хлорировать (против коррозии насосов и водопроводов).
Регазификатор с погружной горелкой		— Трубный пучок, по которому циркулирует СПГ, погружен в металлическую или бетонную емкость, заполненную водой. Горелка погружного горения установлена на дне емкости и питается газом и сжатым воздухом. Поток газа из горелки барботирует в слое воды, нагревая ее (~30°C) и перемешивая, что обеспечивает хороший теплообмен между водой и СПГ и предупреждает образование льда на трубном пучке. — Регазификатор компактный, учитывая высокую эффективность теплообмена между продуктами сгорания, водой и СПГ. — Регулировка подачи смеси газ–воздух в горелку должна обеспечить небольшое содержание окислов азота в продуктах сгорания; — Часто требует нейтрализации воды подачей свежей ее порции, так как вода закисляется продуктами сгорания газа и становится коррозионноактивной.
Регазификатор с промежуточным флюидом		— Криогенные теплообменники с трубными или пластинчатыми пучками, позволяющими теплообмен между несколькими флюидами (СПГ/промежуточный теплоноситель/горячий источник). — Теплообменники хорошо адаптированные к процессам рекуперации холода СПГ. — Очень компактны и высокоэффективны.

Регазификаторы СПГ – описание и эксплуатация.

4.7.1.2.2.4.2. Циклы Рэнкина (Rankine)

Выработка электроэнергии производится в термодинамическом цикле, в котором СПГ является холодным источником, а морская вода - теплым источником. Используется подходящий хладагент, например, фреон.

Эффективность цикла будет максимальной, если теплообмен между цикловым флюидом (хладагентом) и СПГ будет происходить при температуре СПГ или, если кривая конденсации хладагента приближается наилучшим образом к кривой испарения СПГ. Поэтому фреон, конденсация которого происходит при постоянной температуре (–40°С), может быть заменен смесью углеводородов, состав которой может быть подобран таким образом, чтобы получилось наилучшее приближение кривых.

4.7.1.2.2.4.3. Комбинированные циклы

Всегда в условиях предположительно низкой эффективности использования СПГ при регазификации предусматривают выработку электроэнергии путем комбинирования циклов Рэнкина и непосредственного расширения, это позволяет использовать бóльшую часть СПГ.

4.7.2. Регазификаторы

В таблице на с. 479 представлены основные характеристики и описания различных типов регазификаторов, которые применяют на установках СПГ.

4.7.3. Передвижные установки регазификации

4.7.3.1. Общие сведения

Мобильные регазификаторы СПГ были спроектированы Газ де Франс для того, чтобы дать возможность газотранспортным компаниям снабжать потребителей газом во время ремонтных работ на трассе. Каждый регазификатор соединен с изолированным резервуаром под вакуумом, а вся установка смонтирована на автоприцепе.

Качество подаваемого газа корректируется подачей жидкого азота в резервуар, а его одоризация обеспечивается подачей одоранта в резервуар.

Газ де Франс имеет три мобильные установки регазификации, в двух из них резервуар имеет емкость 9,5 м³ СПГ и в одной – 9,9 м³. В случае необходимости эти установки могут быть подключены в автоцистерне с СПГ.

Используемые регазификаторы являются атмосферными: теплым источником является атмосферный воздух. Большая поверхность теплообмена создается оребренными трубками из алюминия и производительность регазификатора изменяется в зависимости от атмосферных условий.

4.7.3.2. Функционирование

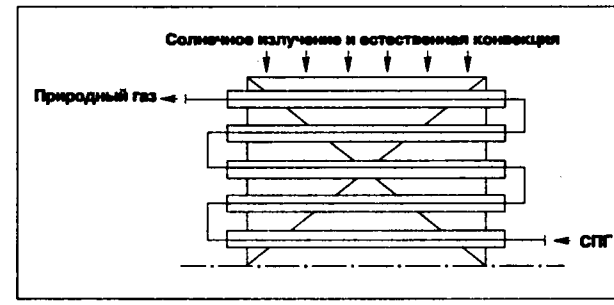
На нижеследующих схемах показано устройство и детали одной из установок регазификации передвижного типа.

Регазификаторы могут быть включены параллельно или последовательно (один в цикле подачи, второй – в цикле размораживания). Для последовательной работы при температуре окружающей среды 10°С, характеристики мобильных установок Газ де Франс следующие:

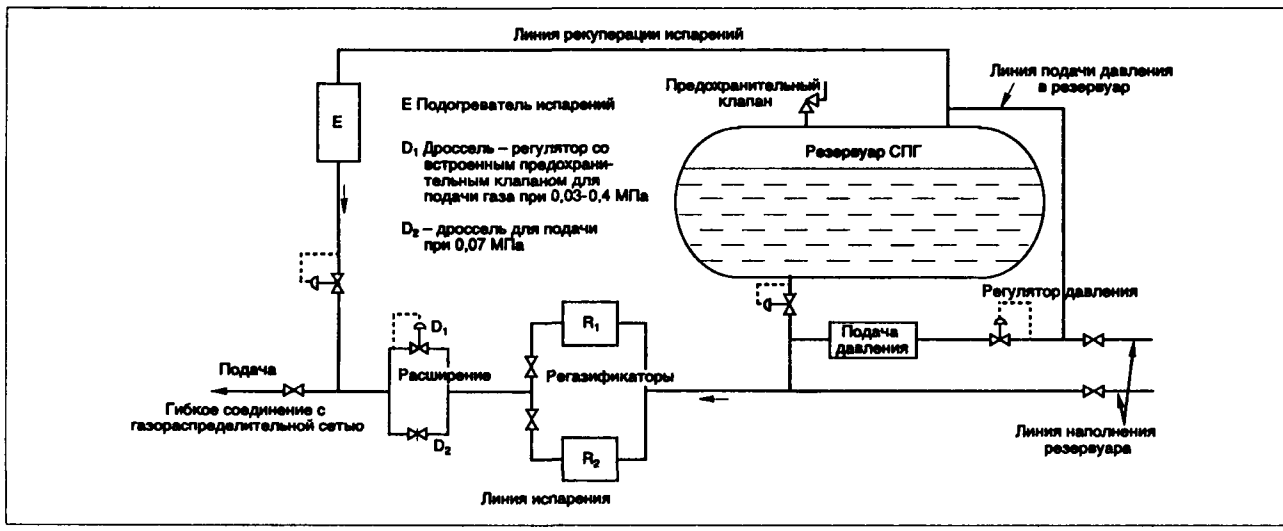
— установки 3,5 м³: 250 м³/ч СПГ;

— установки 9,9 м³/ч СПГ.

Последовательная работа необходима в случае, если температура подаваемого газа ниже 0°С и регазификаторы обледеневают. Но, если атмосферные условия позволяют, параллельное включение дает возможность получить производительность более высокую (соответственно более 300 м³/час и 1700 м³/ч.



Регазификатор атмосферного типа.



Передвижная установка регазификации.

4.8. РЕЗЕРВУАРЫ ХРАНЕНИЯ СПГ

4.8.1. Общие сведения

В этом параграфе рассматриваются резервуары СПГ емкостью более 500 м^3, в которых СПГ хранится в переохлажденном виде под давлением, немного большим атмосферного.

Для меньших емкостей хранения предпочтение отдается резервуарам под давлением (≤1,0 МПа) сигарообразной или сферической формы, технология которых схожа с технологией сооружения резервуаров СНГ (сжиженного нефтяного газа, фракции $C_3 + C_4$).

Форма резервуаров СПГ цилиндрическая со сферическими днищами, в настоящее время объем наибольшего резервуара достигает 150 000 м^3.

Основные эксплуатационные характеристики следующие:

— относительное максимальное давление (от 10 до 23 КПа в зависимости от конструкции);
— уровень суточных испарений, то есть процентное отношение между кубическими метрами СПГ, испарившимися за сутки и максимальным объемом СПГ, который может храниться (от 0,05 до 4% в зависимости от конструкции).

4.8.2. Типы резервуаров

Вне зависимости от конструкций резервуаров СПГ, описанных в § 4.8.3, многие типы резервуаров были сооружены в мировой практике. Они отличаются положением относительно уровня грунта, наличием или отсутствием противопожарного рва вокруг резервуаров, что и показано на нижеприведенном рисунке.

Противопожарный ров служит для удержания значительных утечек СПГ при повреждении резервуара: его наличие и конструкция зависят напрямую от конструкции самого резервуара.

4.8.3. Конструкции резервуаров

Различные конструкции резервуаров основаны на характеристиках трех следующих основных компонентов:

— внутренний корпус;
— внешний корпус;
— изолированное пространство между ними.

Помимо общих технических критериев, которым они должны удовлетворять, можно упомянуть главное:

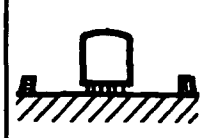
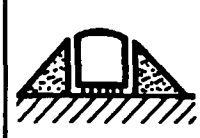
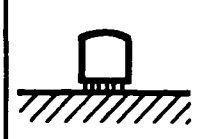
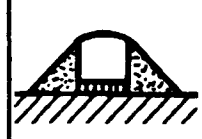
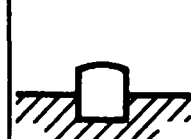
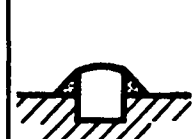
— полная непроницаемость для газа;
— восприятие нагрузок от СПГ (давление, температура, вес);
— удержание СПГ в экстремальных условиях, создающихся или самим СПГ или средой, окружающей резервуар;
— стабильность основания (креплений);
— сохранение целостности теплоизоляции, заполняющей пространство;
— возможность контроля целостности оболочек в процессе эксплуатации.

4.8.3.1. Классические резервуары

4.8.3.1.1. С металлическим внутренним корпусом

Он может быть:

— самонесущим с подвешенным куполом или крышей из алюминия или стали с 9% никеля;
— мембранного типа двух модификаций:
  · система Газ Транспорт из сплава инвар толщиной 0,7 мм;
  · система Текнигаз, N.K.K. или других типов, таких как I.H.I., M.H.I, K.H.I (японские системы), из гофрированных листов нержавеющей стали, в основном толщиной 1,2 мм.

Тип резервуара	Воздушный	Воздушно-засыпной	Полуподземный	Полуподземный засыпной	Подземный
С противопожарным рвом					
Без противопожарного рва					

Различные типы резервуаров.

4.8.3.1.2. Внешний корпус

Он может быть:

— металлическим из обычной стали, не криогенной;

— бетонным, в этом случае резервуар называется "двойной целостности", поскольку может удержать весь СПГ в случае разрыва внутреннего корпуса.

Внешний корпус может быть снабжен системой разогрева, если окружающего воздуха не достаточно для удаления теряемого холода СПГ (случай подземных резервуаров).

4.8.3.1.3. Теплоизолируемое кольцевое пространство

Это пространство может сообщаться или нет с газовой фазой внутренней емкости резервуара. В структурном плане это пространство складывается из трех частей, которые могут быть выполнены из различных слоев теплоизоляции:

— дно – чаще всего из пеностекла;

— обечайка (стенка) – древесные ячейки и перлит (система Газ Транспорт), поливинилхлорид и фанера (система Технигаз), перлит и стекловолокно (система Чикаго Бридж Индастри – Ч.Б.И.);

— крыша – наиболее часто стекловолокно.

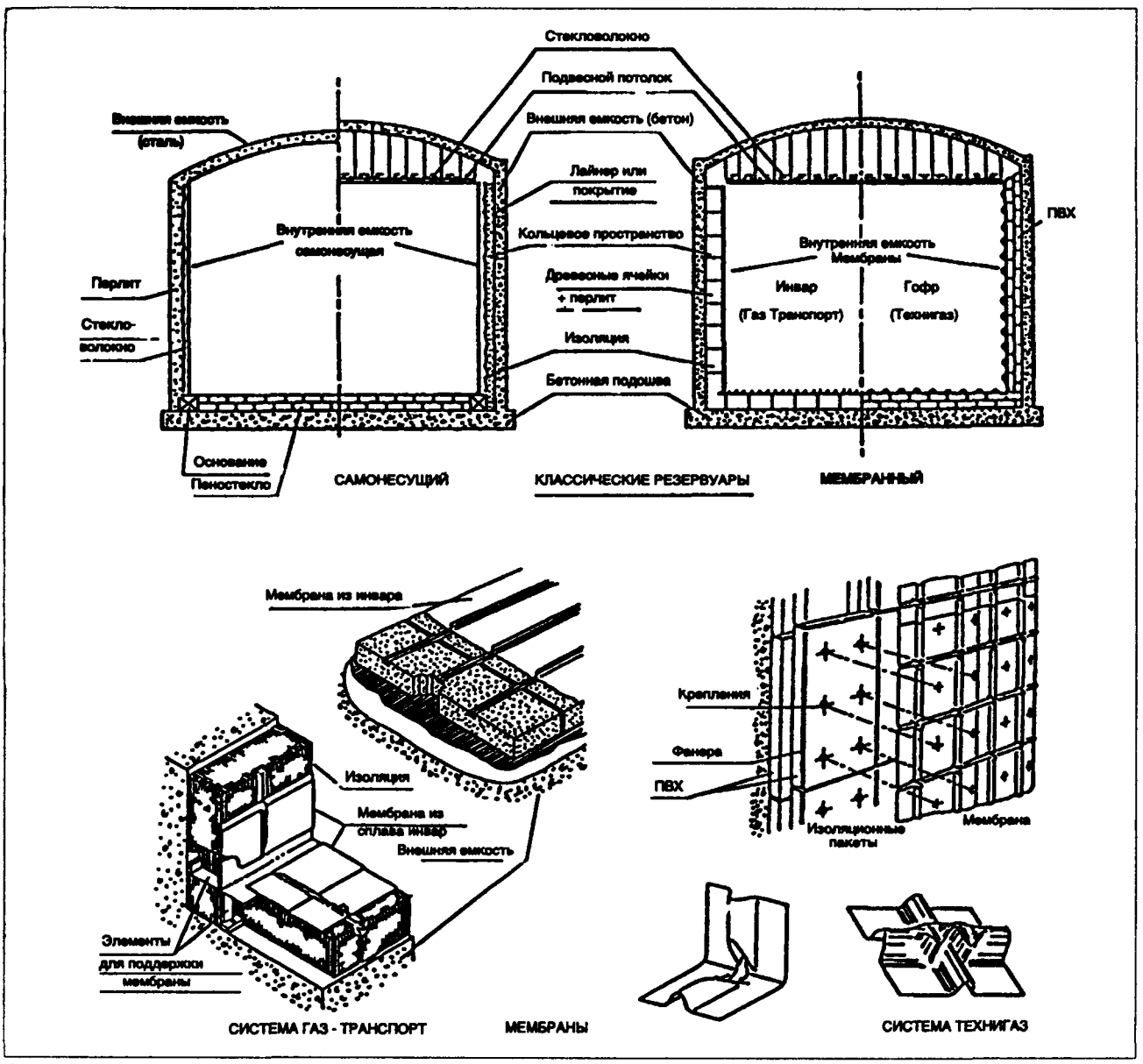
Суточные испарения в классических резервуарах изменяются в пределах 0,05 - 1,0%.

Примечание:

В системе Ч.Б.И. стекловолокно, нанесенное на внешнюю поверхность внутренней емкости, образует эластичную подушку (упругое покрывало), которое компенсирует радиальные перемещения емкости, вызванные температурными изменениями.

4.8.3.1.4. Схемы классических резервуаров

Смотри нижеприведенные схемы.



Схемы классических резервуаров.

4.8.3.2. Особые резервуары

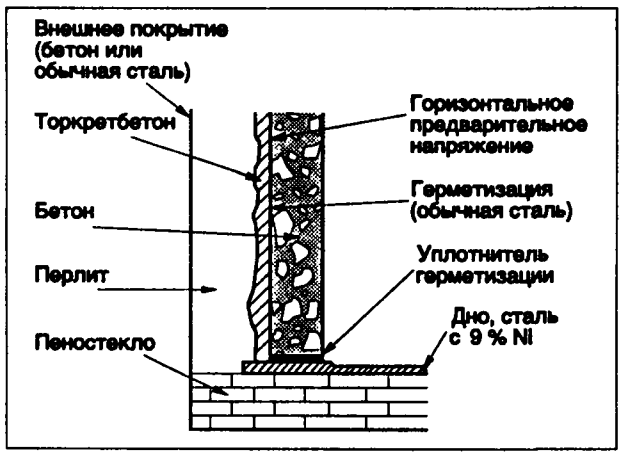
4.8.3.2.1. Резервуары с бетонной внутренней емкостью, система Прелоад (предварительно-напряженный бетон)

На нижеприведенном рисунке показан основной принцип этой оригинальной технологии, при которой СПГ и бетон находятся в прямом контакте, а внешняя емкость (корпус) может быть не криогенной или бетонной.

Примечание:

Внутренняя бетонная емкость дублирована рубашкой из обычной стали (лайнером), образующей паронепроницаемую оболочку и вся емкость предварительно напряжена.

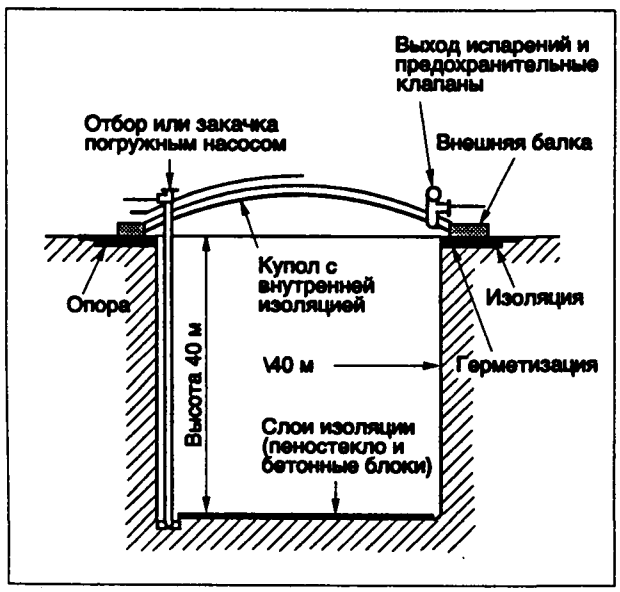
Суточные испарения составляют около 0,05%.



Система "Прелоад".

4.8.3.2.2. Подземные резервуары в замороженном грунте, система Конч

Эта конструкция была упомянута в § 4.3.2.1 и вновь представлена ниже на рисунке.



Система Конч.

Примечание:

Напомним недостатки, которые заставили отказаться от этой системы:

— суточные испарения составляли около 4%;
— подвижки грунта, вызванные промерзанием и продвижением фронта промерзания опасны для окружающих сооружений.

4.8.3.2.3. Экспериментальные подземные резервуары в замороженных емкостях; система Жеосток-Дистригаз

В 1982 г. в Бельгии около г. Антвер был испытан на жидком азоте криогенный подземный резервуар, вид которого показан на рисунке с. 484.

Резервуар имел емкость около 200 м^3 с суточными потерями на испарение около 0,5%. Была сделана оценка, что эта технология может быть использована для сооружения резервуаров большего объема.

4.8.3.3. Сравнение различных конструкций

В таблице на с. 484 представлены в сравнении основные замечания, которые могут быть сделаны на основе технических критериев, изложенных в начале этого параграфа.

4.8.4. Оборудование резервуаров

На рисунке с. 485 показана бóльшая часть оборудования, которое можно найти на одном из резервуаров СПГ и которое кратко описывается ниже.

4.8.4.1. Обвязка (трубопроводы)

4.8.4.1.1. Главные трубопроводы

4.8.4.1.1.1. Заполнение СПГ

Оно может быть реализовано:

— через днище или низ корпуса резервуара ("источником");
— через крышу резервуара ("дождеванием").

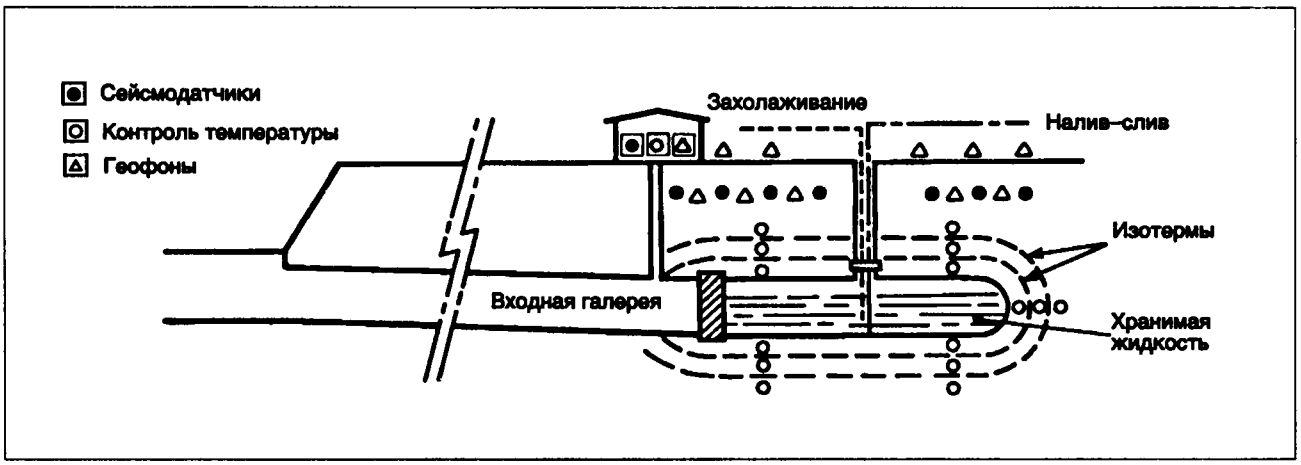
4.8.4.1.1.2. Слив СПГ

Слив может быть реализован:

— самотоком через днище или нижнюю часть корпуса;
— погружным насосом через крышу.

4.8.4.1.1.3. Удаление испарений

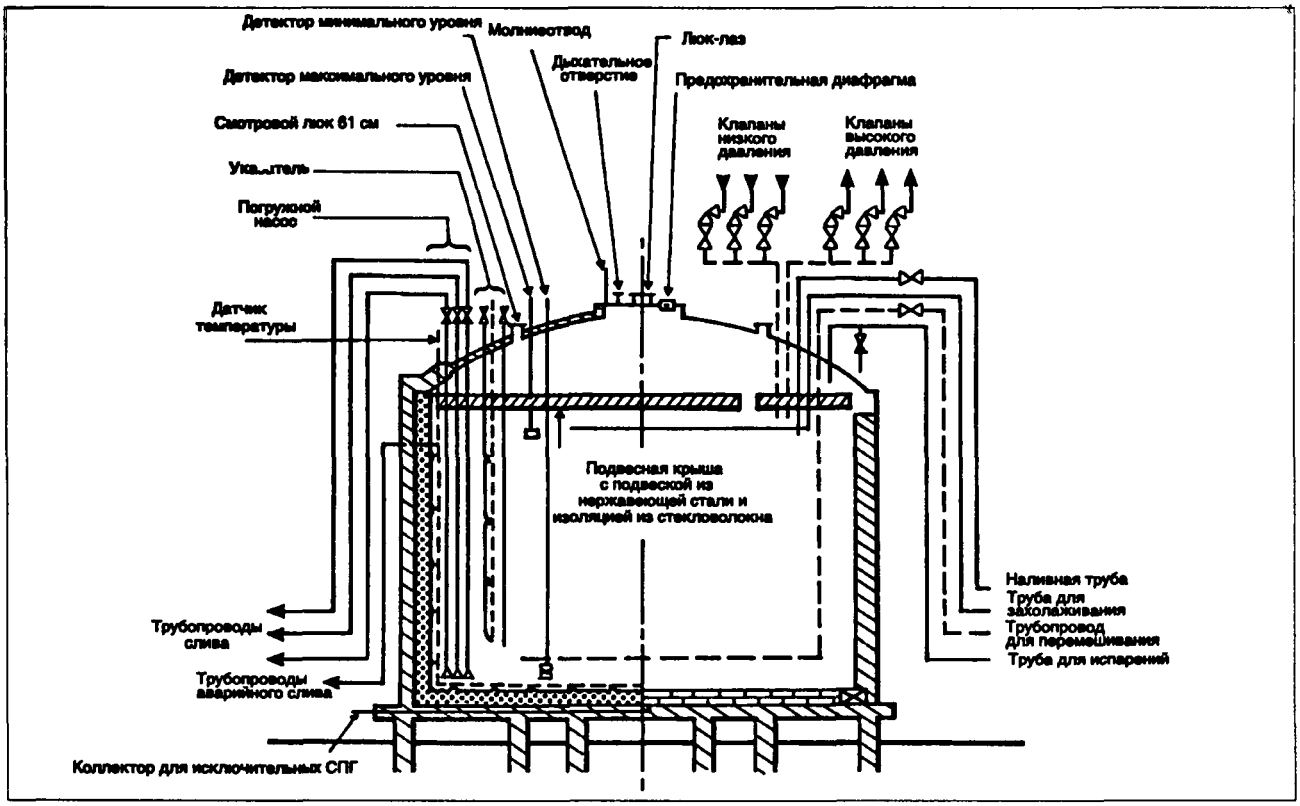
Соответствующая труба или трубы позволяют управлять испарениями из резервуара и направлять их в систему установки СПГ (см. § 4.9.3.1.1).



Экспериментальный резервуар (Жеосток–Дистригаз).

Технические критерии				Конструкции резервуаров				
				Классические резервуары		Резервуары особые		Резервуары экспериментальные
Обязательные	Желательные			Самонесущие	Мембранные	В холодном бетоне	В замороженном грунте	В замороженном грунте
•		Герметичность	Для СПГ	Обеспечено тонким днищем и спиральным корпусом с уменьшающей толщиной листов	Обеспечено мембраной	Обеспечено холодным бетоном корпуса и крыши из 9% никелевой стали днища бетонной внутренней емкости	Замороженная в грунте вода обеспечивает герметичность по отношению к СПГ и газу, что требует постоянного поддержания резервуара в замороженном состоянии	
	•		Для газа внутренней емкости	Контролируется, если кольцевое пространство изолировано от газовой фазы внутренней емкости куполом, непроницаемым для газа	Контролируется постоянно продувкой азотом кольцевого пространства	Обеспечено металлической рубашкой; непроницаемой для паров		
•			Для газа и влаги внешней емкости	Обеспечено или за счет металлической внутренней емкости или лайнера или за счет пластмассового покрытия внешней бетонной емкости	Обеспечено внешней бетонной емкостью и ее внутренним и внешним покрытием			
•		Сопротивление нагрузкам	Вызванным давлением: СПГ	Самонесущей крышей внутренней емкости	Внешней емкостью посредством изоляции, поддерживающей мембрану	Обеспечено вертикальным напряжением и арматурной сеткой между бетоном и металлической рубашкой внутренней емкости	Замороженным грунтом	Замороженным грунтом
			Газа	Внешней емкостью, если крыша подвешена			Замороженным грунтом и крышей	
•			Вызванным термическими напряжениями	Листами днища и корпуса внутренней емкости	Ребрами гофра мембраны		Окружающим грунтом	
					В системе Газ Транспорт листами корпуса, в которых для инвара эти напряжения невелики			
	•	Стойкость	К землетрясениям	Реализуемо в случае необходимости			Нереализуемо	
	•		К внешнему огню	Если резервуар наземный, нужен бетонный ров, если нет, он должен быть огорожен и зарыт в землю	Легко обеспечивается, ввиду того, что внешняя емкость из бетона	Легко обеспечивается, если внешняя емкость из бетона	Легко реализуемо, так как резервуар подземный	Реализуемо, так как конструкция подземная
	•		К внешнему удару					
	•		Внешней емкости к утечке СПГ	Обеспечено, если внешняя емкость из криогенного металла или бетона			Отсутствие вторичного барьера, следовательно двойной целостности	

Сравнение различных конструкций резервуаров для СПГ.



Оборудование одного из резервуаров СПГ.

4.8.4.1.2. Прочие трубопроводы

4.8.4.1.2.1. Захолаживание

Трубопровод, обычно выполненный в форме кольца, снабженного отверстиями, расположенного под крышей резервуара.

4.8.4.1.2.2. Контроль кольцевого изоляционного пространства

Производится двумя способами:

— дренажная труба, проложенная в нижней части кольцевого пространства, позволяет обнаружить утечки жидкого продукта;
— трубопровод продувки азотом кольцевого пространства (если последнее не сообщается с газовой фазой резервуара), позволяющий анализировать состав газа на выходе и обнаружить возможное увеличение концентрации природного газа.

4.8.4.1.2.3. Перемешивание

Различные системы трубопроводов позволяют производить внутри резервуара СПГ перемешивание хранимого продукта во избежание расслоения его в результате многодневного хранения (см. § 4.10.2).

4.8.4.1.2.4. Переполнение (возможное)

В случае несрабатывания сигнализаторов максимального уровня специальный трубопровод служит для слива СПГ для резервуара в противопожарный ров.

4.8.4.2. Дополнительное оборудование и приборы

На резервуаре находятся датчики (см. § 4.2.2):

— давления;
— температуры;
— уровня и сигнализаторы уровня;
— плотности.

Резервуары оборудованы также:

— предохранительными клапанами высокого давления (см. § 4.9.4.3);
— предохранительными клапанами низкого давления;
— взрывными диафрагмами;
— вентиляционными отверстиями;
— люками-лазами (возможно);
— молниеотводами и др.

4.8.5. Пусковые работы и эксплуатация

Перед пуском в эксплуатацию резервуара СПГ или после ремонтных работ, в ходе которых возникла необходимость запустить воздух во внутреннюю емкость, необходимо выполнить ряд особых операций, таких как:

— гидравлические или пневматические испытания (под давлением и вакуумом), которые производятся различными способами в соответствии с конструкцией резервуара;
— осушка и создание инертной атмосферы продувкой азотом до получения:

· содержания кислорода от 5 до 8%, позволяющего избежать взрывоопасных смесей газа с воздухом;

и, что более существенно, достижение температуры точки росы достаточно низкой для того, чтобы избежать конденсации влаги и обмерзание во время захолаживания;

— постепенное захолаживание с таким дебитом СПГ, чтобы соблюдался определенный градиент снижения температуры во времени во избежание термического шока конструкций.

Независимо от типа установки СПГ, резервуары хранения СПГ должны выполнять три функции, которые вызывают определенные проблемы эксплуатации:

— *налив*: контроль давления газовой атмосферы резервуара, уровня налитого СПГ, наблюдение за сигнализаторами максимального уровня;
— *хранение*: контроль давления газа, уровня суточных испарений, изменения состава СПГ;
— *слив*: контроль давления газа; уровня СПГ и наблюдение за сигнализаторами минимального уровня.

Примечание:

См. § 4.2.2.9.: Внутренние наблюдения при эксплуатации.

4.9. ПЕРЕКАЧКА

4.9.1. Перекачка СПГ

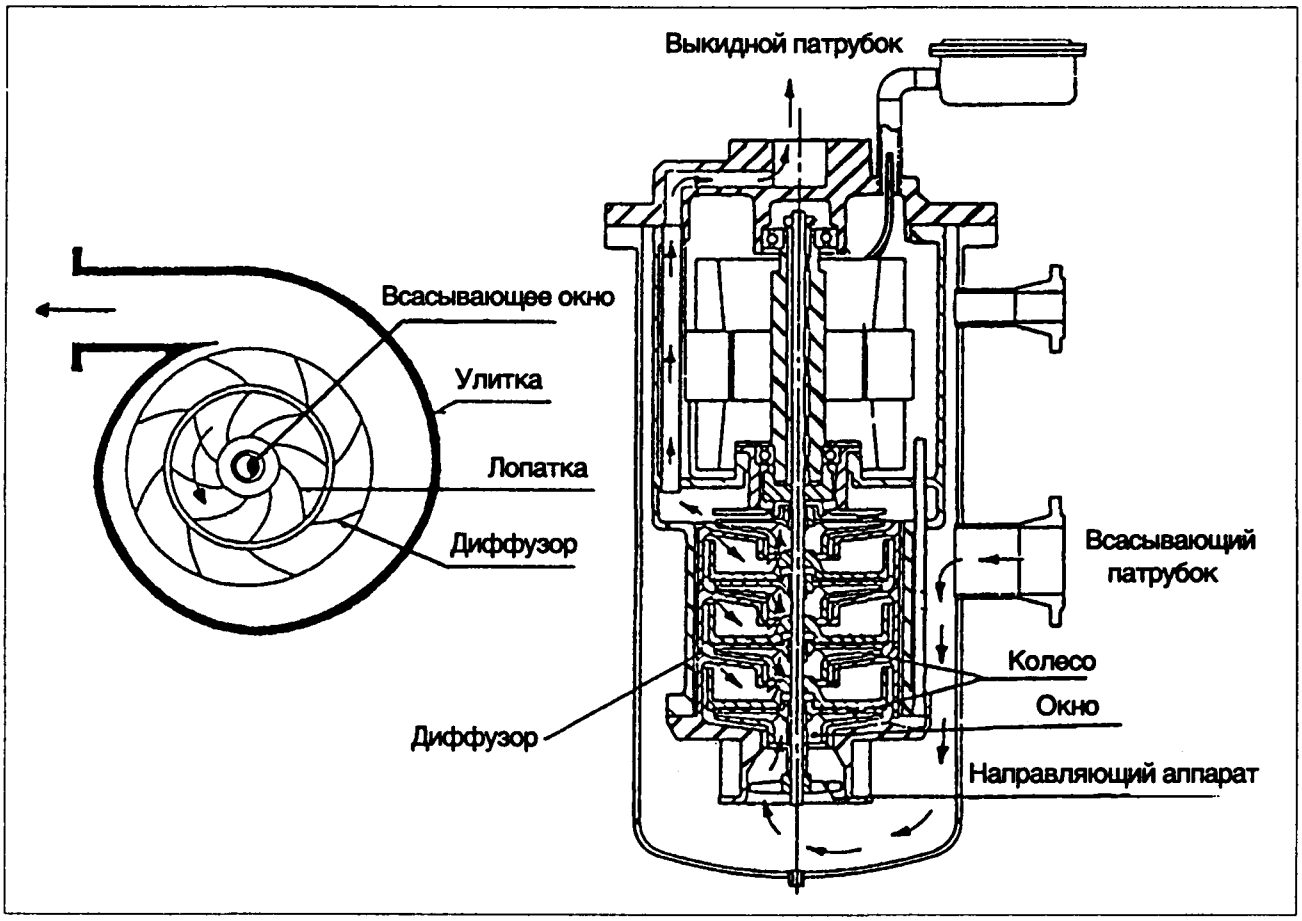
В этом параграфе рассматриваются различные типы центробежных насосов, используемых для перекачки СПГ. Отметим, тем не менее, что в некоторых особых условиях перекачка СПГ может производиться только под действием силы тяжести или под давлением (слив из автоцистерн, опорожнение участков трубопроводов).

4.9.1.1. Краткие теоретические сведения о центробежных насосах

4.9.1.1.1. Принцип работы

Основными частями этих насосов являются:

— рабочее колесо, снабженное лопатками (импульсаторами), обеспечивающими скорость;



Основные элементы центробежных насосов.

— улитка или диффузор, которая преобразует скорость в давление.

Ускорения и преобразования в давление происходят от ступени к ступени рабочего колеса, давление постепенно растет.

В некоторых случаях жидкость может направляться ко входному окну первого колеса с помощью направляющего аппарата.

4.9.1.1.2. Абсолютная высота всасывания

Чистая абсолютная высота всасывания определяется как амплитуда линии напора на уровне всасывающего фланца насоса, выраженная в метрах, за вычетом давления насыщенных паров при температуре жидкости, выраженного в метрах. Обычно эта высота называется N.P.S.H. (Net Positive suction head – чистая положительная высота всасывания – англ. термин).

Различают:

— N.P.S.H.A. (располагаются): чистая абсолютная высота, имеющаяся на уровне всасывающего фланца насоса. Это характеристика входной сети;

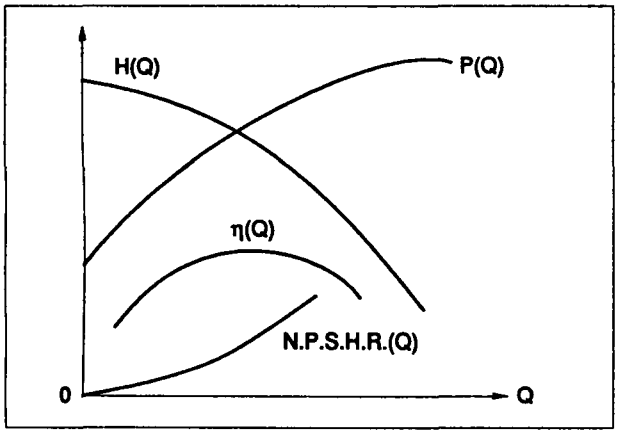
— N.P.S.H.R. (потребная): чистая абсолютная высота, требуемая насосом для ликвидации любого риска кавитации. Это разность между напором на уровне всасывающего фланца насоса и пьезометрической высотой, наиболее низкой внутри насоса. Это характеристика насоса.

4.9.1.1.3. Кавитация

Кавитация означает образование газовой фазы в потоке жидкости в момент, когда пьезометрическая высота становится ниже давления насыщенных паров.

Следствием кавитации является изменение характеристики насоса, неустойчивая работа и эрозия в основном входных окон и лопаток. Для того, чтобы кавитации не возникало, необходимо, чтобы NPSH была бы выше NPSHR, тогда пьезометрическая высота в любой точке насоса будет выше давления насыщенных паров.

4.9.1.1.4. Характеристики насоса (зависимость напора от подачи)

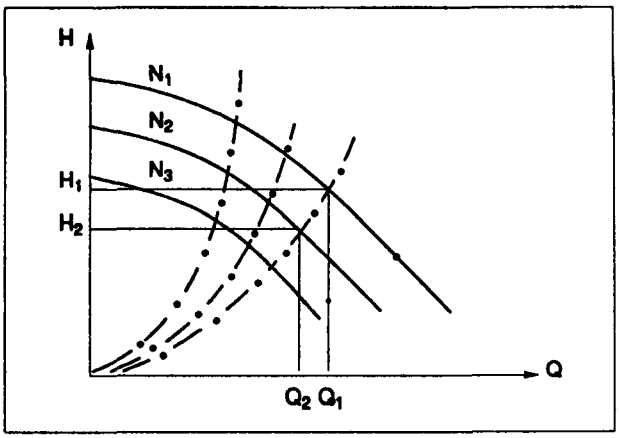


Характеристики центробежного насоса.
Высота – H = f(Q)
Мощность – P = f(Q)
КПД – η = f(Q)
NPSHR – NPSHR = f(Q)

4.9.1.1.5. Изменение скорости

Для двух скоростей вращений N_1 и N_2 центробежного насоса имеем следующие характеристические соотношения:

$$Q_2 = Q_1 \frac{N_2}{N_1} \qquad H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \qquad P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$



4.9.1.1.6. Практическая расчетная формула для мощности насоса

$$P = \frac{hdQ}{K\eta}$$

где:

K – размерный коэффициент для перевода в систему СИ, K = 367;

P – мощность на валу насоса, KW;

h – напор, м;

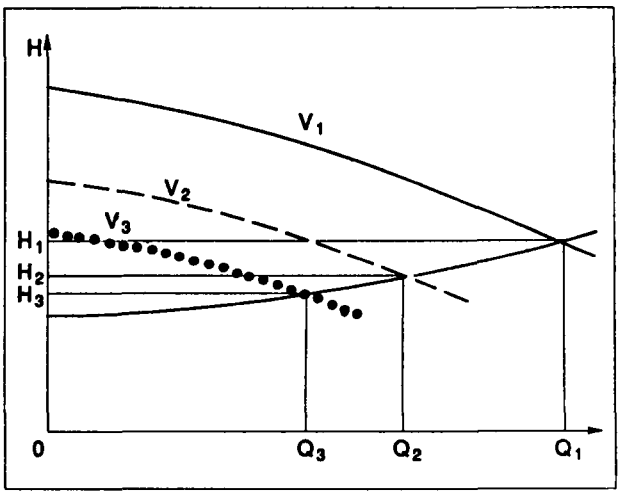
d – относительная плотность жидкости;

Q – подача насоса, м³/час;

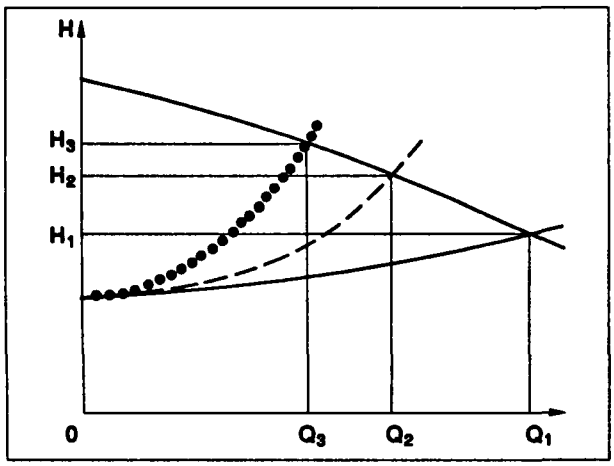
η – КПД насоса.

4.9.1.1.7. Возможности регулирования производительности (подачи)

— Дросселированием на линии нагнетания насоса с возможностью рециркуляции в области низкой производительности (изменение характеристики сети):



— Регулировкой скорости вращения мотора привода (изменение характеристики насоса):



4.9.1.1.8. Возможности различной группировки насосов

Насосы могут быть включены:

— последовательно: производительность не меняется, напор растет;
— параллельно: напор не меняется, растет производительность .

Предпочтительно иметь одинаковые насосы или с похожими характеристиками в случае включения насосов параллельно.

4.9.1.2. Типы насосов

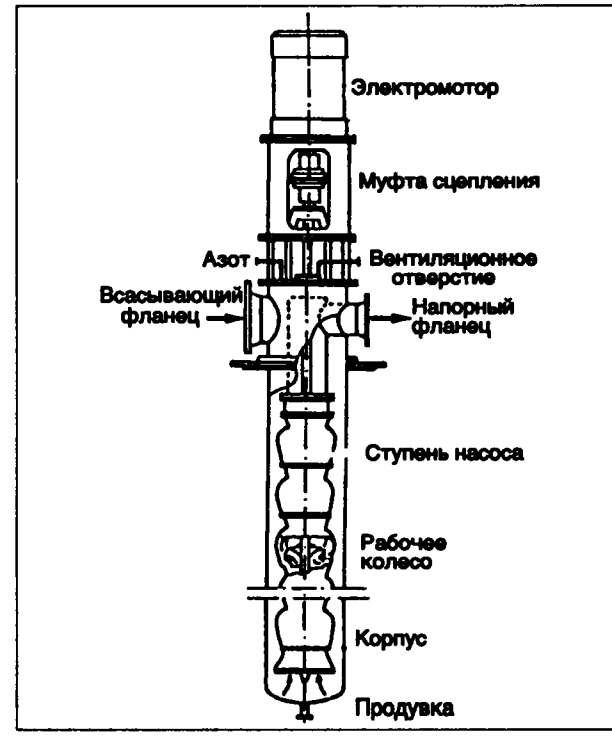
Ниже даны для каждоготипа насоса, используемого для перекачки СПГ, его основные характеристики.

4.9.1.2.1. Горизонтальные насосы

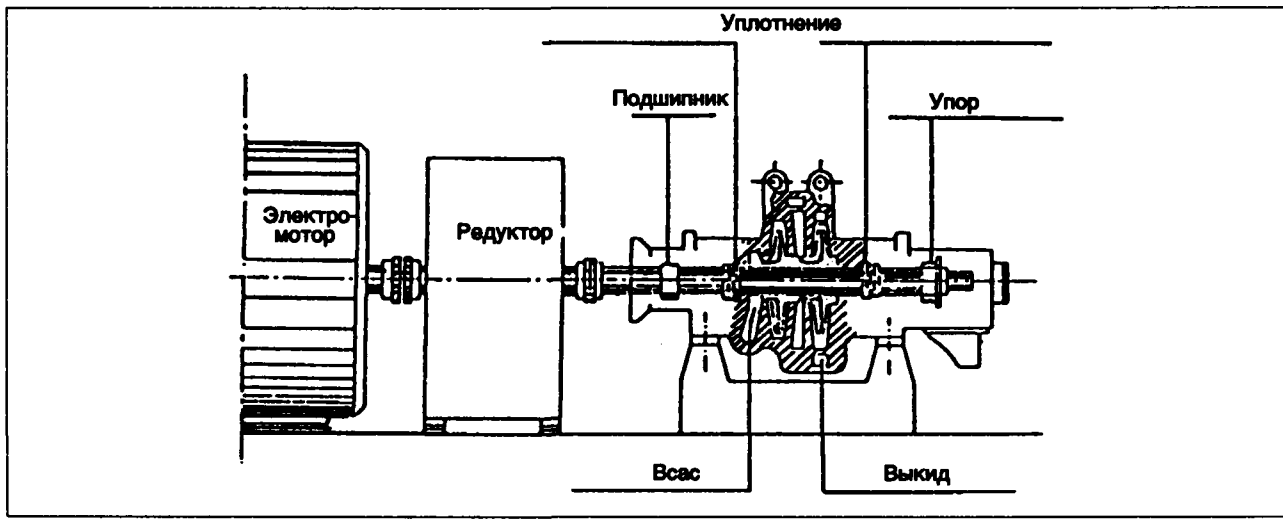
— Компактные, занимают небольшое место по отношению к приводному мотору, легкие в демонтаже, повышенное число оборотов (от 6 000 до 7 000 об/мин);
— NPSHR достаточно большой (напор);
— сложные герметизация и смазка;
— применение:
  · налив автоцистерн СПГ,
  · перекачка перед регазификацией с питанием от первичных насосов.

4.9.1.2.2. Вертикальные, погружные в загрузочную емкость, с внешним приводом

— Большие вертикальные размеры;
— NPSHR (напор) небольшой или нулевой на всасывающем фланце;
— применение:
  · первичные насосы резервуаров, имеющих выходные трубопроводы в нижней части,
  · насосы высокого давления.



Вертикальный насос.



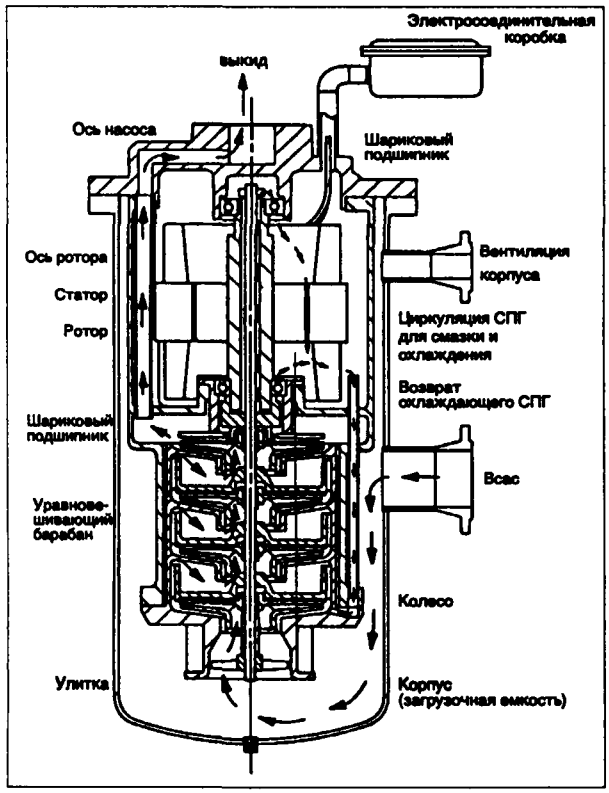
Горизонтальный насос.

4.9.1.2.3. Групповые мотонасосы вертикальные, погружные в емкость СПГ

СПГ является хорошим диэлектриком и может быть использован как смазка "хладагент" и поэтому можно погрузить насос с мотором в емкость ("бочку").

Насосы имеют следующие характеристики:

— NPSHR слабый или нулевой на фланце всаса;
— возможность уравновешивания перемещений с помощью уравновешивающего барабана (гидростатическая площадка);
— нет проблем герметичности и смазки;
— медленное захолаживание;
— возможность использования в режимах низкого и высокого давления для самой различной производительности.



Насос групповой вертикальный с загрузочной емкостью.

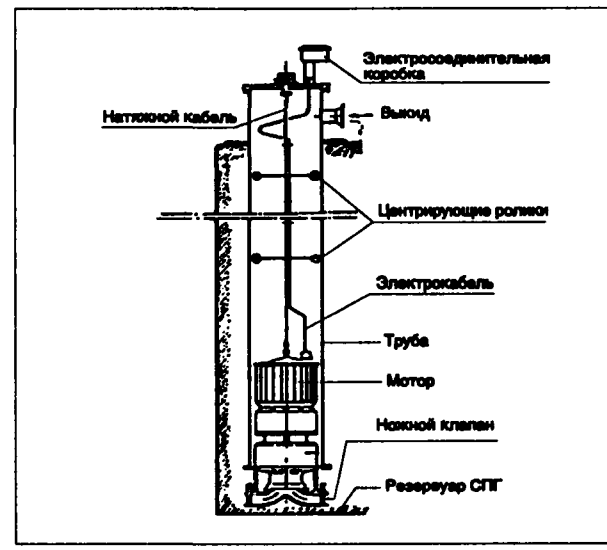
4.9.1.2.4. Погружные насосы для резервуаров СПГ

Во всех резервуарах, не имеющих нижнего слива, используют трубные погружные насосы.

По конструкции это групповые погружные вертикальные насосы (§ 4.9.1.2.3.).

Они могут быть подняты или спущены в процессе эксплуатации резервуара.

Они фиксируются в рабочем положении в трубе с помощью ножного адаптера, снабженного или нет ножным клапаном.



Погружные насосы СПГ.

В общем случае эти насосы имеют колесо и улитку подачи при большой производительности (более 450 м³/час) и напор от 150 до 200 м.

4.9.1.2.5. Сводные данные об особенностях насосов СПГ

Групповые погружные мотонасосы (§ 4.9.1.2.3.) и погружные насосы (§ 4.9.1.2.4.) являются специальными для СПГ по своей конструкции и использованию.

В более общем случае все типы насосов требуют специальных конструктивных решений, связанных с термодинамикой СПГ:

— который, являясь жидкостью, близкой по состоянию к точке кипения, может легко создать условия кавитации;
— и который, имея низкую температуру, обязывает:
  · применять криогенные материалы (алюминий, аустенитные стали),
  · решать проблему дифференциального расширения, особенно для вращающихся деталей.

4.9.2. Сливные и наливные стояки

4.9.2.1. Общие сведения о сливных и наливных системах

4.9.2.1.1. Назначение и состав системы налива (слива)

Система слива (налива) с фиксированной точки (причал, платформа, пирс) должна обеспечить:

— сливным (наливным) стоякам, соединенным с судном:
  · следовать волнению воды,

- следовать движениям судна, связанным с его подъемом или погружением,
- следовать движениям судна параллельно или перпендикулярно по отношению к причалу;

— персоналу на суше посредством оборудования безопасности:
- наблюдать за условиями слива (налива),
- иметь возможность быстрого реагирования в аварийной ситуации.

Такая система включает:

— сливные (наливные) стояки, сконструированные в зависимости:
- от тоннажа судна и состояния моря для расчета длины стояка, которая может быть от 10 до 35 м,
- от расхода перекачиваемого продукта для определения диаметра стояка (который может изменяться от 152 до 610 мм),
- от природы и температуры продукта для определения конструкционных материалов;

— пульт управления стояком с помощью электрогидравлической системы.

4.9.2.1.2. Описание стояка

Сливной (наливной) стояк состоит из следующих элементов (см. рис. 1 стр. 491):

— *несущая конструкция* сварного типа, выполняющая две главные функции:
- поддержка: она передает на причал все механические усилия от стояка,
- соединение: она позволяет переток жидкости между наземными трубопроводами и подвижными трубопроводами стояка;

— *поворотные трубы*, состоящие из внутренней и внешней труб, соединенных между собой и со стойкой поворотными соединениями;

— *уравновешивающее устройство*, состоящее из контргрузов и блоков и выполненное таким образом, что позволяет стояку находиться в уравновешенном или неуравновешенном состоянии в зависимости от определяющих критериев или от операционных усилий (см. § 4.9.2.1.4.);

— *устройство из шести поворотных соединений*, расположенных таким образом, чтобы обеспечить необходимые степени свободы для того, чтобы конечный фланец соединенного стояка мог следовать перемещениям судна внутри зоны работ.

Поворотное соединение выполняет три роли:
- обеспечивает степень свободы в заданной плоскости,
- передает механические усилия,
- обеспечивает герметичность под давлением;

— *гидравлические домкраты* для стояков с гидравлическим управлением;

— *присоединительная система* между стояком и траверсой судна:
- *фланец к фланцу на болтах*,
- *ручной соединитель быстрого действия* – устройство с поворотными сухарями, которое позволяет обходиться без болтов и гаек, не выравнивать плоскости фланцев, что облегчает и убыстряет работу,
- *гидравлический соединитель*: отличающийся от предыдущего гидравлическим управлением сухарями, более быстрым и надежным по сравнению с ручным,
- *устройство быстроразъемное* в аварийном случае, содержащее:

— PERC (Power Emergency Release Coupling) – устройство, состоящее из сухарей сжатия фланцев, блокированное нарезным стержнем (в аварийном случае гидроцилиндр освобождает нарезной стержень, срезая шплинт),

— две задвижки со сферическим золотником (запорным элементом), которые помещены по обе стороны PERC, управляемые одним гидроцилиндром, соединение с обеими осуществляется системой тяг, которые разъединяются в случае отключения PERC;

— *система опорожнения перед рассоединением*, которая может быть выполнена различными способами (закачка азота, сброс продукта на судно);

— *определенное количество вспомогательных устройств*, чаще всего:
- съемные колена, позволяющие смену герметизирующих прокладок поворотных соединений, уменьшая тем самым продолжительность простоя стояка,
- равнопотенциальное соединение, позволяющее избежать искрообразования в процессе соединения, возникающего из-за блуждающих токов, статического электричества или катодной защиты.

4.9.2.1.3. Описание основного электрического и гидравлического оборудования

— *гидроцентрали*
(электромотор, шестеренчатый насос, ручной аварийный насос), электрическое распределительное устройство для ручного аварийного управления движением стояка, ограничитель давления, редуктор давления с манометром;

— *электропульт*
команды выбора и управления стояками, команды гидравлические и логические (§ 4.9.2.1.4.);

— *дистанционное управление с переносного пульта* соответствует командам, вырабатываемым стационарным электропультом;

— *трубопроводы гидравлической обвязки*;

— *кабели электропитания на земле и стояке*.

4.9.2.1.4. Важнейшие особенности конструкции установки слива (налива)

4.9.2.1.4.1. Уравновешивание стояка

Можно рассмотреть различные системы уравновешивания с контргрузами в зависимости от принятого принципа действия, в особенности для системы подсоединения, и способа использования рассматриваемой системы:

— вакуумное уравновешивание, позволяющее легкость маневра (управления стояком) при выполнении штатных операций подключения–отсоединения;

— уравновешивание в аварийных условиях, позволяющее стояку вернуться в аварийной обстановке в нормальное нерабочее состояние даже

в случае отсутствия внешнего источника энергии (преимущество отдается условиям рассоединения в аварийной обстановке);

— комбинированное уравновешивание, состоящее в вакуумном уравновешивании во время нормальных (штатных) маневров и в логическом электрогидравлическом уравновешивании, которое сдвигает контргрузы соответствующим образом, когда судно связано со стояком и таким образом обеспечивает уравновешивание в аварийной ситуации во время работы стояка на слив или налив.

4.9.2.1.4.2. Система контроля движений стояка

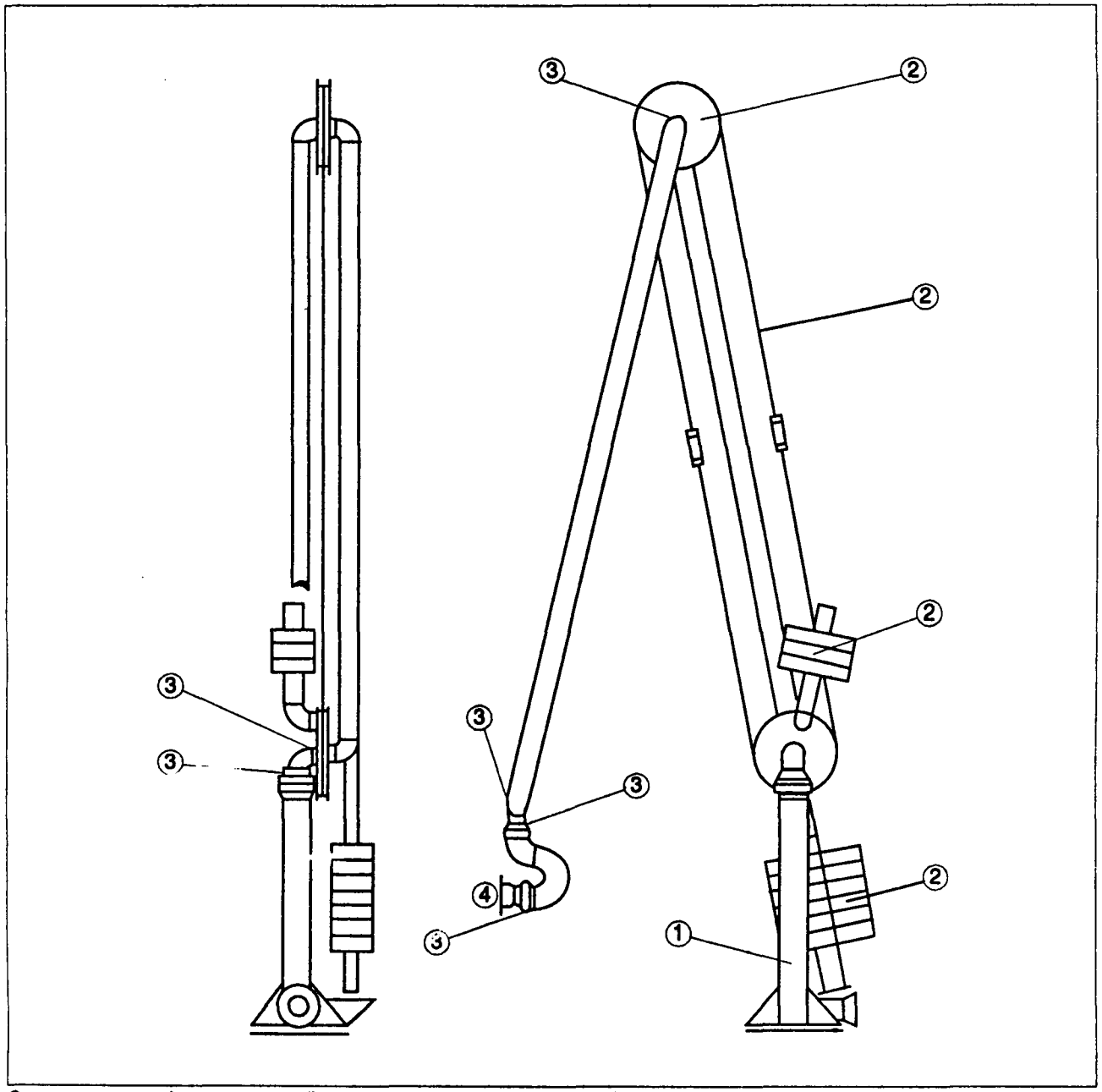
Постоянное наблюдение за рабочей зоной стояка, необходимость срочного аварийного отключения от судна заставляют применять систему обнаружения и сигнализации (датчики касания в трех измерениях). Например, для стояка, имеющего систему подсоединения, состоящую из двух задвижек PERC, используют два порога сигнализации:

— 1-й порог для команды остановки перекачивающих продукт насосов, например СПГ и закрытие задвижек на конце стояка;

— 2-й порог для команды PERC и отсоединения стояка.

4.9.2.2. Устройства и стояки слива (налива) СПГ

Устройства и стояки слива (налива) СПГ принципиально не отличаются по составу и принципу дей-



Описание стояка: 1 – несущая стойка; 2 – уравновешивающее устройство; 3 – поворотные соединения; 4 – соединительный фланец.

ствия от вышеописанных классических устройств (§ 4.9.2.1.)

Основные отличительные особенности вызваны низкой температурой СПГ и необходимостью избежать любых утечек СПГ в портовых сооружениях.

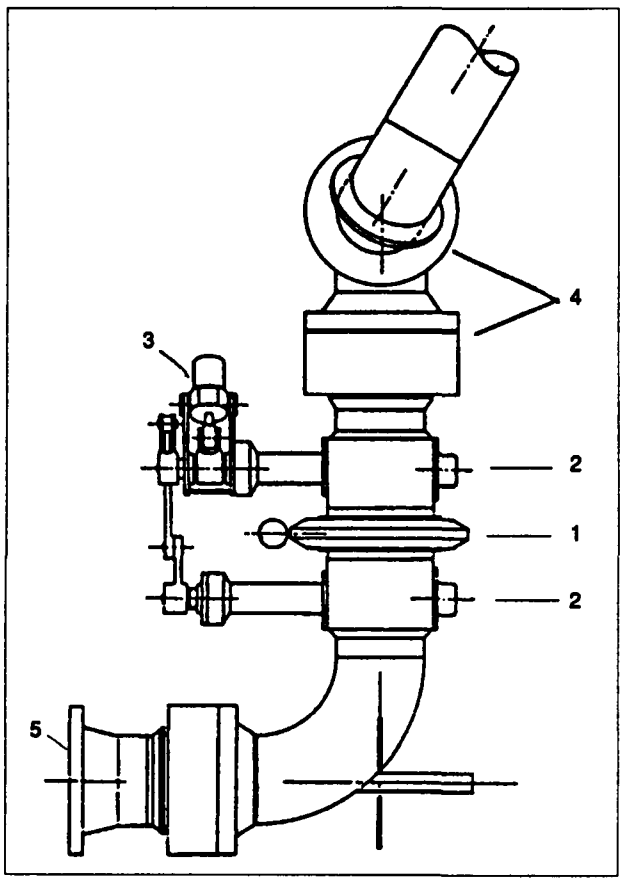
Эти особенности заключаются в следующем.

4.9.2.2.1. Используемые материалы

— Аустенитные нержавеющие стали Z2CN18 - 10 для труб, поверхностей качения поворотных соединений;
— нержавеющая сталь Z2WKД18 или мартенситная сталь для шариков (необходимость соответствия относительной твердости шариков и поверхностей качения);
— полимерная смола Кел-F для уплотнений, обеспечивающая герметичность внутри поворотных соединений.

4.9.2.2.2. Криогенные поворотные соединения

Помимо особенностей вышеперечисленных материалов, поворотные соединения во время их монтажа подвергаются обработке политетрафторэтиленом (PTFE): это обеспечивает смазку в рабочих условиях, которую было бы трудно обеспечить другими средствами, учитывая низкую температуру СПГ.



Устройство быстрого отсоединения: 1 – PERC; 2 – задвижка со сферическим золотником; 3 – гидроцилиндр управления задвижками; 4 – поворотное соединение; 5 – соединительный фланец.

Кроме того, для того чтобы предотвратить возможность доступа влаги к поверхностям качения (и, следовательно, обмораживания) во время захолаживания, осуществляют постоянную продувку азотом под небольшим давлением (сушка).

4.9.2.2.3. Термические напряжения

При разработке конструкции стояка для слива (налива) СПГ необходимы исследования термических напряжений, возникающих в переходный период захолаживания из-за перекачки различных флюидов (пар, двухфазная жидкость), имеющих различные коэффициенты теплоотдачи.

4.9.2.2.4. Механические напряжения

При конструировании стояка учитывают в механическом плане классические параметры, такие, как вес материалов, вес продукта, воздействие ветра и т.д.

До настоящего времени все стояки СПГ, которые были смонтированы, относятся к типу самонесущих, то есть трубопроводы, несущие СПГ, испытывают одновременно термические напряжения, вызванные СПГ, и обычные механические нагрузки.

Особый тип стояка для низких температур был разработан в последнее время с целью получения наименьшей себестоимости и наилучшего сопротивления термическим напряжениям; основание из углеродистой стали поддерживает посредством особого сцепного устройства криогенные трубопроводы, что исключает использование специальных криогенных сталей для всей конструкции. Такие стояки, вероятно, будут применяться на новых установках СПГ.

4.9.3. Трубопроводы обвязки

4.9.3.1. Описание обвязки установки СПГ

4.9.3.1.1. Основные трубопроводы (сети)

— Сеть превращения СПГ–природный газ (основная сеть);
— сеть испарений:
  · эвакуация на факел установки,
  · использование в режиме газового поршня (между судном и резервуарами хранения),
  · рекуперация специальными установками (см. схему установки § 4.1.2).

4.9.3.1.2. Вспомогательные трубопроводы СПГ

— Продувочная сеть (продувочный коллектор из основной сети и из различных устройств к продувочным резервуарам);
— сеть захолаживания (основное оборудование);
— сеть холодильная (основной сети, например).

4.9.3.1.3. Прочие вспомогательные трубопроводы (сети)

— Газопроводы природного газа для обычного его применения (топливный газ, газ для кухни, сервисный газ установок, газ для питания резервуаров хранения в случае снижения давления в них);
— азотопроводы для обычного использования азота как сервисного газа, для лабораторий и, в особенности, для:
  · питания цепей безопасности (контроль герметичности внутренней емкости резервуаров хранения, охлаждение выходного конца факела установки, создание давления в электрических шкафах и т.д.),
  · осушки некоторых видов оборудования (поворотные кулаки стояка, шахты насосов),
  · герметизации уплотнений криогенных компрессоров и т.д.;
— трубопроводы питания судна:
  · жидкий азот;
  · горючее (бункерный уголь, дизтопливо),
  · питьевая вода;
— флюиды процесса сжижения (случай заводов и установок сглаживания пиковых нагрузок).

4.9.3.2. Особые технические элементы трубопроводов СПГ

4.9.3.2.1. Материалы

— Z2CN18 - 10 (304 L) в основном (см. гл. 4.3).

4.9.3.2.2. Испытания

— испытательное давление: 150 - 200% от среднего рабочего давления (PMS);
— испытания воздухом для низких давлений (0,7 МПа);
— гидравлические испытания метанолом предпочтительнее, чем водой, особенно для трубопроводов с арматурой, имеющих пониженные участки без дренажа и т.д., но только в области средних давлений (во избежание выброса метанола по условиям техники безопасности),
— необходимость глубокой осушки (см. § 4.4.1.3).

4.9.3.2.3. Расчеты толщины стенки, предельной длины, сопротивления изгибу

4.9.3.2.3.1. Расчет толщины

В нижеследующей таблице показаны факторы напряжений (колонка 1), принцип расчета, предписанный правилами конструирования (колонка 2), формулы расчета, взятые из двух особых правил (ASME B31.5 и SNCT - Codap) – колонки 3 и 4.

Принимается наибольшая толщина, получаемая из расчета для двух давлений: максимального рабочего PMS (величина e) и испытательного (величина e').

4.9.3.2.3.2. Расчет предельной длины и сопротивления изгибу

Факторами напряжений являются:

— обычные:
  · внутреннее давление,
  · вес трубы в воде (или метаноле) при испытаниях,
  · факторы окружающей среды (ветер, снег, землетрясения и т.п.);
— особые для СПГ:
  · вес трубы в СПГ (в процессе эксплуатации),
  · вес теплоизоляции,
  · усадка стали в холоде.

Максимально допустимое тангенциальное напряжение установлено правилами ASME B31.5:

$$S = \min(R/4;\ 0{,}625\ Re).$$

Для определенной трассы трубопровода производятся расчеты по многочисленным вариантам для проверки того, что допустимые значения напряжений не будут превышены (см. табл. стр. 494).

Трасса, опоры, компенсаторы соответствующим образом подбираются для проверки этих напряжений.

1	2	3	4
Фактор напряжения	Правила конструирования	Пример 1: A.S.M.E. B 31.5	Пример 2: S. N. C.T.-Codap
Максимальное рабочее давление: P_{ms}	$S = f(R_e, R)$ $e = F(P_{ms}, D, C_j, S)$	$S = \min(R/4;\ 0{,}625\ R_e)$ $C_j = 0{,}85 - 1$ $e = \frac{P_{ms} \cdot D}{2(S \cdot C_j + 0{,}4\ P_{ms})}$	$S = 5/8R_e$ или $0{,}25\ R$ $C_j = 0{,}85 - 1$ $e = \frac{P_{ms} \cdot D}{2S \cdot C_j + P_{ms}}$
Испытательное давление: P_e	$S' = f'(R_e, R)$ $e' = F'(P_e, D, C_j', S')$	$S' = 0{,}9\ R_e$ $C_j' = 1$ $e' = \frac{P_e \cdot D}{2(S' + 0{,}4\ P_e)}$	$S' = 0{,}9\ R_e$ $C_j' = 1$ $e' = \frac{P_e \cdot D}{2S' + P_e}$
f, f', F, F' – константы правил конструирования. R_e, R – предел текучести, предел прочности соответственно при 20°C S – допустимое напряжение		D – внешний диаметр трубопровода C_j, C_j' – коэффициенты стыков e, e' – толщины стенок трубы	

Расчет толщины стенки трубопроводов СПГ.

	Факторы напряжений	Результирующее напряжение	Допустимый предел
1	Внутреннее давление, масса трубы, масса изоляции и т. п. (все постоянные нагрузки)	S_1 (под нагрузкой СПГ) S_2' (при испытаниях)	≤S
2	Напряжения, перечисленные выше, напряжения случайные, не сосредоточенные (снег, ветер, землетрясения и др.)	S_2	≤1,33 S
3	Напряжения, вызванные термической усадкой стали	S_3	≤1,5 S

Расчет предельной длины и сопротивления изгибу.

4.9.3.2.4. Потери давления

— СПГ обладает низкой вязкостью (1/10 от вязкости воды, см. § 4.2.1);
— диаметры трубопроводов рассчитываются из условия, что скорость течения СПГ не должна превышать 8 м/с;
— режим течения практически всегда турбулентный и потери давления пропорциональны V^2/D: обычно используется формула Коленбрука;
— для определения потерь давления в особых точках (задвижки, колена, тройники и т.п.) используется формула эквивалентных длин прямых отрезков (см. § 1.4.1.);
— расчеты потерь давления важны для проверки величин давлений, необходимых для работы насосов на линиях слива и налива судов, загрузки резервуаров (на заводах) или слива из резервуаров (случай терминала). Например, для сети слива СПГ из метановоза:

$$P_н = \delta H + H + P_р,$$

где $P_н$ – напор насосов судна; δH – потери давления в сети перекачки с судна в резервуар; H – максимальная разность высот резервуар/судно; $P_р$ – давление в резервуаре.

4.9.3.2.5. Опоры (см. рис. стр. 495)

— *Неподвижные опоры* изготавливаются из деревянных клиньев (дерево ироко), обеспечивающих механическую прочность и теплоизоляцию;
— *подвижные опоры* обеспечивают продольное перемещение (от 0,4 до 0,6 м) трубопроводов по опоре с направляющими элементами или без них;
— *"висячие" опоры* позволяют перемещение в двух плоскостях подвешенного трубопровода.

4.9.3.2.6. Компенсация напряжений, вызванных низкими температурами (см. рис. 1 стр. 496)

Для компенсации напряжений, вызванных холодом, используют:

— лиры.

Приближенная формула для расчета размеров лиры (h) для трубопровода длиной L и диаметром D, работающего в интервале температур $\Delta\theta$:

$$h = \sqrt{\frac{1{,}5E \cdot D\Delta L}{F}}, \text{ где } \Delta L = L \cdot \lambda \cdot \Delta\theta$$

где $\Delta L = L \cdot \lambda \cdot \Delta\delta$,

E – модуль Юнга;

F – максимально-допустимое напряжение;

λ – коэффициент линейного расширения используемой нержавеющей стали;

— компенсаторы:
  · аксиальный компенсатор.
  Элемент, состоящий из гофрированной трубы (сильфона), дающей возможность осевых перемещений с тягами – ограничителями напряжений и без них,
  · шарнирный компенсатор (S).
  Шарнирное соединение, имеющее возможность колебательных движений вокруг продольной оси (около 5°), смонтированное вокруг гофрированной трубы.
  Компенсатор с двойным шарниром имеет две гофрированных трубы, соединенных концами и связанных двойным шарниром,
  · шарнирные системы.

  Они состоят из компенсаторов, используемых для трубопроводов между двумя неподвижными опорами.

4.9.3.2.7. Гидравлический удар

— Аварийная остановка насоса, быстрое закрытие задвижки и т.п. могут вызвать быстрое изменение режима течения СПГ в трубопроводах и распространение ударной волны; амплитуда и скорость этой ударной волны уменьшаются во времени благодаря силам трения.
— Ниже приводятся упрощенные формулы для расчета максимальной величины повышения давления, вызванного закрытием задвижки:

$$\text{для } t \le 2\frac{L}{a} \quad \Delta H = \frac{a \cdot V_0}{g},$$

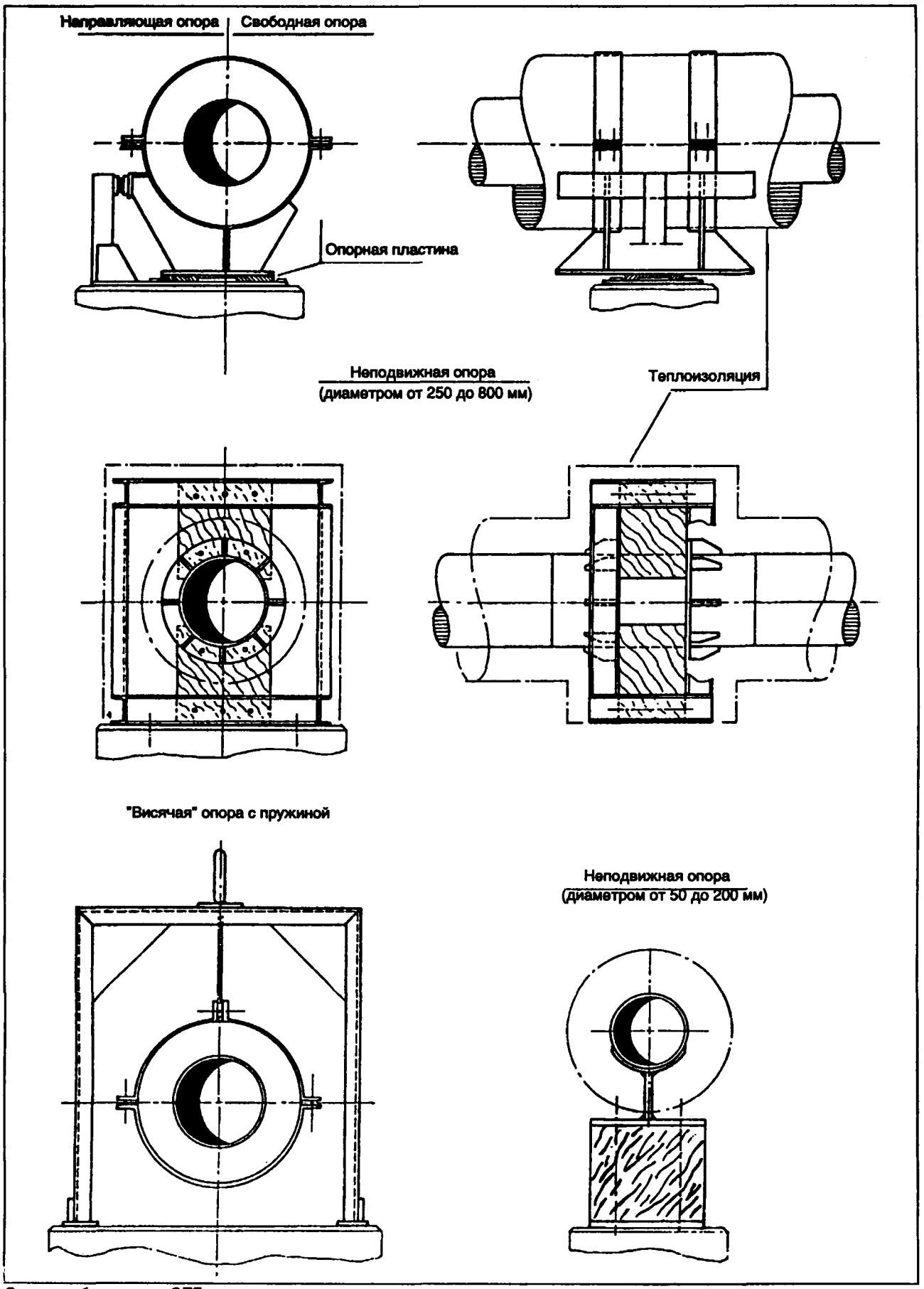
$$\text{для } t > 2\frac{L}{a} \quad \Delta H = \frac{2L \cdot V_0}{gt},$$

где

t – время закрытия задвижки;
L – длина трубопровода;
a – скорость ударной волны (~1500 м/с);
V_0 – скорость СПГ перед гидравлическим ударом;
g – ускорение силы тяжести.

4.9.3.2.8. Теплоизоляция

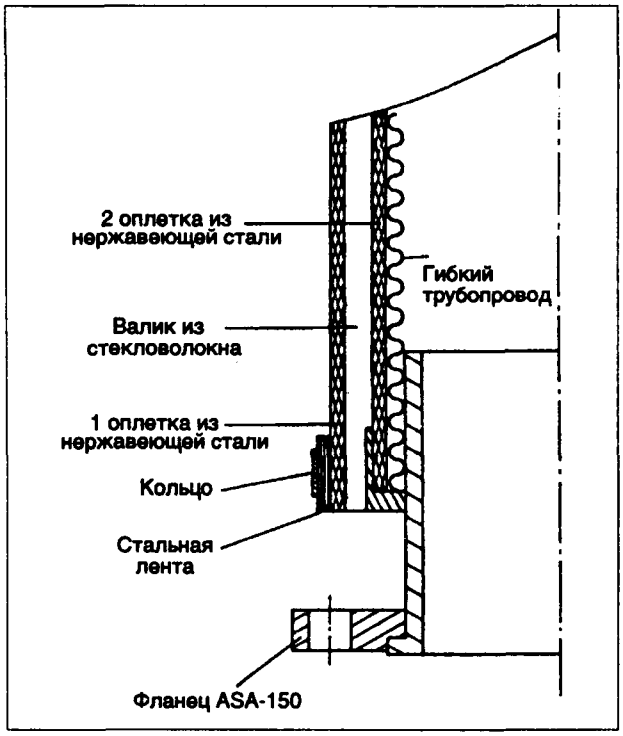
Необходимость теплоизоляции была описана в § 4.4.1.3.4., а использование для этого пенополиуретана – в § 4.3.3.2.3.4.



Опоры трубопроводов СПГ.

4.9.3.3. Особый случай гибких трубопроводов

Использование гибких трубопроводов необходимо в случае коротких участков, где появляются значительные температурные напряжения и сами гибкие соединения выполняют роль компенсаторов, а также в случае временных соединений, таких как при сливе–наливе автоцистерн.



Гибкие трубопроводы.

Обычно гибкие трубопроводы изготавливаются из аустенитных сталей Z2CN18-10 (304 L) или Z2CNД17-12 (316 L) и состоят из:

— гофрированный трубы (собственно гибкого трубопровода);
— антиобледенительной изоляции (стекловолокно, вакуум, полиуретан и др.), часто отсутствующей на трубопроводах, включаемых на короткое время;
— внешнего протектора, выполненного из обмотки из аустенитной стали (см. рис. 2, стр. 496).

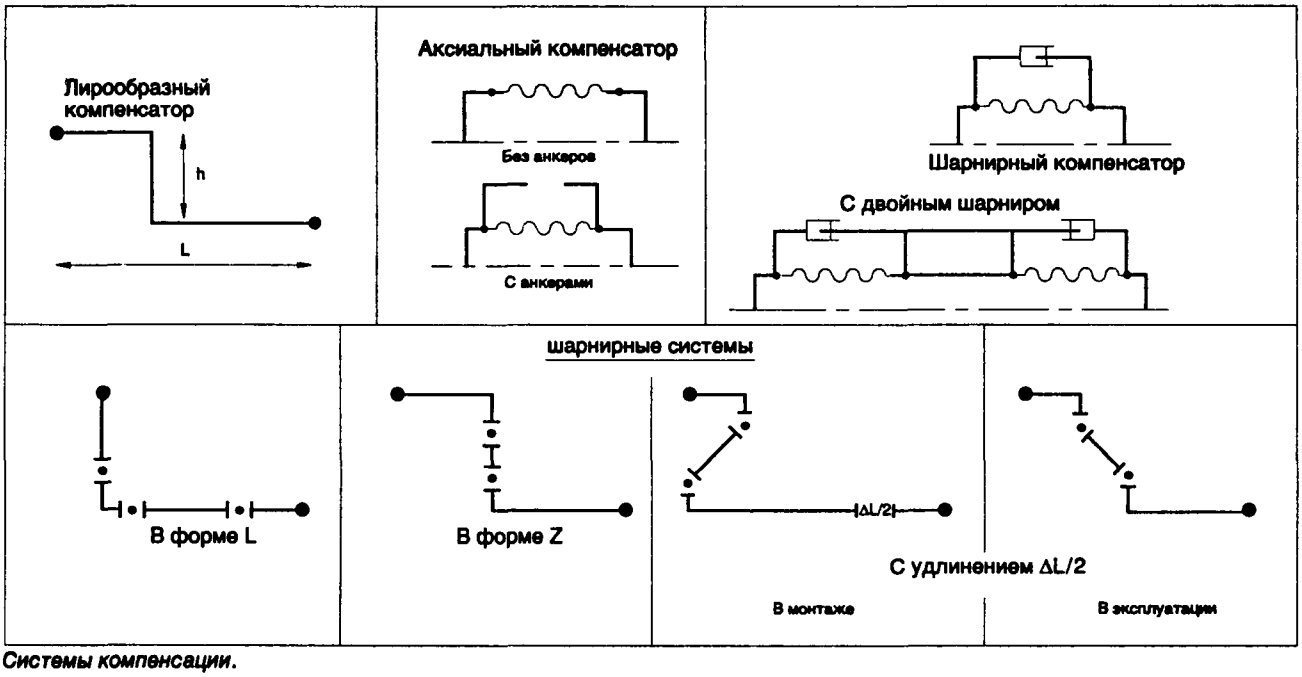
Для номинального диаметра 75 мм масса одного погонного метра в зависимости от изоляции и механической прочности колеблется от 15 до 25 кг.

Применение и испытания гибких трубопроводов выявили трудности в создании таких трубопроводов, которые не обмерзали бы и одновременно ими легко было бы манипулировать, а также хрупкость соединений трубопровода с фланцем. Тем не менее удалось подобрать гибкие трубопроводы для операции перекачки СПГ с одного метановоза на другой (такая операция была реализована в 1984 г. на рейде Фос сюр Мер между метановозом *Эдуард Л.Д.* (125 000 м^3) и метановозом *Жюль Верн* (25 000 м^3).

4.9.4. Вспомогательные устройства на трубопроводах

В общем случае специфичность устройств вызвана главным образом низкой температурой СПГ:

— использование криогенных материалов;
— расположение, исключающее дифференциальные термические напряжения, что является причиной деформаций, заклинивания подвижных деталей и т.п.;



Системы компенсации.

— меры безопасности против обледенения частей, находящихся в контакте с воздухом, а также против изменения физического состояния газа во время захолаживания.

4.9.4.1. Краны

4.9.4.1.1. Особые характеристики

— Оборудование кранов отсекателями (обтюраторами) для того, чтобы избежать скопления порции СПГ во время закрытия крана в корпусе его, что при разогреве вызвало бы повышение давления, несовместимое с прочностью аппарата;
— удлинение оси привода крана для того, чтобы сальник и набивка находились при температуре окружающего воздуха;
— контакт седло–клапан типа металл–металл вместо тефлон–металл для лучшей герметичности в случае пожара;
— устройство идеальной герметичности: дна крана, соединенные последовательно в одном боксе с продувкой последнего азотом;
— типы неисправностей, зарегистрированных во время испытаний и работы:
  · потеря управляемости (блокировка) штурвалов и т.п.,
  · потеря внутренней герметичности (неисправности соединений),
  · потеря внешней герметичности (сальники, соединения в крышках задвижек).

4.9.4.1.2. Типы запорных кранов и их применение

(см. табл. стр. 498).

4.9.4.2. Регуляторы дебита

4.9.4.2.1. Основные характеристики

Одинаковые с характеристиками запорных кранов (§ 4.9.4.1.1.) Если в закрытом положении требуется полная герметичность, необходимо продублировать эти регуляторы отсечным краном.

4.9.4.2.2. Типы регуляторов дебита и их применение

(см. табл. 1, стр. 499).

4.9.4.3. Предохранительные клапаны

4.9.4.3.1. Особые характеристики

— Предохранительные клапаны предназначены для ограничения давления в закрытой емкости, содержащей СПГ или холодный газ, обеспечивая автоматический сброс избыточного флюида.
— Они устанавливаются на всех резервуарах и отрезках трубопроводов между двумя кранами, где СПГ или холодный газ могут находиться в неподвижном состоянии.
— Они работают в очень специфичных условиях: открытие происходит при температуре окружающего воздуха, клапан выпускает холодный газ и закрывается при низкой температуре.
— Типичные неисправности, зарегистрированные во время испытаний и работы в условиях низких температур:
  · недостаточная герметичность при закрытии,
  · блокировка при открытии или закрытии,
  · изменение давления срабатывания при температуре окружающей среды и т.п.
— Сбор газа, выходящего из клапана, является той обычно используемой операцией, которая позволяет решать вопросы блокирования клапана при открытии и закрытии при низкой температуре из-за влажности.

4.9.4.3.2. Типы клапанов

Принцип работы клапанов, используемых для СПГ, не обязательно отличается от принципа действия клапанов, используемых для нефти или газа. Однако были внесены значительные модификации в конструкцию, чтобы удовлетворить требованиям работы в среде СПГ (см. табл. 2 стр. 499).

4.9.4.3.3. Область применения

Часто безопасность требует, чтобы открытие клапанов было надежным. В этом случае не следует применять пилотируемые (управляемые) предохранительные клапаны без дублирования их устройствами прямого действия (клапаны, мембраны), тарированными (настроенными) на давление, несколько большее давления срабатывания пилотируемых клапанов. Фактически трубопроводы СПГ и холодного газа оборудованы только клапанами прямого действия, а резервуары оборудованы пилотируемыми клапанами, продублированными клапанами прямого действия или взрывными диафрагмами.

4.10. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЛАСТИ СПГ

4.10.1. Утечки СПГ: физические явления и оборудование безопасности

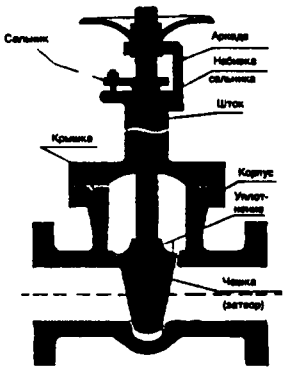
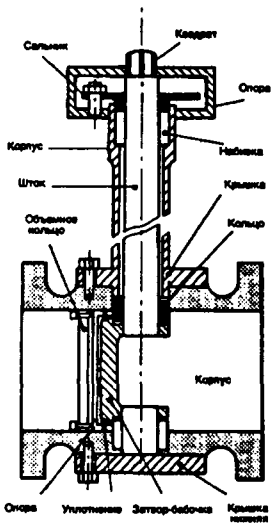
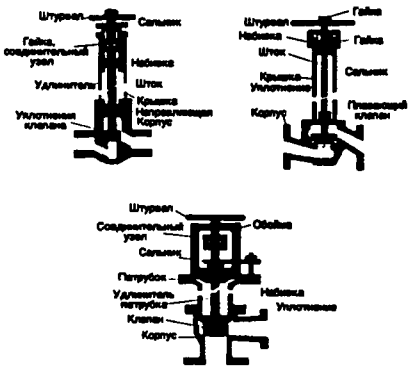
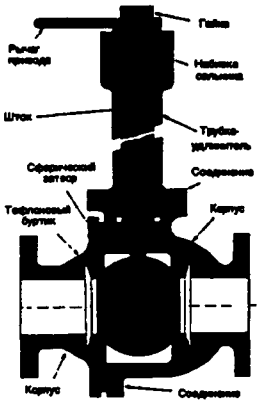
4.10.1.1. Поведение СПГ в процессе утечки

Газ, образующийся испарением разлитого СПГ, образует в смеси с кислородом воздуха смесь, горящую при любых концентрациях газа в пределах от 5 до 15% по объему.

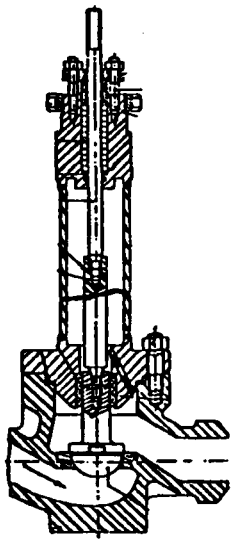
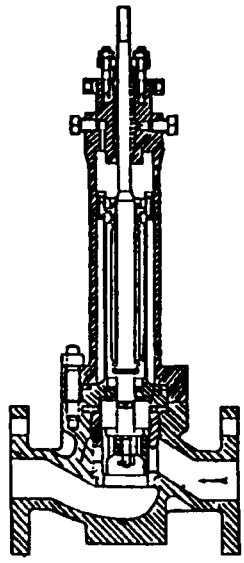
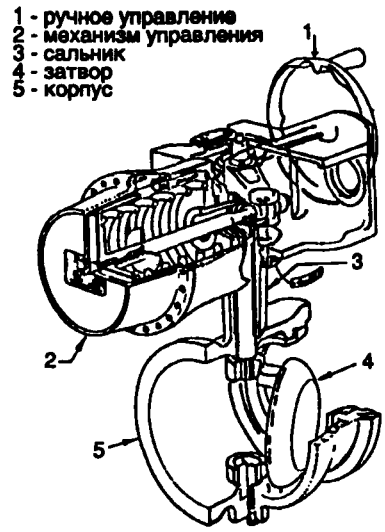
В стехиометрических условиях минимальная температура воспламенения достигает 540°C (мгновенная температура самовозгорания в закрытом объеме).

Практически горение легко начинается при контакте с открытым огнем, более трудно при воздействии искры и особенно при контакте с горячей точкой, которая нагревает лишь небольшой объем смеси газ–Øвоздух и требует более высоких температур для возгорания.

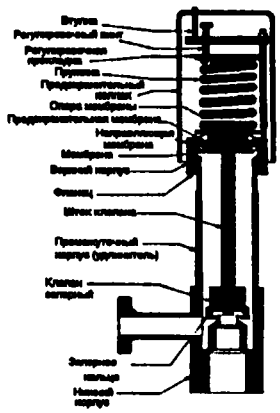
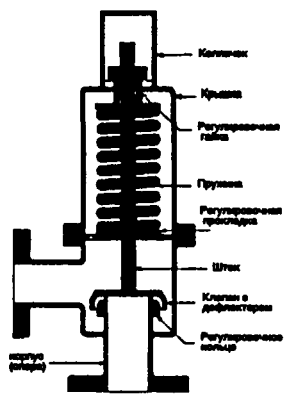
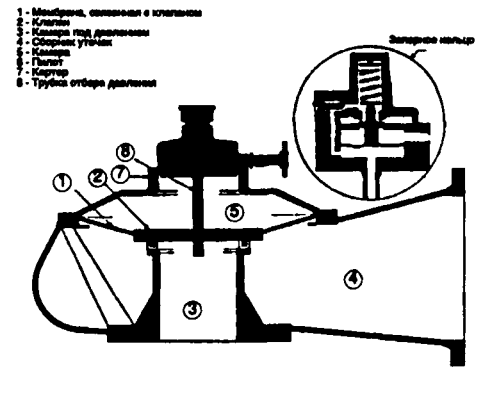
Смесь воздуха с метаном нетоксична по причине плохой растворимости метана в крови. Тем не ме-

Схема	Кран с чашечным затвором	Кран с затвором-бабочкой	Кран с затвором клапанным	Кран со сферическим затвором
				
Принцип действия и замечания	— Затвор перемещается перпендикулярно направлению движения флюида. — Кран обладает большими размерами (из-за хода вверх затвора при открытии крана), время открытия-закрытия весьма длительное. — Герметичность обеспечивается в одном направлении.	— Затвор перемещается вращением вокруг оси, перпендикулярной оси течения флюида, смещенной по отношению к плоскости клапана-бабочки и эксцентричной по отношению к трубопроводу. — Небольшие размеры, наименьший вес, небольшое время срабатывания, приспособлен к регулированию.	— Затвор перемещается параллельно оси течения флюида. — 2 типа затворов: неподвижный и плавающий относительно приводного штока. — Утечки почти нулевые в направлении преимущественного прохода. — Возможность варианта угловых кранов.	— Тип «плавающий шар»: сферический запорный элемент с проходом, создавленым разностью давления, с отверстием на входе, позволяющим декомпрессию СПГ, остающегося во время закрытия (следовательно, герметичность в одном направлении).
Проход		Да	Нет	Нет	Да
Низкое давление A. S. A. 150 P ≤ 1,6 МПа	Д ≤ 50 мм	Да	Нет	Да	Да
	50 мм ≤ Д ≤ 800 мм	Да	Да	Нет	Редко употребляемый
Среднее давление ASA 300	Д ≤ 50 мм	Да	Нет	Да	Да
	50 мм ≤ Д ≤ 400 мм	Да	Нет	Редко употребляемый	Да
Высокое давление ASA 600 и 900 P ≤ 11,2 МПа	Д ≤ 50 мм	Да	Нет	Да	Да
	50 мм ≤ Д ≤ 400 мм	Да	Нет	Нет	Нет

Типы затворных кранов и их применение.

	Обычная регулирующая задвижка прямого действия	Задвижка с клеточным затвором	Задвижка с вращающимся затвором
Схема			
Закон регулирования расхода	— Переменный в зависимости от профиля запорного устройства и седла.	— Переменный в зависимости от профиля окон клеточного затвора.	— Линейный (проход почти полный при полном открытии).
Использование	— В любых не очень сложных условиях.	— Преимущественно для использования в тяжелых эксплуатационных условиях (большая разность давлений при открытой или закрытой задвижке).	— Применяется в случае, если хотят получить повышенный коэффициент расхода.

Типы регулирующих задвижек и их использование.

Предохранительный клапан прямого действия с пропорциональным перемещением	Предохранительный клапан прямого действия с мгновенным открытием	Управляемый предохранительный клапан
		
Замечания по конструкции		
— Необмерзаемая пружина. — Давление газа передается не на запорный клапан, а на мембрану, соединенную с клапаном и помещенную в обогреваемую зону.	— Необмерзаемая пружина за счет удлинителя. — Особые конструктивные решения: достаточные зазоры для компенсации дифференциальных напряжений во время срабатывания; замена материалов для пружины и т. д.	— Возможность срабатывания при небольшой разности давлений благодаря усиливающему действию пилота.

Типы предохранительных клапанов.

нее человек, долгое время находящийся в атмосфере с высоким содержанием метана, может испытывать неприятные ощущения, вызываемые пониженным содержанием кислорода во вдыхаемой смеси.

Испарение СПГ приводит к образованию облака холодного газа (первоначально при –160° С), более плотного, чем окружающий воздух ($\bar{\rho}$ = 1,39). По мере того, как этот газ растворяется в воздухе и имея в виду влажность воздуха, плотность смеси уменьшается, конденсация паров воды, то есть кристаллизация сформировавшихся капель, разогревает газ, облегчает его и делает облако газа видимым.

Вблизи источника испарения это облако тем более видимо, чем больше расход холодного газа и больше влажность воздуха. Длина облака максимальна в спокойную погоду. Она уменьшается с возрастанием силы ветра и перемешивания. Исследования изменения относительной плотности смеси метана при –160°С с воздухом в зависимости от концентрации метана, температуры воздуха, относительной влажности воздуха, показали, что при относительной влажности более 55% концентрация метана на видимой границе облака всегда меньше 5%, то есть, другими словами, горючая смесь полностью содержится в границах видимого облака, так что простое наблюдение облака позволяет оценить опасную зону.

Итак, учитывая риск возгорания и пожара облаков газа, образующихся в результате утечек СПГ, разработаны определенные меры безопасности и оборудование для предотвращения и тушения пожаров и недопущения утечек.

4.10.1.2. Предотвращение утечек СПГ

Предупреждение утечек является первой целью при разработке любого оборудования, содержащего СПГ: использование и улучшение криогенных материалов, совершенствование оборудования с целью предотвращения возможности разрывов и т.д.

Независимо и в дополнение ко всем мерам, принятым при конструировании оборудования, все аппараты, содержащие СПГ, снабжаются устройствами безопасности, способными предупредить или ограничить любые утечки:

— задвижки аварийной отсечки и системы быстрого разъединения сливных рукавов (*стояков*);
— измерители уровня, системы предохранения от перелива, изолирующие задвижки, предохранительные клапаны и т.п. в каждом резервуаре СПГ;
— сигнализаторы и системы аварийного останова в регазификаторах, вращающихся машинах (насосы СПГ и компрессоры испарений), трубопроводах СПГ и т.п.

4.10.1.3. Разлив СПГ

4.10.1.3.1. Распространение и испарение разлива СПГ

4.10.1.3.1.1. Влияние понижения давления

Имеем утечку СПГ массой М, давление насыщенного пара СПГ в емкости, его содержащей, больше, чем атмосферное давление. Из-за разности давлений ΔР масса ΔМ СПГ испаряется. Количество этой массы может быть оценено следующим расчетом:

Количество тепла, отдаваемого массой М флюида, температура которой понижается на ΔТ, равное $C \cdot M \cdot \Delta T$, равно количеству тепла, необходимому для испарения массы ΔМ или $L \cdot \Delta M$, откуда:

$$\frac{\Delta M}{M} = \Delta T \frac{C}{L},$$

где

L – скрытая теплота парообразования;

С – удельная теплоемкость жидкой фазы.

Для СПГ влияние температуры на величину давления насыщенного пара определяется выражением:

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = 0{,}8 \text{ кПа/К},$$

где

L = 510 кДж/кг; С = 3,55 кДж $\cdot$ кг$^{-1}$ $\cdot$ К$^{-1}$.

Для утечки СПГ из сосуда, находящегося под давлением 1 090 кПа, и при атмосферном давлении, равном 101 кПа, доля испарившегося СПГ будет равна около 0,7%.

При более точном расчете необходимо учесть состав СПГ и ввести понятие двухфазного разложения, так же как и коэффициенты фазового равновесия различных компонентов смеси. Но полученные результаты не будут сильно отличаться от простого метода, изложенного выше.

4.10.1.3.1.2. Влияние теплообмена

Разрушение теплоизоляции и контакт флюида с горячими поверхностями приводит к массивной регазификации, более опасной, чем декомпрессия при утечке СПГ. Чтобы понять идею, запомним, что 1 кг нержавеющей стали, охлаждаясь на 1 градус при контакте с СПГ при температуре кипения, вызывает образование 0.6 м^3 газа (приведенного к 0°С и 101,3 кПа). Это количество удваивается, если заменить сталь обычным бетоном.

Если значительное количество СПГ разливается по земле, земля передает ему определенное количество тепла, но и сама охлаждается: если поверхность контакта между СПГ и землей остается постоянной, разность температур между СПГ и землей уменьшается, и, следовательно, количество испарений уменьшается во времени.

Запись уравнений теплопередачи для нестационарного СПГ и грунтом позволяет получить, вводя некоторые допущения (постоянная смоченная СПГ поверхность, нет влияния граничных эффектов, нет теплообмена СПГ с воздухом, нет термического сопротивления грунта, моделируемого полубесконечной стенкой), следующее соотношение для расхода испаряющегося СПГ в контакте с грунтом V в зависимости от времени *t*:

$$R = \frac{\lambda}{\rho L} \frac{\Delta T}{\sqrt{\pi a t}},$$

где:

L – скрытая теплота парообразования, дж/кг;

ρ – плотность СПГ, кг/м^3

λ – коэффициент теплопроводности грунта, Вт м$^{-1}$ K^{-1};

a – коэффициент термодиффузии грунта, м/с;

ΔT – начальная разность температур грунта и СПГ, K.

Важным результатом является то, что расход испарений СПГ с земли уменьшается пропорционально $t^{-1/2}$.

Во избежание всякой неопределенности относительно мгновенного максимального расхода испарений в первые секунды после розлива (при $t = 0$, $V \to \infty$), необходимо провести эксперименты.

4.10.1.3.1.3. Моделирование распространения слоя и испарения СПГ

Распространение цилиндрического жидкого слоя может быть рассчитано численным путем исходя из следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \sqrt{\alpha g\,(h(t) - h_{min})},$$

$$\frac{dM(t)}{dt} = (1 - f)\,Q(t) - Q_e(t),$$

где:

R(*t*) – радиус слоя на момент времени *t*, м;

h(*t*) – высота фронта слоя на момент времени *t*, м;

Q(*t*) – массовый расход выброса СПГ, кг/с;

M(*t*) – масса вышедшего газа (СПГ + испарения), кг;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2;

f – доля СПГ, мгновенно испарившегося при расширении;

$Q_e(t)$ – массовый расход испарений (приход тепла), кг/с;

h_{min} – высота минимальная, которую может иметь слой СПГ. Она зависит или от капиллярных сил или от шероховатости грунта и может быть определена экспериментальным путем.

α – дополнительный коэффициент, который учитывает случаи распространения слоя на поверхности воды и грунта.

На поверхности грунта расход испарений цилиндрического слоя определяется выражением:

$$Q_e(t) = \rho k \int_{u=0}^{u=R(t)} \frac{2\pi u\,du}{\sqrt{\tau}},$$

где *u* и τ связаны соотношением $u = R(\tau)$ и ρ – плотность СПГ, кг/м^3.

Коэффициент *k* зависит от природы грунта и определяется экспериментально для различных поверхностей.

На поверхности воды явление конвекции обеспечивает относительно постоянную температуру воды на контакте с СПГ, поток тепла Q постоянен и может быть определен экспериментально. Тогда массовый расход испарений определится из выражения:

$$Q_e(t) = \frac{\Phi}{L} R^2(t).$$

4.10.1.3.2. **Обнаружение и предупреждение разливов СПГ**

Установки СПГ могут быть оборудованы многими системами обнаружения розлива СПГ:

— детекторы холода типа термопар, терморезисторов, термостатов или, наконец, детекторы на оптических волокнах (в процессе разработки); эти детекторы распределены на всей поверхности, где возможны утечки СПГ (противопожарные рвы и т.д.);

— детекторы газа на основе каталитического горения, полупроводников, теплопроводности; такие детекторы могут быть использованы в зонах расположения оборудования, из которого возможны утечки СПГ, так как они сопровождаются значительным испарением разлитого СПГ.

Кроме того, простым способом обнаружения розлива является визуальное наблюдение образовавшегося облака атмосферной конденсации. Обходы мест расположения установок СПГ и наблюдение через телекамеры позволяют операторам обеспечить обнаружение разливов визуальным наблюдением.

В случаях, когда места потенциальных утечек СПГ, могущих воздействовать на некриогенные части оборудования или тело человека, могут быть заранее известны, защита от криогенных температур может быть обеспечена с помощью:

— экранов или частичных алюминиевых покрытий;

— деревянных щитов;

— бетонных перегородок и т.д.

Пример: защита корпуса судна в месте соединений с наливными стояками.

4.10.1.4. Рассеяние облаков паров СПГ

4.10.1.4.1. Оценка газовой дисперсии

Учитывая основные характеристики выброса СПГ, а именно:

— тип источника (мгновенный или постоянный),

— атмосферные условия,

— рельеф местности и препятствия,

необходимо определить расстояние безопасности, за пределами которого концентрация метана никогда не достигнет более 5%.

Для оценки этого расстояния возможны различные подходы:

— численное моделирование,

— физическое моделирование в аэродинамической трубе или струе,

— опыты в малом или большом масштабе, которые к тому же позволяют оценивать точность двух первых подходов.

Опыты по рассеиванию (дисперсия) сложны и дороги (приборы, расходуемый газ). Поэтому возможно провести лишь ограниченное их число, чем и объясняется интрес к первым двум подходам.

Опыты в аэродинамической трубе или струе позволяют иметь в уменьшенном масштабе реальное явление рассеивания с учетом законов подобия механики флюидов и легко учесть сопротивление препятствий различной геометрии, которые могут встретиться на пути облака паров СПГ.

С другой стороны, эти опыты, в общем случае, не дают представления (не моделируют) о теплопередаче, что является существенным приближением.

Что касается численного моделирования, были созданы следующие три основные категории моделей (в порядке возрастания сложности):

— гауссовы модели,
— модели интегрального типа (или боксовые модели),
— трехмерные модели.

Эти модели предполагают знание величин, описывающих слой и его испарение с помощью изложенного выше моделирования.

Гауссовы модели:

— разлагают выброс газа в элементарные клубы таким образом, что концентрация газа в любой точке есть сумма вклада элементарных клубов, образовавшихся с начального момента эмиссии,
— выражают, что пространственное распределение этой концентрации является гауссовым,
— используют классы стабильности Паскилля для характеристики атмосферных условий и, следовательно, типовые отклонения от гауссового распределения концентрации,
— не учитывают наличие препятствий течению и передачу энергии окружающей среде.

Модели интегрального типа:

— описывают следующие три фазы:
  · образование начального облака (источник представляется в виде газового цилиндра в случае мгновенного розлива СПГ или в виде последовательности прямоугольных слоев, испускаемых через равные промежутки времени в случае постоянного розлива СПГ),
  · распластание под действием сил тяжести и нагрева облака захватом воздуха и конвекцией с грунтом (явления, описываемые формулами с эмпирическими коэффициентами, более или менее сложными в зависимости от моделей),
  · рассеивание по закону Гаусса в зависимости от атмосферных условий, когда достигаются критерии перехода между фазами распластывания и дисперсии (рассеивания) (пример: плотность облака близка к плотности окружающего воздуха или скорость распластывания мала по сравнению со скоростью ветра), (отсутствие ветра, сильный застой), не учитывают наличия препятствий и, что особенно важно, требуют уточнения опытных коэффициентов.

Трехмерные модели:

— рассчитывают в точках сетки, представляющей область течения, семь физических параметров, характеризующих выброс в данный момент:
  · три компоненты скорости,
  · давление,
  · температуру,
  · плотность,
  · концентрацию,

  получаемых численным интегрированием семи следующих уравнений:
  · три уравнения Навье–Стокса, которые описывают атмосферное течение;
  · уравнение сохранения массы,
  · уравнение энергии,
  · уравнение концентрации по закону Фика,
  · уравнение состояния газа, например идеального;
— могут учесть препятствия и рельеф и дать детальное описание эволюции облака;
— требуют большого времени расчетов на больших ЭВМ.

4.10.1.4.2. Контроль рассеивания газового облака СПГ

В случае разлива СПГ могут быть приняты многие меры для ограничения влияния рассеивания облака паров:

— для ограничения объема испарившегося и рассеянного в атмосфере газа разработаны различные устройства, служащие для ограничения смоченной СПГ поверхности в зонах возможного разлива:
  · противопожарные рвы,
  · дренажные канавы,
  · сливные уклоны и т.п.

Для ограничения теплообмена между СПГ и окружающей средой:

  · покрытие смачиваемых поверхностей изолирующим бетоном, смолами или полиуретаном,
  · нанесение физических пен на разлитый СПГ, которые изолируют его термически от атмосферы (см. § 4.10.1.6.2.);
— атмосферная турбулентность может быть усилена в зоне розлива путем создания препятствий для облегчения растворения образовавшегося газа:
  · постоянных (пример: изгороди, посадки деревьев),
  · разворачиваемых в случае утечки (пример: водяная завеса);
— для уменьшения возможности возгорания газового облака определяются зоны газовой безопасности, в которых применяется электрооборудование соответствующего класса и использование открытого огня и источников тепла строго регламентированы.

4.10.1.5. Возгорание и ликвидация пожара

4.10.1.5.1. Общие сведения о пламени СПГ

В свободной атмосфере горение внутри смеси метана с воздухом распространяется теплопроводностью и диффузией свободных радикалов со скоростями, в пределах 5 - 15 м/с в зависимости от состава смеси. Это явление медленной дефлагра-

ции (горения без взрыва) не вызывает существенного повышения давления: другими словами, взрыва не происходит, что произошло бы в закрытом объеме. Некоторые авторы все же считают, что теоретически внутри газового облака больших размеров, распространяющегося в свободном пространстве, в определенных условиях могла бы происходить детонация, то есть распространение пламени ударной волной, сжимающей адиабатически последовательные слои газа.Это мог бы быть случай, когда возгорание было бы инициировано источником ударной волы большой мощности.

До настоящего времени эта гипотеза не подтверждена фактами. Попытки спровоцировать это явление в стехиометрических смесях объемом несколько сот кубометров с помощью тринитротолуола были сделаны, но результата не дали.

Таким образом, так как взрыв в свободном пространстве исключен, остается пожар, который надо хорошо знать, чтобы эффективно его тушить. В классификации пламени, принятой во многих странах, включая англо-саксонские и Францию, СПГ относится к классу В "воспламеняющихся жидкостей или газов под давлением, горение которых сопровождается пламенем" (в отсутствие электрического разряда).

Опыты, проведенные на пленках СПГ меньше 200 м², позволили установить их излучение: были зарегистрированы величины в среднем 150 кВт/м² на поверхности горения и до 250 кВт/м² локально. Эти значения по всей вероятности постоянны для больших пожаров СПГ: возможно, что, начиная с определенного размера, пламя над слоем СПГ не стелется по земле из-за недостатка воздуха. К тому же первые опыты, реализованные на поверхности 1000 м² летом 1987 г. обществом Газ де Франс в кооперации с другими газовыми обществами, показали, что образуется большое количество сажи, что является признаком неполного горения. Тепло, выделяемое пожаром СПГ, рассеивается тепловым излучением пожара и конвекцией; интенсивность теплового излучения пожара на данном расстоянии определяется этим рассеиванием и атмосферным поглощением.

Оценка этого теплового излучения в зависимости от расстояния позволяет оценить опасные зоны для различных приемников (материалы, люди и т.п.) в соответствии с их стойкостью к облучению.

4.10.1.5.2. Моделирование излучения пожара СПГ

Современные способы моделирования основаны на следующей формуле:

$$Q = F\tau E\varepsilon,$$

где:

Q – поток излучения, вт/м²;

F – коэффициент формы пламени;

τ – коэффициент переноса окружающим воздухом;

E – эмиссия пламени, вт/м²;

ε – коэффициент эмиссии пламени;

τ – коэффициент, учитывающий атмосферное поглощение (вызванные, главным образом, водяным паром в окружающем воздухе) на расстоянии пламя–приемник.

ε выражает ослабление эмитированного излучения из-за непрозрачности как пламени, так и сажи.

F учитывает форму пламени, расстояние и взаимную ориентацию между пламенем и приемником, для которого рассчитано излучение Q.

Метод упрощенного расчета излучения Q от пламени СПГ состоит в следующем:

— представить пламя как цилиндр более или менее наклоненный в соответствии с принятыми для расчетов направлением и силой ветра;
— оценить высоту и угол наклона пламени по полуэмпирическим формулам, предложенным AGA: соответственно по формулам Томаса и Виклера и Слипцевича;
— произвести двойное интегрирование элементарного энергетического потока, излученного элементом поверхности пламени (прямо связанного с эмиттивностью: $E = e\pi$) на элементе поверхности приемника;
— пренебречь коэффициентами τ и ε.

4.10.1.5.3. Обнаружение пожара СПГ

Средства, употребляемые для обнаружения пожара СПГ, не отличаются от тех, которые применяются на газовых установках в общем случае.

На установке, расположенной на открытом воздухе, вокруг всех ее частей, содержащих СПГ, устанавливаются детекторы пламени, имеющие чувствительный фотоэлектрический элемент или инфракрасный, ультрафиолетовый элемент.

4.10.1.6. Противопожарная защита

Противопожарная защита установок СПГ имеет три цели:

— защитить близлежащие объекты от действия теплового излучения,
— ограничить интенсивность пламени,
— потушить пожар, если позволяют условия.

4.10.1.6.1. Защита от излучения

Чаще всего используются устройства орошения объектов, считающихся наиболее уязвимыми для обеспечения адекватного сопротивления огню.

Расчет этих устройств состоит в следующем:

— оценить тепловое излучение, получаемое объектами по методам, изложенным в § 4.10.1.5.2. для определенного сценария пожара;
— определить конфигурацию рамп орошения;
— рассчитать теоретически необходимый расход воды для поглощения испарением полученного излучения;
— принять коэффициенты безопасности для этого расхода воды, принять меры, гарантирующие доступность источника воды, определить средства перекачки воды (морская вода чаще всего для заводов и терминалов).

Объектами, для которых устраивается такая противопожарная защита, являются: резервуары хранения СПГ, основные объекты, содержащие СПГ, и здания, служащие для укрытия людей.

4.10.1.6.2. Ограничение пламени

Для СПГ единственным эффективным средством ограничения мощности огня является изоляция жидкости от атмосферы покрытием ее толстым слоем физической пены.

Пена вырабатывается генераторами эмульгированием в воздухе смеси воды и эмульгатора в слабой пропорции.

Разлитая на поверхности жидкости пена позволяет:

— уменьшить скорость испарения СПГ, выполняя роль изоляции между СПГ и атмосферой,
— сохранить распространение газового облака и ограничить зону возгораемости облака,
— ограничить риск возгорания на расстоянии и поддержать зону ближнего возгорания, то есть сверху зоны разлива СПГ,
— в случае возгорания ограничить интенсивность воздействия пламени и излучения пожара на окружающую среду.

Пена характеризуется кратностью, то есть отношением объема пены к объему воды и эмульгатора, использованных для ее приготовления (чем больше кратность, тем легче пена). Этот параметр определяет поведение пены на поверхности СПГ разлитого или возгоревшегося.

Химические пены с очень малой кратностью (получаемые реакцией между двумя жидкими химическими продуктами), с успехом используемые для покрытия пламени некоторых охлажденных углеводородов, оказались неэффективными для СПГ, так как не удовлетворяют определенным критериям, полученным в процессе испытаний пен.

Для СПГ пена должна:

— быть хорошим теплоизолятором, плавающим на поверхности СПГ, с определенной степенью адгезии для того, чтобы не пропустить газ и не быть унесенной ветром или конвективными потоками, возникающими под действием пламени;
— иметь хорошую устойчивость к огню и к холоду,
— обеспечивать равномерное покрытие СПГ при достаточно быстром производстве ее генераторами для того, чтобы она не разрушалась огнем перед тем, как он будет потушен.

Испытания, проведенные обществом Газ де Франс, показали, что физические пены при кратности от 150 до 350 отвечают условиям тушения пламени СПГ на больших поверхностях.

Тип пламени СПГ (поверхность слоя) и скорость разрушения пены огнем определяют число необходимых пеногенераторов, их расположение, размеры установок подачи воды и эмульгатора (расход воды и необходимый ее запас).

4.10.1.6.3. Тушение огня СПГ

Системы, использующие химический порошок и показавшие свою эффективность при тушении пожаров жидких незамороженных углеводородов и газов, могут быть использованы для тушения огня СПГ.

В качестве химического порошка чаще всего используется порошок на основе бикарбоната натрия, другие порошки изготавливаются на основе бикарбоната калия или его производных.

Химические порошки воздействуют на огонь как мощные антиоксиданты, которые замедляют реакцию быстрого окисления (горения).

Если они должны быть применены для гашения огня СПГ, уже покрытого слоем физической пены, необходимо испытание их на совместимость с пеной, чтобы убедиться, что они не реагируют с эмульгатором, иначе порошки могут разрушить слой пены и не потушить, а увеличить силу огня.

Для успешного тушения необходимо мгновенно покрыть порошком весь очаг огня, что трудно в случае большой поверхности.

Опыт, полученный во время экспериментального тушения огня СПГ, показал, что:

— если очаг не превосходит нескольких квадратных метров, тушение может быть произведено прямо порошком без предварительного покрытия очага пеной, одновременным включением нескольких огнетушителей, направленных на основу пламени, но чтобы струи не разрушали поверхность жидкости;
— для больших поверхностей успех тушения быстро уменьшается: показательное тушение, продемонстрированное производителями огнетушителей на поверхности 50 м^2, закончилось успешно, но пожарные при этом рисковали,
— для поверхностей в сотни квадратных метров тушение возможно только в случае огромных затрат порошка без гарантии успеха и лучше покрыть поверхность очага горения надежной физической пеной.

Примечание:

Вода ни в коем случае не является средством тушения огня СПГ.

4.10.2. Поведение СПГ в резервуарах

4.10.2.1. Общие сведения

Возможно, что в резервуаре СПГ появятся слои или ячейки стратификации (расслоения). Плотность жидкости одинакова внутри ячейки, но плотность жидкости нижней ячейки отличается от плотности верхнего слоя.

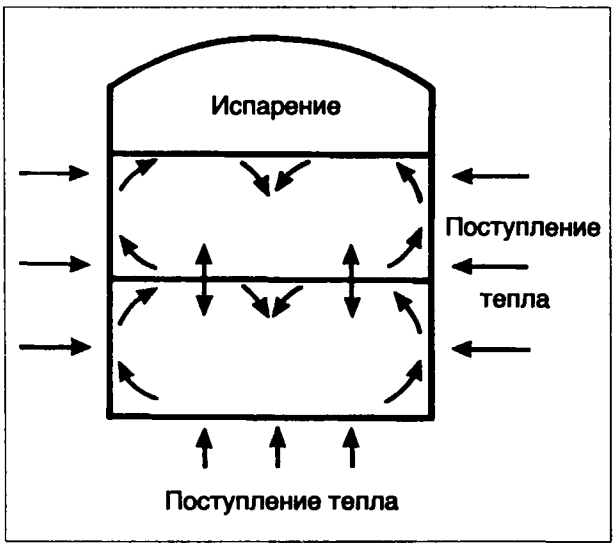
В дальнейшем теплоприток в резервуар, тепло и массообмен между ячейками и наконец испарение с поверхности жидкости вызывают выравнивание плотностей слоев и в конечном счете их перемешивание. Самопроизвольное перемешивание часто называют "ролл-овер" (roll-over). Ролл-овер может сопровождаться мгновенным увеличением расхода испарений, если жидкость нижней ячейки находится в состоянии перегрева по отношению к давлению газовой фазы резервуара.

Это внезапное испарение может в определенных случаях привести к увеличению давления в резервуаре и спровоцировать открытие предохранительных клапанов. Если последние рассчитаны неправильно (на меньшую производительность), внутренняя емкость резервуара может быть повреждена.

4.10.2.2. Стратификация

4.10.2.2.1. Стратификация, возникающая при наливе

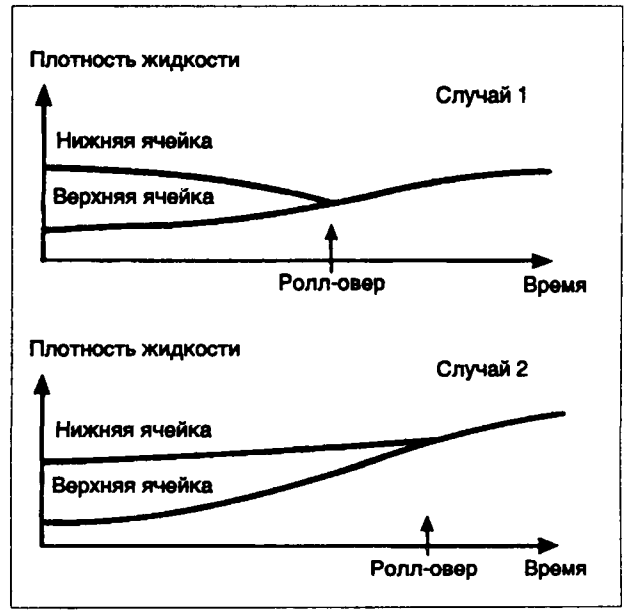
В случае налива в резервуар СПГ с плотностью, отличающейся от плотности уже хранимого СПГ, может случиться, что обе жидкости не перемешаются, образуя два различных слоя. Это расслоение стабильно, если более плотная жидкость находится на дне. Это условие соблюдается, если во время налива через низ резервуара закачивается жидкость (груз) более плотная, чем жидкость, находившаяся в резервуаре (головка) или, в случае налива сверху груз имеет меньшую плотность, чем головка. Наблюдения показывают, что после образования эти слои остаются очень стабильными. Две ячейки с независимой циркуляцией образуются в жидкости (см. рис. 1 стр. 505). Происходит конвективный обмен, тепло и массы обмениваются на границе двух слоев. Тепло, поступающее в верхнюю ячейку с боковых поверхностей и через поверхность раздела, увлекается естественной конвекцией к поверхности и там теряется в виде скрытой теплоты парообразования в поверхностном слое.



Стратификация СПГ в резервуаре и ячейки тепловой конвекции.

С другой стороны, нижняя ячейка получает тепло через дно и боковые стенки, но может потерять тепловую энергию только через механизм конвекции на границе раздела двух слоев. Два механизма развития во времени могут реализоваться в зависимости от того, меньше или больше теплопередача на границе раздела слоев, чем поступление тепловой энергии в нижнюю ячейку.

По первой гипотезе СПГ в нижней ячейке разогревается и становится менее плотным (случай 1), по второй – охлаждается и его плотность растет (случай 2).



Явление "Ролл-овера".

Когда плотности жидкости в двух ячейках почти сравниваются, граница раздела исчезает и жидкости в слоях перемешиваются. Это перемешивание, обычно очень быстрое, называется ролл-овер и сопровождается часто внезапным обильным испарением хранимого СПГ.

4.10.2.2.2. Самопроизвольная стратификация

Присутствие азота в значительных количествах в СПГ может спровоцировать стратификацию начально однородного продукта следующим образом: нестратифицированный флюид получать тепло через стенки и поднимается по стенкам. Поступив на поверхность, эта жидкость дросселируется и теряет много азота. Поэтому она становится менее плотной, чем оставшаяся жидкость, и может скапливаться в приповерхностных слоях.

Это накопление легкой жидкости может продолжаться до тех пор, пока толщина слоя станет такой, что кинетическая энергия циркулирующего флюида вдоль стенок станет равной потенциальной энергии, накопленной благодаря разности плотностей жидкостей в двух слоях.

Когда этот верхний слой сформируется, нижний слой не сможет более терять свое тепло конвекцией и дросселированием. Вследствие этого его температура начинает увеличиваться. Поведение резервуара становится идентичным вышеописанному в предыдущем параграфе. Произойдет ролл-овер после выравнивания плотностей двух слоев. В то же время, перемешанная жидкость может попрежнему содержать значительное количество азота и процесс внезапного перемешивания может повториться много раз.

4.10.2.2.3. Математическое моделирование ролл-овера

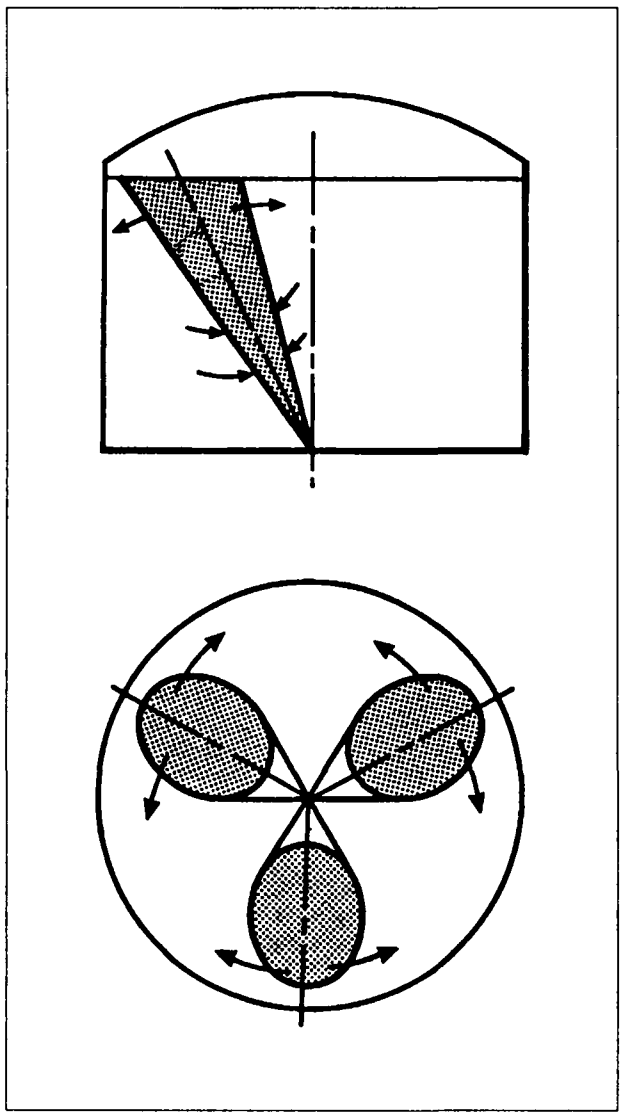
Для моделирования поведения СПГ в резервуарах хранения используются информационные прогностические модели для турбулентных смесей.

Эти модели содержат уравнения теплопередачи и массообмена между слоями. Использование этих моделей для предсказания поведения роллювера затруднительно, так как коэффициенты массо- и теплопередачи через поверхность раздела жидкость–жидкость мало известны.

Для определения этих коэффициентов были использованы результаты экспериментов на солевых растворах. Для природных сжиженных газов нет никаких экспериментальных данных.

4.10.2.3. Антистратификационные устройства

Используя устройства перемешивания или выбирая соответствующие способы заполнения, можно не допустить стратификацию.



Конус перемешивания от струи жидкости.

4.10.2.3.1. Налив через отверстия для перемешивания

Можно получить эффективную смесь свежей жидкости и головки продукта с отличной от свежей жидкостью плотностью, если использовать во время налива через низ резервуара напорное отверстие при условии, что будут выполнены два следующих условия:

- струя свежей жидкости должна выйти на поверхность хранимого продукта,
- перемешивание должно производиться столь долго, чтобы весь хранимый СПГ был перемешан турбулентной струей.

Как критерий перемешивания, принято, что объем флюида, подвергающегося воздействию турбулентной струи, должен в 10 раз превосходить объем хранимого продукта.

4.10.2.3.2. Рециркуляция через отверстия для перемешивания

Гомогенизация стратифицированного продукта может быть обеспечена циркуляцией СПГ, хранимого в резервуаре, с помощью погружных центробежных насосов, установленных в резервуаре. Нагнетаемый насосами СПГ создает струи, которые и обеспечивают однородность жидкой фазы.

4.10.2.3.3. Налив через перфорированные трубы

Можно существенно уменьшить возможность появления расслоения, увеличивая смешение во время налива путем использования перфорированной трубы (на части ее длины). Жидкость, загружаемая в резервуар, будет равномерно распределена в массе хранимого продукта (головки). Необходимо, чтобы перфорация всегда находилась под уровнем СПГ для того, чтобы не допускать излишнего испарения продукта.



Перфорированные наливные трубы.

4.10.2.3.4. Перемешивание закачкой газа

Исследования, проведенные с малорастворимыми газами (водородом и гелием) показали, что устройства закачки газа могут уменьшить расслоение хранимого СПГ. Растворимые газы, такие как метан или азот, не оказывают эффекта. Тем не менее закачка газа не может рассматриваться в качестве практического средства для ликвидации расслоения по причине больших испарений.

4.11. Регламентация в области СПГ

4.11.1. Наземные установки СПГ

Мировая практика регламентации в области СПГ мало разработана по причине относительной немногочисленности установок СПГ.

США являются единственной страной, где существует отдельная регламентация СПГ: 49 CFR часть 193 (11февраля 1980 г.).

Однако эти правила практически не были применены, поскольку установки СПГ в США были построены раньше 1980 г. и в соответствии с рекомендациями нормы NFPA - 59 A (1979) Национальной ассоциации противопожарной защиты.

В Японии несколько декретов регламентации газовых установок "Закон о газовых установках" посвящены СПГ и нормы СПГ опубликованы Японской газовой ассоциацией: "Рекомендуемая практика для хранения СПГ".

Многие страны, в том числе Великобритания, применяют американские правила (нормы) NFPA – 59 A.

Во Франции установки СПГ входят в регламентацию установок, входящих в класс защиты окружающей среды (закон от 19 июля 1976 г.), в основном в раздел "Хранение горючих сжиженных газов № 211-А". Эта общая регламентация была дополнена с 1982 г. вступлением в силу Европейской директивы 82.501/CEE, касающейся риска больших аварий в определенной промышленной деятельности (24 июня 1982 г.), куда входит деятельность в области СПГ.

Эта регламентация устанавливает:

— проведение исследований влияния на окружающую среду, исследований безопасности, опроса общественного мнения по любому проекту установки,
— процедуру получения разрешения на строительство,
— процедуру пуска в эксплуатацию,
— структуру контроля эксплуатации и безопасности в течение всего времени работы установки,
— процедуры организации помощи при несчастных случаях.

Два специальных постановления по СПГ (от 8 октября 1962 г. и от 13 августа 1980 г.) скорее общие в плане позитивных правил, но придающие большую важность контролю со стороны властей, действуют в настоящее время.

Отметим, наконец, существование проекта регламентации по СПГ, называемого проектом "Macart" (Макарт) и подготовленного в 70-х годах, но который не был принят.

Основные предписания регламента или особые нормативы для СПГ касаются:

— установления расстояний между отдельными частями установки СПГ и окружающей средой (безопасность против утечек СПГ),
— реализации особых исследований чувствительности окружающей среды (сейсмическая активность, риск, вызванный близостью установок и т.п.),
— выбора конструкционных материалов, применяемых в криогенной технике и изготовление оборудования,
— конструкции резервуаров хранения СПГ (допустимая нагрузка, контроль хранимого СПГ и т.п.),
— конструкции противопожарных обвалований (рвов) (емкость, размеры и т.п.),
— классификация электрооборудования, расчет средств борьбы с последствиями возможного разлива СПГ (системы подачи воды, пены, порошка и т.п.).

4.11.2. Метановозы

Конструкция и сооружение метановозов являются объектом международного кодекса, установленного "Международной морской организацией". Этот кодекс "IMO газовый кодекс" ("IMO Gas Code") содержит два текста, постоянно обновляемых по мере разработки новых технологий транспорта СПГ; один из текстов относится к строящимся судам, второй – к построенным.

Кодекс в основном рассматривает следующие вопросы:

— контроль грузового отсека (вторичный барьер, пространство между оболочками, давление и температура СПГ);
— противопожарная безопасность;
— жизнестойкость судна в случае аварии и т.п.

Кроме того, в процессе эксплуатации метановоз должен быть зарегистрирован в одном из классификационных обществ, которое гарантирует его конструкцию и проверяет, что его эксплуатация осуществляется в соответствии с правилами.

Наиболее крупными классификационными обществами являются:

— Регистр Ллойда (Lloyd's Register),
— Бюро Веритас (Bureau Veritas),
— Американское министерство торгового флота (American Board of Shipping).

В большинстве стран при перевозке грузов метановозами в порты доставки применяются также:

— международная регламентация по кодексу, разработанному IMO: "Международный морской Кодекс для опасных грузов",
— местная регламентация с предписаниями, установленными портовыми властями, которая учитывает местные морские условия.

Предписания касаются:

— схода в порт,
— маневров судна,
— процедур передачи груза и т.п.

5 СЖИЖЕННЫЕ НЕФТЯНЫЕ ГАЗЫ (СНГ)

5.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СНГ В ЕМКОСТЯХ

5.1.1. Спецификации

5.1.1.1. Таможенные спецификации

Законы	Постановления
— Декрет № 62-1297 от 7 ноября 1962 г. — Закон № 66-923 от 14 декабря 1966 г. (*Официальный журнал* от 8 ноября 1965 г. и от 15 декабря 1966 г.).	— Постановление от 28 декабря 1966 г. — Постановление от 1 марта 1966 г. — Постановление от 22 декабря 1978 г. (*Официальный журнал* от 13 января 1967 г., от 31 марта 1976 г. и от 28 декабря 1978 г.)
Коммерческий бутан	Коммерческий пропан
Продукты: — Находятся в газообразном состоянии при температуре 15°С и давлении 101,3 кПа. — Имеют в жидком виде при температуре 37,8°С избыточное давление насыщенного пара меньше или равное 2,45 МПа по методу NFM 41-010 (AS ТМД 1267). — Содержат не более 90% по объему нормальных ненасыщенных ациклических углеводородов (кроме этилена и пропилена) или их отдельных изомеров. — Нижняя теплота сгорания должна быть более 5000 ккал (5,815 кВт · ч) на м^3 при температуре 0°С и давлении 101,3 кПа.	
— В составе продукта объем (в газовом состоянии) углеводородов с числом атомов углерода, равным 4, равен или более объема углеводородов с тремя атомами углерода. — Содержит не более 95% по объему этилена, пропилена, или нормального насыщенного ациклического углеводорода (за исключением метана или пропана) или их отдельных изомеров.	— В составе которого объем (в газовом состоянии) углеводородов с тремя атомами углерода больше объема углеводородов с четырьмя атомами углерода. — Содержит менее 99% по объему пропана, взятого отдельно.
Специальная жидкая горючая смесь (постановление от 30 декабря 1984 г.)	
— Смесь бутана и пропана, предназначенная для использования в качестве горючего в двигателях внутреннего сгорания.	
— Содержащие более 19% и менее 50% по объему пропана и пропилена.	

5.1.1.2. Административные спецификации

	Коммерческий бутан	Коммерческий пропан
Определение	Смесь углеводородов, представленная в основном бутаном и изобутаном и содержащая менее 19% по объему пропана и пропилена.	Смесь углеводородов, представленная в пропорции: около 90% пропана, пропилена и, кроме того, этан, этилен, бутан и изобутаны (бутен-1, метил-2 пропен)
Запах	Характерный	Характерный
Плотность (NF M 41-008)	Равна или больше 0,559 кг/л при 15°C, что соответствует 0,513 кг/л при 50°C по сравнительным таблицам ASTM-IP	Равна или более 0,502 кг/л при 15°C, что соответствует 0,443 кг/л при 50°C по сравнительным таблицам ASTM-IP
Давление насыщенного пара (NF M 41-010)	Меньше или равно 0,69 МПа при 50°C	Не менее 0,83 МПа при 37,8°C, обеспечивающее не менее 1,15 МПа при 50°C и не более 1,44 МПа при 37,8°C, обеспечивающее не более 1,93 МПа при 50°C
Содержание серы (NF M 41-009)		Не более 0,005% по массе (50 ppm)
Сернистые соединения (NF M 41-006)	Отсутствие реакции в опыте с плобитом натрия, называемом "Doctor Test special" (Специальный докторский тест)	
Коррозия медной пластины за 1 ч при 37,8°C (NF M 41-007)	Не более 1б	
Содержание воды	Отсутствие воды, отделяемой осаждением	Не определяется тестом с бромистым кобальтом (NF M 41-004)
Испарение (NF M 41-012)	Точка конца кипения ниже или равна 1°C по методу "точка при 95%"	Точка конца кипения ниже или равна 15°C по методу "точка при 95%"

	Специальная топливная сжиженная смесь
Состав	Более 19% и менее 50% по объему пропана и пропена (пропилена)
Избыточное давление паров (NF M 41-010)	Больше или равно 0,73 МПа при 50°C и меньше или равно 1,15 МПа при 50°C

Для бутана и пропана: постановление от 28 декабря 1966 (Официальный журнал от 13 января 1967 г.) и постановление от 3 сентября 1979 г. (Официальный журнал от 10 и 11 сентября 1979 г.).

Специальная топливная сжиженная смесь: постановление от 3 сентября 1979 г. (Официальный журнал от 10 и 11 сентября 1979 г.).

5.1.2. Организация распределительной сети

Французский рынок снабжается десятком различных сортов коммерческого пропана и бутана*. Поставляемые продукты отвечают официальным спецификациям. В 1988 г. число наполнительных пунктов, принадлежащих различным обществам, составляло 80. Они были расположены на всей территории метрополии и на Корсике. Торговая сеть, включающая все распределительные общества, состоит из 70 концессионеров или местных депозиторов, снабжает около 200000 местных дистрибютеров, расположенных по всей территории. Число потребителей составляет около 10 миллионов.

Поставка продуктов производится или в баллонах или в цистернах. Последний способ (налив в емкости потребителя) в настоящее время находит все большее распространение у наиболее емких потребителей для хозяйственного и промышленного использования.

** Список поставщиков, в котором перечислены сорта (марки) пропана и бутана может быть получен у Французского Комитета пропана и бутана по адресу: Париж, 75008, улица Хош (Hoche), 4.*

5.1.3. Баллоны

Изготавливаются из специальной стали в соответствии со спецификацией норм М 88-701 для бутана и М 88-702 для пропана.

Помимо различных способов контроля, реализуемых распределительными организациями, все баллоны проходят гидравлические испытания под давлением 3,0 МПа в соответствии с регламентом на аппараты под давлением газа (декрет от 18 января 1943 г. и постановление от 23 июля 1943 г. и 26 октября 1984 г.). Это значение давления утверждено для метрополии Франции и соответствует максимальной температуре 50°С. На 1988 г. во Франции было 48 миллионов баллонов.

Помимо обычных бытовых баллонов, представленных в нижеследующей таблице, существуют баллоны меньшей емкости, в частности для кэмпинга.

5.1.4. Резервуары хранения небольшой емкости у потребителя

На рынке мелкого опта емкость резервуаров составляет от 500 до 5000 кг. В 1988 г. число резервуаров пропана, установленных у потребителей, в большинстве своем для домашнего потребления или ремесленников, оценивалось в 540000. Эта категория потребителей снабжается автоцистернами, снабженными объемными расходомерами, на дому (у потребителя).

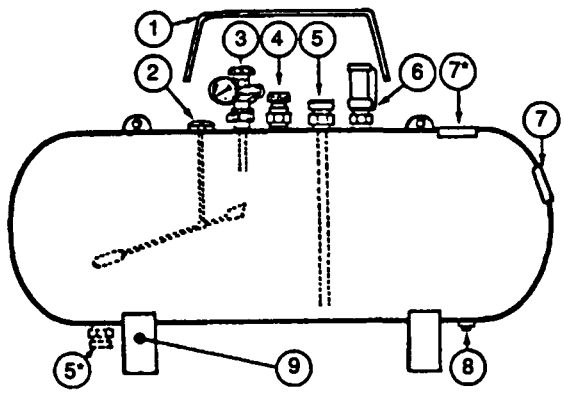
В оптовой торговле, обслуживающей больших промышленных потребителей, емкость резервуаров хранения часто достигает 1000 м^3, то есть около 50 тонн СНГ. Часто этого количества не хватает большим потребителям. Снабжение этой категории потребителей осуществляется или распределительными автоцистернами (с объемными счетчиками) или транспортными автоцистернами, оборудованными разгрузочными насосами (или без них), или железнодорожными цистернами. Оборудование одного из резервуаров представлено на рис. (см. рисунок с. 512).

	Бутан	Пропан	
Рабочее давление в полном баллоне при 15°С	около 0,15 МПа	около 0,7 МПа	
Обычные бытовые баллоны			
Количество газа (около)	13 кг	13,0 кг	35 кг (от 30 до 35)
Масса пустого баллона (около)	11 кг	12,5 кг	37 кг
Приблизительная масса полного баллона	24 кг	25,5 кг	72 кг
Максимальный внешний диаметр	30 см	31,0 см	30 см
Максимальная общая высота	56 см	61,5 см	147 см

Характеристика баллонов.

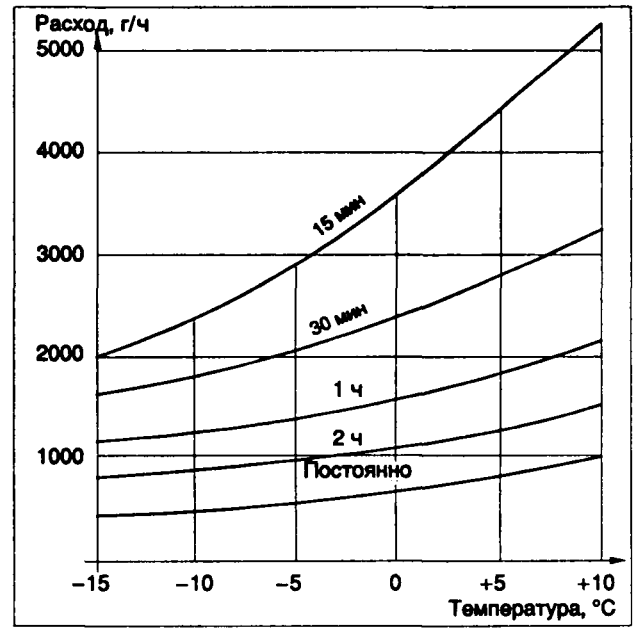
	Номинальная емкость						
	500 кг	1 000 кг	1 750 кг	2 500 кг	3 200 кг	3 500 кг	5 000 кг
Внешний диаметр (мм)	800	1 000	1 200	1 200	1 200	1 500	1 500
Ширина колен (мм)	450	450	800	800	800	1 000	1 000
Расстояние между опорами	1 400	1 400	2 000	3 000	4 400	3 000	3 000
Расстояние до земли (мм)	150	150	150	150	150	150	250
Расстояние между подъемными кольцами (мм)	1 200	1 200	1 200	2 200	2 200	1 200	1 600
Диаметр отверстий для заделки (в бетон) (мм)	23	23	23	23	23	23	23
Длина корпуса (мм)	2 500	3 200	3 850	5 450	7 050	4 960	6 630
Максимальная ширина опор	70	80	100	100	100	150	200
Внутренний объем (л)	1 140	2 280	3 990	5 700	7 300	7 980	11 400
α_{min} (°)	12	12	20	20	20	25	25
β_{min} (°)	20	20	20	20	20	20	20
$\alpha + \beta_{max}$	45	45	50	50	50	55	55

Характеристики резервуаров хранения небольшой емкости у потребителя (нормы NF M 88-706 и 88-708).



1. Крышка с запорами
2. Магнитный измеритель уровня
3. Раздаточный газовый кран с трубкой максимального уровня и манометром (факультативно)
4. Двойной наполнительный клапан
5. Клапан разгрузочный жидкости с заборной трубкой
5*. Клапан разгрузочный жидкости в нижней части резервуара (старые модели)
6. Предохранительный клапан, смонтированный на отсекающем клапане
7. (или 7*) Паспорт резервуара
8. Сливная пробка
8. Место крепления заземления

Оборудование одного из резервуаров небольшой емкости.



Средний расход баллона с пропаном.

5.1.5. Состав газораздаточного пункта

5.1.5.1. Баллоны

5.1.5.1.1. Средний расход баллона

Температура помещения (°С)	Средний расход (г/ч) баллона 13 кг в зависимости от времени пользования				
	15 мин	30 мин	1 час	2 часа	постоянно
+5	1 250	850	500	350	200
+15	1 600	1 100	800	600	400

5.1.5.1.2. Расчет количества баллонов, необходимых для одного пункта

Подсчитать сумму расходов в граммах в час всех аппаратов установки. Разделить полученный результат на расход одного баллона в течение 15 минут. Подсчитать сумму расходов в граммах в час всех аппаратов установки за исключением аппаратов нагрева воды.

Разделить полученный результат на расход, который может дать один баллон за час работы. Подсчитать сумму расходов в граммах в час всех аппаратов нагрева воды. Разделить этот результат на расход, который может дать один баллон в режиме постоянной работы.

Определить наибольшую из трех полученных величин (округлив до ближайшего целого числа) для подсчета числа *n* баллонов одного пункта (рабочих баллонов). Пункт в целом должен иметь *n* баллонов рабочих и *n* баллонов резервных,независимо от их единичной емкости (13 или 35 кг).

Помимо количества рассчитанных таким образом баллонов, рекомендуется, чтобы общая емкость поста (рабочая и резервная) обеспечивала бы потребителю автономию потребления в течение одного месяца.

5.1.5.2. Резервуары

5.1.5.2.1. Емкость

В любом случае вместимость резервуаров определяется в зависимости от способа снабжения, уровня потребления, места установки и постоянного или сезонного характера потребления.

5.1.5.2.2. Максимальный постоянный расход малых резервуаров пропана (прекращение отбора при 25% емкости).

Средние коэффициенты умножения вышеуказанных расходов в режиме непостоянного использования
2 часа в день × 2
4 часа в день × 1,3

В случае повышения потребности (например, при расширении установки) можно обеспечить бесперебойное снабжение аппаратов или увеличивая емкости хранения (увеличение благодаря расширению площади массообмена) или установив испаритель.

5.1.6. Пункт хранения баллонов

5.1.6.1. Состав баллонного пункта

Бутан	Пропан
Простой пункт:	
Баллон с редуктором и гибким шлангом по нормам (NF газ) с длиной до 2 м.	Емкость снаружи, поскольку возможен отбор до – 40°C (Д.Т.U. № 61,1).
Двойной пункт:	
Два обвязанных вместе баллона с автоматическим или ручным переключением внутри жилого помещения (обвязка чаще всего медными трубками).	Пункт раздачи имеет два баллона или две группы баллонов, связанных автоматическим переключателем.

5.1.6.2. Несколько правил безопасности, касающихся пунктов хранения баллонов (постановление от 2 августа 1977 г. Д.Т.U. 61 - 1)

В общем случае сосуды, содержащие углеводороды, не должны подвергаться действию источников тепла, способных их нагревать до температуры более 50°C.

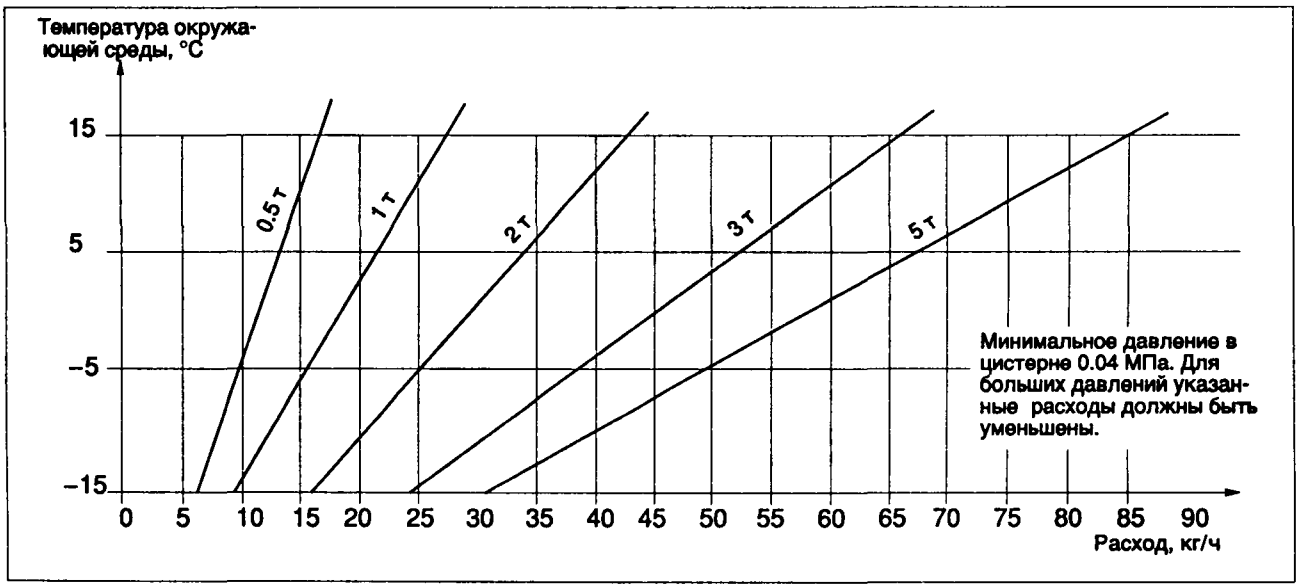
5.1.6.2.1. Бутановые баллоны

Бутановые баллоны подсоединенные или нет, могут устанавливаться в регламентируемых проветриваемых помещениях, снабженных в определенных случаях низким навесом. Они обычно устанавливаются вблизи газопотребляющих установок. Используемые шкафы должны иметь вентиляционные отверстия вверху и внизу. Тем не менее, запрещено хранить в одном помещении более одного не подсоединенного к потребителю сосуда с коммерческим бутаном емкостью более 10 литров.

5.1.6.2.2. Пропановые баллоны

Пропановые баллоны, подсоединенные или нет, емкостью более 6,5 литров (2,8 кг) должны находиться снаружи жилых помещений в укрытиях, отделенных от жилых помещений, но могущих к ним примыкать.

Эти сосуды должны находиться на горизонтальных ровных и устойчивых площадках, которые не должны быть на всем своем протяжении ниже уровня окружающей местности. Они должны быть в принципе удалены не менее чем на 1 метр от отверстий в жилых помещениях, расположенных на уровне земли и от канализационных колодцев, не защищенных сифоном (статья 6, 112 Д.Т.U. № 61.1 указывает меры предосторожности в том случае, если эти условия не могут быть соблюдены).



Максимальный непрерывный расход для небольших резервуаров пропана.

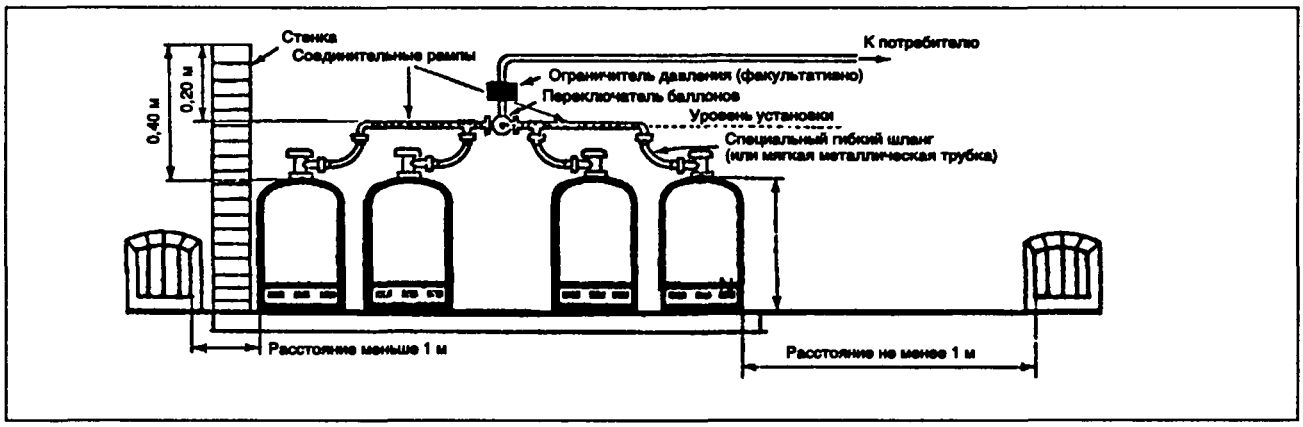
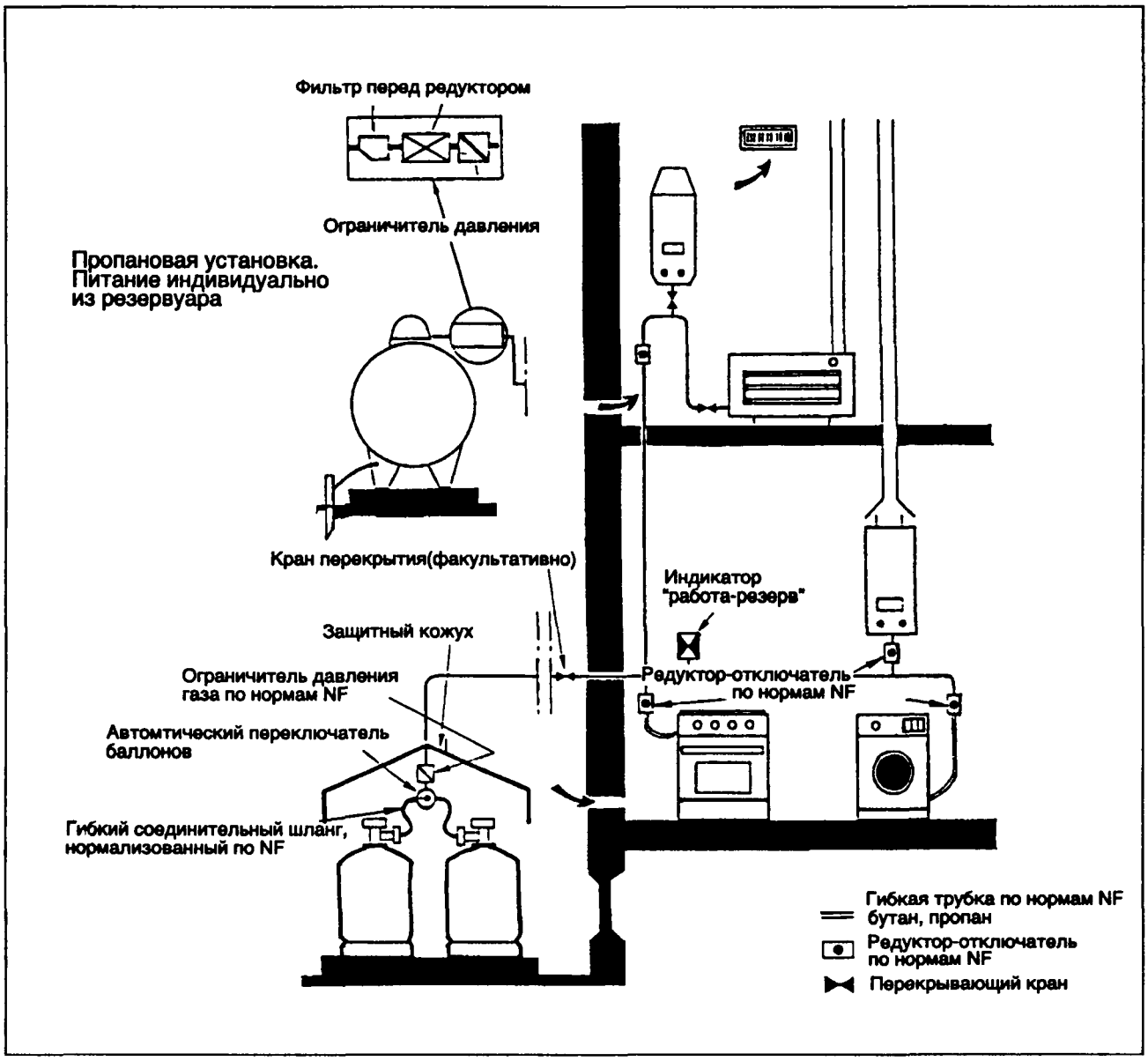


Схема установки пункта пропановых баллонов.



Пример домашней установки с постоянным питанием из фиксированного резервуара или пункта с баллонами пропана. Общая отсекающая задвижка обязательна, если резервуар расположен более чем в 20 м от жилища.

5 СНГ

Баллонный пункт может располагаться или на открытом воздухе или в укрытии. Укрытие может примыкать к зданию или быть встроенным в него при условии, что в нем будут находиться только баллоны с трубопроводами, их обслуживающими и что укрытие будет отвечать некоторым условиям.

Эти условия перечислены в статьях 1 - 2 Д.Т. U. № 61-1: "Инструкции относительно общих обустройств, в особенности в части, касающейся верхней и нижней вентиляции через отверстия 200 см² каждое.

5.1.6.2.3. Пункты пропановых баллонов

Пункты пропановых баллонов должны быть снабжены:

— или переключателем, позволяющим после операции переключения изъятие пустого (или пустых) баллонов, вентили которых должны закрываться без утечки газа в атмосферу, обеспечивая одновременно непрерывную и постоянную подачу пропана к различных аппаратам установки.

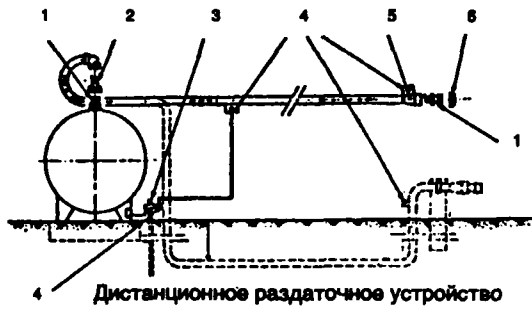
— или устройством отсечки, расположенным перед редуктором первой ступени, это устройство не должно позволять опорожнение системы трубопроводов во время замены пустого баллона полным.

Соединение баллонов может быть сделано:

— или с помощью металлических трубок,

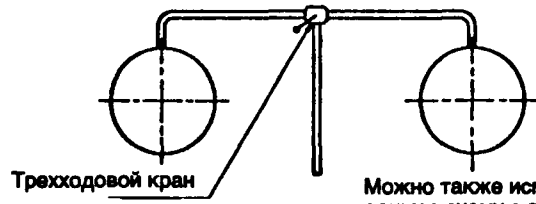
— или с помощью гибкого шланга NF газ.

Защитная стенка обязательна только в случае, если баллон расположен на расстоянии менее 1 м от двери здания, расположенной на том же уровне или ниже уровня баллона.

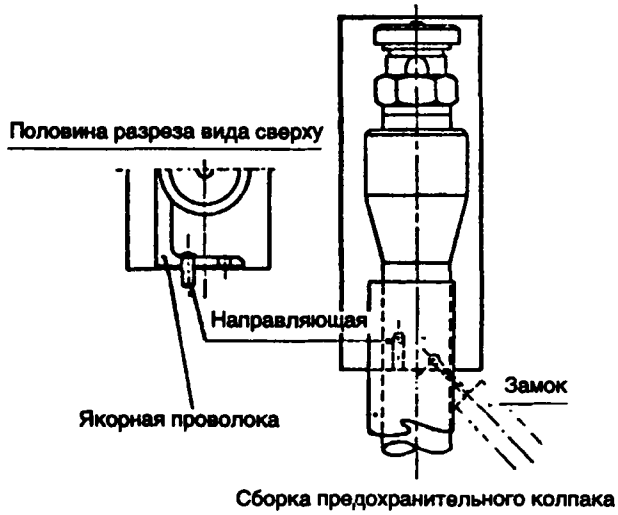


Дистанционное раздаточное устройство

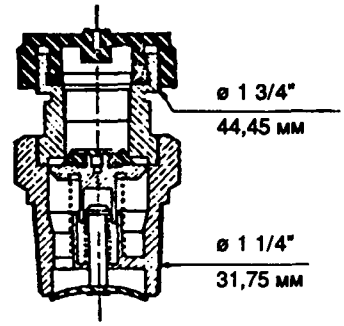
1 – Двойной наливной клапан
2 – Промежуточное соединение
3 – Заземление
4 – Латунная пластинка, припаянная для выравнивания потенциалов
5 – Переводник из кованой стали
6 – Пробка



Питание от двух резервуаров



Сборка предохранительного колпака



Двойной наполнительный клапан (разрез)

Устройства налива стационарных резервуаров.

5.1.7. Пункт стационарных резервуаров

5.1.7.1. Размещение

Пункт (пост) может быть размещен:
— над поверхностью земли:
  · на открытой площадке;
  · в укрытии
— под землей:
  · полностью зарытым в землю,
  · помещенным в траншею.

Он не должен находиться внутри закрытого помещения. Наиболее часто резервуары располагаются в приподнятом положении, размещение в подземном положении или в траншее привело бы к большим осложнениям, связанным с необходимостью внешнего осмотра всех аппаратов под давлением раз в три года.

5.1.7.2. Использование ограничителя давления

Любой пункт, оборудованный стационарными резервуарами или баллонами, обычно снабжен ограничителем давления, смонтированным перед редуктором первой ступени, что позволяет не опрессовывать всю обвязку установки на давление 2,0 МПа (см.: постановление от 2 августа 1977 г., статья 9 Д.Т.U. № 61,1, глава XI технических требований).

5.1.7.3. Устройство налива стационарных резервуаров (постановление от 30 июля 1979 г., статья 7 и 9)

Устройство налива показано на рисунке с. 515. Резервуар должен иметь двойной клапан (или любое другое устройство, обеспечивающее одинаковую безопасность) вмонтированный во входное отверстие. Если шланг автоцистерны или железнодорожной цистерны не достает до наливной горловины резервуара, необходимо использовать выносную горловину. Выносная горловина также должна иметь двойной клапан (или любое другое устройство, обеспечивающее равную безопасность) на своем входном отверстии.

Входное отверстие выносной горловины должно находиться не менее 2 м от мест, указанных в статье 7, за исключением дорог, расстояние до которых не лимитируется.

Если заливная горловина располагается на обочине дороги, она должна находиться в закрытом несгораемом ящике и быть закрыта на замок (завинчена). Заливная горловина должна размещаться таким образом, чтобы операции налива не мешали бы входу и выходу из зданий общего пользования. В любом случае заливная горловина должна быть оборудована соединительной муфтой, позволяющей герметичное подсоединение наливного шланга.

5.2. Распределительные сети сжиженных нефтяных газов

В соответствии с потребностями используются несколько сетей:
— распределение СНГ в чистом виде (преимущественно пропана),
— распределение смеси воздуха с пропаном в двух вариантах:
  · пропано-воздушная смесь с теплотой сгорания 7,6 кВт · ч · м$^{-3}$ – смесь 28% пропана и 72% воздуха;
  · пропано-воздушная смесь с теплотой сгорания 15,7кВт · ч · м$^{-3}$ – смесь 57% пропана и 43% воздуха;
— распределение воздушно-бутановой смеси (газораспределительная сеть Газ де Франс на Корсике), в некоторых случаях эта сеть соединена с сетью природного газа в промышленных установках.

5.2.1. Подача СНГ в бытовые сети

В этих сетях наиболее часто используется пропан. Для того, чтобы пропан не переходил в жидкое состояние при температурах ниже 0°С, что часто наблюдается во Франции, давление на выходе второй ступени редуцирования (сетевое давление) ограничено величиной 0,175 МПа.

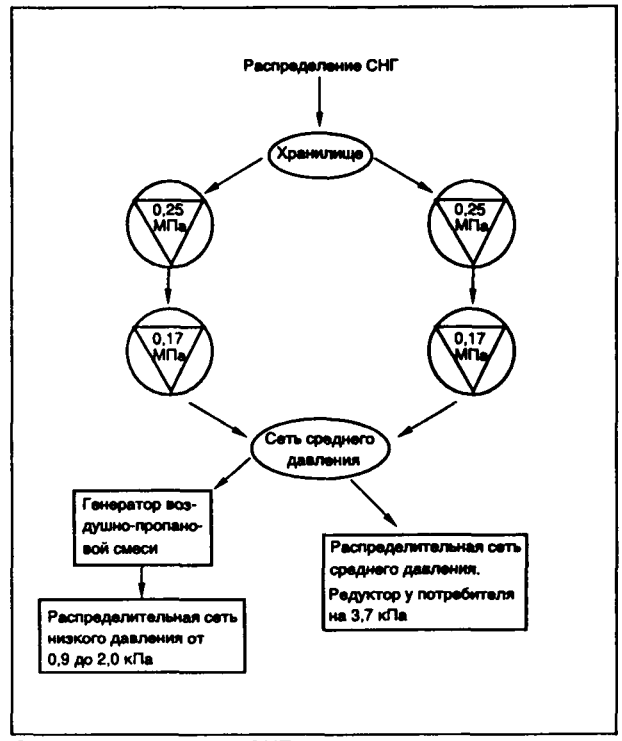
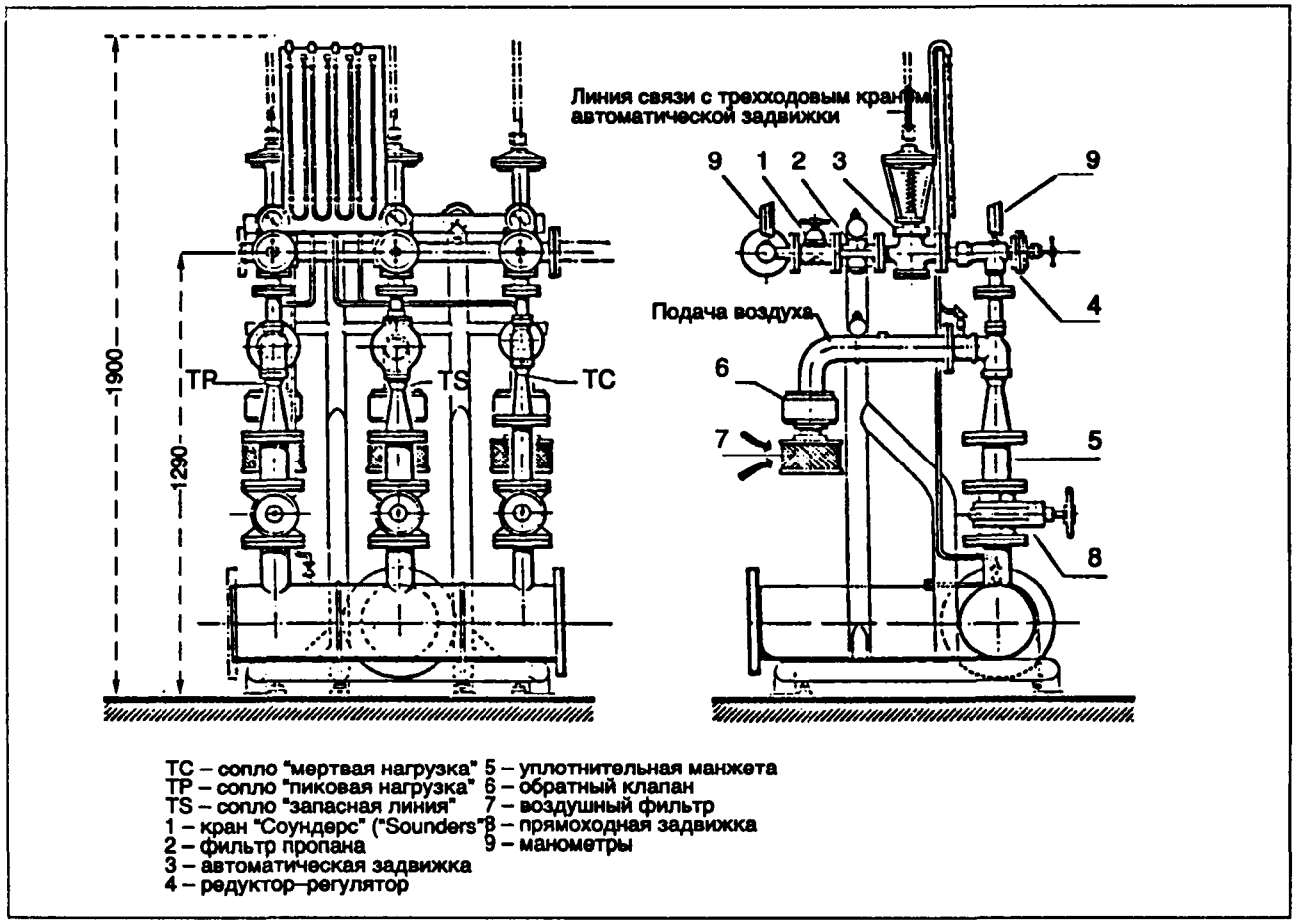
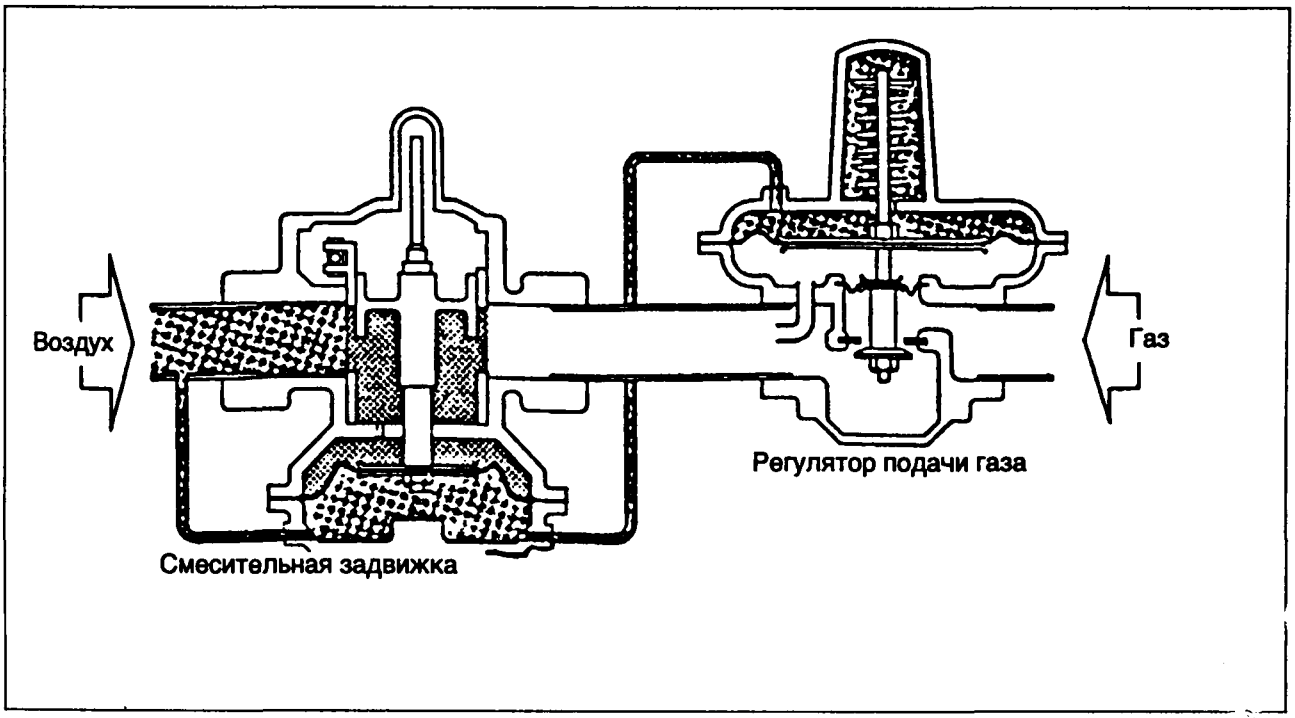


Схема распределения СНГ.



TC – сопло "мертвая нагрузка"
TP – сопло "пиковая нагрузка"
TS – сопло "запасная линия"
1 – кран "Соундерс" ("Sounders")
2 – фильтр пропана
3 – автоматическая задвижка
4 – редуктор–регулятор
5 – уплотнительная манжета
6 – обратный клапан
7 – воздушный фильтр
8 – прямоходная задвижка
9 – манометры

Воздушно-пропановый генератор с соплами.



Принцип работы пропорционального регулятора.

На рисунке с. 516 показана схема распределительной сети СНГ. Это давление позволяет избежать обратной конденсации при температурах ниже –15°С, которая во Франции в большинстве случаев соответствует температуре, вероятность появления которой соответствует 2% (за исключением гористой местности).

Для снабжения газораспределительных сетей чистым пропаном используют систему двойного последовательного редуцирования, каждая ступень давления состоит из двух редукторов, включенных параллельно. Регулировка выходного давления параллельно включенных редукторов чаще всего осуществляется на разных уровнях, что позволяет автоматическое включение параллельной линии, если по какой-либо причине первая линия не обеспечивает заданное давление. Двойное последовательное детандирование, установленное в головном пункте распределения, обеспечивает достаточную безопасность для предохранения сети против возможных повышений давления.

Можно также отметить, что давление часто еще раз понижается перед потребителем до 3,7 кПа с помощью общего редуктора перед зданием или индивидуального регулятора.

В определенных случаях большого газопотребления давление в сети составляет от 14,8 до 50,0 кПа.

5.2.2. Подача СНГ в смеси с воздухом

Как и в случае распределения чистых СНГ, чаще всего используется воздушно-пропановая смесь.

Различают два типа генераторов.

5.2.2.1. Смесители с соплами и буферным газометром

Эти генераторы снабжены несколькими линиями сопел, обычно тремя (одна линия "мертвых нагрузок", вторая линия "пиковых нагрузок" и третья линия "запасная"). Последовательность включения и отключения управляется движениями подъема или опускания небольшого газометра, выполняющего роль регулятора давления и буферной емкости.

Установка имеет также устройство безопасности в верхней части буферного газометра, которое реагирует на поступление пропана в линии сопел.

Эти аппараты позволяют покрыть гамму расходов от 25 до 700 м³/ч).

Давления подачи смеси:

— подача воздушно-пропановой смеси при 7,6 кВт · ч · м$^{-3}$ – 0,9 кПа;
— подача воздушно-пропановой смеси при 15,7 кВт · ч · м$^{-3}$ – 2,0 кПа.

Преимущество этих смесей состоит в том, что они легко позволяют заменить газы, которые подавались в сеть ранее:

— искусственный газ на смесь воздуха с пропаном при 7,6 кВт · ч · м$^{-3}$;
— природный газ на смесь воздуха с пропаном при 15,7 кВт · ч · м$^{-3}$.

5.2.2.2. Генераторы под давлением

Эти типы установок, мало распространенные во Франции, имеют то преимущество, что позволяют подачу пропано-воздушной смеси при 15,7 кВт · ч · м$^{-3}$ под давлением от 0,4 до 0,5 МПа.

Для реализации этих установок возможны два пути:

— используют предыдущую систему с газометром, имеющим емкость более 100 м³, затем сжимают смесь до требуемого давления,
— сжимают воздух до давления подачи в сеть и смешивают его с помощью регулятора пропорционально с таким количеством пропана, которое необходимо для получения требуемой теплотворной способности.

По соображениям безопасности калориметр, установленный в газораспределительной сети, может воздействовать на пропорциональный регулятор и уменьшить или увеличить количество пропана в смеси с воздухом.

Устройства распределения смеси до потребителя точно такие же, как и в случае подачи природного газа (см. главу 7: Распределение).

5.3. Регламентация в области хранения

Ниже излагается сжатая версия, которая не может заменить полное изложение вопроса.

5.3.1. Классификация установок

Сжиженные горючие газы включены в номенклатуру "установок, относящихся к группе для защиты окружающей среды" (декрет 77-1134 от 21 сентября 1977 г., принятый в соответствии с законом от 19 июля 1976 г.) под рубриками 211 и 211бис (и измененными декретами № 84-901 от 9 октября 1984 г.).

Рубрика 211, относящаяся к складам и хранилищам, различает:

— складирование в стационарных резервуарах,
— складирование в передвижных емкостях.

Первые классифицируются, если их вместимость превосходит 12 м³. Они подлежат декларированию, если хранимое количество меньше или равно 120 м³.

Количество (Q) хранимых бутана или пропана		Класс установки
В передвижных емкостях	В стационарных емкостях *	
Q ≤ 2 500 кг	Q ≤ 12 м³	Не существует
2 500 кг < Q ≤ 25 000 кг	13 м³ < Q ≤ 120 м³	Установки классифицированные, подлежащие декларации
Q > 25 000 кг	Q > 120 м³	Установки классифицированные, требующие разрешения

* Если СПГ из хранилища подается в наполнительную установку типа станции заправки полустационарных резервуаров горючего или станции заправки автоцистерн, такая установка ранжируется в том же классе, что и хранилище.
Если стационарная емкость подает СНГ на станцию заправки передвижных резервуаров (баллоны или контейнеры), то эта станция требует разрешения, независимо от класса хранилища.

Классификация установок сжиженных горючих газов.

При объеме более 120 м³ хранилища являются объектом, требующим разрешения.

Вторые, то есть склады в баллонах или контейнерах, классифицируются и требуют декларации, если их емкость находится в пределах от 2500 до 25000 кг. При емкости свыше 25000 кг они входят в класс складов, требующих разрешения.

5.3.2. Правила обустройства и эксплуатации

Склады жидких углеводородов, состоящие из наземных резервуаров, подчиняются правилам обустройства и эксплуатации, вытекающим из постановления от 9 ноября 1972 г. В соответствии с их классификацией, склады попадают под действие типового постановления 211 (15 января 1980 г.).

Не классифицированные склады попадают под действие постановления от 30 июля 1979 г. Те же правила используются для резервуаров емкостью менее 120 м³, покрытые грунтом (полузаглубленные и подоткосные). Для резервуаров емкостью сверх 120 м³ следует руководствоваться правилами для новых установок полузаглубленных и им подобных по постановлению от 9 ноября 1989 г.

5.3.2.1. Хранилища в мобильных емкостях (баллонах)

5.3.2.1.1. Хранилища (≤2,5 тонн)

5.3.2.1.1.1. Пункт подключенных к потребителю баллонов

Пункт баллонов, питающих домашнюю установку или общественное здание 5ª категории: руководствоваться постановлением от 2 августа 1977 г. (статья 19 - 24). Баллонный пункт для сельскохозяйственного потребления, ремесленного, промышленного и т.д.: руководствоваться в отсутствие специальных текстов постановлением от 2 августа 1977 г.

Баллонный пункт, питающий общественные здания 1, 2, 3 или 4ª категорий: руководствоваться статьями GZ 7 и GZ 8 правил противопожарной безопасности и паники в общественных зданиях. Проект установки отсылается в комиссию безопасности не позднее, чем за 1 месяц до начала работ (статьи GE 2 и GZ 3 правил безопасности).

5.3.2.1.1.2. Склады неподключенных емкостей

Склад баллонов и контейнеров, предназначенных для продажи: руководствоваться документом C.F. B.P. № 105 A (и для Парижа приказом № 73 - 16368 от 29 мая 1973 г.). В случае склада баллонов или контейнеров в общественных зданиях 1, 2, 3, 4ª категории: руководствоваться статьями GZ 7 и GZ 8 правил безопасности и административной ответственности, предусмотренными этим регламентом (GE 2 и GZ 3, цитированные выше).

5.3.2.1.2. Хранилища (>2,5 тонн)

Склады, емкостью выше 2,5 тонны, но менее или равной 25 тонн: эти склады подлежат декларированию в условиях, зафиксированных декретом № 77 - 1133 от 21 сентября 1977 г. (статья 25).

Технические предписания: типовое постановление 211. Склад емкостью более 25 тонн: склад требует разрешения по условиям, зафиксированным в декрете № 77 - 1133 от 21 сентября 1977 г. (статья 2 и 3). Технические предписания: постановление от 9 ноября 1972 г., 2ª часть (до 70м³) или 1ª часть (более 70м³).

Случай склада в общественных зданиях 1, 2, 3 и 4 категорий:

— те же административные условия в соответствии с классом (декларация или требование разрешения), что и для других складов. Кроме того, обязательства, предписанные статьями GE 2 и GZ 3 правил безопасности (проект установок представляется ответственному органу не менее чем за 1 месяц до начала работ);

— технические предписания: статьи GZ 5 и GZ 6 правил безопасности, которые требуют соответствия, по классификации, минимальным предусмотренным техническим условиям или по типовому постановлению 211 (склад до 25 тонн) или по постановлению от 9 ноября 1972 г. (склад емкостью более 25 тонн).

5.3.2.2. Хранение в стационарных емкостях (резервуарах)

5.3.2.2.1. Хранилища ≤12 м³

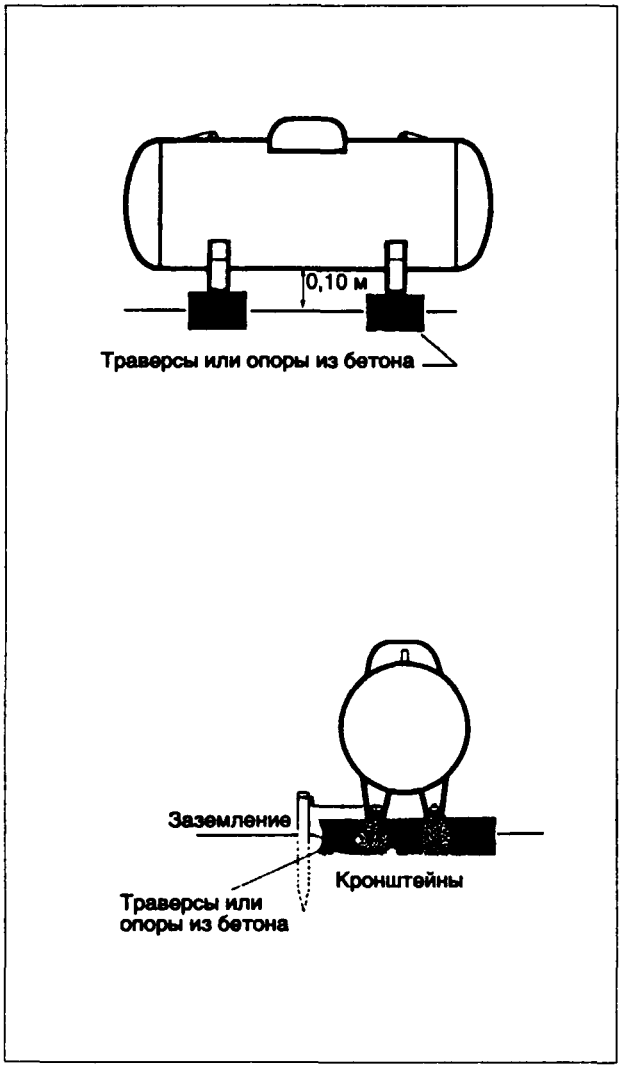
5.3.2.2.1.1. Вне зоны влияния общественных зданий 1, 2, 3 и 4ª категорий

Правила техники безопасности, утвержденные постановлением от 30 июля 1979 г.

5.3.2.2.1.2. В зданиях общественных 1, 2, 3 и 4ª категорий

Общие условия: правило техники безопасности, утвержденные постановлением от 30 июля 1979 г., и административная ответственность, предусмотренная правилами безопасности (GE 2 и GZ 3).

Дополнительные технические условия для всех хранилищ в стационарных резервуарах: статья GZ 9 правил безопасности.



Наземное хранилище. Общие условия монтажа (Репродукция с разрешения Жам-Эдартек).

5.3.2.2.2. Хранилища >12 м³

Склад емкостью более 12 м³ и менее или равной 120 м³. Технические предписания: типовое постановление № 211. Склад емкостью более 120 м³. Технические предписания: постановление от 9 ноября 1972 г. и 9 ноября 1989 г. для новых складов. *Случай склада в общественном здании* 1, 2, 3 и 4ª категорий емкостью более 12 м³: технические предписания: типовое постановление 211.

Примечание:

В декрете 77 - 1134 от 21 сентября 1977 г. содержатся пределы классификаций общих емкостей складов с "стационарных резервуарах" в соответствии со шкалой тоннажа, соответствующей массе продукта, содержащегося в стационарном резервуаре.

Декретом 84 - 901 от 9 октября 1984 г. изменена номенклатура классифицируемых установок и для тех же складов в "стационарных резервуарах" используется шкала в кубометрах, соответствующая общей номинальной емкости (объему) стационарных резервуаров.

Пример: "5 и 50 тонн соответствуют 12 и 120 м³".

5.3.3. Схема установки резервуаров

5.3.3.1. Стационарные неклассифицированные хранилища (постановление от 30 июля 1979 г.)

См. рисунки на с. 521 и 522.

5.3.3.2. Стационарные хранилища, подлежащие декларации

5.3.3.2.1. Расстояния, которые необходимо соблюдать

Эти расстояния рассчитываются от отверстий предохранительных клапанов или наливных горловин резервуара (см.рисунок на с. 523).

5.3.3.2.2. Минимальные горизонтальные расстояния между стенками резервуаров СНГ

Они составляют:

— 0,6 м, если один из резервуаров имеет вместимость более 12 м³ (5 т), но менее или равную 36 м³ (15 т),

— 1 м, если один из резервуаров имеет вместимость более 36 м³ (15 т), но менее или равную 84 м³ (35 т),

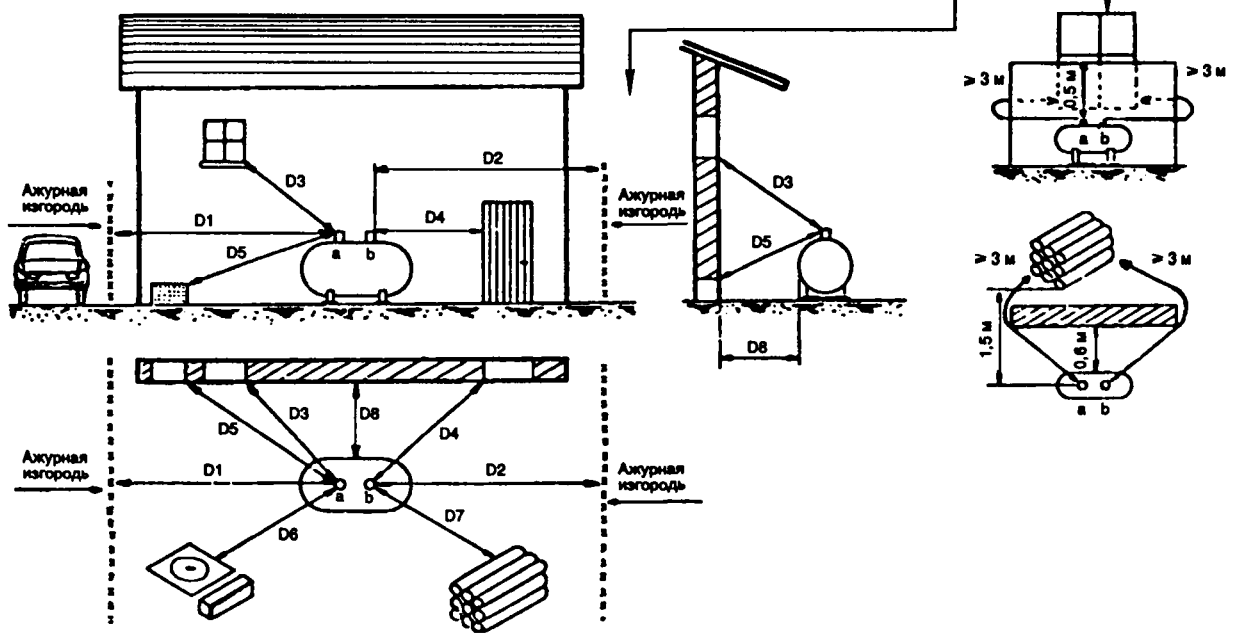
СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ НЕКЛАССИФИЦИРОВАННЫХ ХРАНИЛИЩ

Размещение с огнезащитной сплошной стеной (стойкой к огню в течение 1 ч).
- Верхний край стены должен быть выше не менее чем на 0,5 уровня отверстий a и b. Указанная защитная стенка должна быть расположена таким образом, что горизонтальная траектория возможных паров между отверстиями a и b и элементами снизу была бы более 3 м. С другой стороны, должны быть соблюдены минимальные расстояния, указанные ниже на схеме.

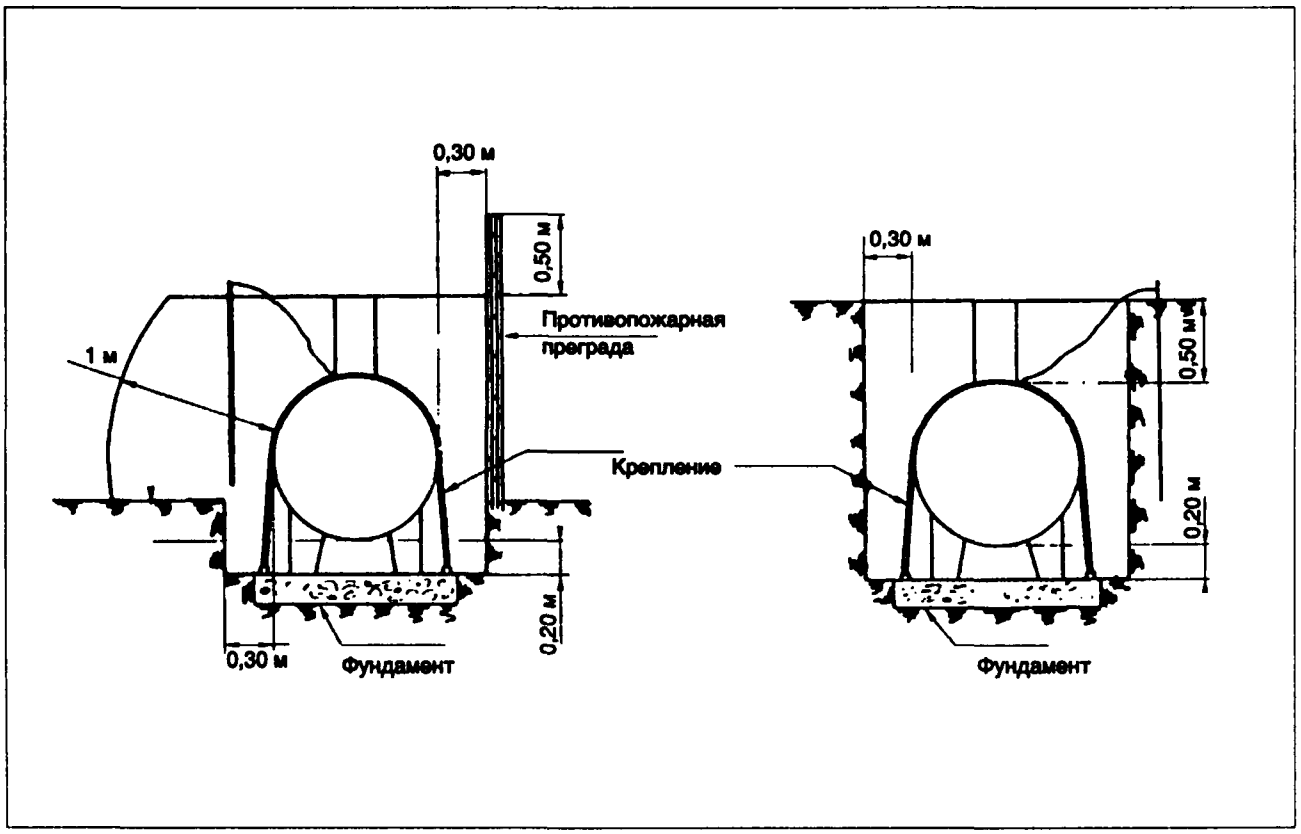
Размещение без огнезащитной стенки (брандмауэра)
Емкость хранилища: ≤ 8,4 м³ (3,5 т) | ≤12 м³ (5 т)

В случае выносного наливного устройства: расстояние от наливной горловины

Регламентированные элементы	Репер	Миним. дистанция, м	Миним. дистанция, м		Миним. дистанция, м
Расстояние до дороги	D1	0 м	3 м	5 м	1,5 м
Расстояние до частного участка	D2	2 м	3 м	5 м	1,5 м
Окно } обитаемого или занятого помещения, где имеется очаг или открытый огонь	D3	2 м	3 м	5 м	1,5 м/3 м(*)
Дверь } обитаемого или занятого помещения, где имеется очаг или открытый огонь	D4	2 м	3 м	5 м	1,5 м
Нижнее вентиляционное отверстие	D5	2 м	3 м	5 м	1,5 м
Люк канализации, не защищенный сифоном	D6	2 м	3 м	5 м	1,5 м
Склад горючих материалов (дрова, уголь)	D7	2 м	3 м	5 м	1,5 м
Свободное пространство вокруг цистерны	D8		0,6 м		0,6м



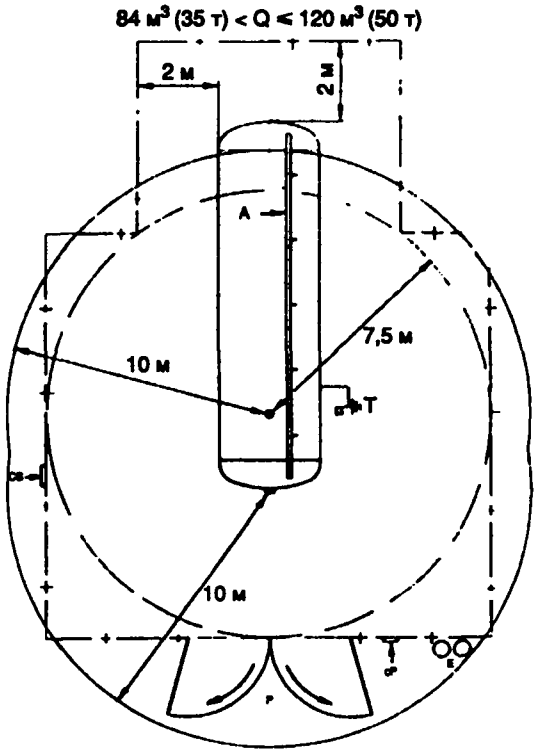
1,5 м, если низ окна находится ниже уровня верха стенки; 3 м, если низ окна находится выше.



Хранилища подземные и полуподземные. Подземные и полуподземные резервуары являются объектом спецификаций CFBP (Воспроизведено с разрешения Жам-Эдартек).

Размещение	Емкость склада		
	от 12 м³ (5 т) до 36 м³ (15 т)	от 36 м³ (15 т) до 84 м³ (35 т)	от 84 м³ (35 т) до 120 м³ (50 т)
1. Пункт раздачи жидких углеводородов	7,5	7,5	10
2. Стенка резервуара жидких углеводородов	10	10	20
3. Отверстия в здании (внутренние) кроме тех, что используются исключительно обслуживающим персоналом	6	10	15
4. Отверстия в жилых помещениях, бюро, ателье, внешних по отношению к зданию	7,5	15	20
5. Наименьшее расстояние до дорог с интенсивным движением, национальных дорог не классифицированных как дороги с интенсивным движением, и дорог местных, дорог внутри городских и железных дорог кроме тех, которые обслуживают здание и водных путей.	6	10	20
6. Общественные здания категорий с 1 по 4-ю: больницы и госпитали, школьные и университетские здания, детские сады, дома отдыха, культовые здания и музеи	15	25	75
7. Другие здания с 1 по 4-ю категории	10	20	60

Правила размещения стационарных хранилищ, подлежащих декларации.



Общие условия:

Ограждение минимальной высотой 2 м, помещенное на расстоянии 2 м от стенки резервуара*

Портал (дверцы) (P) из негорючего материала, открывающийся наружу и закрытый на замок.

Ключ портала (cp) в защитной оболочке

Правила безопасности (CS), вывешенные вблизи хранилища

Заземление (T) сопротивлением менее 100 Ом

Средства пожаротушения**

$Q \leq 36$ м³ (15 т)

Водозабор (A) со шлангом и брандспойтом

Два порошковых огнетушителя (E) по нормам NF-MI H 89 C

$Q > 36$ м³ (15 т)

Трубчатый ороситель (A)

Два порошковых огнетушителя (E) по нормам NF-MH 21 A, 233 B и C

Дополнительное оборудование:

84 м³ (35 т) < Q ≤ 120 м³ (50 т)

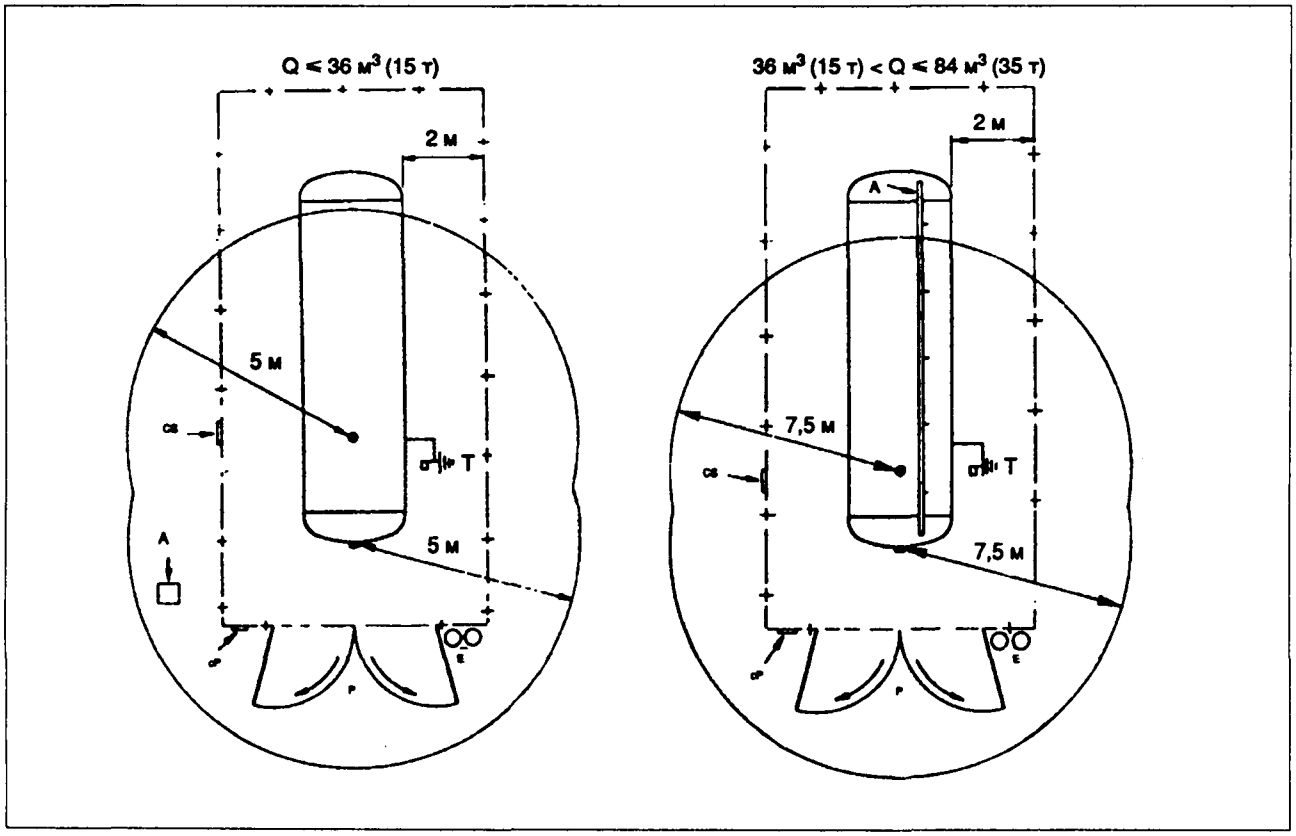
Ограждение, помещенное не менее чем в 7,5 м от предохранительного клапана*

---

* Ограждение не обязательно, если хранилище размещено в здании, обнесенном ограждением. В этом случае все задвижки и краны должны быть укрыты в ящике, крышка которого должна быть завинчена во внерабочее время.

** Не обязательно, если склад размещается около жилых зданий и относящихся к ним сооружений, которые расположены в жилых зонах, оборудованных общественными средствами пожаротушения.

Минимальные горизонтальные расстояния между стенками резервуаров СНГ (с разрешения Жам-Эдартек).



Условия оборудования наземных хранилищ, классифицированных и подлежащих декларации. Примечание: расстояние до наливного люка не регламентируется, если горловина выносная (с разрешения Жам-Эдартек).

— 2 м, если одни из резервуаров имеет вместимость более 84 м³ (35 т), но менее или равную 120 м³ (50 т).

Вокруг любого наземного резервуара должно быть свободное пространство не менее 0,6 м.

5.3.3.3. Особый случай хранилищ в общественных зданиях

Общественные здания входят в специальную регламентацию: Код строительства и жилья, статья R123 I - R123.55, P152.4, R 152.5 и правила противопожарной безопасности (брошюра 1011-1 и 1477 Официального журнала), в которых содержаться, с одной стороны, общие руководящие положения, а с другой стороны, особые положения в соответствии с типом здания.

По этой регламентации общественные здания объединены в две группы:

— здания 1ª категории (более 1500 человек), 2ª категории (от 701 до 1500 человек), 3ª категории (от 301 до 700 человек) и 4ª категории (менее 300 человек за исключением зданий, входящих в 5ª категорию);
— здания 5ª категории: здания, упомянутые в статье R123.14, в которых численность народа не достигает минимальной цифры, установленной правилами безопасности для каждого типа здания.

Здания 5ª категории не так строго регламентированы, как здания прочих категорий и предписания при сооружении хранилищ СНГ для них те же, что и описаны выше (но мэру дана возможность, после консультаций с ответственной комиссией по пожарной безопасности, контролировать ход строительства и эксплуатации).

Для зданий с 4 по 1ª категории:

— Обязателен административный контроль (рабочий план сооружения должен быть представлен не менее чем за месяц до начала строительных работ в комиссию по безопасности);
— здания должны отвечать техническим условиям, определенным правилами техники безопасности.

Для хранилищ СНГ эти технические условия перечислены в статьях от 25 июня 1980 г. (брошюра 1477-1).

Постановление министра внутренних дел от 23 октября 1986 г. изменяет текст статьи GZ 6 общих положений Правил противопожарной безопасности в общественных зданиях. Эти изменения предназначены заменить в редакции текстов постановлений названия "тонны" на "метры кубические" в части, касающейся стационарных резервуаров.

5.3.4. Стационарные хранилища, требующие разрешения

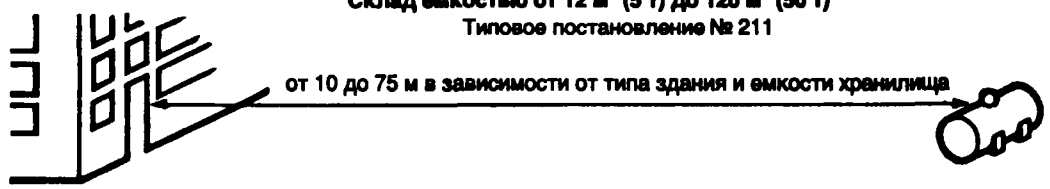
Имея в виду важность текста, обратимся к постановлению от 9 ноября 1972 г. и от 9 ноября 1989 г. или к документу, изданному Профессиональным нефтяным комитетом (75008, Париж, бульвар Курсель, 51).

Хранимое (Q) количество			
В баллонах (т)		В стационарных резервуарах (м³)	
Q < 25 т	Статья GZ 7 (пропан) или GZ 8 (бутан)	Q ≤ 12 м³	Постановление от 30 июля 1979 г. и статья GZ 9
2,8 т < Q ≤ 25 т	Типовое постановление 211	12 ≤ Q ≤ 120 м³	Типовое постановление 211
Q > 25 т	Постановление от 9 ноября 1972 г.	Q > 120 м³	Постановление от 9 ноября 1972 г. и от 9 ноября 1989 г.

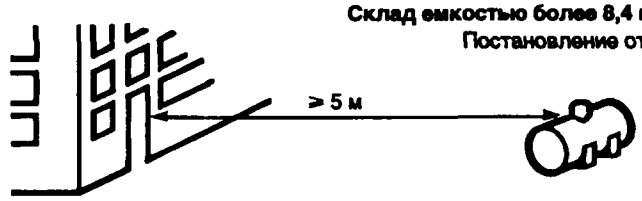
Краткая сводка технических условий использования хранилищ 1, 2, 3 и 4-й категорий

НАЗЕМНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ

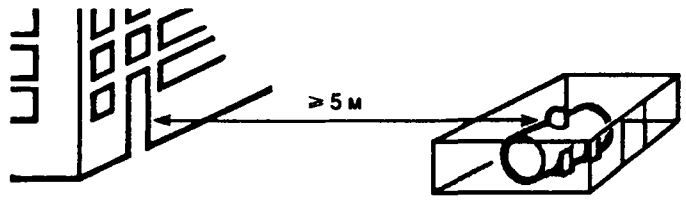
Склад емкостью от 12 м³ (5 т) до 120 м³ (50 т)
Типовое постановление № 211



Склад емкостью более 8,4 м³ (3,5 т),но не более 12 м³ (5 т)
Постановление от 30 июля 1979 г.

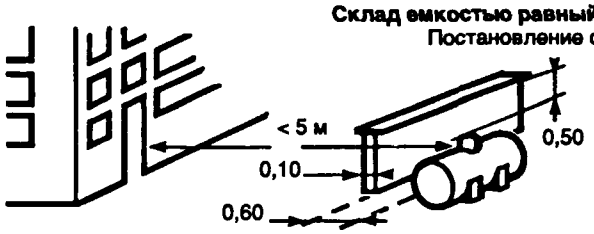


Если резервуар не доступен для людей: специальная защита не нужна



Если резервуар доступен для людей: изгородь минимальной высотой 2м, сооруженная не менее, чем в 60 см от стенок резервуара с дверью из негорючег сматериала, открывающейся наружу

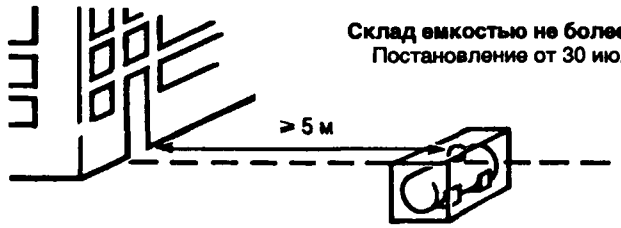
Склад емкостью равный или менее 8,4 м³ (3,5 т)
Постановление от 30 июля 1979 г.



В случае, если отверстие предохранительного клапана находится на расстоянии менее 5м: кирпичная стенка толщиной 0,1 м или из другого негорючего материала, верх которой выше на 0,5 м, чем предохранительный клапан

ПОДЗЕМНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ

Склад емкостью не более 12 м³ (5 т)
Постановление от 30 июля 1979 г.



Если расстояние равно или более 5 м, специальная защита не нужна

Хранилища в общественных зданиях: случай хранения в стационарных резервуарах. Краткие примеры применения статьи GZ 6 и дополнительной статьи GZ 9 регламента противопожарной безопасности и против паники в общественных зданиях. Для сооружения хранилища руководствоваться соответствующими техническими текстами. (Воспроизводится с разрешения Жам-Промогаз).

5.4. Газоснабжение установок потребителей

5.4.1. Редукторы-регуляторы давления

5.4.1.1. Бутан

Редукторы-регуляторы для бутана должны соответствовать нормам NF M88-765. Они могут устанавливаться по выбору или на вентиле баллона, или на устройстве подсоединения (коммутаторе) в начале трубопровода, или вблизи газопотребляющего аппарата.

Редукторы с фиксированным давлением на выходе, соответствующие предписанным нормам, питаются газом под давлением на входе в редуктор от 0,75 МПа (максимум) до 0,02 МПа (минимум). Номинальные нормализованные давления на выходе редуктора составляют 2,8 кПа и 11,2 кПа. Существуют два типа таких редукторов с расходом 1300 г/ч и 2600 г/ч.

5.4.1.2. Пропан

Редукторы первой ступени редуцирования устанавливаются на линии подачи пропана. Редукторы второй ступени устанавливаются около газовых приборов, они имеют отключатель безопасности и вентиль отключения. Эти устройства должны соответствовать норме NF Д36-303 и носить клеймо NF - газ. Номинальные нормализованные давления на выходе редуктора составляют 3,7 и 14,8 кПа. Тем не менее, для промышленных установок часто используют бóльшие значения.

5.4.2. Системы трубок

Выбор газоразводящих трубок показан в нижеследующей таблице.

Применяются только трубки стальные или медные. Использование свинцовых трубок для пропана и бутана запрещено. Дополнительное оборудование (соединения, краны): смотреть раздел "подключения и внутренняя разводка" (характеристики регуляторов давления, расхода Д.Т.U. № 61.1, раздел Технические требования).

5.4.3. Определение диаметра трубок подачи пропана и бутана к внутренней газовой аппаратуре (Правила, разработанные Французским комитетом пропана и бутана)

В нижеследующих таблицах указаны минимальные внутренние диаметры трубок (для заранее установленных потерь давления в 5%), которые нужно использовать в зависимости от длины и массового расхода газа. Колена, крестовины и краны должны учитываться поштучно на 1 м трубки. Расход, который указан в таблицах, равен сумме массовых расходов всех газовых аппаратов установки. Две номограммы (стр. 528) могут быть также использованы для непосредственных расчетов.

Расход газа (г/ч)		500	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
Длина трубки (м)	1	6	6	8	10	10	10
	2	6	8	10	10	12	12
	4	6	8	10	12	14	14
	6	8	10	12	14	14	16
	8	8	10	12	14	16	16
	10	8	10	14	16	16	18
	15	8	12	14	16	18	20
	20	10	12	14	18	18	20
	25	10	12	16	18	20	22
	30	12	14	16	20	20	22
	40	12	14	16	20	22	24
	50	12	14	18	20	22	24

Внутренние минимальные диаметры трубок (в мм) в зависимости от их длины и расхода газа. Пропан под давлением 3,7 кПа. Бутан под давлением 2,8 кПа.

5 СНГ

Расход газа (г/ч)		500	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
Длина трубки (м)	1	4 *	6	6	8	8	8
	2	4 *	6	8	8	8	10
	4	4 *	6	8	10	10	12
	6	6	8	8	10	12	12
	8	6	8	10	10	12	12
	10	6	8	10	12	12	14
	15	6	8	10	12	14	14
	20	6	8	12	12	14	16
	25	6	10	12	14	14	16
	30	8	10	12	14	16	16
	40	8	10	12	14	16	18
	50	8	10	14	16	16	18

* Минимальный калибр, установленный статьей 8.2 Д.Т.О. № 61 для внешних по отношению к зданию трубок равен 8 мм.

Внутренние минимальные диаметры трубок (в мм) в зависимости от их длины и расхода газа. Бутан под давлением 11,2 кПа. Пропан под давлением 14,8 кПа.

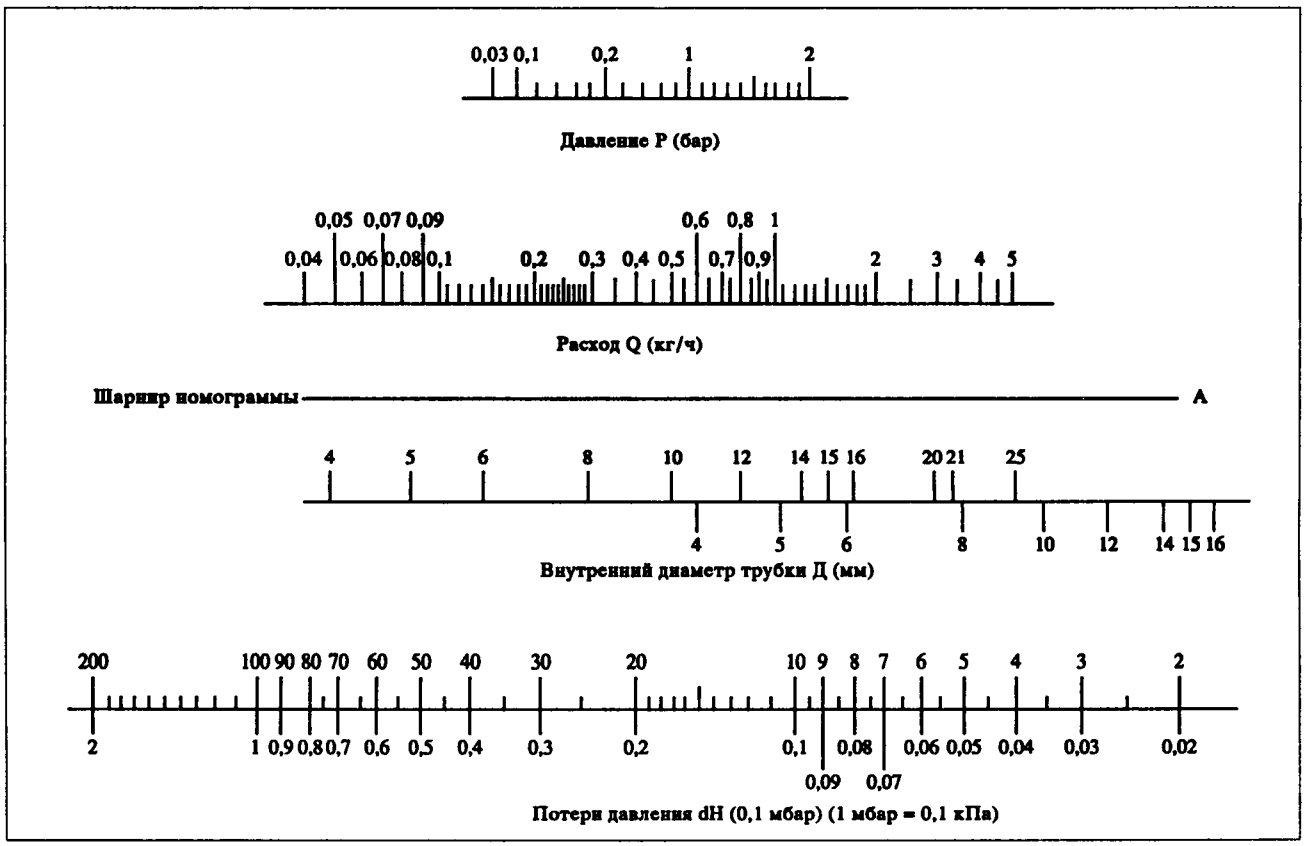
Расход газа (г/ч)		1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000	35 000	40 000	50 000
Длина трубки (м)	5	4 *	6	6	6	6	8	10	10	12	12	12	14	14
	10	4 *	6	6	8	8	10	12	12	14	14	14	16	16
	15	4 *	6	8	8	8	10	12	14	14	16	16	16	18
	20	6	6	8	8	8	12	12	14	14	16	16	18	20
	25	6	6	8	8	10	12	14	14	16	16	18	18	20
	30	6	6	8	8	10	12	14	16	16	18	18	20	20
	40	6	8	8	10	10	12	14	16	18	18	20	20	22
	50	6	8	8	10	10	14	16	16	18	20	20	22	24
	60	6	8	10	10	10	14	16	18	18	20	20	22	24
	70	6	8	10	10	12	14	16	18	20	20	22	22	24
	80	6	8	10	10	12	14	16	18	20	22	22	24	26
	100	6	8	10	12	12	16	18	20	20	22	24	24	26

* Для внешней к зданию разводки статьей 8.2 Д.Т.О. № 61 установлен минимальный калибр трубок 8мм,

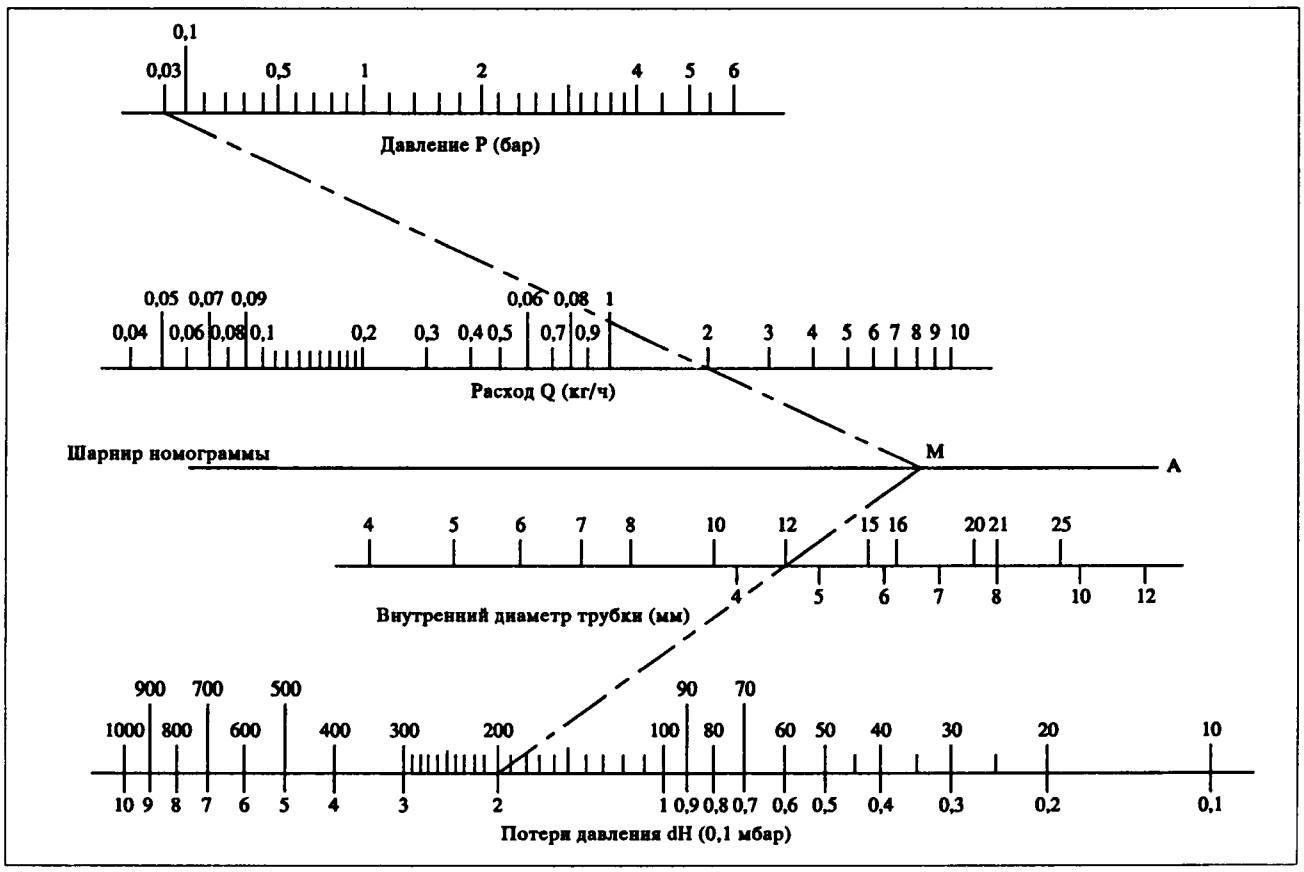
Минимальные внутренние диаметры трубок (в мм) в зависимости от их длины и расхода газа. Пропан среднего давления. Указанные выше значения были получены для базовых потерь давления 10 кПа с учетом того, что в холодное время года с базового хранилища может быть получено давление не более 50 кПа, а так же того, что при большом постоянном расходе может произойти охлаждение емкости, откуда подается газ, что приводит к снижению давления в начале газораздаточной сети.

Зная расход Q (кг/ч), который необходим в конце отрезка трубки, давление P в барах (0,1 МПа) на входе в данный отрезок, длину этого отрезка L и допустимые потери давления ΔH для этого отрезка, определяют потери давления на метр длины

$$dH = \Delta H/L.$$



Номограмма для бутана.



Номограмма для пропана.

5.5. ТРАНСПОРТ СЖИЖЕННЫХ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ

5.5.1. Конструкция резервуаров

Давление, создаваемое внутри зарытого резервуара СНГ, является функцией температуры и состава продукта. В зависимости от физического состояния загружаемого продукта, условий разгрузки, условий безопасности, экономических критериев конструктор делает выбор между тремя типами резервуаров:

— резервуар под давлением: температура продукта зависит от температуры окружающей среды и от излучения. Давление в резервуаре будет изменяться в зависимости от температуры в соответствии с кривой давления насыщенных паров продукта,
— полуохлаждаемый резервуар: с помощью вспомогательных устройств (возврат испарений, теплоизоляция) температура продукта будет поддерживаться ниже определенного предела так, чтобы давление в резервуаре не превышало десятых долей МПа,
— охлаждаемый резервуар: с помощью вспомогательных установок температура будет поддерживаться на уровне, позволяющем поддерживать давление в резервуаре, очень близкое к 0,1 МПа абсолютных (–43°С для коммерческого пропана и –3°С для коммерческого бутана).

Максимальное рабочее давление, которое необходимо принять в расчет, определено декретом № 63 от 18 января 1943 г. и последующими текстами. Минимальное испытательное давление должно быть в 1,5 раза больше максимально рабочего давления.

5.5.2. Основные правила перевозки резервуаров

Изготовление и эксплуатация средств перевозки резервуаров регламентируются "Регламентом перевозки опасных материалов" (RTMD) от 15 апреля 1945 г. и последующими текстами для перевозки по железной дороге и внутренним водным путям. Пропан и бутан регламентом отнесены к классу II (сжатые сжиженные газы или растворенные газы), раздел B (сжиженные газы) подраздел BI (критическая температура не более 70°С).

При железнодорожном транспорте французские правила основаны на Международном регламенте, касающемся транспорта опасных материалов по железной дороге (RID), измененная редакция от 1 июля 1977 г. Французские правила перевозки по дорогам имеют тенденцию к изменению на основе европейского регламента ADR (Advisory Route). Это регламент для перевозки морем опасных товаров (постановление от 12 марта 1980 г., измененное постановлением от 12 марта 1982 г. и последующими текстами), который регламентирует эксплуатацию судов.

5.5.3. Транспорт по железным дорогам и шоссе

Перевозки СНГ железнодорожными и автоцистернами производится под давлением. Благодаря установке специальной солнцезащитной оболочки на верхней части цистерн, правила Р.Т.М.Д. разрешают как для железнодорожных, так и автоцистерн, поддержание максимальной рабочей температуры на уровне 40°С, соответствующей давлению 1,666 МПа (испытательное давление 2,5 МПа) для пропана и 0,92 МПа (испытательное давление 1,38 МПа) для бутана.

5.5.3.1. Железнодорожные цистерны

5.5.3.1.1. Характеристики

Французский парк железнодорожных цистерн для перевозки сжиженных газов (бутан, пропан, аммиак) составлял на 1 января 1987 г. 3030 единиц, принадлежащих в большей части арендным предприятиям.

Номинальная полезная нагрузка составляет 20 тонн для двухосных и 45 тонн для четырехосных вагонов. Некоторые цистерны для бутана имеют емкость 50 тонн. По рекомендациям профессиональных организаций на всех современных средствах перевозки люки для погрузки и разгрузки находятся на нижней части цистерн и соединены горизонтально поперечным патрубком для обеспечения безопасности операций слива-налива с тем, чтобы операторы не находились на трапах. Это облегчает также операции подключения к цистерне.

В соответствии с рекомендациями международных профессиональных организаций и администрации железных дорог:

— клапаны устройств слива-налива цистерн должны находиться внутри цистерны и закрываться в направлении изнутри-наружу,
— управление этими клапанами должно осуществляться с земли с одной или другой боковой стороны цистерны,
— в случае внезапного отказа устройства управления клапанами (разрыва), последние должны автоматически закрываться,
— случайное или умышленное открытие клапанов должно быть невозможно во время перевозки применением запоров, позволяющих пломбирование таможенными службами в закрытом состоянии.

Соглашение, заключенное между различными владельцами цистерн, позволило насколько возможно унифицировать характеристики и размеры устройств подсоединения к цистернам.

В настоящее время применяются следующие устройства:

	Номинальная емкость цистерны		Габариты фланцев
	20 т	45 - 50 т	
	Диаметры отверстий		
Жидкая фаза	50 мм	80 мм	PN 40
Газовая фаза *	40 мм	50 мм	PN 40 простая муфта
* Большая часть предприятий использует отверстие, равное отверстию для жидкости для того, чтобы операцию налива производить струей без линии выравнивания давлений.			

С целью ускорения операций подсоединения-отсоединения в настоящее время ведутся исследования для разработки одного типа устройства быстрого соединения, использование которого было бы принято всеми владельцами цистерн.

5.5.3.1.2. Опознавательные знаки

Смотри карточку (ярлык) безопасности и код идентификации (опознавания) опасности № 23 (стр. 532).

5.5.3.2. Автоцистерны

5.5.3.2.1. Транспортные автоцистерны

Их емкость чаще всего такова, что позволяет полностью использовать разрешенную дорожными правилами грузоподъемность (38 тонн общего веса), что соответствует примерно 20 тоннам полезного груза. Для перевозки в общем случае используют полуприцепы и трактора.

5.5.3.2.2. Автоцистерны разовой доставки

Чаще всего емкость цистерн заключена между 6 и 9 тоннами и автомобили имеют средства перекачки и счетчики для разовой раздачи. Они имеют шланг, намотанный на барабан. Длина шланга до 40 м на современных автоцистернах.

Раздаточный насос приводит в действие или электромотором во взрывозащитном исполнении или вспомогательным дизельным двигателем или ведущим дизельным двигателем.

Специальные правила оборудования и эксплуатации для двух последних категорий приведены в статье 982 RTMD.

В общем случае автомобили, предназначенные для перевозки нефтепродуктов, должны отвечать определенным предписаниям безопасности, которые мы напомним ниже.

Для доставки потребителю чаще всего используют автоцистерны. Гораздо реже используют полуприцепы.

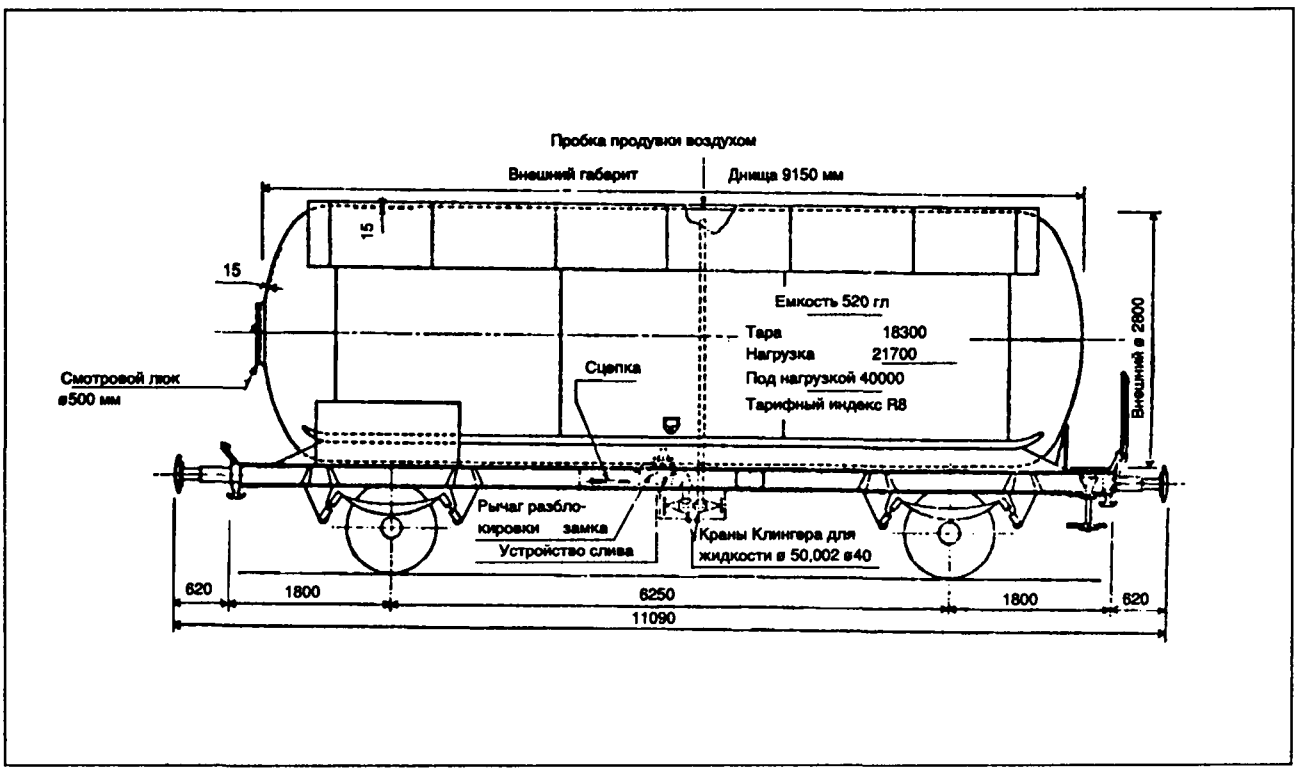
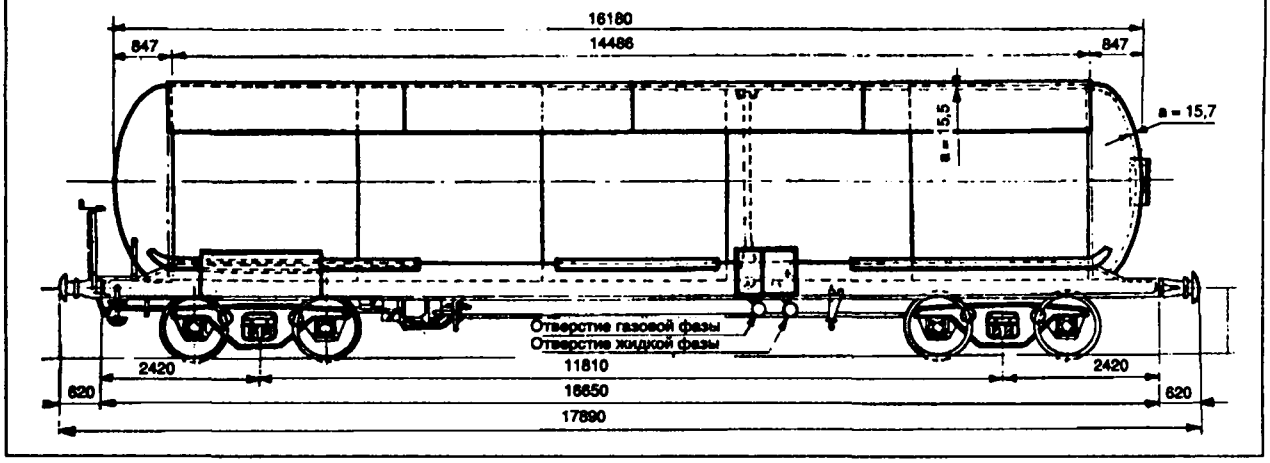
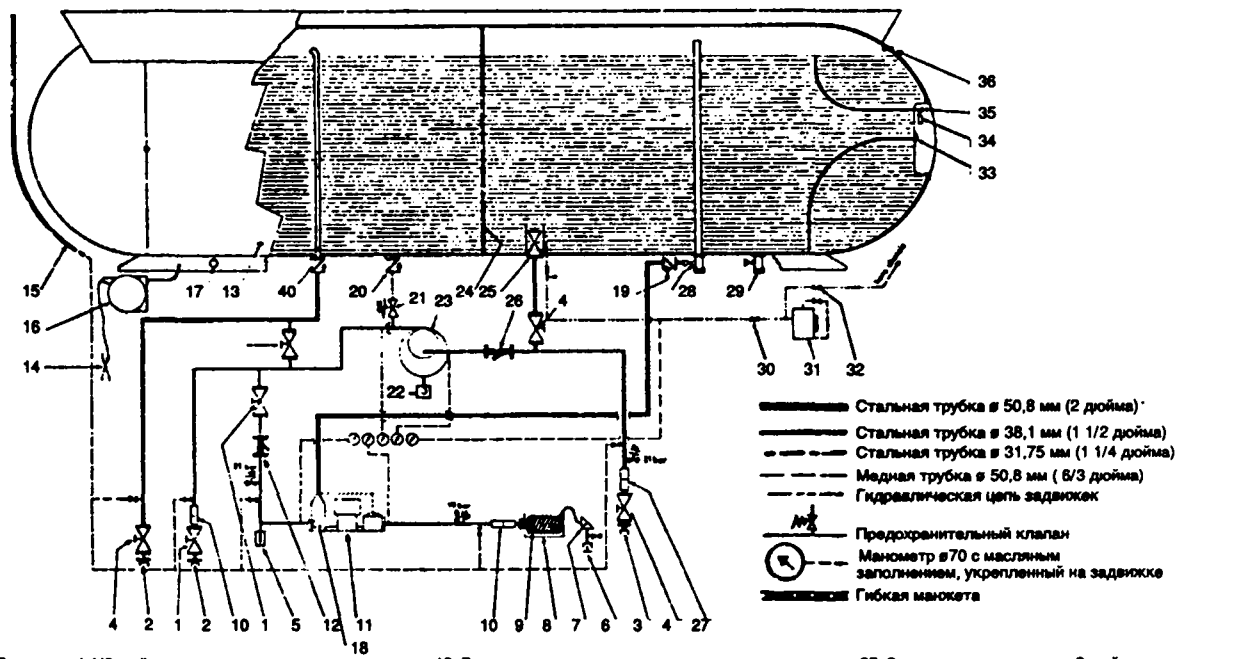


Схема железнодорожной цистерны для пропана или бутана грузоподъемностью 21 тонна.



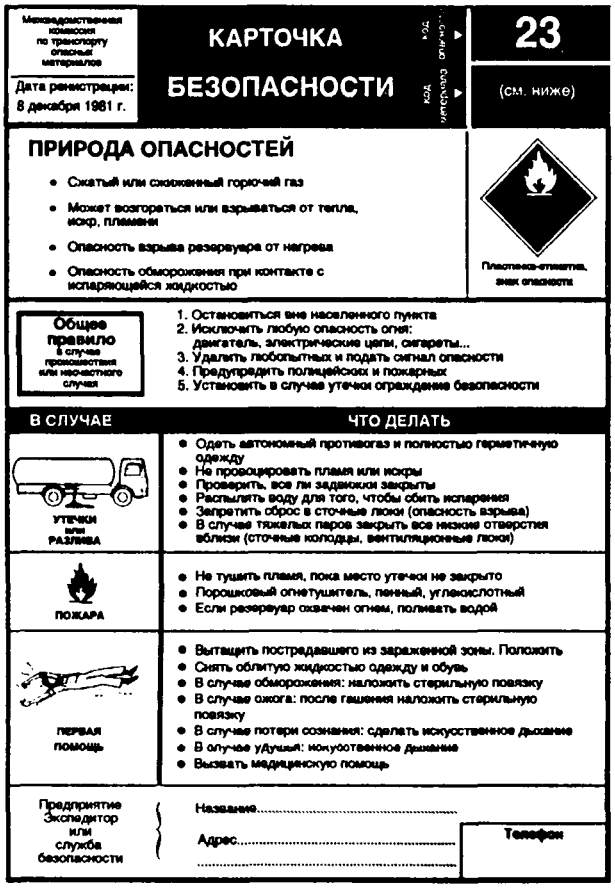
Характеристики железнодорожных цистерн 45 тонн			
	Цистерна	Краны	Шасси
Тара . . . . . 34,8 т. Нагрузка . . . . . 45,4 т. Общий вес . . . . . 80 т . Тарифный индекс . . . . R.9. .	Высокопрочная сталь (предел прочности R = 58/64) Емкость . . . . . 1081 гектолитров Внешний диаметр . . . . . 3 м Испытательное давление . . . . . 2,45 МПа Рабочее давление . . . . . 1,632 МПа Степень заполнения . . . . . 0,42 Защита против нагрева солнечными лучами	Краны закрепленные на резервуаре: — Донная задвижка Жестра (Gestra) — Горизонтальные патрубки соединения задвижек — Мерники верхнего и нижнего уровней	Платформа сварная, смонтированная на четырехосные международные колесные пары Воздушные тормоза. Винтовые тормоза с платформой

Схема железнодорожной цистерны для пропана или бутана большой грузоподъемности.



1. Задвижка 1 1/2 дюйма
2. Фланцевое соединение и быстроразъемное 1 1/2 дюйма
3. Фланцевое соединение и быстроразъемное 2 дюйма
4. Задвижка 2 дюйма
5. Соединение перед счетчиком
6. Соединение загрузки цистерны
7. Угловая задвижка 1 дюйм
8. Устройство намотки шланга
9. Гибкий шланг 1 дюйм (максимальной длиной 40 м)
10. Клапан-ограничитель расхода 1 1/2 дюйма
11. Счетчик 1 1/2 дюйма
12. Фильтр
13. Резервуар
14. Захом заземления
15. Дыхательная трубка
16. Устройство намотки кабеля заземления
17. Крепление заземления
18. Термометрическая трубка
19. Обратный клапан 3/4 дюйма
20. Обратный клапан 1 1/4 дюйма
21. Автоматический байпасс насоса
22. Управление муфтой включения насоса
23. Насос, приводимый главным двигателем 13 $м^3$/ч
24. Рассекатель
25. Задвижка гидропривода 2 дюйма
26. Фильтр 2 дюйма
27. Клапан-ограничитель расхода
28. Задвижка гидропривода 2 дюйма
29. Устройство дренажа
30. Кран безопасности, окрываемый ключом зажигания
31. Гидравлический привод
32. Задвижка сброса давления
33. Ротационный измеритель уровня
34. Манометр
35. Измеритель верхнего уровня
36. Прилив
40. Обратный клапан 3 дюйма

Типовая схема оборудования раздаточной автоцистерны.



Межведомственная комиссия по транспорту опасных материалов

Дата регистрации: 8 декабря 1981 г.

КАРТОЧКА БЕЗОПАСНОСТИ

23

(см. ниже)

ПРИРОДА ОПАСНОСТЕЙ

- Сжатый или сжиженный горючий газ
- Может возгораться или взрываться от тепла, искр, пламени
- Опасность взрыва резервуара от нагрева
- Опасность обморожения при контакте с испаряющейся жидкостью

Пластинка-этикетка, знак опасности

Общее правило В случае происшествия или несчастного случая

1. Остановиться вне населенного пункта
2. Исключить любую опасность огня: двигатель, электрические цепи, сигареты...
3. Удалить любопытных и подать сигнал опасности
4. Предупредить полицейских и пожарных
5. Установить в случае утечки ограждение безопасности

В СЛУЧАЕ	ЧТО ДЕЛАТЬ
УТЕЧКИ или РАЗЛИВА	• Одеть автономный противогаз и полностью герметичную одежду • Не провоцировать пламя или искры • Проверить, все ли задвижки закрыты • Распылять воду для того, чтобы сбить испарения • Запретить сброс в сточные люки (опасность взрыва) • В случае тяжелых паров закрыть все низкие отверстия вблизи (сточные колодцы, вентиляционные люки)
ПОЖАРА	• Не тушить пламя, пока место утечки не закрыто • Порошковый огнетушитель, пенный, углекислотный • Если резервуар охвачен огнем, поливать водой
ПЕРВАЯ ПОМОЩЬ	• Вытащить пострадавшего из зараженной зоны. Положить • Снять облитую жидкостью одежду и обувь • В случае обморожения: наложить стерильную повязку • В случае ожога: после гашения наложить стерильную повязку • В случае потери сознания: сделать искусственное дыхание • В случае удушья: искусственное дыхание • Вызвать медицинскую помощь

Предприятие Экспедитор или служба безопасности

Название.....

Адрес.....

.....

Телефон

Перевозные материалы отметить перевозчику или экспедитору	Код материала	Название материала
	1011	Нормальный бутан
	1012	Бутен-1
	1012	Цис-бутен-2
	1012	Транс-бутан-2
	1027	Циклопропан
	1033	Метиловый эфир
	1037	Хлорэтил
	1049	Сжатый водород
	1055	Метил-2 пропен
	1060	Смеси углеводородов с пропаном и пропандиеном
	1077	Пропен (пропилен)
	1959	Фтористый винилиден (R 1132 a)
	1962	Сжиженный этилен
	1965	Коммерческий бутан
	1965	Специальная горючая (жидкая смесь)
	1965	Смесь углеводородов с бутаном, содержащая более 1% ацетилена и более 1% бутадиена-1,2
	1965	Пропан коммерческий
	1969	Изобутан
	1971	Сжатый природный газ–смесь сжатых горючих газов
	1978	Чистый пропан
	2044	Неопентан
	2517	Хлор-1-дифтор-1,1 этан (R 142 b)

Код идентификации опасности № 23.

5.5.3.2.3. Спецоборудование автоцистерн для перевозки нефтепродуктов

Электрооборудование этих автомобилей отличается от того, что используется на обычных автомобилях по следующим позициям (цитируется по статье 963 R.T.M.Д.; Официальный журнал от 4 мая 1982 г.):

— аккумуляторная батарея: должна быть помещена в металлический аэрируемый ящик (аэрация против хода автомобиля), верхняя и боковые стенки изолируются негниющим материалом;
— электрические цепи: с водонепроницаемой оболочкой;
— соединения: в непроницаемых разводочных коробках, помещенных в местах, недоступных при штатном обслуживании автомобиля;
— отключатель батареи: биполярный, установленный как можно ближе к батарее. Он должен отключать все цепи (в том числе обмотку возбуждения генератора) за исключением указателя скорости и регламентных фонарей стояночного освещения, питание которых обеспечивается предохранителем, находящемся в том же месте, где и отключатель батареи.

То же касается нижеследующего оборудования:

— выхлопная труба: глушитель "нефтяной" (доступный очистке), помещенный спереди и снабженный пламегасителем, направленным назад с левой стороны по ходу движения;
— устройство воздушных тормозов: со специальным управлением на передней панели приборов, позволяющим одновременно установку на нуль кремальеры и герметичное закрытие подсоса воздуха закрытием обтюратора;
— замедлитель (при необходимости) с диодами "нефтяного типа".

5.5.3.2.4. Опознавательные знаки

См. карточку безопасности и код идентификации (опознавания) опасности на этой странице.

5.5.3.2.5. Огнетушители

На грузовике или тракторе должны быть установлены: не менее двух огнетушителей для двигателя и груза. На прицепе: один огнетушитель.

5.5.3.2.6. Карточка безопасности

Эта карточка с номером кода опасности № 23, установленным R.T.M.Д., должна быть вывешена в кабине во время перевозки.

5.5.3.2.7. Проверка и контроль

Проверка соответствия правилам и периодические осмотры, позволяющие получить разрешение на перевозку ("желтая карточка") производятся экспертом, уполномоченным министром, ответственным за транспорт.

5.5.4. Перевозка речными судами

В 1984 г. во Франции были только два речных судна, перевозящих СНГ. Этот способ перевозки также подчиняется правилам R.T.M.Д.

5.5.5. Наливные суда

Перевозка осуществляется или при обычной температуре, или при частичном или полном охлаждении продуктов.

В настоящее время существует много типов судов (под давлением, полу- или полностью охлаждаемые, универсальные). Выбор типа судна зависит от рода условий, в которых предполагается использовать судно, учитывая технические характеристики существующих хранилищ в пунктах погрузки и выгрузки и т.п.

Перевозка под давлением, которая использовалась на первых судах, в настоящее время применяется все меньше и меньше. Этот тип установок требует малого обслуживания, но имеет существенный недостаток – значительный вес цистерн по отношению к общему весу судна.

Низкие температуры для поддержания продуктов в жидком виде применяются во все большем масштабе на судах, начиная с грузоподъемности 5000 м^3. Продукты хранятся под атмосферным давлением в самонесущих или встроенных в корпус судна танках.

Технология перевозки в полуохлажденном виде все более используется для судов средней и малой грузоподъемности. Для погрузки из хранилища под давлением эти суда должны быть оборудованы холодильной установкой, позволяющей понизить температуру продукта до максимальной разрешенной величины в течение достаточно короткого времени. Эти суда по сравнению с судами под давлением имеют важные преимущества, заключающиеся в увеличении дедвейта (полной нагрузки) для данного объема (плотность увеличивается в обратном отношении к температуре), уменьшение веса цистерн и т.д.

Никакая из кратко описанных выше систем не удовлетворяет полностью требованиям по причине различий в типах хранилищ на суше и на борту. В самом деле, если судно под давлением или полуохлажденное судно не может загружаться из полностью охлажденного хранилища без предварительного нагрева продукта и разгружаться без охлаждения, то полностью охлажденное судно не может заправляться из хранилища под давлением или полуохлажденного хранилища без охлаждения или разгружаться без подогрева.

Решение, которое позволяет избежать этих неудобств, заключается в универсальности.

Это решение заключается в оборудовании судна танками из специальных сталей, которые позволяют или перевозить сжиженные газы под давлением или загружаться газом при низкой температуре, перенося температурный удар и сохранять газ при этой температуре. Другими словами, судно может загружаться и разгружаться газом при атмосферном давлении или газом под давлением. Оно может загружаться газом под атмосферным давлением и разгружаться газом под давлением после разогрева и, в случае длительного маршрута, загружаться под давлением и разгружаться под атмосферным давлением. Такое судно должно иметь мощные холодильную и нагревательную установки.

Мировой флот транспорта сжиженных газов (бутан, пропан, метан) оценивался на 1 января 1985 г. в примерно 670 судов общей вместимостью около 8 млн. м^3. Можно получить полный список и их характеристики в специальных ежегодниках, таких как "регистр танкеров сжиженного газа" ("Liquid Gas Tanker Register"), издаваемый Х. Кларксон и компанией (H. Klarkson and co ltd. Bishopgate. Londres. EC 2. Grande Bretagne).

Оценки для будущего двадцатилетия показывают, что нынешняя вместимость флота увеличиваться практически не будет.

Мы даем ниже, в качестве примера, список перевозчиков бутана и пропана под французским флагом (1 января 1985 г.).

— Генеральная морская компания:
Паскаль R 15022 м^3
— Газокеан:
Клод SR 1511 м^3
Пифагор R 14258 м^3
— Сервис и транспорт:
Мариана SR 2760 м^3
Сара Бэлла P 200 м^3
— Национальная навигационная компания:
Флюреаль R 85662 м^3

R: в охлажденном состоянии; SR – полуохлажденном; P – под давлением.

5.5.6. Трубопроводный транспорт

До настоящего времени этот способ транспорта сжиженных газов применяется лишь на коротких расстояниях и эта сеть не достигает размеров газо- и нефтепроводных сетей. Современные сооружения касаются в особенности отрезков трубопроводов, соединяющих на расстоянии нескольких километров хранилища и нефтеперерабатывающие заводы или хранилища и места отбора, которые находятся или на станциях железной дороги или в портах или даже в акватории порта с прокладкой соединительных трубопроводов частично по морскому дну ("Sea Line").

Трубопроводы сооружаются из труб нефтяного сортамента. Трубопроводы, прокладываемые вне пределов складских помещений, предназначенные для перекачки газов в жидком состоянии, сооружаются по специальным правилам, издаваемым дирекцией по топливу и фигурирующим в законодательстве и регламентациях для трубопроводов жидких или сжиженных углеводородов под давлением (декрет от 14 августа 1959 г., постановление от 1 октября 1989 г. и соответствующие тексты). Эта регламентация не относится к трубопроводам стальным с толщиной стенки менее 3,5 мм, когда произведение (pD) максимального давления рабочего p (избыточное давление), выраженного в барах (0,1 МПа) на диаметр внешний D трубы, выраженный в мм, не превосходит 500. Для того, чтобы применить простую регламентацию, власти могут иногда требовать применения правил безопасности для транспорта газа по трубопроводам (постановление министра от 11 мая 1970).

Трубопроводы, сооружаемые внутри складских помещений, должны выполняться в соответствии с рекомендациями для заводских трубопроводов (министерское постановление от 15 января 1962 г. и соответствующие тексты).

5.6. СЖИЖЕННЫЕ НЕФТЯНЫЕ ГАЗЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ

По своим характеристикам сжиженные нефтяные газы представляют всегда значительный горючий потенциал, часто весьма значительный. Их хранение, перекачка, транспорт сопровождаются особыми опасностями, с которыми хорошо должно быть знакомо каждое предприятие, для того чтобы с ними справиться.

Существует строгая регламентация относительно строительства, оборудования и эксплуатации складов, изготовления материалов и транспорта продуктов.

Помимо необходимости строгого соблюдения этой многочисленной регламентации, многочисленные правила производства работ, формализированные или нет (директивы, правила, способы проведения работ и т.д.), должны строго соблюдаться.

Особое внимание должно быть уделено оборудованию, обслуживанию и обучению в процессе работы:

- средства защиты (надежные электрические цепи, равнопотенциальные соединения и заземление, средства безопасности, обнаружения утечек газа, загородки, вывески и т.п.);
- устройства безопасности (клапаны-отсекатели и предохранительные клапаны, обратные клапаны, пневматические или гидравлические сети безопасности, дренажные линии и т.д.);
- средства противопожарной защиты (водоводы, брандспойнты, оросительные системы, огнетушители и т.п.);
- персональные средства защиты (специальные рукавицы, очки, огнестойкая одежда, противоискровая обувь, огнезащитная одежда, каски с защитным экраном и т.п.).

Каждый, кто эксплуатирует или имеет дело с СНГ, должен быть соответствующим образом обучен, осознавать опасность и соблюдать правила, он должен быть в состоянии постоянной готовности к защите.

6 ТРАНСПОРТ ПО ТРУБОПРОВОДАМ

6.1. КОНЦЕПЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

6.1.1. Определение

Транспортные сети представляют собой сооружения, предназначенные для транспорта газа под высоким давлением между одним или несколькими источниками и одним или несколькими потребителями с определенным числом более мелких промежуточных потребителей.

В это определение входят:

— международные газовые сети;
— ответвления от транспортных сетей и местные сети газоснабжения.

Концепция транспортной сети включает определение конфигурации сети и оптимальных характеристик сооружений, состоящих из трубопроводов и компрессорных станций. Стоящая проблема включает разнообразные исходные и физические данные, которые оставляют место для разнообразных решений, среди которых критерий выбора позволяет находить наилучшее решение.

6.1.1.1. Данные

Исходные данные:

— физические характеристики транспортируемого газа;
— расположение источника и условия получения газа в этой точке;
— расположение и характеристика потребителей газа;
— количество транспортируемого газа. Если расход газа не постоянен, то необходимые исходные данные должны быть определены предварительным расчетом.

6.1.1.2. Характеристики, которые должны быть определены

Характеристики транспортной сети следующие:

— структура сети и трассы трубопроводов;
— максимальное рабочее давление и диаметры газопроводов;
— место расположения и мощность компрессорных станций.

6.1.1.3. Физические уравнения проблемы

Физические уравнения решения проблемы включают:

— поддержание расхода в каждом узле сети. Эти решения необходимы для определения режима движения газа по рассматриваемой сети. Указанные уравнения недостаточны в случае закольцованной сети;
— уравнения потерь давления, которые связывают распределение давления на расчетном участке с определенной длиной, диаметром и расходом. Кроме указанных выше, необходимы следующие параметры: физические характеристики газа, температура газа, шероховатость трубопровода, характеризующая состояние внутренней поверхности трубопровода, и прежде всего профиль трассы;
— формулы, дающие возможность определять мощность в зависимости от давления на входе и выходе из компрессорной станции и расхода газа. Физические характеристики газа и температура на всасывании компрессора. Для расчета мощности привода компрессора необходимо учитывать высоту расположения станции над уровнем моря и температуру наружного воздуха.

6.1.1.4. Критерии выбора

Среди различных вариантов, отвечающих проблеме (т.е. исходным техническим данным), экономический критерий должен позволить выбрать оптимальное решение. В общем эта оптимизация состоит в нахождении решения, которое дает максимальную прибыль и еще постоянный доход в соответствии с выбранным решением, минимальные текущие расходы (стоимость транспорта минимальная). В том случае, если предприятие из-за финансовых сложностей не может получить максимальную прибыль, можно принять как оптимальный критерий степень получения максимальной прибыли (отношение доходов от реализованного проекта к сумме капвложений).

Надо заметить, что экономические критерии не могут корректно применяться, когда различие между несколькими решениями незначительно (учитывая неопределенность экономических гипотез). Тем не менее, другие факторы, трудно оцениваемые экономически, должны быть учтены при принятии решения:

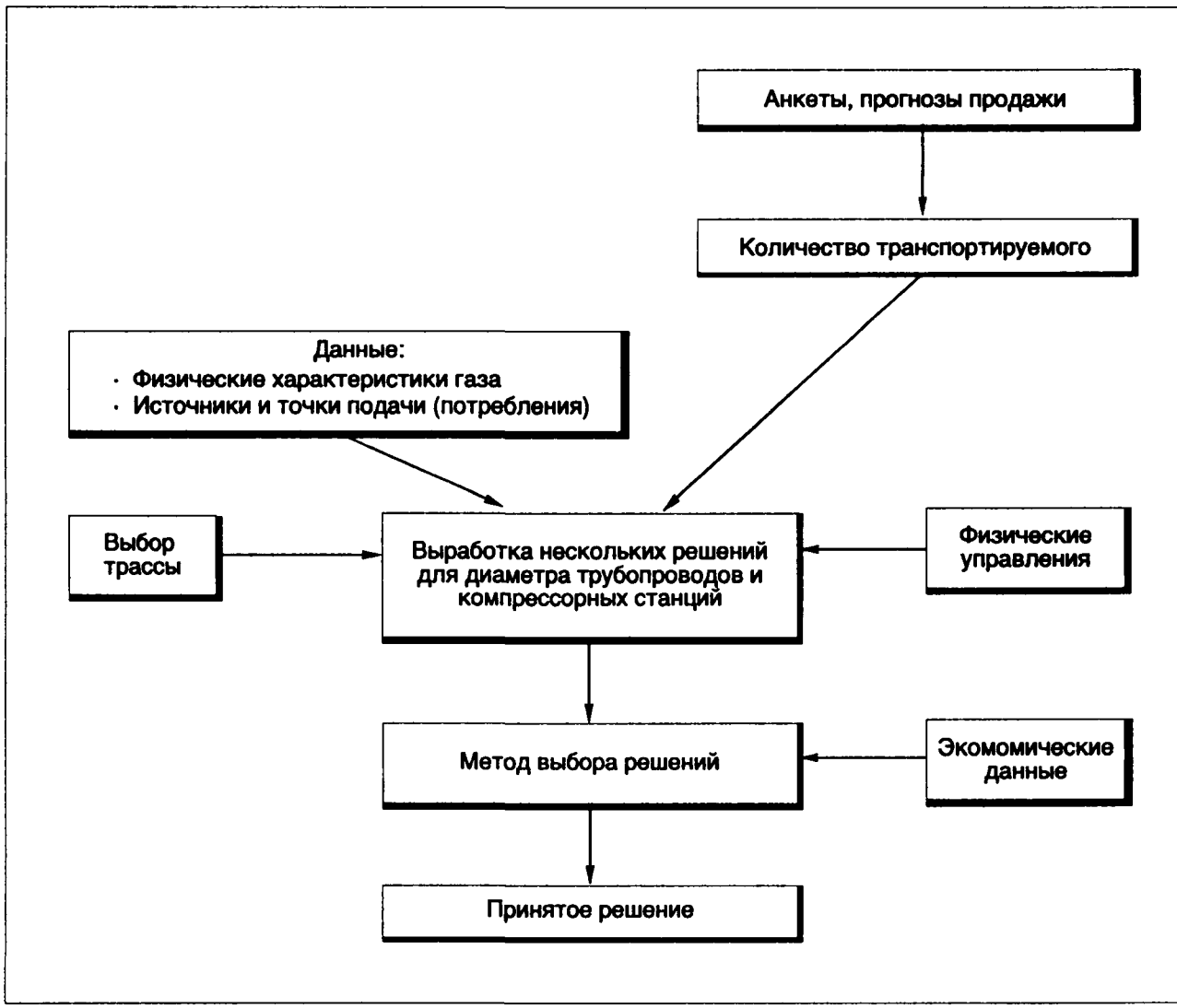
— надежность и безопасность разных решений;
— нагрузка на окружающую среду.

Здесь будет рассматриваться только экономический критерий т.к. другие элементы выбора рассматриваются в особых случаях.

6.1.1.5. Общая методика рассмотрения концепции транспортной сети

Общий ход концепции транспортной сети представлен на схеме, которая показывает различные этапы проекта.

По многим причинам ход концепции транспортной сети не является единственным, как представлено на упрощенной схеме, а включает несколько вариантов расчетов. Например, определение расчетного расхода, изменяющегося во времени, предполагает зафиксировать уровень изучения (расчета), и он зависит от характеристик выбранного решения, что ведет, в теории, к повторяющимся расчетам.



Общий ход концепции транспортной сети.

Проблемы экономики ставят также вопросы: нужно ли уложить газопровод с диаметром D позволяющим подавать клиентам газ N лет, подразумевая, что затем прокладывается новый параллельный газопровод диаметром D' для снабжения клиентов еще N' дополнительных лет или сразу положить газопровод диаметром D'(D' > D), который будет полностью загружен только через N + N' лет? Второе решение, которое требует более высоких капвложений, тем предпочтительней:

— чем ниже процент реализации,

— чем стоимость постоянной части цены строительства трубопровода больше части стоимости, зависимой от диаметра (особенно в случае небольшого диаметра).

В случае сложной задачи (например, определение характеристики нового сооружения внутри существующей закольцованной сети) это комплекс последовательных решений, которые должны повторяться несколько раз, рассматривая разные варианты: различные расходы в точке врезки в зависимости от климатических условий, прекращение газоснабжения от одного из источников и т.д. Использованные методы реализации концепции транспортной сети рассматриваются ниже.

6.1.2. Определение расчетного расхода газа

Рассматриваются два случая, когда расход газа постоянный и переменный во времени.

6.1.2.1. Расход газа постоянен и определен в процессе проектирования

Это характерно:

— для международных газопроводов, соединяющих источники снабжения с границей;

— для национальных газопроводов, являющихся источниками поставки определенного количества газа.

В этих случаях годовая поставка газа определяется контрактом Q_a, а часовой расход Q_m, определяющий размеры сооружений равен:

$$Q_m = \frac{Q_a}{8\,760 m},$$

где:

m – коэффициент колебания расхода, который учитывает гибкость контракта и, в первую очередь, степень безопасности.

Расход Q может быть округлен в большую сторону для увеличения гибкости работы. Величина m обычно составляет 0,85 - 0,9.

6.1.2.2. Расход, изменяющийся во времени

Это участки газопроводов или ответвления регионального уровня, для которых увеличение продажи приводит со временем к увеличению расхода.

Прогноз продажи газа через коммерческие предприятия для среднеклиматического года включает:

— потребление "вне отопления" (вне дополнительного потребления в холодный период H.C.S.P.F.);

— потребности систем отопления (потребление дополнительное в отопительный период C.S.P.F.).

Схематически по методике "градиент" расчетный расход представляет сумму двух составляющих:

— первая составляющая – это максимальный часовой расход на коммунально-бытовые нужды без отопления

$$\frac{\text{H.C.S.P.F.}}{N_1},$$

где:

N_1 – газовое число часов использования газа;

N_1 – обычно составляет 5500 - 7000 часов

— вторая составляющая – это максимальный часовой расход газа на отопление

$$\frac{\text{C.S.P.F.}}{N_2} \times \frac{(T_e - T_c)}{\left[\sum_{0\%}^{} \max (T_e - T_j)\right]},$$

где:

T_e – температура, ниже которой появляется расход газа на отопление;

T_j – среднегодовая дневная температура;

N_2 – число часов работы в день. Представляет суточное изменение потребностей;

T_c – расчетная температура, которая в зависимости от климата должна перекрываться с определенным риском ее возникновения;

T_e – различается для регионов и составляет от 14° до 17°C;

N_2 – равно 15 часам для малых ответвлений и 23 часам для больших транспортных сетей.

6.1.3. Выбор трассы

Знание расположения источника и точки или точек потребления позволяет определить трассу или трассы, которая позволяет определить:

— длину различных отрезков газопровода;

— характеристику грунта, что позволит определить стоимость прокладки трубопровода.

6.1.4. Физические уравнения

6.1.4.1. Формулы потерь давления

Обычно пренебрегают местными потерями по сравнению с линейными потерями. Эти последние могут определяться по формулам, которые для горизонтального газопровода представляются в виде

$$P_1^2 - P_2^2 = K s Z_m T_m \frac{Q_0^2}{D^5} L \lambda \left(R_e \frac{e}{D}\right),$$

где:

K – константа, величина которой зависит от размерности давления и условий (температура, давление) определения расхода. При стандартных условиях для давления в бар 1 атм (1013 бар) и 0°C, K = 6 000 P_1 и P_2 – давление в начале и конце участка соответственно;

Q_0 – часовой расход газа с учетом температуры и давления;

L – длина участка (в км);

D – внутренний диаметр трубопровода (в мм);

s – плотность газа;

T_m – средняя температура газа (K);

Z_m – коэффициент сжимаемости газа для среднего давления и средней температуры транспортируемого газа;

λ – коэффициент трения, зависящий от числа Рейнольдса (R_e) и относительной шероховатости $\frac{e}{D}$, где e – абсолютная шероховатость.

6.1.4.1.1. Формула Панхандля

Формула Панхандля не включает коэффициент λ, как функцию от числа R_e и относительной шероховатости, т.к. используется эмпирическая формула:

$$\lambda = \frac{0,010\,7 \left(\frac{D_v}{Q_0}\right)^{0,039}}{E_p^{1,96}},$$

где v – кинематическая вязкость газа, сантистокс;

E_p – полином в D и e (величина E_p от 0,7 до 1,0).

Таким образом

$$P_1^2 - P_2^2 = 0,010\,7 K s Z_m \frac{v^{0,039} Q_0^{1,96}}{E_p^{1,96} D^{4,96}} L,$$

что позволяет использовать в расчетах формулу

$$P_1^2 - P_2^2 = K_1 \sigma_p \left(\frac{Q_0^{1,96}}{D^{4,96}}\right) L$$

$$\text{с } \sigma_p = s Z_m \frac{T_m}{288} \left(\frac{v}{0,16}\right)^{0,039} \left(\frac{0,85}{E_p}\right)^{1,96}$$

и K_1 = 3,941 K.

6.1.4.1.2. Формула Колеброка (обычная)

Коэффициент потерь давления дается в виде неявной формулы

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{R_e \sqrt{\lambda}} + \frac{e}{3,71 D}\right).$$

6.1.4.1.3. Улучшенная формула Колеброка

В ходе экспериментов было установлено два типа турбулентного режима: режим частично турбулентный для числа Рейнольдса ниже 10^7 и режим полностью турбулентный для числа R_e выше этой величины. Это приводит к новой формулировке коэффициента потерь давления в формуле Колеброка (эта формулировка λ явная).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -\frac{1}{5} \lg \left[\left(\frac{e'}{3,7 D}\right)^{10} + \left(\frac{5,03 \lg R_e - 4,32}{R_e}\right)^{10f}\right],$$

где:

e' – шероховатость в явном виде в микрометрах, принимаемая в расчет, и плюс шероховатость всех элементов, могущих создавать турбулентность при течении флюидов;

f – фактор торможения близкий 1, принимающий в расчет изгиб трубопровода и состояние его внутренней поверхности.

Эта последняя формулировка кажется лучше всего подходит для обычных условий транспорта.

6.1.4.2. Формулы для расчета мощности сжатия

Точная методика состоит в последовательном расчете:

- — теоретической мощности при адиабатическом, изотермическом или политропическом процессе сжатия;
- — реальной мощности сжатия путем деления теоретической мощности на адиабатический, изотермический или политропический КПД (в соответствии с выбранной теоретической формулой) – для того, чтобы учесть необратимость термодинамических процессов, так же как внешний КПД, чтобы учесть механическое трение;
- — мощности на валу, необходимой для определения реальной мощности привода, путем округления ее в большую сторону с учетом влияния вспомогательных устройств антипульсаторов и других причин потерь мощности.

Практически, на стадии проекта можно использовать упрощенную формулу непосредственно для определения по валу:

$$W = K Q_0 \left(\frac{Z_m}{0,9}\right) \left(\frac{T_1}{288}\right) \lg \frac{P_2}{P_1},$$

где:

W – необходимая мощность по валу, кВт;

Q_0 – расход сжимаемого газа нм³/ч;

P_2 и P_1 – давление нагнетания и сжатия;

Z_m – среднеарифметическое значение коэффициента сжимаемости при условии всасывания и нагнетания;

T_1 – абсолютная температура на всасывании.

Значение величины K дается в таблице:

Тип компрессора \ $\frac{P_2}{P_1}$	От 1,3 до 2,0	От 2,0 до 3,0
Поршневой компрессор	0,085	0,095
Центробежный компрессор	0,095	0,100

6.1.5. Экономические данные

6.1.5.1. Определение капвложений

6.1.5.1.1. Трубопроводы

Стоимость трубопровода может быть представлена тремя составляющими:

— поставка неизолированных труб с завода;
— укладка труб (подготовка трассы, рытье траншеи, раскладка труб, сварка, укладка в траншею, засыпка, сдача в эксплуатацию);
— разнообразные элементы строительства: изоляция, транспорт и хранение труб, разнообразные работы.

В общем, капитальные вложения в единицу длины трубопровода диаметром D могут выразиться одной из двух следующих формул (давление и диапазон диаметров, для которых формула может применяться, зависят от числа уточняющих параметров).

$$I_{cons} = a + bD^c$$

$$I_{cons} = kD^e.$$

Приблизительные величины уточняющих параметров для условий среднего строительства составляют:

— фиксированная часть соответствует примерно 25% общей стоимости трубопровода диаметром 400 мм;
— $c = 1{,}5$;
— $e = 0{,}65$ для малых диаметров (≤300);
— $e = 1{,}3$ для больших диаметров (≥400).

6.1.5.1.2. Компрессорные станции

Капитальные вложения одной компрессорной станции включают:

— одна часть, пропорциональная числу установленных компрессоров, которые соответствуют стоимости машин, здания и их коммуникаций;
— вторая часть – постоянная B, соответствующая общим газопроводам и общеинженерным сооружениям.

Первая часть зависит от единичной мощности установленных машин, вторая часть - от общей мощности. Более просто, можно удовлетвориться формулой типа:

$$I_{comp} = AW^x,$$

где:

W – общая мощность, или еще,

$$I_{comp} = C + cW.$$

Приблизительная величина параметра уточнения

$$x = 0{,}65.$$

Фиксированная часть B представляет примерно 30% общей стоимости станции.

6.1.5.2. Оценка годовых эксплуатационных расходов

Различают, с одной стороны, расходы на эксплуатацию и на рабочую силу, с другой стороны, расходы энергии (для привода компрессоров).

6.1.5.2.1. Расходы на эксплуатацию и персонал

Эти годовые расходы принимаются, как заранее оговоренный процент от суммы капитальных вложений, и составляют:

— для трубопроводов – до 3%;
— для компрессорных станций – от 3 до 5%.

6.1.5.2.2. Энергетические затраты

Необходимая энергия сжатия зависит от кривой изменения расхода во времени. Кроме некоторых особых случаев (расход постоянный или монотонный, близкий к линейному) подсчет энергетических затрат состоит в определении плановой программы использования компрессорной станции на основе программы транзита газа. Определяют расход энергии для отрезка времени и путем суммирования – годовой расход энергии.

6.1.5.3. Экономические критерии

Применение предыдущих формул позволяет определить:

— сроки окупаемости капитальных вложений,
— сроки окупаемости (реестра) эксплуатационных расходов, которые имеют место в течение всего срока реализации проекта.

Общие приведенные реальные расходы получаются из этих двух составляющих путем применения к общим расходам (капвложения плюс эксплуатационные расходы) n-го года коэффициента приведения, равного $\frac{1}{(1+a)^n}$; затем суммированием

для всех лет рассматриваемого (*a* – коэффициента приведения (актуализация)).

6.1.6. Метод определения оптимального решения

Для принятия оптимального решения проблемы транспорта газа (см. предыдущий параграф), могут быть применены два метода:

— метод дифференциальных расчетов;

— метод замены реальных сложных проблем искусственными, упрощенными (моделирование).

6.1.6.1. Метод дифференциальных расчетов

Этот классический подход для решения проблем оптимизации систем под напряжением (давлением).

В случае транспорта газа с учетом сложности постановки включающей большое число нелинейных уравнений, необходимо значительно упростить оптимизируемые функции (экономические критерии), число влияющих факторов и параметров при необходимости получения полного решения. Поэтому метод дифференциальных расчетов применяется редко, при решении типовых проблем.

6.1.6.2. Метод моделирования

Он состоит в нахождении определенного числа вариантов, относящихся к характеристике транспортной сети (трасса, диаметр трубопроводов, число, место расположения, мощность компрессорных станций), затем в расчете каждого варианта транспорта в соответствии с последовательностью схемы, представленой в § 6.1.1.5. Это ведет к оптимальному решению, если варианты были выбраны достаточно исчерпывающе.

Этот метод подходит ко всем достаточно сложным исходным данным. Его основной недостаток: продолжительность расчета, устраняемый по мере применения ЭВМ.

Обоснованность принятых гипотез, полнота выбранных для изучения вариантов, критический анализ соответствия полученных результатов с учетом их чувствительности к неопределенности исходных данных, остаются основными условиями качества исследования, выполненного по методу моделирования.

6.1.7. Классические результаты типовых проблем дифференциального метода

6.1.7.1. Общие упрощенные гипотезы, используемые для решения типовых проблем

6.1.7.1.1. Физические уравнения

6.1.7.1.1.1. Трубопроводы

Общая формула, используемая для расчета потерь давления, с обозначениями § 6.1.4.1

$$P_1^2 - P_2^2 = K_1 \frac{Q^2}{D^5} L,$$

где K_1 = const.

Это значит, что пренебрегают всеми изменениями K, в зависимости от диаметра, состояния трубопровода, физических условий температуры, давления, расхода и природы газа. Применяя эту гипотезу постоянства коэффициента, можно рассчитать диаметр одного трубопровода, эквивалентного нескольким параллельным трубопроводам такой же длины и диаметром D*i* или $\left(\sum D i^{5/2}\right)^{2/5}$

6.1.7.1.1.2. Компрессорные станции

Общая формула, используемая для расчета мощности компрессора с обозначениями § 6.1.4.2

$$W = K_2 Q \log \frac{P_2}{P_1},$$

где K_2 = const.

Здесь также не учитывается изменение, вызываемое условиями температуры на всасывании и физическими характеристиками газа (коэффициент сжимаемости).

6.1.7.1.2. Экономическая зависимость

Общие и отдельные гипотезы, применяемые для определения экономических критериев, состоят в том, что относительные расходы, капитальные вложения, относящиеся к транспортной сети, имеют место в одно и то же время. Это позволяет только обосновать нахождение общих годовых расходов сложением эксплуатационных расходов с капитальными в виде амортизационных отчислений, которые сами пропорциональны чистым капитальным вложениям.

6.1.7.1.2.1. Трубопроводы

Годовые расходы для участка трубопровода диаметром D и длиной L, обозначенные как D cana, может выражаться формулой

D cana = *fl* cana = $t(a + bD^{\alpha})L$,

где:

t – фактор, который включает коэффициент амортизации и коэффициент расходов на персонал и эксплуатацию.

6.1.7.1.2.2. Компрессорные станции

Годовые расходы компрессорной станции, обозначаемой D comp, может выражаться формулой:

$$D\ comp = t\,I\ comp + eW,$$

где:

t – фактор, включающий коэффициент амортизации и расходы на персонал и обслуживание,

e – фактор, который включает стоимость энергии, отношение среднего расхода к предельному КПД привода и число часов работы в год.

Капитальные вложения для строительства одной компрессорной станции определяются по формуле

$$I\ comp = a' + b'W,$$

мощность сжатия – формулой

$$W = K \log r,$$

где:

$$r = \frac{P_2}{P_1}.$$

Годовые расходы для одной станции выразятся формулой:

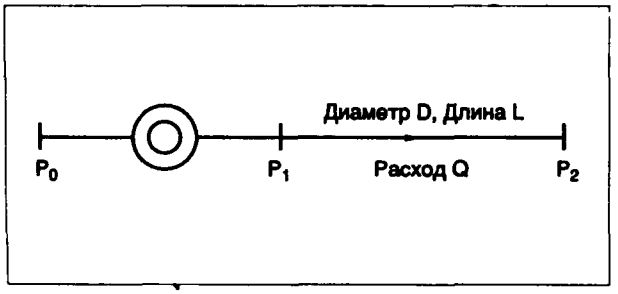
$$D\ comp = t'a' + (t'b' + e)K_2Q \log r$$

или в соответствии с классической теорией

$$D\ comp = C + 2AQ \log r.$$

6.1.7.2. Случай транспорта со сжатием в одной точке в начале трубопровода

Схема и обозначения для типовой задачи представлены ниже.



Поиск минимума $F = C + 2A\,Q \log \left(\frac{P_1^2}{P_0}\right) + t(a + bD^{\alpha})L$ при потерях давления $P_1^2 - P_2^2 = KQ^2 \frac{L}{D^5}$ приводит к отношению

$$\frac{(P_1^2 - P_2^2)^{1+\alpha/5}}{P_1^2} = \frac{tcbK^{\alpha/5}L^{1+\alpha/5}}{5AQ^{1-2\alpha/5}}$$

Это отношение позволяет определить оптимальное давление нагнетания P_1, если известен расход и длина, а также необходимое давление нагнетания P_2. Находят и оптимальный диаметр трубопровода.

6.1.7.3. Случай транспорта газа из одной точки в другую с помощью одного трубопровода без изменения расхода с промежуточным сжатием

Схема и обозначения представлены ниже. Участок трубопровода j имеет диаметр D_j и длину L_j. Расход газа Q постоянен по всей длине. Полная задача расчета транспорта состоит в определении диаметров участков, давлений всасывания и нагнетания компрессорных станций и мест их расположения:

$$S_{(n)} = \sum_{i=1}^{n+1} t(a + bD^{\alpha})L_j + \sum_{i=1}^{n} \left(C + 2AQ \log \frac{P_1(i+1)}{P_2(i)}\right)$$

при следующих ограничениях и вводя:

$$PA = P_1(1),\ PB = P_2(n+1)$$

— потери давления:

$$P_1^2(i) - P_2^2(i) = \frac{KL_iQ^2}{D_i^5}$$

для всех i;

— максимальное рабочее давление в трубопроводе

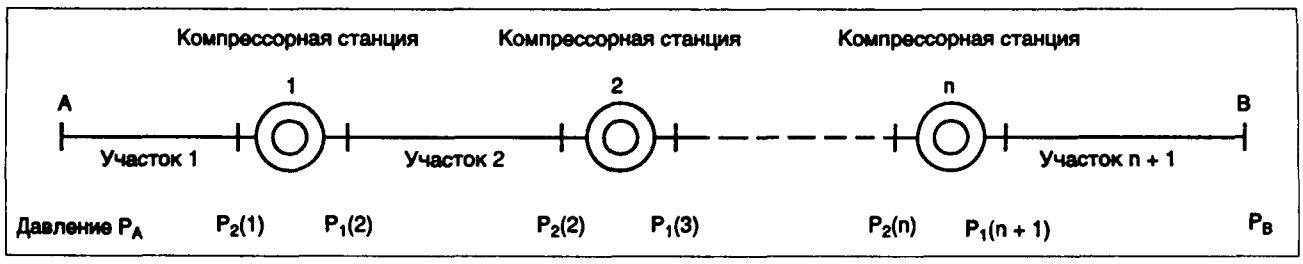
$$P_1(i) \le P.M.S. \text{ для всех } i \ge 2$$

или еще

$$P_1(i)^2 = (P.M.S.)^2 - e^2(i)$$

— общая длина сети

$$\sum_{i=1}^{n+1} L_i = L.$$



Решение этой задачи позволяет сделать следующие выводы:

— все участки трубопровода и в том числе 1 и "*n*" имеют одинаковый диаметр D;
— все компрессорные станции имеют одинаковое давление нагнетания, равное максимальному рабочему (P.M.S.);
— все компрессорные станции находятся на одинаковом расстоянии друг от друга и, следовательно, давление всасывания и степень сжатия всех станций одинаковы;
— длина участка 1 не равна нулю (сжатие в начале), если только P_A ниже, чем давление всасывания компрессорных станций.

В ходе разрешения проблемы находят отношение, связывающее оптимальный диаметр с оптимальной степенью сжатия – r, так же как и отношение, связывающее число станций со степенью сжатия газа на станциях.

$$D = \left(\frac{5KAQ^3r^2}{tbc(\text{P.M.S.})^2}\right)^{\frac{1}{5+\alpha}} \qquad (1)$$

$$PA^2 - PB^2 = \frac{KLQ^2}{D^5} + n(\text{P.M.S.})^2\left(\frac{1}{r^2} - 1\right) \qquad (2)$$

Система уравнений (1) и (2) – неопределенное уравнение, которое имеет одно неизвестное *r*, если число *n* фиксировано. Полное решение состоит в расчете *r* для различных величин и нахождении D и S(*n*). Оптимальное решение соответствует величине n, которое минимизирует S(*n*).

Расчетная величина D – это диаметр теоретический. Это ведет к необходимости выбрать один из двух ближайших стандартных диаметров и уточнить его в зависимости от степени сжатия компрессорных станций, т.е. к необходимости изучения нескольких вариантов. Эта типовая проблема хорошо иллюстрирует возможности и пределы применения дифференциального метода, который не позволяет достичь полного решения из-за упрощения рассматриваемого случая, но который уменьшает число рассматриваемых вариантов.

6.1.7.4. Газопровод без компремирования с расходом газа по пути

Проблема состоит в нахождении длины L единого трубопровода диаметром D_1, транспортирующего расход Q_1, эквивалентного с точки зрения потерь давления ряда "n" участков длиной L_j и диаметром D_j и транспортирующих расход Q_j (т.е. подающего расход $Q_j - Q_{j+1}$ в узле j); количество "n" отрезков соответствует оптимуму с точки зрения капитальных вложений.

Задача формулируется так:

— капитальные вложения в "*n*" участков

$$S = \sum_{j=1}^{n} (a + bD_j^{\alpha})L_j;$$

— эквивалентные потери давления

$$F = P_0^2 - P_n^2 - K\sum_{j=1}^{n}\frac{L_j}{D_j^5}Q_j^2 = P_0^2 - P_n^2 - KL\frac{Q_1^2}{D_1^5} = 0.$$

Оптимизация капитальных вложений в зависимости от диаметров при наличии ограничений потерь давления может осуществляться с помощью метода множителей Лагранжа (приравнивание нулю частной производной по D_j от функции $S + \lambda F$ с $\lambda = \text{const}$.

$$\frac{Q_j^2}{D_j^{\alpha+5}} = \text{const} = C \text{ при любой } j.$$

Откуда

$$L = \sum_{j=1}^{n} L_j\left(\frac{Q_j}{Q_1}\right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+5}}.$$

Приняв $B_j = L_jQ_j^{2\alpha/(\alpha+5)}$, имеем следующий результат. Оптимальная последовательность участков эквивалентна одному участку, который транспортировал бы расход Q_1 первого участка и длина которого L будет такой, что коэффициент B равен $LQ_1^{2\alpha/(\alpha+5)}$ или равен сумме коэффициентов B каждого участка

К этому имеем:

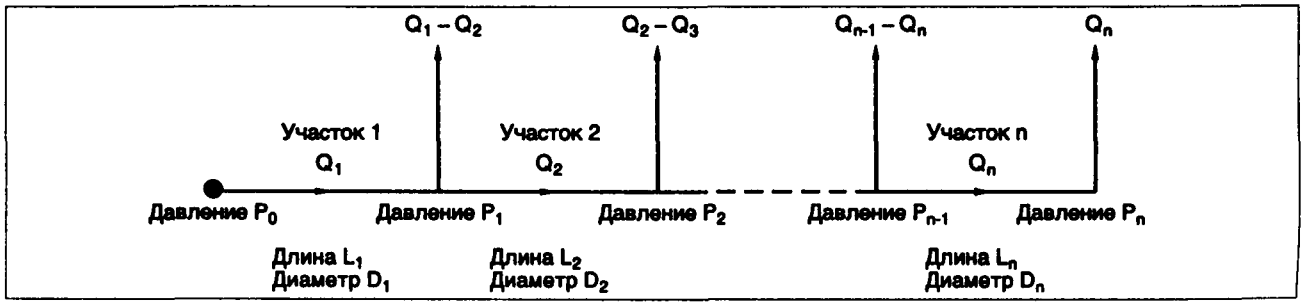
$$\frac{P_j^2 - P_{j+1}^2}{P_0^2 - P_n^2} = \left(\frac{L_j}{L}\right)\left(\frac{Q_j}{Q_1}\right)^2\left(\frac{D_1}{D_j}\right)^5 =$$

и из уравнения для потерь давления

$$= \left(\frac{L_j}{L}\right)\left(\frac{Q_j}{Q_1}\right)^2\left(\frac{Q_1}{Q_j}\right)^{\frac{10}{\alpha+5}},$$

т.к. $\frac{Q_j^2}{D_j^{\alpha+5}} = C$ оптимум капвложений:

$$= \left(\frac{L_j}{L}\right)\left(\frac{Q_j}{Q_1}\right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+5}} = \frac{B_j}{\sum B_j}$$



Это демонстрирует второй результат:

Для участков, расположенных последовательно, оптимальная структура такова, что квадратичные потери давления каждого участка пропорциональны коэффициенту B, которые их характеризуют.

6.1.7.5. Трубопровод с расходом газа по пути с компремированием в начале

Проблема решается заменой последовательности участков одним эквивалентным участком в соответствии с методикой в § 6.1.7.4. Затем по формуле § 6.1.7.2 рассчитывают давление нагнетания компрессора, расположенного в начале эквивалентного участка.

Определяют серию диаметров

$$D_j = \left(\frac{K\sum B_j}{P_r^2 - P_n^2}\right)^{1/5} Q_j^{\frac{2}{c+5}}$$

с $B_j = L_j Q_j^{\frac{2c}{c+5}}$,

где:

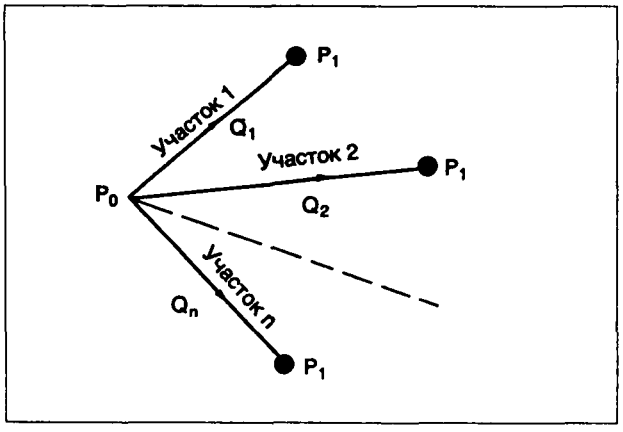
P_r – давление нагнетания;

P_n – давление в конце сети.

6.1.7.6. Разветвленная сеть и метод Комбета

6.1.7.6.1. Промежуточный результат для сети в виде звезды

Рассмотрим сначала сеть, все участки которой выходят из одной точки и в конце которых давление одинаковое (идентичное) :



Участок j диаметром D_j, длиной L_j транспортирует расход Q_j.

Находится один участок диаметром D и длиной L, транспортирующий расход $Q = \sum Q_j$ таким образом, чтобы давление в начале и конце было бы P_0 и P_1 соответственно и так, что составляющая, зависящая от диаметра в капитальных вложениях, была бы равна сумме составляющих, зависящих от диаметра в капитальных вложениях каждого участка. Эти два условия могут формулироваться также:

$$bD^cL = \sum_{j=1}^{n} bD_j^cL_j$$

$$P_0^2 - P_1^2 = KL\frac{Q^2}{D^5} = KL_j\frac{Q_j^2}{D_j^5}$$

для всех *j*.

Откуда

$$L^{1+\frac{c}{5}}Q^{\frac{2c}{5}} = \sum_{j=1}^{n} L_j^{1+\frac{c}{5}}Q_j^{\frac{2c}{5}}.$$

Принимая $A = L^{1+c/5}Q^{2c/5}$, отсюда находим следующий третий результат:

число *n* участков в звезде, все концы которых имеют такие же давление, падение давления и капитальные вложения (составляющая, независимая от диаметра), как и один участок, коэффициент A которого равен сумме коэффициентов A каждого отрезка.

Кроме того,

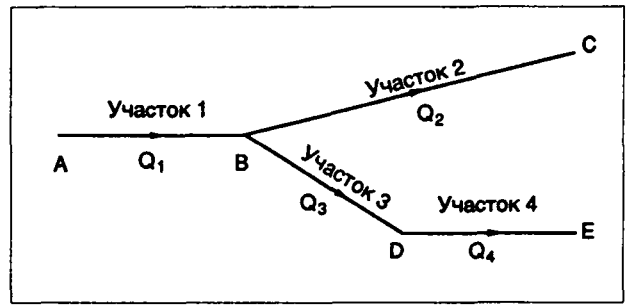
$$A = L^{1+\frac{c}{5}}Q^{\frac{2c}{5}} = \left(LQ^{\frac{2c}{c+5}}\right) = B^{1+\frac{c}{5}} \quad \text{(равенство 1)}.$$

6.1.7.6.2. Метод Комбета

Метод Комбета применяется к случаю разветвленной сети, имеющей один источник, известное давление и одинаковое давление на конце всех участков.

Сеть состоит из участков, соединенных последовательно или звездой известной длины, транспортирующих известный расход, и на конце каждого может быть отбор газа. Проблема состоит в том, чтобы найти диаметр каждого участка таким образом, чтобы получить минимальные капитальные вложения (т.е. капитальные вложения, зависящие от диаметра, т.к. капитальные вложения, независимые от диаметра, постоянны, независимы от выбранного решения, известных длин участков).

Решение проблемы опирается на три результата, показанных в § 6.1.7.4 и 6.1.7.6.1. Применяемая



Каждый участок имеет длину L_j и диаметр D_j.

методика может быть обобщена на основе простого примера, приведенного ниже.

Участок BDE, эквивалентный с точки зрения оптимизации капитальных вложений одного трубо-

Звезда BC, BE эквивалентна с точки зрения капитальных вложений одному участку, коэффициент A которого равен $A_2 + A_3$ (по третьему результату), где A_5 – коэффициент, характеризующий участок, эквивалентный BДE.

$$A_5 = (B_3 + B_4)^{1+\frac{c}{5}} \qquad \text{(из равенства 1)}$$

Звезда BC-BE имеет таким образом B, равным $B_6 = (A_2 + A_5)^{\frac{5}{5+c}}$.

Для оптимальной структуры имеем:

$$\frac{(PA^2 - PB^2)}{(PA^2 - PE^2)} = \frac{B_1}{B_1 + B_6};$$

на основе второго результата, это позволяет определить PB.

Так же

$$\frac{(PB^2)}{(PB^2 - PE^2)} = \frac{B_3}{(B_3 + B_4)},$$

что позволяет определить PD. Таким образом имеется экономическое условие давление в каждой точке и отсюда находится оптимальный с экономической точки зрения диаметр трубопровода для обеспечения нужного расхода.

Простота метода Комбета объясняет его успешное применение в первом приближении в многочисленных проектах, несмотря на то, что условия применения не всегда точно соблюдались.

6.2. Строительство трубопроводов

6.2.1. Изучение трассы транспортных трубопроводов

Проект трассы для трубопроводов транспорта газа высокого давления включает прежде всего:

— предпроектные проработки, позволяющие начать административные действия;

— более детальный проект, необходимый для реализации работ.

6.2.1.1. Предпроект

Предпроект должен дать все необходимые документы для коридора шириной 6 км.

Коридор, в принципе, – ось трассы, нанесенной на карту в масштабе 1 : 50000. Он сопровождается текстом, точно определяющим работы по строительству на местности. Проект коридора должен учитывать:

— зоны, которые должны быть исключены, такие как леса, зоны с опасным рельефом, зоны очевидно каменистые, зоны с высокой плотностью населения, зоны болотистые, зоны песков и т.д.;

— зоны, через которые необходимо пройти, такие как точки газоснабжения, натуральные просеки в лесу, проходы в крутых склонах, сужение водных потоков или реки и т.д.;

— сети шоссейных и железных дорог, линии электропередач высокого и сверх высокого напряжения и т.д.

6.2.1.2. Административные процедуры

Административные процедуры зависят от правил, действующих на дату представления проекта (см. раздел. 6.10. Правила).

6.2.1.3. Детальный проект

Детальный проект должен позволить установить, с одной стороны, ограничивающие условия, а с другой стороны, – определить трассу с максимальным указанием наилучшего проведения работ.

Прежде всего необходимо выполнить план трассы в масштабе 1:25000, называемым "полигональным", устанавливающим трассу с высокой точностью. Этот документ позволяет установить пикетаж и выполнить план в масштабе 1:2000. В ходе этой фазы работ составляется список предпринимателей и эксплуатационников, причастных к этому проекту.

Наконец, чтобы дополнить документацию могут быть проведены особые исследования, такие как изучение грунта, возможность присоединений различных вставок.

6.2.1.4. Заключение договоров

Французское законодательство позволяет транспортеру, сооружающему трубопроводы, заключать договор между ним и хозяином частного владения в случае его пересечения. Эти соглашения ограничивают частные права и заставляют, в принципе, частного владельца не проводить значительных работ в районе газопровода, могущих по-

влиять на его безопасность. В том случае, если владелец препятствует прохождению трубопровода по владению, применяется законная процедура разрешения на пересечение. Эта процедура требует проведения опроса и заканчивается публикацией принятого решения префектурой.

6.2.2. Характеристика используемых труб

6.2.2.1. Изготовление труб

Для строительства газопроводов используются только трубы из стали, которые могут быть изготовлены либо без сварки путем горячей протяжки, либо из листов или обручной стали, сваренной электричеством с или без вноса металла. В настоящее время используется практически только второй метод. Трубы могут свариваться продольным швом с наносом металла, или встык, или сваривается спиральным швом. Трубы заказываются в соответствии с нормами или спецификацией, которые часто различаются для разных стран.

Рассмотрим французские и американские нормы, как наиболее часто встречающиеся:

— нормы французские F A 49 - 00;

— нормы Американского нефтяного института A.P.I.5L

Все нормы могут быть модифицированы или дополнены особой спецификацией самого конструктора, например, для Gaz de France техническая спецификация следующая:

— G.D.F. 521 - 20 – относящиеся к трубам, сваренным продольным швом наружным диаметром от 406,4 мм до 1220 мм;

— G.D.F. 521 - 30 – относящиеся к трубам, сваренным встык продольным швом диаметром наружным от 21,3 мм до 406,4 мм;

— G.D.F 521 - 40 – относящиеся к трубам, сваренным спиральным швом диаметром от 219,1 мм до 1625 мм.

Заметим, что для трубопроводов, построенных за границей, клиенты требуют более четко соблюдать нормы.

6.2.2.2. Характеристика труб

Химический состав труб зависит прежде всего от применяемых норм, к которым они относятся. Основные механические свойства различных сталей приводятся в таблице.

В таблице R_p = 0,2 - минимальный предел упругости, составляющий 0,2% остаточного удлинения в МПа (или декабар);

R_m – сопротивление разрыву при растяжении (min и max) в МПа (или декабар);

A – удлинение минимальное в %.

Марки сталей	R_p 0,2	R_m	A %
TS E 220	220	370 - 490	26
TS E 250	250	410 - 530	24
TS E 290	290	420 - 540	23
TS E 320	320	440 - 560	21
TS E 360	360	480 - 620	20
TS E 415	415	530 - 680	18

NF A 49-400 и GDF 521-30.

Марки сталей	R_p 0,2	R_m	A %
TS E 220 Grade A	220	370 - 480	23
TS E 250 Grade B	250	420 - 530	22
TS E 290 × 42	290	420 - 530	22
TS E 320 × 46	320	440 - 560	22
TS E 360 × 52	360	480 - 620	18
TS E 415 × 60	415	550 - 670	18
TS E 450 × 65	450	560 - 680	18
TS E 480 × 70	480	580 - 720	18

GDF 521-20 и GDF 521-40.

Другие характеристики приводятся в нормах и спецификациях, например, такие, как сопротивление при ударе.

6.2.2.3. Расчет труб

Расчет толщины труб зависит от применяемых правил. Во Франции транспорт горючего газа подчиняется правилам безопасности от 11 мая 1970 г. и изменениям к этим правилам.

Эти правила дают базовую формулу для расчета трубопровода:

$$P_c = \frac{2t}{D}e,$$

где

P_c – предельное безопасное давление в МПа;

e – минимальная оговоренная толщина; учитывающая точность изготовления (в мм);

D_e – минимальный наружный диаметр (в мм);

t – максимальное допустимое поперечное напряжение трубопровода.

Установлены три типа зон в зависимости от их урбанизации:

— для зоны типа "A", соответствующей сельской зоне

$$t = 0{,}73R_p0{,}2;$$

— для зоны типа "B", соответствующей зоне средней урбанизации в приравненной к области общественной

$$t = 0{,}6R_p0{,}2;$$

— для зоны "С", соответствующей населенным пунктам

$$t = 0{,}4R_p0{,}2.$$

Напряжение в металле, возникающее в процессе гидравлических испытаний, не должно никогда превосходить 90% минимального предела упругости. В некоторых случаях могут применяться другие нормы, например, для трубопроводов транспорта влажного газа (случай подземного хранилища). Эти нормы относятся к расчету труб "Codap" (французские нормы изготовления сосудов под давлением), формула которого базируется на выражении:

$$e = \frac{PD_e}{2fz + P},$$

где:

D_e – диаметр наружный в мм;

P – расчетное давление в МПа;

z – коэффициент сварки;

e – минимальная толщина в мм;

f – номинальное расчетное напряжение в МПа.

Номинальное расчетное напряжение берется, как минимальное из двух следующих величин:

— $\frac{5}{8}$ R_p 0,2 или $\frac{1}{3}$ R_m для трубопроводов на заводе (ссылка на декрет от 18 января 1943 года, отнесено к сосудам под давлением);

— 0,6 R_p 0,2 или 0,44 R_m – для трубопроводов транспорта жидкости.

Эти величины соответствуют общим случаям, но могут быть модернизированы в зависимости от используемых листов и разновидности конструкции, ссылаясь на декрет или постановление с учетом быстрой эволюции правил. Для трубопроводов, построенных за границей, необходимо соблюдение специфических правил каждой страны. Можно указать специфические американские правила, такие как A.S.M.E., A.N.S.I. B.31.8, относящиеся к системам трубопроводов транспорта и распределения газа.

6.2.3. Выполнение работ по укладке. Подготовка трассы

Полоса земли поступает в распоряжение подрядчика для выполнения работ по строительству. Ее границы устанавливаются с помощью вешек, отмеряя пикеты от оси трубопровода. Ширина трассы изменяется в зависимости от диаметра трубопровода (от 7 м для диаметра 80 мм до 22 м для диаметра 1000 мм с возможностью расширения во время выемки грунта и применения взрывчатки).

Размещение оси в ту или другую сторону может быть неравным, а часть, служащая для движения механизмов, будет более широкой.

6.2.3.1. Состояние местности

После разметки заключается согласованный договор между транспортниками, подрядчиком, собственником или эксплуатационником для того, чтобы определить состояние земли перед началом работ.

6.2.3.2. Планировка трассы

— Демонтаж изгородей и фундаментов загородок, пересекающих перпендикулярно трассу;

— установка по требованию эксплуатационника временной продольной изгороди и переходов для скота, если это необходимо;

— очистка от кустарника по всей ширине, вырубка и выкорчевывание деревьев во всех лесистых частях трассы;

— выравнивание трассы, особенно в зоне больших перепадов высот или заполнение временных оврагов. Выравнивание земли особенно важно для большого диаметра, т.к. для машин большого веса требуются трассы хорошего состояния.

6.2.3.3. Развозка труб

Трубы с завода-изготовителя складируются на воздухе в оборудованных обычно у железнодорожных путей складах. Они проверяются на состояние наружной изоляции и концов труб. В отдельных случаях, трубы поставляются прямо на стройку. Это позволяет ликвидировать промежуточный склад, но усложняет организацию работ.

Транспорт труб осуществляется грузовиками с платформой, отвечающими габаритам дороги по размерам и весу. Разгрузка труб на трассе осуществляется трубовозами на гусеничном ходу.

6.2.3.4. Сгибание труб

Сгибание труб осуществляется гидравлическим центратором. Минимальный радиус изгиба равен 40 диаметрам.

Максимальный угол изгиба может быть определен по следующей эмпирической формуле:

$$\alpha = (L - 4) \times \frac{1}{40D} \times \frac{180}{\pi},$$

где

α – угол в градусах;

L – длина трубы в метрах;

D – номинальный диаметр в метрах.

Максимально допустимая овальность равна 2,5% от номинального диаметра и контролируется пропусканием через габарит.

6.2.3.5. Сварка

Сварка осуществляется встык с помощью последовательных сварных швов, число которых зависит от толщины стенок трубы. Сварка на линии осуществляется методом сверху вниз обычно с целлулоидными электродами. Кромки зачищаются щетками или шлифовальным камнем. Трубы устанавливаются встык с помощью специальной подъемной машины и фиксируются с помощью кольца или "clamp" (зажим).

Трубы устанавливаются на брусья для того, чтобы уменьшить повреждение изоляции и риск вдавливания в изоляцию.

Предварительный подогрев может быть необходим в случае некоторых сталей в соответствии с разновидностью сварки.

Характеристики операций сварки определяются в каждом случае, для каждой стали:

— используемой техникой;
— используемыми электродами;
— тепловой энергией, выделяющейся в атмосферу (кДж/см);
— скоростью сварки (см/мин);
— температурой подогрева.

Разрешение на сварку выдается после механических испытаний образцов.

6.2.3.6. Контроль сварки

Сварка контролируется гамма-лучами или Х-лучами в соответствии с диаметром и толщиной труб. Аппарат автоматически движется внутри трубы и снимает на пленку для дальнейшей обработки. Может быть осуществлен и ультразвуковой контроль, но он имеет недостаток, связанный с тем, что нет документа (пленки), которая могла бы сохраняться.

Степень контроля составляет 100% в начале стройки и уменьшается в ходе строительства до 30%. В зависимости от результатов, контроль в 100% может быть восстановлен. Сварка между участками трубопроводов полностью проверяется с помощью радиографии. Если она осуществляется после гидравлических испытаний, снимается вторая пленка радиографии.

6.2.3.7. Соединение труб изоляцией

В каждом случае соединения труб выполняется изоляция в виде антикоррозионного пояса с целью осуществления непрерывности изоляции.

6.2.3.8. Траншея

Траншея выкапывается с помощью экскаватора или траншеекопателя в зависимости от характера грунта. В случае (зон) каменистых земель используется гидравлическая камнедробилка или могут быть применены необходимые взрывные работы. Если свойства грунта требуют, то трубопровод должен быть защищен слоем песка или обернут войлочными матами.

6.2.3.9. Укладка в траншею

Укладка трубопровода в траншею производится машиной, оборудованной боковой стрелой (side - booms или pipe - layers) (трубоукладчик).

6.2.3.10. Засыпка и восстановление земель

Засыпка траншеи осуществляется траншейным экскаватором или, если требует грунт, бульдозером.

Рекультивация земли осуществляется землеройными механизмами, приспособленными к качеству и сложностям пересекаемых земель (восстановление каналов (канав), склонов, первоначальных подпочвенных слоев, удаление камней и т.д.).

Геодезистом выполняется план трассы таким образом, чтобы знать как можно точнее расположение трубопровода.

6.2.3.11. Пересечение шоссейных и железных дорог и водных препятствий

Эти операции осуществляются специальными командами (организациями) в соответствии с разнообразной технологией (см. рисунки на с. 548 - 554),

— для шоссейных и железных дорог с небольшим движением путем отрытия траншеи и укладки открытого футляра из бетонных полуколец или бетонных плит над трубопроводом;
— для шоссейных и железных дорог с более интенсивным движением путем горизонтального бурения или продавливания;
— для рек и каналов путем отрытия подводной траншеи и укладки в нее трубопровода в бетонном сплошном футляре.

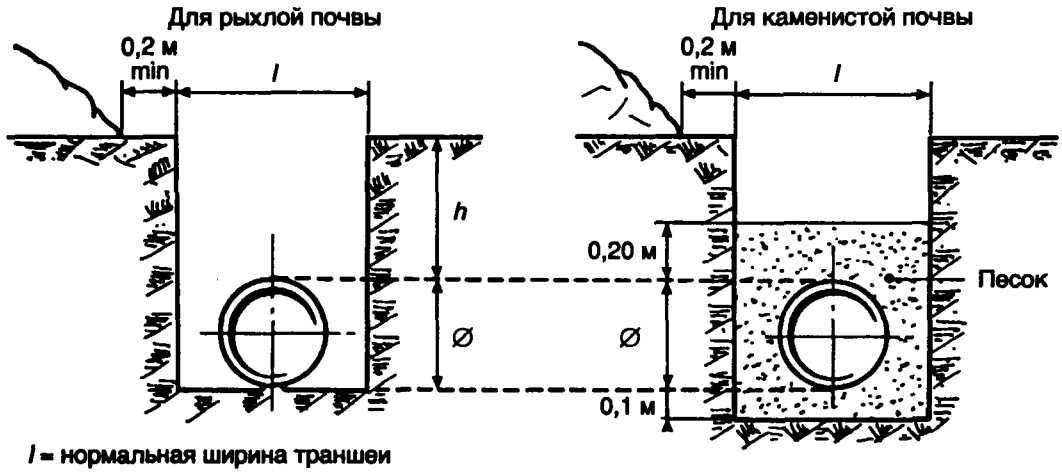
В некоторых случаях и прежде всего при пересечении широких рек, можно использовать горизонтальное управляемое бурение, которое позволяет пройти под дном без разрушения берегов и прекращения движения по реке.

6.2.3.12. Регламентированные испытания

Регламентированные испытания и их правила применения во Франции введены указом от 11 мая 1970 г.

Эти испытания состоят в:

— испытании на сопротивление при минимальном давлении, равном $\frac{P.M.S.}{0,9}$ и плюс испытания под давлением на заводе. Время испытания колеблется в зависимости от диаметра;
— испытании на плотность под давлением более высоким, чем максимальное рабочее давление (M.P.S.). Время испытания изменяется в зависимости от диаметра и объема трубы.



l = нормальная ширина траншеи

Ø = диаметр газопровода

h = высота покрытия

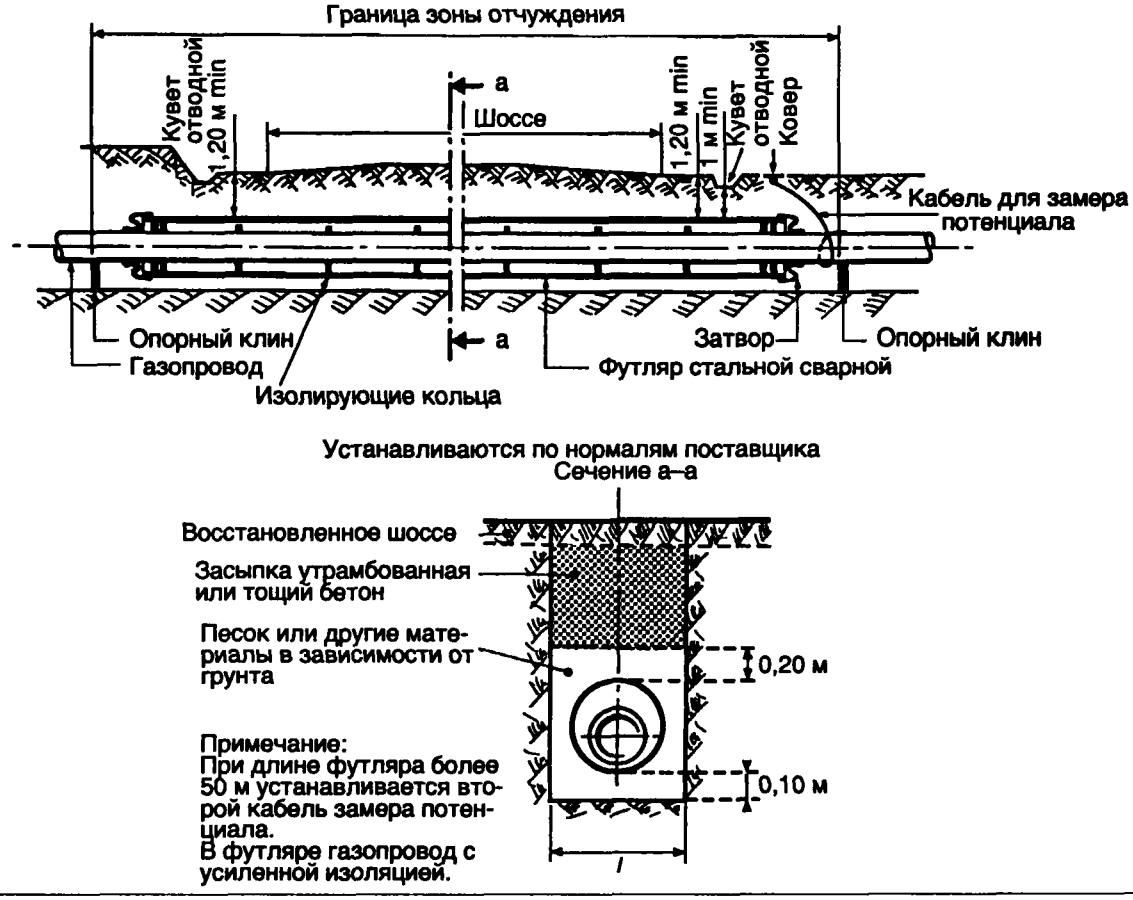
Ø мм	≤150	175 ≤ Ø ≤ 450	500 ≤ Ø ≤ 900	950 ≤ 1000
l м	0,5	Ø + 0,35	Ø + 0,40	Ø + 0,45

Ширина отчуждения, разрешенная для укладки в линию

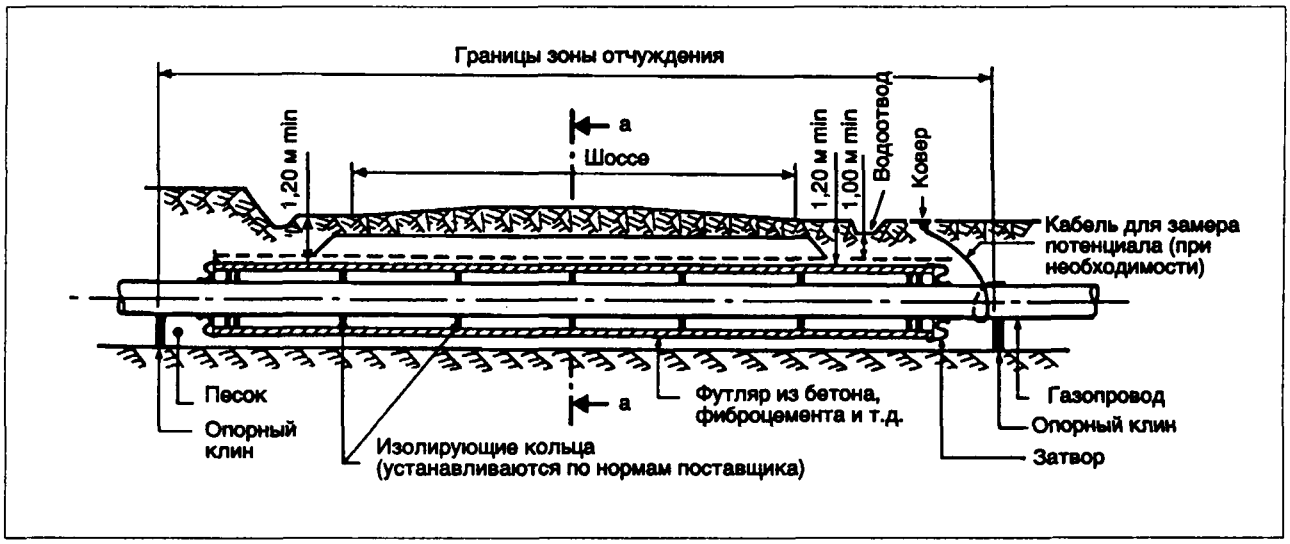
Ø мм	≤100	150 ≤ Ø ≤ 200	250 ≤ Ø ≤ 300	350	400 ≤ Ø ≤ 500	500 ≤ Ø ≤ 700	750 ≤ Ø ≤ 850	900 < Ø ≤ 1000	1050 < Ø ≤ 1200
L м	7	9	10	11	15	17	18,5	20,5	22
l м*	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	2

* Дополнительная ширина для выборки земли около 0,3 м.

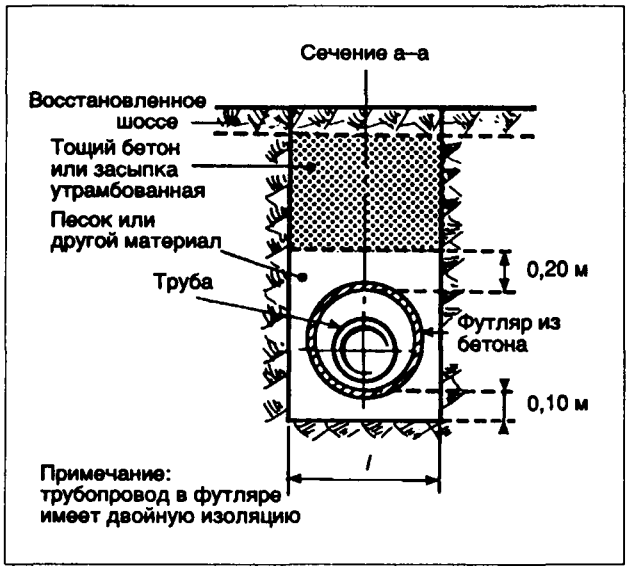
Типовой профиль траншеи



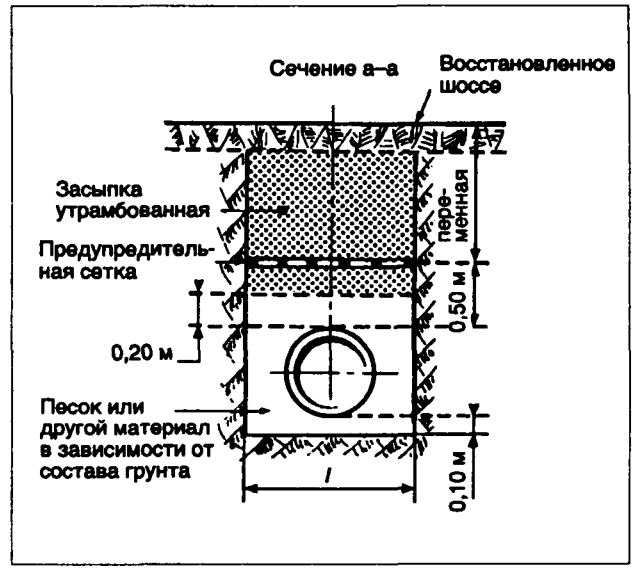
Пересечение дороги металлическим футляром.



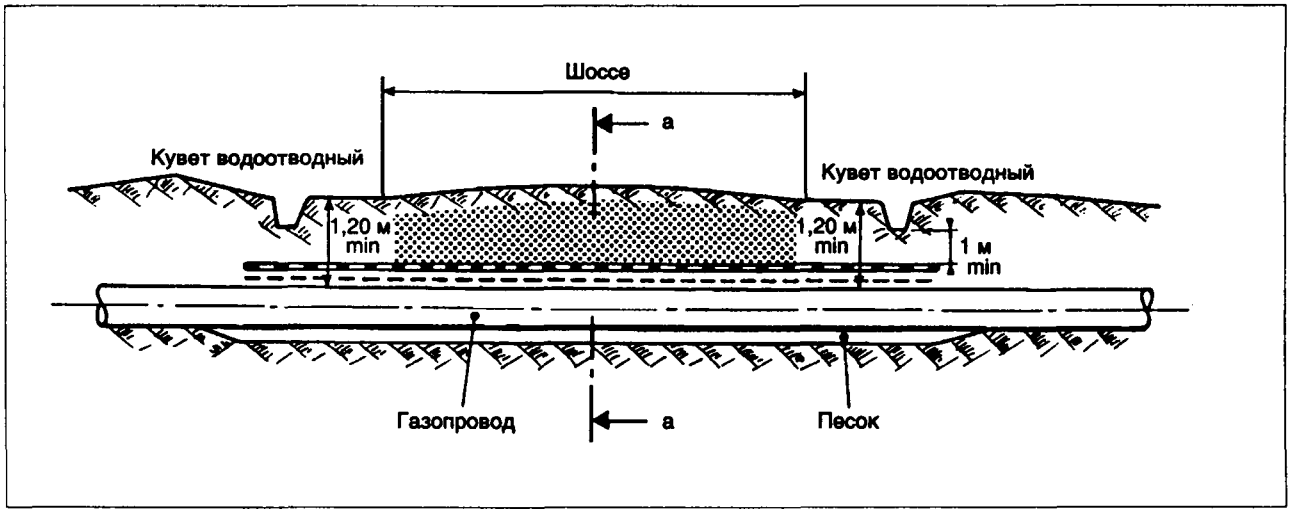
Пересечение дороги неметаллическим футляром.



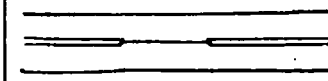
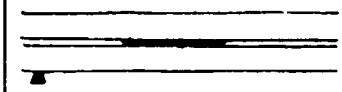
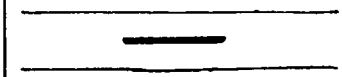
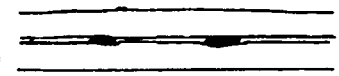
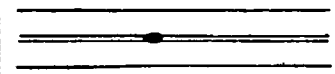
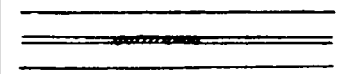
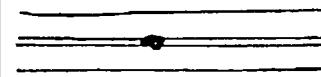
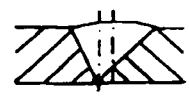
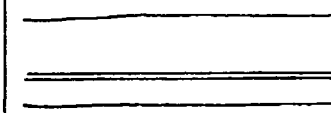
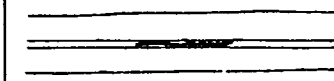
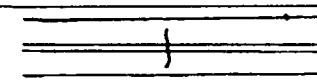
Пересечение дороги неметаллическим футляром (сечение а–а).



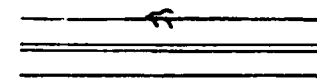
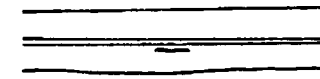
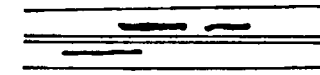
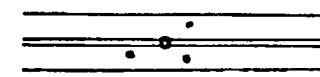
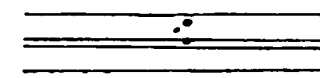
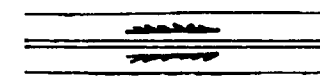
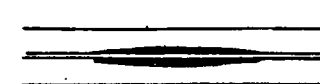
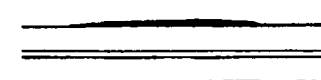
Пересечение дороги без футляра (сечение а–а).



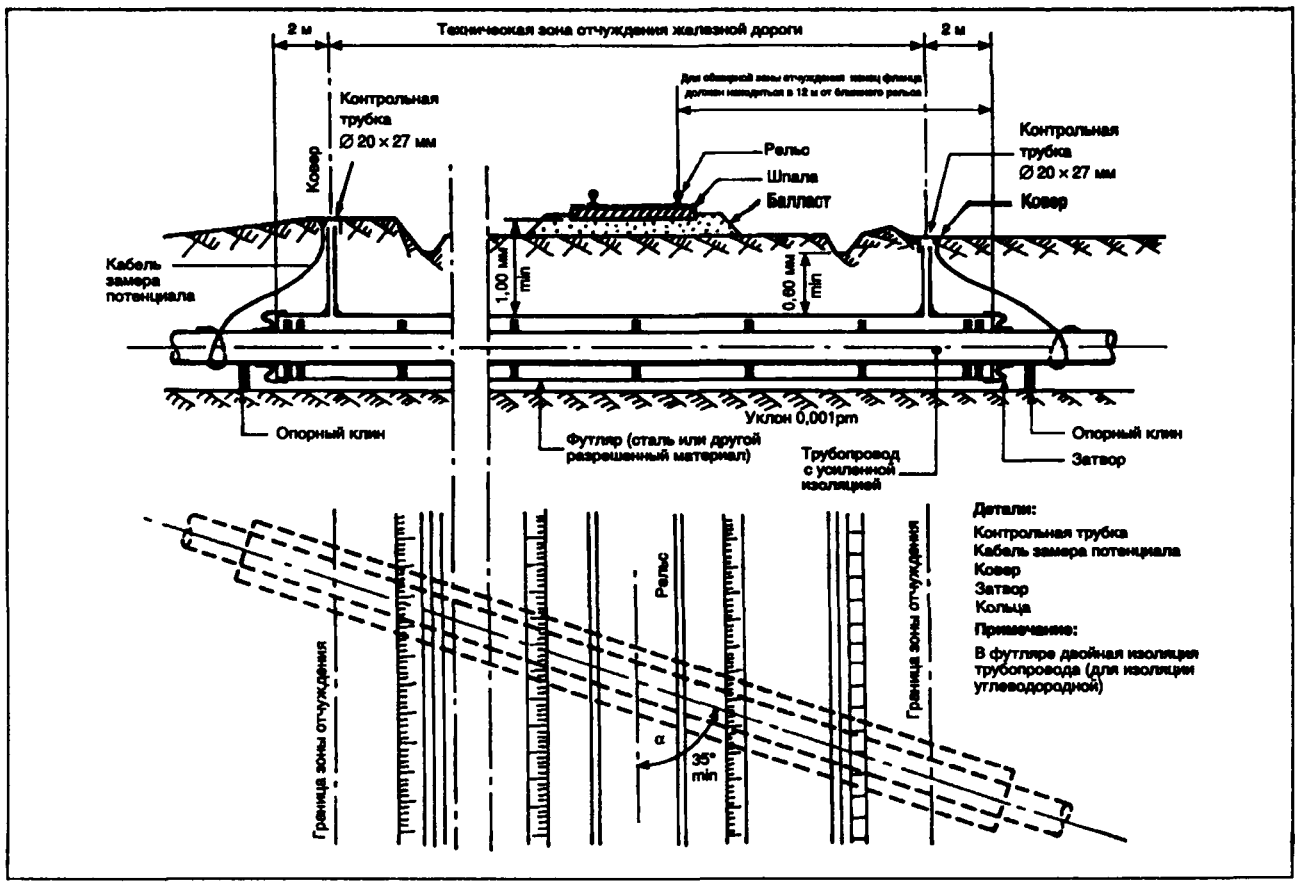
Пересечение дороги без футляра.

Вид недостатка	Описание	Разрез сварки	Радиографическое изображение
1. Отсутствие проникновения	Отсутствие металла на дне кромок (у основания)		
2. Отсутствие проникновения с включениями шлака	Отсутствие металла на дне кромок со шлаком, включенным в ходе сварки		
3. Отсутствие связи в сечении	В случае сварки с кромками вида X		
4. Переуплотнение кратера	Недостатки при начале сварки		
5. Отстутсвие провара (наклейки)	Дефект в двух измерениях, вызван отсутствием провара всей или части кромки		
6. Провал	В основном результат слишком высокого напряжения при проходе первого шва и/или слишком большого разведения кромок. Этот дефект характерен для потолочного соединения		
а) сверление	Локальный провал в форме кратера с различной глубиной		
б) проникающий шов выгнутый	Провал длинее и менее глубокий, чем при сверлении, и поражающий только проникающий шов		
в) калля	Провал и истечение металла в форме капель. Он находится в передней части трубы (плоская сварка, шов)		
7. Проникающий шов сдвинут по оси	Проникающий шов сдвинут по отношению к начальной позиции		
8. Продольная трещина	Прерывистость, вызванная разрывом металла и расположенная в плане паралельно в продольной оси сварного шва		
9. Поперечные трещины	Прерывистость вызванная поперечным разрывом металла и расположенная в большей части по поперечной оси сварного шва		

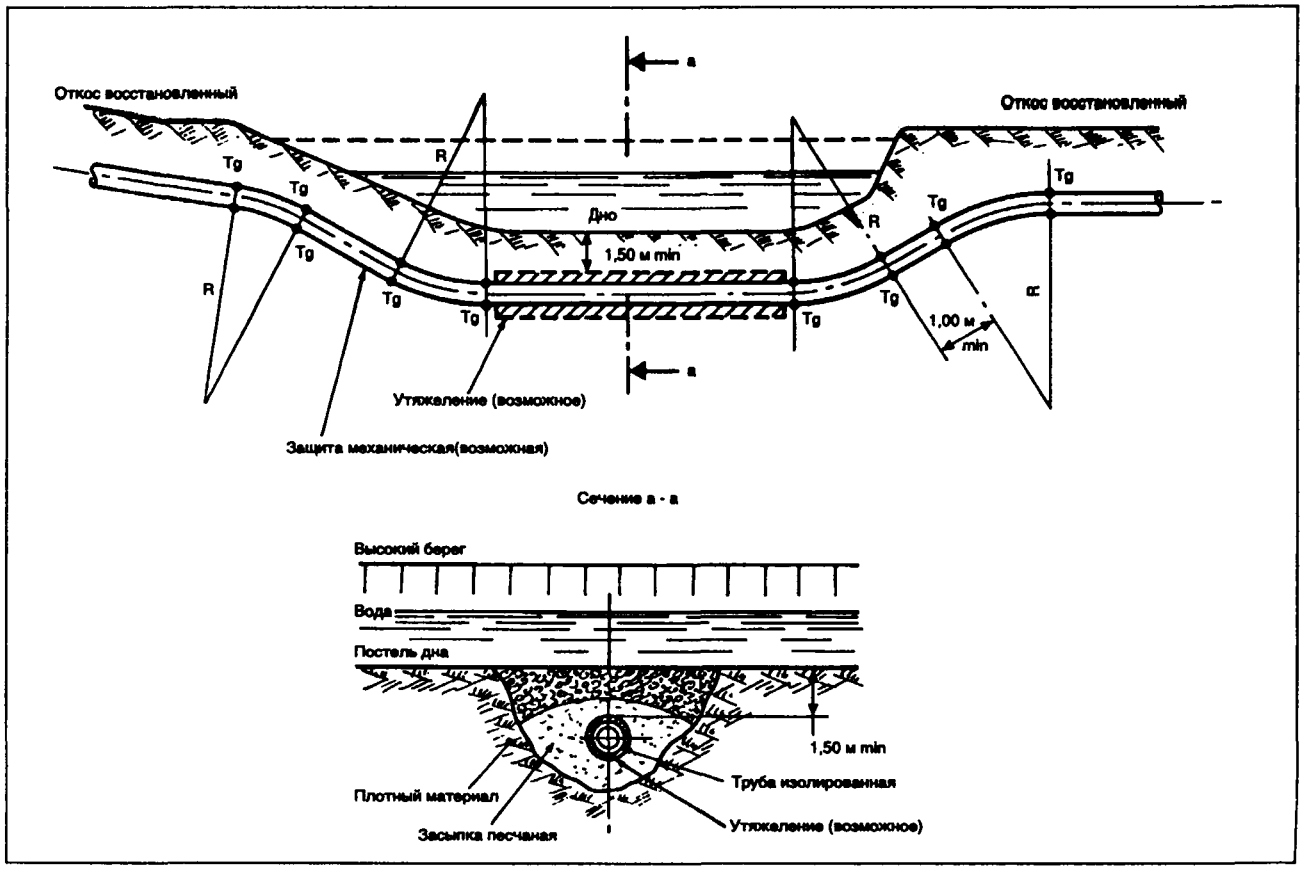
Перечень основных типовых дефектов.

Вид недостатка	Описание	Разрез сварки	Радиографическое изображение
10. Удар закалки	Трещина, расположенная в переходной зоне и возникшая вследствие слишком быстрого охлаждения зоны сварки		
11. Включение шлака (формой и расположением произвольным)	Шлак или другие посторонние включения, попавшие в металл в процессе сварки		
12. Удлиненные включением шлака (или цепочка)	Удлиненные каверны шлака или других посторонних примесей		
13. Пузырь	Газовые включения проявляются при использовании влажных электродов		
14. Гнездо пузырей	Группа пузырей		
15. Пузырь червеобразный	Пузыри вытянутой формы		
16. Укол	Дефект выхода небольшого размера (головка иглы)		
17. Нехватка толщины	Заключительный шов вогнутый		
18. Внутренняя борозда (желобок)	Борозда по краю проникающего шва		
19. Внешняя борозда (желобок)	Борозда на поверхности верхнего слоя у краев сварного шва		
20. Смещение	Смещение образующих свариваемых труб		

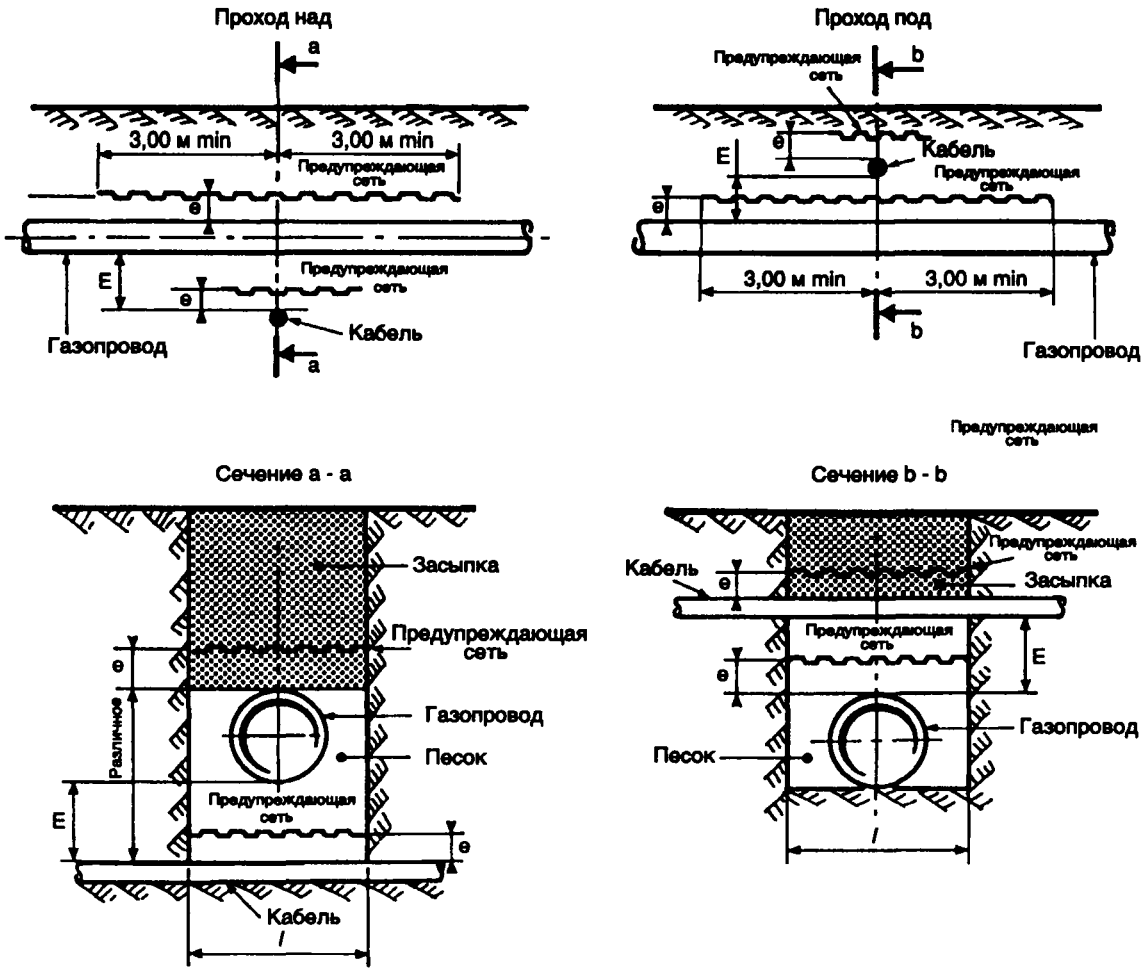
Перечень основных типовых дефектов (продолжение).



Пересечение железной дороги.



Пересечение водного потока: траншейное выполнение.



Примечание:
Предупредительная сеть излишня, если газопровод в футляре

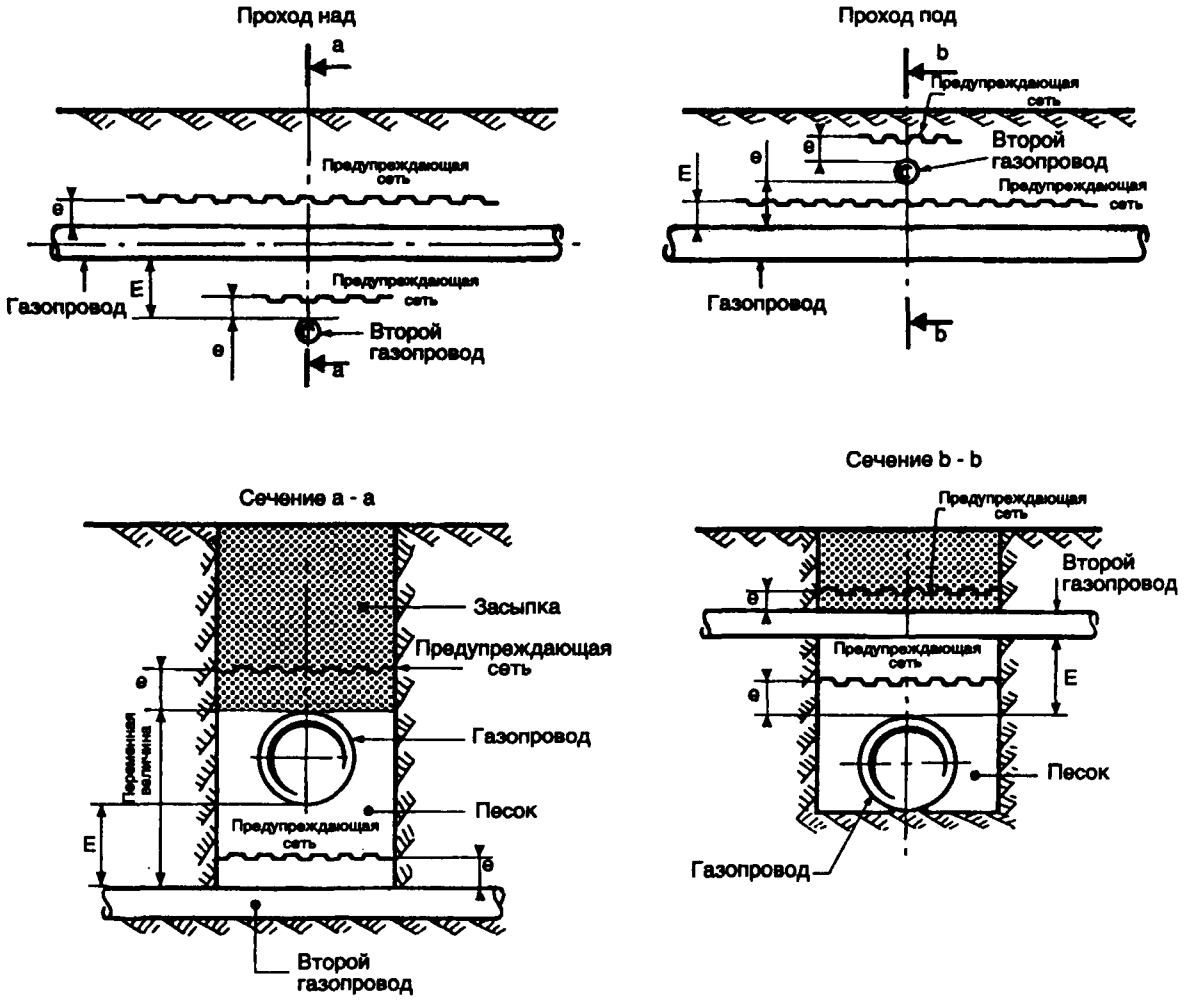
Спецификация:
E - расстояние от образующей кабеля до газопровода
e - расстояние между предупредительной сеткой и газопроводом

Удвоение изоляции с одной и другой стороны пересекающихся осей (для углеводородной изоляции)

Связь	Электроэнергия
0,40 м min	0,50 м min
0,20 м min	0,20 - 0,50 м
3,00 м (1)	5,00 м (1)

(1) длина измеряется перпендикулярно к пересекаемому кабелю

Пересечение электрического кабеля.



Спецификация:

E - расстояние между образующими трубопроводов

e - расстояние от трубопровода до предупредительной сети

Длинапредупредительной сети и удвоенной изоляции с обеих сторон пересечения осей трубопроводов (для углеводородной изоляции)

Газопровод металлический		Газопровод неметаллический
Связь	Электроэнергия	
0,60 м min	0,40 м min	0,40 м min
0,20 м min	0,20 м min	0,20 м min
3,00 м (1)	3,00 (1)	3,00 м (1)

(1) Длина измеряется перпендикулярно к пересекающимся трубопроводам

Примечание:
Предупредительная сеть излишня, если газопровод в футляре

Пересечение подземных трубопроводов.

6.2.4. Оценка комплекса операций одного из способов сварки

6.2.4.1. Характер и число образцов испытаний

Характер и число испытаний зависит от типа стали, которая применяется. Стали классифицируются на три категории, в соответствии с величиной их удельного минимального сопротивления изгибу.

	Удельное минимальное сопротивление изгибу P_m (МПа)	Тип стали (пример)
1 категория	$R_m > 550$	TSE 450 и TSE 480 (X 65, X 70)
2 категория	$450 \leq R_m \leq 550$	TSE 360 и TSE 415 (X 52, X 60)
3 категория	$R_m < 450$	TSE 220, TSE 250, TSE 290, TU 37, TU 48 (A 37, A 42, A 37, HLE, X 42, A 48, и т. д.)

6.2.4.1.1. Стали первой и второй категории ($R_m > 450$ МПа)

— Сварка сверху вниз

Одно испытание, так называемое первый шов, которое предназначено для определения чувствительности к растрескиванию.

Испытание, называемое "сварка всех швов".

— Сварка снизу вверх (толщина выше и равна 12,7 мм).

Те же испытания, что и выше.

— Сварка снизу вверх (толщина меньше, чем 12,7 мм).

Только одно испытание требует сварка, называемая сварка всех швов (проходов).

6.2.4.1.2. Сталь, относящаяся к третьей категории ($R_m < 450$ МПа)

Требуется одно испытание, называемое "сварка всех проходов".

6.2.4.2. Выполнение испытаний сварки

6.2.4.2.1. Сварка "один первый проход"

Сварка "один первый проход" выполняется по всей окружности в соответствии с описанием способа (операции). Все характеристики выполняемых операций записываются в протокол.

6.2.4.2.2. Сварка "все проходы"

Сварка "все швы" выполняется по всей окружности в соответствии с описанием способа, предложенного подрядчиком. Все характеристики операций заносятся в протокол.

Температура стали поднимается на допустимую величину для кромки непосредственно перед вторым проходом сварки (начало второго прохода).

6.2.4.3. Условия квалификации способа выполнения операции

6.2.4.3.1. Сварка "один первый проход (шов)"

6.2.4.3.1.1. Визуальный осмотр

В процессе внутреннего визуального осмотра, выполняемого непосредственно после проведения операции, никаких недопустимых повреждений не должно наблюдаться.

6.2.4.3.1.2. Микрографическое исследование

Оптическое микрографическое изучение, с увеличением минимум в 50 раз образцов трубы, не должно обнаруживать никаких трещин.

6.2.4.3.1.3. Испытание на твердость

— Выполнение испытаний.

Пять образцов подвергаются испытанию на твердость по Викерсу с нагрузкой в 49 N (в соответствии с нормами NF A 03-154) для того, чтобы определить максимальную твердость в зоне, относящейся к зоне нагрева.

— Критерий допустимости

Случай	Температура перед первым швом	Твердость максимальная (5 образцов) HV 5	Результат
A	≥100°C	≤380 >380	Удовлетворительный А переделать
B	<100°C	≤350 >350	Удовлетворительный А переделать

6.2.4.3.2. Сварка "все швы"

6.2.4.3.2.1. Визуальный осмотр

Никаких недопустимых повреждений не должно быть обнаружено в процессе внутреннего и внешнего осмотра.

6.2.4.3.2.2. Радиографическое исследование

В процессе радиографических исследований, выполняемых в соответствии с правилами, не должно наблюдаться никаких недопустимых повреждений.

6.2.4.3.2.3. Испытания с разрушением

Характер и число разрушаемых испытаний зависит от диаметра и толщины трубы одновременно.

6.2.4.3.2.4. Металлографическое изучение и испытание твердости

— Макрография

Не допускается никаких трещин и наплывов

— Испытание твердости

Максимальная величина твердости не должна превосходить 350 HV 5.

— Условия одобрения

Операция сварки принимается удовлетворительной, если все исследования и испытания дали удовлетворительные результаты.

6.2.5. Наружная изоляция

Стальные трубы покрываются снаружи изоляцией, чтобы избежать внешней электрохимической коррозии металла. Существует и применяется несколько технологий.

6.2.5.1. Изоляция на углеводородной основе

Речь идет об угольной пыли или нефтяном битуме, применяемых в зависимости от условий при температуре от 120°C до 240°C.

Работы обычно выполняются на заводе и заключаются в следующем:

— очистка поверхности щетками и обезжиривании, чтобы убрать масло, ржавчину и окалину;
— первый слой наносится в холодном состоянии;
— слой защитный, армированный стекловолокном и защищенный первоначально флангицидной бумагой.

Изоляция на углеводородной основе может применяться так же для защиты оборудования, арматуры или фасонных частей.

Нанесенная изоляция очень хрупкая и требует многочисленного ремонта. Качество получаемой изоляции среднее.

6.2.5.2. Клейкие пленки

Это или тонкая пленка на базе полиэтилена, или на базе тонкого текстиля и пластического материала. Они наносятся на первый слой после зачистки трубы, применяется обычно на стройке и служат в принципе для защиты соединений труб после сварки, но могут также использоваться для изоляции на линии.

6.2.5.3. Полиэтиленовая изоляция

Она осуществляется на заводе, либо плавлением, либо выдавливанием (процесс в основном применяемый). В последнем случае, труба очищается дробеструйкой, подогревается, изолируется тонкой пленкой (бумагой) затем полиэтилен выдавливается через специальную головку или фильтр на трубу.

Полученная изоляция имеет хорошие качества и эта технология в основном, применяется на большей части строек.

6.2.5.4. Другие типы изоляции

Можно отметить также изоляции термического затвердевания типа эпоксидных или полиуритана, которые находятся в испытании, но не нашли еще широкого применения.

Изоляция стыков может быть осуществлена с помощью муфт, сжимающихся при изменении температуры. Такое качество изоляции выше, чем пленок, но муфты не нашли применения из-за высокой стоимости.

6.2.6. Внутренняя изоляция

Трубы могут быть также покрыты внутри эпоксидной изоляцией для того, чтобы снизить потери давления за счет уменьшения шероховатости.

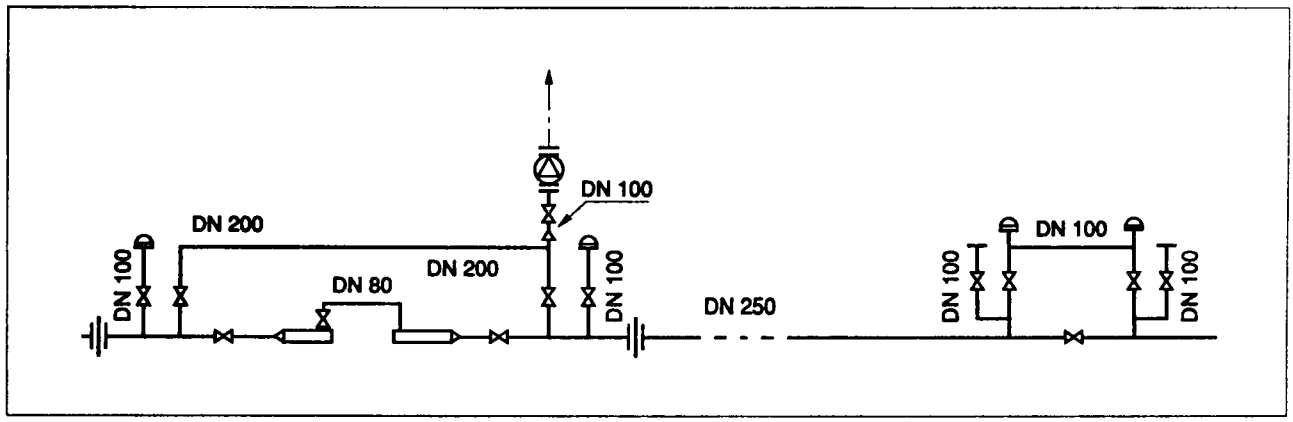
Краска наносится пистолетом после обезжиривания и механической очистки. Только трубы диаметром больше или равным 400 мм могут быть покрыты этой оболочкой (изоляцией).

6.2.7. Отключающие устройства на газопроводе

Указом по безопасности (правилами), утвержденными 11 мая 1970 г., предписывается, что трубопровод должен быть оборудован изолирующими задвижками (кранами). Расстояние между задвижками не должно превышать 20 км для зон типа A и B. Для зоны C расстояние между задвижками не должно превышать 10 км и плюс к тому объем газа, заключенный между секционирующими задвижками, не должен превышать 90000 км^3. Секционирующий пост включает только задвижку для полного прохода газа с одной и другой стороны трубы для сброса газа на свечу, а так же байпас для перепуска газа.

Разделительные посты имеют более сложную схему, т.к. они служат для приема и отправления скребков. Они располагаются на расстоянии от 100 до 150 км или в месте каждого изменения диаметра. Они оборудованы устройствами для приема скребков, изолированных затвором и задвижкой для полного прохода газа.

Трубопроводы сбросной свечи, уравнительные трубопроводы и байпас дополняют схему, которая дается на с. 557. Расположение этих постов, кроме соображений дистанции (расстояния), определяется в зависимости от необходимости установить начало ответвления, поста снабжения (врезки) и компрессорных станций. Они устанавливаются на оборудованной территории, окруженной забором для того, чтобы избежать вторжения.



Примеры разделительных и секционирующих постов (диаметр DN = 250).

6.2.8. Контроль и испытание

Эта тема рассматривается в разд. 6.10. Правила.

6.2.9. Сушка трубопроводов после гидроиспытаний

6.2.9.1. Операции, предшествующие операции сушки

6.2.9.1.1. Опорожнение

Оно должно осуществляться без проникновения воздуха в воду: не опорожнять за счет гравитации; контролировать расход с помощью регулирующей задвижки. Во время работ используется следующее средство: поршень с тремя и четырьмя уплотняющими манжетами, проталкиваемый воздухом со скоростью около 5 км/ч.

6.2.9.1.2. Осушка

Осушка совершенно необходима после опорожнения. Эта операция состоит в организации постоянной циркуляции в одном направлении некоторого числа поршней с манжетами из пористой резины или баллона, продавливаемых сжатым воздухом.

В основном используются следующие средства:

— поршни с манжетами или поршень из пористых материалов;
— пять-десять проходов;
— 24 часа между последовательными проходами (частота в начале наибольшая);
— скорость прохода от 15 до 20 км/ч;
— давление прохода от 2 до 3 бар.

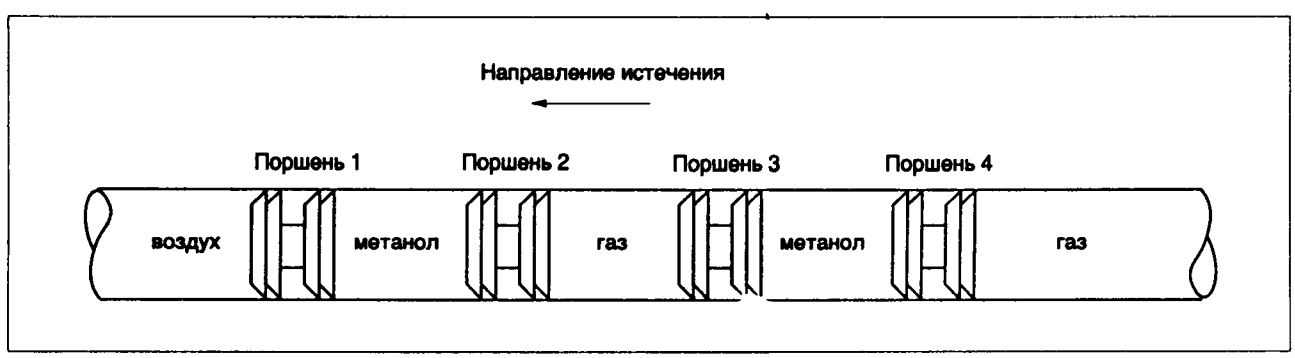
Трубопровод хорошо осушен, если после прохода последовательно трех поршней, каждый в течение порядка одного дня, последний проход поезд соберет незначительное количество воды.

6.2.9.2. Разнообразные способы сушки

6.2.9.2.1. Осушка газом с проходом матенольной пробки

Последний поршень может быть заменен пористым поршнем типа "polly pig". Тем не менее, учитывая высокую стоимость и быстрый износ материала, его использование рекомендуется для больших длин.

Используемый поршень должен быть оборудован новыми манжетами высокого качества с тем, чтобы обеспечить хорошую плотность на всем пути движения инструмента.



Конструкция эшелона метанола.

Общий объем используемого метанола определяется из соотношения:

$$Q = k\pi DL,$$

где:

Q – объем в $м^3$;

D – внутренний диаметр трубопровода в м;

L – длина трубопровода в км;

k – коэффициент, равный 0,25 для трубопроводов без внутренней изоляции;

k – коэффициент, равный 0,15 для трубопроводов с внутренней изоляцией;

Требуемая скорость прохода равна:

— 30 км/ч – для больших диаметров;
— от 10 до 15 км/ч – для маленьких диаметров и труб, имеющих внутреннюю изоляцию.

6.2.9.2.2. Осушка путем испарения в циркулируемый газ

Способ состоит в испарении остаточной воды с помощью сухого газа: природного газа или сухого воздуха.

6.2.9.2.2.1. Осушка природным газом

Осушка с помощью природного газа приводит к получению на выходе из трубопровода влажного газа. Этот газ может быть направлен в резервуар, осушен и смешан с сухим газом перед его закачкой в сеть, может быть переведен в резерв в состоянии, исключающем образование ледяных пробок и гидратов или сожен в свече (решение приемлемое для маленьких диаметров и небольшой длине).

Необходимы определенные предосторожности:

— осушку желательно осуществлять в теплый период года;
— максимально снизить давление;
— в процессе сушки, если возможно, использовать поршень-скребок.

6.2.9.2.2.2. Сушка сухим воздухом

Метод состоит в принудительной циркуляции внутри трубопровода поршней, двигающихся с равными интервалами за счет сухого воздуха до тех пор, пока не достигается требуемая точка росы.

Сухой воздух поступает из осушительного блока, наполненного кремнеземом или активированным алюминием (см. рисунок ниже).

6.2.9.2.3. Осушка путем испарения под вакуумом (пониженном давлении)

Способ состоит в испарении воды под давлением кипения, соответствующим температуре внутри трубопровода.

6.2.9.2.3.1. Схема операции по осушке путем испарения под вакуумом

Эта операция включает три фазы:

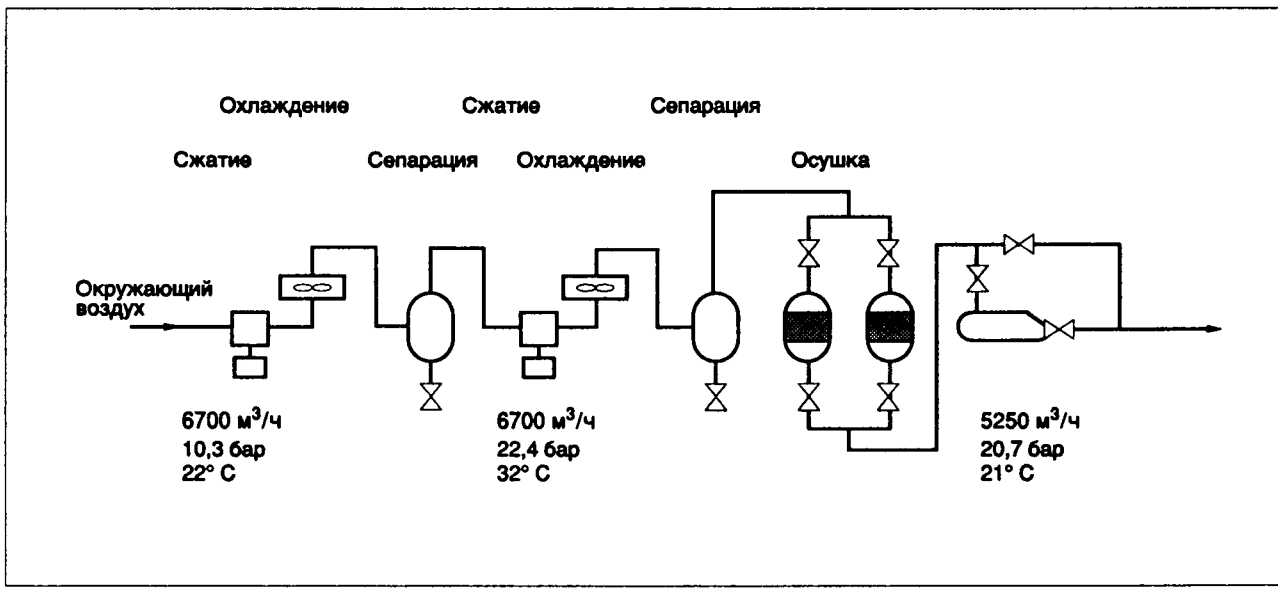
— 1-ая фаза – удаление воздуха, понижение давления;
— 2-ая фаза – вскипание и удаление воды;
— 3-я фаза – создание вакуума, конец операции.

Для уменьшения времени сушки и достижения требуемой точки росы один из вариантов состоит в осуществлении продувки (прочистки) азотом или даже воздухом под абсолютным давлением, равным 20 - 30 мбар. Эта продувка проводится в период 3-ей фазы, прежде чем достигается требуемое предельное давление (разрежение).

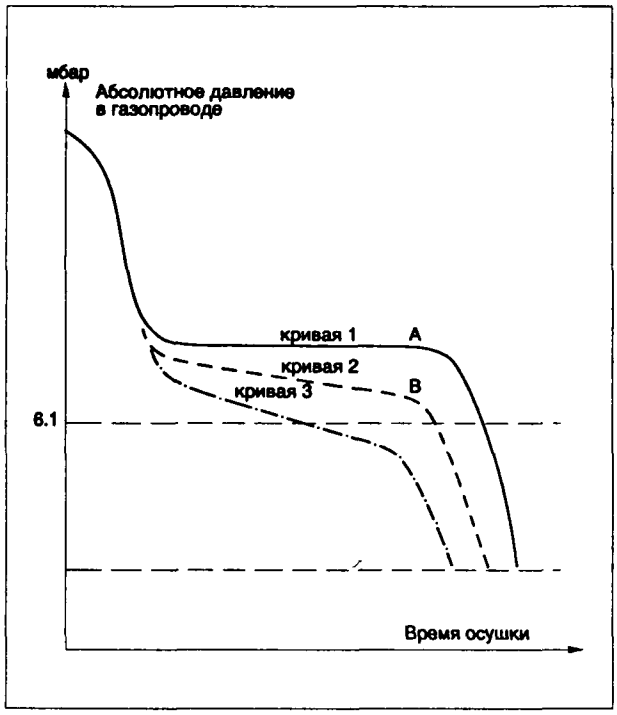
Необходимость этой продувки состоит прежде всего в том, что продувочный газ несет тепло и улучшает условия теплопередачи между парами воды и циркулирующим газом.

Кроме того появляется возможность контролировать точку росы продувочного газа с помощью существующих приборов.

С помощью этой уловки, возможно получить точку росы очень низкую и даже более низкую, чем можно получить прямым снижением давления с помощью вакуумнасоса, за время значительно



Пример осушки воздуха.



Кривые осушки.

меньшее, т.к. вода в этом случае отбирается (удаляется) значительно быстрее, чем с помощью простого снижения давления, вблизи предельного низкого давления. Начало продувки зависит от профиля характеристики кривой осушки.

На рисунке представлено в схематическом виде три случая, которые могут иметь место:

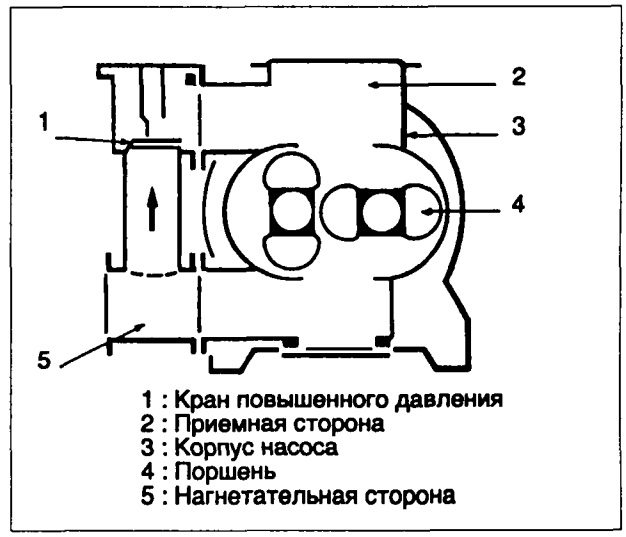
— кривые 1 и 2 относятся к осушке, когда теплопередача достаточна или недостаточна, когда перелом прямой испарения находится в точках A и B очевидной выше точки, соответствующей образованию льда (т.е. давление порядка 6,1 мбар). В этом случае, можно осуществлять продувку в финальной фазе создания вакуума при любом давлении (даже меньшем чем 6,1 мбар), совпадающем по времени с процессом сушки.
— на кривой 3 перелом прямой испарения находится ниже 6,1 мбар. Есть риск образования льда. В этом случае продувка должна производиться, когда давление достигнет 8 или 9 мбар.

При завершении продувки реализуется финальная фаза – создается вакуум, в 1 или 2 мбар, прежде чем осуществить пуск газа. Окончательно точка росы будет зависеть от времени продувки.

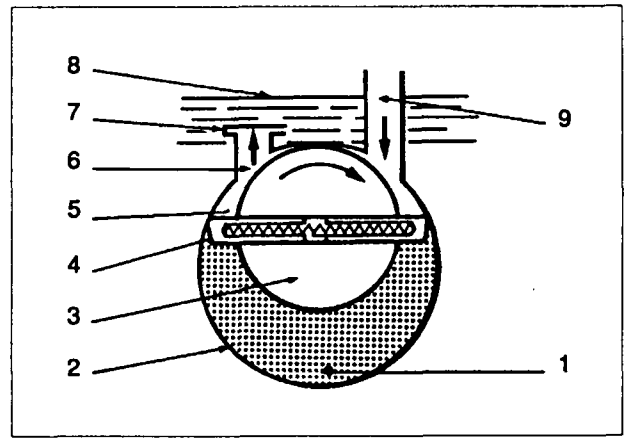
6.2.9.2.3.2. Механизмы (средства) для осуществления работ

Можно использовать следующее оборудование:

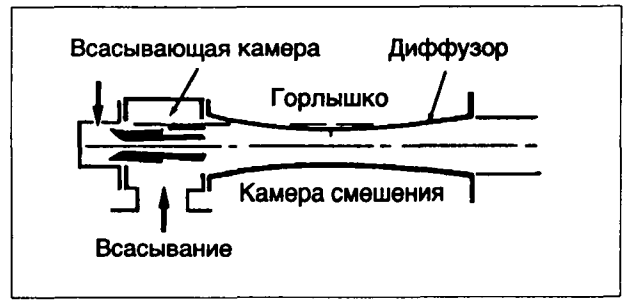
— насосы механические (центробежные, лопастные 2-х и 3-х этажные), соединенные при необходимости с вакуумнасосом "Roots";
— пересеченный профиль увеличивает риск образования сифона
— в случае большого перепада высот возможна прокачка за поршнем метанола



Насос "Roots"



Лопастной насос. 1 – рабочая камера; 2 – корпус насоса; 3 – ротор; 4 – лопасть; 5 – вход балластного воздуха; 6 – нагнетательный патрубок; 7 – клапан насоса; 8 – насосное масло; 9 – всасывающий патрубок.



Гидродинамический насос.

6.2.9.3. Сравнение различных способов осушки

Таблица на с. 560 дает, с одной стороны, характеристику различных способов осушки, а, с другой стороны, их совершенство.

6 ТРАНСПОРТ ПО ТРУБОПРОВОДАМ

Перечень принимаемых параметров	Параметры	Метод осушки				
		Газ + метанол	Газ	Газ на свечу	Сухой воздух	Вакуум
Труба	Диаметр	Все диаметры	Все диаметры	Малые диаметры	Все диаметры	Все диаметры
	Длина	Любые длины	Любые длины	Десяток километров	Несколько десятков километров	Несколько десятков километров
	Объем воды	Любой объем	Любой объем			
	Пропуск поршней	Желателен, т.к. снижает количество влаги на стенках трубы после опорожнения				
Состояние после опорожнения	Осушка	Тщательно сделано (80 г/м^2)	Тщательно очищено (80 г/м^2)	Тщательно осушено	Очень тщательно осушено	Очень тщательно осушено
	Профиль	Пересеченный профиль увеличивает риск образования сифона				
		В случае большого перепада высот возможна прокачка за поршнем метанола				
Окружающая среда	Температура грунта	Мало влияет	Повышенная температура грунта способствует испарению			
	Теплопроводность грунта					Хороший теплообмен грунт–труба уменьшает риск образования льда
	Изменение температуры во время работ	Мало ощутимо	Риск промежуточной конденсации и образования сифона			

Отличительные параметры.

Перечень принимаемых параметров	Метод осушки				
	Газ + метанол	Газ	Газ на свечу	Сухой воздух	Вакуум
Эффективность	Хорошая, но выход влажного газа	Хорошая, но выход влажного газа Необходима осушка под пониженным давлением (гидраты)	Хорошая	Хорошая	Хорошая
Время, сроки	Сооружение свободно со времени пуска пробки метанола. Осушка – функция расхода	Сооружение свободно со времени пуска газа. Осушка – функция расхода	Осушка быстрая (несколько дней)	Сооружение занято в течение всего времени сушки, которое может достигать несколько недель	
Риск	Если проход метанола неудачный или собрано недостаточно смеси, необходимо отправление второй порции (поезда) и соответствующие потери газа Блокирование поршня Плохая плотность поршня	Закупорка гидратами Плохое функционирование регуляторного пункта Присутствие сифона позволяет думать, что осушка удовлетворительная	Наличие сифона позволяет думать, что осушка удовлетворительная Образование льда в начале операции	Наличие сифона позволяет думать, что осушка удовлетворительная	Наличие сифона позволяет думать, что осушка удовлетворительная
Стоимость (цена)	Ручные работы Метанол Поршни Сбор и сжигание	Обсуживание регуляторного пункта Амортизация регуляторного пункта	Ручные работы плюс амортизация регуляторного пункта Потеря газа	Стоимость работ плюс амортизация компрессоров и установок осушки Снабжение топливом	Стоимость работ плюс компрессора и вакуумных установок Снабжение топливом

Сравнение различных методов осушки.

6.2.10. Гидраты природного газа

6.2.10.1. Природа

Гидраты представляют кристаллическое соединение, созданное реакцией воды с метаном, этаном, пропаном, бутаном и углеводородным газом.

Газ + вода ⟶ гидрат

(пар) + (жидкость) ⟵ твердое тело

Риск образования гидратов существует всегда, если есть вода в жидком состоянии:

— осушка трубопровода, после гидроиспытания;
— конденсация паров воды, находящихся в газе, с учетом условий температуры и давления.

6.2.10.2. Кривая формирования гидратов

Существуют разнообразные методы, позволяющие определить условия образования гидратов.

Метод Carson и Katz (1941) – аналогия метода расчета равновесия жидкость–пар, основанный на эмпирических константах равновесия, был вытеснен методом Parrish и Prausnitz (1972), привлекающим термодинамическую статистику (глава 1. Общая часть, § 1.7.2.2.7).

6.2.10.3. Количество воды, насыщающей природный газ

Риск образования гидратов встречается при наличии воды, поэтому важно определить количество и контролировать ее присутствие в природном газе.

Фирма Gaz de France предложила кривые, дающие процентное содержание воды в состоянии насыщения для различных природных газов. Эти кривые применимы для газов, обычно транспортируемых во Франции, и позволяют определить условия давления и температуры, для которых есть риск конденсации (образования гидратов) (гл. 1. Общая часть, § 1.7.2.2.7).

6.2.10.4. Предупреждение образования гидратов, действие ингибиторов

Газовая промышленность использует метанол (или изопропанол для системы регулирования), который реагирует на равновесие жидкость–пары воды, приводя к сдвигу условия (P, T) формирования гидратов (гл. 1. Общая часть, § 1.7.2.2.7).

Хаммершмидт установил следующее соотношение:

$$\Delta T = \frac{k}{M}\frac{C}{100-C},$$

где:

M – молекулярная масса ингибитора (гр/моль);

C – массовая доля (в %) ингибитора в жидкой фазе;

k – константа, зависящая от ингибитора;

ΔT – снижение температуры формирования гидратов.

Экспериментальные исследования позволили принять величину k для метанола равной в 1130°C гр/моль, что приводит к соотношению

$$T = 35,3\frac{C}{100-C},$$

где

$$C = \frac{100\Delta T}{\Delta T + 35,3}.$$

Количество метанола для впрыска может быть подсчитано точно путем применения закона равновесия. Можно принять во внимание, что подача 500 мгр/нм^3 метанола позволяет при содержании воды от 80 до 100 мгр/нм^3 избежать образования льда или гидратов.

6.2.11. Список литературы

E. Berecz, Balla-Achs. – Gas Hydrates. Studies in inorganic Chemistry IV. Elsevier, Amsterdam (1983).

F. Dewerdt, M. Roncier. – Étude de la formation d'hydrates de gaz naturel, congrès du gaz. A. T. G., Paris (1971).

A. Nicoud. – Rapport: séchage des canalisations de transport. A. T. G., Paris (1987).

J. Saint-Just, D. Bomassi. – Point de rosée et teneur en eau: spécificité du gaz naturel. GAZ d'aujourd'hui, Paris (octobre 1984).

6.3. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ПОДЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ

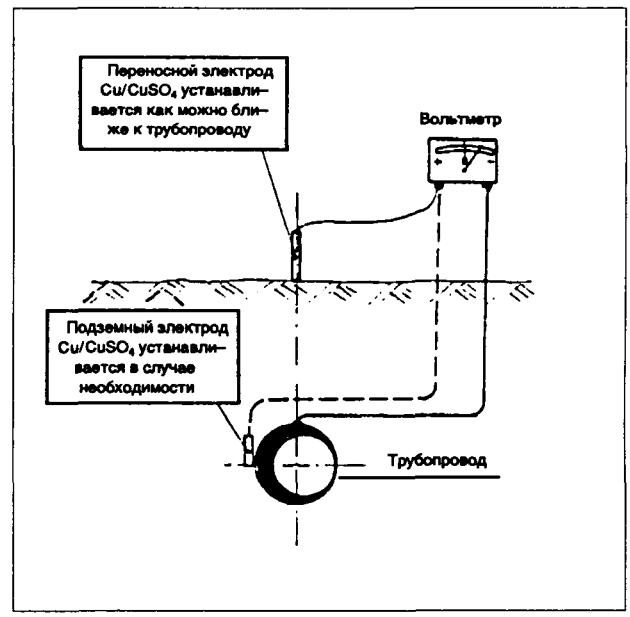
6.3.1. Общая часть

Катодная защита состоит в отрицательной поляризации с помощью специального устройства, защищающей металл от воздействия окружающей среды. Для каждого металла защитный потенциал фиксирован. Например, для стали – 850 мВ, для свинца – 580 мВ, для меди – 250 мВ этот потенциал измеряется с помощью образцового справочного электрода $Cu/CuSO_4$ (см. рисунок напротив).

Катодная защита подземных и погруженных сооружений – необходимое дополнение пассивных методов защиты в виде изоляции и покраски. Она позволяет аннулировать химическую, электрохимическую и бактериальную коррозию металла, контактирующего с окружающей проводящей средой, называемой электролитом.

В настоящее время используется две системы защиты: с помощью гальванического анода и путем отвода тока (дренажа).

Сейчас блуждающие токи могут создавать электрохимическую коррозию, возможно будет необходимым сопровождать (дополнять) эти системы аппаратами электродренажа.



Принцип замера потенциала трубопровода по отношению к грунту.

6.3.2. Защита гальваническим анодом

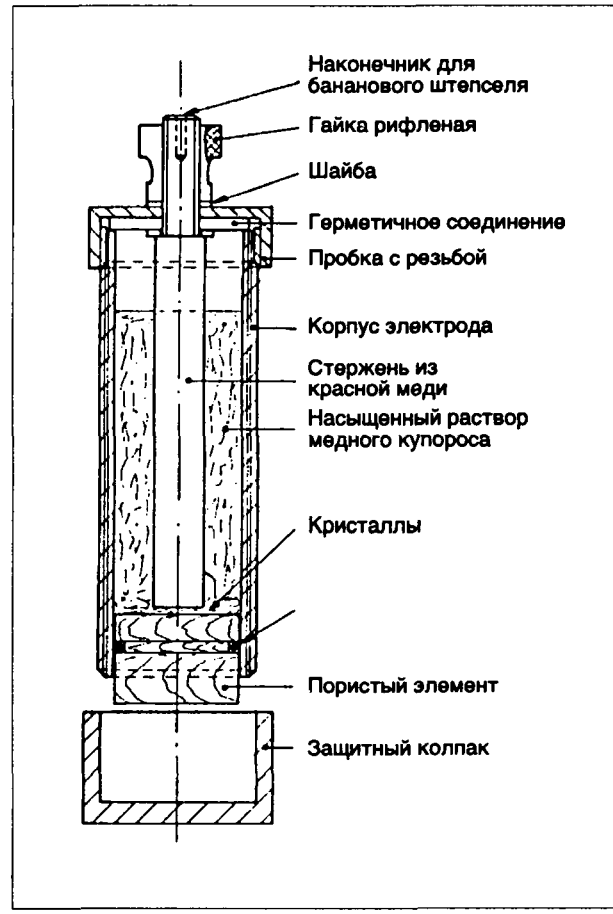
6.3.2.1. Принцип

Этот метод защиты состоит в создании в рассматриваемой среде электрического гальванического элемента, соединяя защищаемый металл с металлом более электронегативным, и который является анодом системы: т.е. происходит его разрушение (рис. стр. 563).

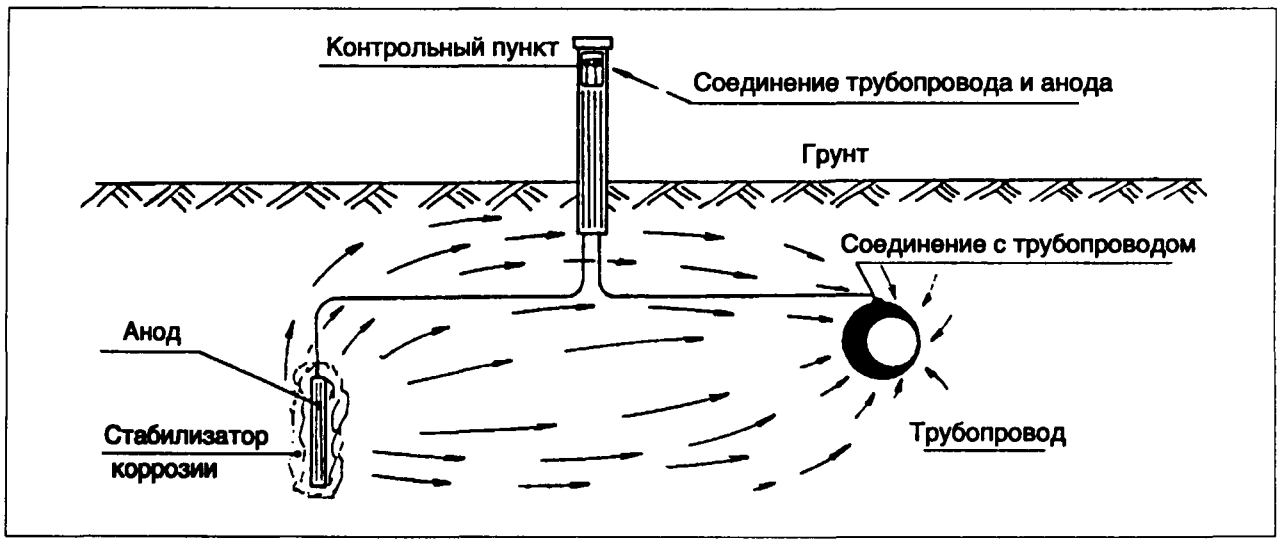
Основными металлами, используемыми в качестве анода, являются: магний, цинк, и, первоначально, алюминий (главным образом в море).

Общая характеристика анода в стабилизаторе (смесь гипса и глины)

	Цинк	Магний
Чистота в %	99,99	6 Al, 3 Zn, 2 Mn } 89 Mg
Масса объемная	7	1,94
A/r реальных на килограмм.	745	1 100
Кг реальных на ампер в год.	11,7	7,8
Потенциал/грунт в вольтах ($Cu/CuSO_4$)	–1,1	–1,55
Размеры стандартные:		
· длина	600мм	360 мм
· ширина	80 мм	185 мм
· толщина	62 мм	154 мм
· вес	20 кг	20 кг



Переносной образцовый электрод $Cu/CuSO_4$.



Принцип анодной защиты.

6.3.2.2. Применение

Анодная гальваническая защита применяется в основном:

— в средах со слабым удельным электросопротивлением ($\rho < 50$ Ω/м) для того, чтобы сопротивление грунт–анод не очень ограничивало интенсивность потока (электронов);
— для трубопроводов небольшой длины и имеющих хорошую изоляцию для того, чтобы интенсивность потока системы была совместима с необходимой для катодной защиты;
— при отсутствии сильных блуждающих токов.

6.3.2.3. Эксплуатация

Она требует часто очищать контакты и периодически проверять соединения, имея в виду слабую плотность токов (небольшую величину).

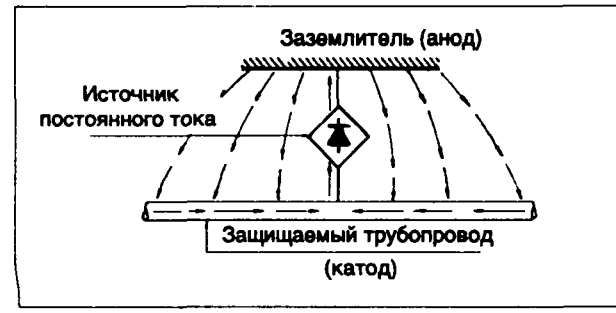
6.3.3. Защита путем дренажа тока (электродренажная)

6.3.3.1. Принцип

Негативная поляризация защищаемой структуры осуществляется соединением с отрицательным полюсом источника постоянного тока, положительный полюс которого соединен с анодом-заземлителем, который разрушается см. рисунок.

6.3.3.2. Аппаратура

В качестве источников постоянного тока могут быть:



Принцип катодной защиты.

— батареи большой емкости (1000 ампер) или батареи перезаряжаемые (50 А) для особых случаев, требующих слабых потоков;
— выпрямитель сухой, включающий понижающий напряжение трансформатор и выпрямительный диодный или тиристорный мост.

Аноды-заземлители могут быть:

— либо большой металлической массы, наиболее часто сталь; такие как старые рельсы, сваренные встык и которые теряют по 10 кг на ампер в год;
— либо ферросилиций (цилиндры небольшого размера), которые расходуются по 0.5 кг/ампер в год;
— либо из графита (цилиндры небольшого размера), который теряет значительно вес – 1 кг/ампер в год;
— либо магнетит (цилиндры небольшого размера), которые расходуются в количестве 0.01 кг/ампер в год.

6.3.3.3. Эксплуатация

Эксплуатация такой системы заключается в проверке один раз в месяц работоспособности выпрямителя и измерении данных вольтметра, амперметра и счетчика.

6.3.4. Защита против блуждающих токов: электродренаж

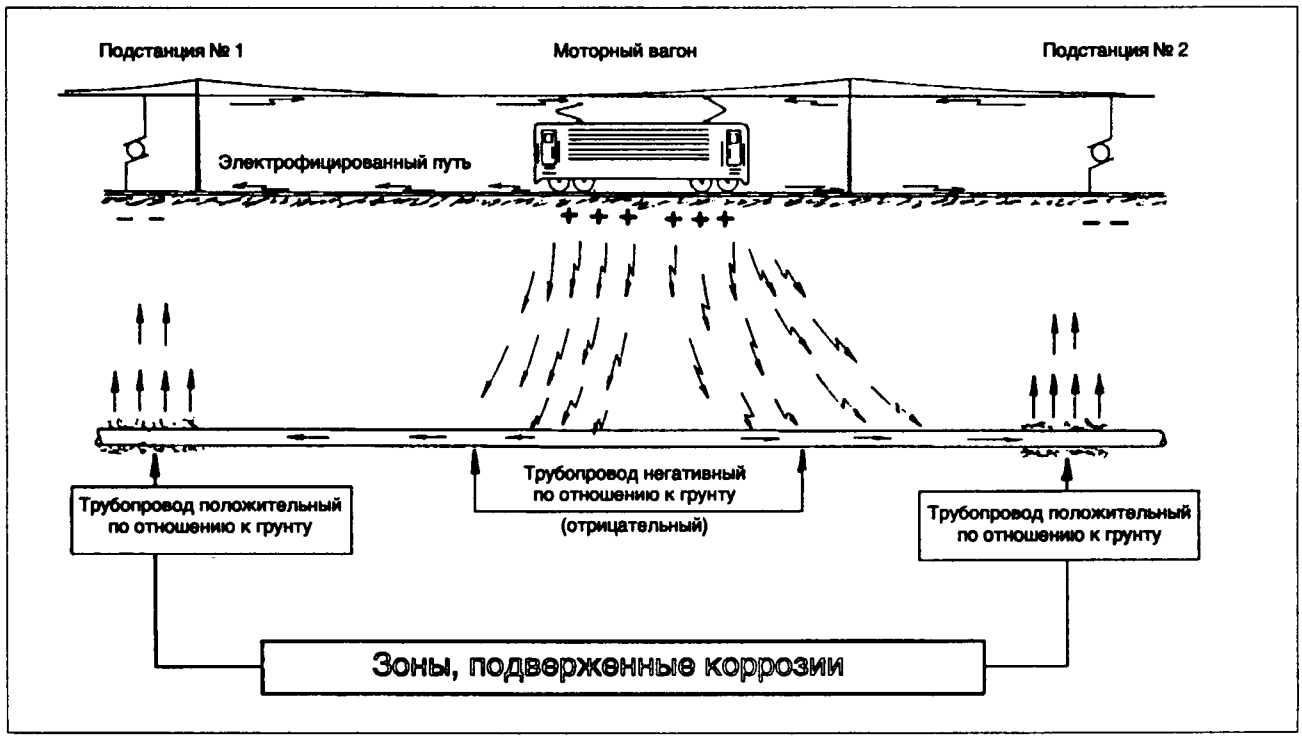
6.3.4.1. Принцип

Электродренаж – это устройство, которое защищает сооружения от блуждающего тока, исходящего обычно из силовой сети постоянного тока, возвращающегося по рельсам. Он сочетается с одним из аппаратов, предварительно описанных для того, чтобы катодная защита функционировала в период, когда не работает электродренаж. Реализация электродренажа состоит в создании между структурой, на которую влияет коррозия, и источником блуждающих токов связи с малым сопротивлением, таким способом, чтобы блуждающий ток возвращался к источнику по этой связи, а не через трубопровод и грунт. Эта связь всегда поляризует трубопровод по отношению к рельсам, для того чтобы избежать возврата тока по этой связи, т.к. из-за движения рельсы не имеют тенденции быть негативно заряженными.

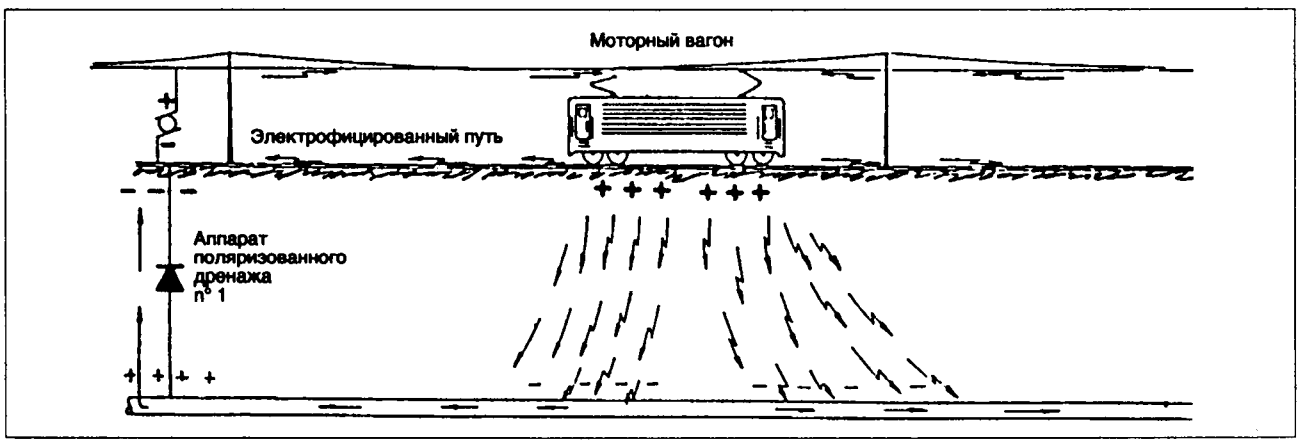
6.3.4.2. Аппаратура

Различные типы аппаратуры, в большей части аттестованной Gaz de France, находятся сейчас в эксплуатации:

— полупроводниковый тип с кремневым диодом;
— тип диода низкого порога чувствительности из кремния, спаренного с диодом из германия.



Коррозия блуждающими токами.



Защита путем электродренажа.

6.3.4.3. Эксплуатация

Учитывая величину тока, идущего по трубопроводу (несколько десятков ампер), плохое функционирование этой аппаратуры может привести в несколько месяцев к очень сильной локальной электрохимической коррозии. Поэтому рекомендуется проверять аппаратуру два раза в месяц.

Режим работы установок, на которых они монтируются, очень различается (ж.д., трамвай, метро, шахты, торговые установки), необходимо замерять величины минимального в максимального дренажного тока с записью времени и сезона, когда производились записи. Эти замеры полезно дополнить периодическими замерами дренажного тока и потенциала по отношению к грунту, пути и защищаемому сооружению.

6.3.5. Пассивная защита сооружений

Катодную защиту сооружений выполнить тем легче, чем лучше они изолированы по отношению к грунту. Следовательно, необходимо сопровождать активную защиту пассивной.

Чтобы получить наилучшую изоляцию необходимо:

— заботиться о хорошем выполнении и поддержании целостности изоляции;
— устанавливать изолирующие соединения на отводах всех типов, которые могут составлять часть заземления защищаемого сооружения;
— убрать гальванические пары путем установки изоляционных соединений;
— избегать контактов со встречающимися особенными структурами, т.е.:
  · все подземные металлические сооружения (электрокабель, водопроводные сети, отопление жилья и т.д.);
— мосты и поручни металлические;
— галереи (металлическая арматура бетона) или металлический футляр.

6.3.6. Оборудование сетей

Для необходимых электрических замеров сети оборудуются контрольными пунктами. В общем все доступные точки сооружения могут служить для замера потенциала при условии наличия изоляции, сравнимой с изоляцией структуры.

Для того, чтобы катодная защита действовала на всей защищаемой сети, необходимо постоянно осуществлять электрическую непрерывность трубопровода путем установки шунтов, особенно в местах задвижек, секционирующих и разделительных постов и т.д.

На распределительной сети определенной мощности необходимо расположить изолирующие фланцы, которые шунтированы в нормальной эксплуатации для того, чтобы избежать электрических колец, но которые могут позволить лучше локализировать начальные недостатки изоляции.

6.3.7. Законодательство

Установка электродренажа подпадает под постановление, утвержденное междуминистерским указом от 26 мая 1978 г., который предписывает получение разрешения, выдаваемого региональной индустриальной дирекцией после соответствующих исследований различных подземных сооружений.

Для протекторной защиты этого разрешения не требуется. Действительно, если включенный диспозитив рискует нарушить соседние сооружения, лучше осуществить с соседним владельцем замеры, чтобы определить, есть ли это влияние, и в случае необходимости его предупредить.

6.4. ПОДГОТОВКА (ОБРАБОТКА) ГАЗА

6.4.1. Осушка природного газа

Gaz de France предписывает для транспортной сети точку росы воды – 10°C при 80 бар, или содержание влаги менее 50 мгр/нм^3. Газ, находящийся в подземном хранилище, увлажняется, поэтому его необходимо осушать перед подачей. Процесс обработки – это абсорбция с помощью триэтиленгликоля (T. E. G.), описание которого находится в разд. 2.4.6.3.

6.4.2. Очистка природного газа от серы

6.4.2.1. Регламентация (требования)

Указом от 28 января 1981 г. зафиксированы следующие содержания H_2S:

— среднее содержание за 8 дней 7 мг/нм^3;
— единичное содержание 15 мг/нм^3;
— время превышения 12 мг/нм^3 - 8 часов.

6.4.2.2. Процесс очистки от серы

Два процесса используются G.D.F. для десульфотации газа, отбираемого из подземного хранилища:

— процесс селективной очистки амином от CO_2 (см. § 2.4.5.3);

— процесс с активированным углем (см. § 2.4.5.7).

6.4.3. Одоризация газа

6.4.3.1. Необходимость одоризации газа

6.4.3.1.1. Риск, связанный с недостаточно одоризированным газом

Распределяемый газ должен иметь специфический запах для того, чтобы утечка из сети или внутренней установки могла быть во время обнаружена.

6.4.3.1.2. Регламентация и рекомендации

Указ от 12 января 1951 г. предусматривает, что газ, предназначенный для публичного распределения, должен иметь характерный запах. Определенные компоненты природного газа, транспортируемого сегодня, – меркаптаны (R.S.H.) могут придавать ему запах достаточной интенсивности, чтобы определить его наличие. К такому типу природного газа относится газ разрабатываемого до 1985 г месторождения Лак. Другие газы, такие как G.N.L., газ Гренинга, Северного моря, СССР, не содержат в натуральном (природном) состоянии признаков запаха. Следовательно, необходимо осуществить одоризацию полную или дополнительную этих газов. Например, доктрина G.D.F. в технике одоризации сейчас следующая:

— для обеспечения безопасности уровень запаха, который должен поддерживаться в точках снабжения в распределительной сети, как минимум, должен составлять уровень 2 шкалы интенсивности обоняния для атмосферы, представляющую концентрацию газа больше или равную 1/5 нижнего предела (взрываемости) воспламеняемости (или около 1%);

— если необходимо, одоризация осуществляется с помощью Т.Н.Т. (Тетрагидротофон), выбранного как раз для ее стабилизации;

— содержание Т.Н.Т. в газе свободном от меркаптанов должна быть поддержана:

  · 25 мг/нм³ для газа H,

  · 20 мг/нм³ для газа B;

— если одоризируемый газ содержит меркаптаны, принимают, в первом приближении, эквивалент между Т.Н.Т. и R.S.H. (меркаптаны):

2,5 мг Т.Н.Т. – 1 мг R.S.H.

Количество Т.Н.Т. для закачки вычитается из величины R.S.H. (меркаптан), применяя формулу:

подача дополнительного (Т.Н.Т.) = I.0 – (2,5 × × [R.S.H] + [Т.Н.Т.] существующие)

I.0 – представляет индекс необходимой одоризации и равен:

  · 25 мг/нм³ для газа H,

  · 20 мг/нм³ для газа B.

6.4.3.1.3. Принцип одоризации. Определение места одоризации

Одоризация до установленной выше величины осуществляется в каждой точке транспортной сети с помощью централизованной установки одоризации.

Она должна находиться на:

— станциях подачи газа на границе;

— терминалах сжиженного газа;

— выходах подземных хранилищ газа, в которых газ теряет большую часть одоранта, содержащегося в нем.

Установки одоризации строятся для точной регулируемой подачи одоранта в газ таким образом, чтобы поддерживать постоянным индекс одоризации на установленном в § 6.4.3.1.2. уровне.

Регулирование должно учитывать два следующих параметра:

— предварительное содержание меркаптанов в одоризируемом газе. Оно может сильно изменяться в течение нескольких часов и зависеть от осуществляемого смешения газов так же, как от функционирования установок по подготовке газа на месторождении;

— дебит обрабатываемого газа. Он может значительно изменяться в течение нескольких минут (закрытие задвижки, например).

6.4.3.2. Принцип одоризационных установок

6.4.3.2.1. Установка централизованного впрыска

Рассматривается два случая:

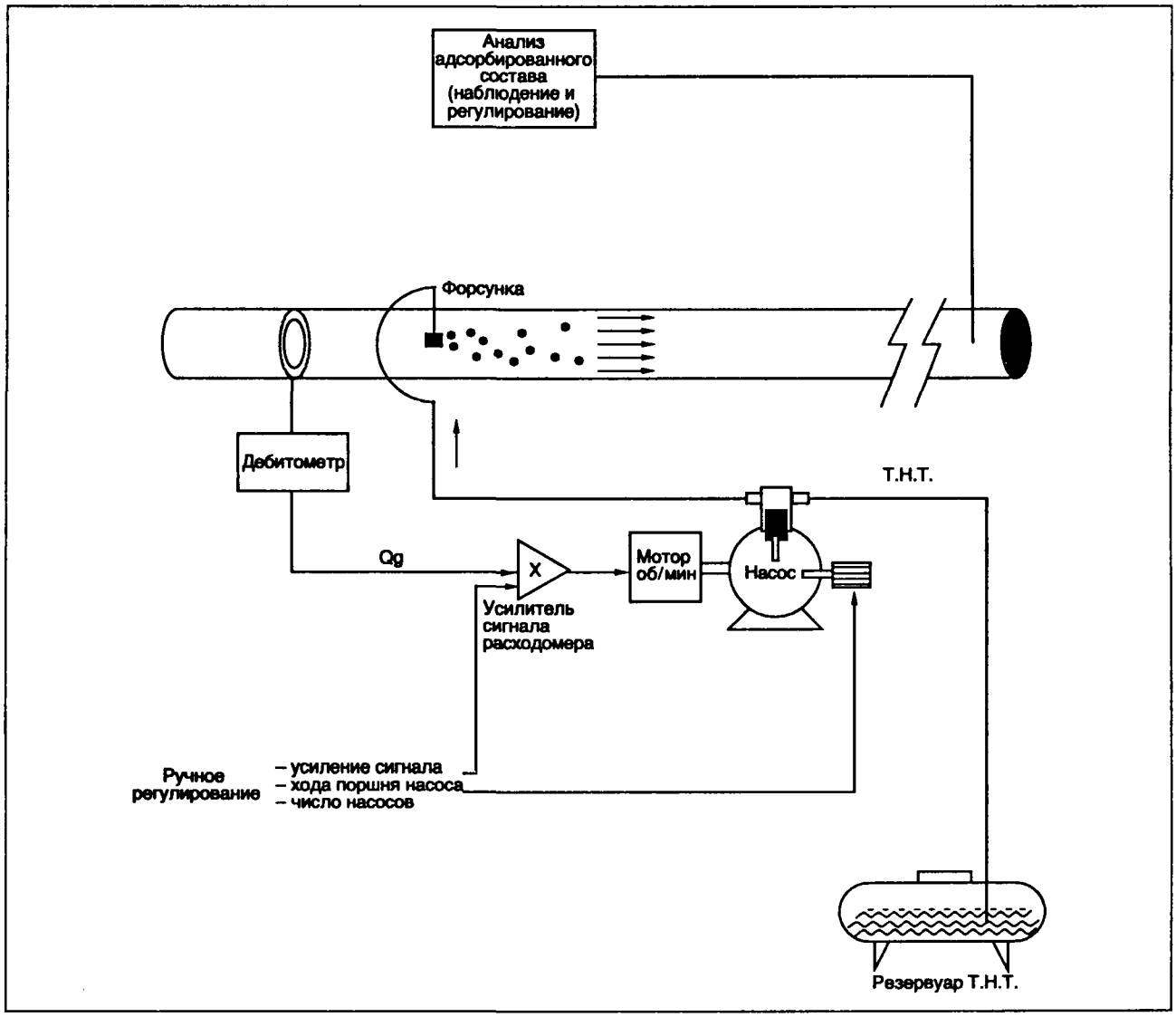
Если поступающий газ не одорирован, т.е. не содержит ни меркаптанов, ни Т.Н.Т., необходимо предусмотреть простой привод насоса одоранта в зависимости от расхода, как представлено на схеме с. 567.

Для доведения содержания Т.Н.Т. до требуемой величины регулирование может осуществляться:

— изменением хода поршня насоса (сервомотор);

— изменением скорости вращения двигателя (привода) насоса (коробка передач).

Анализатор Medor (измерение одоранта) позволяет осуществлять как регулирование установки, так и ее обслуживание. Однако он не является частью системы (цепи) регулирования.



Простая система одоризации.

Если газ частично одоризирован, т.е. содержит изменяющееся количество меркаптанов и (или) Т.Н.Т., необходимо устанавливать дополнительную систему одоризации, которая учитывает в одно и то же время изменение расхода газа и содержания одоранта на входе (тем более, эта система может служить для одоризации газа, не содержащего компонентов одоранта).

Так называемая система Morgana осуществляет замер, одоризацию и регулирование расхода природного газа. Развитая G.D.F. установлена в основных точках сети: Obergailbach, Saint-Clair-sur-Epte, Chémery, Soings и т.д. Их принцип действия представлен на рисунке с. 568.

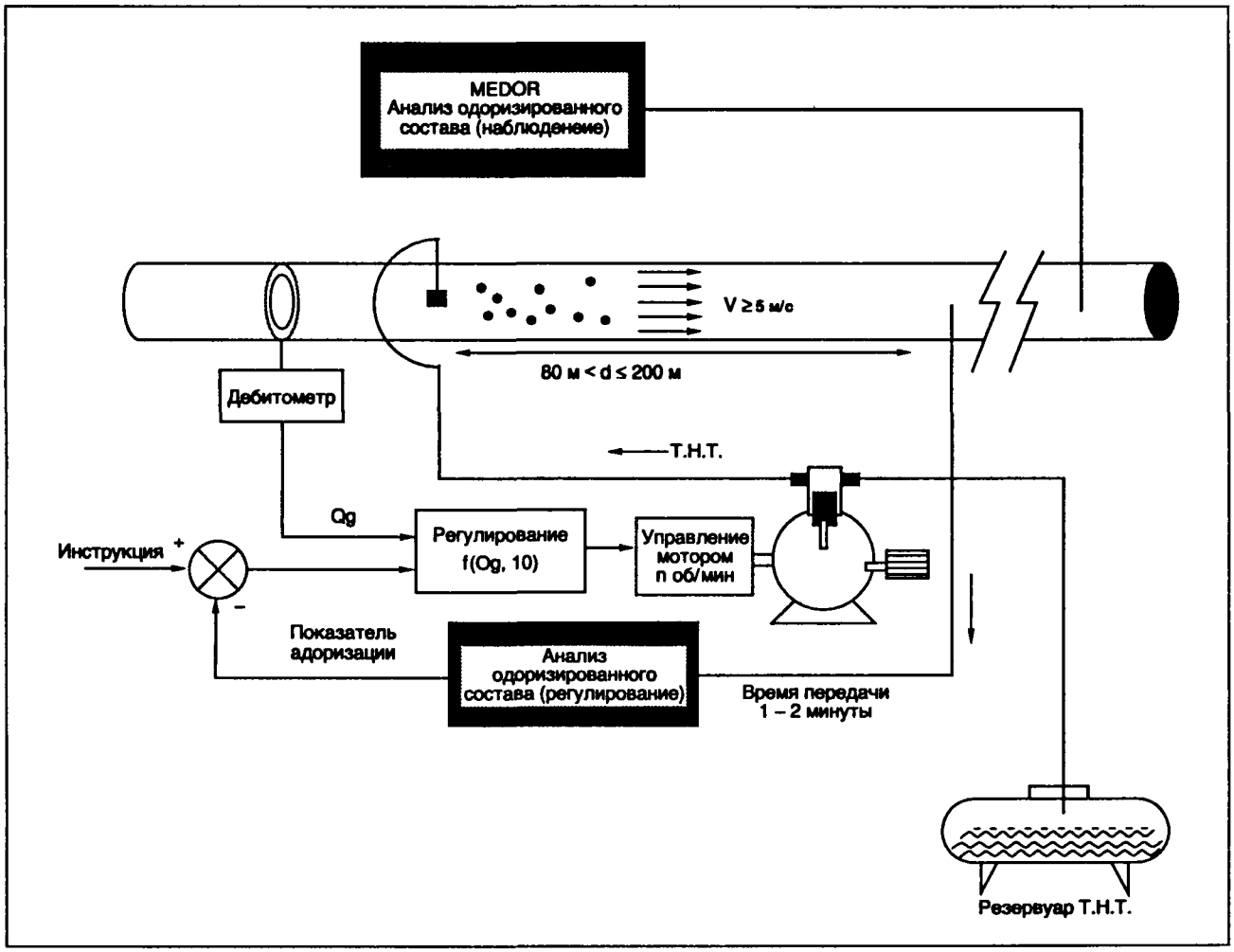
Эти стандартные системы содержат ряд достижений науки и техники и команд так же, как и ЭВМ для поддержания процесса. Замер индекса одоризации осуществляется с помощью хроматографа и электрохимического измерения, базирующегося на принципе аппарата Medor (§ 6.4.3.3.2), но позволяющего осуществлять более быстрый анализ.

6.4.3.2.2. Установка (пунктирного) точечного впрыска

Установки одоризации типа "централизованные", описанные выше, заменили, начиная с 1981 г., многочисленные установки – "капельные", которые одоризировали газ на разветвленных распределительных сетях. Для памяти, но также из-за того, что иногда надо оставить в эксплуатации некоторые из этих установок из особых соображений, приведем основные характеристики используемых систем.

6.4.3.2.2.1. Система с естественным испарением

Эти системы не требуют никакой внешней энергии. Весь или часть потока одоризируемого газа контактирует с поверхностью, увлажненной жидким одорантом. Эта поверхность может быть капиллярной в виде фетильной ткани, пропитанной в жидкости; верхней поверхностью жидкости в резервуаре с постоянным уровнем (установка обтекания (лизания) (рис. на с. 568); поверхность пузы-

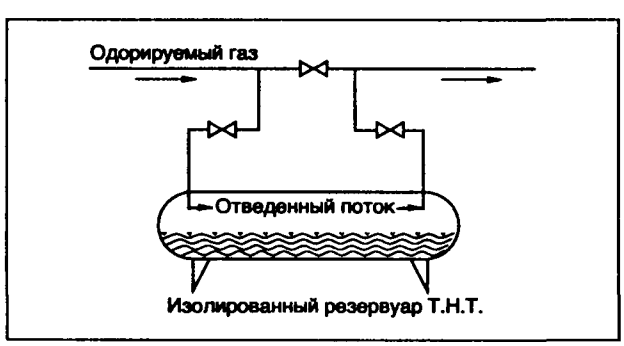


Дополнительная система одоризации Morgala.

рей газа, поднимающихся на поверхность жидкого одоранта (установка барбатажа).

Количество испаряемого газа растет вместе с расходом газа, но не пропорционально расходу, т.е. испарение зависит от большого числа факторов: давления, температуры, вязкости газа.

Ожидаемая точность системы, следовательно, невелика, индекс одоризации может изменяться от 30 до 40% от требуемой величины (предписанной), естественно, при большом колебании расхода. Необходимо частое регулирование.



Принцип установки естественного испарения.

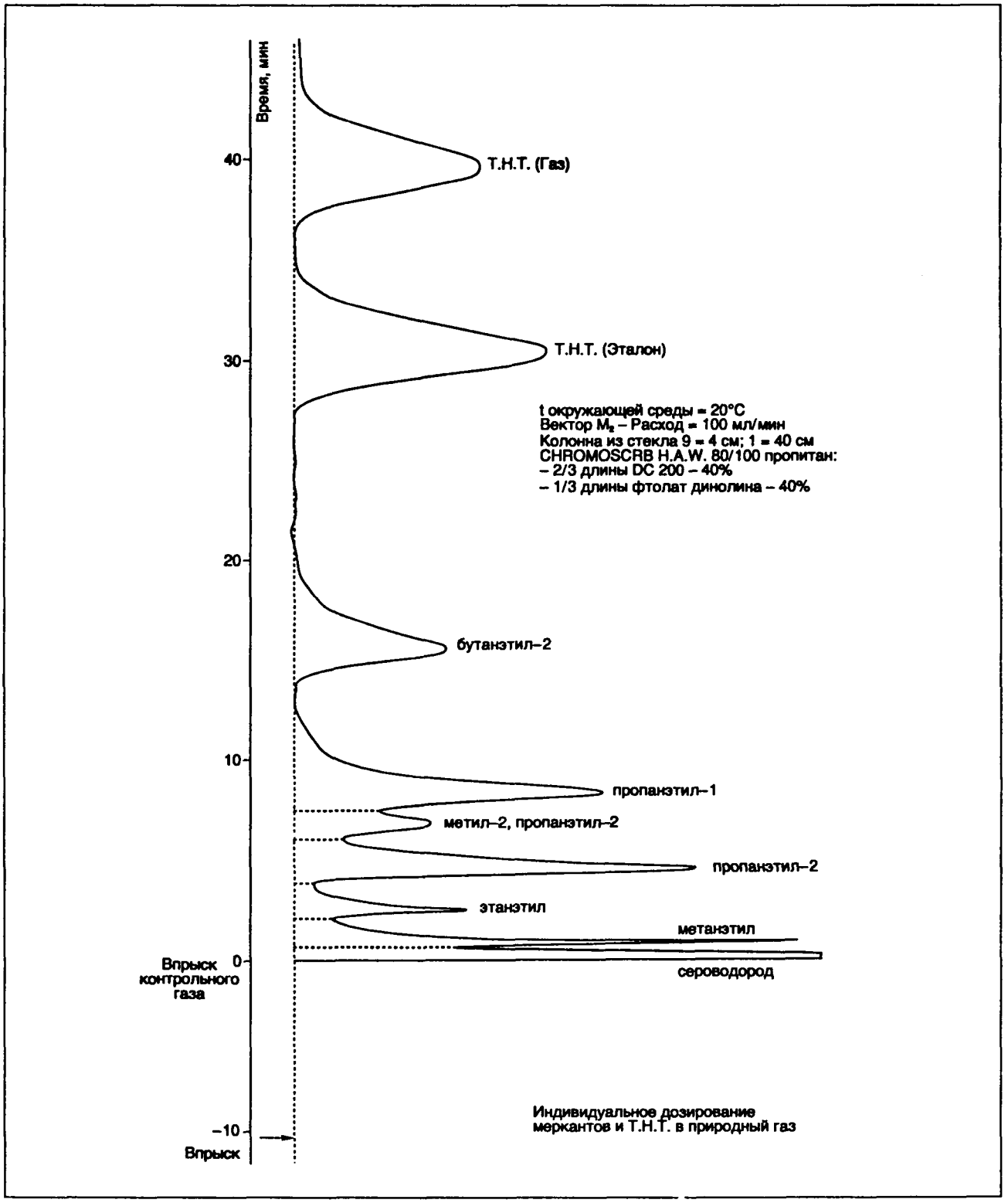
6.4.3.2.2.2. Система, использующая потерю давления

Эти системы не требуют также внешнего источника энергии. Они используют потери давления, вызываемые элементами трубопроводов или калиброванным отверстием. Например, позволяющим капельный ввод определенное количество одоранта. Эти аппараты сегодня не используются. Вспомним установку Odostat, работающую по этому принципу.

6.4.3.2.2.3. Система, использующая показания счетчика

В этой системе определенное количество жидкого одоранта впрыскивается в трубопровод газа каждый раз, когда определенное количество газа пройдет через счетчик, установленный последовательно.

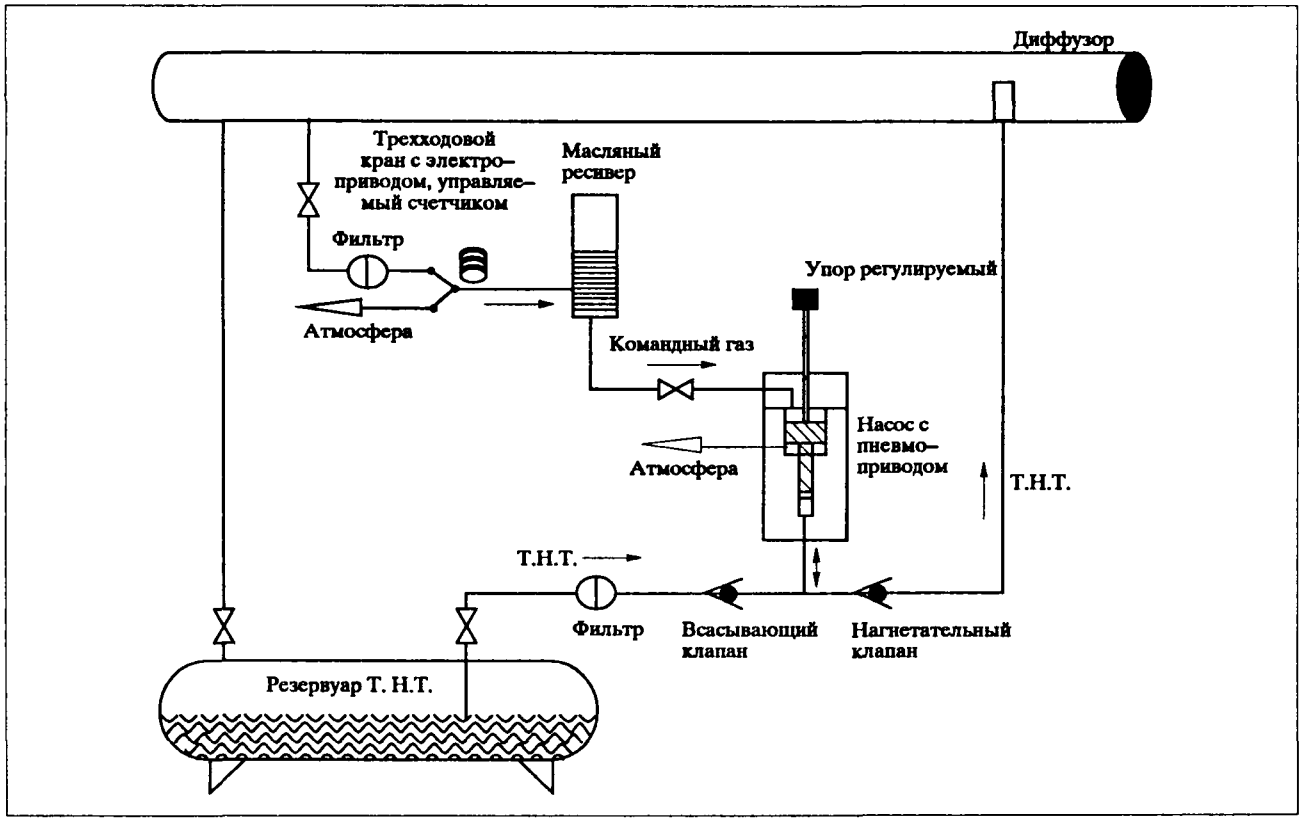
Одоризатор Peerless использует движение мембраны сухого счетчика для механического приведения в действие ковшового дозатора, который подает необходимое количество Т.Н.Т. в газ. Его хруп-



Хроматограмма серосодержащего состава (анализатор Medor 8000S).

кость и отсутствие коррекции по давлению и температуре газа ограничивают его использование.

Более современное решение (рис. стр. 570), находящееся в эксплуатации и в наши дни, использует насос-инжектор, работающий в зависимости от давления газа и управляемый электрокраном (одоризатор с насосом-инжектором, сообщение на газовом конгрессе 1974 г. в Париже).



Установка G.D.F. с поршневым пневматическим насосом.

6.4.3.3. Особенности установок одоризации

6.4.3.3.1. Характеристика и предосторожности использования Т.Н.Т.

6.4.3.3.1.1. Характеристика

Т.Н.Т., выпускаемый S.H.E.A.(P.) под названием "Alerton 88"), имеет следующие характеристики:

— чистота (хроматографическая) ≥97,9% по массе
— дистилация: 5% ≥118°C,
95% ≤ 124°C,
— точка помутнения ≤ −20°C (воды <0,1%),
— точка просветления ≥19°C,
— плотность = 0,999,
— постоянные примеси 1.2% в среднем (метил Т.Н.Т., теофен и сернистые).

6.4.3.3.1.2. Контактируемый материал

Материалы, которые контактируют с Т.Н.Т., предпочтительно должны иметь такой состав:

— для металлов: сталь А - 42 или А - 48, но предпочтительно сталь нержавеющая (18/8);
— для пластических материалов: полиэтилен, тефлон или рильсан.

6.4.3.3.1.3. Хранение

Различные виды используемой тары, выпускаются заводом:

— контейнеры: 660 л,
— бочки: 225 л,
— канистры: 60 л.

Емкости хранятся в светлых, сухих, продуваемых, укрытых от источника тепла помещениях (точка вспышки Т.Н.Т. 19°C).

6.4.3.3.1.4. Токсичность

Т.Н.Т. жидкий может попадать на кожу и вызывать кожное раздражение. Раздражаются слизистые оболочки и глаза.

Необходимо работать в пластиковых перчатках, очках, закрытой одежде и обуви (типа углеводородных, синтетических).

6.4.3.3.1.5. Нейтрализация

— С помощью воднокислющих растворов, таких как хлористая известь или вода ave;
— с помощью заграждающих агентов, таких как Aldor 1052 - Alamask EK - X или SN - X.

6.4.3.3.2. Замер количества одоранта

Селективное определение одоризированного состава осуществляется путем хроматографического анализа газовой фазы и электрохимического определения. Этот метод описан в нормах ISO - 6326.

Аппарат Medor выполнен по этому принципу. Выполненный по лицензии G.D.F. обществом R.N. Electronique, он служит для автоматического дозирования Т.Н.Т. или меркаптана.

Аппарат Medor 8000 оборудован в настоящее время по принципу местного обслуживания и выдает анализ один раз в час. Пример хроматограммы приведен на рис. с. 569. Модифицированный аппарат позволяет делать один анализ менее чем за пять минут, что достаточно для получения пиков разделения. Этот аппарат используется для регулирования системы.

6.4.3.3.3. Техника для впрыска

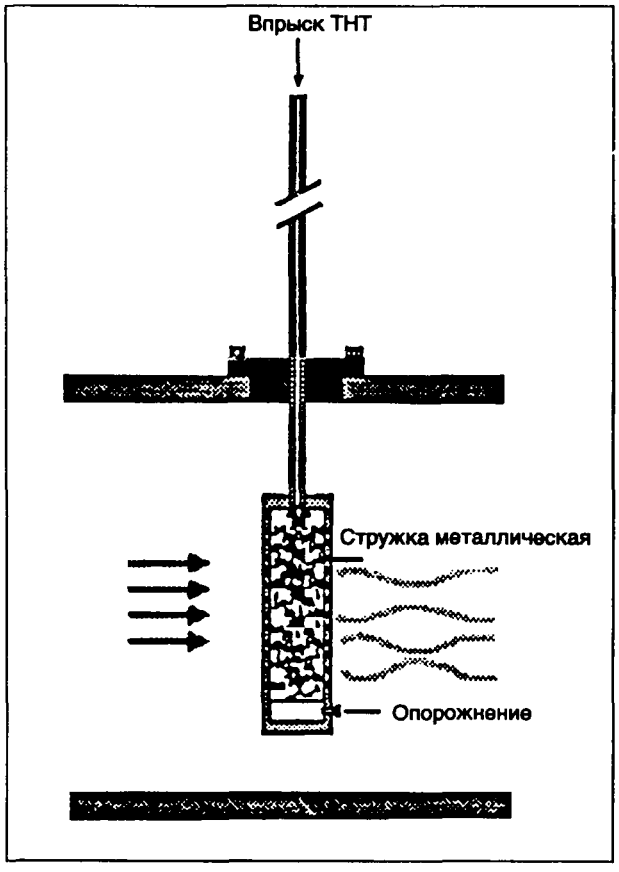
Могут использоваться насосы, по определению, объемные с подвижной мембраной или мембраной, преобразованной в поршень. Поршневые насосы не рекомендуются, т.к. они в принципе не герметичны.

Изменение расхода может быть осуществлено:

— изменением скорости вращения привода;
— применением хода поршня.

6.4.3.3.4. Система впрыска

Этот элемент особенно важен, т.к. он хорошо обеспечивает гармонизированную смесь газ/Т.Н.Т. в трубопроводе. До настоящего времени G.D.F. использовал металлические сетки впрыска (рис. ниже). Тонкий инжекторный испаритель Т.Н.Т. кажется действительно дает наилучшее решение.



Фильтр впрыска.

6.4.4. Взаимозаменяемость природного газа

Понятие о взаимозаменяемости дается в главе 8. Использование в разд. 8.4.

Спецификация газа, используемого во Франции, следующая:

	Газ H	Газ B	
P. C. S. кВт · /м^3	10,7 - 12,8	9,5 - 10,5	Указ от 10.09.1977
Число Воббе (от 1.01.1986) кВт · ч/м^3	13,4 - 15,7	11,8 - 13,0	Разрешение

Если поставляемый газ выходит за пределы, указанные в спецификации, возможно два решения:

— отказ от приема газа (редко);
— корректировка газа с помощью принятых методов.

6.4.4.1. Обеднение

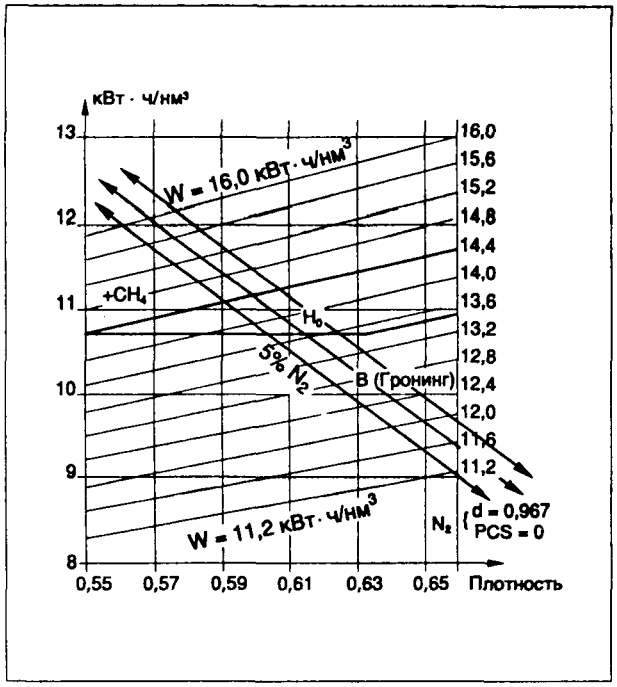
Оно может быть осуществлено:

— отбором богатых (тяжелых) углеводородов путем конденсации, фракционной дистилляцией, или экстренным дросселированием. Эта техника используется на заводах сжижения, где отбираются бутан или пропан;
— коррекцией с помощью инертных газов, подачей воздуха, азота, продуктов сгорания;
— смешением с более бедным газом: техника менее дорогая и более удобная (желательная).

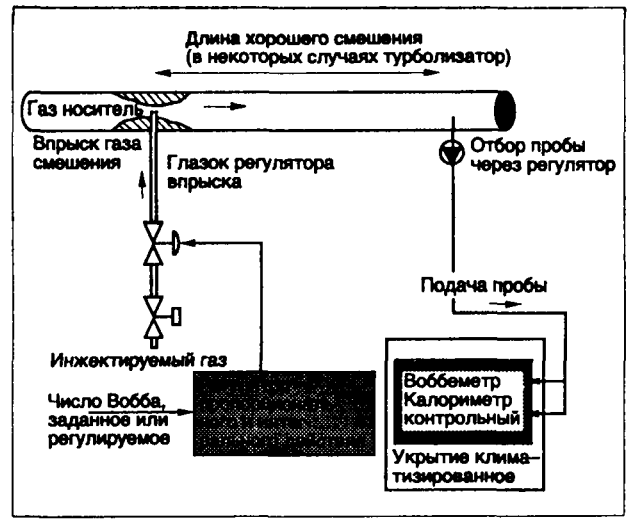
6.4.4.2. Обогащение

Оно осуществляется путем:

— отбора бедных компонентов, углекислоты, азота: завод денитрофикации (снижение содержания азота) в Alfortville, работающий на этом принципе в позволяющий трансформировать газ Grainingue в газ "H";
— впрыска более богатых углеводородов, таких как пропан и бутан;
— смешением с более богатым природным газом: техника, наиболее желательная для применения, и менее дорогая (с меньшей себестоимостью);
— введением исправляющего газа (реформинга).



Снижение содержания азота.



Смеситель для коррекции.

6.4.4.3. Смесь

Если расход направляемого газа и газа-носителя варьируется так же, как и качество газа, необходимо устанавливать смеситель. Система, представленная здесь, работает на основе регулирования числа Вобба за смесителем: качество газа на выходе представляет основной элемент смесителя. Эта система проста, время срабатывания ее находится между 7 и 10 минутами.

Калориметр позволяет контролировать теплотворную способность, чтобы действительно проверить соответствие смеси.

Система безопасности позволяет остановить впрыск газа в случае выхода за установленный предел.

6.5. КОМПРЕССОРНЫЕ СТАНЦИИ

6.5.1. Общие соображения

На транспортных сетях природного газа встречаются следующие компрессорные станции:

— либо станции рекомпрессии на линии, позволяющие компенсировать потери давления в трубопроводах;

— либо станции, установленные на подземных хранилищах, для того чтобы закачивать в хранилище газ, если давление в сети выше;

— либо компенсировать падение давления в сети (отбор).

Для того чтобы осуществить эти функции, используются два типа компрессоров:

— поршневые компрессоры;

— центробежные компрессоры.

Приводом компрессоров являются газомоторные двигатели, газовые турбины или электродвигатели.

6.5.2. Компрессоры

6.5.2.1. Поршневые компрессоры

Эти компрессоры (рис. с. 573) состоят из корпуса, в котором смонтированы цилиндры, где осуществляется сжатие с помощью поршня, совершающего возвратно-поступательное движение.

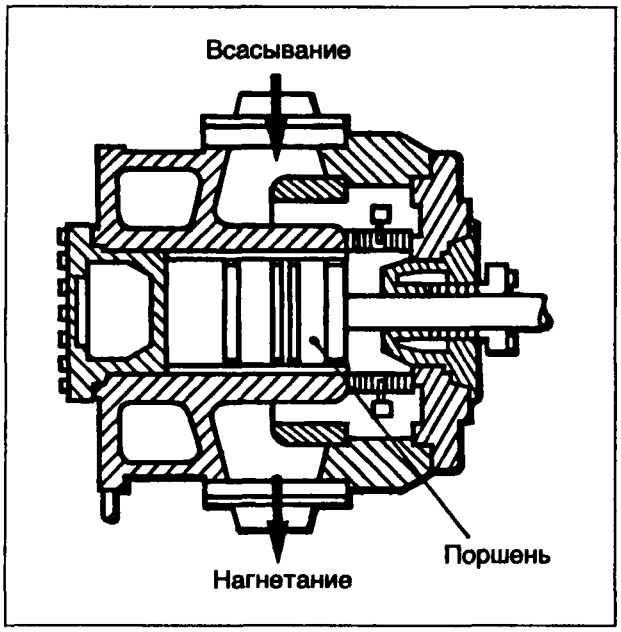
Сжатие (давление) создается путем уменьшения объема газа.

Цикл изменения состояния газа в цилиндре следующий:

— сжатие, затем нагнетание при ходе вперед;

— всасывание при ходе назад.

Каждый цилиндр имеет клапаны нагнетания и всасывания. Цилиндр может быть двойного действия, если используются две стороны цилиндра: каждый ход осуществляет сжатие, с одной стороны, и всасывание, с другой.



Поршневой компрессор.

6.5.2.1.1 Описываемый объем, объемный КПД, дебит сжатый (цилиндр с двойным эффектом)

— Описываемый объем:

$$V_{1э} = 2L\left(S - \frac{s}{2}\right).$$

— Объемный коэффициент полезного действия:

$$\eta_V = 1 - \frac{r}{100} - E\left(r^{(1/\gamma)}\frac{Z_1}{Z_2} - 1\right).$$

— Расход сжатый:

$$Q_{\text{п}^3/\text{ч}} = 16\,170\,\eta_V V N \frac{P_1}{T_1 Z_1},$$

где:

L – ход поршня, м;

S – поверхность поршня, м^2;

s – поверхность сечения шатуна, м^2;

P_1; P_2 – давление абсолютное всасывания и нагнетания, бар;

T_1; T_2 – температура на всасывании и нагнетании, К.

$$r = \frac{P_2}{P_1},$$

E – отношение между мертвым объемом и объемом, описанным цилиндром;

γ – средний показатель адиабаты газа;

Z_1; Z_2 – коэффициент сжимаемости газа для условий всасывания и нагнетания;

N – частота вращения, обор/мин.

Общую часовую производительность одного компрессора с N цилиндрами получают путем суммирования производительности каждого цилиндра.

6.5.2.1.2. Мощность сжатия

— Мощность адиабатическая

$$W_{\text{ад}} = 0,103Q\frac{Z_1 + Z_2}{2}T\frac{\gamma}{\gamma - 1}\left[r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right].$$

— Мощность реальная

$$W = W_{\text{ад}}\frac{1}{\rho_{\text{ад}}}\frac{1}{\eta_{\text{ад}}}$$

Адиабатическая мощность соответствует оптимальному сжатию без внешнего теплообмена (сжатие изотропическое).

Для получения реальной мощности она должна быть дополнена:

— адиабатическим внутренним коэффициентом полезного действия (находящийся между 0,83 и 0,94), порождаемый теплообменом, который незначителен, и термодинамическими потерями, $\eta_{\text{ад}}$ (сжатие необратимое);

— механический коэффициент полезного действия принимает во внимание механические потери и вспомогательные, вызванные непосредственно машиной (насосов и т.д.) (приблизительно равен 0,95).

6.5.2.1.3. Регулирование расхода

Регулирование расхода осуществляется либо:

— механическим запаздыванием закрытия всасывающих клапанов;

— увеличением мертвого пространства цилиндра путем открытия дополнительного кармана (модификация объемного коэффициента полезного действия), что не сопровождается термодинамическими потерями;

— уменьшением части мощности (полезное действие);

— изменением скорости вращения привода (не более чем на 50%).

6.5.2.1.4. Преимущества и недостатки поршневого компрессора

6.5.2.1.4.1. Преимущества

— Давление нагнетания от 1 до 2000 бар и мощность от нескольких киловатт до более чем 10 000 кВт;

— гибкость работы при изменении расхода;

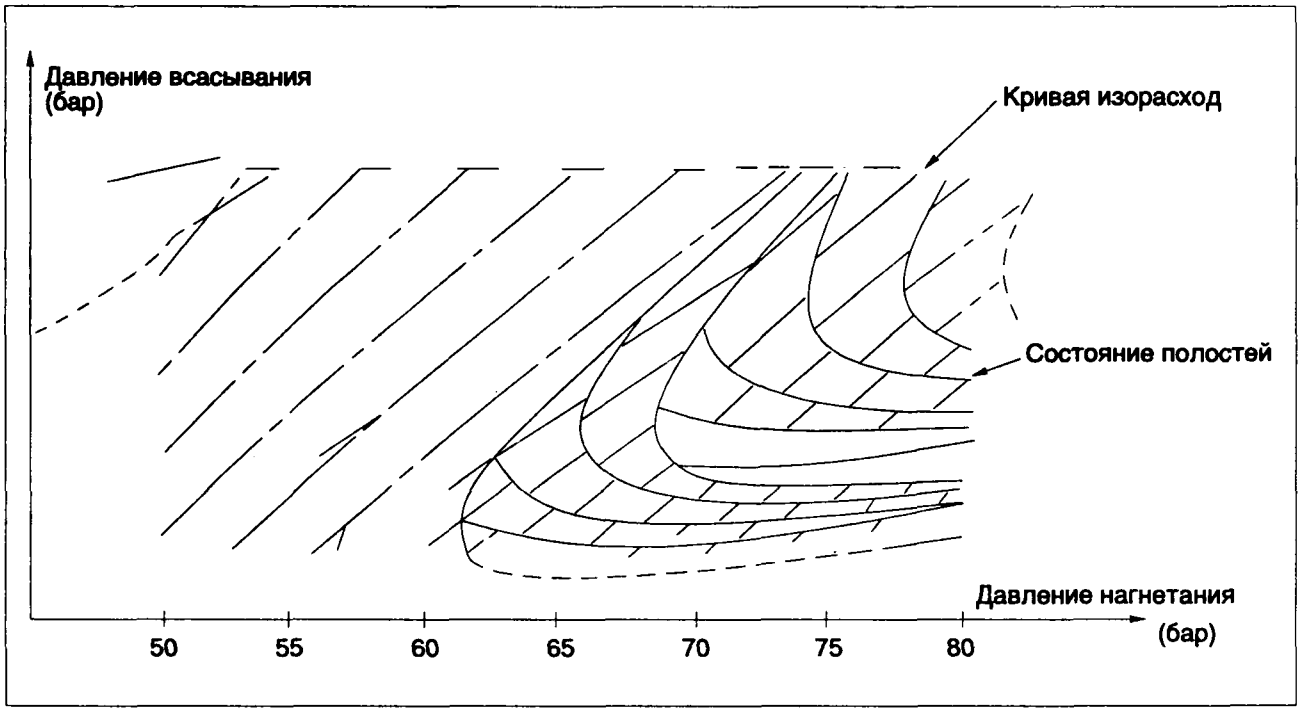
— высокий адиабатический КПД.

6.5.2.1.4.2. Недостатки

— Большие фундаменты из-за веса машин и неуравновешенных сил;

— обслуживание постоянное и достаточно дорогое;

— дебиты непостоянные, вызывающие возможную пульсацию с резонансом, что требует применение ресиверов против пульсации и акустического расчета трубопроводов.



Характеристика поршневого компрессора.

6.5.2.1.5. Пример характеристики

См. рисунок выше.

6.5.2.2. Центробежные компрессоры

Центробежный компрессор преобразует механическую энергию вращения в давление газа.

Они содержат фиксированные направляющие устройства и одну или несколько лопастных (лопаточных) зон, в которых газ приобретает скорость и давление. Устройства, установленные на выходе колес, называемые диффузорами, и улитка, выпрямляют потоки флюидов и преобразуют скорость в давление (см. рис. напротив).

6.5.2.2.1. Высота (давление) и мощность компрессора

— Мощность адиабатическая

$$W_{ад(W)} = IH_{ад},$$

где:

I – дебит массовой кг/сек;

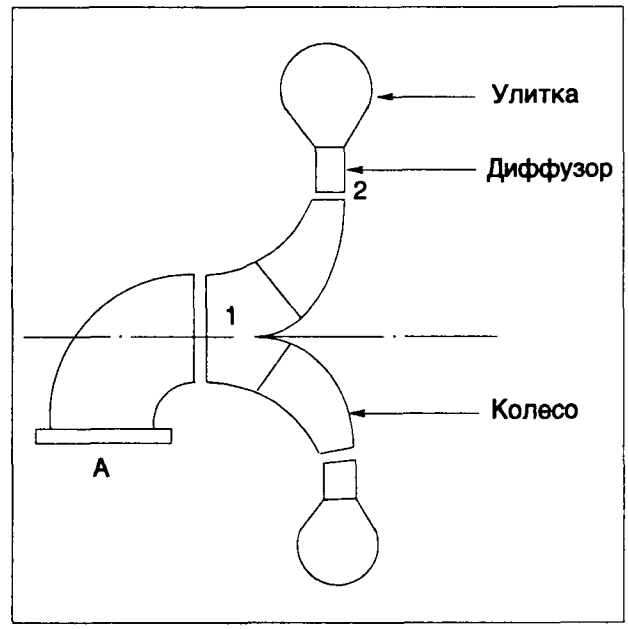
H – высота нагнетания адиабатическая Дж/кг;

— Адиабатическая высота нагнетания

$$H_{‰} = 287\frac{Z_1 + Z_2}{2}\frac{1}{d}T_1\frac{\gamma}{\gamma - 1}r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1.$$

— Мощность реальная

$$W = W_{‰}\frac{1}{\rho_{‰}}\frac{1}{\eta_{IA}}.$$



Центробежный компрессор.

Максимальный адиабатический внутренний КПД находится в пределах от 0,75 до 0,85 для компрессоров в одно колесе. Механический КПД находится в пределах от 0,97 до 0,99.

Обозначения те же самые, что использовались для поршневых компрессоров,

где:

d – плотность газа.

6.5.2.2.2. Регулирование расхода

Регулирование расхода осуществляется путем изменения скорости вращения привода. Это регулирование может осуществляться путем модификации положения лопаток на входе в колеса, но этот диспозитив не используется на компрессорных станциях, кроме использования электродвигателя с постоянной скоростью вращения.

6.5.2.2.3. Преимущества и недостатки центробежных компрессоров

6.5.2.2.3.1. Преимущества:

— давление нагнетания до 400 бар;
— небольшие фундаменты;
— недорогое обслуживание;
— незначительный расход масла.

6.5.2.2.3.2. Недостатки:

— КПД небольшой и уменьшается очень быстро, если удаляется от расчетной точки;
— хорошо работает при большом расходе;
— есть риск помпажа.

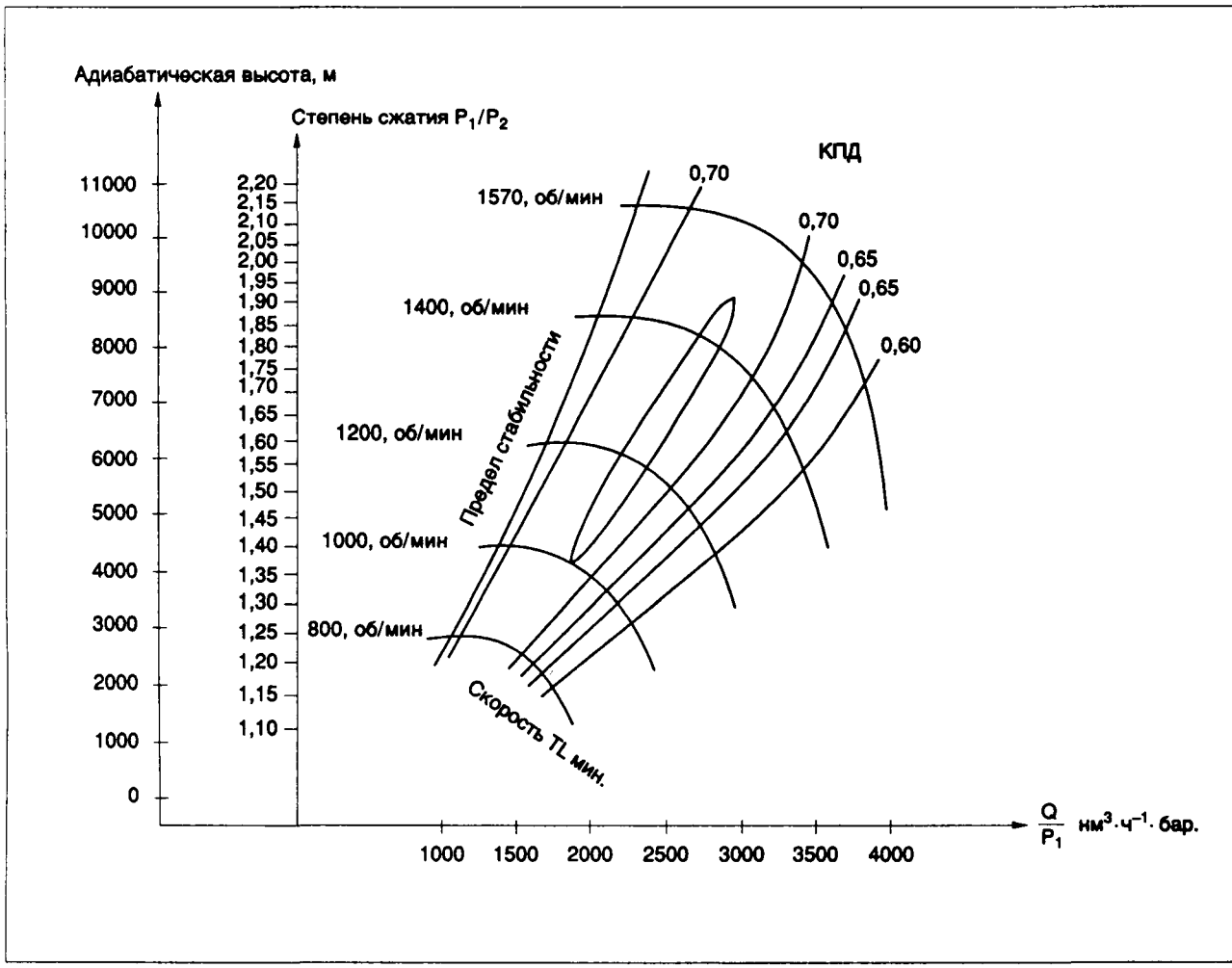
6.5.2.2.4. Пример характеристики

См. рисунок ниже.

6.5.2.2.5. Приспособление против помпажа

Кривые характеристики работы центробежного компрессора имеют одну часть поднимающуюся и одну часть – опускающуюся. Кривая, соединяющая все максимумы, называется кривой помпажа или пределом стабильности. Она разграничивает зону, расположенную в левой части и называемую "зоной помпажа".

В этой зоне работа компрессора нестабильна и наблюдается значительное изменение расхода, могущее вызвать смещение производительности компрессора. Компрессоры оборудуются устройством антипомпажа, перепускающего часть сжатого газа для того, чтобы осуществить расход выше минимального расхода помпажа для данной скорости вращения и высоты нагнетания.



Характеристика центробежного компрессора.

6.5.3. Приводы

6.5.3.1. Газомоторные двигатели

Газомоторные двигатели применяются на газовых сетях и используют в качестве топлива природный газ.

Газомоторные двигатели альтернативного типа могут быть четырех- и двухтактными, зажигание в которых осуществляется с помощью свечей. Они, в принципе, используются для привода поршневых компрессоров, формируя общий ансамбль: в этом случае коленчатый вал включает шатуны, моторы и компрессоры.

Их мощность может достигать 12000 кВт и число цилиндров от четырех до двадцати: они обычно работают под наддувом. Коэффициент полезного действия находится от 34 до 40%. Максимальная скорость вращения меняется от 300 до 1200 об/мин. Преимущества и недостатки этих моторов такие же, как у поршневых компрессоров. Они, кроме этого, имеют риск детонации в случае плохой регулировки или замены газа.

6.5.3.2. Газовые турбины

Газовые турбины используются, главным образом, для привода центробежных компрессоров. Это могут быть машины индустриальные или турбореактивные самолетов. Они включают воздушный оксиальный компрессор, порой центробежный или радиальный, камеру сгорания, первый турбодетандер воздушного компрессора и второй турбодетандер для привода компрессора.

Эти два типа турбодетандеров могут быть независимыми или смонтированными на одном валу.

Для привода центробежного компрессора он должен быть обязательно независим, чтобы иметь большую способность изменения скорости. Их мощность изменяется от 1000 до 50000 кВт, а термический КПД изменяется от 16 до 36%. Они могут быть оборудованы рекуператором тепла для нагрева воздуха, идущего на сгорание.

Улучшение коэффициента полезного действия можно осуществить путем реализации комбинированного цикла, соединяя газовую турбину с паровой турбиной, использующую тепло уходящих продуктов сгорания.

Преимущества и недостатки газовой турбины те же, что у центробежного компрессора:

— достоинства: невысокие капвложения и стоимость эксплуатации и обслуживания;
— недостатки: невысокий коэффициент полезного действия, особенно при недогрузке.

6.5.3.3. Электродвигатели

Электродвигатели для привода компрессоров бывают постоянного или переменного тока, синхронные или асинхронные.

6.5.3.3.1. Двигатели постоянного тока

Двигатели постоянного тока позволяют менять свою скорость вращения. Они требуют тем не менее дорогого обслуживания, вызываемого наличием щеток. Плюс к этому общий КПД для системы выпрямитель + мотор меньше, чем у мотора переменного тока.

6.5.3.3.2. Двигатели синхронные и асинхронные

Асинхронные и синхронные электродвигатели вращаются с постоянной скоростью, зависимой только от частоты и числа полюсов мотора.

Для варьирования скорости вращения к мотору подается изменяемая частота с помощью системы терристров.

Пуск синхронного двигателя, имеющего нулевую пару вне скорости синхронизации, осуществляется путем пуска мотора в асинхронном режиме.

Коэффициент полезного действия этих машин находится между 93 и 98% в зависимости от мощности: он уменьшается у моторов с изменяемой частотой, т.к. имеют место электронные потери мощности.

6.5.3.3.3. Преимущества и недостатки

6.5.3.3.3.1. Преимущества

— Небольшая стоимость капитальных вложений и эксплуатации;
— КПД высокий, мало снижаемый нагрузкой;
— уровень шума и загрязнения незначительные.

6.5.3.3.3.2. Недостатки

— Стоимость может быть повышена, если электричество используется во время пиковых нагрузок (E.D.F.);
— зависимость транспорта газа от электроэнергии;
— необходимость иметь электросеть высокой мощности, которая может потребовать длительного строительства из-за административных причин.

6.5.4. Концепция компрессорных станций

Компрессоры могут устанавливаться:

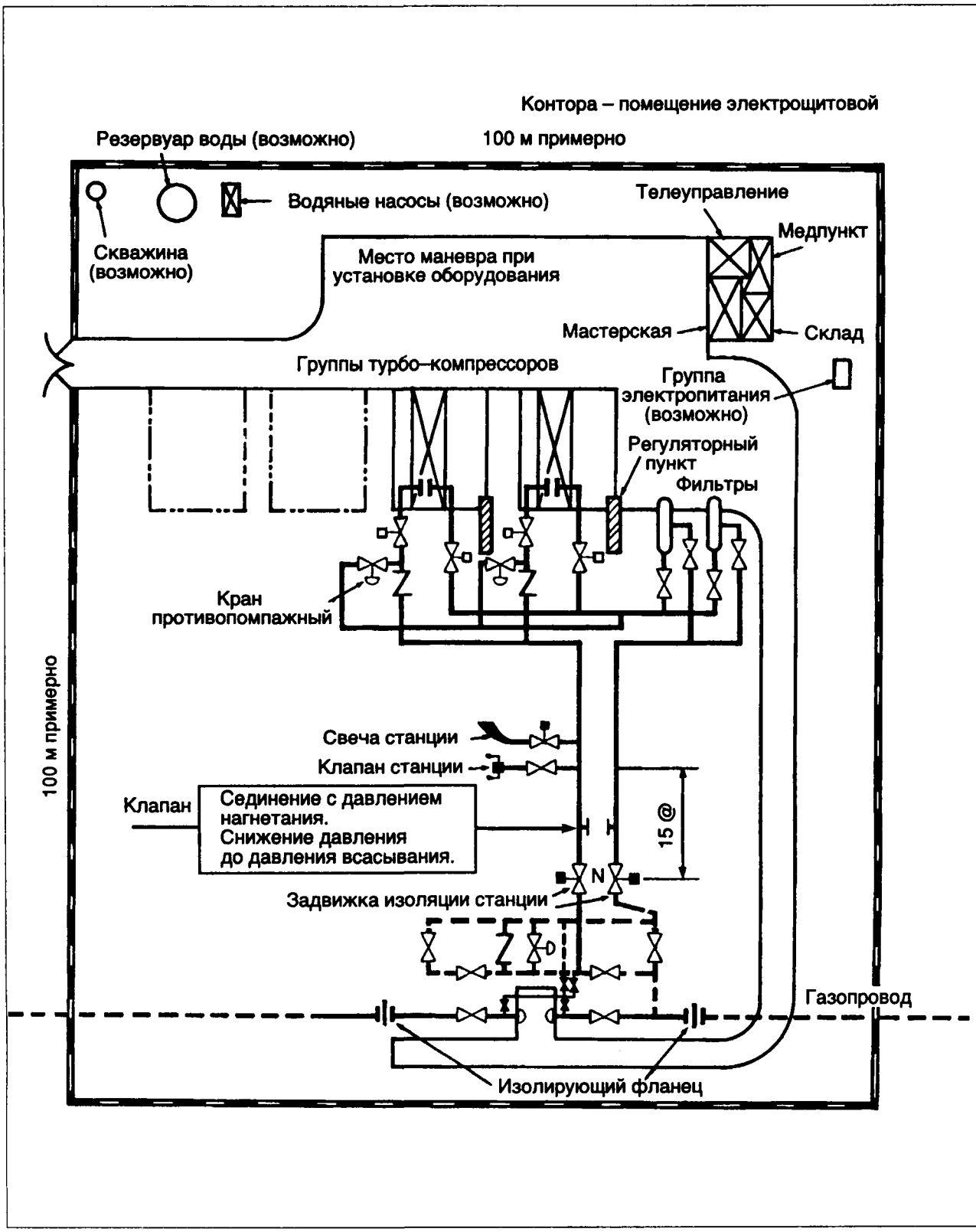
— в здании (в общем случае для поршневых компрессоров, требующих обслуживания);
— в звукоизолированных блоках (в основном для центробежных компрессоров);
— на открытом воздухе, если позволяют климатические условия и особенно требования по шуму не очень жесткие.

Газовая сеть компрессорной станции включает:

— пост входа и выхода со станции;

— всасывающий коллектор с фильтром;
— нагнетающий коллектор;
— вспомогательные газопроводы (газоснабжение системы сгорания и система безопасности).

Станция должна иметь способность быть изолированной или иметь выхлоп в атмосферу сети безопасности (система сброса) и должна быть защищена от избыточного давления клапанами.



Пример планировки компрессорной станции.

6.6. РЕГУЛЯТОРНЫЕ ПУНКТЫ

6.6.1. Общая часть

См. разд. 7.4.

6.6.2. Принципы работы регуляторов

См. разд. 7.4.1.

6.6.3. Технология регулирования

См. разд. 7.4.1.

6.6.4. Типовая схема регуляторного пункта

Регуляторный пункт обычно включает:

— изолирующие соединения на входе;
— входную задвижку (кран);
— фильтр;
— основную линию регулирования оборудованную:
  · предохранительный клапан;
  · регулятор;
— резервную линию регулирования с регулятором;
— счетчик устанавливается:
  · на главной линии, если он с вращающимися поршнями;
  · на выходе двух линий регулирования для других типов счетчиков;
— задвижка (кран) на выходе;
— предохранительные клапаны, установленные с одной и другой стороны выходной задвижки;
— байпас оборудованный:
  · запорной задвижкой (краном);
  · регулирующим краном (задвижкой);
— изолирующие соединения на выходе.

Кроме этого перед постом вне его устанавливается изолирующая задвижка (кран).

6.6.5. Устройства безопасности (клапан и кран безопасности)

6.6.5.1. Регламентация

Модифицированным указом от 11 мая 1970 г. уточнено, что в точках подсоединения поставщик обязан установить один или несколько диспозитивов безопасности.

Одно из устройств должно начать функционировать, когда давление достигает максимального рабочего давления, а весь комплекс обеспечения безопасности должен препятствовать повышению давления больше, чем на 10%.

6.6.5.2. Давление регулирования

Для регулирования предусматриваются следующие пределы:

— ±2,5% для регуляторов и клапанов с пилотом;
— ±5% для регуляторов, клапанов прямого действия и предохранительных клапанов.

Диапазон действия аппаратов должны следовать один за другим, без наложения один на другой в возрастающей последовательности:

— диапазон регулятора безопасности;
— диапазон основного регулятора;
— диапазон первого диспозитива безопасности: 100% максимального рабочего давления;
— диапазон второго диспозитива безопасности: 110% максимального рабочего давления.

В случае, если на выходе сети давление М.Р.В., диапазоны действия аппаратов обычно фиксируются следующим образом:

— диапазон регулятора безопасности;
— диапазон основного регулятора: 4 бар:
  · предел первого диспозитива безопасности;
  · предел второго диспозитива безопасности 4,8 бар; или 5,0 бар в зависимости от того, оборудован ли пост одной или двумя линиями регулирования.

Величина регулируемого давления аппаратов должна устанавливаться в зависимости от распределительных сетей или индустриального клиента.

6.6.6. Детали конструкции

Максимальная скорость газа:

· в трубопроводе 20 м/с,
· на выходе из регулятора – 100 м/с.

— общий расход поста обеспечивается одним регулятором;
— соединение аппаратов осуществляется плоскими фланцами (razedface, F.R.) или тороидными фланцами (ringjoint, R.J.);

— фильтр рамочный и с отверстием для очистки;
— установка турбинного счетчика:
  · длина прямого участка перед счетчиком 20D (6 D с выпрямителем потока);
  · длина прямого участка после счетчика 5 D.

6.6.7. Размещение регуляторного пункта

6.6.7.1. Три типа регуляторных пунктов

Встречается три типа пунктов:

— пункт на открытом воздухе (более часто);
— пункт в кабине (ящика) (в жилом районе);
— пункт в здании (в основном по требованиям архитектуры).

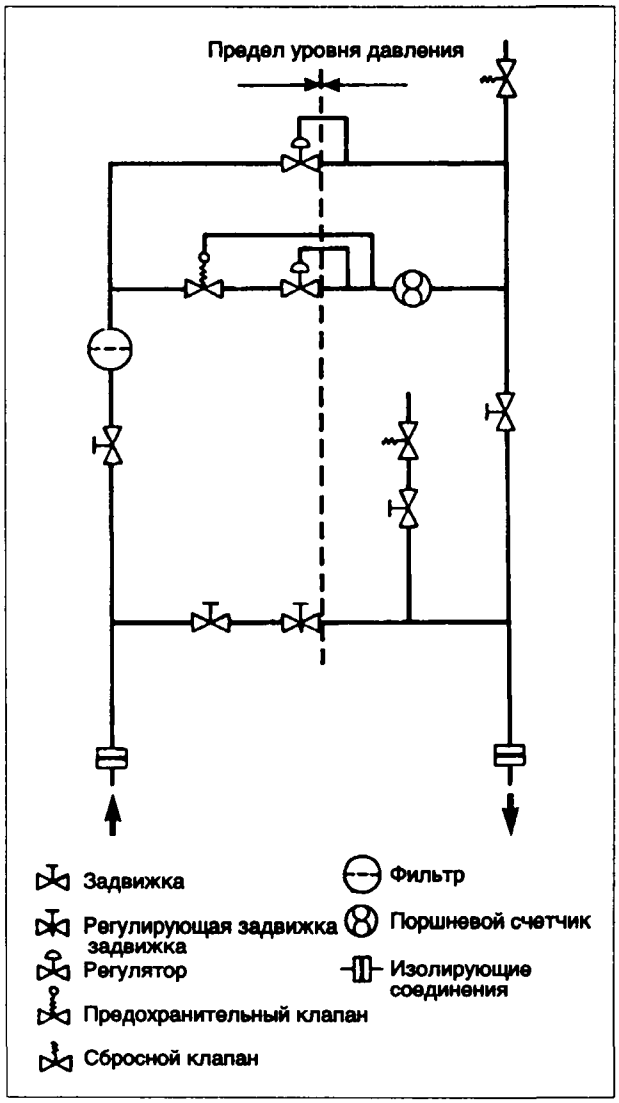
6.6.7.2. Выбор места расположения

Необходимо учитывать:

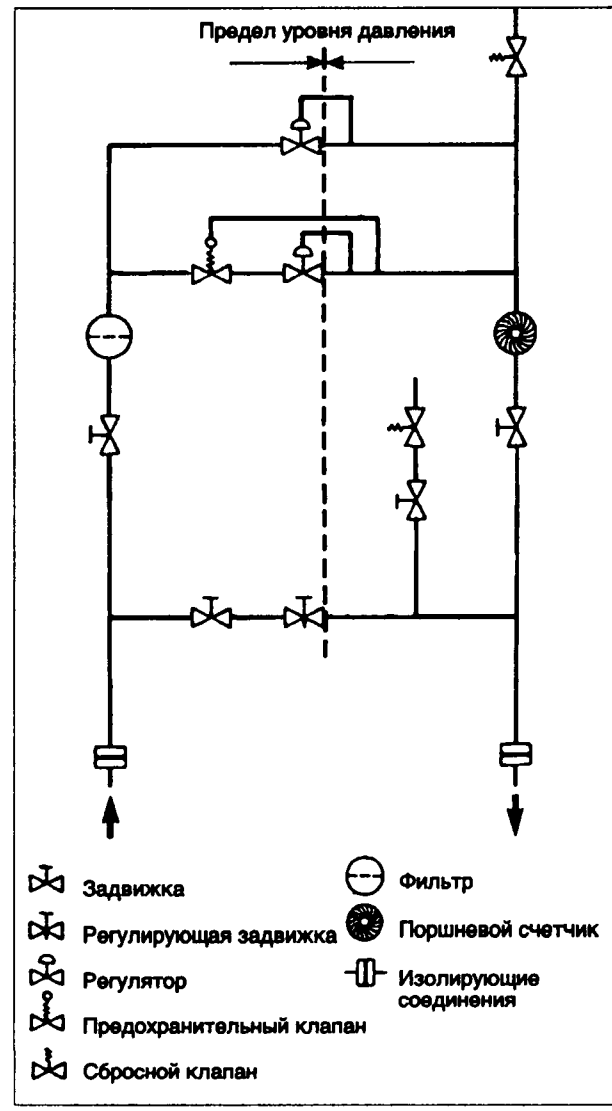
— близость точки снабжения;
— доступность (близость дороги);
— удаленность от линий электропередач с нулевым проводом;
— последствия промерзания грунта на выходе из поста;
— горизонтальность земли.

6.6.8. Охлаждение при дросселировании

— Уменьшение температуры газа составляет 0,5 K° при снижении давления на 1 бар;
— борьба против образования гидратов в импульсных линиях:
  · лента-электронагреватель (ТЭН);
  · барботажный горшок с изопропанолом;
— борьба против обмерзания аппаратов: покрытие аппаратов изоляцией;
— борьба против промерзания земли. (см. раздел 7.2.3.2).



Регуляторный пункт. Счетчик с вращающимися поршнями.



Регуляторный пункт с турбинным счетчиком.

6.7. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГАЗОВЫХ СЕТЕЙ

6.7.1. Вступление

Целью эксплуатации является поддержание в хорошем состоянии функционирования сооружений газовой сети и в особенности борьба против риска снижения эксплуатационных характеристик:

- повреждение трубопроводов в ходе посторонних работ;
- коррозия внутренняя и внешняя;
- оседание почвы;
- закупорка трубоприводов (пыль, гидраты, лед);
- нарушение работы регуляторов, задвижек, клапанов и т.д.;
- закупорка (засорение) фильтров.

6.7.2. Отношение с посторонними организациями

Они касаются:

- отправления в мэрию планов сети, соответствующих настоящему времени;
- информация мэрии предприятиям гражданского строительства, ливневой канализации о возможной опасности при выполнении работ рядом с газопроводом и процедуры, которые необходимо выполнить перед началом этих работ;
- ответ на заявление о намерении начать работы, адресованные поставщику газа;
- специальное обслуживание транспортных работ, выполняемых по соседству (рядом);
- поиски работ, выполняемых предприятиями без уведомления о их начале.

6.7.3. Обследование трубопроводов

Используется три конкурирующих метода обследования:

- пеший;
- автомобильный;
- воздушный.

Обследование имеет целью:

- следить за состоянием сооружений;
- следить за перемещением почвы;
- искать работы, которые ведут посторонние лица без предупреждения;
- контролировать развитие гражданского строительства рядом с газопроводами.

6.7.4. Обслуживание трубопроводов

Оно состоит из:

- прочистки трубопроводов в случае наличия пыли или конденсата;
- поиска утечек газа: операция, проводимая периодически для нестальных трубопроводов в жилой зоне;
- поддержания трассы подземных трубопроводов:
  - состояние границ и вешек (сигнальных отметок);
  - вырубка леса, очистка от кустарника;
- поддержания наземных трубопроводов:
  - покраска трубопроводов;
  - проверка состояния опор;
- поддержания состояния подводных трубопроводов путем периодического контроля движения дна и реки;
- поддержания состояния трубопровода, лежащего на нестабильных почвах:
  - установка индикатора напряжения и периодическая запись его показаний;
  - проведение периодической топографической съемки;
  - врезка:
    - освобождение труб;
    - обрезка труб или установка муфт;
    - установка естественных лирообразных компенсаторов;
    - перенос трубопровода из зоны нестабильной почвы.

6.7.5. Обслуживание регуляторных пунктов

Оно включает:

- периодический контроль функционирования задвижек, исполнительных механизмов, задвижек, затворов, предохранительных клепанов, сбросных клапанов, автоматических исполнительных механизмов задвижек, задвижек с телекомандным управлением и счетчиков;
- периодическая очистка фильтров: очистка, замена фильтрующих элементов;
- периодическая настройка регуляторов, предохранительных клапанов, сбросных клапанов, приборов давления и температуры, исполнительных механизмов задвижек;
- в холодный период установка электроподогревателя или горшка барботажа, содержащего изопропанол, бывает необходима для борьбы с образованием гидратов в импульсных линиях пилота регулятора;
- эксплуатация в гражданском смысле: прополка, покраска и т.д.

6.7.6. Обслуживание установок катодной защиты

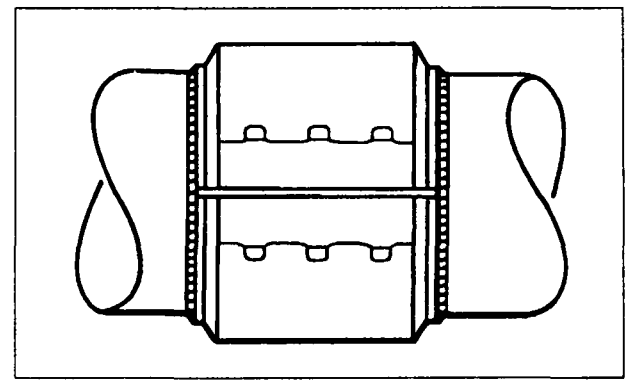
Предусматривает:

- — поддержание сооружений дренажа;
- — контроль напряжения и потенциала защиты;
- — поддержание потенциала трубопровода по отношению к грунту;
- — проверку изолирующих соединений;
- — замер изоляции трубопровода, проложенного в металлическом футляре.

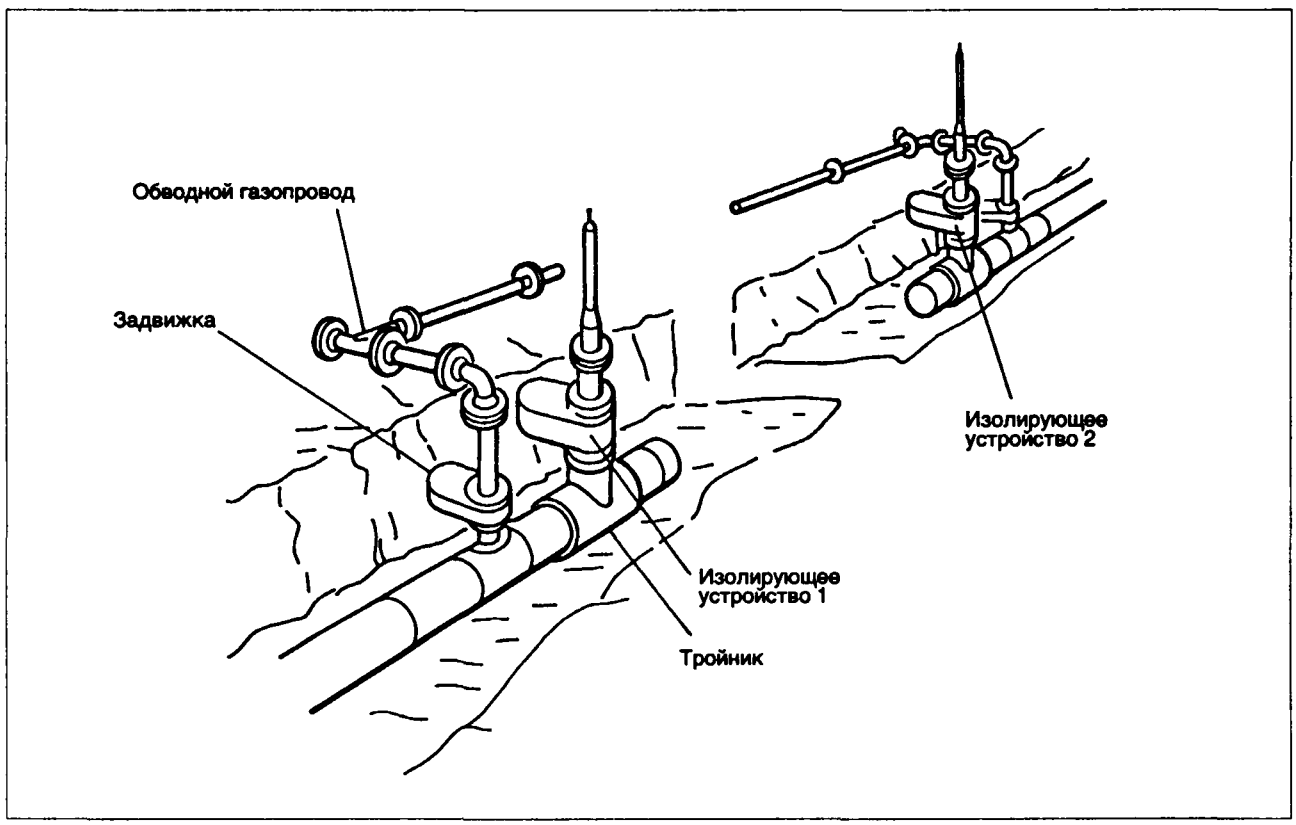
6.7.7. Ремонт трубопровода

Он касается:

- — второстепенных повреждений, таких как восстановление изоляции;
- — серьезных повреждений, которые могут потребовать:
  - · временного ремонта:
    установки муфт (см. рис. напротив) или труб между двумя муфтами;
  - · ремонта окончательного:
    в этом случае необходимо иметь следующее оборудование:
    - — машину по разрезанию труб;
    - — машину по обработке кромок;
    - — сварочный аппарат;
- — если перерыв в подаче газа невозможен, необходимо:
  - · использовать цистерну со сжатым газом или цистерну со сжиженным газом;
  - · или осуществить врезку под давлением с перекрытием подачи газа с двух сторон заменяемого отрезка и установить байпас (временный обводной газопровод (см. рисунок);
- — оперативные действия следующие:
  - · сварка в атмосфере воздуха после продувки газопроводов и применение средств, позволяющих избежать появления газа;
  - · сварка в атмосфере газа под постоянным контролем небольшого избыточного давления газа в трубопроводе. Выходящий в месте сварки газ сжигается (пламя высотой 15 - 20 см).



Муфта, устанавливаемая на трубе.



Врезка под давлением и установка обводного газопровода.

6.8. УЧЕТ

Этот вопрос освещается также в разд. 1.12.

6.8.1. Роль подсчета

Расход газа в сетях подсчитывается для того, чтобы знать количество газа, фигурирующего в:

— коммерческих и некоммерческих соглашениях поставщиков и клиентов, а также и транспортников;
— движение газа (расход в трубопроводе, регулирование хранения, прогноз снабжения, проектирование сетей);
— материальный баланс вход-выход во всех частях сети.

Подсчитываемое количество наиболее часто выражается в энергии, иногда в объемах (накопленный, средний часовой, суточный расход и т.д.).

6.8.2. Принципы измерений

В системе транспорта еще не существует диспозитивов, позволяющих измерять непосредственно количество энергии. Это осуществляется на практике, измеряя:

— *с одной стороны, объем газа при данных условиях давления и температуры*, т.е. относительных условиях;
— с другой стороны, количество энергии, содержащейся в единице объема газа в относительных условиях, т.е. теплотворную способность.

Замер объема газа в относительных условиях производится путем замера объема газа в условиях истечения и коррекции объема. Замер объема газа в условиях истечения может производиться с помощью системы с подведением и без подведения энергии.

6.8.2.1. Без подведения внешней энергии

Снижение давления или потери давления, вызванные течением:

— служат для приведения в движение подвижного устройства, скорость вращения которого (турбинный счетчик) или перемещение объема (счетчик с вращающимся поршнем) пропорциональны соответственно расходу или объему;
— измеряется прямо в местах неподвижного сопротивления (отвод, трубка Пито, диафрагма, труба Винтури, калиброванная трубка) и позволяет измерять расход путем применения физических законов, включая другие параметры, такие как температура, давление, плотность (объемная масса);
— создает пульсирующее вихревое движение газа за неподвижным препятствием, частота которого измеряется счетчиком и пропорциональна расходу (счетчик вихревого эффекта).

6.8.2.2. С подведением внешней энергии

Возмущение, производимое внешним источником, позволяет измерять скорость истечения и, следовательно, расход (счетчик ультразвуковой).

Коррекция объема для приведения его к относительным условиям может осуществляться различными методами, начиная от простой коррекции по температуре до коррекции более сложной, включающей температуру, давление и качество газа.

Принципиальные процессы учета и коррекции объема, использующиеся в транспорте газа, даны в таблице на с. 583.

Определение теплотворной способности может осуществляться непосредственно с помощью калориметра или расчетом на основе состава данного газа с помощью хроматографического анализа.

6.8.3. Применение

Чтобы дать определение учета на транспорте, различные аспекты должны быть приняты к рассмотрению.

6.8.3.1. Регламентация определения расхода (счетчика) и условия соблюдения правил

Все измерения, имеющие место в коммерческих соглашениях, подчиняются правилам. Эти правила, выработанные сервисом метрологии, фиксируют регламентацию строительства, точности установки, использования и контроля. Правила иногда дополняются специфическими условиями между партнерами соглашения, со ссылкой на нормы.

6.8.3.2. Точность

Задачей точности помимо правил является важность измерения (техника и финансы) для поставщиков и его партнеров по контракту.

6.8.3.3. Надежность, отклонения (разброс)

Надежность и отклонение во времени являются такими же важными критериями качества, как и точность, К тому же стоимость эксплуатации счетчиков прямо связана с этими элементами (обслуживание, частота контроля).

6.8.3.4. Адаптация расхода

Величина измеряемого уточненного объема должна перекрывать, как минимум, максимальный разброс расхода, встречающегося в эксплуатации. Адаптация может быть получена, если необходимо, путем использования рамп из нескольких счет-

чиков, установленных параллельно, в зависимости от расхода, подсоединяемых вручную или автоматически.

6.8.3.5. Контроль

Замер должен быть задуман таким образом, чтобы эксплуатационник могут легко провести регламентный контроль по контракту или окончательный из внутренних соображений всех элементов цепи счетчика. Если установлена важность учета, этот контроль должен быть возможен без остановки. Определенный контроль может быть реализован автоматически и постоянно (многообразие элементов цепи замера или всей цепи, использование нескольких методик подсчета одновременно, выполнение теста нормального функционирования, как теста выхода из шкалы счетчика).

Поскольку используются счетчики, имеющие механические движущиеся части, можно оборудовать счетчик контрольной рампой, позволяющей проверять периодически путем соединения в параллель рампы, находящейся в эксплуатации.

Небольшой период использования контрольной рампы намного снижает риск поломки подключенного счетчика контроля. Это подсоединение в параллель может быть с помощью контрольного счетчика, устанавливаемого периодически вместо катушки, предусмотренной для этого случая в рампе.

6.8.3.6. Качество газа

Необходимое оборудование устанавливается, если газ содержит пыль (фильтр), конденсат (сепаратор жидкости) или если коррозивен (материал, сопротивляющийся коррозии).

Тип замера	Формула	Измеряемые величины	Учет качества газа	Примечание
Счетчик (1) + коррекция T	$V_0 = Cte \cdot \frac{V}{T}$	V, T	Нет	Используется, если P > Cte
Счетчик + коррекция по плотности	$V_0 = Cte \cdot V$	V	Нет	Используется, если ρ > Cte
Счетчик + коррекция P. T. Z.	$V_0 = V \cdot \frac{P}{P_0}\frac{T_0}{T}\frac{Z_0}{Z}$	V, P, T	— Возможно, измеряя в точное время параметры, необходимые для определения Z (P. C. S. плотность, % N_2; % CO_2 и т. д.) — Может быть измерено прямо Z-метром	
Счетчик + коррекция $\frac{\rho}{\rho_0}$	$V_0 = V \cdot \frac{\rho}{\rho_0}$	V, ρ, ρ_0	Да	
Учет с помощью диафрагмы типа P. T. Z.	$V_0 = Cte \cdot \alpha \cdot \varepsilon \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{TZ\rho_0}}$	ΔP, P, T, ρ_0	Так же как при коррекции P. T. Z.	
Учет с помощью диафрагмы типа $\sqrt{\rho}$, ρ_0	$V_0 = Cte \cdot \alpha \cdot \varepsilon \frac{\sqrt{\Delta P \cdot \rho}}{\rho_0}$	ΔP, P, T, ρ_0, ρ	Да	— Замер P необходим для расчета ε и вязкости — Замер T необходим для расчета вязкости

(1) – Счетчик с вращающимися поршнями, турбинный или с турбулентным эффектом.

Без индекса – величины при условии истечения
Индекс 0 – при приведенных условиях
V – объем
P – давление абсолютное
T – температура абсолютная
Z – коэффициент сжимаемости
ΔP – перепад давления
ρ – объемная масса
α – коэффициент расхода
ε – коэффициент дросселирования

Принципы определения объемного расхода при транспорте газа.

6.9. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

6.9.1. Общие положения

Телекоммуникация – это "множество процессов передачи информации на расстояние" (определение из энциклопедического словаря Petit Robert). Круг этих процессов обширен: радио, электричество, передачи по кабелям разной природы, волоконная оптика. Это позволяет реализовать ряд не менее важных функций: звуковая связь (телефон и радиотелефон), видеосвязь (телевидение, телеконференции), передача всех типов информации (телеграф, факсимильная связь и любые услуги передачи информации).

В газовой индустрии из-за протяженности своих установок, рассредоточенности объектов добычи и значительных контактов, которые она имеет со своими клиентами, поставщиками и администрациями, используются в полной мере большая часть этих процессов.

Здесь представлены только те средства, которые наиболее часто используются в газовой отрасли, и те, которые считаются перспективными для широкого применения в будущем.

6.9.2. Информационный канал передачи данных

6.9.2.1. Определения

Информационный канал устанавливается между двумя оборудованными терминалами передачи данных (ОТПД), т.е. вычислительными системами и/или терминальными системами. Оборудованные абонентские пункты взаимодействуют между собой с помощью цепи передачи данных, которая включает аппаратуру передачи данных (АПД). в частности модемы и линии связи.

ОТПД и АПД связаны между собой интерфейсом.

Ниже представлена схема, иллюстрирующая эти понятия:



6.9.2.2. Используемые цепи передачи данных

Цепь передачи данных может быть реализована различными видами передающих сред, среди которых чаще всего используются:

— пара металлических проводов;
— коаксиальный кабель;
— волноводы;
— радиорелейные линии;
— спутники связи;
— волоконная оптика;

но существуют еще и другие, и представляет собой большой интерес использование трубопровода как среды для передачи данных.

6.9.2.3. Кодирование данных

Чтобы быть переданными от одного ОТПД к другому ОТПД, данные и информация должны быть закодированы. Они представляются последовательностью двоичных элементов (0 и 1), составляющих символы алфавита, которые могут быть:

— буквами;
— цифрами;
— знаками пунктуации;
— специальными символами, применяемыми для функционирования терминалов или для управления протоколом. В последнем случае речь идет об управляющем символе.

Код характеризуется своей длиной, которая равна количеству "бит", представляющих каждый знак. Наиболее часто используемые коды имеют длины 5, 6, 7 или 8 бит, позволяющие кодировать соответственно 32, 64, 128 или 256 различных символов.

Ниже представлены характеристики наиболее часто используемых кодов.

6.9.2.3.1. Код МККТТ № 2 (C.C.I.T.T. № 2)

МККТТ – Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии. Этот код, называемый также кодом Бодо, применяется в телеграфной интернациональной сети (Телекс). Код имеет длину в пять бит, содержит два специальных символа "цифры" и "буквы", позволяющих получить две группы по тридцать знаков.

6.9.2.3.2. Десятично-двоичный код (D.C.B. - Decimal Coded Binary)

Десятично-двоичный код имеет длину шесть бит и широко используется в работе асинхронных терминальных систем.

6.9.2.3.3. Код МККТТ № 5

Этот семибитовый код весьма распространен. Код имеет и другие названия: Американский стандартный код для обмена информацией (ASCII – American Standard Code for Information Interchange) или международный алфавит № 5. Позволяет кодировать 128 символов. Представлен в таблице на стр. 585.

6.9.2.3.4. Код E.B.C.D.I.C. (Extended Binary Coded Decimal Interehange Code)

E.B.C.D.I.C. – расширенный двоично-кодированный десятичный код для обмена информацией имеет восемь бит и также широко распространен. Используется тогда, когда данные, обрабатываемые на вычислительной машине, представляются машинными словами, длины которых кратна восьми битам.

Иногда оказывается необходимым передать любую последовательность битов. Некоторые протоколы позволяют реализовать то, что называют прозрачностью относительно используемых кодов.

6.9.2.4. Передача по паре металлических проводов или по коаксиальному кабелю

6.9.2.4.1. Передача на базовом диапазоне

Для данного типа передачи 1 и 0 или последовательности битов (сдвоенный бит, строенный бит и др.) представляются значениями постоянного напряжения.

Применяются различные виды кодирования электрического сигнала:

— двоичное кодирование представляет 0-й бит нулевым напряжением и 1-й бит напряжением V;
— кодирование N.R.T. (No return to zero) представляет нулевой бит напряжением –V и единичный бит напряжением +V;
— манчестерский код представляет бит 0 сигналом, проходящим от –V до +V в середине интервала представления нулевого бита, и сигнал, проходящий от +V до –V в середине интервала представления единичного бита;
— манчестерский дифференциальный код представляет различие между двумя битами переходом сигнала в середине интервала представления бита: восходящий фронт, если таким же был предыдущий бит, падающий фронт в противоположном случае; это кодирование электрического сигнала, которое наиболее часто используется, представлено на рисунке стр. 587.

b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	Строки \ Колонки →	0	0	0	0	0	1	1	1
								0	0	1	1	0	0	1	1
								0	1	0	1	0	1	0	1
								0	1	2	3	4	5	6	7
			0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0		P		*p*
			0	0	0	1	1	SOH	DC1	'(1)	1	A	Q	*a*	*q*
			0	0	1	0	2	STX	DC2	"	2	B	R	*b*	*r*
			0	0	1	1	3	ETX	DC3	#	3	C	D	*c*	*s*
			0	1	0	0	4	EOT	DC4	S	4	D	T	*d*	*t*
			0	1	0	1	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	*e*	*u*
			0	1	1	0	6	ACK	SYN	&	6	F	V	*f*	*v*
			0	1	1	1	7	BEL	ETB	'	7	G	W	*g*	*w*
			1	0	0	0	8	BS	CAN	(	8	H	X	*h*	*x*
			1	0	0	1	9	HT	EM	)	9	I	Y	*i*	*y*
			1	0	1	0	A	LF	SUB	.	:	J	Z	*j*	*z*
			1	0	1	1	B	VT	ESC	+	;	K	[(1)	*k*	
			1	1	0	0	C	FF	FS	,	<	L		/	:
			1	1	0	1	D	CR	GS	-	=	M	](1)	*m*	
			1	1	1	0	E	SO	RS	.	>	N	(1)	*n*	~
			1	1	1	1	F	SI	US	/	?	O	–(1)	*o*	DEL

ISO USASCII – код Международной организации по стандартизации – Американский стандартный код для обмена информацией.

Значение символов

ACK (Acknowledge): Подтверждение приема. Символ передачи, который передается приемным устройством, чтобы сообщить передающему устройству, что:

а) была установлена правильная поправка,

или

б) данные получены.

BEL (Bell): Звонок. Символ, используемый, когда необходимо привлечь внимание людей. Он может управлять устройствами вызова или предупреждения.

NUL (Null): Нуль. Символ, который может быть включен в ряд символов или извлечен из него, но с тем, чтобы информация, составленная этой последовательностью действовала.

RS (Record Separator): Разделитель записей (чтобы определить, см. ниже US).

SI (Shift-In): Вход. Символ "Вход" означает, что кодовая комбинация, которая далее следует, должна интерпретироваться в соответствии с таблицей нормализованного кода.

Если особая (нестандартная) последовательность содержит символ "выход", то знак "вход", который может завершить действие режима "выход", может также обозначить конец особой последовательности (см. ниже SS).

Особая последовательность может быть также установлена, если она имела место, применением символа SS.

SO (Shift-Out): Выход (по коду). Символ "выход" означает, что кодовые комбинации, которые следуют друг за другом, должны быть интерпретированы не по таблице нормализованного кода до тех пор, пока не появится символ "вход". (Символ "вход" – символ изменения кода для возврата к стандартному набору символов, для ЭВМ это переход к латинскому регистру; символ "выход" – символ изменения кода для замены стандартного набора символов на расширенный, для ЭВМ – это переход в национальный шрифт. Не путать с ESC – Выход. ESC – это выход наружу. Прим. перев.)

SOH (Start of Heading): Начало заголовка. Знак управления передачей, применяемый в начале последовательности символов, которая содержит информацию о маршруте или используемый адрес, как это делается в машине. Такая последовательность обозначается заголовком.

Символ STX имеет в качестве своего действия окончание заголовка.

SPACE (Space): Пробел. Графический символ, который обычно не печатается и используется для разделения слов. Это также символ воспроизведения, который управляет движением позиции печатаемого знака впереди на той же печатаемой строке.

SS (Start of Special Sequence): Начало особой последовательности. Знак, который используется для обозначения начала последовательности переменной длины символов, которые имеют специальное значение или должны быть обработаны специальным образом.

Символ "начало специальной последовательности" может быть использован для управления передачей.

Если необходимо применить символ, обозначающий окончание особой последовательности, то для этого служит символ SI.

STX (Start of Text): Начало текста. Символ управления передачей, который предшествует последовательности знаков, которые должны быть обработаны как единое целое и полностью переданы по своему конечному назначению. Такую последовательность обозначают именем "текст". Символ "начало текста" может быть использован для обозначения окончания последовательности знаков, начинающейся символом "начало заголовка".

SYN (Synchronous Ilde): Синхронизация. Символ управления передачей, применяемый в системе синхронной передачи в отсутствие всех других символов (ситуация неактивная), чтобы выработать сигнал, после которого синхронизация может быть достигнута или поддержана.

US (Unit Separator): Разделитель элементов. Разделитель элементов (US), разделитель записей (RS), разделитель групп (GS), разделитель файлов (FS) являются разделителями информации, которые имеют между собой иерархическую связь (в последующем порядке). Разделитель элементов (US) – наименее мощный из четырех. Разделитель информации используется в конце последовательности информации для его обозначения.

"Элемент" не может включать ни "файл", ни "группу", ни "запись".

"Запись" может включать (и в данном случае должна включать полностью) переменное число (ноль, один или многие) элементов. "Запись" не может включать в себя ни "файл", ни "группу".

"Группа" может включать (и в данном случае должна включать полностью) различное число (ноль, один или многие) "записей" и/или "элементов".

"Группа" не может включать в себя "файл".

"Файл" может включать (и в данном случае должен включать полностью) различное число (ноль, один или многие) "групп", "записей" и/или "элементов".

VT (Vertical Tabulation): Вертикальная табуляция. Символ отображения, который управляет движением позиции печатаемого знака к следующей в ряде заранее определенных строк печати.

DC1, DC2, DC3, DC4 (Device Control): Символы, используемые для механического управления некоторыми терминальными устройствами.

BS (Backspace): Возврат на шаг. Символ воспроизведения, который управляет движением позиции печатаемого знака на один шаг (позицию) назад на той же строке печати.

CAN (Cancel): Аннулирование. Код, который используется для того, чтобы показать, что данные, на которые он указывает, являются ошибочными или не должны быть приняты в рассмотрение.

CR (Carriage Return): Возврат каретки. Символ отображения, который управляет движением позиции воспроизводимого знака на той же строке.

Delete (Delete): Удаление. Этот символ используется особенно для стирания или уничтожения ошибочных или нежелательных знаков на перфоленте.

DLE (Data Link Escape): Афторегистр 1. Символ управления передачи, который изменяет единственную комбинацию следующего кода (см. "Escape"). Служит исключительно для того, чтобы доставлять дополнительные управляющие возможности в сети передачи данных.

EM (End of Medium): Конец носителя. Символ управления, предназначенный для идентификации материального конца носителя информации или конца используемой или желательной части информации, зафиксированной на носителе. Расположение этого кода не обязательно должно соответствовать материальному концу носителя.

ENQ (Enquiry): Запрос. Символ управления передачей, применение которого предусмотрено в системах передачи данных для реализации ответа на запрос к удаленной станции. Ответ может включать идентификатор станции и/или состояние станции.

EOT (End of Transmission): Конец передачи. Знак управления передачей, используемый для индикации окончания передачи одного или многих текстов (каждый из которых должен оканчиваться символом ETX).

ESC (Escape): Выход. Функциональный символ, который позволяет расширить набор стандартных знаков кода, изменяя смысл следующего непосредственно за ним знака. Точное значение следующего знака требует предварительного соглашения между передатчиком данных и адресатом. Символ "выход" может быть рассмотрен как подготовительный или выход из кода без блокировки.

Символ, следующий непосредственно за "выходом", может быть интерпретирован как графический или как код управления, внешний к нормальному набору.

Единственным значением этого знака может быть: "Иди в код X и оставайся там". В этом случае результатом последовательности двух символов будет изменение кода с блокировкой.

ETB (End of Transmission Block): Конец блока передачи. Это знак управления передачей, применяемый для обозначения конца блока данных. Символ может быть добавлен к последовательности знаков (или исключен из нее) на любом этапе на пути передачи без изменения содержания данных. ETB используется для разделения данных, когда структура блока не имеет необходимой связи со структурой передаваемой информации.

ETX (End of Text): Конец текста. Код управления передачей предназначен для указания конца последовательности знаков, имеющих в начале символ STX и передаваемый как единое целое. В некоторых системах, использующих символ или символы контроля ошибок, эти символы могут следовать за знаком ETX.

FF (Form Feed): Перевод формата. Символ отображения, который управляет движением позиции печатаемого знака на первой заранее определенной печатной строке для следующей формулы.

FS (File Separator): Разделитель файлов (определение см. ниже US).

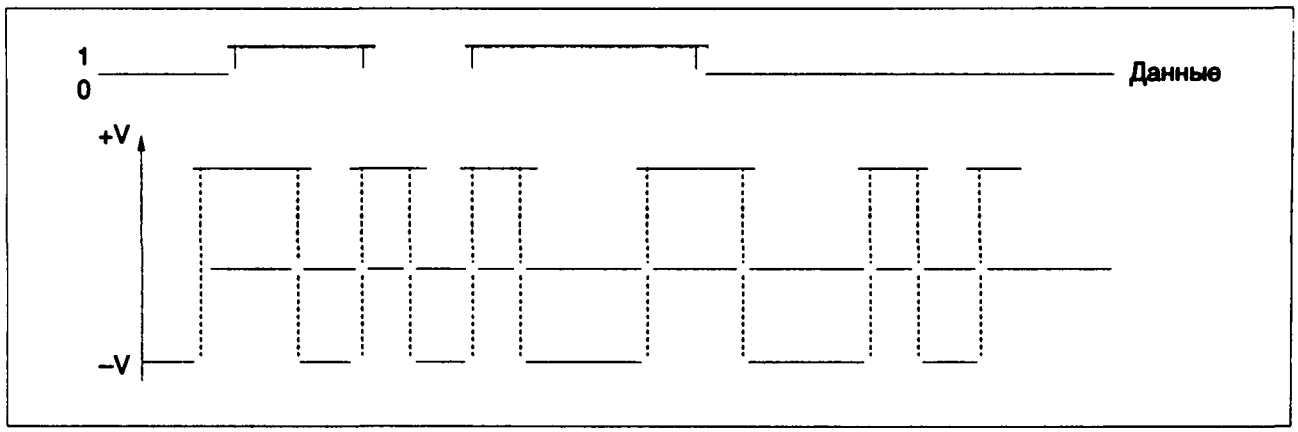
GS (Group Separator): Разделитель групп (определение см. ниже US).

(HT) (Horisontal Tabulation): Горизонтальная табуляция. Символ отображения, предназначенный для управления движением позиции печатаемого знака к следующей в ряду заранее определенных позиций вдоль печатаемой строки.

LF (Line Feed): Перевод строки. Символ отображения, который управляет движением позиции печатаемого знака при переходе к следующей строке печати.

NAK (Negative Acknowledge): Отрицание приема. Символ управления передачей, посылаемый принимающей стороной как отрицательный ответ передающей.

NL (New Line): Новая строка. Символ воспроизведения, который управляет движением отображаемого знака на первую позицию следующей печатной строки.



Манчестерский дифференциальный код.

Манчестерские коды являются более результативными, так как позволяют, кроме того, наилучшим образом передать тактовые импульсы генератора терминального передатчика ОТПД. Преимущество передачи на базовом диапазоне заключается в простоте и низкой стоимости реализации ОТПД.

6.9.2.4.2. Передача на основе преобразования частоты

Передача на базовом диапазоне применяется при небольших расстояниях. При передаче сообщений на большие расстояния необходимо использовать другой способ передачи.

Способ преобразования частоты предполагает, что сигнал, представляющий последовательность битов, действует на несущую волну в виде:

$$p(t) = A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p),$$

где

A_p – амплитуда несущей волны;

$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$ – частота несущей волны;

φ_p – фаза несущей волны.

Применяются четыре типа модуляции:

— амплитудная модуляция: действие непосредственно на A_p. Часто используется для передачи аналогового сигнала (чадипередача);
— частотная модуляция: действие непосредственно W_p. Очень часто используется для передачи аналогового сигнала (стереофоническая радиопередача, телевещание, многоканальная телефонная связь;
— фазовая модуляция: непосредственное воздействие на φ_p; характеризуется наложением состояния цифрового сигнала на фазу несущей волны. На практике используют модуляции по 2, 4 или 8 уровням фазы, распределенных равномерно от 0 до 2π.
Часто используется для передачи цифровых сигналов в телефонных сетях, в диапазоне электромагнитного излучения полосой пропускания 2 гГц и спутниками;
— амплитудная и фазовая модуляция часто комбинируются. Они позволяют увеличить объем информации.

6.9.2.4.3. Скорость передачи и пропускная способность

Эти два понятия, которые часто путают, заслуживают объяснения.

6.9.2.4.3.1. Скорость передачи

Каким бы не был базовый диапазон или передаваемая частота, напряжение или несущая волна должны оставаться стабильными в интервале T, для того чтобы можно было бы проанализировать на приемном ОТПД. Скорость передачи оценивается в бодах и равна:

$$R = \frac{1}{T}.$$

6.9.2.4.3.2. Пропускная способность

Оценивается в бит/с и измеряет количество информации, передаваемой за одну секунду. Напряжение или несущая волна сигнала могут принимать ряд N отличных друг от друга значений.

Если $N = 2q$, то бинарная пропускная способность D рассчитывается

$$D = q \cdot R \text{ бит/с}.$$

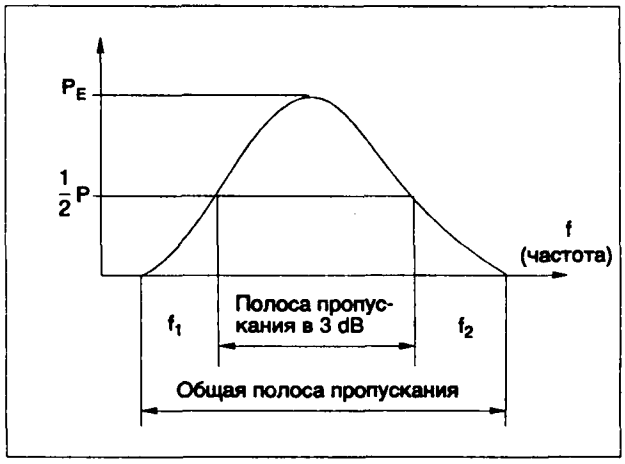
Например: модулированная несущая волна в соответствии с четырьмя величинами частоты при скорости 1200 бит/с имеет пропускную способность 2400 бит/с.

6.9.2.4.4. Ширина полосы. Полоса прохождения

Электрический сигнал, даже называемый синусоидальным, не является идеальным, но всегда может быть разложен на конечную или бесконечную сумму синусоидальных сигналов (ряд Фурье).

Сверх того, можно осуществить передачу по одному и тому же каналу одновременно сигналы разной частоты. Каким бы идеальным не был канал передачи, он может позволить пройти только определенной частоте.

Пропускная способность характеризуется своей полосой прохождения, частотной полосой, внутри которой сигналы передаются надлежащим образом.



P_E – мощность передаваемого сигнала.

P_S – мощность принимаемого сигнала.

В этом примере определятся общая полоса пропускания и полоса пропускания в 3 децибела (dB), представляющая собой интервал частот, в котором

$$10 \log \frac{P_E}{P_s} \leq 3.$$

В этом случае:

$$\frac{P_E}{P_s} \simeq 2.$$

Когда говорят о полосе пропускания без каких-либо уточнений, то чаще всего речь идет о полосе пропускания в 3 децибела.

Телефонная цепь общественной сети имеет, например, полосу пропускания от 300 до 3 400 герц.

6.9.2.4.5. Полоса пропускания и скорость передачи информации

6.9.2.4.5.1. Теорема Найквиста

В 1924 г. Найквист доказал, что возможность передачи по каналу ограничивается его полосой пропускания. Его теорема формулируется так: максимально допустимая скорость передачи по одному каналу с шириной полосы в W (герц) равна 2W (бод).

Например, максимальная скорость передачи по телефонной цепи (W = 3 100 гц) равна 6200 бод. Результат тем не менее является приближенным, так как теорема Найквиста применяется только для низкочастотных фильтров, то есть с шириной полосы 0 - W герц.

6.9.2.4.5.2. Теорема Шеннона

В 1948 г. К. Шеннон доказал, что возможности (в бит · $с^{-1}$) одного канала ограничиваются не только его полосой пропускания, но также и отношением сигнала к помехе; помеха – это паразитный сигнал-шум, искажающий сигнал, который желательно передать.

Его теорема выражается формулой:

$$D = W \cdot \log_2 (1 + \frac{S}{B})$$

где:

D – есть пропускная способность в бит · $с^{-1}$,

W – есть полоса частот в герцах,

S и B мощности сигналов и $\frac{S}{B}$ выражается в децибелах.

Например, для телефонной цепи с полосой пропускания W = 3 100 гц и с отношением $\frac{S}{B}$ равным 30 dB ($10 \log \frac{S}{B} = 30$ dB) – текущая величина – максимальная пропускная способность равняется 30 000 бит · $с^{-1}$.

6.9.2.5. Семиуровневая эталонная модель

Для того чтобы улучшить коммуникации между различными информационными системами, обменивающимися через сеть, Международная организация по стандартизации (ISO – International Standardiration Organization) предложила модель взаимодействия открытых систем (OSI – Open Systems Interconnexion), имеющую семь уровней.

Эта модель, описанная в документах ISO 7498 и C.C.I.T.T.χ200, определяет множество стандартных процедур для обмена информацией между системами. Модель имеет семь уровней.

Эти семь уровней кратко описаны в разд. 1.4.6.4.2.

6.9.3. Имеющиеся средства передачи

Здесь описываются основные средства передачи, имеющиеся во Франции и которые можно встретить во всех индустриальных странах. Во Франции частные средства передачи на значительное расстояние редки (S.N.C.F., которое располагает своими собственными сетями, является исключением) и чаще всего они передаются в распоряжение предприятий администрацией телекоммуникационных систем.

6.9.3.1. Телефонная сеть с коммутацией (R.T.C. – Réseau Téléphonique Commuté)

При данном состоянии техники (модемов) она позволяет передавать данные до 2 400 бит · $с^{-1}$.

6.9.3.2. Телеграфная сеть с коммутацией

Телеграфная сеть с коммутацией (Телекс) позволяет прежде всего обмен телексами со скоростью 50 бод, используя код C.C.I.T.T. № 2. По этой функции сеть является интернациональной.

Начиная с 1963 г. эта сеть открыта для передачи данных со скоростями, достигающими 200 бод. По этому назначению сеть охватывает только несколько европейских стран.

6.9.3.3. Специализированные линии

Можно арендовать у администрации телекоммуникационных компаний постоянные двухточечные или многоточечные телефонные линии. За это платится ежемесячная арендная плата, которая весьма высока.

Имеется возможность арендовать у Р.Т.Т. различные типы специализированных линий:

— двухпроводная линия нормального качества. Эти линии обеспечивают скорость в 2 400 бит · $с^{-1}$ в дуплексном режиме (одновременный обмен в обоих направлениях) и 4 800 бит · $с^{-1}$ в полудуплексном режиме (поочередный обмен);
— четырехпроводные специализированные линии высокого качества. Они построены аналогично предыдущим, но с более совершенными средствами обработки. Они позволяют использовать дуплексный режим со скоростью 9 600 бит · $с^{-1}$;
— многоточечные линии. Это линии типа четырехпроводных. Усилители передачи, установленные в помещениях администрации телекоммуникационных систем, позволяют соединить участки линий;
— металлические линии. Это – непрерывные металлические линии и могут быть арендованы в городских зонах на расстоянии, не превышающем 50 км. Они обеспечивают скорость 72 бит · $с^{-1}$ при передаче на базовом диапазоне.

6.9.3.4. Сеть Транспак

Сеть Транспак, открытая в 1978 г., является общественной сетью с коммутацией пакетов. Эта сеть, имеющая значительный успех во Франции, обладает эквивалентами во многих странах мира. Обладает пропускной способностью от 50 до 48 кбит · $с^{-1}$.

6.9.3.5. Другие средства

Чтобы быть точным, следует также назвать службу Тра... ..., которая является службой специальных систем связи с очень большой пропускной способностью (от 2,4 до 2 048 кбит · $с^{-1}$) на цифровых носителях, и систему Телеком I, использующую множество геостационарных спутников.

6.9.4. Телекоммуникации в газовой индустрии

Крупное газовое предприятие должно эффективно обмениваться двумя видами информации.

6.9.4.1. Управленческая (административная) информация

Административная информация (организационное управление, учет и др.) передается между различными информационными объектами, расспределенными по территории, на которой данное предприятие действует.

В основном речь идет о потоке между большими центрами обработки и другими объектами. Речь идет там о потребностях, полностью сравнимых с теми, в которых нуждаются не газовые предприятия, обладающие множеством географически распределенных информационных объектов.

Для этих нужд Газ де Франс использует почти исключительно сеть Транспак. Вместе с тем системы телерасчетов, использующие телефонные сети с коммутацией, являются объектом перспективного развития.

6.9.4.2. Техническая информация

Зарубежная техническая информация служит для управления транспортной и распределительной сетью. В противовес предшественникам эта информация в большинстве своем должна быть быстро известна агентам, которым вменено в обязанность управление и ведение сети.

Таким образом транспортная сеть Газ де Франс обслуживается национальным центром распределения и восемью региональными центрами сопровождения. Важные точки, за которыми необходимо следить непрерывно, связаны с региональными центрами специализированными линиями связи. Девять центров взаимодействуют между собой с помощью системы Транспак.

Региональные системы телеконтроля, работающие на телефонной сети с коммутацией, укомплектованы такими сетями.

6.10. РУКОВОДЯЩИЕ ДОКУМЕНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ К СООРУЖЕНИЯМ ТРАНСПОРТА ГАЗА

Регламентирование транспорта газа, как и все технические аспекты, очень изменчиво, и публикация нового текста может в значительной степени изменить действующие в настоящее время правила.

Тем не менее, кажется необходимым в рамках справочника дать краткое описание различных применяемых правил (регламентирующих документов), если они действуют во время редактирования работы.

Хотя изменения бывают по большей части прогрессивными и основа остается обычно постоянной, читатель должен убедиться, что никаких новых публикаций по этой части не было.

Деятельность в области транспорта газа во Франции должна подчиняться многим положениям на уровне концепций, строительства и эксплуатации сооружений.

Эти положения могут:

— иметь общую часть, касающуюся каждого гражданина. Это случай, например, кодекса строительства, кодекса урбанизации, лесной кодекс, рабочий кодекс, дорожный кодекс и т.д.;
— касаться в общем виде индустриальной деятельности, но отражаться прямо на концепции, выполнении и эксплуатации сооружений транспорта газа. Перечислим:
  · закон № 76-663 от 19 июля 1976 г. и декрет применения № 77-1133 от 21 декабря 1977 г., относящиеся к установкам, включенным в списки для защиты окружающей среды. Перечень определяется по различным признакам в зависимости от серьезности опасности и недостатков установки, требующей либо разрешения, либо декларации. Эта регламентация применяется к резервуарам сжиженных горючих газов (терминалы природного сжиженного газа, станции сжиженных нефтяных газов); хранилищам горючих жидкостей (Т.Н.Т., метанол, бензин, топливо и т.д.), компрессорным станциям, установкам очистки от серы, установки сжигания и т.п.
  · В рамках этой регламентации, применяемой во Франции, находятся – постановление 82/501/C.E.E. Совета европейского сообщества от 24 июня 1982 г., относящееся к наибольшей пожароопасности, определенной индустриальной деятельности;
  · закон № 76-629 от 10 июля 1976 г. и декрет о его применении № 77-1141 от 12 октября 1977 г., относящийся к защите природы. Эти документы требуют от работ и проектов обустройства выполнения требований по охране окружающей среды. С этой целью проект проведения соответствующих работ должен содержать соображения об их влиянии на окружающую среду.

    Проект влияния включает:

    — анализ начального состояния ландшафта и окружающей среды;
    — анализ последствий влияния на окружающую среду;
    — причины, по которым среди других решений принят рассматриваемый проект;
    — меры, предусмотренные для предотвращения, уменьшения или компенсации последствий влияния на окружающую среду.

    Сооружения и работы, к которым относятся указанные требования:

    — газопроводы суммарной стоимостью более 6 миллионов франков (Н.Т.);
    — установки, входящие в список и требующие разрешения;
    — сооружения подземных хранилищ;
  · правила для аппаратов под давлением газа, (A.P.G.) определены декретом от 18 января 1943 г., (модифицированные) определяют классификацию аппаратов и общие предписания. Каждый тип аппарата затем становится объектом специальных правил в форме указов министерств:
    — объемные компрессоры (указ от 15 января 1962 г.);
    — необъемные компрессоры (указ от 26 июля 1962 г.);
    — заводские трубопроводы (указ от 15 января 1962 г. модифицированный);
    — аппараты производства, хранения и использования сжатого газа, сжиженного и растворенного газа (указ от 23 июля 1943 г. модифицированный).

    Указ от 24 марта 1978 г. регулирует применение сварки при сооружении и ремонте двух последних категорий установок;
  · закон № 83-630 от 12 июля 1983 г. и декрет № 85-453 от 23 апреля 1985 г., относящиеся к демократизации общественного опроса и защите окружающей среды.

    Эти документы служат для улучшения организации опроса и расширения области применения.

    Они относятся:

    — к перечню установок, требующих разрешения;
    — к подземным хранилищам;
    — к трубопроводам транспорта, произведение наружного диаметра на длину которых больше 5 000 м^2.
  · закон № 87-565 от 22 июля 1987 г. относится к организации гражданской обороны, защите лесов от пожаров и снижению величины риска, как и первый декрет применения № 88-622 от 6 мая 1988 г., касающийся срочных планов, особенно в отношении подземных хранилищ;
— относящиеся исключительно к газопроводу.

  Это случаи:

  · подземных хранилищ в соответствии с инструкцией от 25 ноября 1948 г. и декретом от 6 ноября 1962 г., модифицированного декретом от 7 марта 1988 г.;
  · транспортная сеть с декретом от 15 октября 1985 г. и правилами безопасности от 11 мая 1970 г.

Основные регламентирующие документы, применяемые к основным установкам, за исключением терминальных метановых установок, и которые рассматриваются и изучаются ниже.

6.10.1. Транспортная сеть

6.10.1.1. Декрет № 85-1108 от 15 октября 1985 г.

Он определяет административный и юридический режим транспорта горючего газа по трубопроводам.

6.10.1.1.1. Область применения

Она является частью режима транспорта, осуществляемого с помощью трубопровода и имеющего целью питание:

— публичного распределения, начиная с сооружений, предназначенных по идее для распределения газа и пересекающих территории областей, не предусматривающие такое распределение;

— других сооружений транспорта;
— индустриальных и коммерческих предприятий;
— подземных хранилищ.

Отсюда исключаются:

— трубопроводы заводов;
— трубопроводы сбора газа в пределах подземного хранилища и месторождений;
— трубопроводы, соединяющие на месторождениях установки подготовки газа.

Все сооружения транспорта таким образом подчиняются этому режиму, за исключением трубопроводов влажного газа на подземном хранилище, и особенно компрессорные станции и поверхностные установки сухого газа на подземном хранилище, включенные в область применения декрета от 15 октября 1985 г.

6.10.1.1.2. Концессия на транспорт

Декрет определяет состояния концессии как режима права коммун на строительство и эксплуатацию сооружений транспорта газа.

Основные характеристики концессии на транспорт:

— она представляет национальный характер;
— эта концессия публичного обслуживания, но также и публичных работ;
— она может быть сдана в аренду;
— она требует одобрения государством контрактов снабжения и поставок;
— она не требует обязательства поставок.

Характеристики концессии определяются в журнале нагрузок. За исключением режима общих прав, концессия имеет две модификации: разрешение и декларации.

Концессии и разрешения запрашиваются в министерство газа и передаются после административной инструкции и публичного опроса. Если речь идет о трубопроводе, анкеты будут различаться, в зависимости от величины произведения (длина x наружный диаметр) меньше или больше 5 000 м².

В первом случае анкета специфическая и определяется декретом от 15 октября 1985 г. Во-втором случае анкета организуется в соответствии с законом от 12 июля 1983 г. и декретом № 85-453 от 23 апреля 1985 г., относящихся к демократизации публичной анкеты и защите окружающей среды.

6.10.1.2. Декрет № 70-492 от 11 июня 1970 г.

Модернизированный декрет 85-1109 от 15 мая 1985 г. устанавливает условия, при которых проведение работ по транспорту может быть объявлено общественно полезным. Приобретение сертификата (Д.U.P.) общественной пользы предшествует процесс административного инструктирования и, если D. L. ≥ 5 000 м², публичного опроса.

После подписания (ДUP) транспортер может запросить легальную финансовую помощь (модифицированный декрет от 11 июня 1970 г.) для выполнения работ в тех частях, где он не может подписать удовлетворяющее его соглашение по снижению расходов.

Приобретение права на снижение легальных затрат предшествует новой процедуре анкетирования.

6.10.1.3. Изучение экологической нагрузки

Трубопроводы транспорта, стоимость которых выше или равна 6 миллионов франков, попадают под обязательное изучение экологической нагрузки (удара), исходя из закона от 10 июля 1976 г. о защите природы и декрета № 77-1141 от 12 октября 1977 г.

Проект нагрузки включается в досье запроса концессии, разрешения, Д.U.P. и попадает в публичную анкету, если эта процедура предусмотрена.

6.10.1.4. Указ от 11 мая 1970 г. модифицированный

Этот указ включает правила безопасности сооружений транспорта. Он регулирует технические работы, подпадающие под действие декрета от 15 октября 1985 г., начиная с давления равного или выше 4 бар и произведение (давление в бар x x диаметр номинальный наружный в миллиметрах) большее 1500.

Емкости объемом больше или равные 5 м³ исключаются из области применения и рассматриваются как аппараты под давлением газа.

Правила безопасности определяют:

— механические характеристики элементов, составляющих сооружения:
  - максимально предельное напряжение 0,73; 0,60; или 0,40 R_p 0,2 в порядке увеличения урбанизации, установленной тремя категориями A, B и C. Это напряжение определяет предельное безопасное давление;
  - удлинение после разрыва A ≥ 15% для категории A и ≥18% в категориях B и C;
  - R_p 0,2/R_m ≤ 90% для труб без сварки и 85% для сварных труб;
— контроль составляющих элементов на заводах, включающий:
  - заводские испытания. Давление испытаний на заводе определено;
  - контроль образцов на базовое качество стали (A, R_p, 0,2; R_m);
  - контроль образцов сварки;
— правила обустройства сооружений:
  - грубина засыпки: >0.6 м категории A > 0.8 м, категорий B и C;
  - расстояние между разделяющими задвижками:
    — для категории A и B это расстояние равно 20 км или меньше;

— для категории С это расстояние равно 10 км или меньше, но кроме этого объем газа между двумя разделяющими задвижками должен быть менее 90000 нм^3;

— установить аппаратуру, позволяющую ограничивать давление газа в точке соединения сооружений, рабочее давление в которых различается (роль, обычно выполняемая регуляторами).

В этих же точках соединения устанавливается один или несколько устройств безопасности, который начинает работать, если давление достигает максимального рабочего давления (P.M.S.), и который препятствует превышению давления более чем на 10% (роль обычно выполняется предохранительными и сбросными клапанами);

— условия испытания на месте сооружения (стройке):
  · гидроиспытания на прочность. Давление испытания определено;
  · гидравлические испытания на плотность (герметичность);

— максимальное рабочее давление (P.M.S.) сооружения в зависимости от давления испытания на прочность на стройке, также предельное давление безопасности и давление испытания на заводе каждого элемента сооружения.

Правила безопасности не предусматривают никаких дополнительных испытаний после сдачи объекта в эксплуатацию.

6.10.1.5. Постановление министерства от 28 января 1981 г. относительно содержания серы и состава сернистого природного газа, транспортируемого по трубопроводам

Оно фиксирует предельные характеристики природных горючих газов:

— мгновенное и кратковременное содержание сероводорода 15 мг/нм^3 без превышения 12 мг/нм^3 в течение более, чем девяти часов подряд;

— среднее содержание сероводорода в течение девяти дней: 7 мг/нм^3;

— мгновенное содержание общей серы < 150 мг/нм^3;

— точка росы < −5°C при максимальном рабочем давлении.

6.10.1.6. Работы посторонних организаций

К применению декрета от 15 октября 1985 г. постановления префектуры устанавливают условия, в соответствии с которыми транспортер должен быть предупрежден предварительно о работах, проводимых рядом с сооружениями транспорта.

Во исполнение этого постановления исполнитель работ должен перед началом работ послать транспортеру декларацию (предупреждение) о начале работ (D.I.C.T.).

6.10.2. Компрессорные станции

Независимо от того, установлена ли компрессорная станция на сети или является частью установки на поверхности подземного хранилища, эти станции подчиняются одним и тем же правилам.

6.10.2.1. Административный и юридический режим

Он подчиняется общему режиму транспорта горючих газов по трубопроводам, установленном декретом № 85-1108 от 15 октября 1985 г. В соответствии с этим он является объектом либо концессии, либо разрешения на транспорт. Если мощность компрессорных станций выше 300 кВт, они должны иметь разрешение на эксплуатацию с точки зрения правил для установок, включенных в списки объектов, которые должны предусматривать защиту окружающей среды в соответствии с декретом от 23 апреля 1985 г. относительно демократизации публичного опроса, после административного инструктажа и анкетирования.

Досье требует получения разрешения, включающего изучение опасности и давления на окружающую среду в соответствии с законом от 19 июля 1976 г. и его декрета применения от 21 сентября 1977 г.

6.10.2.2. Техническая регламентация

— Указ о разрешении на титр стандартной установки фиксирует:
  · условия установки;
  · условия эксплуатации;
  · средства анализа и измерений;
  · средства вмешательства при несчастных случаях.

  Это постановление очень часто соответствует постановлению, подготовленному министерством;

— постановление от 20 августа 1985 г. министерства окружающей среды относительно шума, издаваемого зарегистрированными установками;

— правила безопасности от 11 мая 1970 г. для всех частей компрессорной станции, за исключением самого компрессора и замкнутого пространства, внутренним объемом 5 м^3 или меньше;

— указ от 15 января 1962 г., регламентирующий объемные компрессоры, который предусматривает прежде всего испытания у изготовителя;

— указ от 23 июля 1943 г., модифицированный для емкостей объемом ≥5 м^3.

Принципы применения этого последнего указа уточнены в разд. 6.10.3.2.

6.10.3. Подземные резервуары

По этому вопросу можно посмотреть разд. 3.6.

6.10.3.1. Собственно хранилище

Собственно хранилище, т.е. недра, регламентируются с административной точки зрения следующими документами:

— постановление № 58-1132 от 25 ноября 1958 г.;
— декрет № 62-1296 от 6 ноября 1962 г., модифицированный декрет № 88-220 от 7 марта 1988 г.

Решивший построить подземное хранилище должен запросить в министерстве промышленности разрешение на изыскания. Документы по запросу разрешения на изыскания должны содержать записку о влиянии на окружающую среду, а также записку, объясняющую опасность, которую представляет само изыскание.

Этот запрос после административной инструкции и сбора мнений интересующихся предпринимателей позволяет получить разрешение на изыскания, принятые решением министерства. Это разрешение с максимальным сроком на десять лет и обновляемое позволяет осуществить сверх геологических изысканий:

— геохимические и геофизические исследования, бурение и гидрогеологические испытания;
— исследование закачки или отбора горючего газа или другого флюида (например инертный газ), позволяющие определить герматичность изучаемых пород и их способность быть хранилищем в том случае, если они не требуют соединения с траснпортной сетью).

Разрешение на хранилище согласуется с запросом в министерство промышленности после административного предписания и публичного анкетирования. Все соединения подземных формирований с газовой транспортной сетью согласуются с предоставлением разрешения на хранилище. Запрос разрешения включает, естественно, исследование о влиянии на окружающую среду и опасность, которую может представлять хранилище. Разрешение на хранилище уточняет границы периметра хранилища и охраняемый периметр. Срок первого разрешения ограничен десятью годами.

Периметр хранилища включает все зоны, способные принять газ и скважины контроля по периметру. Охраняемый периметр включает все зоны, внутри которых должна осуществляться защита резервуара и установок на поверхности, а также водоносные пласты.

Испытания закачки и отбора, предпринимаемые авторами изысканий или обладателем разрешения на хранение, проводятся перед пуском резервуара в нормальную эксплуатацию и согласуются с программой предварительных испытаний опробования, проводимых министерством промышленности.

6.10.3.2. Компрессорные станции подземных хранилищ

Станции, т.е. установки на поверхности, регламентируются по следующим направлениям.

6.10.3.2.1. Сооружения для сухого газа

Это сооружения, расположенные на выходе из установки обезвоживания. Они подчиняются режиму транспорта горючих газов, определенного декретом от 15 октября 1985 г.

Они являются объектом концессии или разрешения на транспорт и должны соответствовать правилам безопасности от 11 мая 1970 г.

6.10.3.2.2. Компрессоры

Это установки, предусмотренные для защиты окружающей среды, установки очистки от серы, хранилища метанола и T.H.T. и установки регенераци T.E.G., используемые для осушки.

6.10.3.2.3. Установки для влажного газа

Расположены внутри ограждения, они подчиняются регламенту заводских трубопроводов (модифицированное постановление от 15 января 1962 г.) и регламенту, применяемому при сварке (модифицированное постановление от 24 мая 1978 г.).

Вспомогательная аппаратура подчиняется также модифицированному постановлению от 23 июля 1943 г.

Тем не менее, если они испытаны на заводе под давлением, в два раза превышающем максимальное рабочее давление (P.M.S.), они освобождаются от контроля и периодического переиспытания.

6.10.3.2.4. Колонны очистки от серы и влаги

Это аппараты под давлением газа: модифицированное постановление от 23 июля 1943 г. Это постановление предписывает различные требования:

— материалы: $R_m \cdot A \geq 10\,500$ (МПа × %), $A \geq 14\%$ и 12% для болтовых соединений;

максимальное напряжение ограничивается $\frac{R_m}{3}$

при обычной температуре и $\frac{5}{8} R_p\,0{,}2$ при максимальной температуре.

При определенных условиях эти величины могут быть равны $\frac{R_m}{2{,}7}$ и $0{,}7\,R_p\,0{,}2$. Максимальное напряжение позволяет определить расчетное давление;

— испытание у строителя (изготовителя) составляет 150% расчетного давления;
— в процессе эксплуатации аппараты подвергаются обследованию в трехлетний период и переиспытанию один раз в десять лет.

6.10.3.2.5. Установки влажного газа, расположенные вне сооружения

Аппараты подчиняются постановлению от 23 июля 1943 г. и 24 марта 1978 г. Трубопроводы не подчиняются никаким административным и техническим регламентам.

Практическое разнообразие конструкции и эксплуатации определено в каждом отдельном случае территориальной, индустриальной и исследовательской дирекцией, действующей в соответствии с аналогичными правилами безопасности для заводских трубопроводов.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

7.1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

7.1.1. Оценка объема распределения и его колебаний

7.1.1.1. Анализ рынка

Количество газа, которое может быть продано, является основой технических и финансовых проектов распределения.

Анализ потенциального рынка требует последовательного рассмотрения годового, суточного и часового потребления газа.

Потребителей газа можно схематически разделить на пять категорий:

— новое жилье;
— существующее жилье;
— существующие коммунально-бытовые потребители;
— промышленность.

Прогноз сбыта газа необходим для того, чтобы:

— количественно определить объем коммерческих операций, которые предстоит вести;
— служить отдельным специалистам для прогноза подсоединения к газопроводам и определения размера сети;
— рассчитать рентабельность расширения сети или переход на природный газ системы распределения, снабжаемого другим газом;
— помочь спрогнозировать потребление газа, что позволяет распределителю узнать свои потребности и уточнить свои закупки;
— помочь спрогнозировать финансовую прибыль.

Прогноз должен обязательно осуществляться в соответствии с рыночными соображениями, так как от этого зависит цена продажи киловатт-часа энергии.

Анализ рынка используется как метод прогноза, особенно для среднего срока (1 - 5 лет), и тем более интересен, чем крупнее объект анализа (район, страна и т.д.).

Для короткого срока используется метод саморегрессии, моделирующий случайные процессы, для среднего срока – аналитический метод прогноза потребления, учитывающий средние климатические условия. Для длительного промежутка времени прогноз учитывает многочисленные экономические предпосылки.

7.1.1.2. Показатели, используемые при анализе сбыта

7.1.1.2.1. Существующий рынок

Расчеты заставляют прибегать к знаниям статистики, иногда недостаточным, и к определениям, которые могут различаться в зависимости от учета или неучета определенных секторов рынка (районов).

7.1.1.2.2. Рынок сбыта

Речь идет о новом строительстве, приводящем к увеличению существующего рынка. Для прогноза рынка сбыта на средний срок необходимо учитывать внешние экономические предпосылки.

7.1.1.2.3. Зона обслуживания газом

Совокупность районов, где есть потребление газа (подача газа) (жилье или один промышленный объект).

7.1.1.2.4. Степень обеспечения населенного пункта

Речь идет о потребностях в газе, определяемых для всего рассматриваемого населенного пункта. Имеется в виду степень обеспечения газом нового строительства (число газифицированных квартир, деленное на общее число построенных квартир) или степень обеспечения существующего жилья.

7.1.1.2.5. Степень коммерческого успеха

Это отношение объема сбыта к возможному объему продажи. Показатель степени успеха используется для оценки газификации нового строительства.

7.1.1.2.6. Степень внедрения

Это отношение объема сбыта к возможному объему запасов. Показатель внедрения используется для оценки газификации существующего строительства.

7.1.1.2.7. Степень снабжения

Речь идет об объеме использования газа потребителями, деленном на общее необходимое количество газа. Числитель и знаменатель могут быть выражены либо числом квартир, либо в м², либо в киловатт-часах.

Степень коммерческого успеха и степень внедрения оцениваются для данного периода времени. Степень снабжения используется для общей оценки газа, т.е. доли газа в общей продаже энергии.

7.1.1.3. Потребление и подача

Потребление и подача, касающиеся урбанизированной зоны, должны быть изучены с точки зрения следующих аспектов:

— потребление и подача в течение года зависят в конце концов от финансового сбалансирования эксплуатации;
— дневная подача, которая должна соответствовать установке производства (добычи), транспорта и хранения газа. Она может влиять на финансовый баланс, так как представляет собой параметр в договоре на подачу газа;
— часовая подача (расход), которая служит для расчета распределительной сети и сооружений транспорта.

Эксплуатационная подача представляет собой сумму потребления, которая классифицируется с учетом времени использования (времени работы).

Потребление жилого фонда:

— приготовление пищи и горячее водоснабжение;
— отопление.

Коммерческие клиенты:

— коммерческое потребление;
— отопление помещений.

Индустриальные потребители:

— индустриальное потребление;
— отопление зданий;
— потери вследствие технических утечек сети и подсоединений, а также ошибки счетчиков.

7.1.1.4. Случай холодного периода газа

Расчет подачи в зимний период, особенно касающийся отопления, кроме статистических данных для определенных климатических условий, требует еще чисто эксплуатационных данных.

7.1.1.4.1. Средняя температура "трех часов" (T_j)

Средняя температура в течение одного дня в период эксплуатации. Она определяется во Франции как среднее из восьми измерений, осуществляемых через каждые три часа Национальной метеорологией в районе эксплуатации.

7.1.1.4.2. Температурный порог отопления (T_s)

Средняя трехчасовая температура, ниже которой клиент начинает включать отопление. Эта температура зависит от климатических условий и уклада жизни клиентов рассматриваемого района.

7.1.1.4.3. Разница в температурном пороге для одного дня ($T_s - T_j$)

Разница между температурой порога отопления и средней температурой трех часов эксплуатации для рассматриваемого дня. Эта разница имеет смысл, если средняя трехчасовая температура ниже температурного порога отопления. В противном случае она равна нулю или не имеет смысла.

7.1.1.4.4. Число градусо-дней

$$ND_j = \sum_{j-1}^{N} (T_s - T_j)$$

Сумма предыдущих разниц температур для всех дней рассматриваемого периода.

Для каждой метеостанции во Франции установлено среднее число градусо-дней в году, отнесенное к пятнадцати произвольным годам. Это соответствует среднему числу градусо-дней в году.

7.1.1.4.5. Градиент (G)

Градиент – это увеличение средней суточной потребности в газе за дополнительный градусо-день. Градиент выражается в киловатт-часах на градусо-день. Он незначительно колеблется в течение данной зимы и увеличивается по мере роста мощности отопления.

7.1.1.4.6. Дополнительное потребление в зимнее время (C. S. P. F)

Оно соответствует дополнительному потреблению, возникающему, если температура наружного воздуха снижается ниже температурного порога отопления. Оно в основном состоит из расхода на отопление зданий, но оно также связано со всеми потребителями, зависящими от снижения температуры: нагрев воды, отопления промышленных печей и т.д.

7.1.1.4.7. Потребление, не входящее в дополнительный расход в зимнее время (H. C. S. P. F)

Сюда относятся все другие потребители, которые рассматриваются как не зависящие от наружной температуры.

7.1.1.4.8. Понятие риска

Температура риска *n*% - это самая низкая температура, которая может быть один или несколько раз (*n* – количество зим из 100 лет подряд).

Для определения подачи используются два понятия дневного риска:

— средний риск: 50% (выход за пределы один раз из двух среди большого числа лет);

— риск "пиковый": 2% по "Газ де Франс" (выход за пределы два раза в столетие).

Двухпроцентный риск в особенности касается суточного и часового пиков. Не существует никаких методов учета волны холода.

Для определения мощности сооружений предполагается, что при риске в 2% все существующие средства используются полностью.

Каждое предприятие прикреплено к метеостанции. В "Газ де Франс" документы, изданные экономической и коммерческой дирекциями (M42 и M43), классифицируют основные результаты, касающиеся всех метеостанций.

7.1.1.5. Модель прогноза потребление–климат

Практика показала, что дневная температура T_j является величиной достаточной для определения в первом приближении объема потребления в зимний период.

В холодный период из N дней дополнительное потребление в зимний период равно:

$$C.S.P.F = G\sum_{j=1}^{N}(T_e - T_j).$$

Эта модель, полностью удовлетворительная для обычных температур, ведет к завышению прогнозных величин потребления для очень низких температур.

7.1.1.6. Время использования

Потребление и подача подвержены (колебаниям), которые можно уточнить с помощью следующего понятия, называемого временем использования.

Число дней использования за год:

$$J_c = \frac{\text{годовое потребление}}{\text{потребление наиболее загруженного дня}} = \frac{C_a}{C_j}.$$

Число часов использования за год:

$$H_c = \frac{\text{годовое потребление}}{\text{максимальное часовое потребление наиболее загруженного дня}} = \frac{C_a}{C_h}.$$

Число часов использования за сутки:

$$h_c = \frac{\text{максимальное суточное потребление}}{\text{максимальное часовое потребление данных суток}} = \frac{C_j}{C_h}.$$

Можно определить $H_c = h_c J_c$ для потребления.

Аналогично для подачи $H_e = h_e J_e$.

7.1.1.7. Практическое определение годового потребления

7.1.1.7.1. Расчет потребления на бытовые нужды (H. C. S. P. F) и градиента для бытовых потребителей

Общее потребление текущего года, определенное по зафиксированным потребностям, не может быть прямо использовано для расчета сети и подачи на календарный год.

Оно должно подвергаться двойной обработке, осуществляемой по каждому потребителю:

— так как период замера разнится от потребителя к потребителю, то первая обработка состоит в утверждении и коррекции потребления календарного года исходя из потребления текущего года;

— вторая обработка состоит в определении максимального часового расхода, который учитывается при расчете сети.

Эти обработки включают как модель прогноза (см. разд. 7.1.1.5, так и знание времени использования (см. разд. 7.1.1.6).

Потребление, независимое от климата (H. C. S. P. F), измеренное в K дней, может быть пересчитано в годовое потребление с помощью правила "трех".

Часть годового потребления, которая включает прежде всего отопление (C. S. P. E), является разницей между общим годовым потреблением и средним потреблением на бытовые нужды (H. C. S. P. F).

Средний годовой градиент потребителя определяют путем деления объема потребления (C. S. P. F) на число градусо-дней за соответствующий период потребления.

При отсутствии другой информации могут быть использованы следующие величины годового потребления (см. таблицу на с. 598).

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Потребители			Годовое потребление на квартиру, кВт · ч
Кухня			800
Горячая вода	Индивидуальные	Квартира	3 000
		Дом	4 000
	Коллективные		4 500
Отопление жилья постоянно занятого и построенного до применения декрета 10 апреля 1974 г.	Обогрев индивидуальный	Квартира	7,0*
		Дом	11,5*
	Отопление коллективное		9,0*
Отопление жилья, постоянно занятого и отвечающего новым нормам изоляции (декрет от 10 апреля 1974 г.)	Отопление индивидуальное	Квартира	5,4*
		Дом	9,5*
	Отопление центральное		6,4*
Отопление жилья, постоянно занятого и отвечающего новым нормам изоляции (декрет от 24 марта 1982 г.)	Отопление индивидуальное	Квартира:	
		Отопление	3,8*
		Горячая вода	2 960
		Дом:	
		Отопление	8,6*
		Горячая вода	3 800
	Отопление центральное		4,5*
Отопление жилья, постоянно занятого и соответствующего HPE (декрет от 5 июля 1983 г.)	Квартиры:		
	1-я категория	Отопление	3,8*
		Горячая вода	2 760
	2-я категория	Отопление	3,2*
		Горячая вода	2 730
	3-я категория	Отопление	2,8*
		Горячая вода	2 530
	4-я категория	Отопление	2,2*
		Горячая вода	2 530
	Дом:		
	1-я категория	Отопление	8,2*
		Горячая вода	4 060
	2-я категория	Отопление	7,2*
		Горячая вода	3 630
	3-я категория	Отопление	5,8*
		Горячая вода	3 670
	4-я категория	Отопление	4,8*
		Горячая вода	3 670
Отопление жилья, постоянно занятого и соответствующего новым правилам изоляции (указ от 5 апреля 1988 г.)	Квартиры:		
		Отопление	3,2*
		Горячая вода	2 730
	Дом:		
		Отопление	7,2*
		Горячая вода	3 630
Отопление жилья, постоянно занятого и соответствующего указу от 30 декабря 1988 г., устанавливающих новую марку	Квартиры:		
	3-я категория	Отопление	2,8*
		Горячая вода	2 530
	4-я категория	Отопление	2,2*
		Горячая вода	2 530
	Дом:		
	3-я категория	Отопление	5,8*
		Горячая вода	3 670
	4-я категория	Отопление	4,8*
		Горячая вода	3 670

* – число градусо-дней среднего климата в документе № 43. «Etude statistique des temperatures journalieres» (GDF).

Средний годовой объем потребления.

7.1.1.7.2. Потребление вне бытовых объектов

Для этих потребителей расход определяется путем ручного замера в течение месяца. Так как число таких потребителей невелико, их можно знать каждого индивидуально. Поэтому можно определить их потребление, не путать эту часть в общем максимальном потреблении сети с чистым максимумом.

7.1.1.8. Расчет максимального суточного потребления

Максимальное суточное потребление определяется типом потребителей:

— для потребителей вне дополнительного расхода в зимний период (C. S. P. F) на основе годового потребления при известном числе суток использования (работы).

При отсутствии точных специальных данных об эксплуатации рассматриваемых установок можно принять следующее число суток использования в год:

- 260 – для бытовых потребителей;
- 280 – для коммерческих потребителей;
- 300 – для промышленных потребителей;

— для системы отопления (C. S. P. F) с риском "климатическим n", который должен быть покрыт числом суток использования за год, определяется:

$$J_c = \frac{\text{среднее число градусо-дней в году}}{T_e - T_n}.$$

7.1.1.9. Расчет максимального часового потребления бытовым объектом

7.1.1.9.1. Использование газа (H. C. S. P. F)

Бытовое потребление с горячим водоснабжением определяется, исходя из максимального суточного потребления на бытовые нужды с горячим водоснабжением (C. S. P. F). В соответствии с практикой суточное использование h_c составляет 7 - 12 ч. При отсутствии точных данных можно принять 10 ч/сут.

Для крупных индустриальных потребителей необходимо иметь данные о режиме работы промышленности, так как некоторые промышленные потребители имеют очень изменчивое время работы.

7.1.1.9.2. Использование газа (C. S. P. F)

Можно принять время суточного использования равным 22 ч при риске 2% и 19 ч при риске 50%.

7.1.1.9.3. Суммарный максимальный часовой расход с данным риском

Максимальная часовая подача определяется как сумма часового расхода на бытовые нужды и на отопление (H. C. S. P. F) и (C. S. P. F).

7.1.1.10. Подсоединение потребителей в узлах сети

Крупные потребители должны подсоединяться в создаваемых сетях, если это необходимо, в специальных узлах.

Снабжение мелких потребителей "представляет сумму потребления сектора и совокупности потребителей и распределяется по узлам сети, к которой подсоединяется". (Manuel pour le transport et le distribution du gaz. § 1.4.4.3, издание I.A.T.G).

7.1.2. Концепция и расчет распределительных сетей

7.1.2.1. Структура распределительных сетей

7.1.2.1.1. Тип сетей

Распределительные сети, предназначенные для снабжения многочисленных потребителей. Они включают трубопроводы, регуляторные пункты, подсоединения. Во Франции они разделяются в соответствии с рабочим давлением на пять категорий.

Класс	Уровень давления
BP	(1)
BPA	BP < BPA ≤ 50 мбар
MPA	50 мбар < MPA ≤ 0,4 бар
MPB	0,4 бар < MPB ≤ 4 бар
MPC	4 бар < MPC ≤ 19,2 бар

Типы сетей, встречающихся во Франции.

(1)	Газ искусственный	= 8 мбар
	Природный газ H	= 18 мбар
	Природный газ B	= 25 мбар
	Смесь пропан-воздух 7,6 кВт · ч/м^3	= 8 мбар
	Смесь пропан-воздух 15,7 кВт · ч/м^3	= 18 мбар
	Пропан	= 37 мбар

Наиболее часто встречаются сети типа BP, MBP, MPC.

7.1.2.1.2. Структура сетей

7.1.2.1.2.1. Первичная сеть

Трубопроводы снабжаются от MPC транспортной сети и служат для подачи газа в период больших холодов, когда все источники в работе (риск 2%), и для периода умеренных холодов, когда его элементы вначале выключены (риск 50%).

Через каждые 3 км предусматривается секционирование с устройствами для продувки трубопровода (в течение четверти часа).

7.1.2.1.2.2. Вторичная сеть

Трубопроводы снабжаются от MPB и BP от одного или нескольких регуляторных пунктов и осуществляют транзит газа и обслуживание потребителей. Они закольцованы при проектировании.

7.1.2.1.2.3. Третичная сеть

Эти трубопроводы снабжаются от MPB или BP и обслуживают только конечных потребителей. Секционирование позволяет изолировать от 250 до 500 потребителей в соответствии с их типом. Это разветвленные сети.

7.1.2.1.3. Критерии сетей

На стадии проектирования сетей давление предусматривается меньше или равное 6 бар для MPC и 1 бар для MPB.

Критерии, которые исследуются:

— безопасность персонала и имущества;
— постоянство и качество обслуживания;
— легкость эксплуатации и обслуживания;
— адаптация и гибкость во времени;
— экономический оптимум капитальных и эксплуатационных затрат, затрат на обслуживание.

Предусматривается разделение сети на сектора эксплуатации для агломераций в 100 000 и более потребителей. Сектор состоит из сооружений одинакового давления, снабжаемого от двух источников, и обслуживает 25 000 клиентов и более.

Сети типа MPB наиболее распространены по следующим причинам:

— качество обслуживания: аппараты снабжаются под постоянным давлением;
— безопасность: предусмотрены регуляторы, позволяющие автоматически прерывать газоснабжение при повышении или понижении давления на выходе;
— техника: при равенстве диаметров мощность больше, чем у сети типа BP;
— экономика: ее сооружение позволяет экономить от 25 до 40% расходов по сравнению с сетью BP.

7.1.2.2. Расчет сетей

Физический расчет (или анализ) имеет целью после определения необходимого расхода установить давление для данной структуры (существующей или создаваемой). Экономический расчет состоит в определении диаметров трубопроводов, соответствующих наиболее экономичному решению для создания новой сети или развития существующей.

7.1.2.2.1. Топология сети

Прежде чем определить расход и давление, надо рассмотреть сеть как совокупность точек или узлов, соединенных между собой отрезками.

Топологический анализ – это анализ связей между узлами с помощью отрезков.

Он позволяет:

— проверить связи сети (контроль данных);
— опознать тип сети (закольцованная, разветвленная);
— разделить сеть (расчленение на узлы).

Определение топологических элементов позволяет установить связь между теорией графов и газовой интерпретацией.

7.1.2.2.1.1. Участок

Это часть трубопровода постоянного диаметра, откуда газ может выйти только с концов.

7.1.2.2.1.2. Узел

Это оконечность участка, например, точка:

— соединения нескольких участков;
— изменения сечения или уклона;
— подачи газа (узел питания);
— в которой потребление может влиять в значительной степени на уточнение конечного результата.

7.1.2.2.1.3. Степень

Это число участков, примыкающих к одному узлу. Оно позволяет проверить степень истощения коллектора раздачи газа.

7.1.2.2.1.4. Потребление, расход (подача)

Потребление – это количество газа, поданного потребителю за определенное время с выбранным температурным риском и приведенное к стандартным условиям расчета.

Расход – количество газа, которое движется по участку трубопровода в единицу времени.

Подача – количество газа, выданное постом редуцирования для удовлетворения потребителя.

Эти параметры выражаются в $м^3/ч$.

7.1.2.2.1.5. Узел p_i

Расчет давления предполагает, что оно известно по крайней мере в одном узле сети. Этот узел с предполагаемым давлением обозначается как узел p_i. В общем случае речь идет об узле-источнике. Однако это может быть и узел-потребитель, где должно поддерживаться определенное минимальное давление.

7.1.2.2.1.6. Сеть

Сеть – это совокупность соединенных участков, имеющих как минимум один узел p_i. Соединение означает, что можно достичь всех узлов сети, исходя из одного узла и следуя по выбранным соответствующим образом участкам из конца в конец.

7.1.2.2.1.7. Разветвленная сеть

Сеть называется разветвленной, если она содержит только один узел p_i. Все узлы соединены с узлом p_i с помощью одного или серии последовательных участков.

7.1.2.2.1.8. Закольцованная сеть

Сеть называется закольцованной, если она не разветвленная. Она может быть определена как сеть с одним узлом p_i, и имеющей также узлы, которые можно соединять как минимум двумя цепями участков.

Две цепи между двумя узлами образуют контур, называемый кольцом.

Единичность источника должна пониматься как возможность соединить все источники в один, фиктивный источник, который может рассматриваться как перевод сети на более высокий уровень давления.

Фиктивный узел – источник видится как поднятие давления на более высокий уровень, чем существующее давление, для обеспечения движения газа в фиктивных участках к реальным узлам-источникам.

7.1.2.2.1.9. Подсети

В соответствии с поставленной целью интересно рассмотреть два типа подсети.

7.1.2.2.1.9.1. Сочлененная сеть. Узлы сочленения

Разделение на составные подсети подразумевается в самой структуре сети. Оно может быть использовано для уменьшения времени расчета. При этом можно легко определить расходы газа, проходящего по участкам сети, и нет необходимости подсчитывать на первом этапе давления в узлах, снабжаемых этими участками. На практике наличие естественных препятствий таких, как реки, железные дороги или расширение сети в сторону нового строительства, способствуют появлению узлов сочленения.

7.1.2.2.1.9.2. Подсеть многосвязная. Узлы связи

Разделение на многосвязные подсети осуществляется для облегчения управления и определения результатов; оно осуществляется независимо от составных подсетей путем свободной географической группировки.

Разделение опирается на предположение, что можно определить на глаз или с помощью ЭВМ ограниченное число участков для разрезания, чтобы получить независимую сеть.

Сечение участка по границе между двумя подсетями создает два узла связи по одному на каждую подсеть.

Граница может быть естественной преградой, границей населенного пункта; в этом случае она рискует пересечь много участков. Каждая созданная подсеть соединяется с соседями в основном с помощью более чем одного узла связи. Из-за этого обстоятельства она называется многосвязной подсетью.

7.1.2.2.2. Потери давления на участке

7.1.2.2.2.1. Гипотеза распределения

Какой бы расчет распределительной сети не осуществлялся, для него необходимо знать:

— максимально допустимые потери давления (потери давления),
— необходимые расходы и их географическое расположение;
— внутренние диаметры трубопроводов.

Стандартные условия для расчета:

$$p_0 = 1\,013 \text{ мбар и } T_0 = 283 \text{ K}.$$

Редуцирование газа в распределительной сети достаточно слабое, поэтому можно рассматривать температуру газа постоянной. Коэффициент сжимаемости также может быть принят постоянным.

Распределительная сеть имеет небольшой объем, что не позволяет рассматривать ее в качестве резервного объема; истечение может рассматриваться не зависящим от времени, т.е. постоянным. Скорость газа в трубопроводах остается достаточно малой, поэтому кинетическая энергия газа и его инерция считаются незначительными.

Если давление источника превышает 15 бар, эти допущения не могут быть приняты.

7.1.2.2.2.2. Формула Ренуарда (Renouard)

Трение газа о стенки трубопроводов является причиной потери энергии пропорционально коэффициенту гидравлического сопротивления λ, который сам зависит от шероховатости трубопровода и режима истечения.

Режим истечения характеризуется безразмерным числом Рейнольдса Re

$$\mathrm{Re} = \frac{vD}{\nu},$$

где

v – скорость газа,

ν – динамическая вязкость газа,

D – внутренний диаметр газопровода.

Отношение $\lambda(\mathrm{Re}, e)$, в котором e – высота выступов в мм (шероховатость), определяется с достаточной точностью для всех трубопроводов с $\mathrm{Re} < 5 \times 10^6$ по формуле Ренуарда:

$$\lambda = 0{,}172\mathrm{Re}^{-1{,}82}.$$

7.1.2.2.2.3. Потери давления

Выражение для изменения давления (т.е. потери давления) между двумя концами цилиндрического трубопровода при сделанных выше допущениях следующие:

$$p_1^2 - p_2^2 = 43,908 d_0^{1{,}82} \mathrm{L} \frac{\mathrm{Q}_0^{1{,}82}}{\mathrm{D}^{4{,}82}} + 0,2447 \times 10^{-3} \times$$

$$\times p_м (z_2 - z_1)\left(d_0 \frac{p_м}{1,013} - 1\right),$$

где

p_1, p_2, $p_м$ – абсолютное давление (в барах) на концах 1, 2-го трубопровода и среднее;

d_0 – плотность газа по отношению к воздуху при 10°C,

$d_0' = d_0\left(\frac{\nu}{\nu_a}\right)^{0,18}$ – плотность "фиктивная", отражающая влияние изменения динамической вязкости газа;

L – длина трубопровода в м;

D – внутренний диаметр трубопровода в мм;

Q_0 – расход газа в м³/ч при стандартных условиях;

z – геодезическая высота рассматриваемых точек в м.

Второй член выражения отражает влияние альтитуды. Он мал по сравнению с первым членом (динамическое истечение) в выражении для квадратичной разности давлений. Для низкого давления его величины мало изменяются около среднего давления p_a = (1,013 + 0,019) бар, и формула становится, если выражать давление в мбар:

$$p_1^2 - p_2^2 = 21\,273\, d_0' L \frac{Q_0^{1,82}}{D^{4,82}} + 0,1186(d_0 - 1)(z_2 - z_1).$$

7.1.2.2.3. Расчет сети

7.1.2.2.3.1. Потери давления в сетях

7.1.2.2.3.1.1. Разветвленная сеть

Потери давления определяются методом последовательного приближения для каждого участка, начиная с первого, таким образом, чтобы проверить достаточность давления в конце сети в настоящее время и в будущем.

7.1.2.2.3.1.2. Сетчатая сеть

Без применения ЭВМ расчет сетчатых сетей длинен и труден.

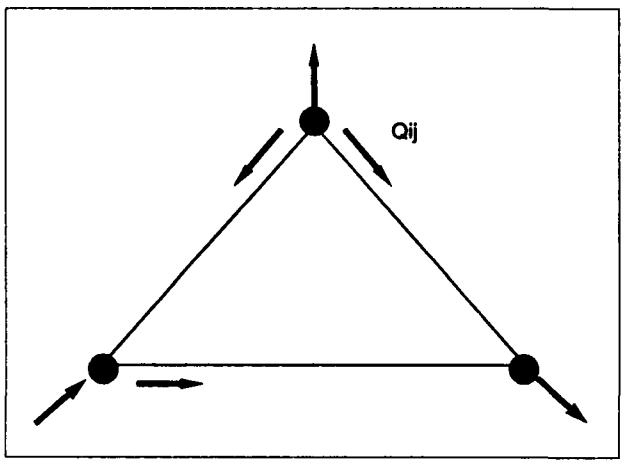
7.1.2.2.3.2. Формулировка задачи

При движении в одной сетке имеем:

$$\sum_m \overline{H} = 0,$$

H – потери давления на каждом участке со знаком Q.

Во всех узлах: $\sum_j \overline{Q} = 0$,



Разветвленная сеть.

Q – расход, входящий со знаком (+) и выходящий со знаком (–).

На каждом участке имеем:

$$H = kL\frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}}.$$

7.1.2.2.3.3. Решение задачи

Эффективным является метод Харди-Кросса или чаще метод Ньютона. Он состоит в решениях методом итераций нелинейных систем уравнений, полученных с помощью уравнений сохранения газа в узле и при условии равенства нулю потерь давления в сетке.

7.1.2.2.4. Схематизация сети

Техника схематизации позволяет сразу изучать в общем случае структуру сети и моделировать ее реакцию на внешние изменения. Различают схематизацию разветвлениями и сетками.

7.1.2.2.4.1. Схематизация разветвления

Формулы расчета кольцевых сетей показывают, что если все потребление сети увеличивается на коэффициент k, все расходы увеличиваются в k раз и, следовательно, потери увеличиваются в $k^{1,82}$ раз. Следовательно, сеть реагирует как разветвленный участок, транзитный расход которого увеличивается в k раз.

По аналогии можно думать, что если потребление изменяется в постоянном соотношении внутри зоны, ограниченной двумя последовательными изобарными зонами, каждая промежуточная зона схематизируется в один эквивалентный участок, характеризуемый $J_j d_j$.

Применение этой схематизации состоит в следующем:

— исследование структуры сети путем сравнения межизобарных зон; сравнение диаметров d_j и соотношений

$$\frac{J_1}{\sum_j J_1} \text{ или } \frac{Q_1}{\sum_j Q_j};$$

— исследование дополнительного расхода зоны;

— определенно адаптированное потребление во всех узлах сети.

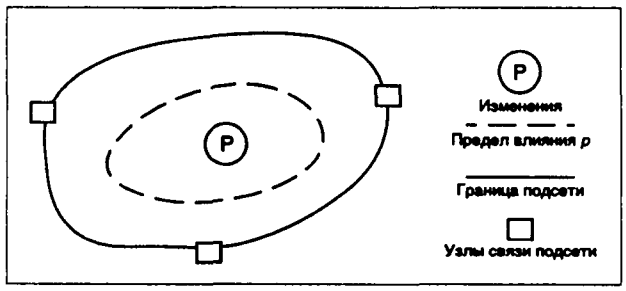
7.1.2.2.4.2. Схематизация сеткой

Эта техника особенно адаптирована к проектированию больших сетей, которые классически разделены на многосвязные подсети.

Когда изменение воздействует на подсеть, нет необходимости рассматривать совокупность всех остальных подсетей. Однако в этом случае нельзя пренебрегать влиянием соседней подсети. Могут рассматриваться три варианта.

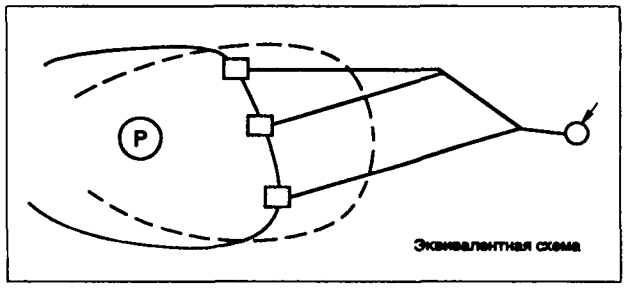
— Изменения относительно слабые и условия на границе подсети не изменяются.

В этом случае достаточно задаться величиной давления в узлах связи и проверить на основе опыта, что расход (вход и выход) не меняется.



Соседняя подсеть не влияет.

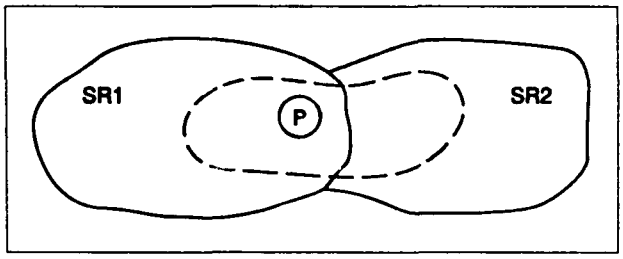
— Изменения происходят также в соседней подсети, но зона его влияния мало распространяется в подсети, подлежащей схематизированию.



Соседняя подсеть мало влияет.

Это случай области сеточной схематизации, который позволяет учитывать обмен между связующими узлами подсетей, являющихся объектом возмущения.

— Величина и место возмущений таковы, что они влияют глобально на соседнюю подсеть.



Соседняя подсеть сильно влияет.

Достаточно исчерпывающе изучить совокупность из двух подсетей 1 и 2. Это приведет к одному из двух предыдущих случаев.

7.1.2.2.5. Упрощение сетей

Не надо путать упрощение и схематизацию. Упрощение может быть полезно в случае большой сети. Можно, действительно, уменьшить расчеты в упрощенной сети, эквивалентной существующей.

7.1.2.2.5.1. Параллельные трубопроводы

Кроме того, что можно убрать некоторые участки, есть возможность для одной улицы представить n параллельных участков как один трубопровод, эквивалентный диаметр которого определяется по формуле:

$$D_{eq} = \left(\sum_{j=0}^{j=n} D_j^{2,65} \right)^{0,377} .$$

7.1.2.2.5.2. Последовательные трубопроводы

Можно заменить несколько трубопроводов с разными диаметрами, соединенных последовательно, одним трубопроводом.

Возможны два решения:

— сохраняют диаметр постоянным и рассчитывают эквивалентную длину L_{eq} двух участков с характеристиками D_1L_1 и D_2L_2:

$$L_{eq}(D_1) = L_1 + L_2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{4,82} ;$$

— складывают длины существующих трубопроводов и определяют эквивалентный диаметр D_{eq}:

$$D_{eq}(L_1 + L_2) = \left(\frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{D_1^{4,82}} + \frac{L_2}{D_2^{4,82}}} \right)^{0,21} .$$

Это решение имеет преимущество, так как остается постоянной длина.

7.1.3. Картография

7.1.3.1. Цель картографии

Картография отражает современную картину и историю эксплуатации. Она должна:

— служить источником данных, необходимых для принятия решений, относительно сооружений;
— отвечать либо правилам, либо требованиям эксплуатационников;
— позволять в соответствии со своей концепцией, построить сооружение и дать как можно быстрее консультацию.

Масштаб плана выбирается в зависимости от требуемой точности на местности, в особенности для детального плана.

7.1.3.2. Анализ потребностей

7.1.3.2.1. Регламентированные потребности

Картография должна отвечать договорным и регламентированным потребностям.

7.1.3.2.1.1. Журнал нагрузок

Концессионер должен всегда иметь экземпляр плана сети и передать один экземпляр соответствующему органу власти.

Никакого обязательного масштаба не требуется.

7.1.3.2.1.2. Правила безопасности от 11 мая 1970 г.

Для сети МРС, отвечающей правилам безопасности сооружений транспорта горючих газов, эксплуатационник выполняет и хранит соответствующий сегодняшнему дню план сооружений трассы и передает его представителям власти, отвечающим за безопасность.

Никакого особого масштаба в общем случае не требуется.

7.1.3.2.1.3. Постановление префектуры о выполнении работ вблизи газовых сооружений

Это постановление предписывает всем, кто собирается или должен осуществлять работы, способные привести к прямому или косвенному повреждению сооружений газораспределения, получать информацию распределителя газа о возможно существующих газопроводах.

7.1.3.2.2. Внутренние потребности распределительных фирм

7.1.3.2.2.1. Эксплуатация

Речь идет об обслуживании ответственных лиц картографическим материалом, позволяющим:

— при необходимости визуально рассмотреть распределительные сети;
— располагать детальной информацией для осуществления конкретной врезки или информировать всех ведущих работы о подземной ситуации и характеристике сооружений.

7.1.3.2.2.2. Общее исследование

Картография должна отвечать на все запросы проектов на средний и длительный срок, относящиеся к развитию сооружений (статистика, расчет сети и т.д.).

Эти общие соображения требуют довольно большого масштаба.

7.1.3.3. Составные части картографии

7.1.3.3.1. Выбор масштаба

В соответствии с деталями информации, которая должна регистрироваться, применяются наиболее часто два типа планов.

— Детальный план: 1/200; 1/500.
— Общий план: 1/2 000; 1/5 000, дополняемый, при необходимости, особенно для крупных сетей, общими (генеральными) планами (1/10 000; 1/25 000, 1/50 000).

7.1.3.3.2. Форматы

Нормализованные форматы это:

A1(594 × 840 для крупных путей и площадей),

A4 × 4(297 × 840 для путей обычных).

7.1.3.3.3. Символы

Используемые символы предусмотрены в спецификации A. T. G. S 300.

7.1.3.3.4. Элементы детального плана в масштабе 1/200 или 1/500

Цель плана состоит в определении положения сооружений по отношению к фиксированным точкам, прочным и легко определяемым на поверхности:

— линейные боковые ориентиры (фасад зданий, стены, изгороди и т.д.);
— номера и границы (на начало) зданий;
— пороги дверей, за исключением порогов складов;
— бордюры тротуаров;
— деревья;
— колодцы, люки, стандартные таблички;
— таблички входные;
— большие прочные сооружения, которые могут служить репером для трубопровода (опоры моста, вход в подземный переход).

Газовые сооружения представляются в соответствии с действующими нормами. Графические материалы трубопроводов дополняются надписями, указывающими класс давления, номер калибра, материал, год строительства. Для определенных трубопроводов и в зависимости от случая могут быть отмечены тип изоляции, используемая технология переделки (внутренняя и внешняя), трубы, при необходимости внутренний и внешний диаметры.

Аппаратуру сети, в принципе, представляют:

— сифоны, краны, изолирующие фланцы, аноды, контрольные пункты, манометры, футляры, посты дренажа, регуляторные посты и посты клиентов.

Наконец, чтобы лучше понять будущие проблемы эксплуатации, полезно отмечать ответвления, уточняя калибр и материал, особенно для:

— низкого давления – калибр >50 мм;
— среднего давления – калибр >25 мм, а также при пересечении путей.

В общем, для того, чтобы план был более читаемым, число надписей должно быть минимальным.

7.1.3.3.5. Элементы плана сооружения в масштабе 1/2 000 и 1/5 000

В соответствии с интересами эксплуатации полезно иметь карты с геоподосновой и карту без геоподосновы. Опыт показывает, что можно располагать двумя видами планов.

7.1.3.3.5.1. Тип "A"

Он включает:

границы путей, границы участков, все здания и топонимику (названия путей).

7.1.3.3.5.2. Тип " B"

Он включает только границы путей (трассы), несколько больших общественных зданий, служащих реперами, и топонимику. Для каждого типа геоподосновы в дополнение к представлению о газовых сооружениях полезно добавить сведения в зависимости от назначения этих планов:

— карты сетей под активной защитой,

— карта участков труб из чугуна и т.д.

На новой геоподоснове, детальном плане или плане всех сооружений и в соответствии с регламентом должны быть нанесены координаты Ламберта.

7.1.3.4. Основы изготовления

7.1.3.4.1. Бумага

Речь идет о нанесенном на кальку или бумагу чертеже сооружений. Обычная бумага последнее время заменяется бумагой на полистироловой основе. В зависимости от целей могут применяться различные способы использования геоподосновы и "накладных калек". Репродукция геоподосновы, представляющей подземные сети, должна быть выполнена также качественно (стабильность размеров, сохранность во времени и т.д.), как и оригинал.

7.1.3.4.2. Микрофильмы

Микрофильмирование используется для съемки существующих планов на пленку 16 и 35 мм. При формате 16 мм основа находится на бобине или кассетах; качество увеличенного изображения ограничено. В случае ленты 35 мм изображение получается хорошим и может быть двух типов: либо карта со слайдами, либо кассета с шестью картинками.

При эксплуатации объектов больших размеров важно предусмотреть систему автоматического поиска карт, не зависящую от классификации последних.

7.1.3.4.3. Информатика

В этом случае все чертежи трансформируются в базу данных и хранятся в форме магнитных дисков и кассет.

Чертежи получаются либо путем копии с экрана с помощью электростатического или термочувствительного пера, либо чертежного стола.

7.1.3.5. Применение новых графических методов

Расширение распределительных сетей по территории, разнообразие размеров и состава сооружений ведут к прогрессу и обогащению картографии.

Наилучшие технические или экономические решения требуют улучшения использования данных, зависящих одновременно от анализа и современного состояния, достигаемого применением ЭВМ.

Речь идет по аналогии с чертежами компьютеров (D. A. O), о выполнении чертежа на основе базы данных информации, поступающей от:

— распределителя,
— администрации гражданских путей,
— других органов управления и планирования.

Это превращение классической картографии является основой картографии информатизированной (на базе ЭВМ).

Картография на базе информатики работает без масштаба, но точность воспроизведения зависит от точности вводимых данных.

Если внесенные данные были получены на основе карты в масштабе 1/2 000, нельзя увеличивать масштаб до 1/2 00, так как ошибка в 1 мм в масштабе 1/2 000 соответствует 2 м в натуре. И, напротив, если основой служил план в масштабе 1/200, есть возможность осуществлять любое уменьшение.

7.1.3.5.1. База графических данных

Она регистрирует всю информацию, необходимую для выработки плана и его воспроизводства с помощью автоматического чертежника. Как и для традиционного плана, база графических данных снабжается двумя основными элементами:

— геоподосновой (с системой координат Ламберта),
— сооружениями (на основе существующего плана).

7.1.3.6. Развитие картографии

7.1.3.6.1. Применение информатики в картографии на основе детального плана в масштабе 1/200 и 1/500

Такое применение информатики позволяет решить сразу проблемы общего проектирования и эксплуатации сетей.

С ее помощью можно определить:

— точное место расположения оборудования сети;
— расположение сооружений на месте своего непосредственного окружения,
— дополнительную информацию, относящуюся к жизни сооружений.

Оно дает следующие преимущества:

— приводит в порядок графику в соответствии с сегодняшним временем;
— одним вмешательством приводит в соответствие со временем цифробуквенную базу, содержащую всю информацию, относящуюся к сооружениям;
— создает настоящую систему управления с помощью последовательных слоев, способных представлять в визуальном виде различную информацию;

— дает быструю консультацию с экрана и ее копию;
— распространяет удобную для использования информацию путем снятия копий с экрана.

Поддержание этой разнообразной информации составит историю сооружений. Этот способ имеет недостаток, так как относительно дорог.

7.1.3.6.2. Картографическая информация с плана ансамбля в масштабе 1/2 000 или 1/5 000

Такое решение позволяет:

— получить финансовую выгоду при расчете сети;
— получить необходимый тематический графический материал, удовлетворяющий:
  · потребностям общего проекта в части выработки программы работ, определенных потребностями эксплуатации, таких, как борьба с пожарами, схема эксплуатации, активная защита, поиски некондиционных зон.

Возможна совместная работа с другими техническими документами.

Геоподоснова может быть либо пронумерована, либо храниться в классической форме и может быть объектом новых наложений.

7.2. Сооружение распределительных сетей

7.2.1. Трубопроводы и соединения

7.2.1.1. Существующие материалы сетей

7.2.1.2. Материалы, применяемые в настоящее время

Это:

— сталь,
— полиэтилен,
— ковкий чугун,
— медь,
— алюминий,
— свинец (применяется только для ремонта).

7.2.1.2.1. Допустимые напряжения

Они определяются в разделе 7.9.

Категория	Сталь	Полиэтилен	Чугун	Листы битумные	Медь	Алюминий
BP	A и E	E	E	E	A и E	A
BP < BPA ≤ 50 мбар	A и E	E	E	E	A и E	A
50 мбар < MPA ≤ 0,4 бар	A и E	E	E	E	A	A
0,4 бар < MPB ≤ 4 бар	A и E	E	–	–	A и E	A
4 бар < MPC ≤ 19,2 бар	A и E	–	–	–	–	–
A – положение воздушное или вне земли. E – положение воздушное.						

Сборная таблица материалов, существующих в сетях.

7.2.1.2.2. Эксплуатационные напряжения

Материал	Подземное расположение	Воздушное или внеземное расположение
Сталь	Риск коррозии, требующей защиты пассивной (изоляция, изолирующие соединения) и изоляции активной	Защита от коррозии
Полиэтилен	Чувствительность к температуре (холод или жара) лимитирует использование	
Чугун	Давление ограничено, большое число механических соединений, риск коррозии в определенных условиях	
Медь	Риск коррозии в определенных условиях	Без эксплуатационных напряжений
Алюминий	–	Легкость пуска в работу, недостаток – специальный инструмент
Свинец	Температура плавления и пластичность лимитируют применение	–

Эксплуатационные напряжения в зависимости от используемого материала.

7.2.1.3. Соединения

7.2.1.3.1. Сварка электродуговая

Рекомендованная техника – так называемая "поднимающая" сварка с применением электродов от 2,5 до 3,2 мм.

7.2.1.3.2. Сварка кислородно-ацетиленовая

Она должна реализовываться:

— в два шва (кромки обработаны),

— в один шов (кромки прямые).

При проведении работ под газом рабочее давление должно быть менее 50 мбар.

7.2.1.3.3. Пайка капиллярная, прочная

Она требует соединения с вставками и калиброванными трубами. Основной сплав (носитель) имеет точку плавления выше 450°C.

7.2.1.3.4. Пайка-сварка на меди

Металл-носитель – латунь с 40% цинка с температурой плавления близкой 900°C.

7.2.1.4. Размеры труб. Соединения

7.2.1.4.1. Сталь

Характеристика труб, относящихся к GDF для строительства распределительных сетей дается на с. 608.

7.2.1.4.2. Полиэтилен

GDF использует с 1985 г. трубы серии S.5 с номинальным наружным диаметром: 40; 63; 90; 110; 125 мм.

Тип соединения	Сталь	Полиэтилен	Чугун	Медь	Алюминий
Дуговая сварка	Все диаметры				
Сварка кислородно-ацетиленовая	$d \geq 60{,}3$ мм				
Склейка					Полимеризация при 150°C
Пайка капиллярная				$d \leq 54$ мм	
Пайка-сварка				$d \geq 42$ мм	
Механические соединения	Фланцевые соединения	Соединение механическое для труб из (PE) полиэтилена	Соединение специальное		
Электросварка		Соединение электросваркой PE			

Тип соединений в зависимости от материала.

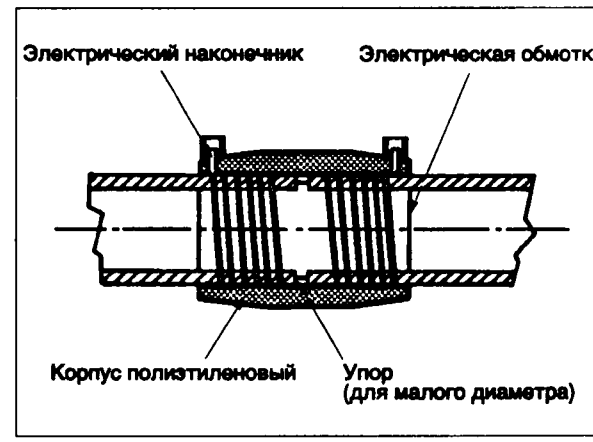
7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Калибр	Диаметр наружный, мм	Толщина, мм		Линейная масса голой трубы, кг/м
15	21,3 ± 0,5	2,3	±0,25	1,1
25	33,7 ± 0,5	2,9		2,2
32	42,4 ± 0,5	2,9		2,9
50	60,3 ± 0,5	2,9		4,1
80	88,9 ± 0,5	3,2		6,8
100	114,3 ± 0,5	3,6		9,8
150	168,3 ± 1	3,6		14,6
		4	+0,35 −0,25	16,2
200	219,1 ± 1	3,6		19,1
		4,5		23,8
250	273 ± 1	3,6		23,9
		5		33
300	323,9 ± 1,3	4		31,6
		5,6	+0,45	
			−0,35	44
400	406,4 ± 1,3	4,5	+0,35	
			−0,25	44,6

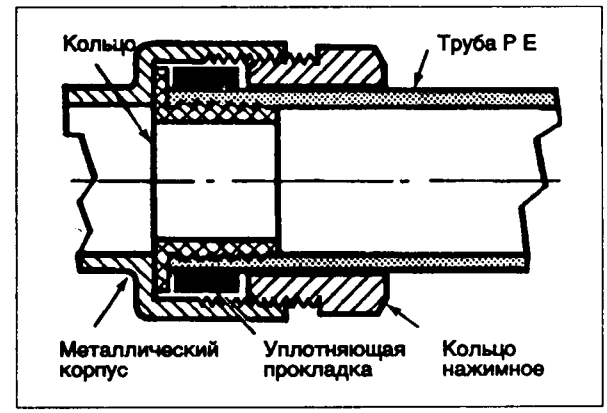
Размеры труб и соединений из стали.

Использование труб диаметром 160 и 200 мм является предметом особого изучения.

Схемы примеров часто употребляемых соединений приводятся на рисунках.



Соединение сваркой электрическим способом.



Соединение DN 15; 25; 32 для труб PE диаметром внешним номинальным 20; 32 или 40 (соединение металл – пластик).

Диаметр наружный номинальный, мм	Диаметр средний наружный, мм		Серия S 12.5-PN 4 (SDR 26) *			Серия S 8-PN 6 (SDR 17) *			Серия S 5-PN 10 (SDR 11) *		
			Толщина, мм		Масса линейная, кг/м	Толщина, мм		Масса линейная, кг/м	Толщина, мм		Масса линейная, кг/м
	min	max	min	max		min	max		min	max	
10	10,0	10,3							2,0	2,4	0,053
12	12,0	12,3							2,0	2,4	0,066
16	16,0	16,3							2,0	2,4	0,093
20	20,0	20,3							2,0	2,4	0,119
25	25,0	25,3				2,0	2,4	0,152	2,3	2,8	0,173
32	32,0	32,3				2,0	2,4	0,193	2,9	3,4	0,275
40	40,0	40,4				2,4	2,9	0,299	3,7	4,3	0,435
50	50,0	50,5	2,0	2,4	0,318	3,0	3,5	0,453	4,6	5,3	0,675
63	63,0	63,6	2,4	2,9	0,483	3,8	4,4	0,730	5,8	6,6	1,070
75	75,0	75,7	2,9	3,4	0,685	4,5	5,2	1,030	6,8	7,7	1,490
90	90,0	90,9	3,5	4,1	0,990	5,4	6,2	1,490	8,2	9,3	2,150
110	110,0	111,0	4,2	4,9	1,450	6,6	7,5	2,190	10,0	11,2	3,180
125	125,0	126,2	4,8	5,5	1,870	7,4	8,4	2,800	11,4	12,8	4,130
140	140,0	141,3	5,4	6,2	2,350	8,3	9,4	3,500	12,7	14,2	5,150
160	160,0	161,5	6,2	7,1	3,080	9,5	10,7	4,570	14,6	16,3	6,750
200	200,0	201,8	7,7	8,7	4,750	11,3	13,3	7,153	16,2	20,3	10,500
250	250,0	252,3	9,6	10,8	7,400	14,8	16,5	11,100	22,7	25,2	16,400
315	315,0	317,9	12,1	13,6	11,700	19,7	20,8	17,500	28,6	31,7	25,900
400	400,0	403,6	15,3	17,8	19,200	23,7	27,5	29,900			
500	500,0	504,5	19,1	22,2	29,900	29,6	34,3	45,100			

* SDR – отношение номинального наружного диаметра к предусмотренной толщине стенки.

Полиэтиленовые трубы серии S5.

7.2.1.4.3. Ковкий чугун

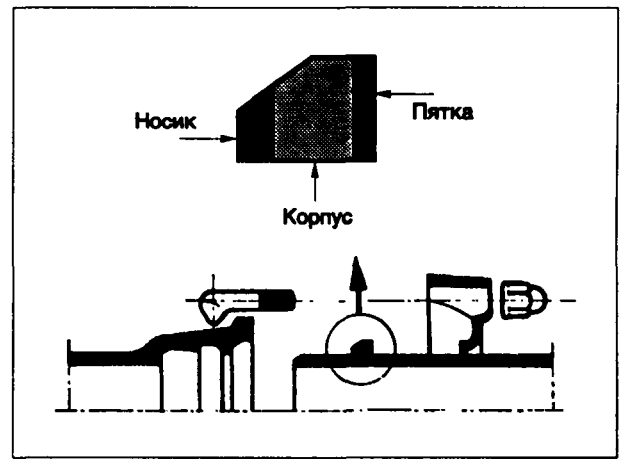
Используемые трубы соответствуют серии K9 соединений Express.

7.2.1.4.3.1. Сжатие соединений из чугуна

Необходимо стянуть болты с помощью динамического ключа, соблюдая порядок в соответствии с числом болтов и норм DN труб в парах сжатия, определенных технической спецификацией, а именно:

— DN 80 - 3 болта D 2 - 70 Н · м,
— DN 100 - 3 болта D 2 - 100 Н · м,
— DN 150 - 4 болта D 2 - 110 Н · м,
— DN 200 - 5 болтов D 2 - 120 Н · м,
— DN 300 - 7 болтов D 2 - 140 Н · м.

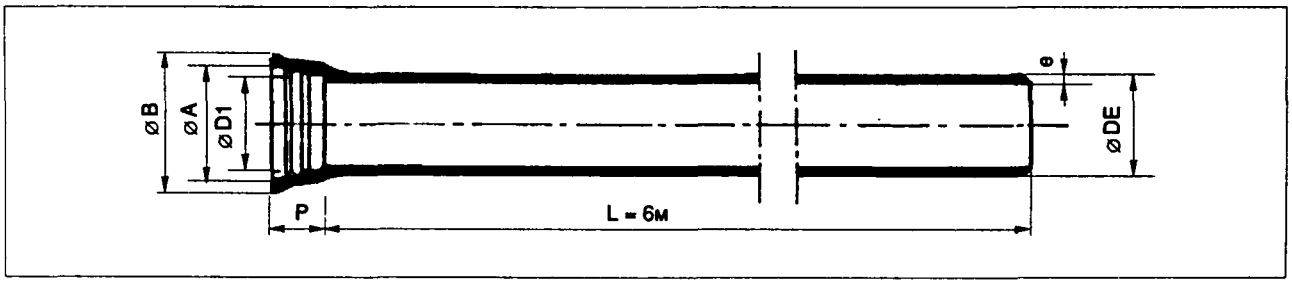
(10 Н · м - 1 кгс · м).



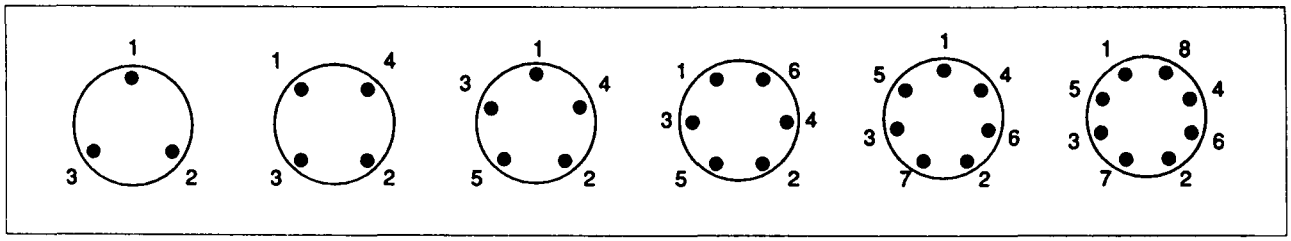
Изготовление соединения и зажима.

DN	Размеры, мм						Классическая изоляция		Масса одной трубы, кг
	Корпус		Подсоединение						
	DE	e	DI	P	A	B	внутренняя	наружная	
100	118	6,1	121	92	143	189	Лак	Один слой цинка + лак	95
150	170	6,3	173	98	197	243			144
200	222	6,4	225	104	251	296			194
250	274	6,8	277	104	302	353		Лак	255
300	326	7,2	329	105	358	410			323
400	429	8,1	432	110	463	517			482
500	532	9	535	115	568	630			669
600	635	9,9	638	120	677	739			882

Характеристика труб из ковкого чугуна (серия K9).



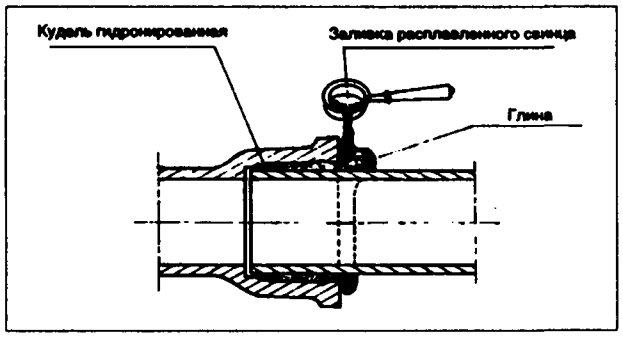
Сечение трубы из ковкого чугуна.



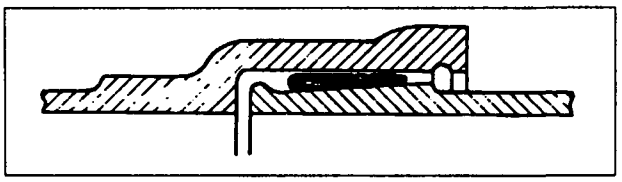
Порядок сжатия болтов.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

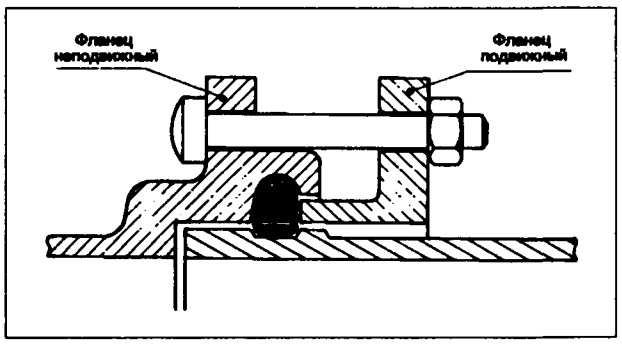
7.2.1.4.3.2. Соединения, еще встречающиеся на сетях



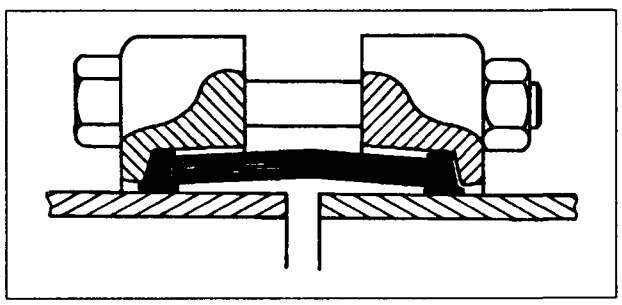
Соединение расплавленным свинцом (raspes).



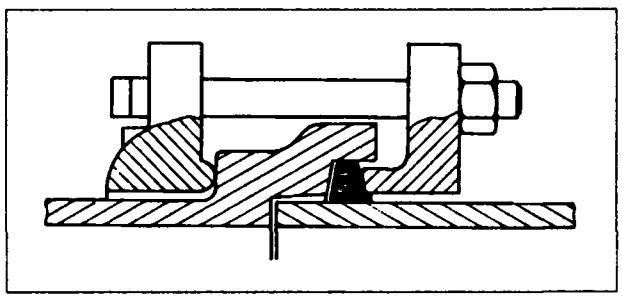
Соединение Somzée (1867).



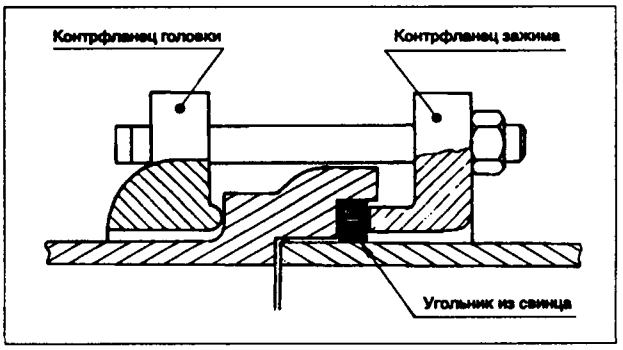
Соединение Lavril обычное (1870).



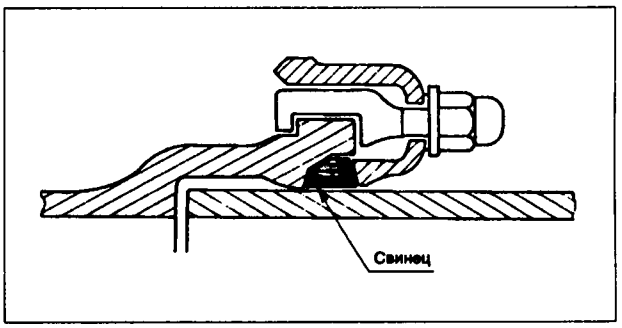
Соединение Gibault.



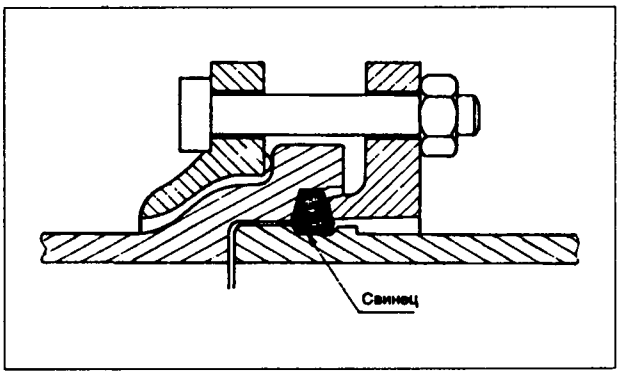
Соединение Précis (1904).



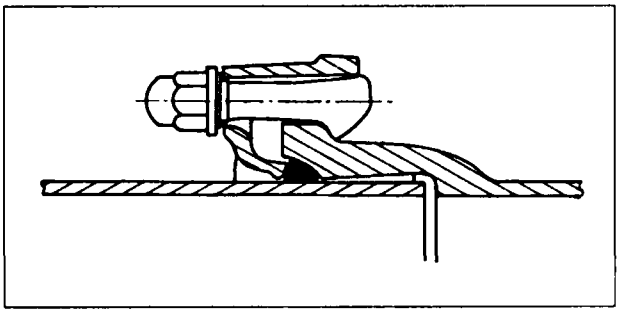
Соединение Précis P32 (1932).



Соединение Lavril усиленное.



Соединение Precis-Express (1936).



Соединение унифицированное.

7.2.1.4.4. Медь

См. разд. 1.10.3

Диаметр наружный, мм	Точность по наружному диаметру, мм	Толщина, мм	Масса линейная, кг/м
8	±0,05	1 или 0,8 *	0,196
10			0,252
12			0,308
14			0,363
16			0,419
18			0,475
22	±0,05		0,537
28			0,755
35	±0,07		0,95
42		1	1,146
54			1,482
70	±0,2	1,6	3,06
85	±0,25	2	4,92
100			5,48
* Масса дается для толщины 1 мм.			

Характеристики и размеры медных труб.

Характеристика определяется нормами NF E 29-591 для диаметров от 8 до 54 мм.

Соединения из меди или латуни; в основном типа капиллярной пайки.

7.2.1.4.5. Алюминий

См. разд. 1.10.4

Обозначение	Диаметр наружный, мм	Толщина стенки, мм	Масса линейная, кг/м
12 × 1	12 (±0,09)	1 (±0,10)	0,092
16 × 1	16 (±0,09)	1 (±0,10)	0,127
28 × 1	16 (±0,09)	1 (±0,10)	0,230
36 × 1	36 (±0,09)	1 (±0,10)	0,297
56 × 1,2	56 (±0,13)	1,2 (±0,10)	0,558

Характеристика и размеры труб из алюминия.

Необходимые соединения при строительстве сооружений это – рукава, угольники, тройники, крестовины, отводы и врезки. Их приготовляют в основном путем штамповки.

7.2.2. Проектирование сооружений распределения

Строительству сооружений распределения должно предшествовать проектирование, или предпроектные разработки, цель которых следующая:

— определение технической возможности выполнения сооружений;
— возможность его учреждения на основе разрешений различных органов власти;
— расчетное уточнение стоимости строительства.

7.2.2.1. Предпроект

Все решения по строительству трубопроводов должны включаться в план на средний или дальний срок, установленный на основе проекта.

Цель предпроекта следующая:

— проверить включение выполняемой стройки в существующую структуру или создаваемую структуру;
— определить техническую и размерную характеристики сооружения,
— выяснить особенности трассы;
— установить примерную стоимость сооружения;
— включить проектируемую стройку в программу работ.

7.2.2.2. Определение трассы

Размещение трубопроводов как в общественных владениях, так и в частных должно стать предметом внимательного, точного и детального изучения.

Действительно, размещение трубопроводов определяет их надежность, срок жизни и стоимость.

Этот проект трассы выполняется обычно в соответствующем масштабе, позволяющем осуществить детальный анализ.

Применяют масштаб либо 1/200, либо 1/500.

Проект должен позволить:

— установить как можно точнее места расположения сооружений в окружающей среде;
— определить особые точки, встречающиеся на трассе, с объяснением решений, применяемых для каждой из них. Это может привести к необходимости шурфования;
— проверить соблюдение:
  · регламентов, правил,
  · норм,
  · спецификаций, касающихся самих сооружений и соседних концессионеров;
— осуществить административное анкетирование после соответствующего обслуживания;
— определить особые условия реализации стройки (использование специальных материалов для земляных работ, основные материалы для засыпки и т.д.);
— консультировать предприятия.

7.2.2.3. Административное анкетирование

Административная анкета предназначена для получения необходимого разрешения на строительство сооружений.

В системах распределения газа сети и ответвления относятся к сфере деятельности местных властей, нередко к частному сектору, иногда к сфере деятельности государства или отдельного департамента.

Работы должны выполняться с соблюдением:

— действующих регламентирующих документов: указы, циркуляры министерские и т.д.;
— различных технических рекомендаций:
  · технической спецификации на поставку материалов для строительства, DTU,

- журнала нагрузок и особых условий, применительно к работам;
- технической инструкции распределителя;
- особых предписаний администрации или согласующих авторитетов.

Сооружения распределения подчиняются правилам, которые регулируют область концепции и область реализации. Эти правила зависят от области (частная, общественная и т.д.), в которой будет расположено сооружение (см. разд. 7.9.3).

7.2.2.4. Финансирование работ

Проект принимается после изучения всех необходимых соглашений, после чего становится возможным точно определить первоначальную стоимость строительства.

7.2.3. Промерзание грунта после поста регулирования

Охлаждение, вызванное редуцированием газа, может вызвать сложности в функционировании оборудования регулирования и нарушения в окружающей подземный трубопровод среде за этим постом. Изучение зон с температурой ниже 0°С, в зависимости от условий транзита, позволяет нарисовать картину риска нарушений.

Интересно для эксплуатационника сравнить возможные решения каждой встречающейся проблемы [и в особенности выбор места установки поста "высокое давление" ("среднее давление") (HP/MP)], выбирая наиболее подходящие и экономичные.

7.2.3.1. Влияние холода после редуцирования

Редуцирование газа, охлаждаемого примерно на 0,5°С на каждую атмосферу для газа, распределяемого во Франции, может привести к снижению температуры на выходе из поста с –10 до –20°С.

Если эксплуатационник знает, как решить эту проблему для поста редуцирования, то проблема на выходе из него оказывается более сложной.

Холод делает хрупкими материалы, замерзает вода в трубопроводах и отводах; но холод может вызвать вспучивание грунта и спровоцировать большое искривление или подъем стены. Эти нарушения могут происходить из года в год с опасной нестабильностью поведения грунта вследствие его замерзания и оттаивания. Холод может вызвать также сложности в работе газовой аппаратуры (запорные задвижки, регуляторы, счетчики).

7.2.3.2. Замерзание грунта после дросселирования

7.2.3.2.1. Геофизические аспекты

Вспучивания грунта – наиболее важные последствия холода после дросселирования. Все грунты реагируют на холод по-разному.

Грунт является естественным формированием, сочетающим твердые частицы и минералы в агрегатном состоянии; явление вспучивания грунта льдом является сложным.

Проведенные Центральной лабораторией мостов и дорог исследования возможного капиллярного всасывания во влажных и проницаемых грунтах позволили построить зависимости вспучивания от корня квадратного из индекса льда (застывания) $Xg = f(\sqrt{I})$ и объяснить явление замерзания грунта. Как следствие, результаты многочисленных исследований замерзания, некоторые из них показаны ниже, позволяют сказать, какой грунт замерзает (уклон кривой > 0,4), какой мало замерзает или не замерзает (уклон < 0,05).

Немерзлый грунт в процессе снижения температуры смерзается всей массой. Мерзлый грунт образует целики льда в процессе замерзания. Они сжимают грунт и вызывают отток из него жидкости, т.е. появляется движение воды по капиллярам. Целики расширяются и вспучивают грунт.

Грунт	Содержание воды, %	Уклон прямой вспучивания I
Песок Фонтенбло	13,2	0,00
Глина коричневая	18,6	0,07
Песок Нанси	15,2	0,09
Песок глинистый	11,5	0,18
Мергель зеленый	11,6	0,20
Глина песчаная	16,3	0,23
Ил Эндлоса	16,1	0,25
Глина песчаная Монтери	14,0	0,27
Песчаник	9,4	0,29
Ил Гондчевиля	14,3	0,30
Ил Каен	14,6	0,55
Пепел летучий Бленода	27,3	0,56
Мелкий песок (гранитный)	12,1	0,66
Лёсс Альсаса	16,5	0,80
Известняк Мёса	11,6	0,83
Мел Реймса	23,6	1,43

Замерзаемость некоторых грунтов.

7.2.3.2.2. Термические аспекты

Ближайшее рассмотрение явления замерзания грунта после дросселирования требует учета многочисленных факторов, влияющих на теплопроводность грунта и нагрев газа в процессе перекачки по трубопроводу, таких, как замерзание воды, содержащейся в грунте, перемещение воды за счет капиллярного всасывания.

Это требует знания холодных зон (температура < 0°С).

Упрощенная модель Трансола, результаты расчета которой проверены измерениями на нескольких экспериментальных участках, позволяют брать в расчет последовательные участки трубопроводов с различными характеристиками.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Разрезают трубопроводы на гомогенные участки (одинаковые по физическим характеристикам: размерам, материалу, расходу и т.д.). Их рассчитывают на мини-ЭВМ путем введения исходных данных, воспроизводимых в форме, удобной для интерпретации. Типовые результаты приводятся ниже.

Эта модель, соединяющая понятия температурного риска и сопровождаемого движения, позволяет определить путем расчета части сети, которым угрожает определенный риск замерзания, осуществить геологический анализ определенной зоны и предположить возможные последствия.

7.2.3.2.3. Упрощенные решения

Простейшие решения известны. Они подразумевают либо ограничение охлаждения путем снижения уровня редуцирования или путем подогрева газа, либо снижение теплообмена между трубопроводом и окружающей средой для уменьшения падения температуры (дренаж воды, применение незамерзающих материалов).

Специфичекие преимущества и недостатки этих решений зависят от встречающихся проблем и влияют на их выбор.

7.2.3.2.4. Ответы на практические проблемы

Когда речь идет о новом или старом посте редуцирования, необходимо прежде всего определить с помощью метода Трансоля, "холодную зону" по длине трубопровода. Эта первая фаза учитывает удельные характеристики поста, место его расположения, риск, который он может представлять.

Далее, для этой зоны очерчиваются все существующие и потенциальные задачи с включением гидрогеологического и геологического анализа соответствующих грунтов.

Затем для каждой задачи осуществляется приоритетный выбор решения из приведенных в таблицах с. 614 для того чтобы сделать экономический баланс и выбирать окончательное решение.

Надо заметить, что приоритет отдается решению, обеспечивающему такой выбор места установки поста, чтобы ограничить влияние отрицательных температур на состояние нейтрального слоя в грунте.

Конец 2-го подземного участка: температура грунта в 210,0 м от поста

Температура газа	:	−7,7°C
Среднемесячный расход газа	:	3150 м³/ч
Температура воздуха	:	1,1°C
Температура грунта на глубине 0,9 м	:	5,0°C
Температура грунта в контакте с трубой	:	−4,6°C
Толщина замерзшего грунта над трубой, м	:	0,38 м
Толщина замерзшего грунта под трубой, м	:	0,27 м

Ось трубопровода — Поверхность земли — Изотерма 0°C — Расстояние по оси трубопровода, см

0		30		60		90		120		150		180	см
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0
0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	
0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	20
0,1	−0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	
0,5	−0,4	−0,2	0,2	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	1,8	40
1,1	−0,9	−0,5	−0,0	0,4	0,8	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	
1,8	−1,5	−0,8	−0,2	0,3	0,8	1,2	1,4	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	60
3,0	−2,3	−1,2	−0,3	0,3	0,9	1,3	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	
***	−3,1	−1,4	−0,3	0,4	1,0	1,4	1,7	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7	80
***	−3,5	−1,4	−0,2	0,5	1,1	1,6	1,9	2,2	2,5	2,7	2,8	3,0	
****	−2,7	−1,1	0,0	0,8	1,3	1,8	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	100
2,2	−1,6	−0,5	0,4	1,1	1,6	2,0	2,4	2,7	3,0	3,2	3,3	3,5	
0,8	−0,5	0,2	0,9	1,4	1,9	2,3	2,7	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	120
0,3	0,4	0,9	1,4	1,9	2,3	2,7	3,0	3,3	3,5	3,7	3,9	4,0	
1,1	1,2	1,5	1,9	2,3	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	4,0	4,2	4,3	140
1,9	1,9	2,1	2,4	2,8	3,1	3,4	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,6	
2,5	2,6	2,7	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,3	4,5	4,6	4,8	4,9	160
3,1	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	
3,7	3,7	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	180

Глубина, см

Результат, полученный по модели Трансоля.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Решение	Проблемы				
	Нарушения термические			Нарушения механические	
	Полиэтилен	На малом расстоянии	На большом расстоянии	На малом расстоянии	На большом расстоянии
Выбор другой трассы газопровода	XX	XX		XXX	XXX
Выбор другого места для поста	XX	X		XX	XXX
Изоляция газопровода	XX	X		XX	X
Уложить стальной газопровод на выходе из поста большего размера для убыстрения нагрева газа	XX		XX	XX	
Изоляция защищаемых сооружений	XXX	X			
Осушка грунта				XX	XX
Замена грунта				XX	XX
Снижение давления на входе	XX	XXX	XXX	XX	XXX
Увеличение давления на выходе	X	XX		X	XX
Установка воздушного нагревателя	X	XX	X	X	XX
Установка подземного подогревателя	X	XX	XX	X	XX
Установка котла-нагревателя (подогревателя)		X			X
Установка электроподогревателя		X			X
Подогрев защищаемых сооружений	X		X		

XXX – решение приоритетное для изучения,
XX – решение для серьезного изучения,
X – решение может рассматриваться.

Вспомогательная таблица выбора решений в ходе строительства поста с целью избежания проблем, связанных с охлаждением газа.

Решение	Проблемы			
	Нарушения термические		Нарушения механические	
	Местные	Общие	Местные	Общие
Перекладка газопровода	XX	XX	XX	XX
Перенос сооружения	XX	XX	XX	XX
Изоляция газопровода	XXX	XX	XXX	XX
Изоляция защищаемого сооружения	XXX	XX		
Подогрев защищаемого сооружения	X			
Осушка грунта			XX	XXX
Замена грунта			XXX	XX
Снижение давления на входе	X	XXX	X	XXX
Увеличение давления на выходе	X	XXX	X	XXX
Установка атмосферного теплообменника	X	XX	X	XXX
Установка подземного теплообменника	X	XX	X	XX
Установка котла-подогревателя		XX		XX
Установка электронагревателя		X		X

XXX – решение приоритетное для изучения,
XX – решение для серьезного изучения,
X – решение может рассматриваться.

Вспомогательная таблица выбора решений в случае существующего поста.

7.2.4. Реализация работ

7.2.4.1. Укладка трубопроводов

7.2.4.1.1. Подготовка строительства

Подготовка строительства включает:

— обследование места,
— бурение,
— административные операции (заявление о предстоящих работах и о поставке материалов),
— установление зоны работ.

7.2.4.1.2. Земляные работы

На поверхности земли размечаются:

— трассы новых сооружений, по возможности по прямой;
— трубопроводы и подсоединения, расположенные рядом или пересекающиеся.

7.2.4.1.2.1. Ширина траншеи

Она должна быть минимально допустимой, чтобы опустить трубопровод в траншею без риска повреждения.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Диаметр, мм		≤ 50	80	100	150	200	250	300	350	400
Чугун	Ширина макс., м			0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
Сталь	Ширина макс., м	0,30	0,40	0,40	0,45	0,50	0,60	0,65		0,75
Полиэтилен: Ширина траншеи сравнима с диаметром укладываемого трубопровода.										

Размеры траншеи в зависимости от диаметра укладываемого трубопровода.

7.2.4.1.2.1.1. Траншея обычная, отрытая механической лопатой

Размеры в таблице выше.

7.2.4.1.2.1.2. Траншея узкая, отрытая спецмашиной (траншеекопателем)

Ширина менее 30 см.

7.2.4.1.2.2. Глубина траншеи

Минимальная нагрузка над трубопроводом 0,7 м; принимается 0,8 м для трубопроводов, подчиненных правилам безопасности от 11 мая 1970 г.

Вынимаемая земля, пригодная для использования, укладывается на бордюре и оставляется проход в 20 см.

7.2.4.1.2.3. Встречающиеся сооружения, вспомогательные работы, вырубка

Поддерживающие устройства используют, если нельзя избежать прокладки вблизи стены.

Удаление деревьев или столбов, ближайших к траншее или их перемещение, если это необходимо, по согласованию с местной администрацией.

Ручное удаление встречающихся препятствий, поддержание или подпирание, если необходимо (толстые доски, стягивание, оттяжка и т.д.).

Для пересечения рек, шоссе, железной дороги:

— использовать преимущество новых методов ведения земляных работ (гидравлическое продавливание трубы, взрыв, бурение, удалитель веток),
— или предусмотреть проход вспомогательными средствами в зонах вырубки.

Для глубокой (больше 1,3 м) траншеи, где есть риск просадки, обязательны укрепление стен, подпорки или распорки.

7.2.4.1.2.4. Особые установки (диспозитивы)

Специальные приспособления к откачке потоков воды.

Поддержание в рабочем состоянии существующих кюветов и канав для дождевых вод (футляры, каналы).

Установка мостов для поддержания движения машин и пешеходов и выходов из домов.

7.2.4.1.2.5. Сооружение ниш

Дно траншеи, место соединения элементов или участков трубопроводов (имеется в виду создание удобств и безопасности для людей).

7.2.4.1.2.6. Обустройство дна траншеи

Оно должно быть очищено от комьев грунта и иметь слой 5 - 10 см мелкой земли или песка.

7.2.4.1.3. Укладка трубопровода

7.2.4.1.3.1. Перевозка труб

Использовать все средства для избежания повреждения труб или изоляции.

Избегать длительного оставления изолированных труб и труб из полиэтилена на солнце.

7.2.4.1.3.2. Подготовка элементов трубопровода

Соединение отрезков в участки возможно большей длины перед их опусканием в траншею (за исключением чугуна).

Очистка внутренностей трубопровода и закрытие концов труб, чтобы исключить попадание в них посторонних предметов.

7.2.4.1.3.3. Соединение труб

Соединения однородные см. разд. 7.2.1.3.

Соединения разнообразные

Материал соединяемых труб	Способ разнообразных соединений
Сталь–чугун	Изолирующее соединение
Сталь–полиэтилен	Соединение металл–пластик: — сварное, — фланцевое
Сталь–медь	Изолирующее соединение
Чугун–полиэтилен	Соединение металл–пластик, фланцевое
Полиэтилен–медь	Соединение металл–пластик, пайка

7.2.4.1.3.4. Квалификация персонала

Он должен быть подготовленным и квалифицированным в выбранной области техники.

7.2.4.1.3.5. Опускание в траншею

Принять все меры для избежания повреждения трубы и изоляции в процессе этой операции.

Расположение трубы на дне траншеи должно быть таким, чтобы можно было осуществлять все операции в процессе последующей эксплуатации.

7.2.4.1.3.6. Защита

Пересечение и близость различных трубопроводов: соблюдать расстояние не менее 20 см.

Если это невозможно, установить механическую защиту (полукольца, футляры, плиты).

Защита определенных компонентов, в особенности полиэтилена, от тепла и холода.

Футляры используются:

— при пересечении некоторых препятствий или защите укладываемых сооружений;
— для электроизоляции трубопровода.

7.2.4.1.3.7. Тюбаж (протаскивание)

Эта техника позволяет обновить или усилить существующие сети или ответвления, уменьшая в значительной степени объем земляных и восстановительных работ.

Принцип состоит в протаскивании трубы в существующем старом газопроводе, который играет роль футляра.

Используются два способа выполнения работ:

— тюбаж без газа;
— тюбаж под газом, без остановки его подачи.

7.2.4.1.4. Выполнение плана и испытания

7.2.4.1.4.1. Съемка плана

Совершенно необходимо выполнить и поддерживать в современном состоянии план, содержащий следующие сведения:

— расположение трубопровода и вспомогательных органов, привязанных на плане и профиле,
— реперы сооружений и встречающихся препятствий,
— длины, замеряемые по оси трубопровода,
— окружающие реперы, выбранные таким образом, чтобы не изменяли своего положения во времени.

7.2.4.1.4.2. Испытания

Смотри таблицу ниже.

7.2.4.1.4.3. Коррекция давления

(не применяется для полиэтилена)

$$C = P_{ср} \frac{t_1 - t_2}{t_{ср} + 273},$$

где:

t_1 – температура в начале испытания,

t_2 – температура в конце испытаний,

$t_{ср}$, $P_{ср}$ – средние температура и давление в начале и в конце испытания.

Если в исключительном случае испытание, указанное в таблице, невозможно провести, осуществляется контроль обмазыванием (обмыливанием) соединений (фланцы, сварные швы) под рабо-

Вид испытания	Сталь	Чугун	Полиэтилен
Контроль сварки	Радиография. Визуальный и пенными материалами под давлением воздуха 6 бар для каждого участка.		
Испытание на механическое сопротивление	1 p ≤ 19 бар избыточных D наружн. ≥ 79 мм Соответствует предписаниям декрета от 11 мая 1970 г.	Испытание воздухом под давлением от 0,5 до 1 бар	Испытания воздухом под давлением 6 бар в течение 2 ч
	2 4 ≤ p ≤ 19 бар D наружн. < 79 мм Испытание водой под рабочим давлением в течение 4 ч	Соединения и врезки проверяются при испытаниях пеной	Соединения проверяются пеной в процессе испытания, затем прополаскиваются и сушатся
	3 p < 4 бар Испытание воздухом под давлением в 6 бар в течение 4 ч		Соединения проверяются пеной в процессе испытаний
Испытание на герметичность	1 Трубопровод подпадает под декрет от 11 мая 1970 г.	Под давлением воздуха от 200 до 500 мбар	Испытание воздухом под давлением от 0,5 до 1 бар в течение 48 ч минимум
	2 Второй случай – либо предписания декрета 11 мая 1970 г., либо испытания воздухом p = 1 бар в течение 24 - 192 ч	Две серии замеров с интервалом не менее 24 ч	

Таблица видов испытаний в зависимости от типа трубопроводов.

чим давлением. После завершения испытания выпускают воздух и пускают газ.

7.2.4.2. Засыпка траншей

Засыпка траншей для укладки газовых сооружений ставит иногда (со временем) проблемы.

На основе интуиции и эмпирических соображений ведения земляных работ служба технических исследований дорог и автодорог (SETRA) и Центральная лаборатория мостов и дорог (LCPC) подготовила техническую документацию об утрамбовке засыпного грунта траншеи (в соответствии с исследованиями, осуществленными экспериментальным дорожным центром в Руане, с участием PTT; EDP - GDF, с помощью дирекции гражданских инженеров департамента оборудования). Она применима к траншеям шириной более 30 см.

Этот документ основывается на изучении реальных величин. Он дает гарантированный результат в том случае, если соблюдается общность применяемых параметров.

В настоящее время успех земляных работ зависит от следующих факторов:

— расположения слоя в траншее;

— знания засыпных материалов;

— выбора оборудования для утрамбовки;

— применения таблицы утрамбовки.

7.2.4.2.1. Расположение слоев траншеи по отношению к зоне дороги. Качество утрамбовки

В соответствии с расположением сооружений (под шоссе, под тротуаром или под обочиной) и слоя требуются три уровня качества утрамбовки.

В порядке возрастания получаемой плотности их обозначают q_4, q_3, q_2 и располагают, как показано на рисунке.

7.2.4.2.2. Информация о материалах заполнения

Для привезенного или вынутого материала с точки зрения повторного использования, LCPC и SETRA устанавливают следующую классификацию:

— четыре класса ABCD, основаны на отвлеченных критериях или *критериях природных*, таких как гранулированность, определяют распределение элементов по размерам: 250, 50, 2 мм и 80 микрон (с учетом весового распределения элементов);

— два класса E и F, группируют особые материалы: подвижные (например, мел), разлагающиеся, горючие, растворимые или загрязняющие, как некоторые отходы производства (летучая зола, шлак и т.д.).

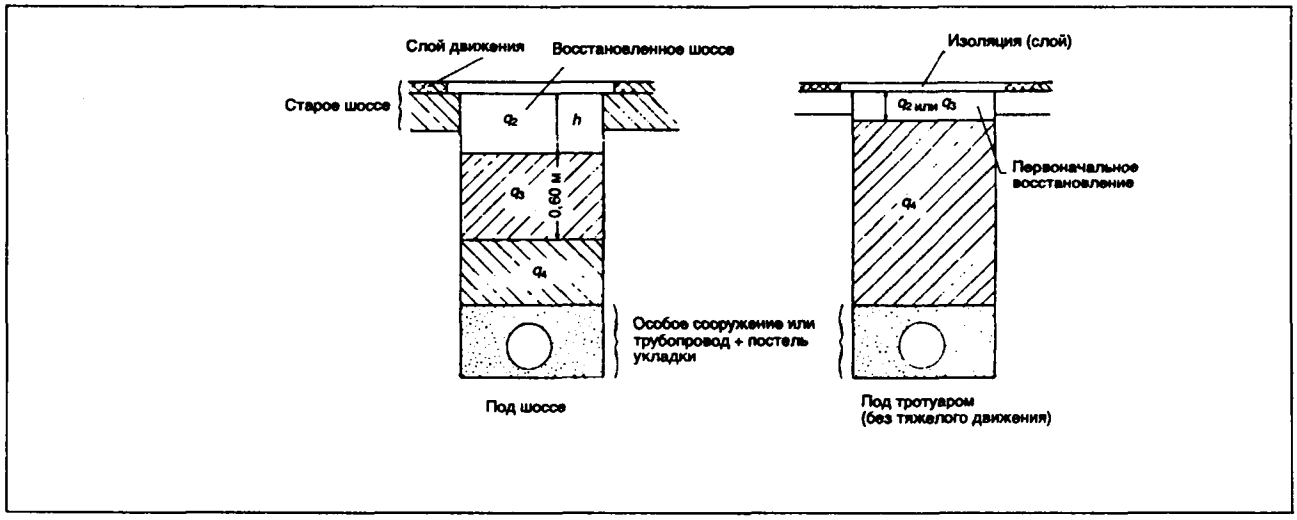
Подклассы уточняют эту классификацию. Они определяются с помощью геотехнических исследований, относящихся прежде всего к *состоянию* материалов:

— индекс пластичности (I_p) характеризует глинистость почвы и ее способность более и менее быстро менять состояние (твердая, пластичная, жидкая) в зависимости от влажности. Поэтому индексу различают подклассы A_1; A_2; A_3; A_4; B_5 и B_6;

— эквивалент песка (ES) позволяет различать почвы B_1, B_2 и B_3, B_4 в соответствии с количеством элементов "глины", которые содержат эти мелко гранулированные почвы;

— исследования Проктора имеют целью определить для данной интенсивности утрамбовки оптимальное содержание воды ($W_{опт.}$), требуемое для расчета максимальной сухой плотности ($\gamma_{dop.}$), определяющей лучшую степень утрамбовки.

Качество утрамбовки определяется как соответствующее процентное отношение $\gamma_{dop.}$; например, 95% для q_4; 100% для q_3; 103% для q_2.



Осуществление трамбовки с учетом плотности грунта.

Класс Название	Характеристический критерий	Подкласс			
A Почва тонкая	$D < 50$ мм Просеянный при 80 мкм > 35%	$I_p < 10$			A_1
		$10 < I_p < 20$			A_2
		$20 < I_p < 50$			A_3
		$I_p > 50$			A_4
B Почва песчаная и песок	$D < 50$ мм Просеянный при 80 мкм 5 - 35%	Просеянный при 80 мкм 5 - 12%	Без частиц 2 мм менее 30%	ES > 35	B_1
				ES < 35	B_2
			Без частиц 2 мм более 30%	ES > 25	B_3
				ES < 25	B_4
		Просеянный при 80 мкм 12 - 35%	$I_p < 10$		B_5
			$I_p > 10$		B_6
C Почва, содержащая тонкие и большие элементы	$D > 50$ мм Просеянный при 80 мкм > 5%	Просеянный при 80 мкм (повышенное)			C_1
		Просеянный при 80 мкм мало	$D < 250$ мм		C_2
			$D > 250$ мм		C_3
D Почва и камни, невосприимчивые к воде	Просеянный при 80 мкм < 5%	$D < 50$ мм	Частиц 2 мм менее 30%		D_1
			Частиц 2 мм более 30%		D_2
		50 мм $< D <$ 250 мм			D_3
		$D > 250$ мм			D_4
E Камни подвижные	Материал тонкой структуры, хрупкий с малым содержанием или без глины				E_1
	Материал крупный, хрупкий с малым содержанием или без глины				E_2
	Материал разрушаемый, песчаный				E_3
F Материал гниющий, горючий, растворимый или загрязняющий					F

D – диаметр небольшого элемента,
ES – эквивалент песка,
I_p – индекс пластичности.

Классификация почв.

7.2.4.2.3. Выбор техники утрамбовки

В качестве машин утрамбования в траншее используются маленькие виброкатки, виброплатформы, вибраторы, ударные вибраторы.

В зависимости от характеристики машин (масса статическая, ширина или поверхность утрамбовки, частота вибрации и т.д.) устанавливается эффективность машин по возрастающей степени:

— виброкаток: P_{v1} P_{v2} P_{v3} P_{v4};
— виброплатформа: P_{q1} P_{q2} P_{q3} P_{q4};
— вибротрамбователь: P_{n1}, P_{n2}, P_{n3};
— трамбователь ударный: P_{p1}, P_{p2}.

В технических описаниях все существующие в продаже машины внесены в списки в зависимости от своей эффективности.

Выбор оборудования трамбовки будет осуществляться в зависимости от размерных характеристик и кпд, связанного с классом эффективности.

7.2.4.2.4. Применение таблиц трамбования

Для каждого типа почвы, для каждого типа машин и каждого качества нужной трамбовки в

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Материалы		Машины												
		Виброкаток				Виброплатформа				Вибротрамбователь			Трамбователь ударный	
		P_{v_1}	P_{v_2}	P_{v_3}	P_{v_4}	P_{q_1}	P_{q_2}	P_{q_3}	P_{q_4}	P_{n_1}	P_{n_2}	P_{n_3}	P_{p_1}	P_{p_2}
Q_4	l_{max}	35	40	45	50	30	45	65	80	30	80	80	25	70
	Q/L_c	90	100	120	200	60	90	130	160	50	140	180	25	70
	n	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4
	V	1,3	1,3	1,3	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,4	0,4
D_1	l_{max}	15	20	25	35	10	15	20	25		30	35	Машины не применяются	
	Q/L_c	20	30	50	120	10	20	25	40		45	55		
Q_3	n	10	8	7	6	10	9	8	6		6	6		
	V	1,3	1,3	1,3	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0		0,9	0,9		

l_{max} – в см,
Q/L_c – м^3/(ч · м),
n – необходимое число проходов,
V – км/ч.

Пример таблицы трамбования.

таблице даны следующие параметры:

— l_{max}, в см – максимальная толщина слоя после трамбовки;
— Q/L_c, в м^3/(ч·м) – теоретический расход трамбовки на единицу проходки;
— V – км/ч – средняя скорость машины;
— n – число необходимых проходок.

Развитие оборудования и техники сооружения (траншеекопатели, виброножи и т.д.) способно улучшить полученные результаты.

7.2.4.3. Восстановление поверхности шоссе

Шоссе необходимо восстанавливать на слое утрамбованной земли.

Как известно, результат гарантирован, если выполняются оперативные правила работ. Для этого необходим контроль:

— всех параметров;
— гаммаплотномером;
— плотности проникновением (проколом);
— объемным плотномером;
— или даже, если слой верхний уже выполнен, замер гаммаплотномером.

Во всех случаях можно брать пробы, осуществляя контроль либо на стройке, либо на предприятии руководителем работ.

Начиная с 1980 г. применение этого метода, основанного на знании материала, машин утрамбовки, позволило во многих случаях добиться меньшей стоимости, улучшить содержание засыпки и рентабельность земляных работ.

7.2.4.3.1. Составные части шоссе

Принципиальные требуемые характеристики поверхности шоссе следующие: отсутствие деформации, горизонтальность, шероховатость.

Шоссе служит для распределения усилий колес машин равномерным допустимым способом на ниже лежащие слои.

Эта функция выполняется тем лучше, чем более равномерна кривая гранулирования засыпки.

Сверху вниз расположены последовательно:

— слой движения
— базовый слой
— слой оснований

} слои собственно шоссе

— слой формирующий: для траншеи этот слой составляет засыпку

Принципиальные материалы, используемые на дорогах, указаны в таблице на с. 620.

Слой	Материал
Слой движения (толщина меньше или равна 8 см)	Смазка поверхностная Песок изолированный Изоляция холодная Изоляция плотная Бетон битуминозный
Слой базовый (толщина от 10 до 30 см)	Гравий битумный Гравий эмульсированный Гравий цементный Гравий стекловидный, шлаковый
Слой основания (толщина от 20 до 70 см)	Гравий необработанный Все остальное

Устройство шоссе.

7.2.4.3.2. Дорожное покрытие над траншеей

Структура шоссе на большей части восстанавливается в два слоя (базовый и основной (фундаментный) насыпной); работы на боках траншеи выполняются преимущественно отбойным молотком.

Восстановление осуществляется в основном:

— в два приема, сдвинутых во времени: восстановление временное, затем несколькими месяцами позже, окончательное;
— в один прием: засыпка траншеи гравием-цементом или бетоном-цементом.

Эффективное решение состоит в максимальном улучшении трамбовки (см. разд. 7.2.4.2) и в усилении базовых слоев дорожного покрытия.

7.2.4.4. Контроль и регламент работ

Руководитель работ должен убедиться, что они выполнены в соответствии с регламентом работ и необходимыми предписаниями.

Задача контроля состоит в изучении:

— соответствия с проектом,
— соответствия с административными правилами, спецификацией и техническими нормами,
— механизмов, принимавших участие в работах,
— реализации стройки, сроков и финансовых документов.

В контрактной документации между руководителем работ и подрядчиком уточняются пункты и меры, позволяющие разделить работы на два этапа:

— контрактные измерения и привязка на местности,
— окончательный расчет вне стройки.

Среди нескольких способов возможного контроля предпочтение отдается контролю путем зондирования и сохранения систематического контроля определенных этапов специфических работ.

7.2.5. Список литературы

— Les tranchées sous chaussées et trottoers pour la pose d'ouvrages de distribution du gaz. – Compte rendu des journees de perfectionnement de l'Association technique de l'industrie du gaz en France (19 - 20 novembre et 3 - 4 décembre 1980).
— Compactage des remblais de tranchées. – Note technique du ministere des transports (17 janvier 1981).
— Techniques de remblayage des tranchées. – Livret-guide établi par le groupe de travail du service technique gaz de la direction de la distribution E.D.F.-G.D.F. (mai 1980).
— P.Duchaufour. – Pédologie. Masson Éd., Paris (1977). T. 2. M. Bonneau et M.B. Souchier, Masson Éd., Paris (1979).
— S. Caillere, S. Henin et M. Rautureau. – Minéralogie des argiles. Masson Ed., Paris (1982).
— G. Filliat. – La pratique des sols et fondations. Éditions du Moniteur, Paris (1981).
— Modes opératoires du Laboratoire central des ponts et chaussées. – Dunod Ed., Paris.

7.3. Обработка распределяемого газа

Она направлена на подготовку и удаление посторонних продуктов.

7.3.1. Обработка и ее эволюция

7.3.1.1. Почему?

Обработка производится только при использовании старых сооружений, имеющих элементы герметичности из натурального каучука и прядей (волокон), пропитанных битумом.

Эти сооружения служили для транспорта газа, содержащего тяжелые углеводороды и воду. Поток природного газа, не содержащего эти элементы, изменил условия равновесия.

Эта ситуация может вести к деформации элементов герметичности и значительному увеличению утечек.

Чтобы вернуться к начальным условиям, впрыскивают жидкости, которые восстанавливают начальное равновесие (вода, масло, растворитель 97/180). Выбор впрыскиваемого продукта и его количество зависят прежде всего от "истории" распределяемого в сооружениях газа и состояния соединений. Цель состоит в поддержании относительно постоянной степени насыщения газа (насыщенность реальная / насыщенность предельная) продуктами обработки.

Проблемы обработки могут различаться в зависимости от условий эксплуатации. Это подразумевает:

— хорошее знание состава сети,
— определение качества газа, распределяемого первоначально,
— замер степени насыщения углеводородами, которые могут конденсироваться,
— замер влажности.

7.3.1.2. Как?

Чтобы обработка была эффективна, необходимо учитывать температуру и давление, так как степень насыщения является прямой функцией этих параметров.

Регулирование установки должно быть одинаково эффективно для любого расхода, исходя из того, что хорошая обработка необходима как в период малого расхода (так как обмен длится долго), так и в период максимального расхода.

Впрыск воды и тяжелых углеводородов может производится отдельно или вместе. Главное, чтобы эти составы были в виде пара. В особенности следует избегать конденсации растворителей, которые могут провоцировать разрушение каучука.

Поддержание качества этой операции требует много энергии, особенно в случае испарения воды. Ее эффективность проверяется периодически с помощью контроля качества.

7.3.2. Снижение требований

7.3.2.1. Почему?

Обработка является полиативом, который позволяет задержать во времени обновление сети, но эта технология приспособлена только для старых сетей и не годится для новых сооружений. Поэтому возврат к старым условиям сейчас необходим во многих случаях.

Наиболее изношенные газопроводы сейчас заменяются. Их конфигурация сильно изменилась в течение 25 лет. В этих условиях внимательно изучаются существующие ситуации, анализируются различные меры, определяются зоны действия постов, при этом используются, если необходимо, компьютерные программы расчета сетей.

7.3.2.2. Как?

Полное прекращение обработки увлажнением может быть рассмотрено в первую очередь, если зимняя остановка не приводит к увеличению утечек или если степень насыщения паров воды ниже 50%, так как в этом случае обработка неэффективна.

Эта остановка предпочтительна в конце зимнего периода, после проведения операции по обработке резьбовых соединений закупоривающими материалами.

Прекращение обработки растворителем должно рассматриваться в прогрессивном плане, учитывая, что необходимо несколько месяцев для достижения нового равновесия смеси. Если это обстоятельство не имеет пагубных последствий, после наблюдений в течение нескольких месяцев необходим новый этап обработки.

Во всех случаях следует принять определенные предосторожности, при необходимости постоянно сравнивая получаемую информацию с первоначальной.

Для этого необходимо:

— увеличить частоту систематических поисков утечек, например машиной обслуживания сетей (VSR);
— использовать операции ремонта для изучения состояния соединений;
— следить за заявлениями посторонних организаций;
— поддерживать установки обработки в рабочем состоянии не менее одного года после остановки.

Действительно, если остановка приводит к общей деградации, установка должна быть пущена в эксплуатацию. Напротив, если деградация частичная, после соответствующего определения зоны сравниваются решения о замене сооружений или статической обработке соединений или обработке этих зон. При этом необходимо учитывать высокую стоимость эксплуатации установок обработки, которой нельзя пренебрегать.

7.3.3. Жидкие углеводороды

7.3.3.1. Происхождение

Компрессорное масло,

тяжелые углеводороды природного газа.

7.3.3.2. Негативные последствия

Нарушения пилотной циркуляции пневматической системы регулирования, феномен помпажа.

Разрыв фурнитуры, вызванный закупоркой сифона.

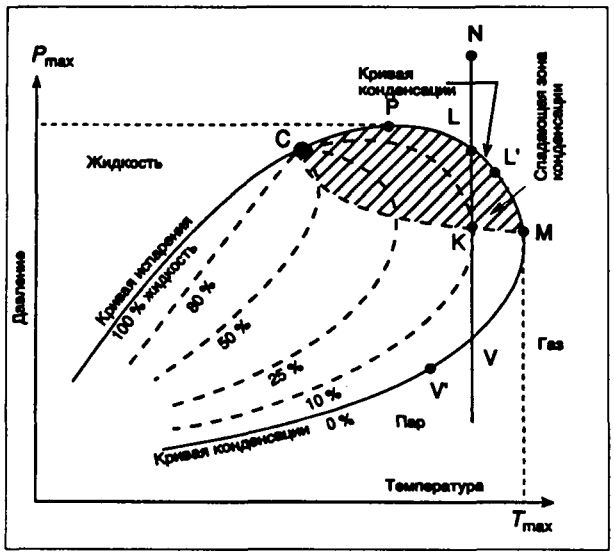
Плохое сжигание.

7.3.3.3. Описание явления

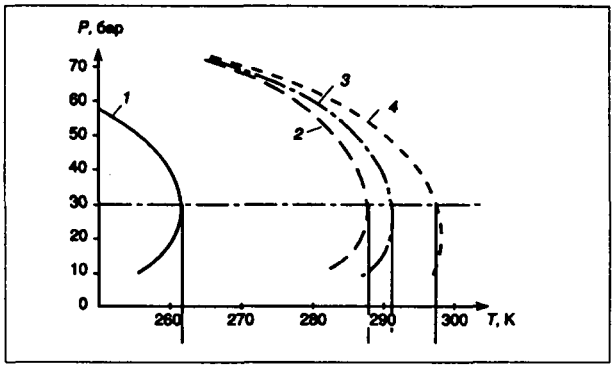
Двухфазная смесь газ–масло образуется на выходе из компрессорной станции, проходит через фильтр поста редуцирования и попадает в распределительную сеть.

Тяжелые углеводороды являются составной частью газа в условиях давления и температуры в

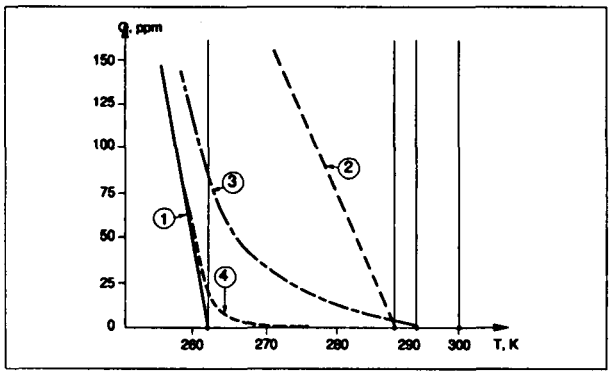
трубопроводе. Их конденсация требует термодинамических условий, могущих существовать на выходе из поста регулирования HP/MPC (спадающая кривая конденсации).



Двухфазная диаграмма природного газа.



Спадающие кривые конденсации. 1 – газ типа B; 2 – B + 77 ppm nC_{10}; 3 – B + 10,5 ppm nC_{12}; 4 – B + 0,28 ppm nC_{16}.



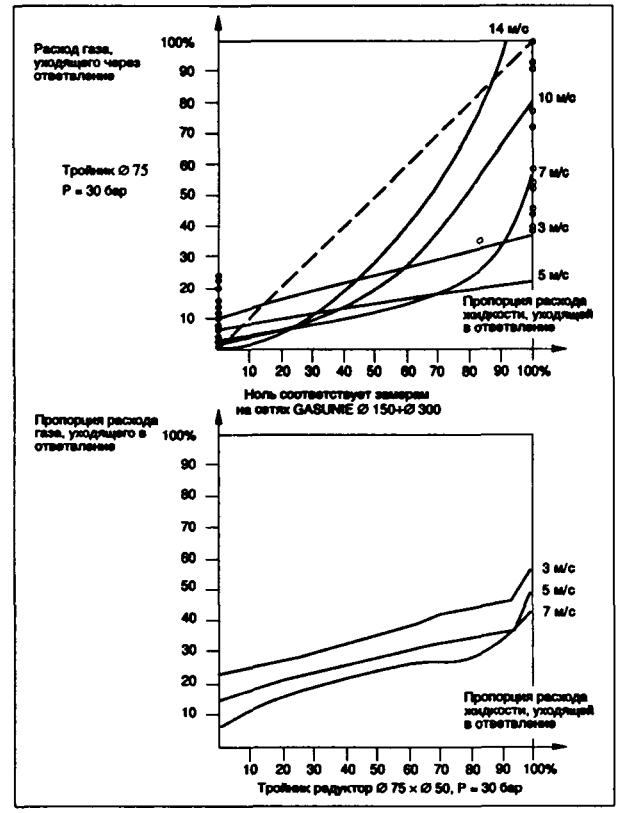
Количество конденсата, выпадающего при давлении 30 бар. 1 - 4 см. выше.

Жидкость появляется в виде очень тонкого тумана, который может создавать объединенную массу (феномен увеличения, ведущий к увеличению капель аэрозоля в процессе соударений), двигающуюся более или менее быстро в зависимости от скорости газа.

— Если V < 2 м/с, капли быстро собираются в нижней части газопровода.
— Если 2 м/с < V < 5 м/с, то бóльшая часть жидкости собирается на дне, но появляются туман и волны.
— Если V > 5 м/с, туман движется вместе с тонкой пленкой на стенах трубы.

Два феномена (механизма) могут объяснить аккумуляцию жидкости в особых точках сети:

— специфическое увлечение жидкости к определенным ответвлениям, служащим ловушками, в соответствии с их геометрией и режимом истечения;
— уменьшение скорости истечения, вызванное распределениям расхода в разветвленной части сети.



Истечение жидкости в ответвлении.

7.3.3.4. Способы определения риска конденсации

Чтобы предупредить этот риск, надо уточнить реальное количество и качество конденсата, способного выпасть в зависимости от условий эксплуатации транспортных и распределительных сетей.

Переносные аппараты позволяют определить риск появления жидких углеводородов в рассматриваемой сети и пределы этого эффекта.

7.3.3.5. Средства предотвращения

Снижение давления при постоянной температуре ведет к снижению количества конденсата.

Наконец, при снижении скорости газа конденсат скапливается более быстро на дне трубопровода. Это же должно улучшить теплообмен с почвой, т.е. увеличить температуру, что способствует испарению.

Эти решения не всегда могут быть реализованы. Одно из решений состоит в сепарации и сборе жидкости.

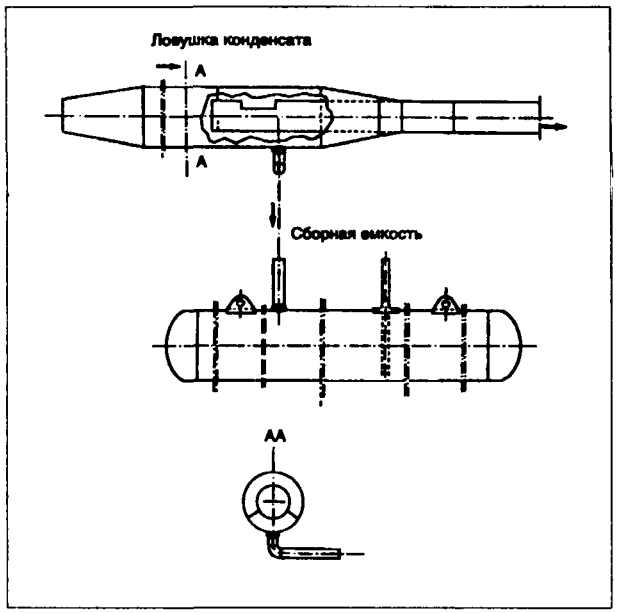


Схема сбора конденсата на выходе из поста снабжения.

Сепарацию можно произвести с помощью горизонтального или сферического сепаратора.

Когда сепарация газ–жидкость уже осуществляется, единственная рекуперация, которую можно рассматривать, это установка в нижней части сети сифона.

7.3.4. Проблемы пыли

7.3.4.1. Происхождение пыли

Пыль, находящаяся в транспортных сетях, возникает от нагара при изготовлении труб или внутренней коррозии.

В распределительных сетях пыль появляется прежде всего вследствие высушки составных, находящихся в искусственном газе, и внутренней коррозии.

7.3.4.2. Средства обработки

Пыль, которая перемещается, в некоторых случаях, при достижении скорости газа 9 м/с, изъедает трубопроводы, если это продолжается долго.

Для исключения перемещения пыли в распределительной сети посты регулирования оборудуются фильтрами, использующими эффект циклона (сбор пыли с помощью гравитации) или фильтрующими патронами, задерживающими частицы размером 5 - 10 мкм. Пыль может мешать сжиганию газа, фильтр вмонтирован также в индивидуальном регуляторе.

Аппаратура, служащая для системы пневматического регулирования, оборудуется более тонкими фильтрами (эффективность 1 - 2 мкм).

Дополнительную информацию о фильтрах см. в разд. 7.5.1.

7.4. Дросселирование газа (регулирование)

Теоретические аспекты приведены в разд. 1.11.

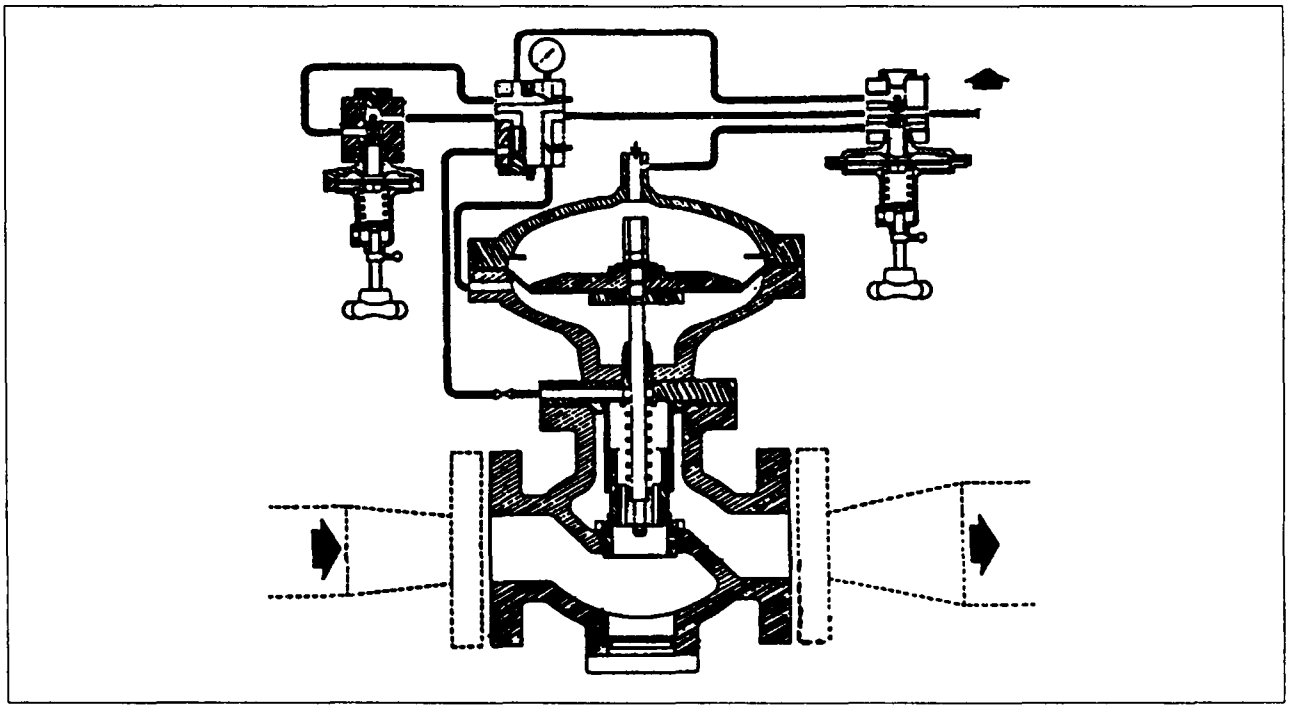
7.4.1. Технология регуляторов

7.4.1.1. Регулирование классическое

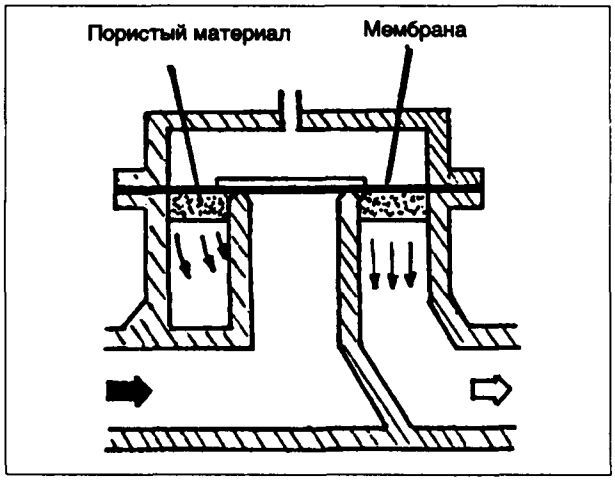
Прежде всего различают два типа аппаратов в соответствии с природой силы, действующей на мембрану (сервомотор) и символизирующей давление регулирования:

— силы, действующей с помощью рессоры, массы или неизменяемого давления газа: прямого действия;

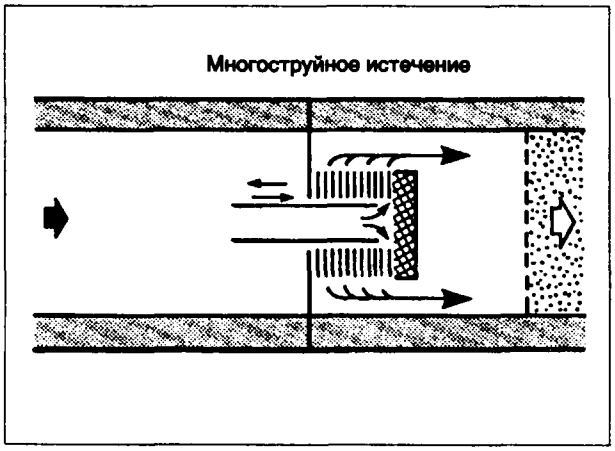
— силы, действующей регулируемым давлением с помощью вспомогательных диспозитивов (пилот): (с. 623) непрямого действия. В зависимости от реализации пилот может иметь постоянный или непостоянный расход, используя недуциированный газ или вспомогательные флюиды.



Регулятор непрямого действия.



Ступенчатое редуцирование через пористую среду.



Фракционное редуцирование.

7.4.1.2. Бесшумные регуляторы

Они используют те же принципы, что и классические аппараты. Их особенности заключаются в их принципах действия:

— скорость никогда не достигает скорости звука: редуцирование многоэтажное через лабиринт и пористый корпус;

— разделение потоков газа: редуцирование фракционное или многопоточное.

7.4.1.3. Регулятор-счетчик

Используя свойства трубопроводов, работающих в звуковом режиме, этот аппарат выполняет одновременно функции регулятора давления на выходе и счетчика (см. с. 625):

— сверхдавление закрытия – это величина давления, возникающего на выходе из аппарата после закрытия;

— реакция аппарата – открытие или закрытие в случае разрыва мембраны.

Таблица иллюстрирует общие тенденции аппаратов:

	Прямого действия	Пилотный
Давление на входе	MP	MP и HP
Расход максимальный	≤ 1 000 нм^3/ч	> 1 000 нм^3/ч
Точность (% *p* выхода)	± 5	± 1 и 2%
Изменение расхода	Быстрое	Медленное
Реакция на порыв мембраны	Открытие	Закрытие

7.4.1.4. Технологический выбор

Регулятор выбирается в зависимости от его совершенства и следующих критериев:

— предельное давление на входе и расход, т:
  · максимальные и минимальные давления для которых предусмотрен аппарат,
  · интервал расходов, в котором регулирование эффективно;
— степень регулирования (редуцирования) – отношение давления на входе к давлению на выходе;
— надежность, аппарат называется надежным если поставленный в одни и те же условия он дает всегда одинаковый результат;
— точность, она характеризуется отношением между максимальным и минимальным давлением на выходе для данной регулируемой величины аппарата и для всех величин расхода;
— чувствительность, она характеризуется способностью реагировать на изменение давления малой амплитуды;
— стабильность, она определена временем нестационарного режима, если расход аппарата изменяется.

В общем виде находим компромисс между чувствительностью и стабильностью.

7.4.2. Конструкция поста регулирования

Регулятор редко устанавливается один. Другие аппараты, выполняющие разные функции: краны, фильтр, байпасс, клапан-отсекатель и т.д., обычно сопровождают его.

Перечисленные аппараты и элементы трубопроводов служат в соединении для создания *блока регулирования.*

Постом регулирования называется ограждение или специально предназначенное здание, занятое блоком редуцирования.

7.4.2.1. Оборудование, сопровождающее регулятор

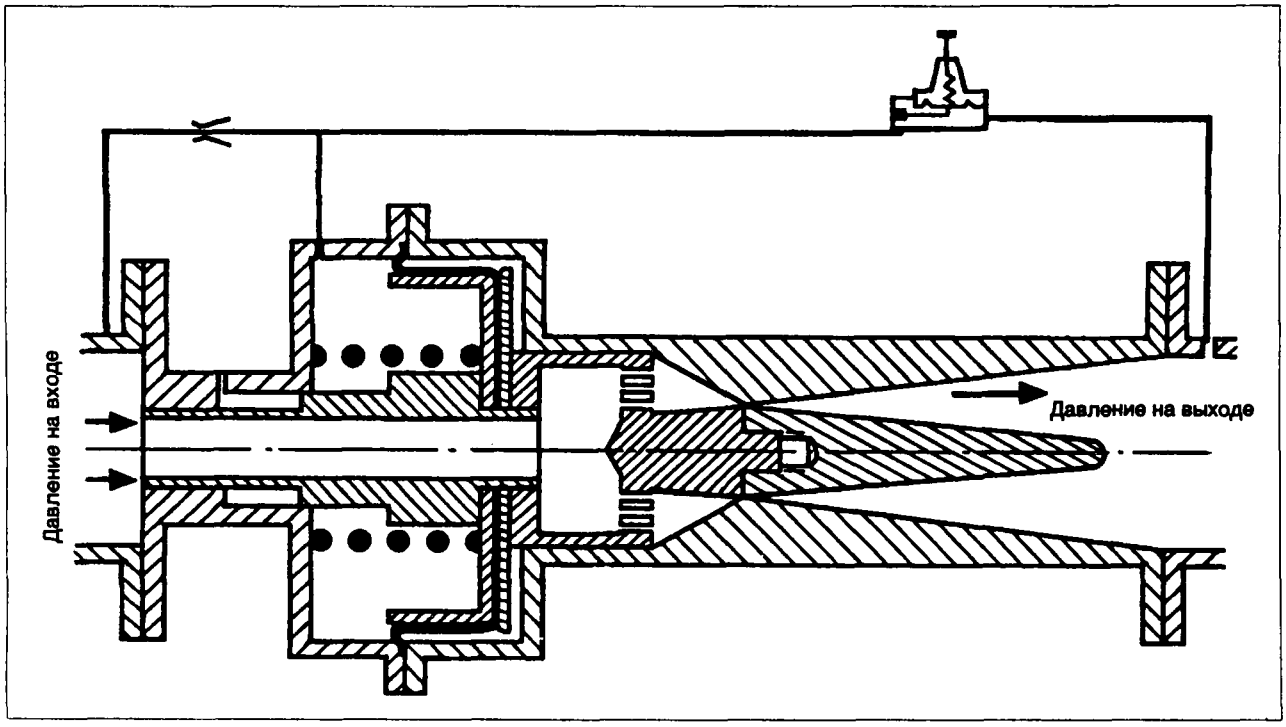
Оно служит для следующих целей:

— управления циркуляцией газа – функция перекрытия;
— защиты от износа и засорения аппаратов, расположенных на выходе – функция фильтрования;
— защиты сети на выходе от нарушения регулирования – функция безопасности;
— защиты от электрического тока – функция изоляции.

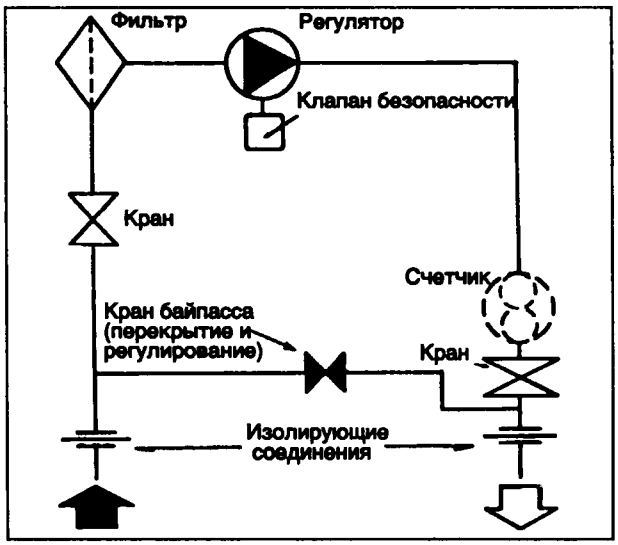
Краны и фильтры описаны в разд. 7.5.

Функции безопасности осуществляются различными аппаратами, кранами и клапанами безопасности. Их роль состоит в автоматическом прекращении расхода газа на линии, где они установлены, если давление превысит предварительно установленную величину.

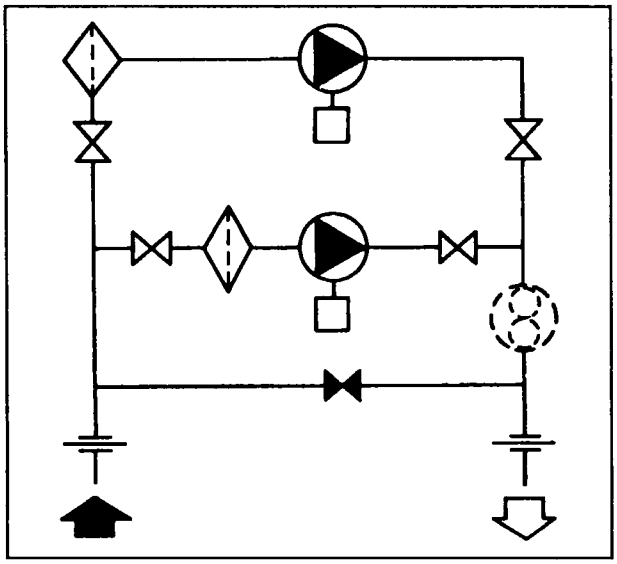
Принцип действия базируется на влиянии изменения давления газа в ту или другую сторону от установленного значения на мембрану, чтобы получить усилие.



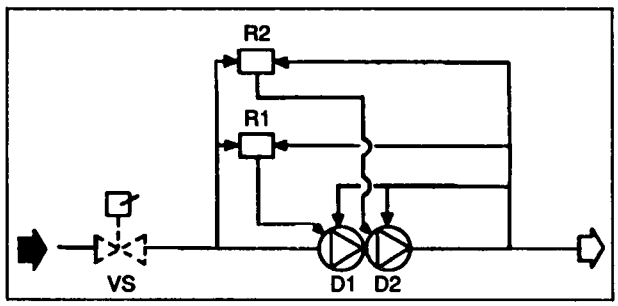
Регулятор-счетчик.



Пост регулирования с простой линией.



Пост регулирования с двойной линией.



Монтаж "Монитор".

Это в основном увеличение и приведение в действие путем перенесения и/или поворота заслонки (затвора).

Основные качества оборудования, обеспечивающие безопасность, следующие:

— надежность по отношению к контролируемой величине;

— нечувствительность к внешним воздействиям (вибрация, температура и т.д.).

Но к блоку регулирования может быть добавлено другое оборудование для учета, обработки и/или нагрева газа.

Может быть установлен байпасс блока регулирования. Он имеет обычно два крана (изолирующий и регулирующий). Этот диспозитив не устанавливается на посту снабжения котельных.

7.4.2.2. Типовой блок регулирования

Различают два типа блоков регулирования.

7.4.2.2.1. С простой (одной) линией

Применение: пост потребителей или общественный пост распределения, сеть на выходе которого снабжается несколькими источниками.

Может быть установлен предохранительный клапан, срабатывающий в случае, если давление на выходе больше или меньше, или в одном из этих случаев. После срабатывания он может вводиться в действие только вручную.

Между различными аппаратами должен быть предусмотрен эквипотенциальный проводник, соединенный с землей.

7.4.2.2.2. С двойной линией

Применение: пост крупных потребителей, снабжение которых не должно прекращаться (госпиталь, индустрия и т.д.) или общественный распределительный пост, сеть на выходе которого не снабжается от нескольких источников.

В случае нарушения функционирования основного регулятора он изолируется автоматически предохранительным клапаном, расположенным на входе. Вторая линия (безопасности) заменяет линию, вышедшую из строя.

В случае линии регулирования, описанной для общественного поста перед этим, применяется монтаж типа "Монитор", который объединяет два последовательно установленных регулятора с пилотом.

7.4.2.3. Правила устройства поста регулирования

7.4.2.3.1. Регламент административный

Посты регулирования подчиняются тем же правилам, что и трубопроводы, на которых они установлены.

Они не требуют разрешений на строительство и не входят в регламент установок, классифицированных для защиты окружающей среды (кроме случаев, когда вспомогательные установки этого требуют).

Расположение поста регулирования потребителей должно соответствовать тексту действующих правил (жилые дома, общественные здания и т.д.).

7.4.2.3.2. Техническая регламентация

Блок (пункт) редуцирования подчиняется указу от 11 мая 1990 г., когда соблюдены условия, указанные в разд. 7.9.1.1.

Оборудование поста регулирования подчиняется также DTV, указу от 2 августа 1977 г. и регла-

ментирующим документам общественных зданий.

Некоторые аппараты регуляторного пункта подчиняются различным регламентирующим документам:

— аппараты под давлением газа,
— аппараты замера расхода,
— электроустановки для освещения и обогрева поста.

7.5. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СЕТЕЙ

7.5.1. Фильтры

Фильтры – это оборудование, которое служит для защиты чувствительных аппаратов от пыли и твердых частиц, находящихся в потоке газа. К этим аппаратам относятся регуляторы, счетчики, аппараты использования газа, расположенные за постом.

Они подразделяются в зависимости от:

— класса давления,
— расхода, проходящего через фильтр,
— минимального давления,
— положения корпуса (вертикальный или горизонтальный) и положения патрубков входа и выхода.

Размерные критерии		В зависимости от положения корпуса фильтра	
		Вертикальное	Горизонтальное
Минимальное давление на входе	Класс давления 19 бар	6 бар	
	Класс давления 4 бар	1 бар	1 бар
			3 бар, случай упрощен
Минимальная поверхность фильтрования		0,6 м^2 для 100 м^3/ч	
Максимальная скорость движения газа вдоль фильтрующего элемента		≤ 3 м/с	
Объем кармана для пыли (объем свободный под фильтровальным элементом, способный собрать падающую пыль)		2 дм^3 для 100 м^3/ч	Нет

Характеристика фильтров.

Критерий потерь давления	В зависимости от положения корпуса фильтра			
	Давление на входе	Вертикальное		Горизонтальное
		Класс 19 бар	Класс 4 бар	Класс 4 бар
Потери давления в новом состоянии при номинальном расходе	1 бар		<30 мбар	<30 мбар
	3 бар			<30 мбар упрощенный
	6 бар	<150 мбар		
Потери давления при нормальной работе, номинальном расходе в течение 3600 ч и запыленности газа 2,5 мг/нм^3.		≤ 500 мбар	≤ 100 мбар	≤ 100 мбар

Потери давления.

На распределительной сети используют фильтры с фильтрующими патронами (кассетами) из фетра, полипропилена или бумаги.

Материал, составляющий фильтрующий элемент, должен иметь следующие характеристики:

— открытая пористость >70%;
— средний максимальный диаметр пор 10 мкм;
— число пор на 1 $см^2$ ≥ 5 000;
— удельная поверхность (отношение общей поверхности открытых пор к объему) ≥0,25 $м^2/см^3$.

Порог фильтрации должен быть ниже 5 мкм от начала фильтрования.

7.5.2. Задвижки (краны)

Задвижки (краны) – это аппараты, оборудованные затвором, приводимым в движение снаружи, которые позволяют устанавливать, прерывать или изменять расход флюидов в трубопроводе или установке.

7.5.2.1. Терминология

В конструкции этих аппаратов вне зависимости от типа и функций задвижек всегда встречаются определенные базовые элементы, такие как:

— подвижный элемент, клапан или затвор, по аналогии с регулятором;
— неподвижный элемент, на который устанавливается клапан в закрытом положении, называемый седлом;
— элемент управления в подвижной части – шток;
— элементы, обеспечивающие герметичность:
  · внутреннюю – "сочленение седла" или "гарнитура седла",
  · наружную, особенно вдоль штока управления – говорят "сочленение" (соединение) штока или "гарнитура" штока, или еще "сальниковая гарнитура".

В соответствии с технологией реализации французские нормы E29-307 дают для различных типов задвижек название деталей, составляющих каждую арматуру.

7.5.2.2. Классификация задвижек в соответствии с их конструкцией

Задвижки различаются по названию их затворов, терминология которых зафиксирована нормами "Afnor NFE29-306".

Различают:

— задвижки.

Задвижки – это арматура, затвор которой перемещается перпендикулярно от движения флюидов;

— краны (клапанные задвижки).

Краны (клапанные задвижки) - это арматура, затвор (клапан) или поршень которой перемещается в том же направлении, что и истечение флюидов (см. с. 629);

— задвижка шиберная (бабочка).

Задвижка шиберная (бабочка) с затвором "бабочкой" (поворотная) – это арматура, затвор которой перемещается в флюидах путем вращения вокруг оси, вертикальной по отношению к истечению флюидов (см. с. 629);

— краны поворотные.

Краны поворотные – это арматура, затвор которой (пробка) имеет проход (окно) и перемещается вращением вокруг оси перпендикулярно к истечению флюидов.

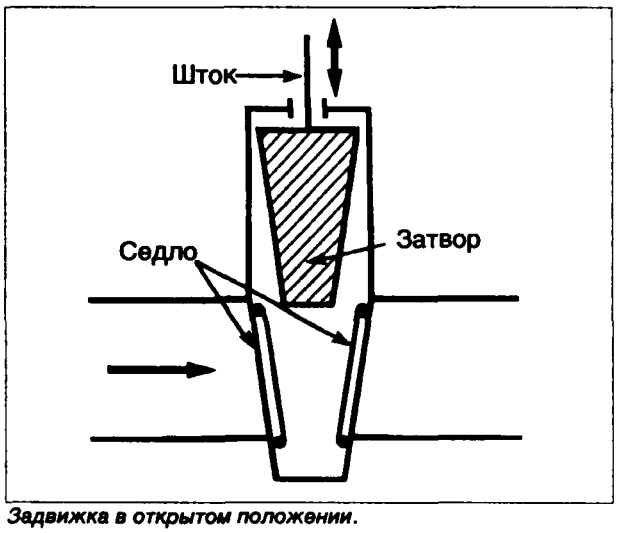
Краны этих типов могут иметь затворы цилиндрической, конической или сферической формы.

Для каждого типа этих кранов, особенно для кранов со сферическими пробками, есть названия: кран с полным (интегральным) проходом, если этот проход круглой формы и равен сечению входного и выходного патрубков; кран с частичным сечением (проходом), если сечение меньше диаметров патрубков (см. с. 629).

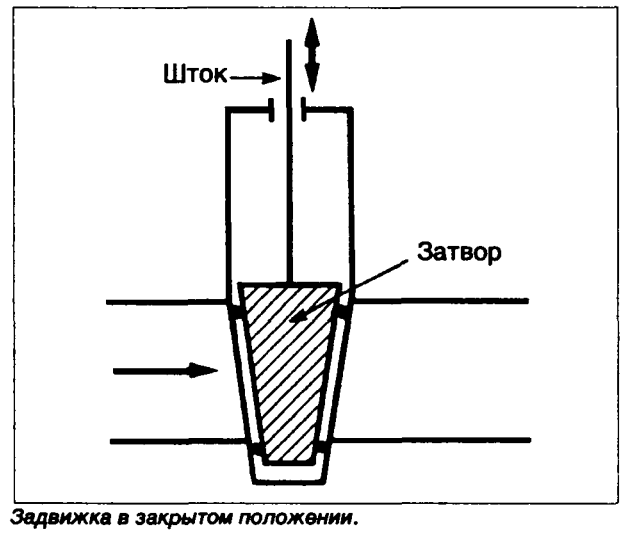
7.5.2.3. Классификация задвижек в зависимости от их функций

— Задвижки регулирующие.

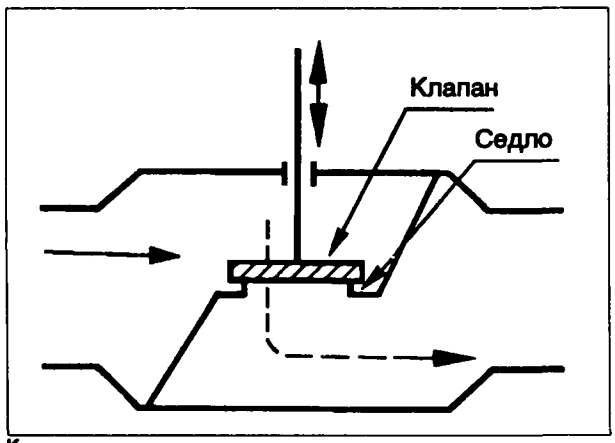
Они позволяют изменять расход, создают перепад давления, следовательно, редуцирование.



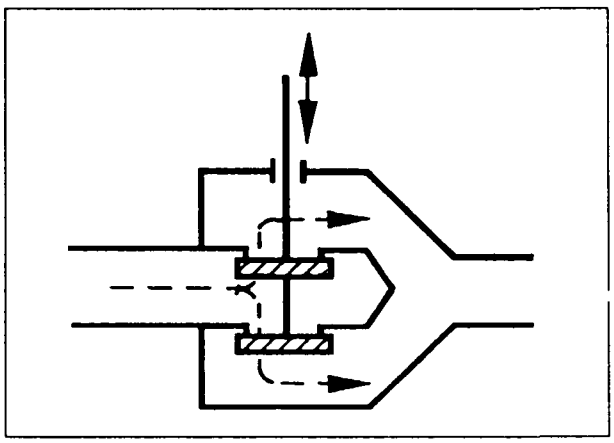
Задвижка в открытом положении.



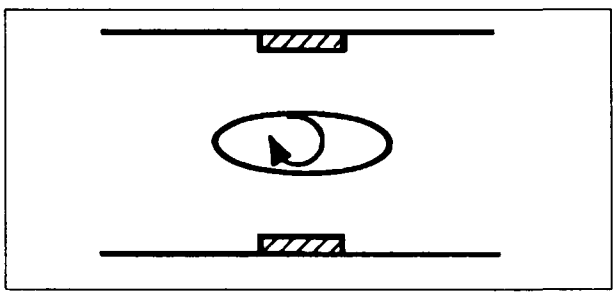
Задвижка в закрытом положении.



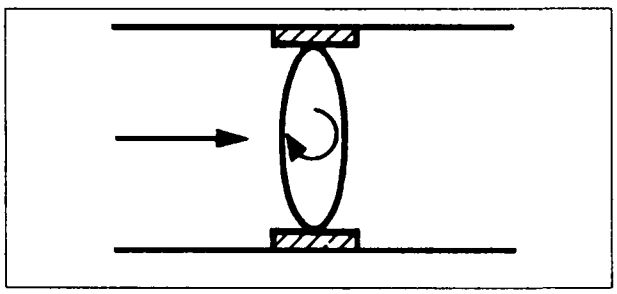
Кран-вентиль с простым клапаном в закрытом положении.



Кран-вентиль с двойным клапаном в закрытом положении.



Кран с затвором "бабочка" в открытом положении.

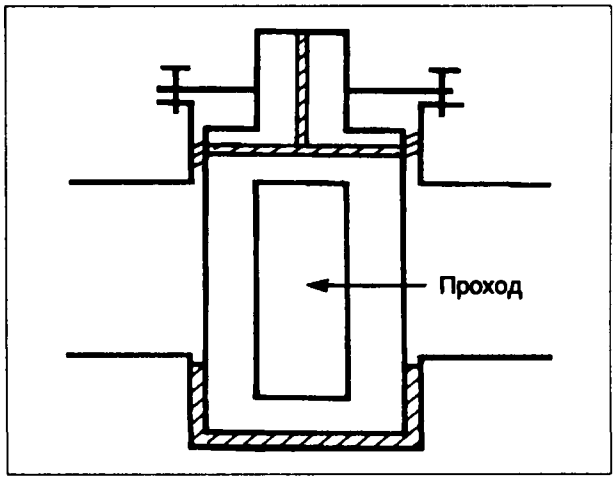


Кран с затвором "бабочка" в закрытом положении.

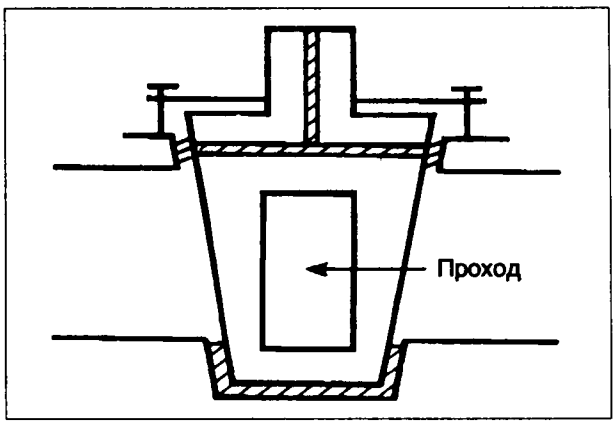
— Задвижка запорная.

Ее основная функция – прекращать подачу газа.

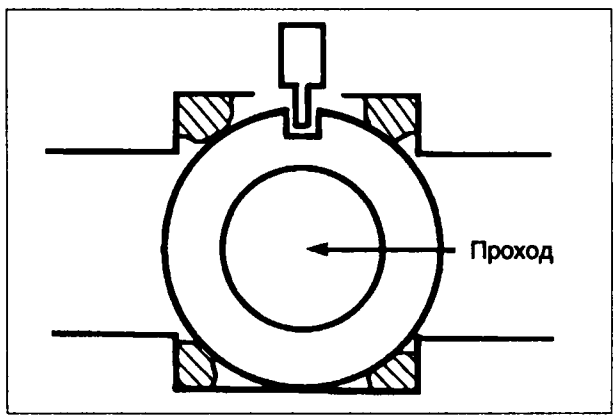
— Задвижки "многоструйные".



Кран с цилиндрической поворотной пробкой.



Кран с конической поворотной пробкой.



Кран сферический.

В основном трехходовые, они позволяют направлять расход по разным направлениям.

7.5.2.4. Критерии выбора задвижек, используемых на сетях

Принципиальные критерии выбора задвижек следующие:

— назначение (в сети, на ответвлении, в посте регулирования);

— максимальное рабочее давление;
— давление подземное или стояка;
— материалы изготовления (сталь, чугун, латунь, полиэтилен);
  · сталь или чугун; задвижки предназначены для подземных сооружений, задвижки из стали покрываются изоляцией для защиты от коррозии,
  · латунь; задвижки используются на стояках для малых диаметров (≤50мм) и также подземные (изолированные),
  · полиэтилен; задвижки используются только на трубопроводах полиэтилена.

7.5.2.4.1. Типы соединений

Подземные задвижки:

— сваркой в линию (задвижка стальная со сталью);
— пайкой или сварко-пайкой (краны латунные с медью);
— фланцевые (задвижки стальные, чугунные, латунные);
— патрубками электросварными (краны полиэтиленовые с полиэтиленом).

Задвижки (краны) на стояках:

— фланцевые (сталь, чугун, латунь);
— резьбовые соединения (латунь, DN ≤ 50), прокладки плоские или сферо-коническое соединение.

7.5.2.4.2. Способы управления

В общем случае управление осуществляется поворотом на четверть оборота, закрытие – вращением по часовой стрелке.

Для определенных задвижек большого диаметра с вынесенной парой управления с помощью редуктора четверть поворота может трансформироваться в несколько оборотов.

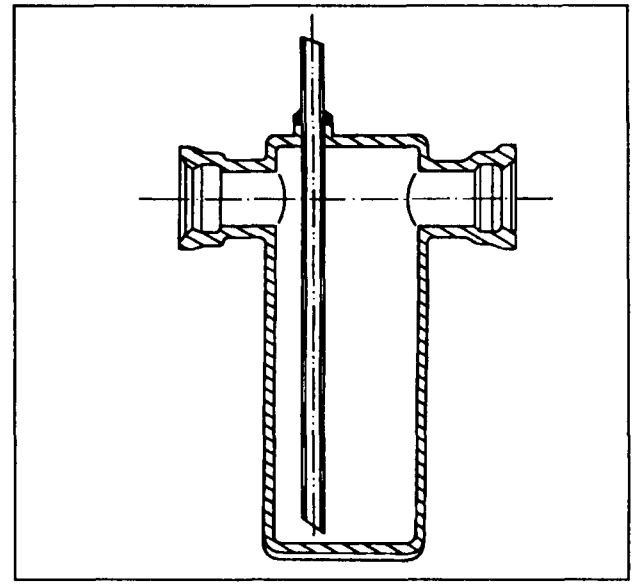
7.5.3. Сифон

Служит для сбора продуктов конденсации, которые могут скапливаться в газопроводах. Сифоны устанавливаются в нижних точках сети низкого давления. Они состоят из патрубков соединения с трубопроводами и емкости, называемой корпусом (кожухом) или приемником.

Приспособления для удаления конденсата, дополняемые при необходимости устройством хранения.

Спецификация ATGB 125-10 и B 125-11 для сифонов из чугуна.

Сифоны-изоляторы указываются для сведения, так как в настоящее время не применяются из-за опасности непредусмотренного прекращения подачи газа в сеть.



Сифон.

7.6. ПОДСОЕДИНЕНИЯ – ДОМОВЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ – УСТАНОВКИ

7.6.1. Подсоединения и домовые трубопроводы

7.6.1.1. Терминология и структура

7.6.1.1.1. Терминология

Эти сооружения служат для транспорта от распределительной сети до, включая входную задвижку (кран), счетчика.

Принципиальные элементы подсоединения определены статьей 2.2. Указа от 2 августа 1977 г. или в документации "Терминология" DTU 61.1 (апрель 1982 г., модификация - июнь 1984 г.).

7.6.1.1.2. Регламентированная классификация различных видов зданий

7.6.1.1.2.1. Жилые здания

Эти здания классифицируются на пять типов в зависимости от уровня и/или высоты.

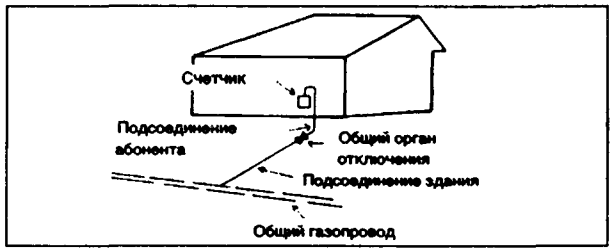
7.6.1.1.2.2. Здания, принимающие публику (общественные здания) (ERP)

Эти здания подразделяются на пять категорий.

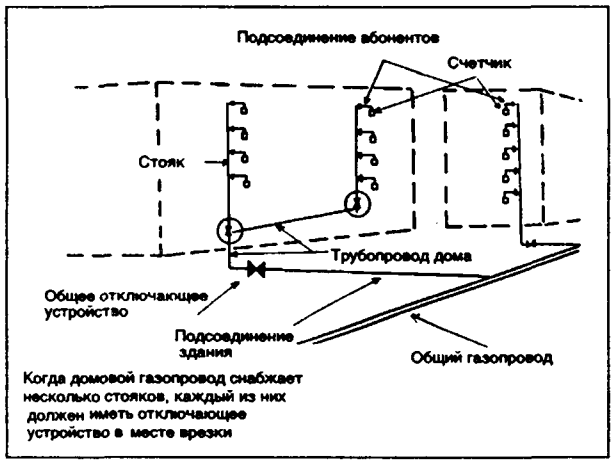
7.6.1.1.2.3. Котельные

Эти здания, где находится один или несколько аппаратов, производящих тепло, полезная мощность которых больше 70 кВт.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ



Индивидуальный дом.



Коллективный дом.

7.6.1.1.3. Классификация жилых домов

7.6.1.1.3.1. Первый род

Индивидуальный, изолированный или спаренный дом не более двух этажей.

Индивидуальные дома в один этаж, соединенные одним фундаментом.

7.6.1.1.3.2. Второй род

Индивидуальные жилые дома, изолированные или спаренные более чем в два этажа.

Индивидуальные жилые дома только в два этажа, объединенные общим фундаментом, когда стабильность каждого дома зависит от стабильности сочлененных зданий.

Индивидуальные жилые дома более чем в два этажа на общем фундаменте.

Коллективные жилые дома - самое большее в четыре этажа.

7.6.1.1.3.3. Третий род

Здания, в которых нижняя часть перекрытия самой высокой квартиры расположена не более чем в 29 м от земли, доступной для машин безопасности (скорой помощи), пожарных.

Среди этих зданий различают:

— третьего рода А: здание не более восьми этажей, в которых расстояние между дверью на лестничную площадку и входом на лестницу не превышает 7 м;
— третьего рода В: здания, не удовлетворяющие предыдущим условиям.

7.6.1.1.3.4. Четвертый род

Здания, в которых нижняя часть перекрытия наиболее высокой квартиры расположена выше 29 м и не более 50 м от земли, пригодной для приема машин скорой помощи и пожарных машин.

7.6.1.1.3.5. Пятый род

Здания большой высоты (IGH): коллективные (жилые) здания, низ перекрытия наиболее высокой квартиры которых находится на высоте более 50 м.

7.6.1.1.4. Классификация общественных зданий (ERP)

См. таблицу с. 632.

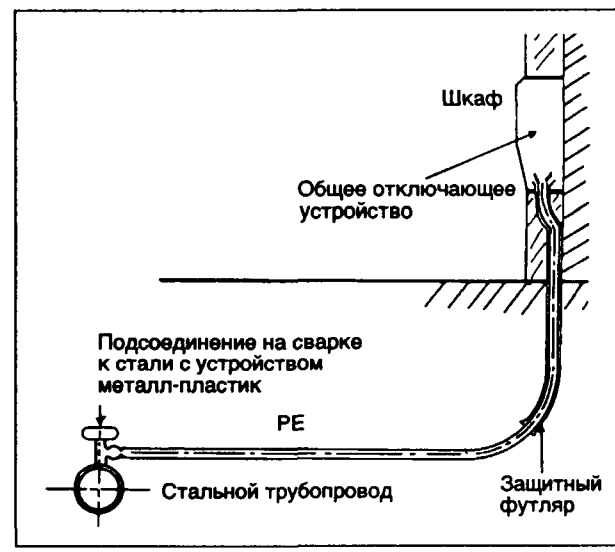
7.6.1.1.5. Структура подсоединений

Она включает:

— врезку в трубопровод сети;
— промежуточные трубопроводы;
— общее отключающее устройство;
— специальное оборудование подсоединения (задвижки, изолирующие соединения, регулятор, счетчик, блок врезки и т.д.).

Все подсоединения должны быть оборудованы общим устройством отключения, хорошо обозначенным, постоянно доступным с земли, легко управляемым, расположенным снаружи на расстоянии <20 м от здания и от соседей.

Это общее отключающее устройство предпочтительно устанавливается в шкафу над землей и при необходимости включает определенное оборудование.



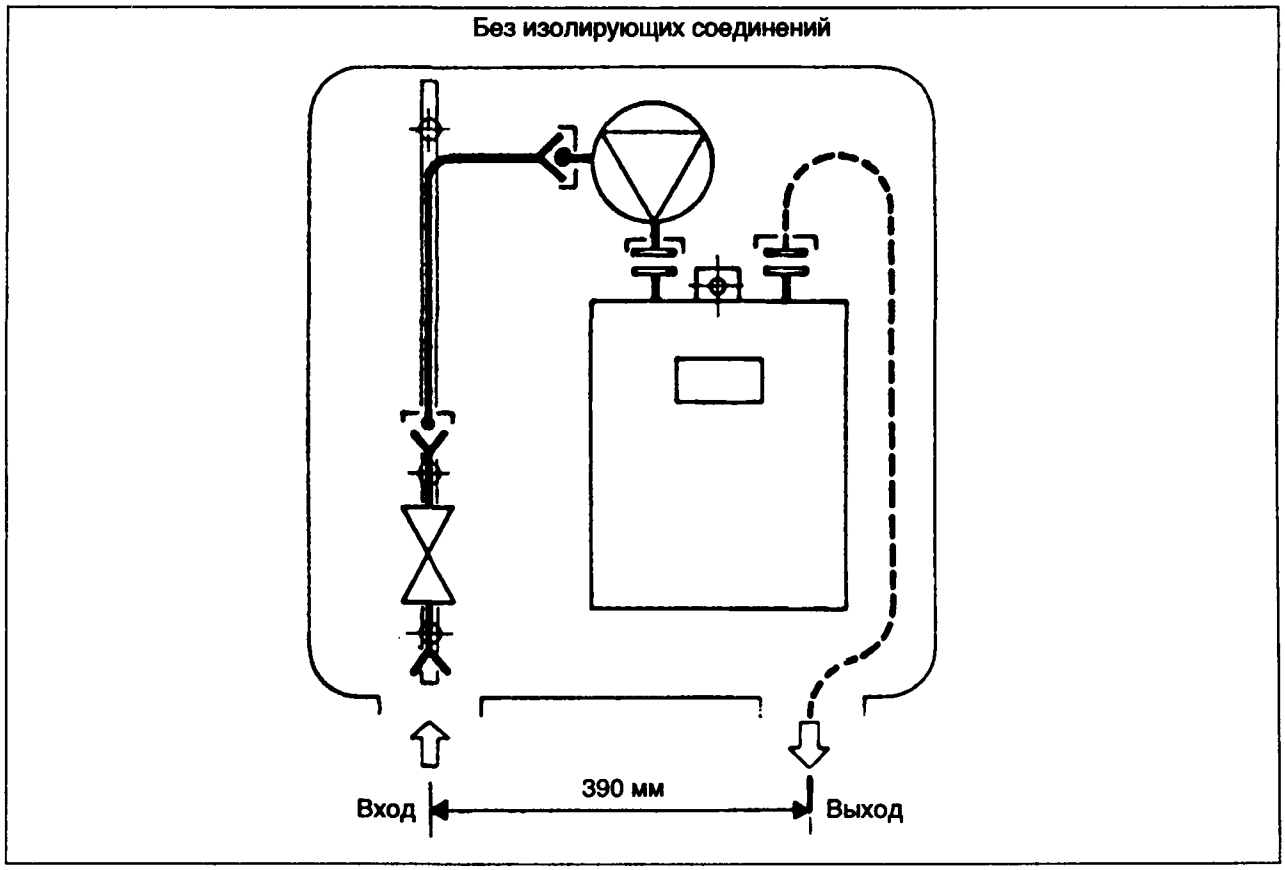
Подсоединение полиэтиленового газопровода к стальному.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Тип	Наименование		Количество принимаемых людей							
			Категория							
			4-я					3-я	2-я	1-я
			20	50	100		120	200	300	700	1.500
а) Учреждения в здании											
L	— Залы приемов, собраний, конференции и т.д.										
	Зал приемов, собраний	в подвале									
	Зал ассоциаций, зал квартала	в общем									
	— Другие учреждения	в подвале									
		в общем									
M	— Магазины, центры коммерции	в подвале или на первом этаже, других наружных сооружениях									
		в общем									
N	— Рестораны и продажа напитков	в подвале									
		на этаже, в галерее, в других наружных сооружениях									
		в общем									
O	— Отели, пансионаты	количество публики									
P	— Залы танцев и игр	в подвале									
		на этаже и других наружных сооружениях									
		в общем									
R	— Учебные заведения и заведения для отпуска	на этаже									
	— Роддома (запрет на подвал)	первый этаж									
	— Другие учреждения	в подвале									
		на этаже									
		на первом этаже									
		в общем									
S	— Библиотеки, музеи	количество публики									
T	— Залы выставок	в подвале на этаже, в галерее									
		в общем									
U	— Санитарные учреждения	количество одновременно консультирующихся (20 кроватей)									
V	— Учреждения культа	в подвале									
		на этаже или других сооружениях									
		в общем									
W	— Администрации, банки, бюро	в подвале									
		на этаже и других сооружениях на воздухе									
		в общем									
X	— Спортивные закрытые учреждения	в подвале									
		на этаже, в галерее, в других сооружениях									
		в общем									
б) Специальные учреждения											
CTS	Шапито, тенты										
PA	Учреждения на воздухе										
EG	Надувные сооружения										

Классификация общественных зданий.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ



Оборудование шкафа S-300 с поворотным краном, регулятором 4 или 6 м³/ч, счетчиком G4.

Характеристика отключающего устройства			
Устройство отключения	Число квартир на лестничной клетке		
	≤ 10 квартир	> 10 квартир	
	$p \geq 400$ мбар	$p \leq 400$ мбар*	$p > 400$ мбар
Диспозитивы общие	Легко управляемые	Закрытие быстрое, ввод в действие поставщиком	
Управление ручное	нет	нет	да
Случай использования DDMP			
Для $p > 400$ мбар*	2-й род		3 и 4-й род
	≤ 10 квартир	> 10 квартир	
D. D. M. P. (см. разд. 7.6.1.3.6.2.)	нет	да	да
*Давленин внутри зданий.			

Положения Указа от 2 августа 1977 г., относящиеся к коллективным зданиям и структуре подсоединения.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

7.6.1.1.6. Установка футляров на трубопроводах стояков

В коллективном жилом доме стояки, особые подсоединения, счетчики и, при необходимости, регуляторы устанавливаются в технических кожухах.

Техническая спецификация ATGB 600 уточняет характеристику стояков, изготовленных из меди. Ниже в таблице указаны диспозитивы, предназначенные для установки в футляре (кожухе).

Он устанавливается исходя из формулы Ренуара с учетом реальной длины, увеличенной за счет эквивалентной длины, создаваемой местными потерями, и максимального расхода в ответвлении.

Важное замечание:

Указом от 2 августа 1977 г. установлены максимальные внутренние диаметры для коллективных жилых домов в размере 108 мм при низком давлении (BP), 70 мм при MPA и 37 мм при MPB

Размеры подсоединения (ответвления) внутренних трубопроводов жилых домов определяются по графикам A1, A2, A3, A4, A5 (см. с. 635 - 639).

7.6.1.2. Размеры ответвления и трубопроводов жилых домов, снабжаемых природным газом

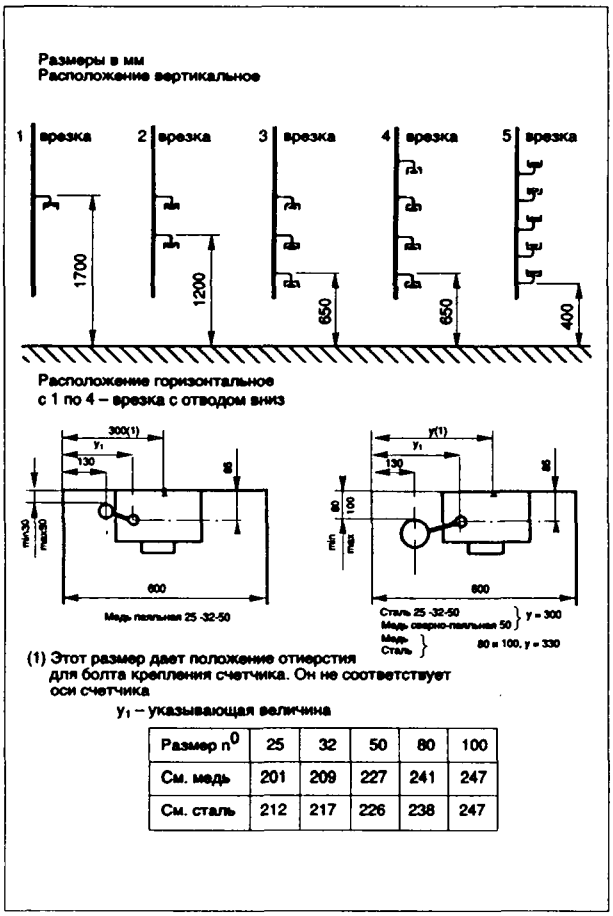
Размеры являются функцией:

— допустимых потерь давления,
— длины сооружения,
— осуществляемых расходов.

Использование графиков (см. с. 635 - 639) требует знания:

– горизонтальной длины } для индивидуальных подсоединений
– максимального расхода }
– числа уровней (этажей) } индивидуальный потребитель
– числа клиентов на этаже }
– комфортабельности
I – кухонная плита
II – кухонная плита + водонагреватель
III – кухонная плита + водонагреватель + отопление

} Ответвление коллективного жилого дома

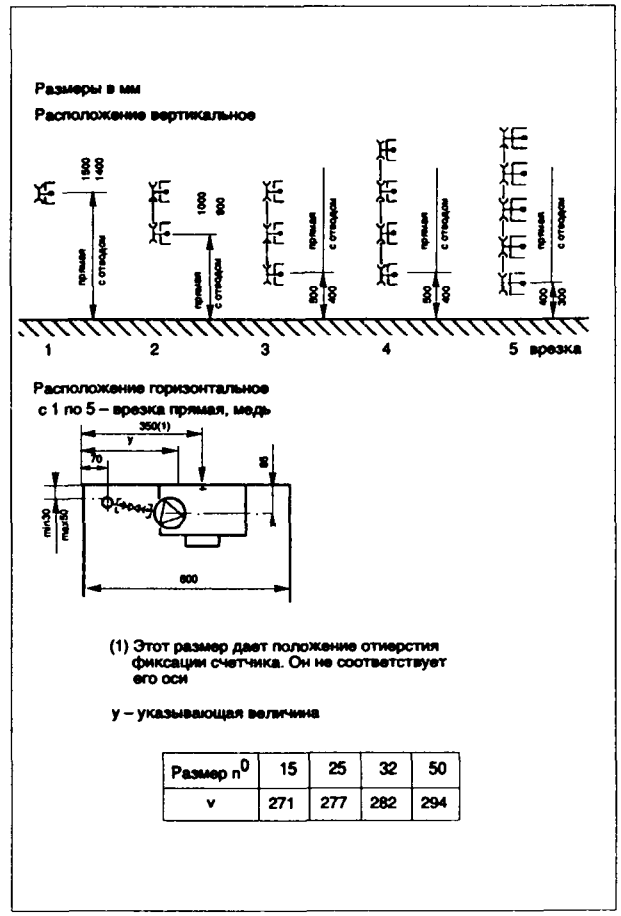


(1) Этот размер дает положение отверстия для болта крепления счетчика. Он не соответствует оси счетчика

y_1 – указывающая величина

Размер n°	25	32	50	80	100
См. медь	201	209	227	241	247
См. сталь	212	217	226	238	247

Стояки низкого давления.



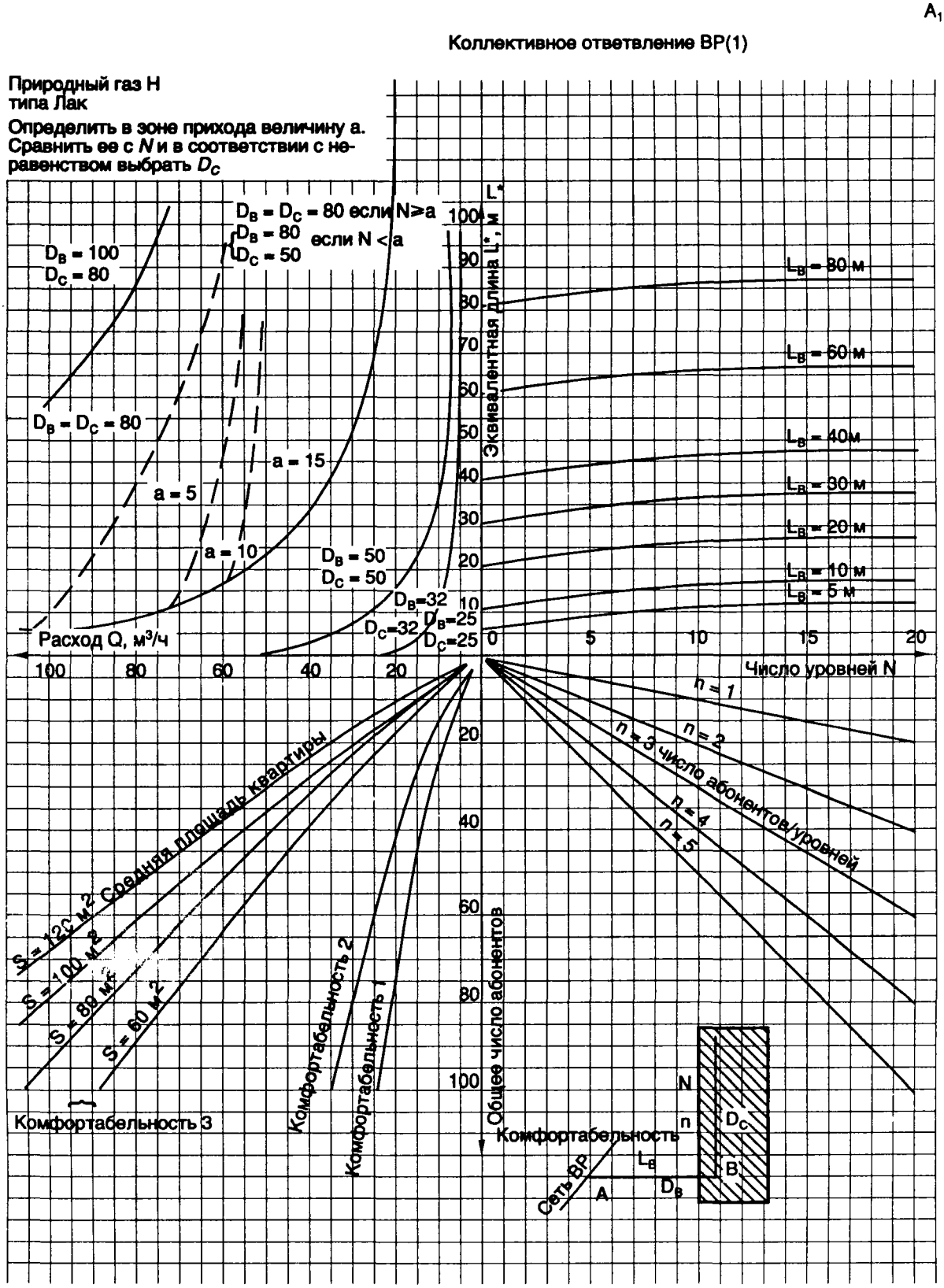
(1) Этот размер дает положение отверстия фиксации счетчика. Он не соответствует его оси

y – указывающая величина

Размер n°	15	25	32	50
v	271	277	282	294

Стояки высокого давления.

A1



(1) Для технического помещения эквивалентную длину на оси OL* умножить на 1,4 и объяснить в записке

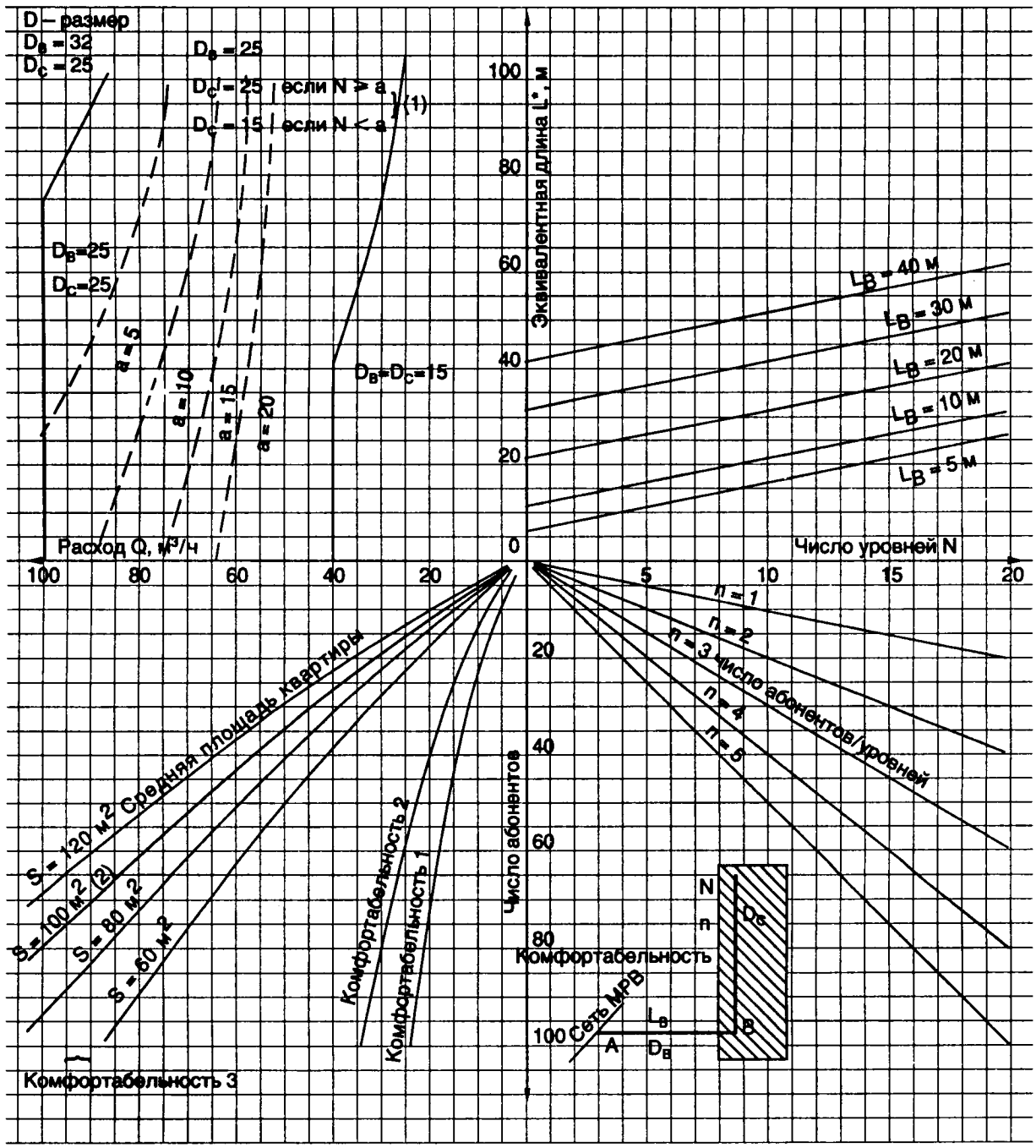
(2) Классический тип.

L – длина AB, м
Сопротивления – одна вырезка, 3 отвода, один кран

Природный газ H
типа Лак

A2

Коллективное ответвление MPB
(стояк MPB) (1)



(1) Определить в зоне прихода величину 2, сравнить ее с *N* и в соответствии с неравенством выбрать D_C

(2) Классический тип

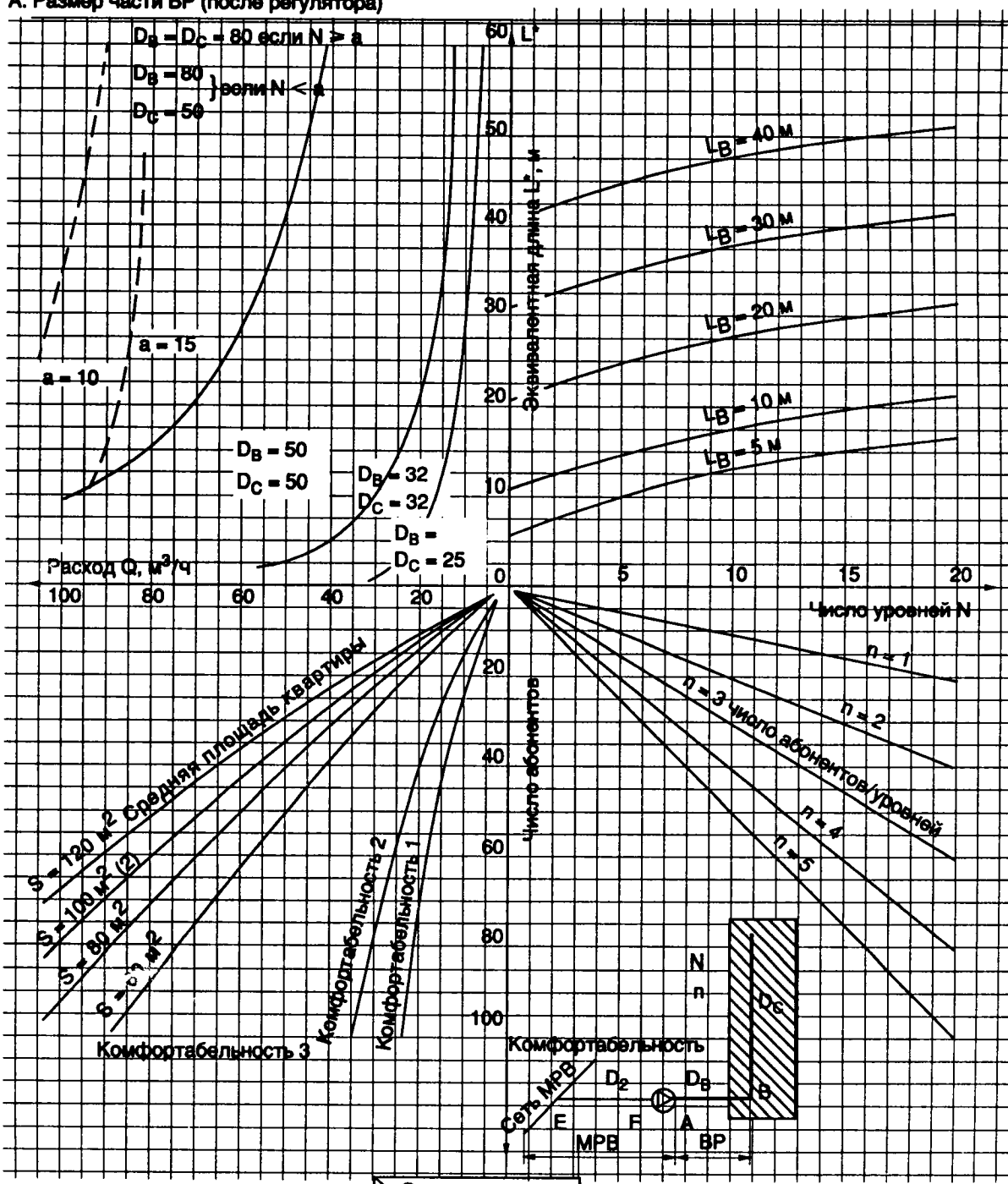
L_B – длина AB, м
D_B – размер трубопровода до стояка
D_C – размер стояка
Сопротивление – одна врезка

Природный газ H
типа Лак

Коллективное ответвление MPB/BP (1)
стояк BP

A3

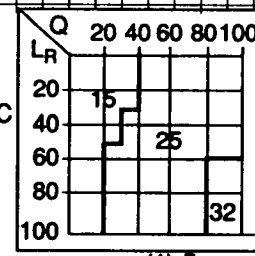
A. Размер части BP (после регулятора)



Определить в зоне прихода величину *a*, сравнить ее с N и в соответствии с неравенством выбрать DC

B. Размер части MPB

Q определять на оси OQ графика BP



Пример построения графика

часть MPB Сопротивление – врезка
L_R – длина TF, м

часть BP Сопротивления – 3 отвода, один кран
L_B – длина AB, м

(1) Для технического помещения и для части BP эквивалентная длина на оси OL* умножается на 1,2 и объяснить на 1 в записке CP3

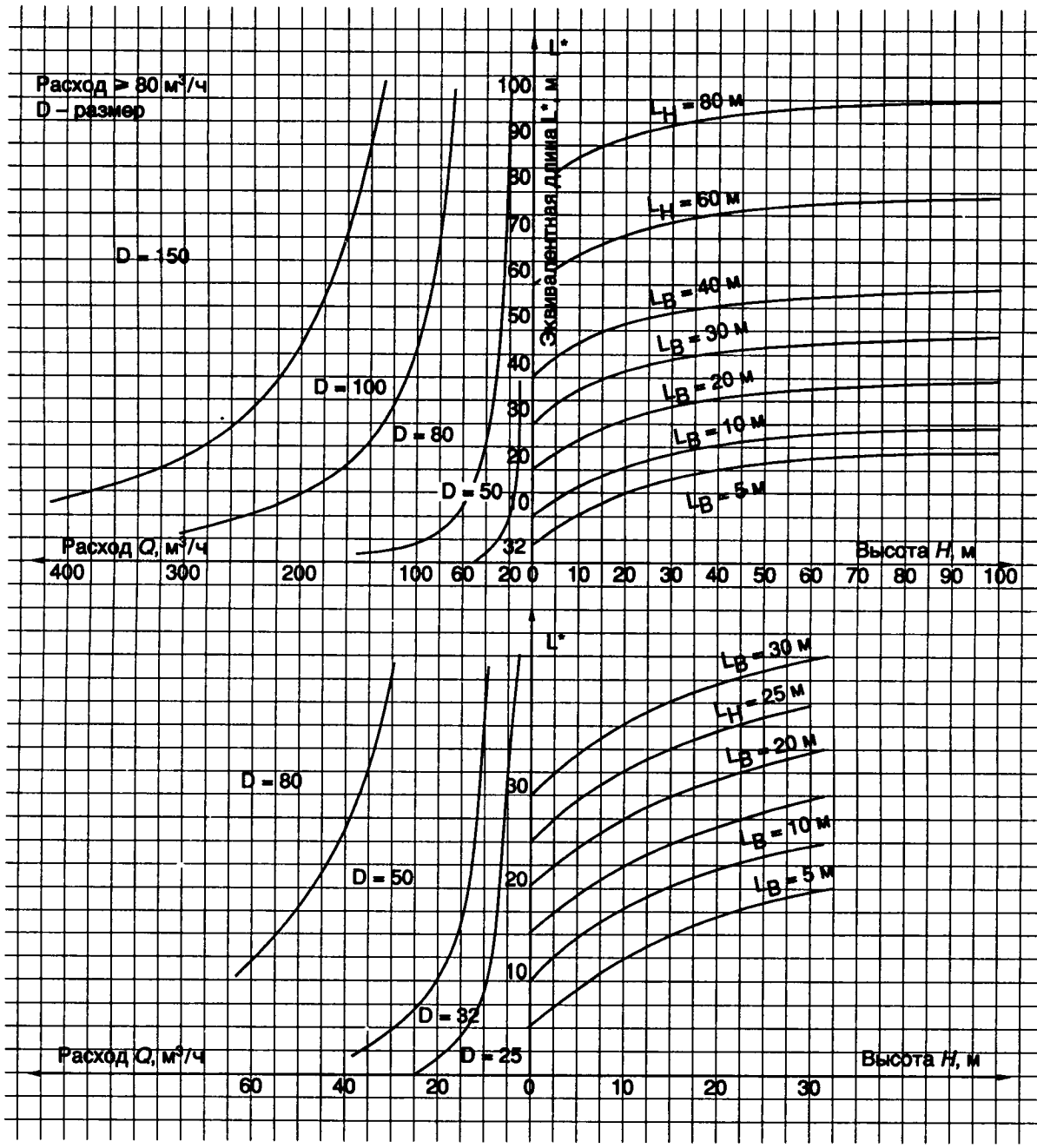
(2) Классический тип

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

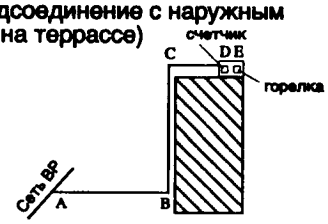
Природный газ H
типа Лак

A4

Индивидуальное подсоединение BP



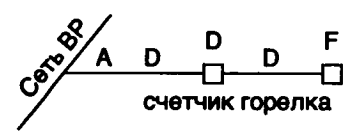
Индивидуальное подсоединение с наружным стояком (установка на террассе)



L_H – сумма ($AB + CE$), м
Горизонтальная часть увеличивается на 0,5 м (сопротивления – отвод, кран)

H – высота стояка, м

Индивидуальное горизонтальное подсоединение



Домашнее подсоединение
$L^* = AD + 0{,}5\ n$
Недомашнее подсоединение
$L^* = AD + DF + 0{,}5\ n$
(размеры в м)

n – сопротивления (отвод, кран)

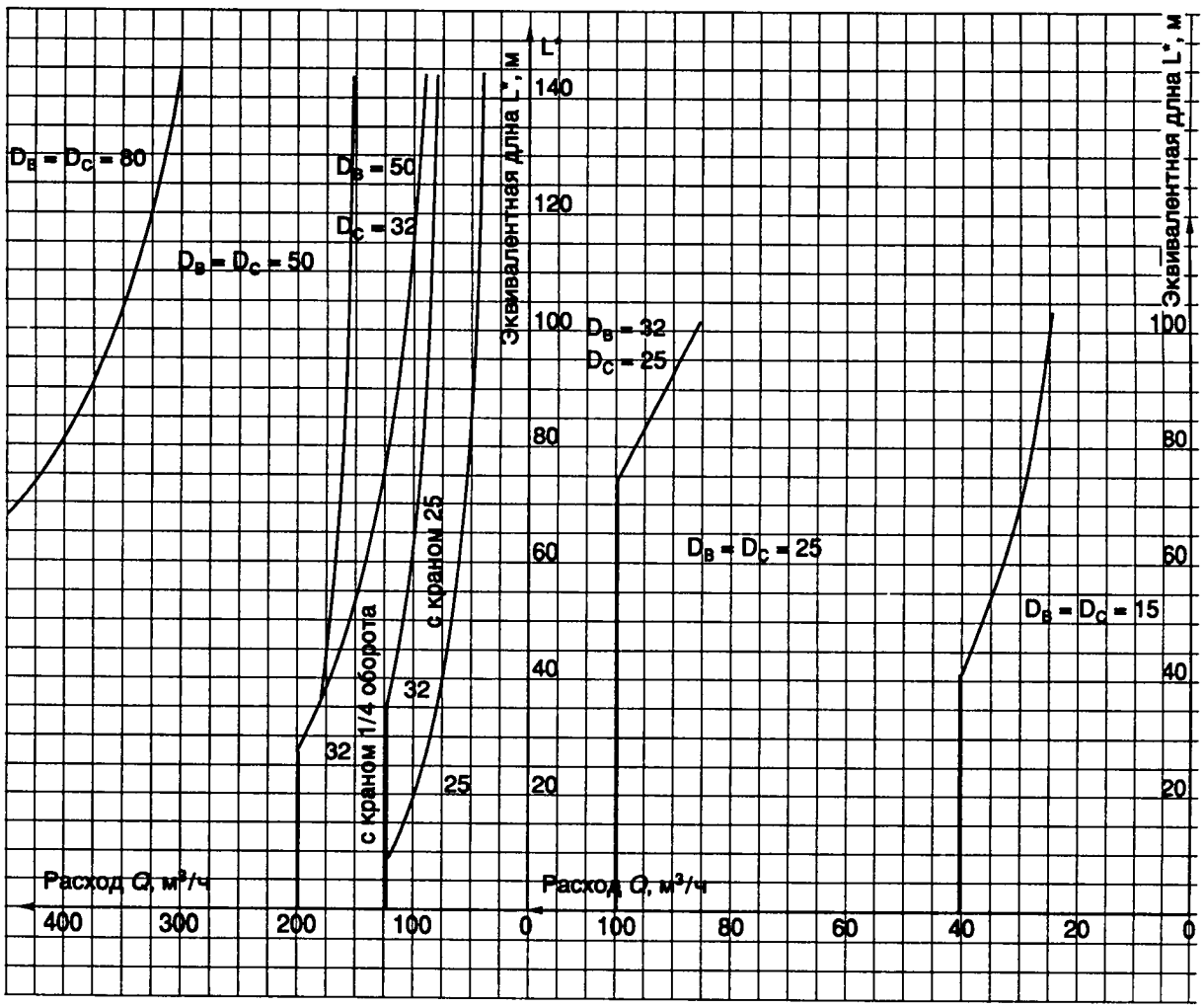
7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

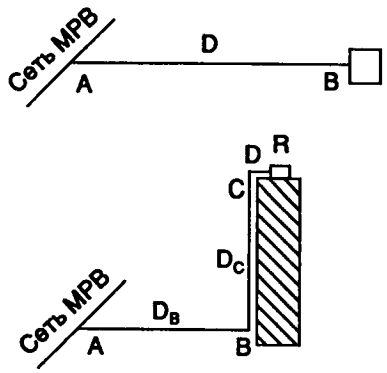
Природный газ H
типа Лак

A5

Индивидуальное подсоединение MPB не подключенное к механизму автоматического отключения (DDMP)

Давление на выходе регулятора 300 мбар **Давление на выходе регулятора 19 мбар**





1. Индивидуальное горизонтальное подсоединение :
L* – AB, м
Q – расход, м³/ч
D – размер трубопровода, $D = D_B$
R – регулятор

2. Индивидуальное подсоединение с наружным стояком :
L* – AB + BC + CD, м
Q – расход котельной, м³/ч
R – регулятор
D_B – размер трубопровода до стояка
D_C – размер стояка до регулятора на террассе

Сопротивления – один кран, одна врезка

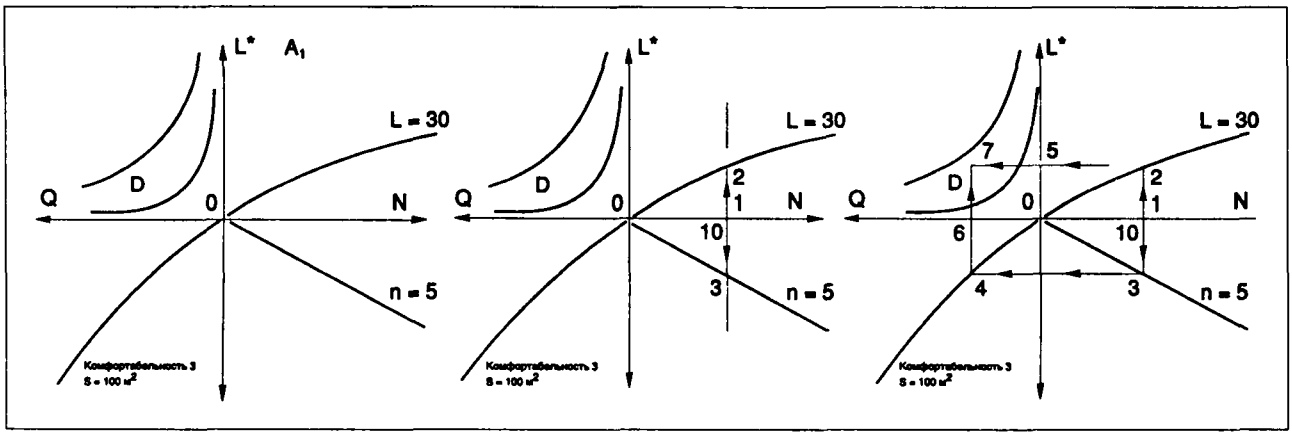
7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

ЗАПИСКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАФИКОВ (стр.635 -639)

Определение диаметра трубопровода с помощью графика.

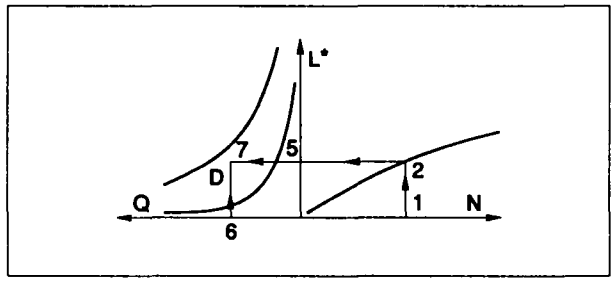
Пример: Коллективное ответвление ВР: N = 10, L = 30, комфортабельность 3, S = 100 м², *n* = 5.

1. Нанести на график А1 соответствующие данные, написанные на листе 1.
2. От точки 1, N = 10, провести параллель оси OL*. Она пересекает кривые L = 30 в точке 2 и *n* = 5 в точке 3.
3. От точки 3 проводят линию параллельно QON. Она пересекает линию комфортабельности 3 в точке 4. От точки 2 проводим параллель QON. Она пересекает OL* в точке 5 и представляет эквивалентную длину L. От точки 4 проводят параллель оси OL*. Она пересекает OQ в точке 6, эта точка представляет расход и пересекает 2 - 5 в точке 7. Эта точка попадает в зону, где указан размер D диаметра, D = 80.



Случай графиков в двух квадратах

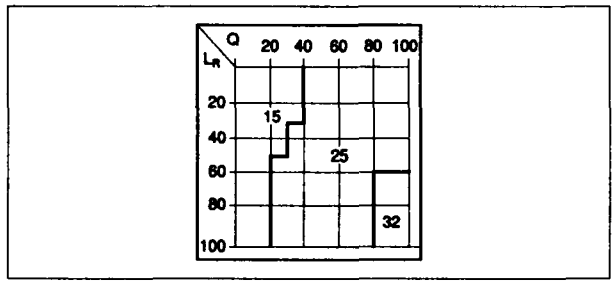
Построение такое же, как для точек 1и 6.



Случай ответвления МРВ/ВР, часть МРВ

Нанести L_R и Q.

На пересечении линии L_R и колонки Q найти размер D.

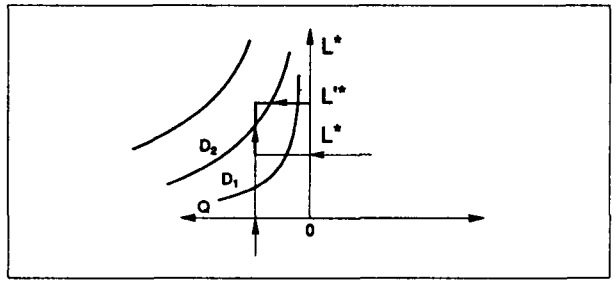


Модификация эквивалентной длины

В каждом отдельном случае эквивалентную длину находят на оси OL*, чтобы исправить.

Переносят на ось OL* новое значение эквивалентной длины L'*.

Находят новый размер D, как указано на рисунке.



7.6.1.3. Сооружение ответвлений и домовых трубопроводов

7.6.1.3.1. Врезка ответвлений

В стальной трубопровод:

— врезка прямая,
— с помощью тройника.

В чугунный трубопровод:

— соединение резьбовое с цилиндрической или конической резьбой,
— разъемное кольцо (очковое)
— тройник чугунный.

Резьбовая врезка может использоваться только, если отношение диаметров врезки и трубопровода меньше или равно:

— 1/4 для серого чугуна,
— 1/3 для ковкого чугуна.

Врезка в полиэтиленовый трубопровод осуществляется

— непосредственно,
— с помощью тройника.

7.6.1.3.2. Используемые материалы

На выходе из общего отключающего устройства:

— в подземном положении:
  · сталь изолированная,
  · медь,
  · свинец, исключительно в существующих индивидуальных домах (кроме пропана и бутана),
  · снаружи здания – полиэтилен.
— в наземным положении:
  · сталь,
  · нержавеющая сталь (стоянки наружные),
  · алюминий (только снаружи здания),
  · медь (кроме внутренних EPP для размера более 25 мм, если давление больше 400 мбар).

Материал сети	Материал ответвления						
	Сталь		Полиэтилен PE	Чугун ковкий	Медь	Алюминий	Свинец
	Изолированная (1)	Сталь					
Сталь		(2)					(3)
Полиэтилен			(4)				
Чугун	(5)			(6)			
Медь			(2), (7)		(2)		
Алюминий							

(1) – битумная смола или полиэтилен,
(2) – врезка только ответвления в 15 мм,
(3) – только на сети, которая останется низкого давления (BP/BPA), так же как для труб из битумных материалов.
(4) – включая врезки в существующие сети (PVC),
(5) – только в сетях, предназначенных к обновлению и для врезки диаметром 50 мм,
(6) – врезка диаметром 100 мм,
(7) – на существующих сетях размером 25, 32, 50 мм и новых сетях диаметром 25 мм.

Рекомендации по выбору материала для ответвления.

7.6.1.3.3. Технология соединения

7.6.1.3.3.1. Часто применяемые соединения труб при сооружении ответвлений

Материал	Соединение		Спецификация
Сталь	Вход в отключающее устройство	В основном электросварка в стык (обязательно, если диаметр более 60,3 мм)	Спецификация поставщика
	Выход из отключающего устройства	В основном сварка в стык газовая (толщина труб меньше или равна 36 мм)	ATGB521
Полиэтилен (только под землей)	Соединение электросваркой пластик–пластик. Соединение металл–пластик, механическое		ATGB527
Медь	Капиллярная пайка (сильная)		ATGB524
Алюминий (только над землей)	Горячая склейка		ATGB525
Свинец	Пайка оловом		Спецификация поставщика

Тип соединений в зависимости от материала.

7.6.1.3.3.2. Соединение труб с арматурой

Труба	Арматура				
	Патрубок гладкий под сварку	Фланцы	Соединения сфероконические	Соединения плоские с газ. счетчиком	Патрубок гладкий полиэтиленовый
Сталь	Если *l* > 3.6 – газовая сварка, Если *l* > 3.6 – электросварка	Фланец плоский	Соединение смешанное (1)	Соединение смешанное (1)	Соединение смешанное (1) металл–пластик, механическое, электросварка
Полиэтилен	Смешанное соединение, механическое болтовое или электросварка	Соединение смешан., механ. электросварка, металл–пластик	Соединение смешанное (1), металл–пластик, болтовое	Соединение смешанное (1) металл–пластик, болтовое механич.	Соединение пластик–пластик, болтовое механическое или электросварка
Медь	Патрубок соединительный сталь–медь	Фланец обычный, приваренный к трубе	Соединение смешанное (1)	То же	То же
Свинец	Патрубок соединительный сталь–медь	Обычный фланец для трубы	То же	То же	То же

[1]Смешанное соединение предназначено для соединения труб из различных металлов. Соединение каждого типа трубы должно осуществлятся в соответствии с рекомендациями для соединения двух труб, приведенных в таблице. Соединение труб из чугуна и алюминия осуществляется по рекомендациям DTU61-1. Смазка соединения и материал соединений должны быть невосприимчивы к воздействию транспортируемого газа. Применение прокладок из фибры и кожи запрещено.

Типы соединений и аксессуары .

7.6.1.3.4. Правила сооружения

Подсоединение должно осуществляться перпендикулярно к пересекаемому пути или распределительному трубопроводу.

Сетка или полоска из цветного пластического материала укладывается над образующей ответвления трубопровода, кроме случая укладки футляра или горизонтального бурения.

Проникновение в здание под землей через стену должно обязательно быть выполнено герметично. Журнал нагрузки (DTU61.1) должен служить справочником для оборудования, установленного по ходу газа за отключающим устройством.

7.6.1.3.5. Квалификация персонала

Он должен быть подготовлен к работе с выбранной техникой.

Спецификация ATGB540-9 уточняет квалификацию сварщика, пайщика и сваро-пайщика.

7.6.1.3.6. Арматура

Приводятся только отключающие устройства (задвижки, краны, предохранительно-запорные краны, установленные на подающих трубопроводах среднего давления), регуляторы и счетчики.

7.6.1.3.6.1. Задвижки (краны)

— Латунные краны низкого давления (BP), приваренные к свинцу или припаиваемые к меди ≤50 мм;
— стальные задвижки на среднем давлении (MPB) приварные;
— краны латунные низкого давления (BP), соединение плоское (накидная гайка) ≤50 мм;
— кран латунный счетчика, низкого давления (BP), соединение накидной гайкой ≤50 мм;
— кран латунный среднего давления (MPB), соединение сферо-коническое ≤32 мм;
— клапан отстойник среднего давления (MPB), соединение сферо-коническое ≤32 мм.

7.6.1.3.6.2. Отсекатель расхода среднего давления (DDMP)

Этот аппарат автоматического отключения подачи газа, если расход превосходит в 1,5 раза номинальное потребление домового трубопровода. Он включается снова в работу только поставщиком газа.

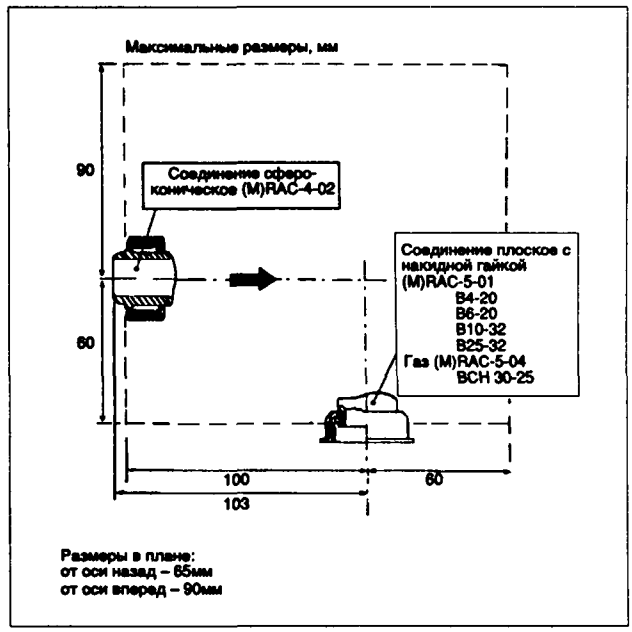
7.6.1.3.6.3. Регулятор давления

Принципиальные размерные характеристики приводятся ниже на рисунке.

Модели B6 и B10 располагают функцией ручного перекрытия (закрытие случайное).

Номинальный расход (газ H, плотность 0,61; в нм³/ч при 0°C и 1,013 бар):

Тип	Низкое давление	300 мбар
B4 B6 B10 B25	4 6 10 25	
BCH30		30



Регулятор давления.

Примечание: Номинальный расход другого газа находится путем умножения на следующие коэффициенты:

воздух-бутан – 0,71,

воздух-пропан – 0,73,

газ природный сжиженный — 0,98,

пропан – 0,63.

Давление на входе при номинальной работе:

— минимальное – 0,5 бар (0.8 бар для BCH3O),
— максимальное – 4 бар.

Характеристики регулирования (с. 644).

Регулятор попадает в состояние опасности, если:

— отмечается избыточный расход (120 - 150% номинального расхода),
— отсутствует давление на выходе,
— отсутствует давление на входе (прекращение работы).

Необходимо ручное включение в работу.

В случае повышения давления на выходе открывается сбросной клапан, затем аппарат переходит в безопасное состояние.

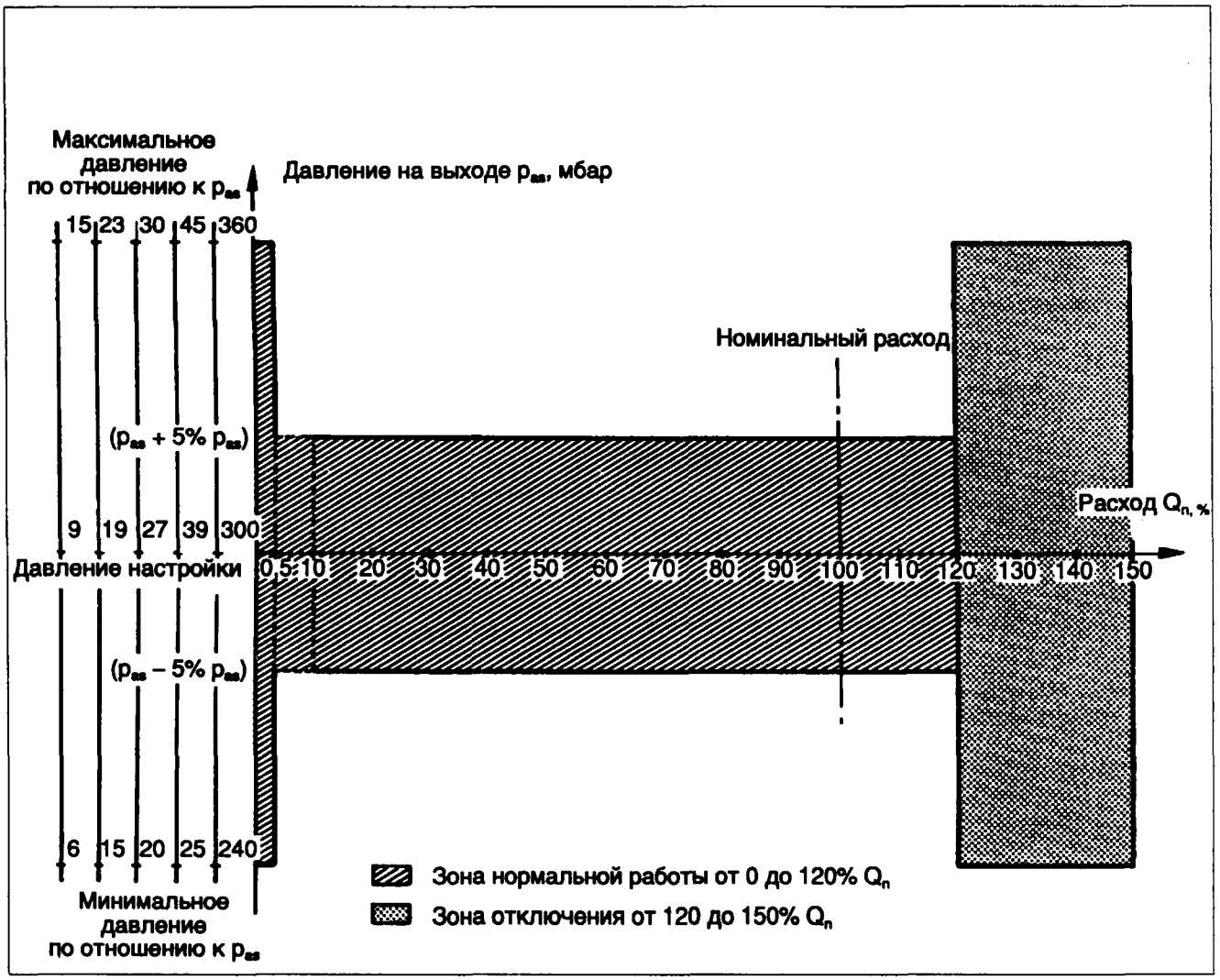
7.6.1.3.7. Счетчики

См. разд. 7.7.

7.6.1.3.8. Испытания

7.6.1.3.8.1. Трубопроводы, находящиеся перед общим отключающим устройством

Они должны подвергаться испытаниям, установленным спецификацией поставщика.



Огибающая нижних допустимых давлений в функции расхода.

7.6.1.3.8.2. Трубопроводы, расположенные за общим отключающим устройством

Они должны подвергаться различным испытаниям и контролю, указанному в DTU61-1 и отраженному в таблице.

Рабочее давление	Сопротивление на механическую прочность	Герметичность
$p \leq 400$ мбар	нет	50 мбар или давление распределения
400 мбар $\leq p \leq 4$ бар	6 бар	400 мбар

7.6.1.3.9. Приемка установок

Строитель готовит соответствующий сертификат, один экземпляр которого предназначен эксплуатационнику или владельцу и второй – поставщику (Указ от 2 августа 1977 г.).

7.6.2. ВНУТРЕННИЕ УСТАНОВКИ

7.6.2.1. Терминология

Внутренние установки включают трубопроводы и аксессуары, позволяющие подать газ до аппаратов использования от выхода счетчика:

— при отсутствии счетчика – от выхода отключающего устройства, расположенного перед точкой входа трубопровода в здание (статья 13-2 Указа от 2 августа 1977 г.);

— или, если речь идет о кухонной плите – от выхода отключающего устройства (статья 13-3 того же Указа).

Часть внутренней установки может находиться в соответствии со своим назначением вне здания, например, в саду, она тем не менее всегда находится на частной территории.

7.6.2.2. Условия установки

7.6.2.2.1. Ограничение давления

Во внутренних установках жилых коллективных домов, кроме домов второго рода, имеющих не более десяти квартир на лестничной клетке, максимальное избыточное давление не должно превышать 500 мбар (см. разд. 7.6.1.1.).

7.6.2.2.2. Прокладка трубопроводов

Трубопроводы не должны иметь никаких механических соединений при пересечении невентилируемых помещений или проходит их в штрабе. Сочленение называется механическим, когда соединение и герметичность осуществляются отдельно, соединение с помощью гаек с резьбой без герметичности; на резьбе или с помощью болтов; герметичность за счет сжатия гарнитуры, прокладки и т.д.

Трубопроводы и различные приспособления к ним должны быть плотно соединены между собой и надежно закреплены на стенах, перегородках, перекрытиях.

Когда трубопровод проникает в здание из земли через подземную часть стены, цилиндрическое пространство между стеной и трубой должно быть герметично заделано.

Трубопроводы должны быть расположены на расстоянии не менее 3 см от электрокабеля и других коммуникаций, кроме случаев, где это расстояние уменьшено до 1 см. Для подземных трубопроводов это расстояние должно быть не менее 20 см; если это невозможно выполнить, трубопровод располагается в электроизолированном кожухе, концы которого удалены от электрического кабеля не менее чем на 20 см.

Запрещено использовать газопровод как заземлитель электроустановок и радиоэлектрических приборов и использовать его в качестве механической опоры, для чего он не предусмотрен.

Применение свинцовых трубопроводов в новых зданиях запрещено.

Полиэтилен разрешен для использования вне зданий в подземном положении.

7.6.2.2.3. Краны управления аппаратов

Все аппараты, имеющие фиксированные патрубки, должны управляться кранами, расположенными в непосредственной близости от аппаратов, и иметь к ним легкий доступ.

Когда аппарат установлен на жесткой трубе и имеет управляемый кран на входе, кран на выходе может быть не предусмотрен, если патрубок на выходе закрывается пробкой на резьбе, когда аппарат не работает.

В случае поступления газа от распределительной публичной сети комнатные краны аппаратов жарения или машин стирки белья должны отвечать следующим характеристикам:

— выходной патрубок диаметром 15 мм должен иметь резьбу с шагом G1/2 в соответствии нормам NFE03-005, октябрь 1970 г.;

— конец соединения обрабатывается и полируется, чтобы смонтировать металлизованный шланг, арматура которого соответствует нормам NFD36-103.

Краны по нормам NFE29-135 и 29-138 соответствуют этим условиям.

7.6.2.2.4. Подсоединение аппаратов

В таблице приведены типы подсоединений в зависимости от категории аппарата.

7.6.2.2.5. Испытание трубопроводов

Газовое оборудование, установленное строителями, подлежит различным видам испытаний и контролю, указанному в таблице.

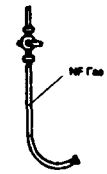
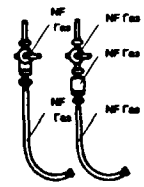
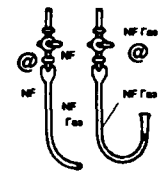
Распределение	Тип	В каких случаях должно осуществляться испытание
Трубопроводы снабжаются от распределительной сети	Испытание на механическую прочность	Когда оборудование работает при давлении более 400 мбар (независимо от длины труб)
	Испытание на герметичность	Когда установка работает под давлением p — $p \leq 400$ мбар – все трубы длиной более 2 м, — $p > 400$ мбар – все трубопроводы независимо от длины
	Контроль отсутствия утечек	Если $p \leq 400$ мбар – все трубы длиной < 2 м

Испытания и контроль трубопроводов.

7.6.2.2.6. Приемка установок

Строитель составляет сертификат соответствия, один экземпляр которого предназначен эксплуатационникам или владельцу, а второй - поставщику (распределителю).

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

			Газ из сети			
Тип подсоединения			Труба жестк.	Шланг с накидной гайкой (2)		Гибкая труба или шланг
Устройство управления подсоединения			Кран	Кран	Клапан безопасности и кран (комбинированный или нет)	Кран (оборудованный на конце каучуковым шлангом)
						
Аппарат для жарки (1)	Встроен в блок плиты фиксированной		да	да	да	нет
	Прикреплен винтом, вделан в стену, чистый вес, вантуз		да	да	да	да
	Другие диспозитивы		нет	да	да	да
Водонагреватель	Прикреплен винтом или заделан в стену, вантуз		да	нет	нет	нет
	Другое закрепление (вес, вантуз)		да	да	да	нет
Стирка белья, сушка, посудомойка	С электродвигателем	Машина стационарная	нет	да	да	да
		Машина передвижная	нет	да	да	да
	Без электродвигателя	Машина стационарная	да	да	да	да
		Машина передвижная	нет	да	да	да
Холодильник	Закреплен, заделан в стену, в блоке с плитой		да	да	да	нет
	Другая фиксация		нет	да	да	нет

(1) Жарочный аппарат, снабжаемый плитой, может быть соединен жестко патрубком или гибкой трубой с накидной гайкой. В обоих случаях устанавливается управляющий кран с диспозитивом безопасности, прекращающим подачу газа в случае падения давления.
(2) При условии, что трубка видна полностью.

Типы соединений для разных аппаратов.

Примечание:

— Определение утечек с помощью пламени запрещено.

— Испытания на прочность всегда предшествуют испытаниям на герметичность.

7.6.2.3. Определение размеров бытовых приборов (установок)

7.6.2.3.1. Практическое определение диаметров трубопроводов бытовых установок

Метод относится к установкам, снабжаемым газом низкого давления.

Диаметр трубопровода зависит от:

— допустимых потерь давления,

— длины трубопровода,

— расхода газа.

7.6.2.3.2. Допустимые потери давления

Тип здания	Расположение счетчика	Допустимые потери в установке после счетчика, мбар
Индивидуальный дом (одна квартира)	В пределах владений	1
	В квартире	0,5
Коллективное здание	В ящике	0,5
	В техническом помещении	1
	В квартире или коридоре	0,5

Допустимые потери в зависимости от типа здания и расположения счетчика.

7.6.2.3.3. Определение длины трубопровода

Практикой установлено, что эквивалентная длина трубопровода, вызванная местными потерями, составляет порядка 20% реальной длины. Это учитывалось при составлении графиков.

Таким образом, при использовании графиков надо применять реальную длину.

До 10 м длина округляется до 0,5 м больше, для большей длины – до 1 м.

7.6.2.3.4. Определение теплового расхода

	Тип аппарата	Расход в тепловых единицах (кВт)
Плита		9
Горячая вода	Водонагреватель: 8,72 кВт	12
	Душевая колонка: 17 кВт 23 кВт 28 кВт	 23 30 37
	Аккумулятор: нагрев нормальный нагрев быстрый	 2 6
	Стиральная машина	7
Отопление	Котел простого обслуживания Котел или генератор двойного назначения (отопление + горячая вода). Генератор горячего воздуха	1,3 на каждый кВт от номинальной мощности

Расход в тепловых единицах в зависимости от назначения аппарата.

7.6.2.3.5. Номограммы

При эквивалентном расходе (в кВт·/м^3) номограмма (с. 648) дает идентичный диаметр для: природного газа, смеси пропана с воздухом в 15,6 кВт·ч/м^3, пропана технического.

7.6.2.3.6. Пример использования номограммы

Снабжение природным газом. Здание с одной квартирой (счетчик в укрытии (ящике) снаружи, либо в пределах владения).

Единственный газопотребляющий аппарат – генератор двойного назначения (отопление + горячее водоснабжение) номинальной мощностью 28 кВт.

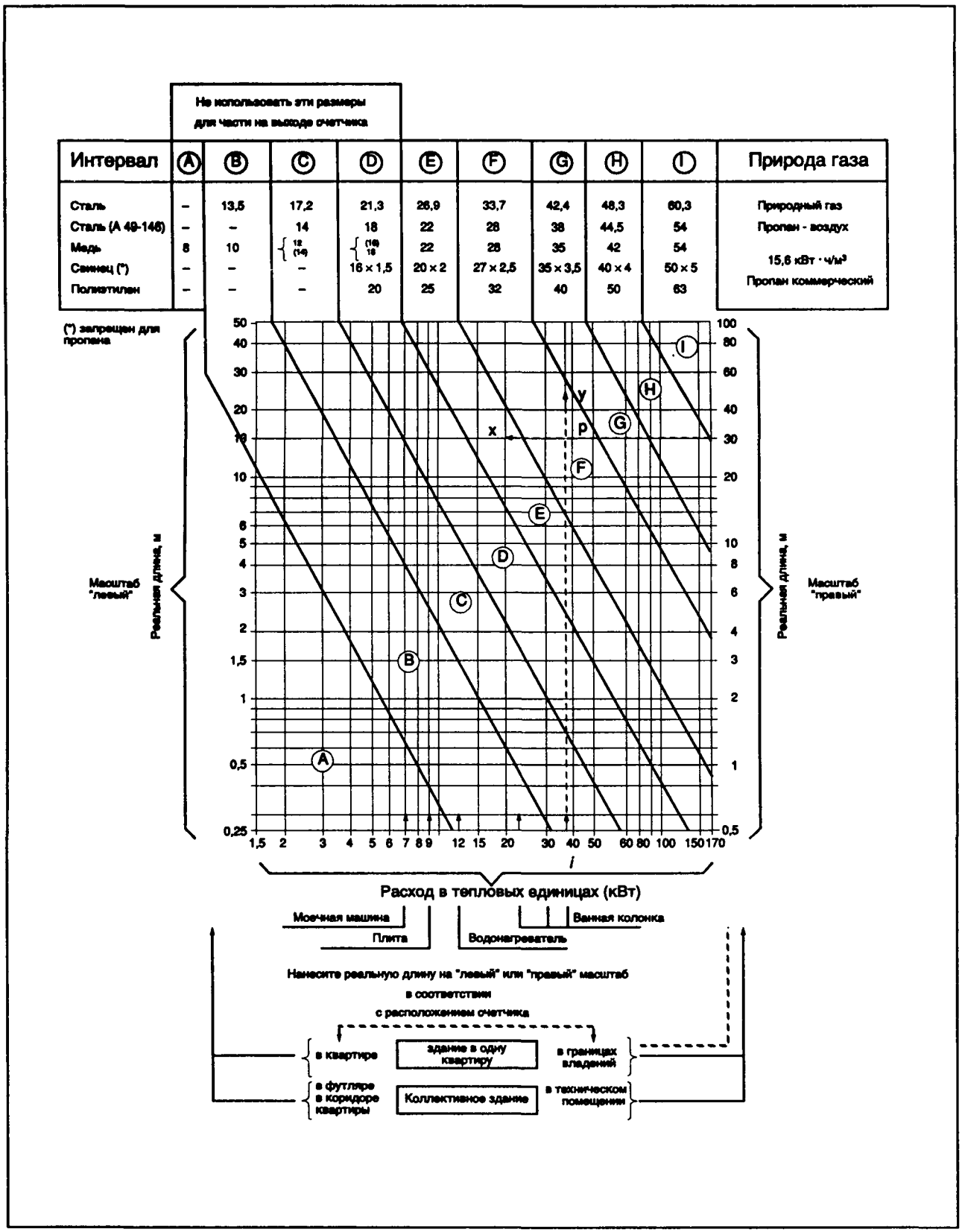
Длина реальная – 30 м.

Трубопровод стальной.

Расход: 1,3 × 28 = 34,4 кВт.

Когда речь идет о здании в одну квартиру и счетчик расположен в пределах владельца, используется масштаб правой части номограммы. Провести горизонталь Ах из точки 30,0 м. Провести вертикаль Ву из точки 36,4 кВт. Прямые Ах и Ву встречаются в точке Р, расположенной в области F.

Видно, что необходимо использовать диаметр 28 мм, соответствующий калибру 25.



Определение диаметра трубопроводов после счетчика.

Калибр		6	8	10	12	15	20	25	32	40	50
Наружный	Сталь		13,5		17,2	21,3	26,9	33,7	42,4	48,3	60,3
	Медь	8	10	12	14	18	22	28	35	42	54
Внутренний	Свинец					15	20	27	35	40	50

Диаметр труб в зависимости от используемого материала (в мм).

7.6.2.3.7. Разрешенный минимальный диаметр

Минимальный диаметр трубопровода на выходе из счетчика составляет 20 мм для всех газов.

7.6.2.4. Технология материалов и приспособлений

7.6.2.4.1. Трубы

См. таблицу выше.

7.6.2.4.2. Типы трубопроводов и способы соединения

См. разд. 7.6.1.3.

7.6.2.4.3. Особый случай мягкой пайки

Тип здания	Давление *p*, мбар	Газ, распределяемый сетью
		Внутренние установки абонентов
Индивидуальное	< 400	Разрешено
	> 400	Запрещено
Коллективное	< 50	Разрешено*
	> 50	Запрещено
Установка в специальном здании для газа		Запрещено

*Когда счетчики сгруппированы в техническом помещении, пайка запрещена для соединения «стержень после счетчика» (ДТV61.1).

Использование мягкой пайки.

7.7. УЧЕТ ГАЗА

Замер газа, циркулирующего в трубопроводе, определяется как совокупность операций, которые дают понятие о количестве газа, пересекающего сечение трубопровода в течение известного отрезка времени. При этом весь газ в месте измерения должен находиться в движении.

7.7.1. Основные принципы

Принцип функционирования счетчика состоит в турбулизации потока газа, что позволяет замерить характерные величины – скорость истечения или прямо объем – элементарный объем в камере постоянного размера.

Кинематическая цепь колес регулирования позволяет на основе замеряемых величин получить транзитный расход и его характеристику.

Энергия, необходимая для показа объема, вызывает потерю давления. Используемый в коммерческих соглашениях счетчик попадает под директивы Общеевропейской комиссии и подчиняется национальным указам и декретам.

Национальные регламентации определяют метрологические характеристики и конструкции счетчиков. Такой же регламентации должны удовлетворять механизмы коррекции.

7.7.2. Терминология

Счетчики газа обозначаются на европейском уровне буквой G и следуют числу, исходящему из таблицы величин: 1, 6 - 2, 5 - 4 - 6 - 10 - 16 - 25 - 40 - 65, характеризующих номинальный расход.

В соответствии с принципом, используемым для осуществления замера газа, счетчики, применяемые в распределении, разделяются на:

— счетчики с подвижной перегородкой (мембранный),
— счетчики с вращающимися поршнями,
— счетчики скоростные (турбинные).

Счетчик мембранный	Потеря давления механическая, Па	Потери давления при максимальном расходе, Па
G1,6 - G10	60	200
G16 - G40	60	300
G65 - G650	100	400
1мбар = 100 Па		

7.7.3. Метрология

7.7.3.1. Пределы измерений

Максимальные и минимальные расходы, выраженные в $м^3/ч$, записаны в таблице в соответствии с обозначением G счетчиков.

7.7.3.2. Допустимые ошибки и потери давления

7.7.3.2.1. Примитивная проверка

Она осуществляется у изготовителя на выходе из цепи изготовления (см. таблицу на с. 651).

Потери давления скоростных счетчиков и счетчиков с вращающимися поршнями не лимитируются и могут достигать 10 - 15 мбар при максимальном расходе.

Обозначение G	Максимальный расход, $м^3/ч$	Минимальные расходы, $м^3/ч$			
		Мембранный счетчик	Скоростной счетчик и с вращающимися поршнями		
			Охват измерений		
			малый	средний	большой
1,6	2,5	0,016			
2,5	4	0,025			
4	6	0,040 (*)			
6	10	0,060 (*)			
10	16	0,100 (*)			
16	25	0,160 (*)			
25	40	0,250 (*)	8	4	2
40	65	0,400 (*)	13	6	3 +
65	100	0,650 (*)	20	10	5 ×
100	160	1,000 (*)	32	16	8 + ×
160	250	1,600 (*)	50	25	13 + ×
250	400	2,600	80	40	20
400	650	4,000	130	65	32
650	1 000	6,500	200	100	50
1 000	1 600		320	160	80
1 600	2 500		500	250	125
2 500	4 000		800	400	200
4 000	6 500		1 300	650	320
...	...		...	...	...

* Мембранные счетчики, используемые во Франции, + минимальный размер для аппаратов с вращающимися поршнями, x – минимальный размер для аппаратов замера скорости.

Максимальные и минимальные расходы счетчиков.

Счетчик	Расход			
	Ошибка			
	Q_{min}	$2Q_{min}$	$0{,}2Q_{max}$	Q_{max}
Мембранный	<---------- ±3% >	≤---------- ±2% ---------->		
Скоростной и с вращающимися поршнями	<---------- ±2% ---------->		≤---------- ±1% ---------->	
≤ предел чувствительности				

Ошибки и потери давления, определенные у изготовителя (проверка примитивная).

7.7.3.2.2. Периодическая проверка

Счетчик должен подвергаться помимо примитивной периодической проверке.

Периодичность проверки и максимально допустимые ошибки указаны ниже.

Ошибки и потери давления, допустимые при периодической проверке

Счетчик	Расходы			
	Ошибка			Периодичность
	Q_{min}	$0{,}2Q_{max}$	Q_{max}	
Мембранный	←---------- ±4% ----------→			20 лет
Скоростной и с вращающимися поршнями	←--- ±4% ---→	≤--------- ±2% ---→		5 лет
≤ предел чувствительности				

Ошибки и потери давления, допустимые при периодической проверке.

7.7.4. Функционирование

См. разд. 1.12.4.4.

7.7.5. Коррекция замеров

Объемы суммируются счетчиком при температуре и давлении в элементах измерения. Это объем брутто.

Некоторые контракты могут требовать автоматического пересчета объема брутто в контрактный (приведенный) объем:

$$V_r = V \cdot \frac{P}{P_r} \cdot \frac{T_r}{T} \cdot \frac{Z_r}{Z}$$

здесь V, P, T и Z соответственно объем, давление, температура абсолютная и коэффициент сжимаемости газа, индекс *r* соответствует приведенному в контракте относительному состоянию.

Корректировка может быть адаптирована к счетчикам, располагающим устройством коррекции.

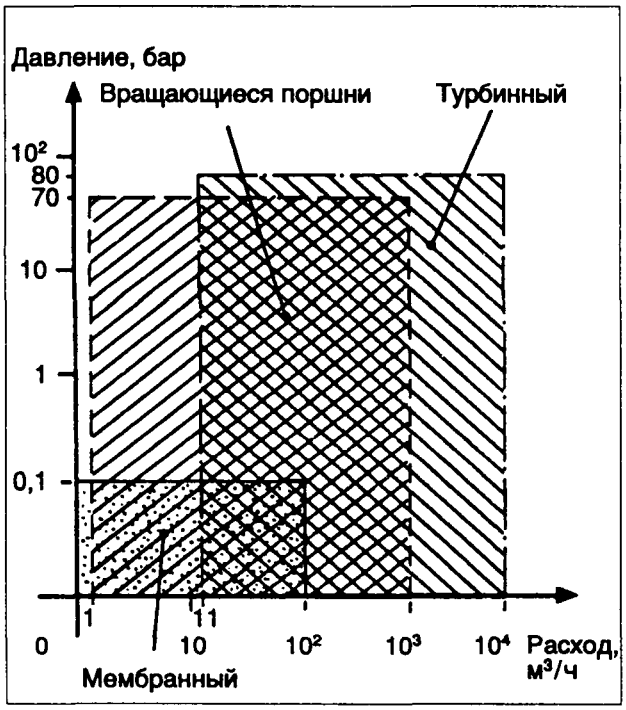
7.7.6. Область применения различных счетчиков

Счетчик выбирается в зависимости от используемого газа и особенностей самого счетчика (см. с. 652).

7.7.6.1. Мембранный счетчик

Преимущества:

— очень хорошая внутренняя точность,
— достаточно слабое влияние температуры и давления,
— большая динамика измерений ($Q_{max}/Q_{min} > 140$).



Область применения счетчиков в зависимости от давления и расхода.

Недостатки:
— давление использования достаточно низкое;
— большие размеры для малых расходов и очень велики для больших расходов.

7.7.6.2. Счетчик скоростной

Преимущества:
— хорошая внутренняя точность,
— доступная цена,
— легкость установки,
— простое обслуживание,
— невозможность блокировки.

Недостатки: восприимчивость к пульсирующим и цикличным режимам.

7.7.6.3. Счетчик с вращающимися поршнями

Преимущества:
— очень хорошая внутренняя точность,
— большая динамичность измерений (Q_{max}/ Q_{min} от 20 до 30),
— невосприимчивость к изменению профиля истечения на входе,
— слабая восприимчивость к циклическим режимам.

Недостатки:
— риск блокировки,
— небольшой риск акустического резонанса при циклическом режиме,
— влияние качества эксплуатации.

7.7.7. Условия установки

Счетчики должны устанавливаться в укрытиях, освещенных помещениях с вентиляцией или аэрацией, под навесом, так как возможны поломки или плохое функционирование счетчика (удары, вибрация, коррозионная атмосфера, слишком высокая или слишком низкая температура, влажность).

Они не должны опираться прямо на землю.

Они должны быть доступны.

На входе в счетчик всегда устанавливаем отключающее устройство, т.е. задвижка (кран).

7.8. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ

7.8.1. Знание сооружений

7.8.1.1. Перечень сооружений (Досье)

7.8.1.1.1. Определение

Досье сооружений содержит всю информацию, необходимую для: лучшего изучения сооружений, чтобы наблюдать за его эволюцией, ориентации и облегчения принятия решения о соответствующих действиях.

7.8.1.1.2. Сопутствующие сооружения

Предлагаемый список не ограничен и должен учитывать средства, которыми располагает распределитель, и поставленные цели:
— подземные сооружения:
  · трубопроводы,
  · оборудование катодной защиты,
  · датчики качества подготовки газа,

- подсоединение больших значительных потребителей,
- подсоединение коллективных зданий, оборудованных DDMP;

— наземные сооружения:
- пост регулирования (публичное распределение),
- регуляторный пункт (клиентов),
- оборудование катодной защиты,
- установки подготовки газа,
- местные установки одоризации.

7.8.1.1.3. Сборник информации

Формирование досье определенных сооружений требует сбора статической и динамической информации.

Ценность (нагрузка) досье зависит от средств информации, которыми располагают на местах. Фиксируют обычно инциденты с газом, пуск или удаление газа из сооружений, картографическую документацию, тетрадь (сборник) замеров.

7.8.1.2. Систематические поиски утечек

Эти поиски – операция превентивного обслуживания, которая служит для улучшения знаний сети, для выработки способа эксплуатации, выбора метода ремонта.

Поиски осуществляются в три этапа:

— обнаружение утечек – постоянные обходы сетей природного газа с детектором ионизации пламени после предварительного обследования с помощью машины обследования сети (VSR);

— локализация – установление места утечки, зондирование для замера концентрации газа с помощью эксплозиметра-катарометра;

— классификация утечки (немедленный ремонт, после программирования или обследования).

7.8.1.2.1. Аппараты детекции

Они должны быть надежны и чувствительны, так как концентрация газа непосредственно над землей очень мала из-за разбавления воздухом.

Для детекции часто применяется прибор, использующий ионизацию пламени.

Большая чувствительность (несколько частей из миллиона), использование электропроводности пламени.

Для локализации эксплозиметр использует свойство газа различного состава иметь разную теплопроводность. Эксплозиметр позволяет определять процентную величину нижнего предела взрываемости.

Аппарат детекции звука измеряет изменение скорости звука в зависимости от плотности забранного газа и особенно удобен для определения (поиска) GPL и биогаза.

Для газа более тяжелого, чем воздух, предусмотрен принудительный забор проб.

Машина обследования (VSR), со своей стороны, оборудована детектором ионизации пламени, с предшествующей сепарацией воды, и окислительной печью, которая удаляет высшие углеводороды и выхлопные газы.

Скорость регистрации замеров определяет скорость движения автомобиля, исходя из точек, намеченных оператором. Установка отрегулирована таким образом, чтобы привести к минимуму утечки, соответствующей пределу (порогу) восприятия запаха газа, которые были бы обнаружены.

7.8.1.2.2. Описание операций и интерпретация результатов

Применение автомобиля обслуживания (VSR) как диспозитива обслуживания в значительной степени улучшает возможность инспекции сетей.

Один автомобиль позволяет обследовать около 4000 км в год (800 км для нашего обследования), систематическое обследование трубопроводов может производиться с постоянной регистрацией отборов проб.

Записи результатов изучаются с целью выявления сомнительных данных путем их определения и локализации утечек "пешим" способом и сравнением с предыдущими данными.

С другой стороны:

— результаты систематических поисков в процессе предыдущих лет;

— характеристики сооружений (год строительства, тип соединений, тип трубопровода);

— нагрузки и агрессивность (угроза), которым подвергается трубопровод (давление, движение грунта, агрессивность почвы, условия работы системы катодной защиты);

— история трубопровода (характеристика газа, распределяемого в начале сооружения трубопровода, наличие или отсутствие установок обработки газа);

— окружающая среда (стоянки, движение тяжелых грузов, близость жилых домов и т.д.) – позволяют определить частоту поисков утечек применительно к каждой сети.

В зависимости от полученных на земле результатов эксплуатационник классифицирует утечки и предусматривает плановый ремонт, обслуживание или перекладку сооружений.

7.8.1.3. Оценка потерь газа

Установление энергетического баланса, который должен быть известен потребителю, требует оценивать потери газа. Речь идет о всех потерях энергии, состоящих из технических потерь и ошибок измерения.

Если ошибки измерений расхода можно определить путем данных, взятых от периодических проверок счетчиков, технические потери и их динамика определяются путем измерений, либо расчетом.

7.8.1.3.1. Замеры

Техника замеров на сооружениях зависит от рабочего давления сети.

7.8.1.3.1.1. Сеть низкого давления (BP)

В этом случае используется метод, называемый замером ночного расхода.

Он не позволяет получить точную величину, но определяет степень потерь и особенно их динамику.

Выбирая период небольшого расхода, констатируют, что ночной расход есть сумма утечек и потребления некоторых абонентов (расход паразитический).

В виду постоянства паразитического расхода изменение во времени должно быть таким же, как степень потерь. Следовательно:

— большое и внезапное увеличение расхода говорит о появлении трещины;
— медленное и регулярное увеличение расхода сигнализирует о деградации сооружений.

7.8.1.3.1.2. Сеть среднего давления (MP)

Техника замеров на изолированной сети состоит в измерении времени, в течение которого происходит определенное снижение давления.

Пренебрегая изменением температуры, можно расчетным путем получить величину потерь и расход утечек.

7.8.1.3.2. Расчет

Энергетический баланс к концу года выражается так:

$$E_n + GC_{n-1} = F_n + P_n + GC_n,$$

где

E_n – подача газа за год n;

GC – газ, подсчитанный к концу соответствующего года (n и $n + 1$);

P_n – потери n-го года;

F_n – отчетный расход n-го года, полученный потребителем.

Если предположить, что известны подача и потребление, для определения потерь остается оценить величину $GC_n - GC_{n-1}$ (которая представляет изменение учтенного расхода газа и которая входит в баланс).

Используются несколько методов:

— бухгалтерский метод состоит в расчете изменения "энергии" в счетчике путем аналитического изучения средних величин. В общем полученная величина имеет случайный характер и должна подвергаться обработке, уточнению методом исследовательных приближений;
— метод Кантина (Cantin), базирующийся на изучении графика потерь брутто, собранных за определенный исторический срок (минимально шесть лет).

Для данного месяца суммарные потери брутто соответствуют сумме месячных поступлений с самого начала минус сумма месячной фактической продажи также с самого начала или:

P потери = $\sum$(подача в сеть – получение фактическое у клиентов).

Этот принцип суммирования позволяет определить потери с относительно небольшой ошибкой. Этот метод не может заменить предыдущий. Он позволяет на уровне эксплуатации быстро определить ошибки расчета и даже степень изменения потерь. Он легко сочетается с информационной системой.

7.8.2. Трубопровод и эксплуатация сооружений

7.8.2.1. Запрос посторонних организаций по поводу запаха газа. Первое вмешательство

Сообщение третьих лиц о запахе газа должно вызвать немедленное вмешательство команды поставщика для предотвращения прежде всего опасности.

Действия по защите персонала должны быть приняты в кратчайший срок и первое вмешательство имеет наиболее важное значение в ряду будущих акций.

7.8.2.1.1. Обработка сообщений со стороны

Обычно сообщения поступают по телефону, но могут иметь и другую форму. Прием должен осуществляться постоянно. Во всех случаях сообщение должно быть зарегистрировано с максимальными данными и передано в кратчайшие сроки работникам первой помощи.

Работник, получивший сообщение, отмечает прежде всего меры безопасности, которые необходимо принять до прибытия персонала первой помощи.

Это предполагает, что номер запроса для вмешательства известен жителям и наружным службам безопасности (милиция – безопасности, пожарные).

Число и распределение запросов должно изучаться во времени с тем, чтобы лучше использовать (распределить) средства приема.

7.8.2.1.2. Задача первой помощи

Эта задача состоит в том, чтобы быстро прибыть на место аварии и обследовать место аварии и принять первые меры безопасности, устранить временно или окончательно причины аварии, вывести людей из опасной зоны и доложить о результатах своей работы. Если авария большая и устранение причин сложно, вызвать дополнительные средства, приняв необходимые меры по консервации объекта.

Во всех случаях, если служба безопасности присутствует на месте аварии, представители поставщика должны работать сообща с пожарными. Первая помощь характеризуется "легкостью и быстротой".

7.8.2.2. Эксплуатация регуляторных постов

Целью эксплуатации является удовлетворение требований безопасности, качества и постоянства обслуживания (работы).

Надо различать регуляторный пост коллективного распределения и пост снабжения непосредственно потребителей.

7.8.2.2.1. Коллективный пост распределения

Для корректного функционирования различных аппаратов и оборудования, установленного в посте, эксплуатационник систематически посещает его с частотой, зависящей от типа сооружения (расход, возраст, характер и частота неполадок и т.д.).

В ходе визита, кроме беглого обследования (давление, шум, запах газа, вентиляция и т.д.), проверяются различные средства безопасности, прежде всего, линия безопасности, действие кранов и в случае необходимости действие системы телеобслуживания.

7.8.2.2.2. Пост снабжения непосредственно абонентов

Поставщик газа связан с потребителями контрактом, который вменяет ему в обязанность посещение и контроль, аналогичный для коллективного поста распределения, так же как и проверку соответствия замера давления расходу. Акт обслуживания будет реализовываться в соответствии с условиями контракта.

На каждом посту коллективного и индивидуального распределения должна существовать схема функционирования с обозначением величин регулирования аппаратов.

7.8.2.3. Эксплуатация катодной защиты

Чтобы катодная защита была эффективна, необходимо поддерживать защищаемые сооружения под постоянным отрицательным по отношению к окружающей среде зарядом.

Прерывистое функционирование, в действительности, приводит к чередованию окисления и восстановления металла, способного вызвать коррозию более сильную, чем та, которую можно наблюдать у незащищенных сооружений.

Таким образом нельзя нарушать циркуляцию тока катодной защиты или короткого тока изолирующего фланца в ходе ремонта защищаемых сооружений.

Эксплуатация сооружений катодной защиты состоит в контроле эффективности оборудования путем соответствующих электрических замеров в характерных точках сети (концов трубопроводов, изолирующих фланцев, футляр – трубопроводов), в периодической проверке блуждающих токов (силовой кабель S, N, C, F, метро и т.д.), проверке потенциала защиты сооружений, в осуществлении наблюдения за работой предприятий, посторонних организаций, ведущих работы вблизи сооружений, с целью защиты электрической изоляции от разрушения.

В общем виде замеры должны соответствовать сегодняшнему дню и вноситься в досье сооружения.

Для сооружений, подчиняющихся правилам сооружения транспорта, замеры заносят в журнал с пронумерованными страницами (подчистки запрещены).

В практическом плане замеры и контроль, осуществляемые при эксплуатации, зависят от типа защиты.

7.8.2.3.1. Эксплуатация защиты с помощью реактивного анода

Замер потенциала по отношению к грунту.

Замер расхода анода.

Хорошее состояние соединений.

7.8.2.3.2. Эксплуатация дренажной защиты

Замер потенциала по отношению к грунту.

Замер интенсивности разрушения каждого заземлителя (устройства дренажа, батареи, выпрямителей). Расход энергии. Хорошее состояние предохранителей. Включение выключателя в случае грозы.

7.8.2.3.3. Эксплуатация дренажной защиты

Режим работы этих диспозитивов изменяется и не зависит от эксплуатационников.

В ходе периодического посещения надо отмечать максимальные и минимальные величины, определяемые примерно в течение 10 мин с указанием времени замера.

Наличие показателя "ноль" еще не говорит об аномалиях.

Необходимо в посте дренажа проверить:

1) состояние предохранителей, установленных на связи с электрифицированными путями, замеряя потенциал соответствующего кабеля по отношению к грунту;

2) предохранитель и молниеотвод аппаратов дренажа, регулирующих лампы табло и диодов.

7.8.2.3.4. Поиски нарушений детектором изоляции

Эти поиски указывают прежде всего на большие нарушения, такие как опасные заземления.

Принцип:

В доступной точке сети (подсоединение точки замера потенциала, задвижка) подается переменный ток слышимой частотой. Циркуляция этого тока создает вокруг трубы магнитное поле, которое определяется благодаря приемнику. В процессе движения по трубе нарушения (повреждения) обнаруживаются по сильному падению уровня звука.

7.8.2.4. Эксплуатация установок обработки газа

Решение об использовании подготовки газа путем впрыска продуктов типа растворителя и воды требует строительства установки, позволяющей реализовывать операции в удовлетворительных условиях, с целью получения необходимой степени насыщения.

Эти посты подготовки требуют для хорошей работы постоянного наблюдения, предписанного в свете политики обслуживания. Разнообразные основы контроля должны сосредоточиться на следующих пунктах:

— изучение конденсата в сифонах. Явление конденсации продуктов служит показателем наличия холодных точек или впрыска в газ продукта при температуре более низкой, чем та, которую имеет грунт;

— изучение соединений в ходе перекладки сети. Этот контроль позволяет следить за степенью насыщения газа растворителем;

— замер относительной влажности газа в случае впрыска воды;

— хорошая работа поста обработки, принцип которой основан в большинстве случаев на испарении продукта с наблюдением за:

а) регулированием впрыска продукта в зависимости от параметров для получения необходимой степени насыщения,

б) испарителем, мощность которого должна быть связана с расходом испаряемой жидкости во избежание подачи жидкого продукта в сеть.

7.8.2.5. Контроль одоризации

7.8.2.5.1. Одоризация природного газа

Одоризация природного газа, поступающего к индивидуальным и коллективным потребителям, необходима по технике безопасности. Соглашение на транспорт газа не содержит обязательств поставки одорированного газа.

Уровень удерживаемого запаха является таким, который позволяет получать второй уровень интенсивности запаха в постоянной атмосфере и поддерживать содержание газа ниже или равным пятой части нижнего предела взрываемости.

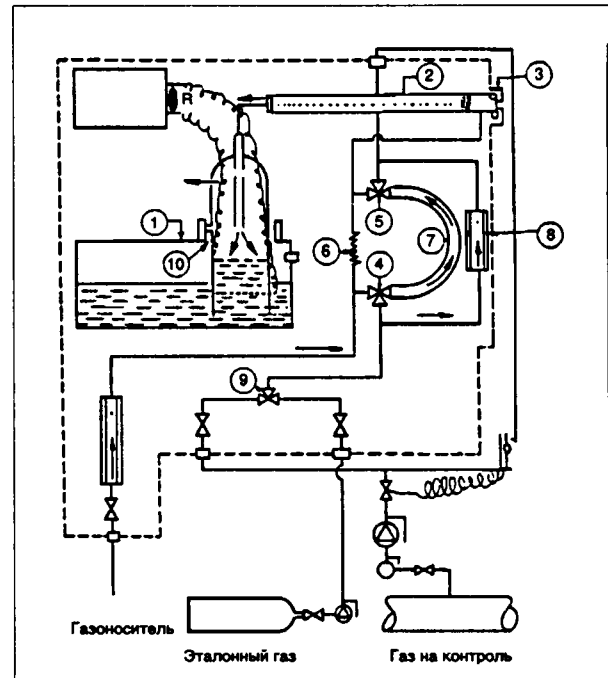
Эта одоризация осуществляется (GDF) путем впрыска в газ одоранта тетрагидротиофена (ТНТ) – продукта, применяемого из-за своей стабильности.

Разрешенная величина равна примерно 25 мг эквивалента ТНТ на 1 нм^3 газа в соответствии с отсутствием или наличием в газе меркаптанов.

Неодорированный газ (газ Арзева и Фоса, например) одорируется путем впрыска 25 мг ТНТ в 1 нм^3, в то время как для газа из Лака, содержащего 8 мг меркаптана, впрыска ТНТ не требуется, так как 1 мг RSH (меркаптан) примерно эквивалентен 2,5 мг ТНТ. Эта одоризация осуществляется на уровне различных источников (терминал метанов, пост снабжения на границе, подземное хранилище) на основе системы типа "Morgane", которая учитывает начальную степень одоризации газа.

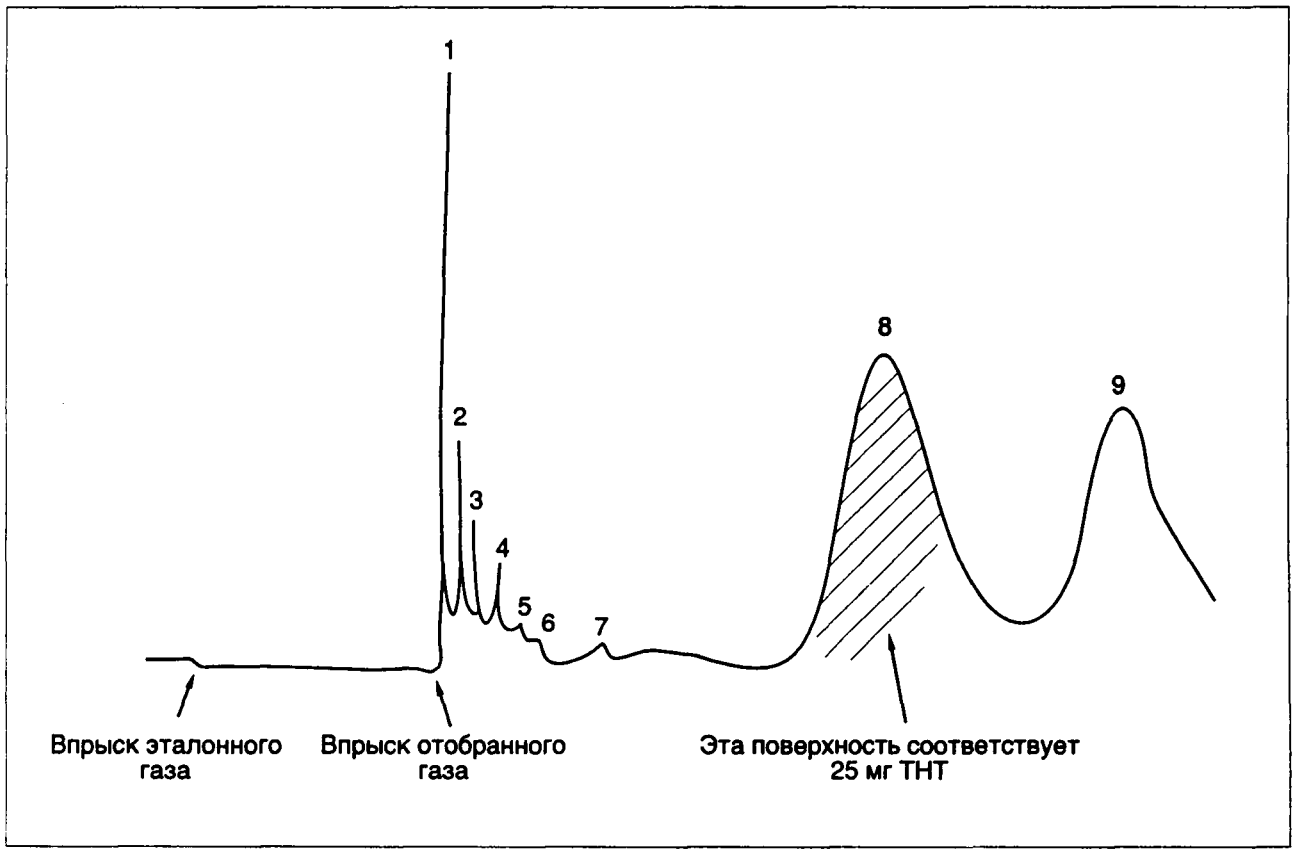
7.8.2.5.2. Контроль одоризации

Контроль одоризации осуществляют в точках поступления, в конце ответвлений системы транспорта и распределения и в крупнейших узлах сети. Все отклонения передаются лицам, ответственным за одоризацию.



1 – резервуар
2 – хроматографическая колонка
3 – инжектор
4, 5 – электрокран
6 – змеевик
7 – петля пробоотборника
8 – расходомер
9 – электрокран
10 – детектор
R – сопротивление

Хроматограф Медор".



Пример хроматограммы, полученной на "Медор S-8000"

Этот контроль реализуется с помощью колонок хроматографа, соединенных со специальным детектором, передающим сигнал, пропорциональный содержанию в газе ТНТ меркаптанов в периодически отбираемых пробах.

Интеграция сигнала измерений колонок хроматографа позволяет оценить концентрацию. Сигнал сверх одоризации или неодоризации выдается в случае пересечения определенного предела.

Соединение трех хроматографических счетчиков с электрохимическими детекторами, один из которых – запасной, другой – автомат управления анализатора, интегратора и привода насоса дозатора, составляют систему "Morgana", разработанную дирекцией изучения и исследования новой техники GDF.

7.8.3. Обслуживание сооружений

7.8.3.1. Политика обслуживания

Обслуживание определяется как совокупность выбранных операций, направленных на консервацию (поддержание) сооружений в состоянии нормального функционирования, с точки зрения осуществления наилучшего качества и постоянства возможного обслуживания, безопасность персонала и сохранность имущества. Оно предусматривает осуществление достаточного количества наблюдений, подбора программированного контроля, позволяющего внести в работу после диагностики необходимые изменения. Обслуживание и эксплуатация перекрываются в соответствии со схемой на с. 658.

Определение политики и последовательности обслуживания происходит в четыре фазы: предварительная диагностика, определение целей и установление политики, количественный контроль применения политики, контроль результатов и решение о его повторе.

Политика обслуживания должна быть определена на уровне каждого объединения эксплуатации. Она характеризуется:

— привлечением экономики,

— влиянием на улучшение и осуществление знаний персонала, занятого пусковыми работами,

— необходимостью развития.

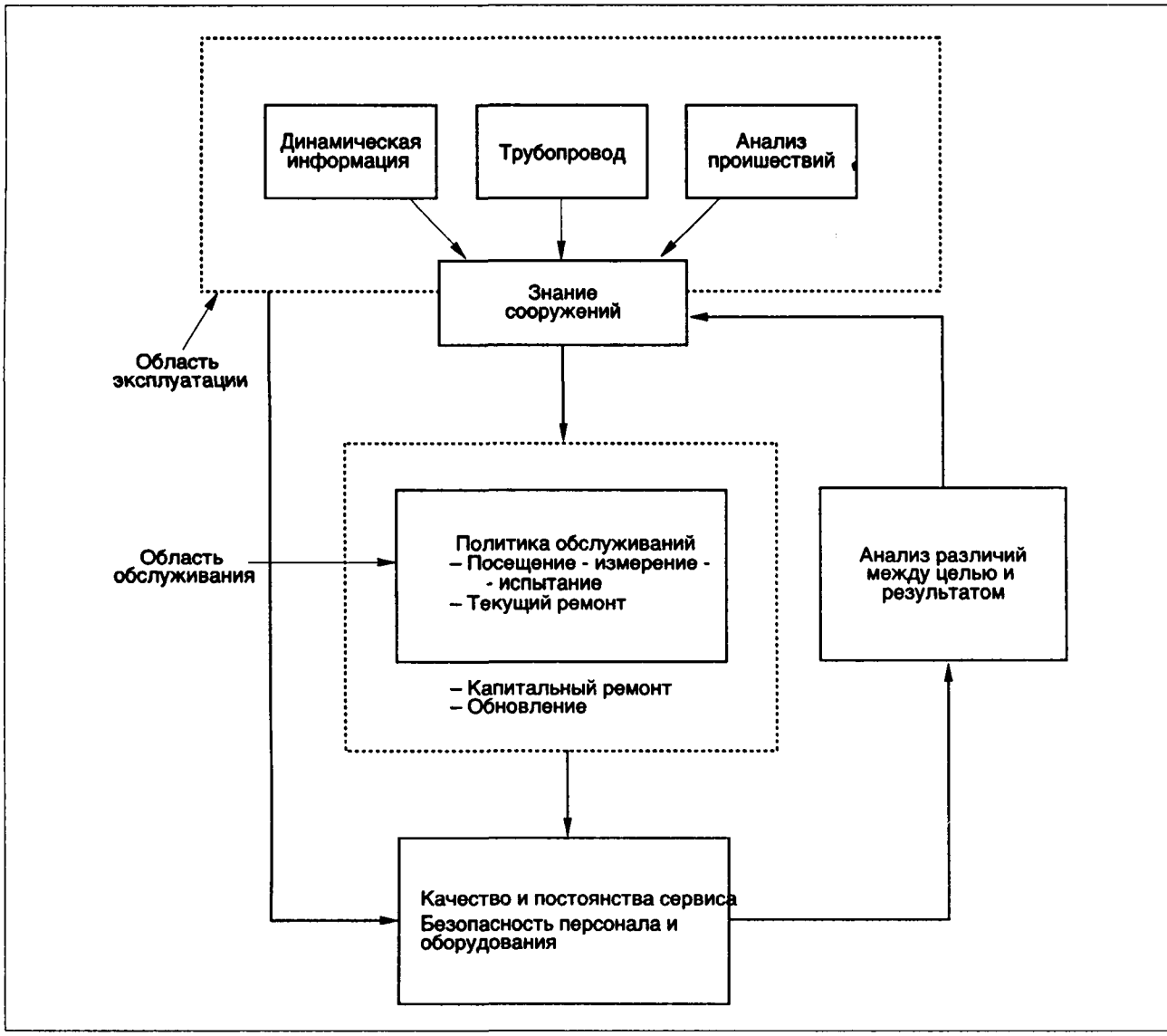


Диаграмма обслуживания

Нижеследующие критерии позволяют определить эффективность обслуживания каждого сооружения путем изучения различных происшествий и постороннего воздействия.

7.8.3.1.1. Посты снабжения, подачи и регулирования сетей

Качество регулирования и устройства безопасности.

Качество обслуживания.

Внедрение в окружающую среду (вход, шум, эстетика).

Эффективность фильтрации.

Изменение замеров сопротивления почвы и т.д.

7.8.3.1.2. Абонентские пункты регулирования

Качество регулирования, устройства безопасности и учета расхода.

Стабильность давления при учете эффективности фильтров, рекламации клиентов и т.д.

7.8.3.1.3. Сети

Изменение требований посторонних организаций.

Изменение числа обнаруженных и локализованных утечек на 1 км сети в процессе поисков утечек.

Установление (формирование) графика (выдача–покупка фактическая, выдача–поступление) баланса энергии.

Изменение степени утечек в $м^3$ в год на 1 м (либо по графику, либо замерами, если это возможно).

Изменение степени разрывов, утечек в соединениях и т.д., надежность эксплуатируемой арматуры сети.

7.8.3.1.4. Обработка газа

Изменение степени (эффективности) обработки.

Уменьшение утечек в соединениях.

Надежность постов и индикаторов обработки.

Вхождение (адаптация) поста в окружающую среду.

7.8.3.1.5. Катодная защита

Изменение: качества изоляции, отношения с партнерами, такими как муниципалитет, SNCF и т.д.

7.8.3.1.6. Ответвления и стояки

Изменение: сообщение посторонних, степень сообщений о неполадках, таких как число аварий на ответвлениях к общему числу ответвлений и т.д.

7.8.3.1.7. Станция пропана или бутана. Смеситель воздуха с пропаном или бутаном

Качество распределяемого газа. Отключение запорно-предохранительного клапана. Изменение показаний замеров грунта (потенциала). Изменение неполадок в котлах, испарителях и т.д.

7.8.3.1.8. Одоризация

Изменение степени одоризации и обращений посторонних лиц.

7.8.3.2. Ликвидация аварий и ремонт сооружений

Таблица уточняет терминологию и контекст, относящийся к понятиям аварии и ремонта.

Принципиальные вмешательства в сеть связаны с :

— утечками точечными (кратерная коррозия, прокол случайный – аварийный, деформацией или разрывами трубопроводов или ответвлений из стали или полиэтилена, механизмами общественных работ;

— трещинами, разрывами, утечками в соединениях на трубопроводах из чугуна.

В зависимости от окружающей среды, расхода газа, выходящего из нарушенного сооружения и т.д., ремонтники устраняют опасность, т.е. прекращают (перекрывают) утечку:

— либо

а) временно прекращают утечку с помощью клейкой автоматически прилипающей ленты и герметизирующей мастики;

б) устанавливают на месте оборудование ликвидации аварий и ремонта;

— либо используют прямо указанное оборудование.

	Ликвидация аварий	Ремонт
Терминология	Перевод в переходное состояние	Перевод в окончательное состояние
Характер вмешательства	Вынужденное	Предусмотренное*
Цель вмешательства	— Сохранность безопасности персонала и оборудования. — Обеспечение постоянства и/или качества обслуживания	Восстановление первоначальных технических характеристик соответствующих сооружений
Степень срочности вмешательства	Немедленное вмешательство	Возможность отложить вмешательство
Источник вмешательства	— Определение крупной утечки. — Повреждение сооружений посторонними организациями. — Сигнал о наличии запаха газа	Запрограммированные действия после ликвидации аварий, систематических поисков утечек, обследования сооружений и т.д.
* Ремонт может быть осуществлен и в ходе вынужденной ликвидации аварии, когда эксплуатационник имеет оборудование, позволяющее вернуть сооружение в окончательное состояние.		

Терминология, относящаяся к ликвидации аварий и ремонту.

7.8.3.2.1. Оборудование для ликвидации аварий на сетях

Это прежде всего рукава (муфты) различных конструкций (таблица на с. 660), используемые в определенных условиях:

— утечки точечные, деформации очень локализованные и т.д. на трубопроводах из стали или полиэтилена;

— трещины, разрывы на трубопроводах из чугуна.

7.8.3.2.2. Оборудование для ремонта сетей

Оно применяется для приведения в окончательное состояние сооружений. Его используют в следующих случаях:

— когда вмешательство осуществляется на месте и в точке установки оборудования и ликвидации аварии;

— для операций, точно программированных на временно проложенных трубопроводах, когда предыдущее вмешательство было предусмотрено;

— для ремонта систематического характера, когда технико-экономическое исследование показало, что это решение более выгодно, чем тюбаж или перекладка.

Оборудование для ремонта делится в основном на четыре категории:

— муфты механические,
— кольца и герметические прокладки,
— муфты пластиковые (термосжимаемые, термозатвердеваемые, полимеризирующиеся),
— продукты закупорки.

Их использование зависит от:

— типа нарушений в результате аварии (трещина, утечка в соединении и т.д.) и материала трубопровода;
— типа распределяемого газа, в первую очередь его плотности;
— рабочего давления сооружения, подлежащего ремонту.

В таблице указаны оборудование, наиболее часто применяемое при ремонте, и область его применения. Констатируют, что они относятся только к трубопроводам из чугуна. Это говорит в действительности о том, что дефектные элементы трубопроводов из полиэтилена и стали, кроме особого случая стали, эксплуатируемой под давлением ≤0.4 бар, систематически заменяются. Замена же сети, работающей при среднем давлении (MPC) заключается в восстановлении сооружения в первоначальное состояние, соответствующее правилам безопасности.

Все трещины на чугунных трубопроводах должны исследоваться и анализироваться перед ремонтом в зависимости от причины аварии.

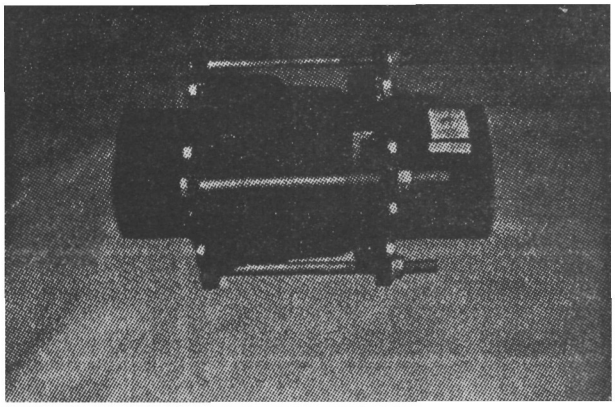
7.8.3.2.3. Таблицы, характеризующие оборудование для ликвидации аварий и ремонта сети

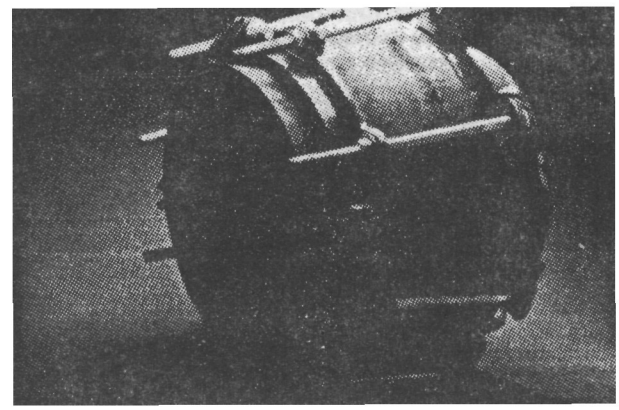
Тип муфты		Размер	Ликвидация аварии				Ремонт				
			Сталь	Полиэтилен	Чугун ковкий	Другой чугун	Сталь	Чугун ковкий	Другой чугун		
								Отверстие или трещина продольная	Отверстие или трещина продольная	Разрыв без разведения губ	Разрыв с разведением губ
Без перекрытия газопровода	*Давление ≤ 4 бар*										
	Детали герметичности «Tespa»		X	X	X	X					
	Устанавливать:										
	— стиль 118	15 - 50	X	X							
	— стиль 330	50 - 100	X	X	X	X					
	Rockwell тип SB	50 - 300	X	X	X	X					
	Electroma, Indusha — Тип AP3	40 - 400	X	X	X	X		(1)	(1)	(1)	
	Manips, EIE, Melcher — Тип kW 110	40 - 150	X	X	X	X		(1)	(1)	(1)	
	Waffrega — Тип D5/3	40 - 400	X	X	X	X		(1)	(1)	(1)	
С перекрытием газопровода	Устанавливать:										
	— стиль 129 тип 1	50 - 1 000									X
	— стиль 129 тип 2	50 - 400	X				(2)				
	Viking Johnson										
	— для стали (сеть)	50 - 400	X				(2)				X
	— асимметричное	50 - 300	X				(2)				X
	— для чугуна (сеть)	60 - 1 000									
Без перекрытия газопровода	MPC										
	Plidso Split-sleeve	50 - 300	X								
	Lall-storm MA4	50 - 300	X								
	Plidco Weld + ENS	50 - 300	X								
	Lall-storm coupling — тип 1	50 - 300	X								

(1) – с болтами ковкого чугуна (или нержавейка);
(2) – только для сетей низкого давления (BP).

Оборудование для ремонта сетей и ликвидации аварий.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ





Ремонтное кольцо.

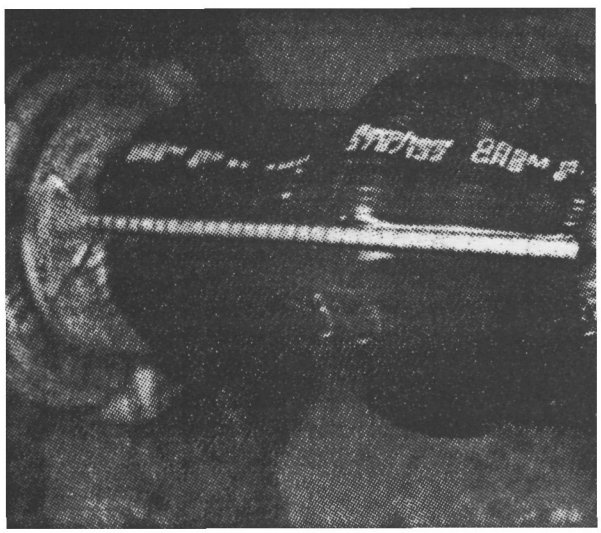
Тип пластической муфты	Размер трубы	Примечание
Давление низкое ВР и ВРА (только)		
Муфта термосокращаемая, системы «Raychem»	40 - 500	Опасно для сети, распределяющей тяжелый газ
Муфта термосокращаемая, системы «Rayseal»	40 - 300	Нет ограничений по природе газа
Муфты наружные процесса «Société Le Joint» внутренние	100 - 400	Не пригоден для ремонта при утечках в соединениях
Муфты наружные процесса «Belzona Molecular» супер металл		*То же*

Муфты для ликвидации утечек в соединениях.

Установка колец часто очень тонкая операция, так как требуется уделять много внимания предварительной очистке труб и разрезу на месте установки соединения. Можно только посоветовать использовать специальный инструмент (пескоструйка, коробка и полотна для разреза прокладок).

7.8.3.2.3.3. Пластические муфты

Пластические муфты применяются для ремонта трубопроводов из чугуна, за исключением ковкого чугуна (Express 2GS), соединения (прокладки) которого заменяются идентичными.



Ремонт утечек с помощью термосжимающего футляра.

Термосжимаемые муфты применяют при ремонте утечек из соединений на чугунных трубопроводах. Ремонт производится:

— путем подогрева муфты на слабом пламени горелки (система Raychem.);

— путем соединения с электросопротивлением от приспособленного сварочного поста (система Rayseal).

Под действием тепла муфта сжимается, принимая нужную форму и прижимая к фланцам липкую мастику заполнения, нанесенную предварительно для смягчения действия углов соединения (контрфланцев, болтов).

Муфтовые соединения используются на чугунных трубопроводах, отличных от ковкого (Express 2GS):

— для ремонта круговых трещин без отгибания осевых губ;

— для соединения без газа трубопроводов одинакового диаметра (процесс Ioint внутренний и Belzona) или разных диаметров (процесс Belzona).

Перед установкой муфтовых соединений трубопровод необходимо очистить, обезжирить, промыть растворителем от гудрона и перекрыть утечки через трещины.

Процесс "Ioint внутренний" состоит в создании пластыря из смеси последовательно наносимых различных полимеризуемых составляющих:

— полиуретан + стекловолокно,

— лента неопрена, закрепленного кольцом сжатия,

— полистер + стекловолокно.

Процесс Belzona состоит в применении резины, состоящей из смеси базового металла и затвердителя, на ремонтируемом или монтируемом трубопроводе.

Пластмасса наносится на место и поддерживается с помощью листовой стали или полуколец.

Последовательная обработка нескольких соединений обеспечивает жесткость трубопровода.

Строгое выполнение технологии является залогом успеха применения этих двух операций.

7.8.3.2.3.4. Закупоривающие материалы

Система и процессы, комплекс готовый к использованию	Размер	Примечание
Давление BP и BPA		
Система Scotchrap de la Société 3M France	60 - 200	Используется исключительно на трубопроводах из чугуна типа разъем и шнур
Система PLCS *	80 - 1 000	Используется для ремонта соединений чугунных трубопровода.
Система PLCSTHF	60 - 200	Исключительно на соединениях из ковкого чугуна, которые предпочтительно идентичны.
Процесс Braipox M20 Orchem		
* В стадии испытания находится система PLCS, которая позволяет ремонтировать трубопроводы из чугуна, эксплуатирующиеся при p ≤ 0,4 бар.		

Система Scotchrap составляет комплекс продуктов, служащих для ремонта соединений:
— первичный липкий слой, наносимый на трубопровод после чистки;
— мастика в виде валика или из пластичной глины для изоляции утечек в разъемах;
— клейкая лента для механической защиты изолирующей мастики.

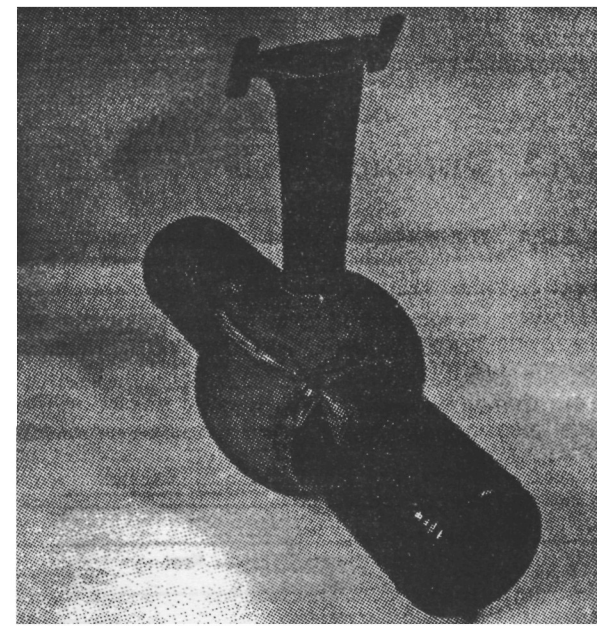
Принцип системы PLCS состоит в обеспечении герметичности соединений на:
— чугунных трубопроводах (из битумных материалов);
— соединениях Gibault, установленных на стальных трубопроводах.

Полимеризующуюся пластмассу сжимают в оболочке из нейлона таким образом, чтобы сформировать рукав на ремонтируемом соединении. Прилипание первого слоя способствует приклеиванию пластмассы на предварительно очищенный трубопровод.

Система PLCSTHF – это аналог предыдущей системы для работ на верху траншеи с использованием "всасывающих" землеройных машин.

Процесс Braipox M20 используют для ремонта утечек в соединениях смесь смолы отвердителя и эпоксидной смолы.

Нагрузка в виде кремнистого песка позволяет увеличить плотность продукта для того, чтобы уменьшить высоту запора над трубопроводом; перекрытие утечек, в действительности, осуществляется за счет веса продукта, когда он растекается в форме. Этот процесс производится на верху траншеи.



Система PLCS.

Замечание: Существуют два продукта, позволяющих производить ремонт утечек на резьбовых соединениях поднятого трубопровода путем наружного закупоривания (продукт закупорки Pierlon BC60 и мастики KSR Astral специально GDF). Указанные материалы применяются прежде всего при ремонте точечных повреждений.

Существуют также процессы, позволяющие осуществлять систематический контроль и ремонт трубопровода:
— механический ремонт внутренних соединений ("Joint interne") для трубопроводов из чугуна диаметром ≤400 мм;
— ручной ремонт соединений внутри ("Weco-Seal") для трубопроводов из чугуна диаметром ≥500 мм;
— система "Phoenix", которая позволяет покрыть изоляцией обветшалый трубопровод независимо от типа и размера трубопровода.

Очевидно, стоимость этих процессов снижает эффективность их использования.

7.8.4. Работы на трубопроводах под нагрузкой (газом)

7.8.4.1. Подготовка работ

Выполнение работ на трубопроводах под газом (нагрузкой) требует подготовительных операций и в сложных случаях получения разрешения на врезку в следующих случаях:
— сложных операций на сетях низкого (BP) и среднего давления (MPB);
— во всех случаях врезки (вмешательства) в сети, подчиняющиеся регламенту безопасности.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

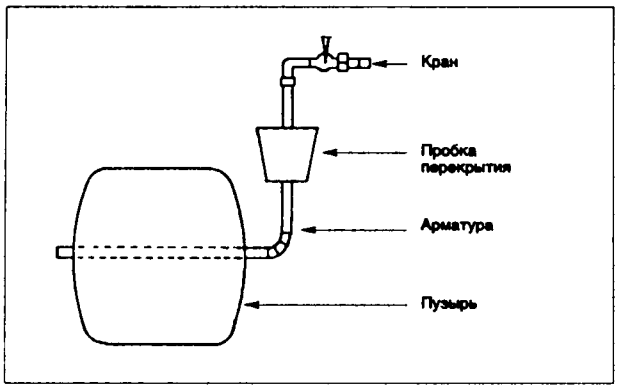
Перед всеми вмешательствами необходимо установить связь с потенциальными службами. Дополнительно к этому рассматривается необходимость установки байпасса.

7.8.4.2. Оборудования перекрытия

7.8.4.2.1. Баллоны

Баллоны состоят из расширяющейся оболочки (пузыря), которая может быть защищена чехлом из антистатической ткани. Они могут иметь внутреннюю арматуру.

Область применения баллонов – трубопроводы низкого давления (BP) и низкого давления, улучшенные (BPA).

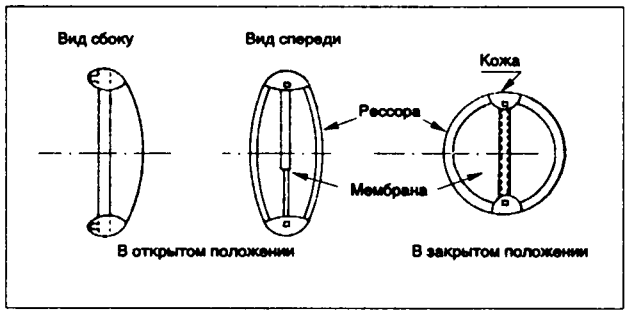


Баллон.

7.8.4.2.2. Запор мембранный

Состоит из мембраны, усиленной распором по окружности и смонтированной на арматуре, представляющей плоские рессоры. Натяжка троса создает форму запорного диска.

Область применения – трубопроводы среднего (MPA) и прежде всего низкого (BPA и BP) давления.



Запор мембранный.

7.8.4.2.3. Запор чашечный или гибкий

Перекрытие обеспечивается путем деформации:

— либо чашечки (система Williamson);

— либо пробки (система Muellem и Piedfort) (см. рисунки с. 665).

Запор устанавливается на место с помощью машины, работающей под нагрузкой (газом). Он состоит из:

— задвижки полнопроходной;

— корпуса-носителя инструмента, позволяющего перемещать последний без выпуска газа и имеющего устройство для продувки или байпасс.

Область применения – сооружения, работающие под средним давлением (MPA, MPB, MPC).

7.8.4.2.4. Сплющиватель труб

Принцип его работы состоит в деформации трубопровода до тех пор, пока не прекратится проход газа. Применяется прежде всего на полиэтиленовых трубопроводах наружным диаметром ≤110 мм. (см. рисунок с. 665).

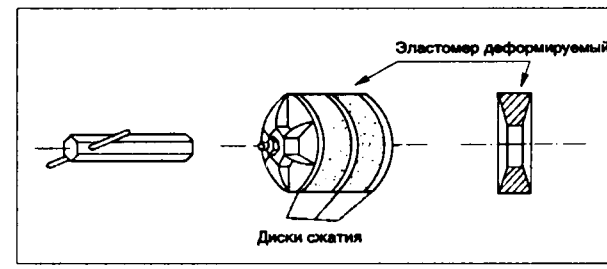
7.8.4.2.5. Дополнительные уплотнительные устройства

Они используются для соблюдения безопасности работ.

7.8.4.2.5.1. Уплотнительный поршень

Его принцип действия состоит в том, чтобы вызвать деформацию дисков из эластомера, расположенных между металлическими фланцами, которые движутся по оси с резьбой.

Они используются на чугунных и стальных трубопроводах низкого и среднего давления.



Уплотнительный поршень.

7.8.4.2.5.2. Полное покрытие

Они применяются, если необходимо получить полную герметичность.

7.8.4.3. Соединение сооружений

Методы врезки под давлением в значительной степени идентичны для сооружений, работающих при низком и среднем давлении.

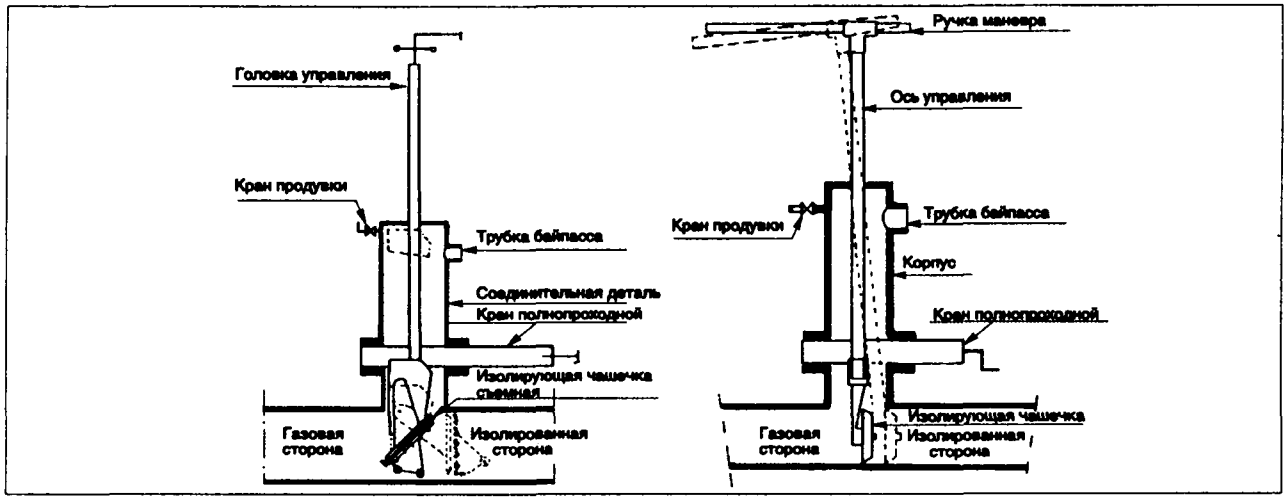
Определенные предосторожности должны быть предварительно приняты:

— постоянство снабжения потребителей;

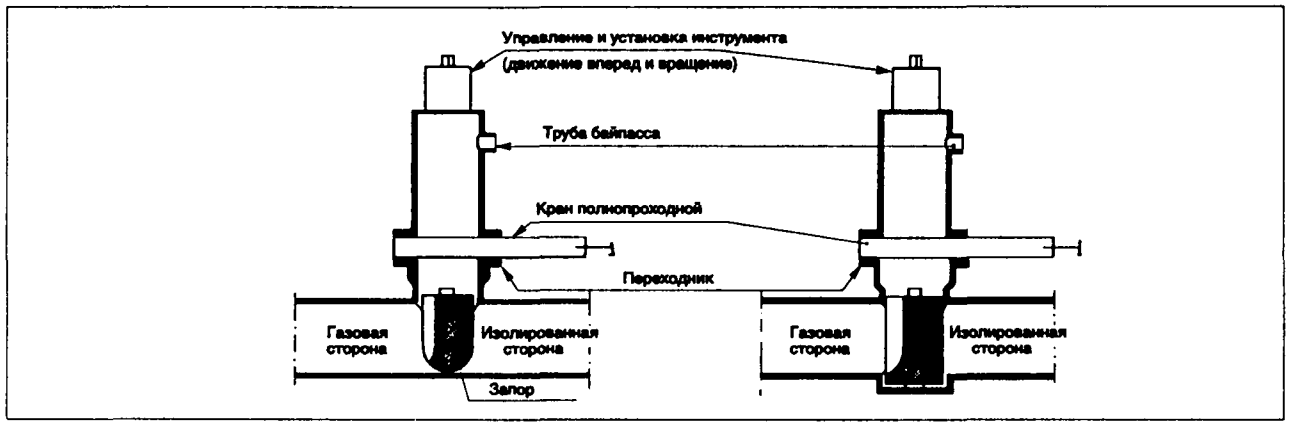
— индивидуальная и коллективная безопасность для рабочих;

— безопасность посторонних организаций и оборудования рядом со стройкой.

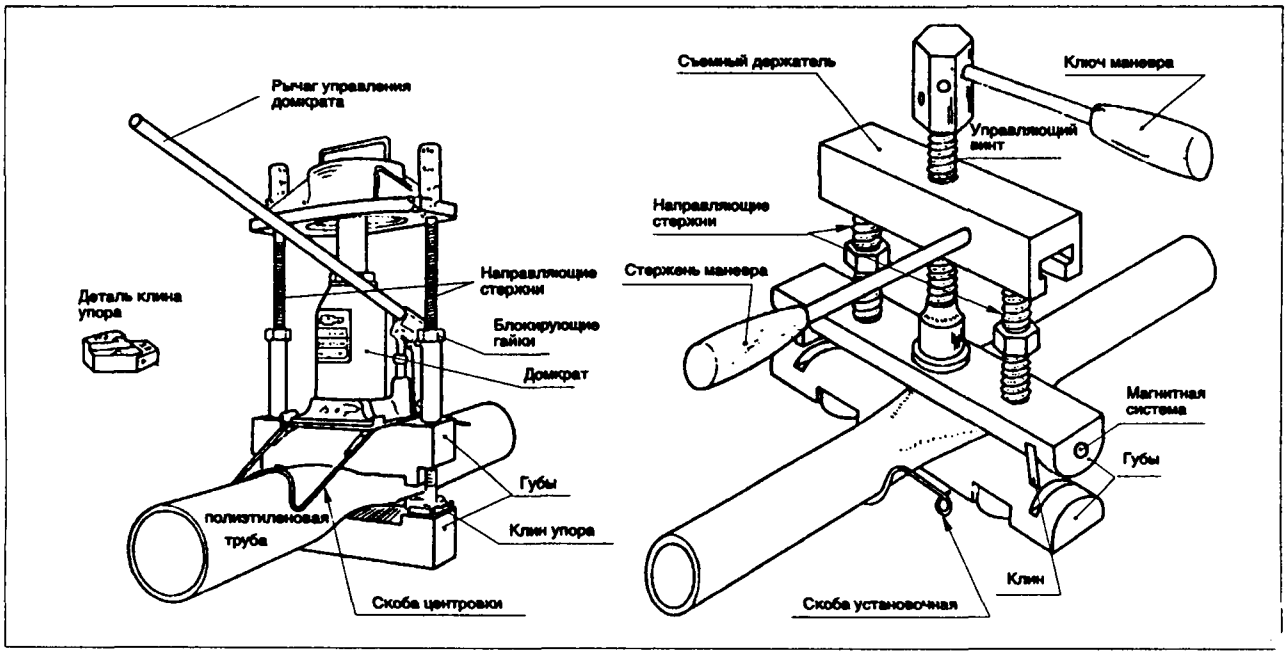
7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ



Чашечный запор (система Willamson: Shortstop 275 и Shortstop 60).

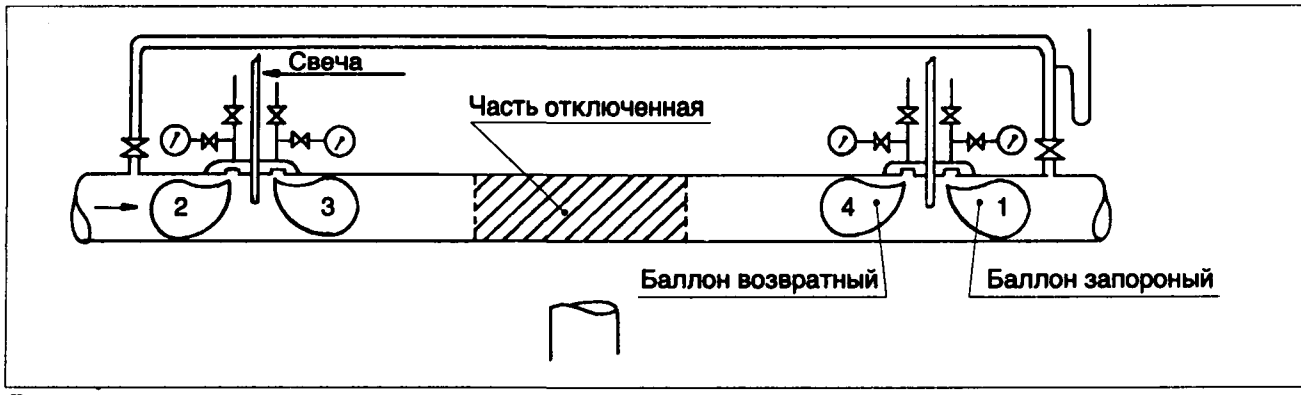


Перекрытие при врезке (простое ис кольцевым запором) (система Muller и Piedford).

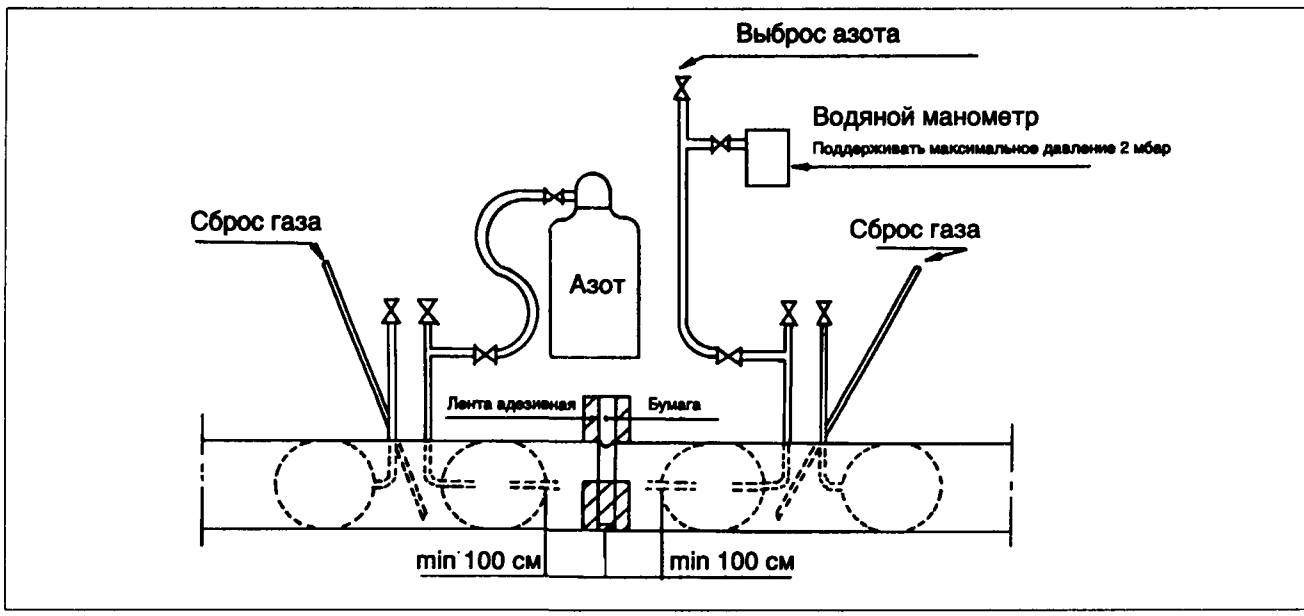


Принцип действия сплющивателя труб.

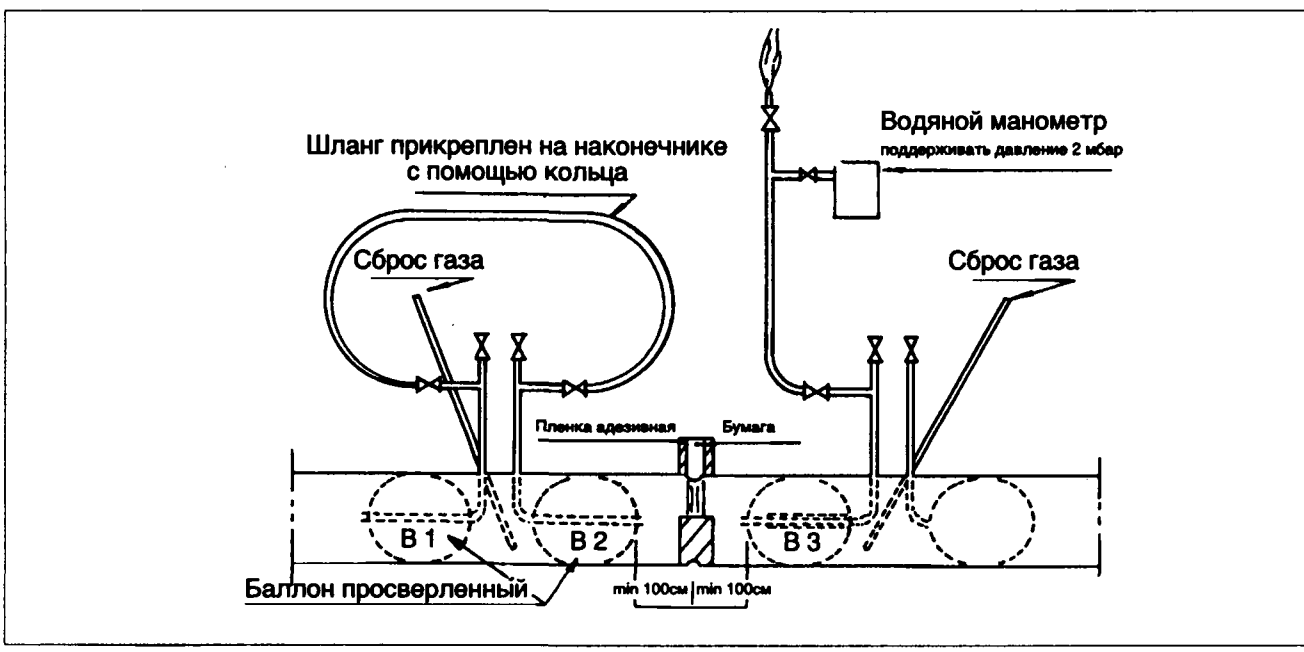
7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ



Принцип подсоединения к сооружению низкого давления.



Врезка в стальной газопровод с использованием инертного газа.



Врезка в стальной газопровод с горючим газом.

7.8.4.3.1. Соединение сооружений низкого давления (BP и BPA)

7.8.4.3.1.1. Общие случаи

Соединения бывают:

— в линию —— ·····, т.е. продолжение или вставка —— ····· ——;
— ответвление —— существующее сооружение
: подсоединенное сооружение

Соединения реализуются:

— механически (чугун или сталь),
— сваркой (сталь),
— электросваркой (полиэтилен).

7.8.4.3.1.2. Особые случаи

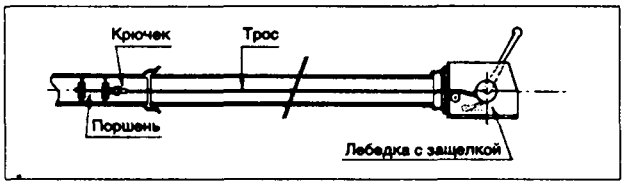
7.8.4.3.1.2.1. Техника соединения на стальных сооружениях

Врезка на стальных сооружениях реализуется сваркой с инертным газом или сваркой с горючим газом (см. с. 666).

7.8.4.3.1.2.2. Соединение чугунных сооружений с помощью поршня

Новый трубопровод устанавливается в линию и на место старого. Он заполняется газом путем перемещения поршня-затвора с помощью лебедки для исключения удара при протяжке.

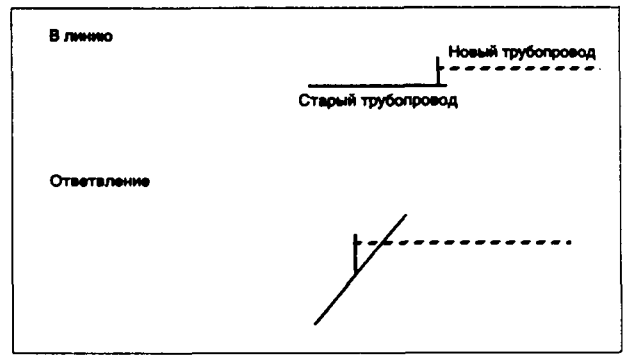
В каждый момент остановки строительства конец трубопровода закрыт, поршень остается в трубе.



Соединение чугунных сооружений с помощью поршня.

7.8.4.3.2. Соединение трубопроводов среднего давления

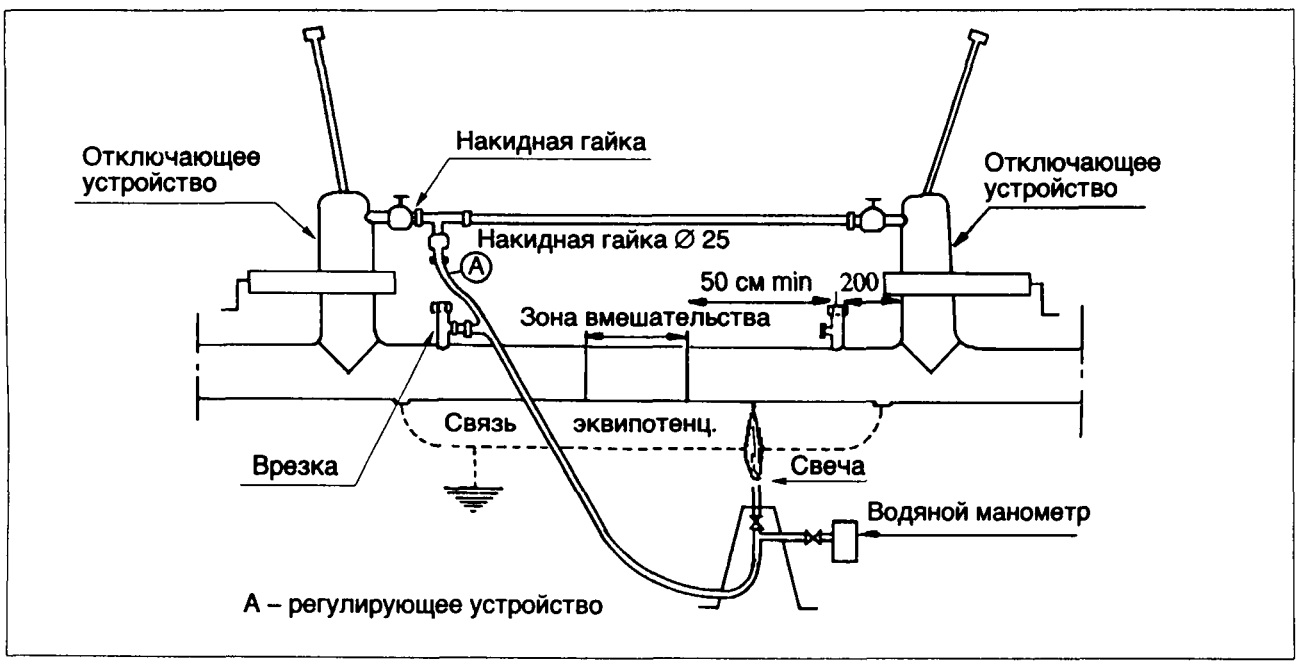
Принцип соединения трубопроводов среднего давления аналогичен технике для низкого давления: в линию, вставка, ответвление. Возможно дополнительное использование тройников (с. 668).



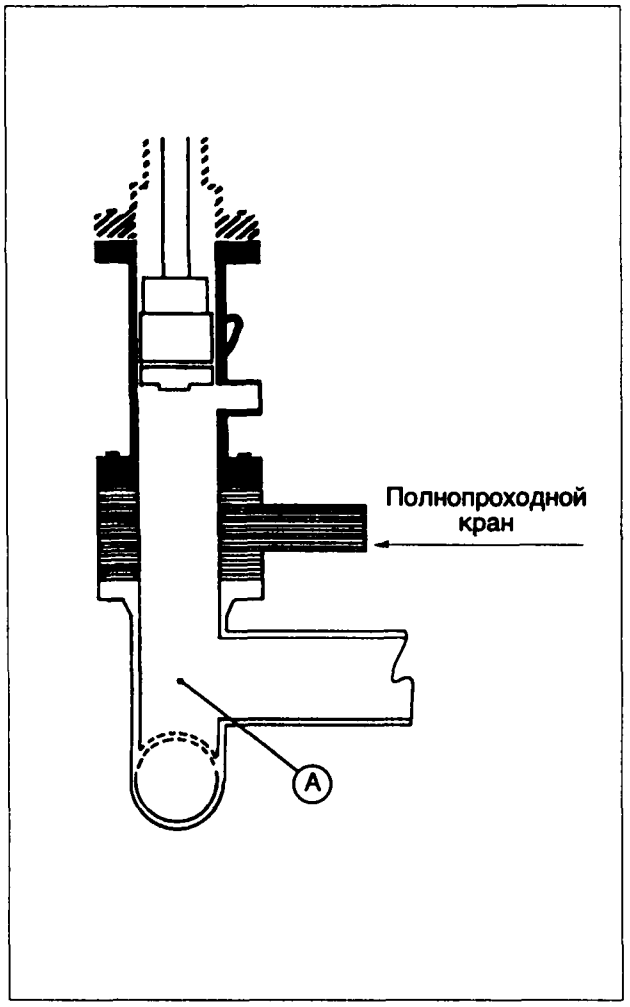
Соединение трубопроводов среднего давления.

7.8.4.3.2.1. Техника соединения на сооружениях среднего давления

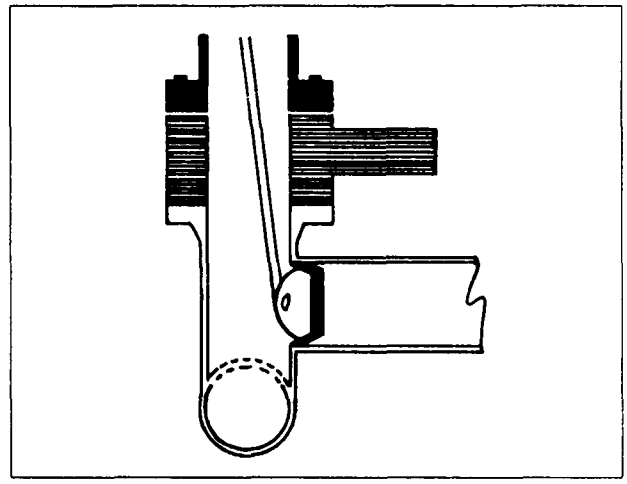
Сваривать соединения можно под газом при пониженном давлении (2 мбар max) или без газа.



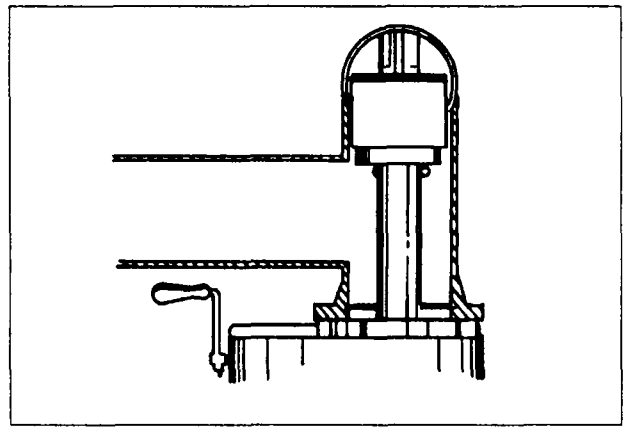
Сварка при пониженном давлении газа.



Сверление тройника и пуск газа.



Перекрытие с помощью чашечки.



Перекрытие с помощью деформируемого эластомера.

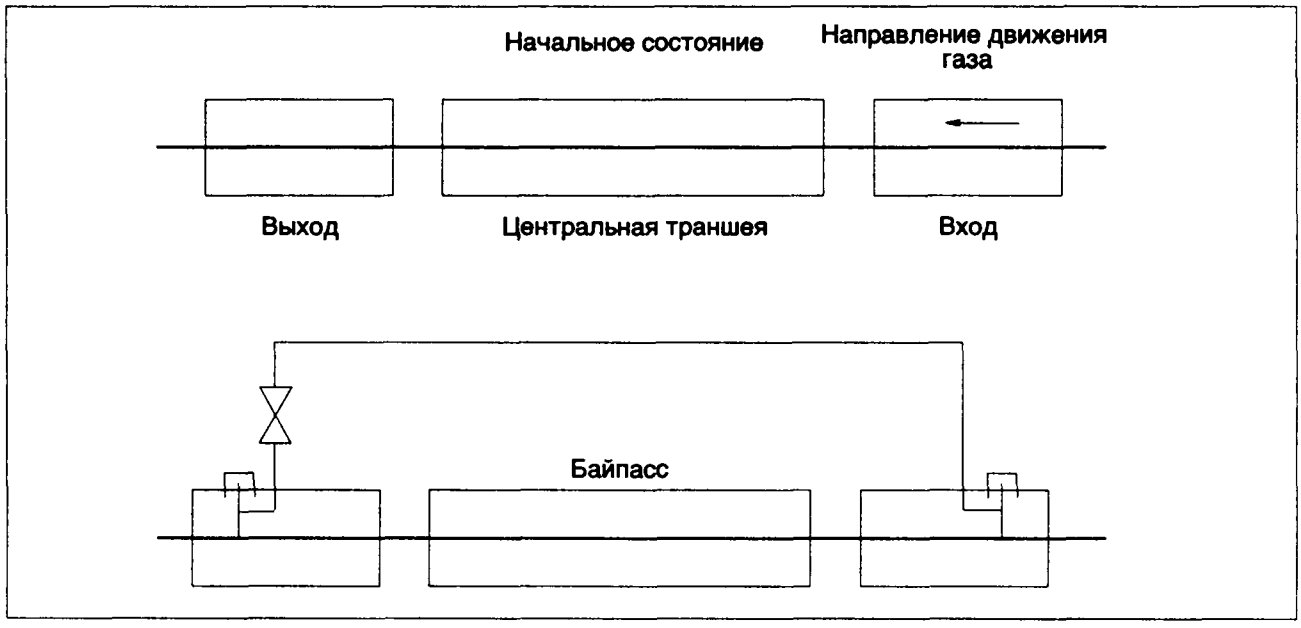
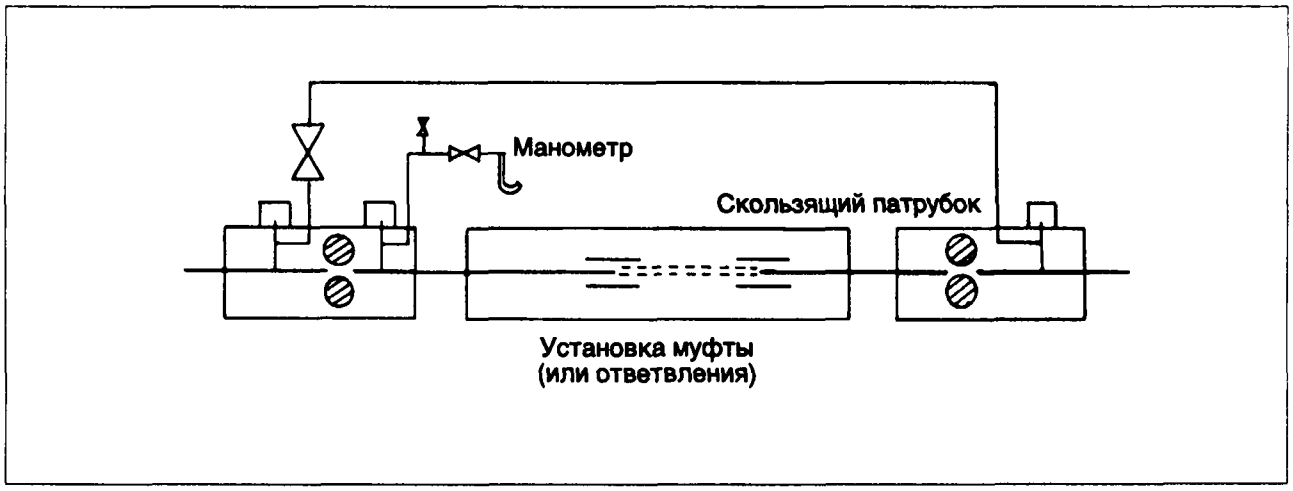
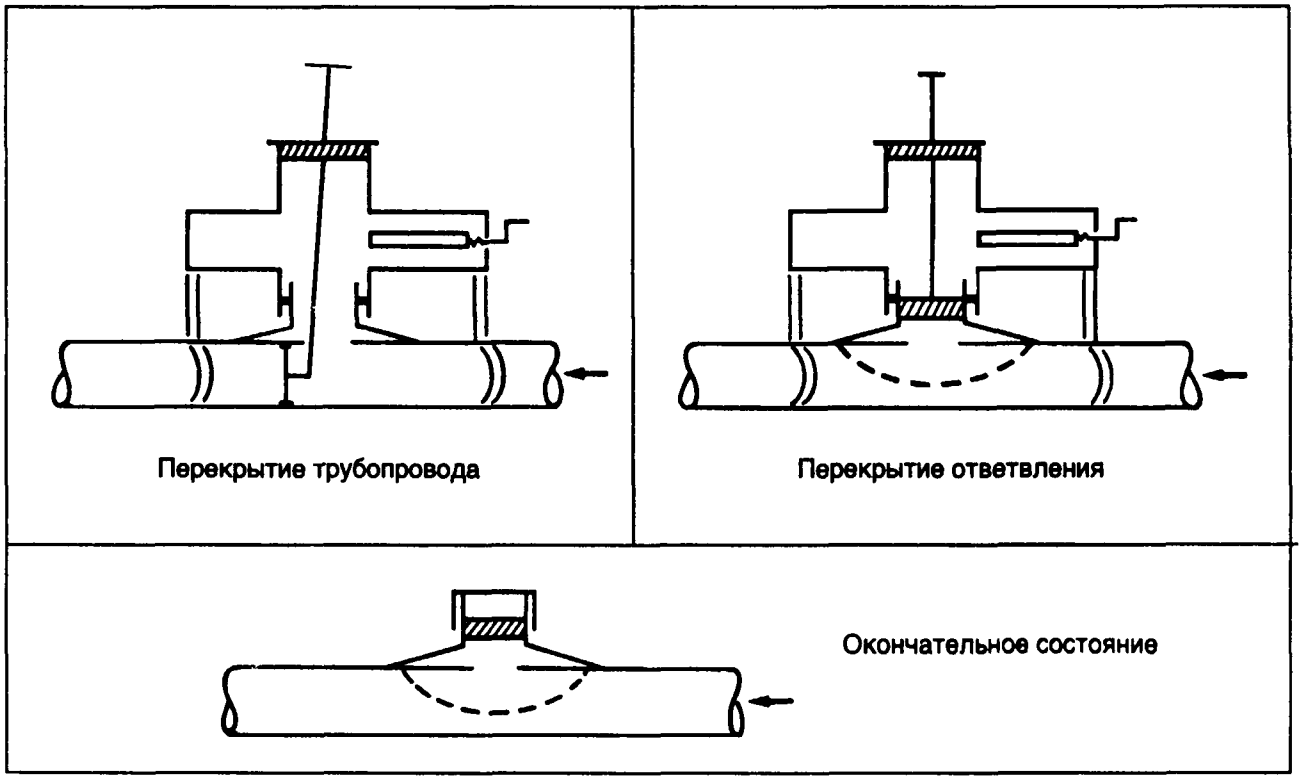


Схема соединения с помощью электросварки.

7 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ



Перекрытие с помощью сплющивателя труб.



Перекрытие под давлением.

Сверление тройника ответвления и пуск газа после сварки без газа представлено на рисунках с. 668.

Использование тройников облегчает врезку при дальнейшей эксплуатации.

7.8.4.3.2.2. Соединение конструкций из полиэтилена при среднем давлении (В)

Соединение полиэтиленовых труб разделяется на три этапа:

— установка байпасса;

— продувка и соединение. Перекрытие трубопровода реализуется:

а) путем сжатия (пережатия) труб наружным номинальным диаметром 110 мм;

б) с помощью оборудования для врезки под давлением для трубопроводов наружным диаметром от 125 до 200 мм;

— продувка, пуск газа и установка на место усиливающей подкладки в части трубопровода, который был пережат;

— перекрытие врезки и электросварка пробки, если врезка осуществлялась под давлением.

7.9. РЕГЛАМЕНТАЦИЯ, ОТНОСЯЩАЯСЯ К СООРУЖЕНИЯМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗА

7.9.1. Регламентация технологической концепции установок и безопасности

7.9.1.1. Правила безопасности сооружений транспорта горючих газов по трубопроводам

Речь идет об Указе от 11 мая 1970 г., относящемся к сооружениям транспорта, которые применяются к сооружениям распределения, при выполнении одновременно трех условий: материал труб – сталь; давление – рабочее, которое может быть достигнуто в процессе эксплуатации по крайней мере 4 бар; произведение давления (в бар) на диаметр наружный (в мм), по крайней мере равно 1500 (Р.Д. ≥ 1500).

7.9.1.2. Технические правила и правила безопасности, применяемые к установкам горючих газов и сжиженных углеводородов, расположенных в жилых зданиях или зависимых от них

Речь идет об Указе от 2 августа 1977 г., который применяется к общим отключающим устройствам и всем сооружениям, расположенным ниже.

Надо заметить, что для части сооружений, которые входят в концессию поставщика, строитель совместно с поставщиком должен выбрать необходимую техническую спецификацию.

Указ от 2 августа 1977 г. дополняется инструкцией DTU 61-1 "Installations de gaz", журналами нагрузок, которые адресуются к строителю, и инструкцией, относящейся к общественным работам, пуску сооружений (началу строительства) и пуску в работу.

7.9.1.3. Примечания

Для распределительных сетей, не относящихся к Указу по транспорту от 11 мая 1970 г. или декрету от 18 января 1943 г., т.е. в общем для сооружений среднего низкого давления (МРВ и ВР) так же, как для подсоединений (ответвлений), расположенных вверх от общих отключающих органов, не существует регламентации публичных властей. Правила, которые применяют, вырабатываются строителем.

Впрочем, журнал нагрузки распределения, подготовленный ответственным за входящие в концессию сооружения распределителем, имеет цель зафиксировать правила, установить техническую спецификацию для выбора предприятия, улучшения оборудования, пуска в работу сооружений, проверки обслуживания и эксплуатации сооружений, имеющих нагрузку.

Заметим, что декрет от 18 января 1943 г. предусматривает, что общественные власти могут установить технические правила и правила безопасности, если сооружения, входящие в систему распределения, подвержены по своей природе часто повторяющейся или тяжелой по последствиям опасности.

7.9.2. Регламентация

7.9.2.1. Создание концессии системы общественного распределения газа

Она может рассматриваться только в виде соглашения общественного распределения, которому придается журнал нагрузки, фиксирующий права и обязанности соответствующих авторитетов, концессионеров и потребителей.

Начиная с закона от 2 марта 1982 г. и дополнительного закона от 22 июня 1982 г., журнал нагрузки одобрен декретом № 61-1191 от 27 сентября 1961 г. и может служить только моделью.

Журнал нагрузки является предметом обсуждения между авторитетами соглашения и будущими концессионерами. Соглашения и журнал нагрузки принимаются решением муниципальных советов и не могут быть приняты префектом.

В общем журнал нагрузки обсуждает следующие основные вопросы: пределы и сроки концессии, расположение сети и прикрепленных клиентов, условия поставки и качество газа.

Если поставщик хочет снабжать новых клиентов от существующих сооружений на основе новой концессии, он должен удовлетворить требования декрета от 15 октября 1985 г. (режим транспорта горючих газов по трубопроводам).

7.9.2.2. Заявление о намерении вести работы рядом с сооружениями газа

Первый министерский циркуляр от 16 августа 1972 г. приглашает префектов принимать типовое соглашение как дополнение к циркуляру.

Второй циркуляр от 30 октября 1979 г. устанавливает типовой формуляр, который заменяет выработанные каждым концессионером.

Третий циркуляр от 20 мая 1980 г. приглашает префектов модифицировать существующую процедуру для адаптации к новым решениям.

Рекомендуется устанавливать контакты с префектурой и жителями, чтобы знать требования, которые необходимо соблюдать.

7.9.2.3. Дорожный кодекс (Закон от 22 июня 1989 г. и декрет от 4 сентября 1989 г.)

Эти тексты рассматривают условия ведения работ во всех общественных местах (дороги коммунальные, дороги департаментов, дороги национальные) и деревенские дороги, которые являются частью личной собственности и подчиняются тем же регламентам, что и общественные.

7.9.2.4. Другие общественные сферы

Речь идет о государственной общественной сфере, т.е. сфере водных, морских, воздушных и, начиная с 1 января 1983 г., железных дорогах.

Циркуляр № 80 от 26 декабря 1966 г. министра оборудования предусматривает получение специального разрешения в особых случаях.

Часть общественной сферы может быть передана компаниям или коммерческим структурам (например, Национальная компания "Phone", коммерческие и рыболовные порты и т.д.). Сочетание этих сфер позволяет заключить соглашение – обязательства участников.

7.9.2.5. Частные владения

Они могут принадлежать коллективу, коммуне, департаменту, предприятию или частнику (начиная с 1 января 1983 г., SNCF становится индустриальным и коммерческим предприятием, сфера деятельности которого оговорена государством и частным владением).

Во всех случаях занятие этих земель (сфер) требует соглашения об их использовании и взаимоотношениях, предусматривается обычно арендная плата.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА

8.1. Общая часть

8.1.1. Соотношение использования газа в жилом фонде, на общественные нужды и в промышленности

В 1988 году:

Потребители	Газ сетевой		Сжиженный нефтяной газ	
	Mtep P. S. I.*	%	Mtep P. S. I.**	%
Жилье	8,7	39	1,7	65
Общественные нужды	3,1	14	0,2	8
Промышленность	10,7	47	0,7	27
	22,5	100	2,6	100

* Природный и сжиженный нефтяной газ (C. P. L.).
** В соответствии с условиями лаборатории, "Энергетические наблюдения": 1 т G. P. L. = 1,095 tep P. C. I. и 1 МВт·ч P. C. S. природного газа = 0,744 tep P. C. I.

Приведенные потребления газа с учетом климатических условий (1988 г.). Источник: Энергетические наблюдения. P. C. I. – низшая теплота сгорания; P. C. S. – высшая теплота сгорания. Прим. ред.

8.1.2. Использование в жилом фонде

Большая часть потребляемого сетевого газа используется на отопление жилья. Для сжиженного нефтяного газа – это использование газа в газовых домовых плитах, которые преобладают.

Потребители	Сетевой газ	Сжиженный сетевой газ
Отопление	6,3	0,5
Горячее водоснабжение	1,8	0,5
Газовые плиты	0,6	1,1
	8,7	1,9

Потребление в 1988 г. в Mtep P. C. I. Источник: Энергетические наблюдения.

Отопление жилья в 1988 г. Прогноз C.E.R.E.N. (Центр по изучению и исследованию экономики энергопотребления).

	В тысячах		
	Павильонов	Квартир	Сумма
Отопление центральное индивидуальное	2 419	2 200	4 619
Отопление центральное коллективное	–	1 988	1 988
Сумма	2 419	4 188	6 607

Горячее водоснабжение может осуществляться от системы отопления (котел смешанный) или от независимого аппарата. В 1988 г. количество независимых аппаратов (один аппарат на квартиру) оценивалось в пять миллионов. Аппараты работают на сетевом или сжиженном газе (источник C.E.R.E.N.).

Что касается газовых плит, их количество оценивается исходя из того, что двадцать один миллион квартир оборудовано плитами (источник C.E.R.E.N.).

Среди этих квартир около восьми миллионов оборудованы смешанными аппаратами, работающими на газе и электричестве.

8.1.3. Использование в общественном секторе

Потребление в 1985 г. составило 3,1 Мтер PCI для сетевого газа и 0,2 Мтер PCI для сжиженного газа . Соотношения потребления между отоплением, горячим водоснабжением и плитами оценить очень трудно. Доля отопления должна составлять около двух третей от общего потребления природного газа. В настоящее время проводится новая оценка. Отапливаемая поверхность составляла в начале 1983 г. 98 миллионов м^2 для природного газа и 16 миллионов м^2 для G.P.L (источник B.I.P.E – бюро исследования, информации и прогнозирования экономики).

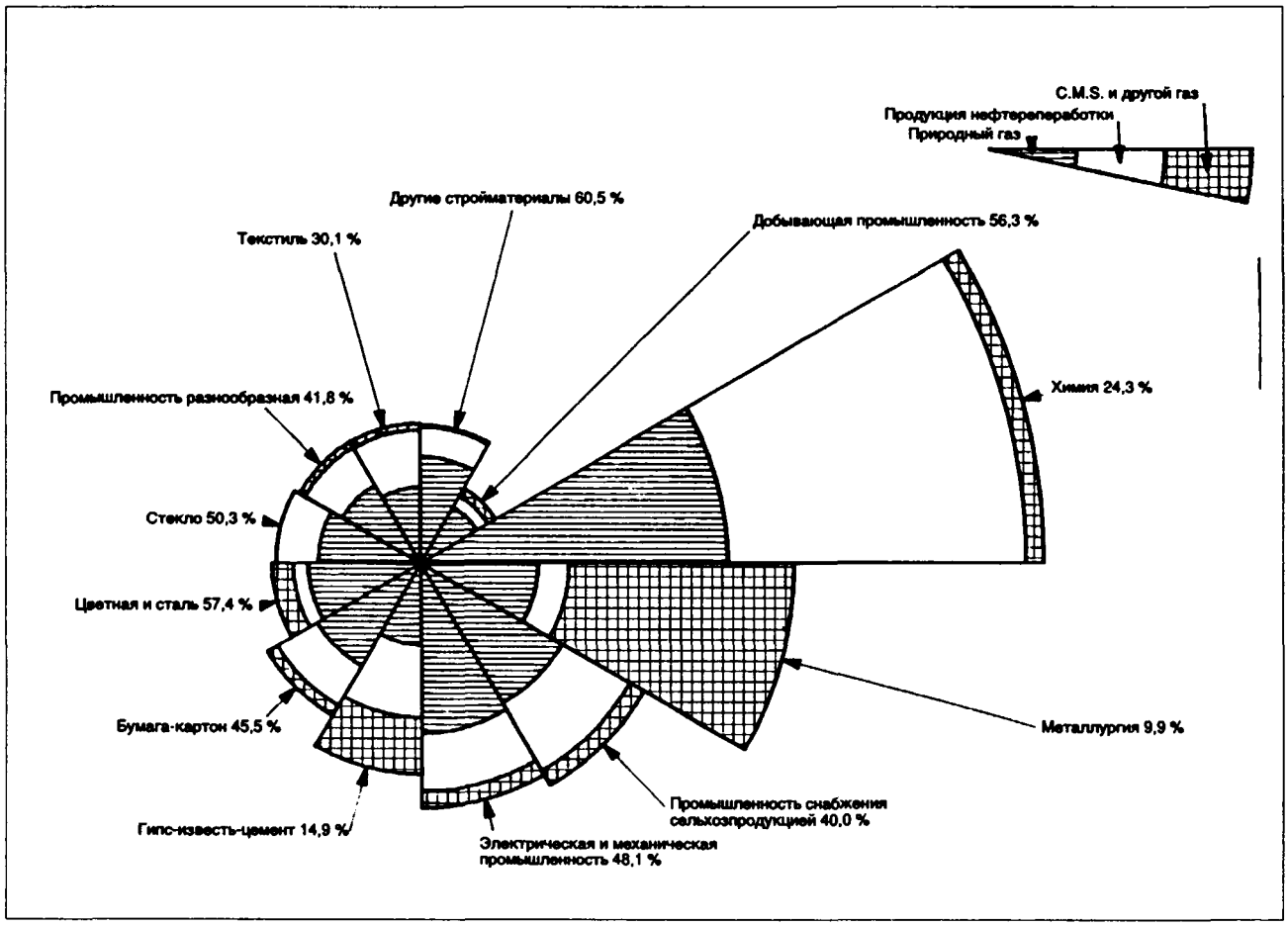
8.1.4. Использование в промышленности

На основе анкеты (C.E.R.E.N. 1987 г.) оценивают, что потребление в настоящее время подразделяется в зависимости от аппаратов и направления использования следующим образом:

	Котлы	Другие аппараты	Общее
Газ сетевой	39	6	100
G P. L.	17	83	100

	Сырье	Отопление	Изготовление	Другое использование	Сумма
Газ сетевой	15	10	71	4	100
G P. L.	42	9	45	4	100

Использование газа в различных сферах деятельности очень различно. Оно в 1986 году колебалось от 10 до 60% общего потребления топлива в каждом секторе. Это иллюстрируется приводимой схемой.



Потребление топлива отраслями промышленности в 1986 году

8.2. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ

8.2.1. Истечение флюидов в горелках

8.2.1.1. Истечение на выходе инжектора

8.2.1.1.1. О режимах истечения

Тип течения флюидов в трубопроводе определяется характерным числом, называемым числом Рейнольдса, которое записывается:

$$Re = \frac{VD}{\nu},$$

где:

V – скорость газа, м/с;

D – диаметр трубопровода, м;

ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Если

— Re < 2000: истечение осуществляется параллельными струями со скоростью, изменяющейся прогрессивно от стенки к центру трубы. Истечение (течение) называется ламинарным.

— Re > 3 000: течение называется турбулентным; скорость изменяется резко у стенки и остается затем приблизительно постоянной.

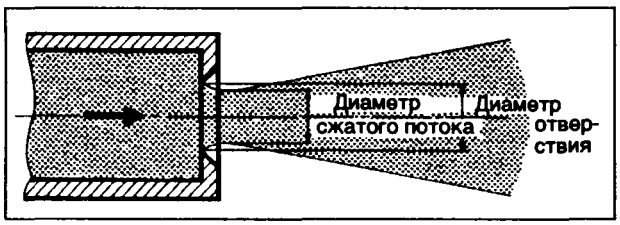
— 2 000 < Re < 3 000: течение очень нестабильное и может быть либо ламинарным, либо турбулентным, с неожиданным переходом из одного в другое.

Ламинарное течение имеет место в зоне горения кухонных горелках, газовых резаков и почти во всех горелках с выходными отверстиями порядка миллиметра, снабжаемых газом при очень низком давлении.

Напротив, почти во всех промышленных горелках встречается турбулентный режим истечения.

8.2.1.1.2. Коэффициент расхода инжектора

Форма, принимаемая флюидами при истечении через отверстие, представлена на схеме. Замечено, что струя флюида подвергается сжатию, что делает ее диаметр меньше диаметра инжектора, сжатие зависит от формы инжектора и в меньшей степени от входного давления.



Истечение флюидов через отверстие в тонкой стенке

Принимая во внимание это явление, а также трение о стенки, определяют общий коэффициент расхода, который представляет отношение реального расхода и теоретического, который прошел бы через идеально профилированный инжектор.

Этот коэффициент расхода обозначается буквой C. На практике C составляет 0,6 - 1,0 (величина приблизительная для соответственно обработанного инжектора, когда давление на входе выше 0,8 бар и мало изменяется в зависимости от типа флюида. На рисунке с. 676 приведены наиболее часто встречающиеся величины. Свыше 1 бар "C" может использоваться для практических расчетов в соответствующей размерности.

8.2.1.1.3. Уравнение расход–давление Бернулли для очень низкого давления

Изменение расхода в зависимости от давления в сопле показано на рисунке с. 677.

Для определения связи, существующей между давлением на входе в сопло и расходом, рассмотрим три зоны давления:

— зона низкого давления, где можно пренебречь сжимаемостью газа;

— зона высокого давления, где истечение осуществляется со звуковой скоростью в выходном сечении сопла;

— промежуточная зона.

Когда можно пренебречь сжимаемостью газа отношение расход–давление в сопле описывается уравнением Бернулли, которое в упрощенной форме для 15°C записывается следующим образом:

$$q_v = 0,74CS\sqrt{\frac{P_{эф}}{dT}},$$

где:

q_v – объемный расход, м³/ч;

C – коэффициент расхода сопла (≤1);

S – сечение сопла, мм²;

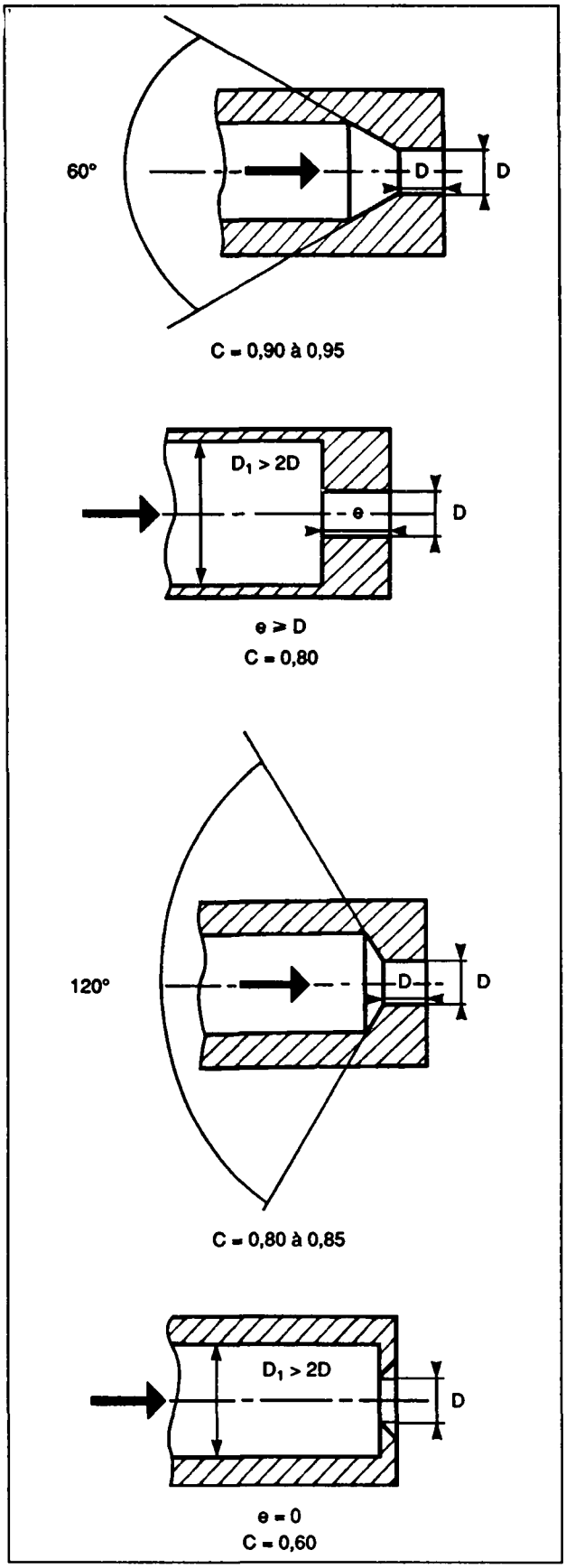
$P_{эф}$ – давление эффективное, мбар;

T – абсолютная температура газ (T = 273 + t).

Это соотношение точно только до давления примерно 100 мбар. Тем не менее, оно может быть применено при оценочных расчетах до давления 2 бар с ошибкой в 2% для воздуха. Ошибка достигает 7% для природного газа и 14% для пропана.

8.2.1.1.4. Отношение расход–давление для звукового режима

Звуковой режим истечения достигается в сопле при истечении в воздух, когда эффективное



Пример величин средних коэффициентов расхода инжекторов при давлении от 0 до 1 бар.

давление равно следующим критическим величинам:

— 0,76 бар – для пропана;
— 0,85 бар – для природного газа;
— 0,91 бар – для воздуха.

Абсолютное критическое давление определяется из следующего соотношения:

$$P_c = P_{ат} \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}},$$

где:

P_c – критическое абсолютное давление в барах, равное ($P_{эф} + P_{атм}$);

γ – отношение массовой теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответствующего газа; пропан – $\gamma = 1{,}14$; природный газ – $\gamma = 1{,}3$; воздух и водорода – $\gamma = 1{,}4$;

$P_{атм}$ – атмосферное давление, равное 1,013 бар при звуковом режиме, расход пропорционален абсолютному давлению, т.е. возрастанию разницы между эффективным давлением и атмосферным, при истечении в воздух. Это соотношение иллюстрируется на с. 677.

Уравнение расход–давление при 15°C представлено в виде:

$$q_v = \frac{0,969}{\sqrt{d}} S P_0 \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}},$$

где:

q_v – объемный расход, нм³/ч;

d – плотность газа по отношению к воздуху;

S – сечение сопла, мм²;

P_0 – абсолютное давление, бар ($P_0 = P_{эф} + 1{,}013$).

В том случае, если температура газа t отличается от 15°C, результат умножается на величину $\sqrt{\frac{273+15}{273+t}}$.

8.2.1.1.5. Соотношение расход–давление при дозвуковом режиме

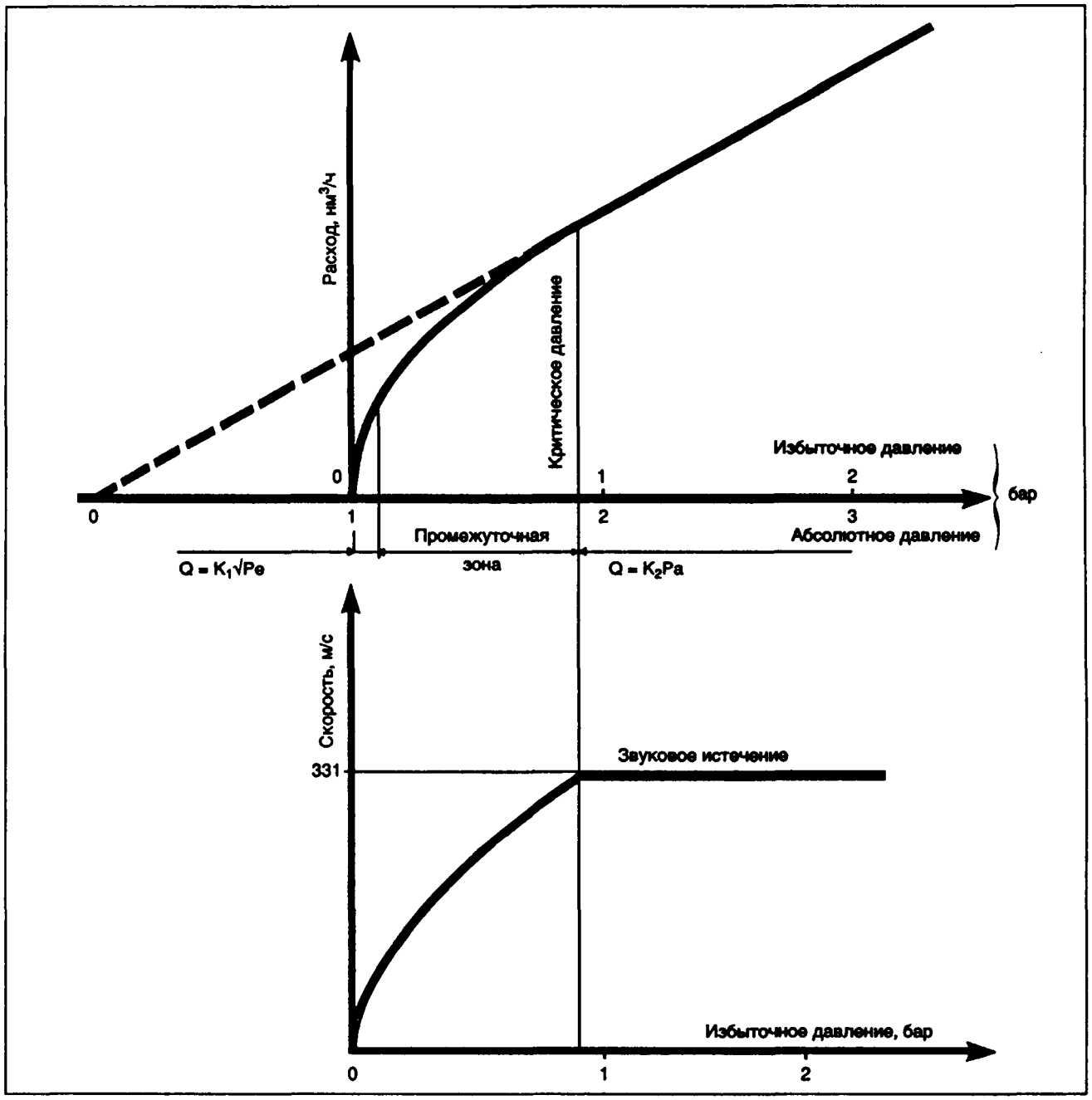
Речь идет о промежуточном режиме истечения, находящимся между двумя предыдущими (с. 677).

В этом случае выражение расход–давление для температуры 15°C принимает очень сложную форму

$$q_v = \frac{0,969}{\sqrt{d}} C.S.P_0 \left(\frac{1,013}{P_0}\right)^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{1,013}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

При другой температуре газа t, результат должен быть умножен на величину $\sqrt{\frac{273+15}{273+t}}$.

Графики (с. 678 и 679) позволяют подобрать инженктор с коэффициентом расхода, равным единице, в зависимости от давления и мощности в P.C.I.



Изменение расхода и скорости газа в сопле в зависимости от давления: пример – воздух.

8.2.1.1.6. Отношение тяга инжектора–давление

Исследование аэродинамических процессов, вызываемых струями газа, выходящими из сопла показывает важность инжектирующей способности (напора) сопла. Этот напор G, называемый также "импульсом", в общем виде, если предположить равномерные скорости, принимает следующий вид:

$$G = q_m V_s + (P_s - P_a)S_i,$$

где:

G – в Ньютонах;

q_m – расход массовый, кг/с;

V_s – скорость флюидов на выходе из сопла;

P_s – давление в выходном сечении сопла;

P_a – давление на выходе;

S_i – площадь выходного сечения сопла.

При дозвуковом режиме, второй член равен нулю и напор равен количеству движения через сопло: $q_m V_s$.

Для очень низкого давления имеем уравнение: (§ 8.2.1.1.3)

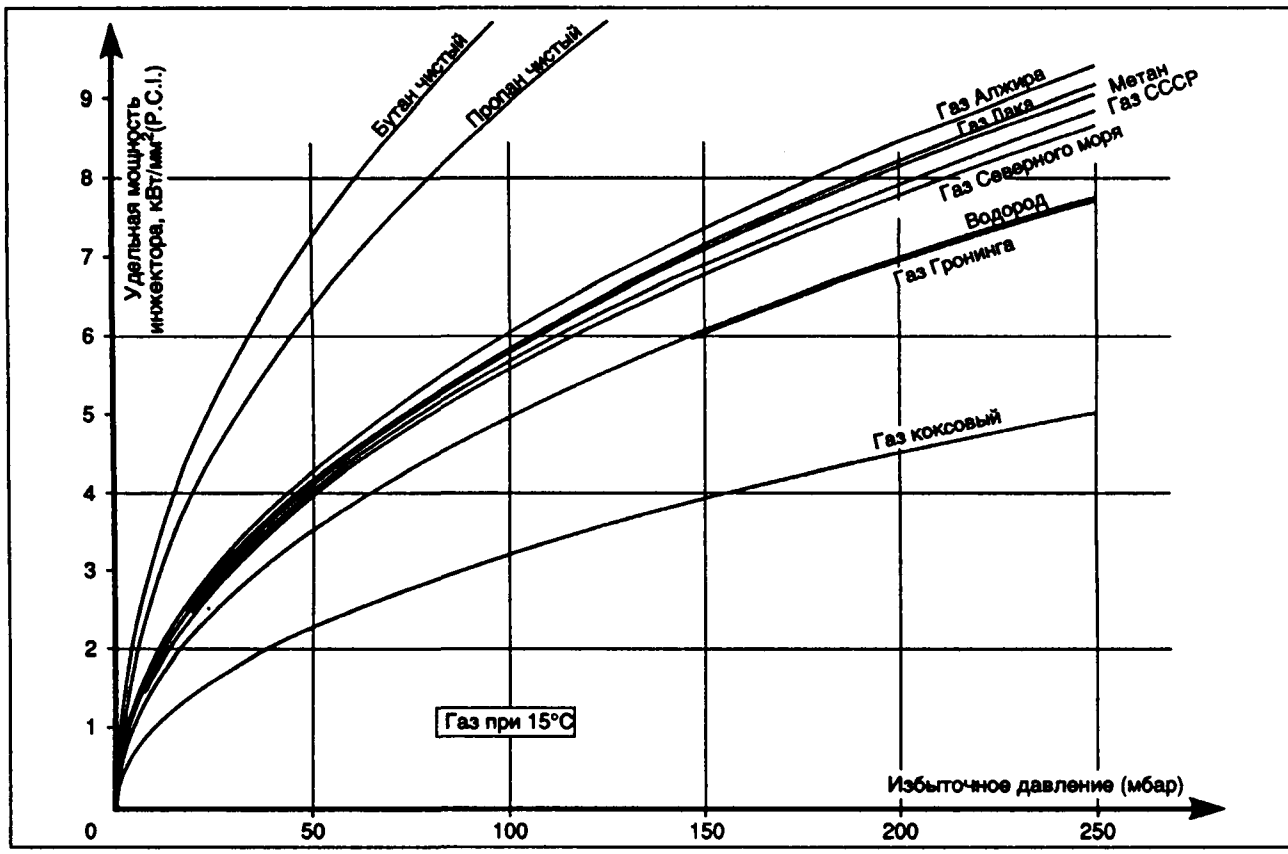


Диаграмма удельная мощность–давление (низкое давление).

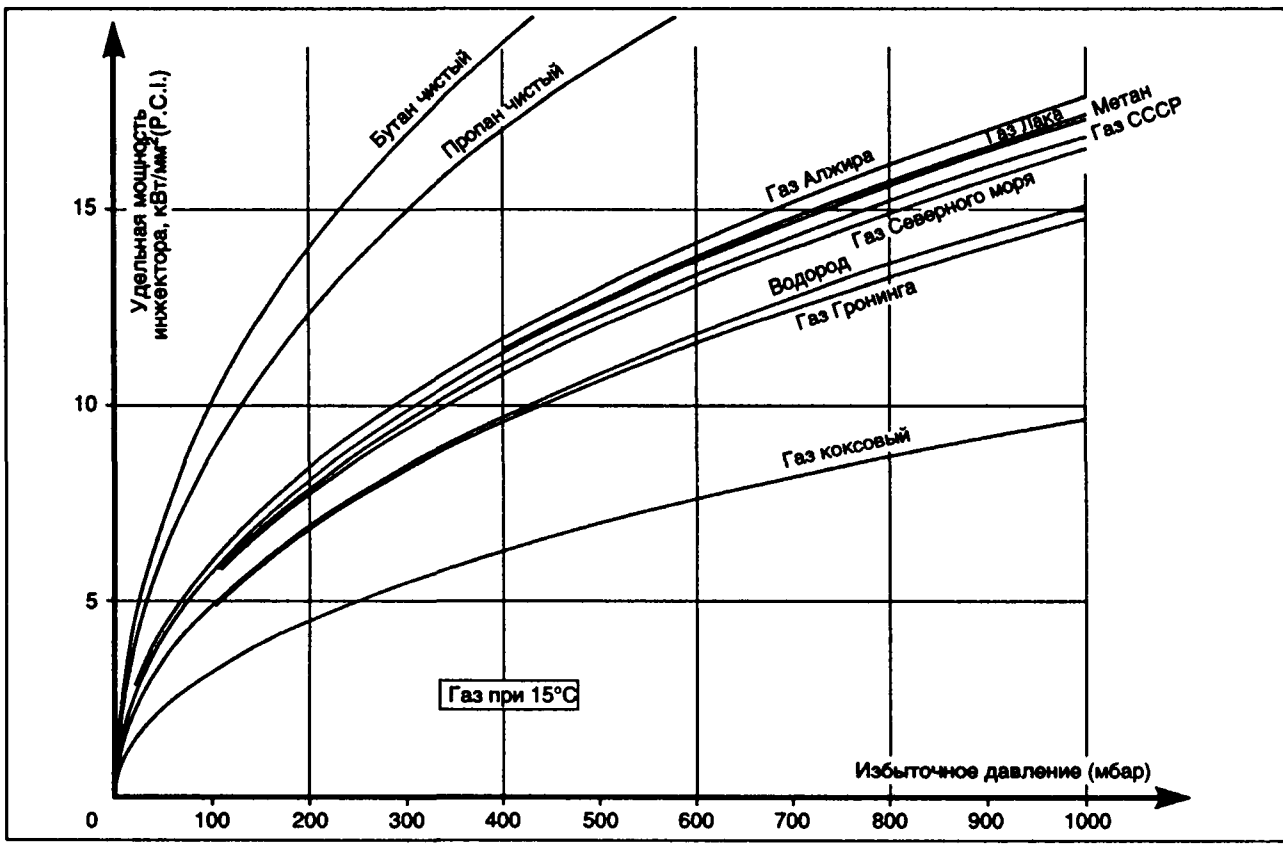


Диаграмма удельная мощность–давление (среднее давление).

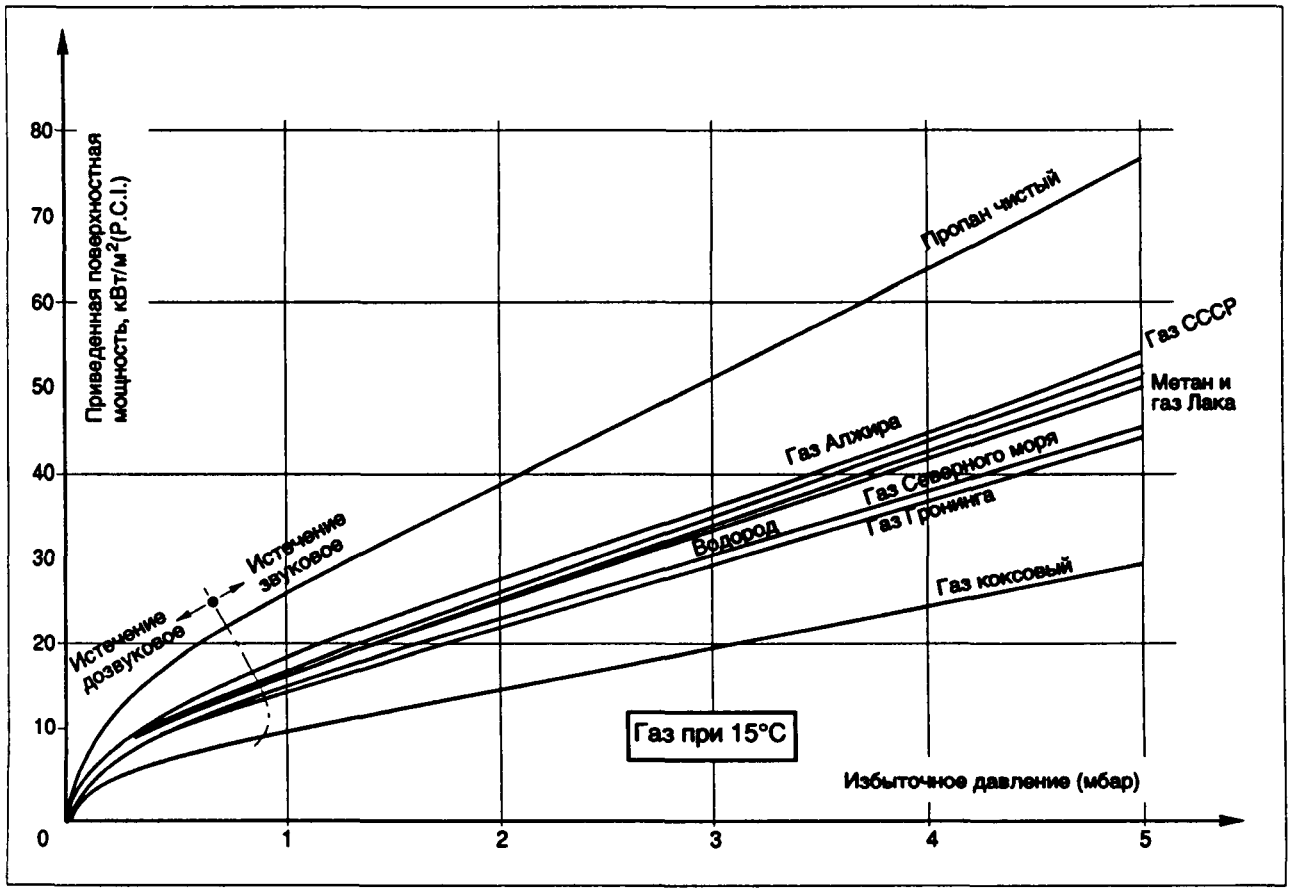


Диаграмма удельная мощность–давление (высокое давление).

$$G = 2 \times 10^{-4} \Delta P S_i C,$$

где

ΔP – перепад давления в сопле, Паскаль (Па);

S_i – площадь выходного сечения сопла, м²;

C – коэффициент расхода сопла.

В практических единицах

$$G = 2 \times 10^{-4} \Delta P S_i C,$$

где:

G – Ньютоны;

ΔP – мбар;

S_i – мм².

8.2.1.1.6.1. Истечение дозвуковое

Уравнение импульсов для сопла принимает вид:

$$G = 10^{-6} S_i C P_0 \left(\frac{1,013}{P_0}\right)^{1/\gamma} \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{1,013}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right].$$

8.2.1.1.6.2. Звуковое истечение

Уравнение имеет вид

$$G = 10^{-6} S_i \left[2P_0 \left(\frac{2}{c+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} - P_a\right],$$

где:

G – Ньютоны,

S_i – мм²,

P_0 – абсолютное давление на входе в сопло,

P_a – абсолютное давление на выходе из сопла.

Примечание: напор сопла не зависит от температуры газа для данного давления, изменяется в зависимости от свойств газа.

8.2.1.1.7. Коэффициент уменьшения Ар в зависимости от давления

Анализируя отношения расход–напор–давление можно выделить безразмерное выражение, дающее изменение характеристик газовых потоков в сопле при изменении давления. Это выражение, называемое коэффициентом уменьшения Ар, показывает, что напор в данном инжекторе не возрастает пропорционально росту рабочего давления.

Это выражение имеет вид:

$$Ap = \sqrt{\frac{GS_i}{q_v^2 \rho_g}\frac{273}{T_0}} \text{ или } Ap = \sqrt{\frac{GS_i \rho_g}{q_m^2}\frac{273}{T_0}},$$

где:

G – напор в инжекторе, в Ньютонах,

S_i – сечение сопла, м²,

q_v – расход объемный в трубопроводе, нм³/с,

q_m – массовый расход, кг/с,

ρ_g – объемная масса при нормальных условиях,

T_0 – абсолютная температура газа.

Ap равно 1 при давлении равном нулю и уменьшается с увеличением давления.

Он зависит только от давление и γ (§ 8.2.1.1.4.), но не зависит от температуры.

8.2.1.1.7.1. Дозвуковое истечение

Имеем

$$Ap = \left(\frac{1,013}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}.$$

8.2.1.1.7.2. Звуковое истечение

$$Ap = \frac{1,013}{P_0}\sqrt{\frac{2}{\gamma}\frac{P_0}{1,013}\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - \frac{1}{\gamma}\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$$

где:

P_0 – абсолютное давление на входе в сопло, бар.

Примечание:

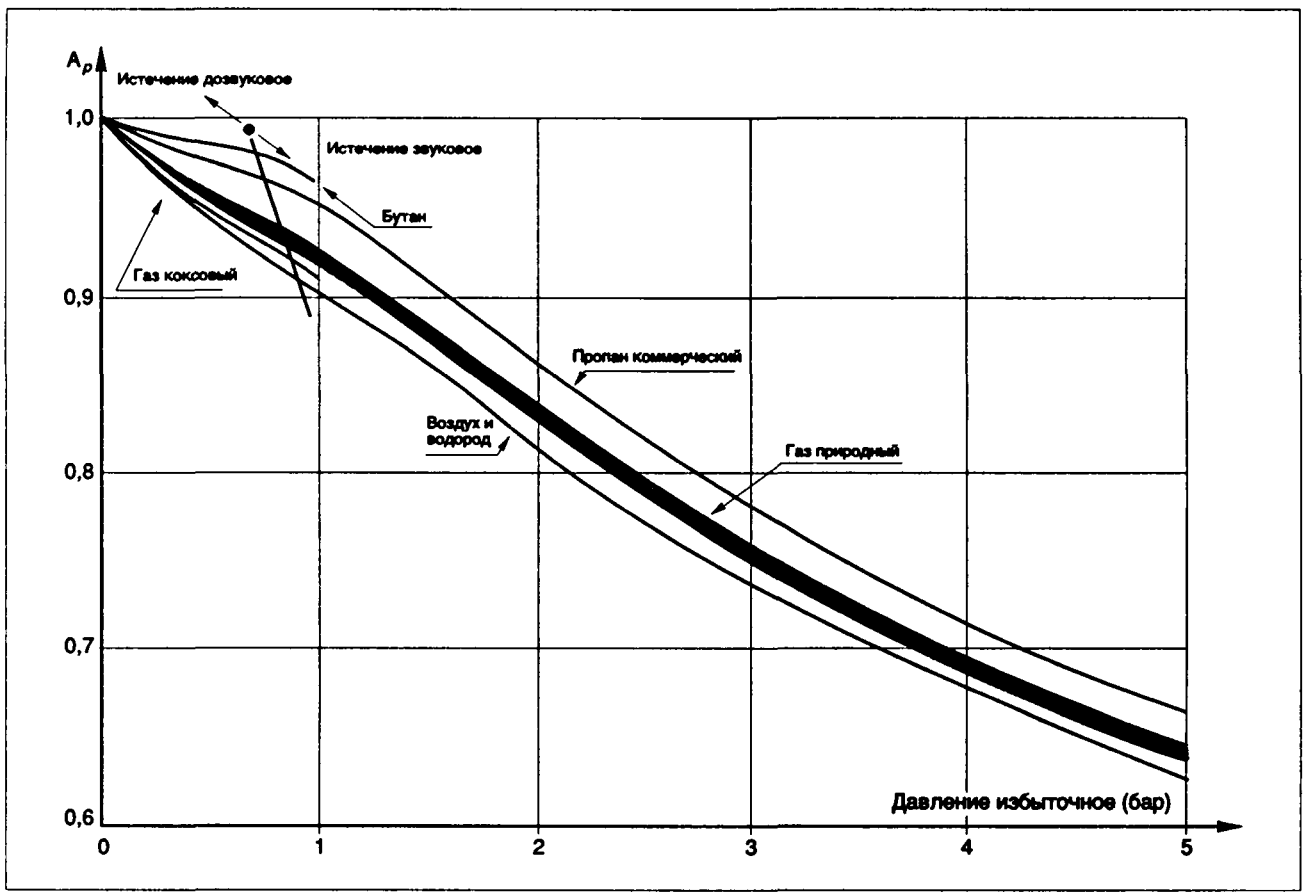
Можно также написать:

$$Ap = \frac{\sqrt{\text{удельный объемный нормативный напор}}}{\text{удельный массовый расход}}\sqrt{\frac{273}{T_0}}$$

с удельным напором и удельным массовым расходом, отнесенными к единице поверхности сечения выхода сопла.

8.2.1.1.8. Понятие об удельном напоре

Так как поток на выходе из сопла – это топливный газ, предназначенный для сжигания, интересно (целесообразно) связать напор с мощностью, развиваемой при горении, и выраженной в P.C.I.



Коэффициент уменьшения Ap в зависимости от давления в сопле.

Удельная мощность вводится в выражение параметров подобия пламени, в котором смесь топлива и окислителя создает аэродинамический эффект, выраженный одним или несколькими потоками топлива.

Удельный напор, выраженный в зависимости от мощности, G.S.P., имеет вид:

$$\frac{G}{q_v(P.C.I.)}$$

в Н/МВт (P.C.I.).

Можно выделить выражение для Δp

$$G.S.P. = \frac{q_v}{S_i}\Delta p^2 \frac{\rho_g}{P.C.I.}\frac{T_0}{273},$$

где:

$\frac{q_v}{S_i}$ – удельный объемный расход в трубопроводе, $нм^3/м^2 с$;

ρ_g – объемная масса газа при нормальных условиях;

P.C.I. – низшая теплота сгорания газа, $Дж/нм^3$;

T_0 – абсолютная температура газа.

Удельный напор стремится к пределу при увеличении давления. Этот предел – результат эволюции противоположностей q_v, который возрастает, и Δp, который стремится к нулю.

Этот предел равен:

$$G.S.P._{max} = \frac{2}{P.C.I.}\sqrt{1,013\times10^5\rho_g\frac{\gamma+1}{2\gamma}\frac{T_0}{273}}.$$

Размерности те же.

Для практических размерностей:

$$G.S.P._{max} = 201\frac{\sqrt{d}}{P.C.I.}\sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma}}\sqrt{\frac{T_0}{273}},$$

где:

G.S.P. – Н/МВт (P.C.I.),

P.C.I. – кВт·ч/$нм^3$.

При 15°C имеем:

$G.S.P._{max}$ 9.8 Н/МВт (P.C.I.) пропан,

14,6 Н/МВт (P.C.I.) газ Лака,

17,6 Н/МВт (P.C.I.) газ Гронинга.

Примечание:

Эти величины носят индикаторный характер, т.е. с повышением давления γ не остается постоянным и некоторые газы сжижаются.

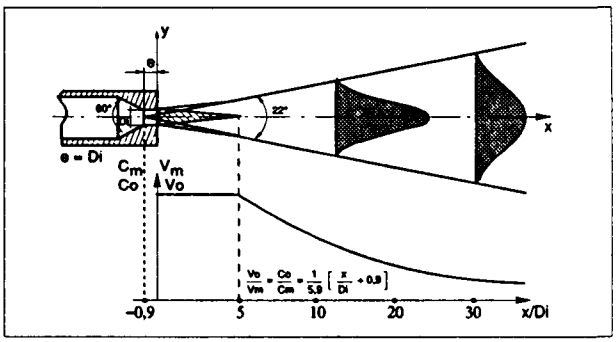
8.2.1.2. Смешение в аксиальных потоках

8.2.1.2.1. Свободная струя. Явление индукции

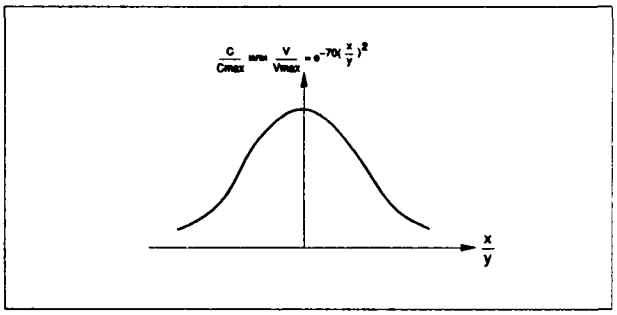
Свободная струя – это струя, вытекающая из сопла в спокойную и бесконечную атмосферу.

Свободная турбулентная струя обладает следующими свойствами:

- струя – это конус с углом раскрытия у основания около 20°, независимо от свойств и плотности флюидов. Она изобарная.
- струя втягивает окружающую атмосферу, которая разбавляет рабочую струю.
- переходной зоной, длина которой около пяти диаметров сопла, скорость и концентрация рабочей среды снижаются обратно пропорционально расстоянию от основания конуса.
- распределение скорости и концентрации остается схожим от сечения к сечению.
- массовый расход, проходящий через сечение струи пропорционален расстоянию от сечения до основания конуса.



Свободная турбулентная струя. Изменение скорости V_m и концентрации C_m по оси в зависимости от дистанции в инжекторе.

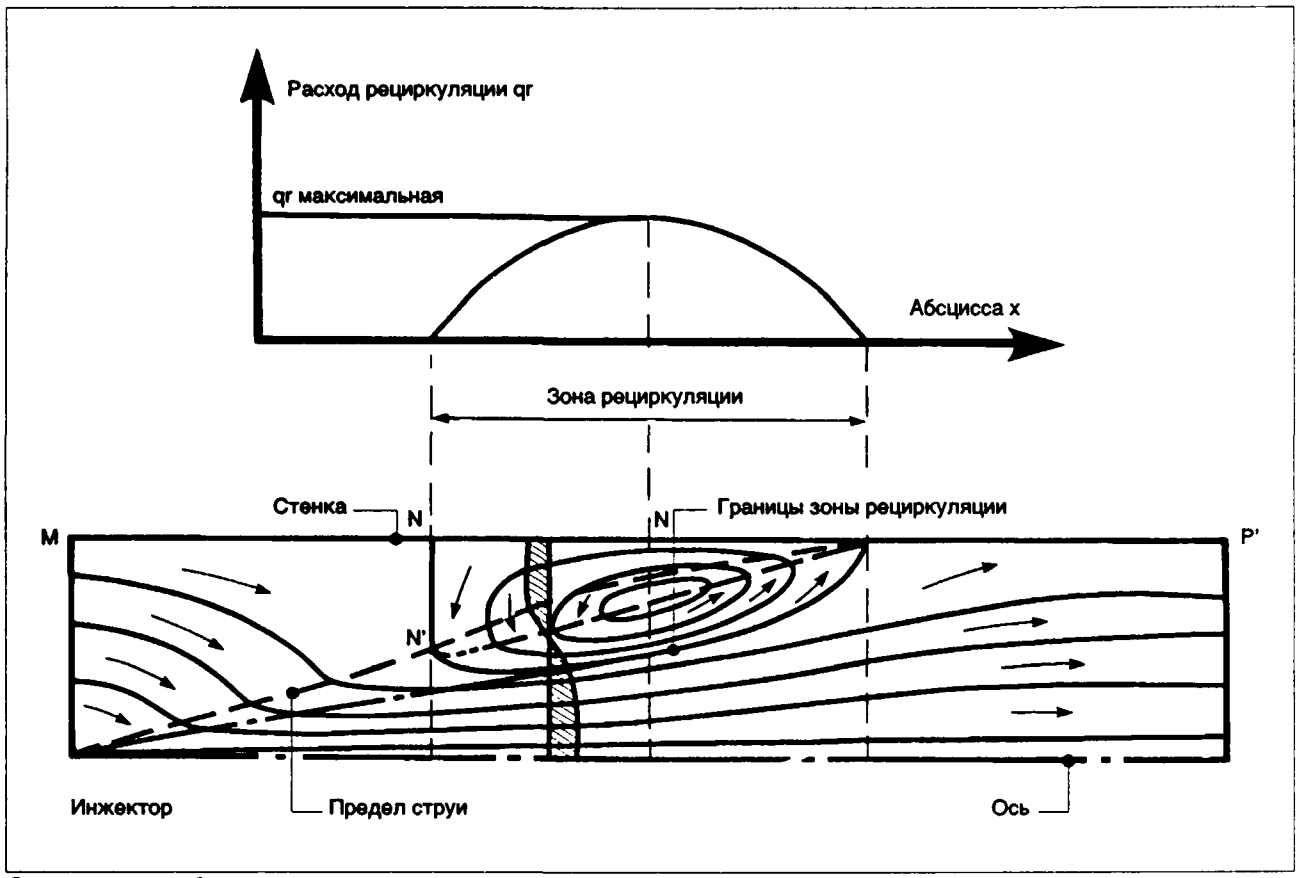


Свободная турбулентная струя. Радиальное распределение скорости и концентрации.

8.2.1.2.2. Ограниченная турбулентная струя

Так как струя находится зажатой в цилиндрической трубе, всасывание окружающей среду ограничено и между трубой и струей создается зона рециркуляции, в которой струя всасывает сама себя (см. рисунок с. 686).

В результате этого точка на оси, где получается данное разбавление рабочей среды, находится дальше от сопла, чем в случае свободной струи.



Ограниченная турбулентная струя: линии истечения создают рециркуляции.

8.2.2. Горелки предварительного смешения. Топливо-окислитель

8.2.2.1. Стабильность пламени

Горелка Бунзена дает картину наиболее простой горелки предварительного смещения: пламя стабилизируется на выходе одного отверстия, снабжаемого частично предварительно смешанной смесью, когда появляются некоторые условия истечения;

— ниже определенного расхода, скорость становится очень малой, горение может передвинуться в смеситель (проскок);
— для большого расхода, пламя может стать насыщенным воздухом и "задуться" (оторваться).

На с. 683 иллюстрируется этот феномен, так же как и приспособления, применяемые для сглаживания этих недостатков:

— прикрытие выходного отверстия, использование свойств отверстий малых диаметров, охлаждение, препятствующее продвижению пламени;
— вспомогательное "пилотное" пламя, производимое дополнительным отверстием, в котором скорость истечения меньше, чем в основном отверстии.

8.2.2.2. Горелки предварительного смешения за счет давления газа

Горелки инжекционного типа используют свойство струй увлекать окружающую среду, описаны для турбулентных струй в § 8.2.1.2.

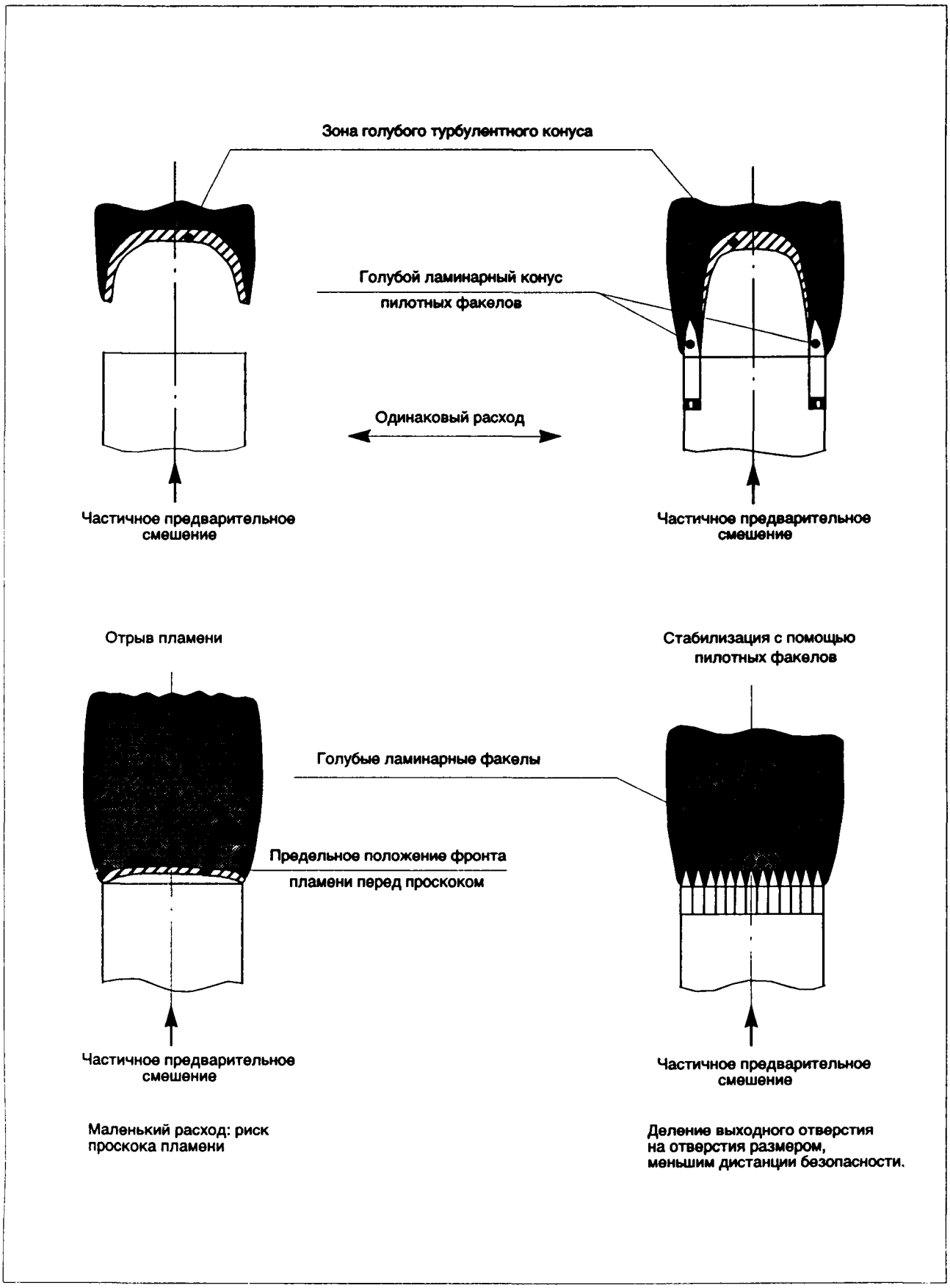
Примером такой горелки является горелка Бунзена, которая включает (см. рисунок на с. 684):

— газовое сопло;
— смеситель, состоящий из сходящейся и расходящейся частей в форме вентуре;
— головку стабилизации сжигания.

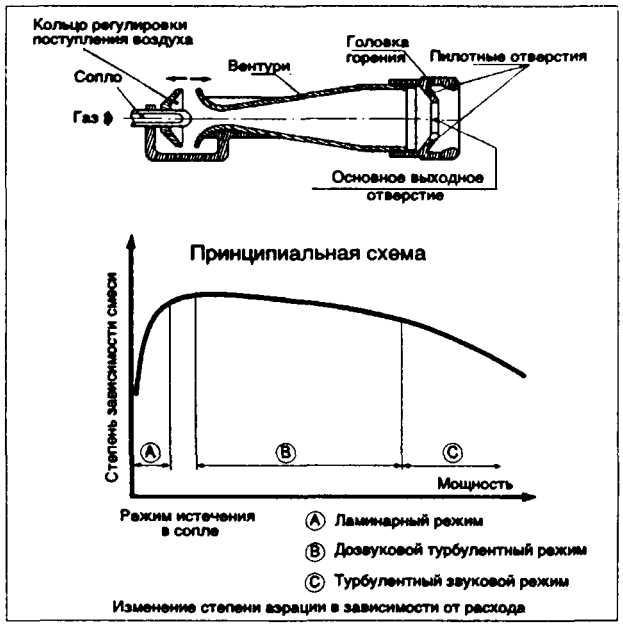
В рисунках 8.12, 8.13 дается пример многосопельных горелок, используемых для водонагревателей. Отметим, что на горелках данной конфигурации, коэффициент аэрации смеси *n* (инжекции), изменяется в соответствии с рис. 8.14, т.е.:

— при ламинарном истечении в сопле "*n*" пропорционально мощности;
— при турбулентном течении в сопле "*n*" медленно уменьшается.

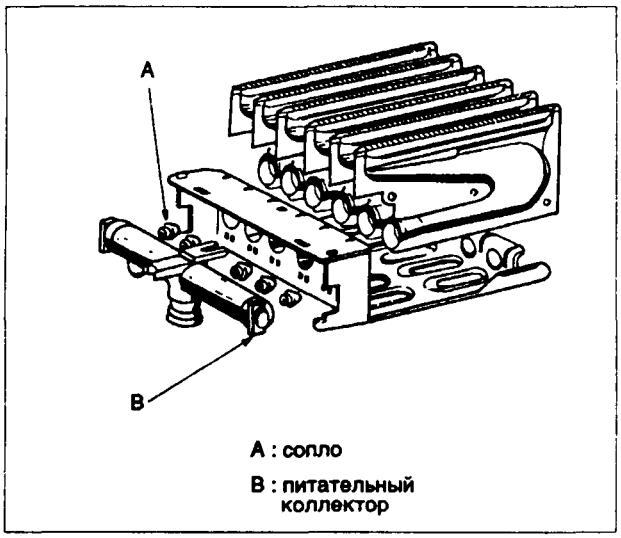
Рабочая зона таких горелок соответствует турбулентному течению в сопле.



Пример средств стабилизации пламени предварительного смешения факельных горелок.



Пример горелки индукции атмосферного воздуха.



Многосопельная горелка индукции атмосфернрго воздуха.

В этих условиях коэффициент инжекции воздуха определяется соотношением:

$$n = \frac{\sqrt{d}}{Va}\left[Ap\frac{D_e}{D_i} - 1\right],$$

где:

n – коэффициент инжекции воздуха, d – относительная плотность газа,

D_i – диаметр сопла,

D_e – эквивалентный диаметр горелки,

Ap – коэффициент смягчения (§ 8.2.1.1.7.),

Va – теплотворная способность газа.

Эквивалентный диаметр горелки равен:

$$D_e = \frac{K}{\sqrt{C}}D_s,$$

D_s – гидравлический диаметр головки сгорания (диаметр одного отверстия, имеющего в равных условиях те же потери давления, что и все выходные отверстя).

C – коэффициент расхода сопла,

K – коэффициент инжекции воздуха ($K \leq 1$), величина которого зависит от отношения $\frac{D_c}{D_s}$ и представлена на рисунке с. 685 (D_c – диаметр входного отверстия смесителя).

"K" обычно равно 0,75 - 0,95 для 85% коммерческих горелок, соответствующих оптимальным размерам $0{,}55\ D_s < D_c < 0{,}95 D_s$.

Для промышленных горелок использование указанного соотношения показывает,что максимальная мощность, которую можно получить, значительно ниже предела стабильности пламени предварительно подготовленной смеси: количество подсасываемого воздуха является лимитирующим фактором работы горелок на одном давлении газа. Показано, что мощность W, которую можно получить на таких горелках, отнесенная к единице поверхности выходного сечения S_s, равна:

$$\frac{W}{S_s} = \frac{G.S.P.}{\rho_g}\frac{273}{T_0}\frac{\left(P.C.I.\frac{D_e}{D_s}\right)^2}{(1+nV_a)\left(1+\frac{nV_a}{d}\right)}$$

Максимальная мощность рассчитывается для максимального удельного напора, $G.S.P_{max}$, описанного в § 8.2.1.1.8.

8.2.2.3. Замена топлива в атмосферных горелках

Если необходимо заменить топливо в атмосферной горелке с сохранением мощности и коэффициента инжекции воздуха, находят в предыдущем уравнении выражение, характеризующее топливо, которое имеет размерность мощности на единицу поверхности:

$$P.S.R. = \frac{G.S.P.}{\rho_g}\frac{(P.C.I.)^2}{(1+nV_a)\left(1+\frac{nV_a}{d}\right)}.$$

Это выражение в случае замены топлива мало отличается от выражения для диффузионного пламени.

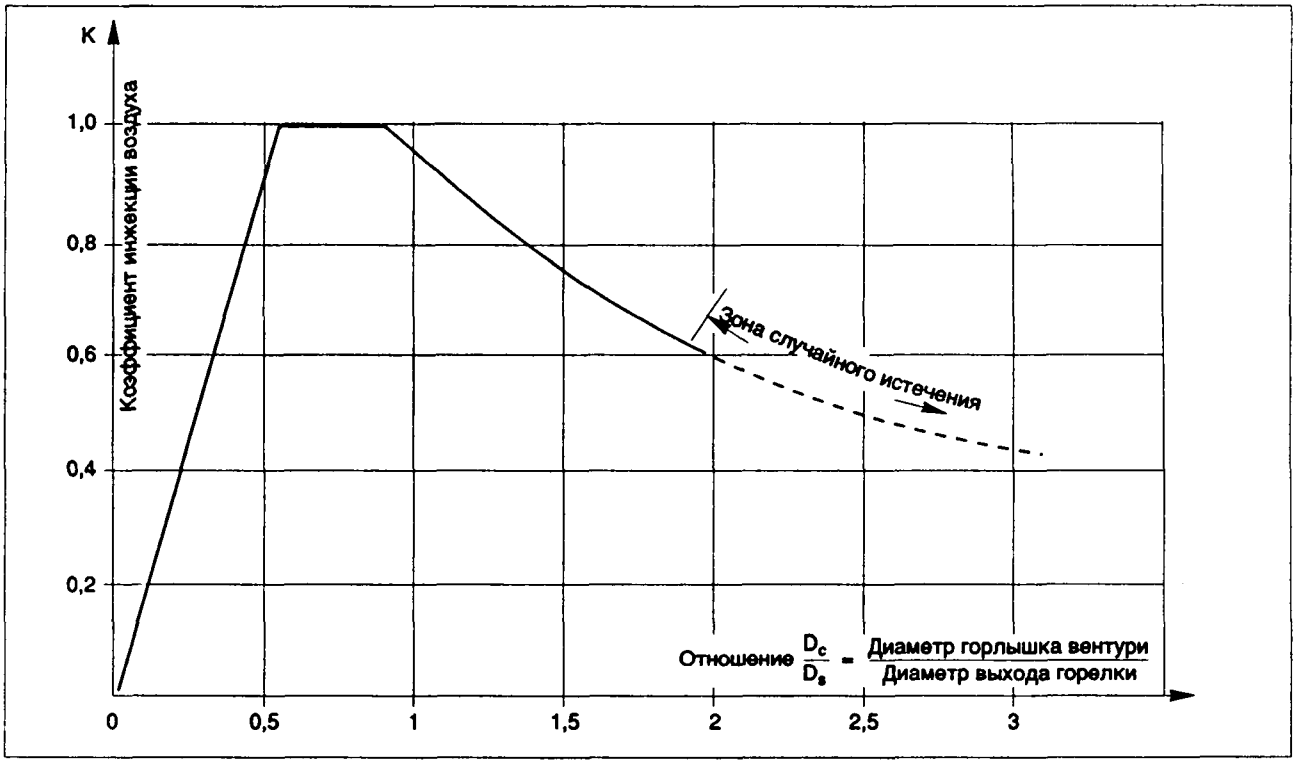
Сохранение параметров при переходе от одного газа к другому позволяет сохранить условия работы:

— мощность,

— аэрацию (коэффициент инжекции воздуха),

после соответствующей замены сопла и давления газа.

Величина этого параметра, называемого удельной поверхностной мощностью, дается на рисунках с. 685, 686, для $n = 1$.



Горелки индукции атмосферного воздуха. Влияние отношения размера горлышка вентури к гидравлическому выходу отверстий головки горения на коэффициент инжекции воздуха.

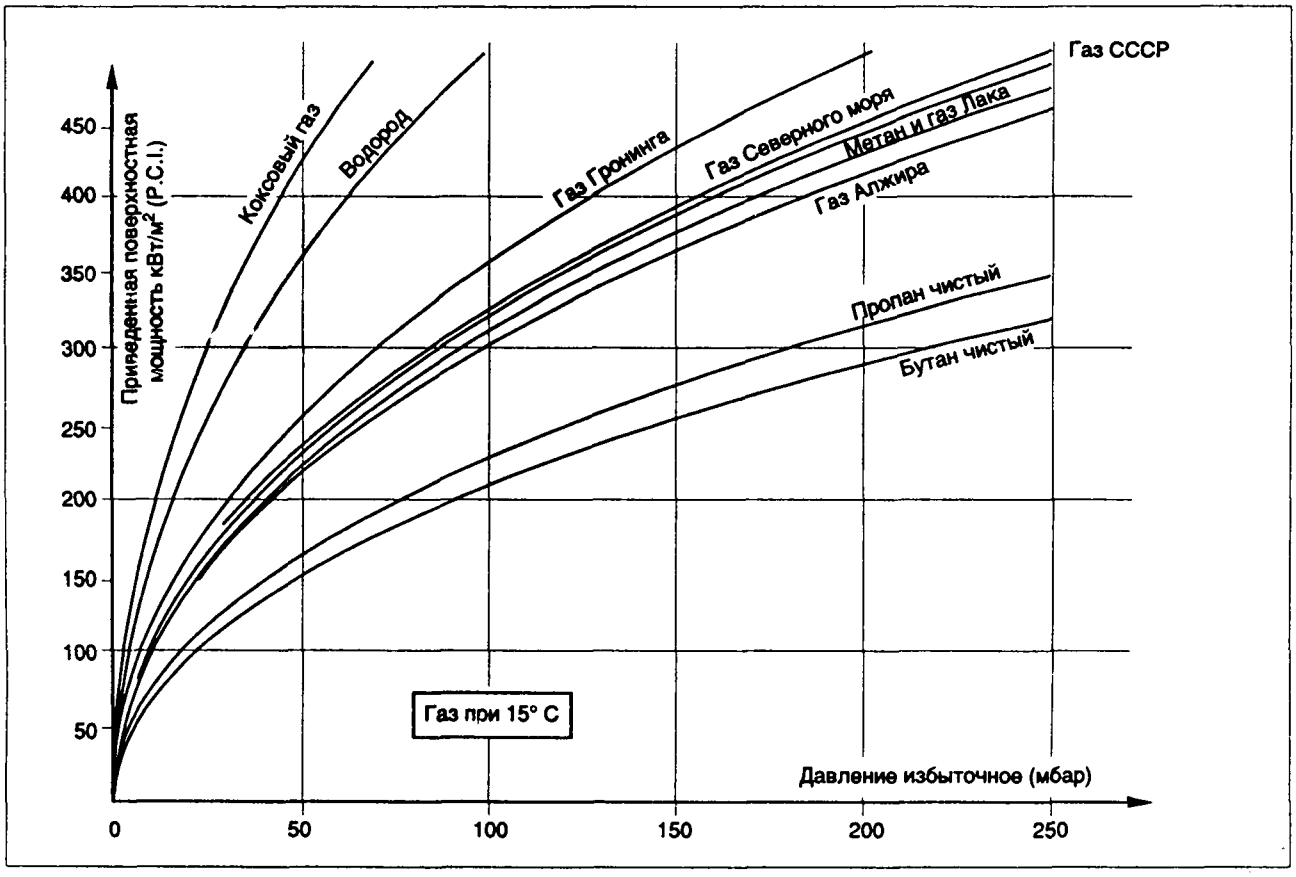


Диаграмма: приведенная поверхностная мощность–давление. Низкое давление.

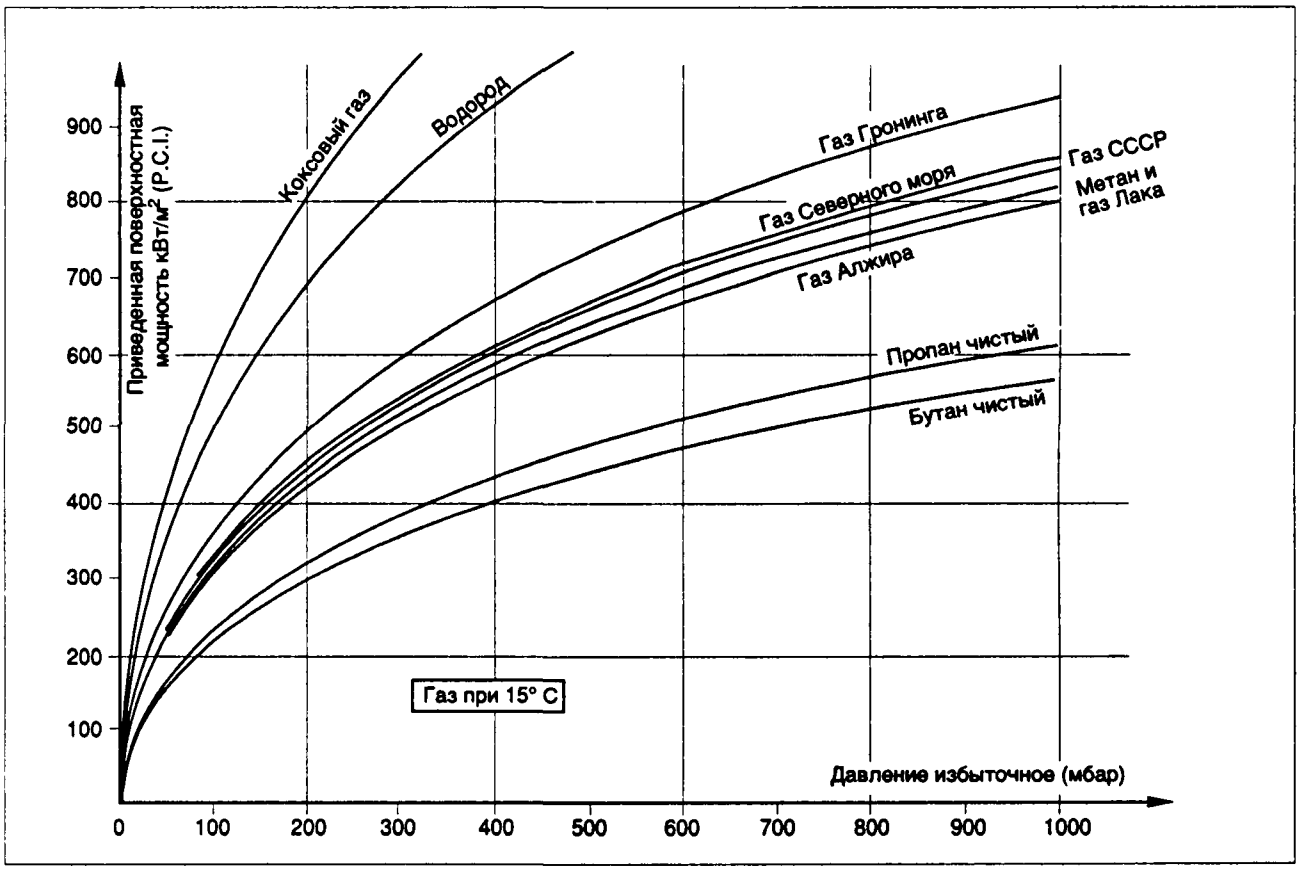


Диаграмма: приведенная поверхностная мощность–давление. Среднее давление.

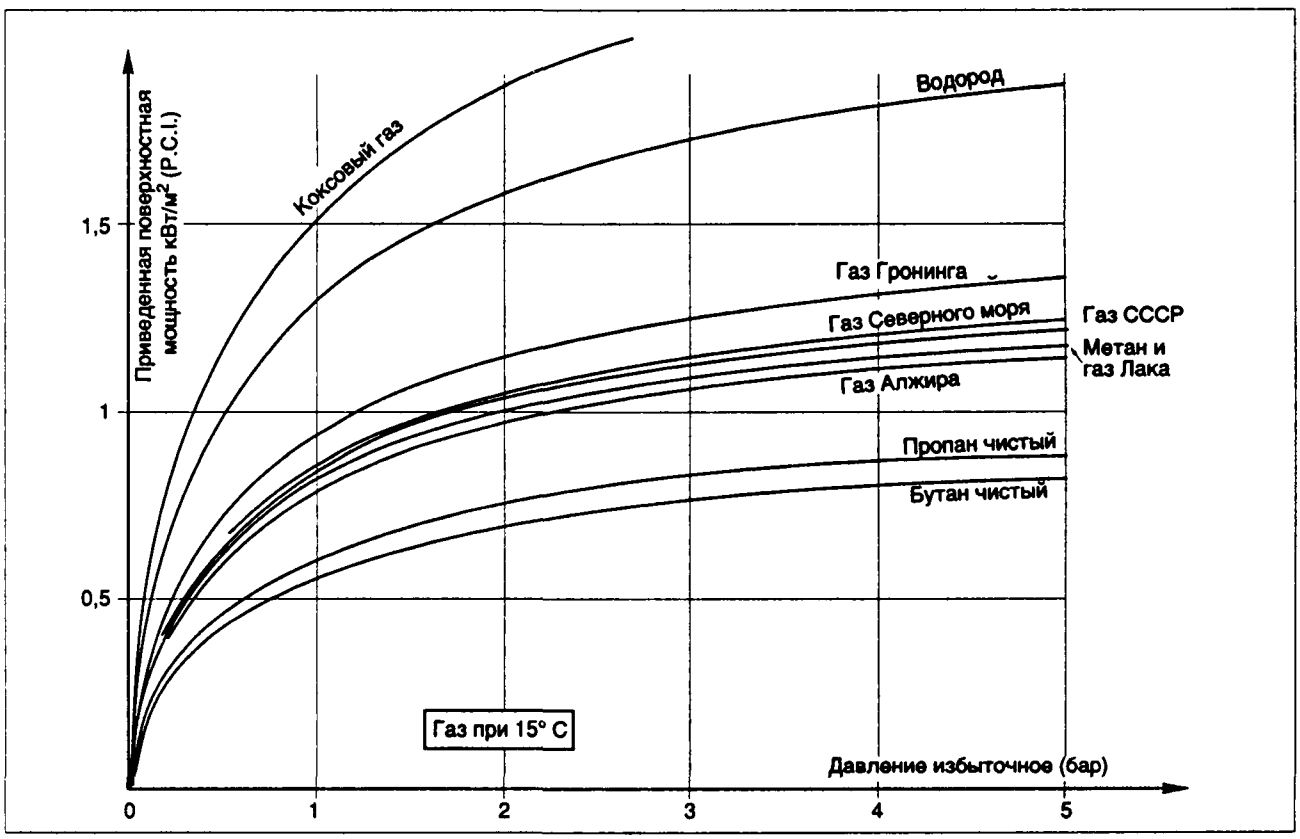


Диаграмма: приведенная поверхностная мощность–давление. Высокое давление.

На рисунках можно прямо определить, зная давление начального газа, необходимое давление газа замены при сохранении P.S.R. = const.

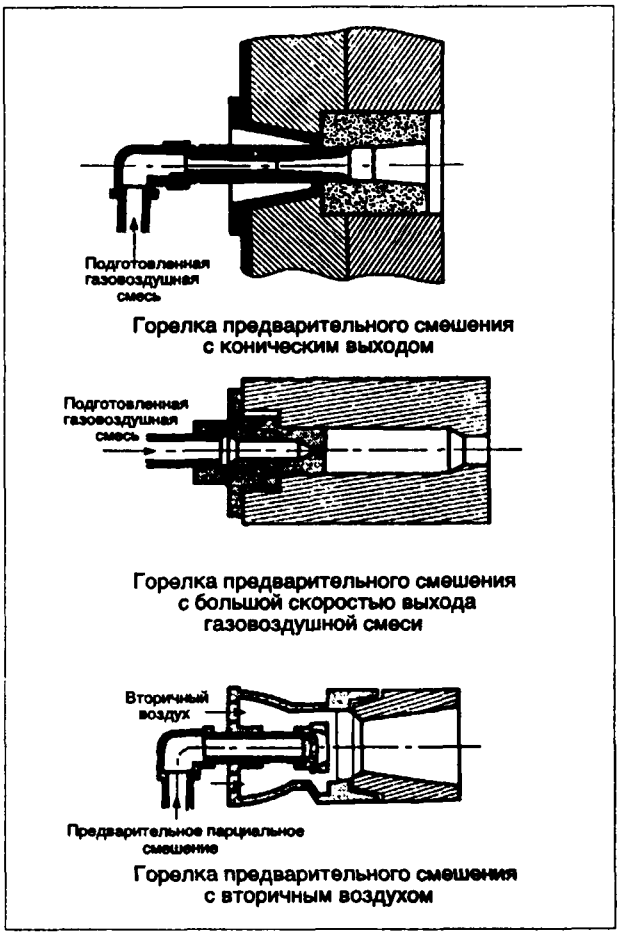
Расчет нового диаметра сопла осуществляется с помощью рисунков с. 685, 686, которые дают для каждого давления удельную поверхностную мощность на мм² сопла P_u и позволяют определить соотношение:

$$\frac{D_i \text{ конечное}}{D_i \text{ начальное}} = \sqrt{\frac{P_i \text{ начальное}}{P_i \text{ конечное}}}$$

Заметим, что как удельная мощность, так и приведенная поверхностная мощность, стремятся к пределу при возрастании давления и, когда это происходит, невозможно для пропана получить условия работы, соответствующие работе на природном газе под давлением в 1 бар.

8.2.2.4. Горелки с предварительным смешением под давлением

Эти горелки соответствуют случаю подачи газа вентилятором, который позволяет осуществить полное предварительное смешение под высоким давлением. Эти устройства применяются в промышленности и сейчас встречаются в установках жилого комплекса. На рисунке напротив представлены три примера таких установок.



Горелки предварительного смешения под давлением.

8.2.3. Горелки кислород–газ

Замена воздуха кислородом необходима, когда нужно получить высокую температуру и/или необходимо повышение плотности теплового потока. Это случай газовых кислородных резаков, при формовке, обжиге и для определенных горелок специального назначения. Учитывая искомые характеристики, в качестве топлива используется ацетилен, пропан, тетрен (коммерческая смесь с общей формулой, близкой C_3H_6) и природный газ.

В таблице даются принципиальные характеристики используемого газа.

Удельная мощность фронта пламени является мощностью, выделяемой единицей поверхности зоны горения при сжигании газ-кислородной смеси. Теоретический кислород – это количество кислорода, необходимое для стохиометрической реакции. Практическая степень подачи кислорода соответствует степени подачи кислорода, для которой эффективная температура пламени максимальная: это оптимальное регулирование резака, работающего в свободном воздухе, когда дополнительный кислород может быть найден в окружающем воздухе.

Практический кислород – это соответствующее количество кислорода.

	Теоретическая температура горения, °C	Удельная мощность фронта пламени, кВт/см²	Кислород теоретический		Практическая степень подачи кислорода (n_p)	Кислород практический	
			м³/кВт·ч (P. C. I.)	м³/Дж		м³/кВт·ч (P. C. I.)	м³/Дж
Газ Гронинга	2 730	3,6	0,201	0,0558	0,95	0,191	0,0531
Газ Лака	2 750	3,9	0,201	0,0558	0,95	0,191	0,0531
Пропан	2 820	5,4	0,191	0,0531	0,90	0,172	0,0478
Тетрен	2 895	5,6	0,188	0,0522	0,90	0,169	0,0469
Ацетилен	3 300	23,0	0,159	0,0422	0,80	0,127	0,0353

8.2.4. Смесительные горелки со слабыми скоростями воздуха в зоне горения

Это случай, когда воздух горения находится под давлением порядка миллиметра водяного столба (0,1 мбар), что соответствует, например, случаю использования рекуператора тепла или керамического регенератора, опасность нарушения герметичности которых не позволяет повысить давление. Соответствующие скорости воздуха составляют 10 - 15 м/с максимально, следовательно, энергию, необходимую для смешения, несет поток топлива.

8.2.4.1. Пламя с оксиальной (осевой) диффузией

Когда газовая струя вытекает в свободный воздух с малой скоростью и через малые отверстия (случай блочных горелок (пламени)), ламинарное течение и смешение осуществляются за счет молекулярной диффузии одного газа в другой. Если струя газа вытекает в воздух с большой скоростью и через большое отверстие (случай промышленных горелок), истечение турбулентное: это значит, что образуется множество турбулентностей (завихрений) и смешение осуществляется гораздо быстрее. Этот процесс называется турбулентным смешением.

Нихе на рисунке показано, как изменяется в зависимости от расхода длина диффузионного пламени, получаемого в газовом сопле данного диаметра.

8.2.4.1.1. Диффузионное пламя при ламинарном режиме истечения

До числа Рейнольдса порядка 2 500 и для диаметра отверстия менее двух миллиметров длина пламени пропорциональна расходу и не зависит от диаметра, что записывается:

$$L = kQ$$

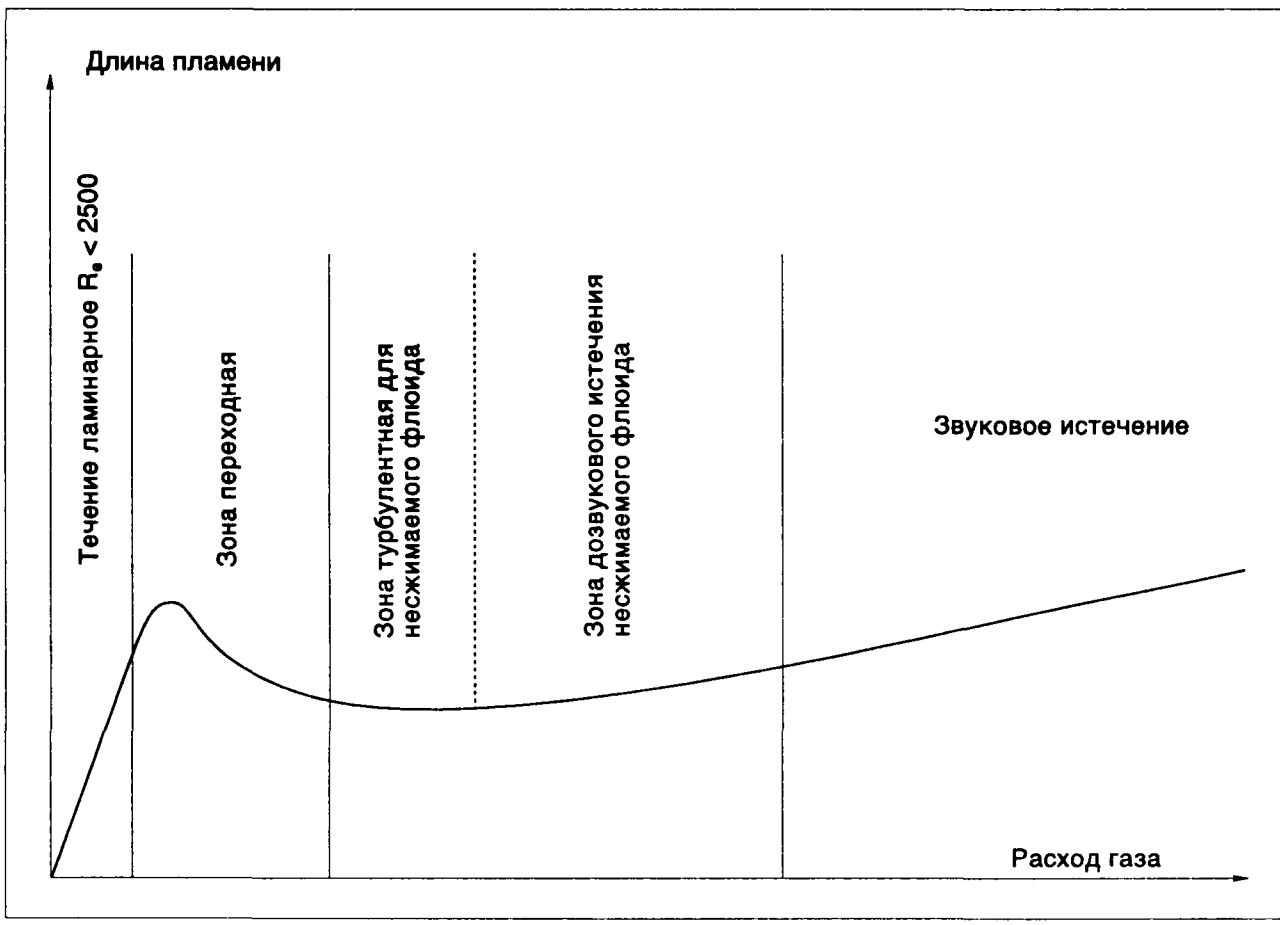
Величина k определяется экспериментально.

Выражаем Q в Ваттах и L в сантиметрах, k принимает следующее значение для одного отверстия:

— городской газ – $k = 0{,}036$;
— природный газ – $k = 0{,}041$;
— бутан, пропан – $k = 0{,}046$.

Вот несколько значений удельного критического расхода отрыва ламинарного, диффузионного пламени:

— городской газ – 800 вт/мм^2,
— природный газ – 600 вт/мм^2,
— пропан, бутан – 700 вт/мм^2.



Осевое изменение длины пламени.

8.2.4.1.2. Диффузионное пламя при турбулентном режиме истечения

8.2.4.1.2.1. Длина пламени в свободной атмосфере

Диффузионное осевое пламя реализует горение струи газа (топлива) в окислительной среде, движущейся со скоростью гораздо ниже скорости горения.

Свойства осевых струй рассматривались в § 8.2.1.2.

В случае струи топлива, вытекающей в свободный воздух, длина L_0, необходимая для создания стехиометрической смеси, определяется по классическому выражению:

$$L_0 = 6,65 \frac{q_m}{\sqrt{G\rho_f}} \left(1 + \frac{V_a}{d}\right)$$

где:

q_m – массовый расход, кг/с;

G – напор струи, Ньютон;

ρ_f – средняя объемная масса смеси.

Это выражение мало удобно, т.к. не содержит в явном виде характеристики горелки и топлива.

Вводя понятие коэффициента уменьшения Ap, запишем:

$$L_0 = 5,9 \frac{D_i}{Ap} \sqrt{\frac{T_F}{T_0}} \sqrt{V'_{f_0} \left(1 + \frac{V_a}{d}\right)}$$

V'_{f_0} – мощность влажного дымообразования, т.е. объем дыма без конденсации. Он выражается в нм^3 дыма на нм^3 газа или нм^3 дыма на кВт·ч (P.C.I.).

Если заменить V'_{f_0} на $(1 + V_a)$ и $\sqrt{(1+V_a)\left(1+\frac{V_a}{d}\right)}$ с $1 + \left(\frac{V_a}{\sqrt{d}}\right)$, получим:

$$L_0 = 5,9 \frac{D_i}{Ap} \frac{T_F}{T_0} \sqrt{\left(1 + \frac{V_a}{\sqrt{d}}\right)}.$$

Разность между L_0, определенным по двум выражениям: менее одного процента для природного газа и водорода, 2% – для пропана и коксового газа и 5% – для доменного газа,

где:

D_i – диаметр сопла;

T_F – средняя абсолютная температура пламени;

T_0 – абсолютная температура газа;

V_a – мощность горения газа;

d – плотность газа.

Для данного сопла, длина пламени изменяется обратно пропорционально Ap, если изменяется мощность. при постоянной мощности пламя будет тем меньше, чем меньше сопло. То есть необходимо повышенное давление.

Характеристика газа отражается его температурой и отношением $\frac{V_a}{\sqrt{d}}$.

Примечание:

Турбулентное истечение характеризуется случайными колебаниями, длина L_0 характеризует расстояние в инжекторе (от сопла), где, в среднем, горение закончено.

Принимают, что предельная длина, начиная с которой не обнаруживают несгоревших частиц (менее 0,1% CO), больше (примерно) 30% L_0.

8.2.4.1.2.2. Длина пламени в сжатой (ограниченной) атмосфере

Отмечено в § 8.2.1.2.2. влияние на длину пламени сжатия сжигания. Удлинение пламени вызывается разбавлением воздуха горения инертными продуктами сгорания. В печи, работающей с избытком воздуха, имеется избыток кислорода в продуктах сгорания, и эффект удлинения пламени за счет потока рециркуляции ослаблен.

8.2.5. Горелки смешения в зоне горения с воздухом под давлением

Под "воздух под давлением" подразумевают воздух, подаваемый центробежным вентилятором в горелку под давлением, обычно от 50 до 70 мбар, иногда 100 мбар. Воздух может быть предварительно нагрет в металлическом рекуператоре до температуры, близкой 400 - 500°C.

Соответствующая скорость воздуха порядка 100 м/сек. В этих условиях "напор" воздуха велик. Для природного газа, учитывая стехиометрический расход, "напор" струи воздуха в 20 мбар равен "напору" струи газа Лак более, чем в 5 бар.

Видно, что процесс смешения сразу зависит от условий подачи воздуха и газа и, при определенных условиях, когда нет газа высокого давления, он зависит только от условий подачи воздуха.

Характеристика пламенем зависит исключительно от способа создания газовоздушной смеси, т.е. от устройства горелки: подачи воздуха и газа, формы раскрытия отверстий и температуры использования.

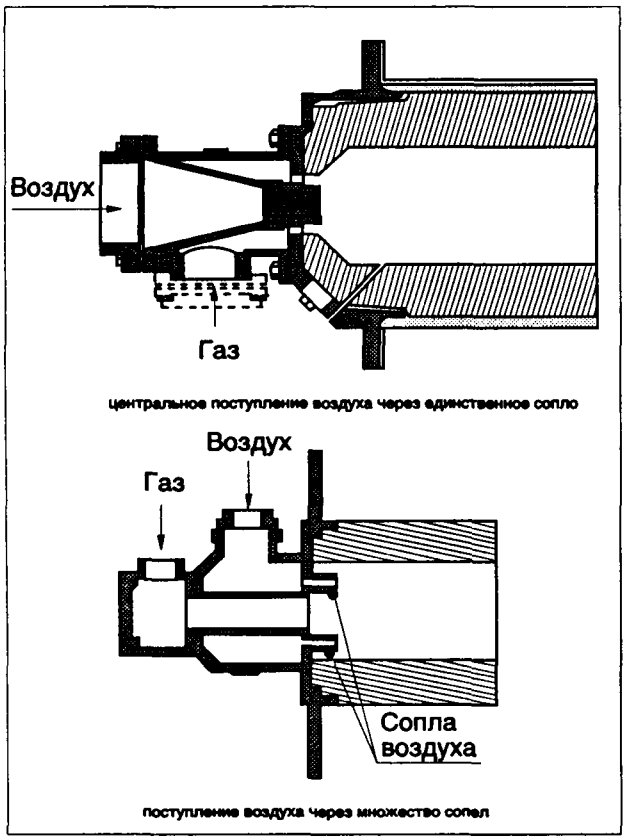
Этот диапазон возможностей позволяет даже в наиболее часто встречающихся случаях конструкторам свободно творить и не быть в своем творчестве ограниченными.

Эту богатую возможность использования представляет газовое топливо.

Читатель с пользой обратится к литературе по газовым горелкам для коллективного пользования или промышленности. Заметим, что в этом случае простые принципиальные методы создания смеси (течение всегда происходит в турбулентном режиме).

8.2.5.1. Пламя осевое с большой скоростью воздуха

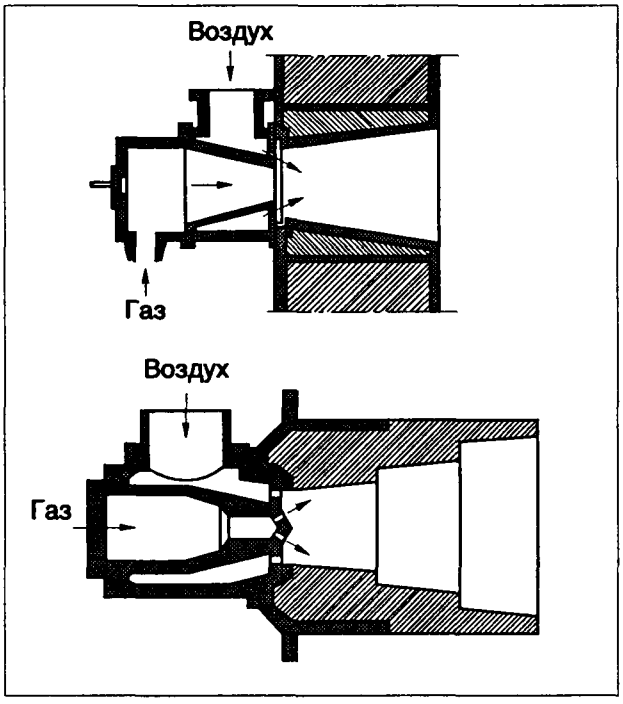
Речь идет в некотором роде о пламени, обратном диффузионному (см. рисунок на с. 690).



Горелки с осевым пламенем и большой скоростью воздуха.

8.2.5.2. Пламя с пересекающимися флюидами

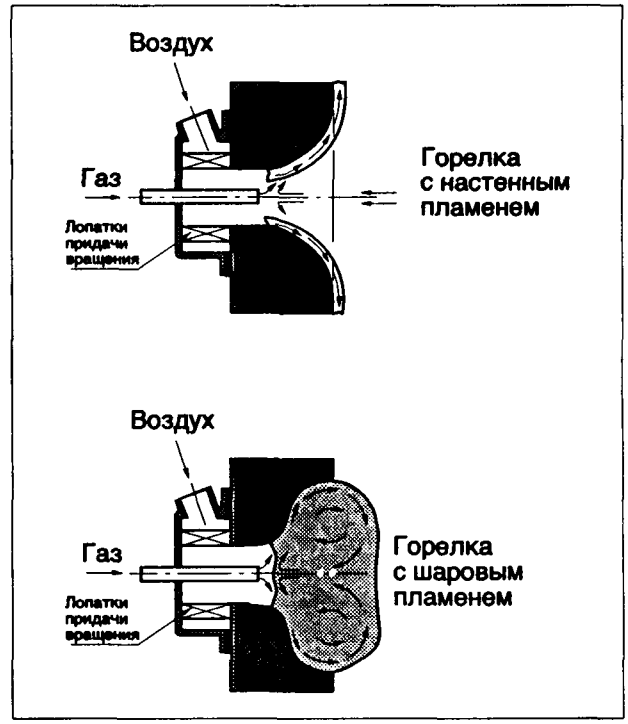
Они соответствуют истечению со сходящимся воздухом или расходящимся газом.



Горелки с истечением пересекающихся флюидов.

8.2.5.3. Пламя с вращением вытекающего воздуха

Сжигание очень интенсивное, связано с большой турбулентностью.



Горелки с вращением воздуха.

8.2.5.4. Пламя с истечением контрвращением

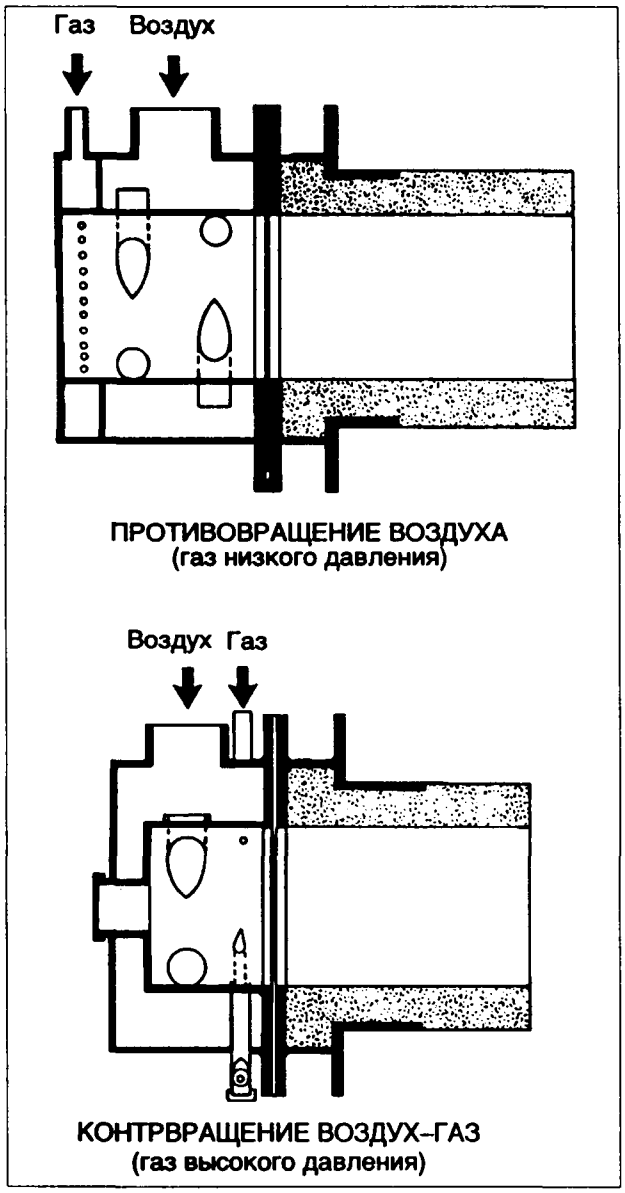
Горение очень интенсивное, связано с большой турбулентностью (см. рисунок на с. 691).

8.2.5.5. Горелки "моноблок"

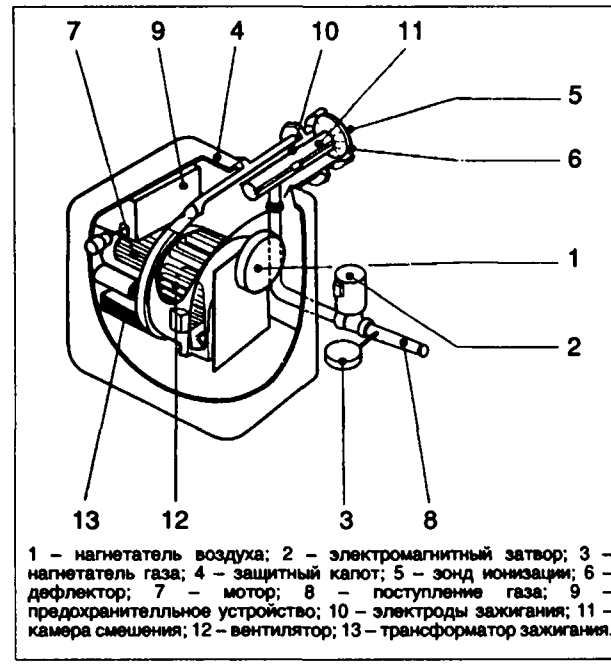
На рисунке с. 691 представлена особая горелка, называемая "моноблок", часто используемая на котлах, которая включает в одном корпусе вентилятор, последовательность кранов, осуществляющих регулирование и безопасность, также как и головку сгорания.

8.2.6. Горелки с особенностями в работе

Развитие новой техники использования газа требует создания горелок, создающих пламя, имеющего особые определенные свойства. Горелка не только источник тепла, но также специфическое средство процесса.



Горелки с истечением контрвращением.



1 – нагнетатель воздуха; 2 – электромагнитный затвор; 3 – нагнетатель газа; 4 – защитный капот; 5 – зонд ионизации; 6 – дефлектор; 7 – мотор; 8 – поступление газа; 9 – предохранительное устройство; 10 – электроды зажигания; 11 – камера смешения; 12 – вентилятор; 13 – трансформатор зажигания.

Горелка-моноблок.

8.2.6.1. Авторекуперативные горелки

Подогрев воздуха горения – средство повышения температуры горения. Вблизи условий стехиометрического горения, повышение температуры воздуха на 100°C соответствует повышению на 50°C температуры горения.

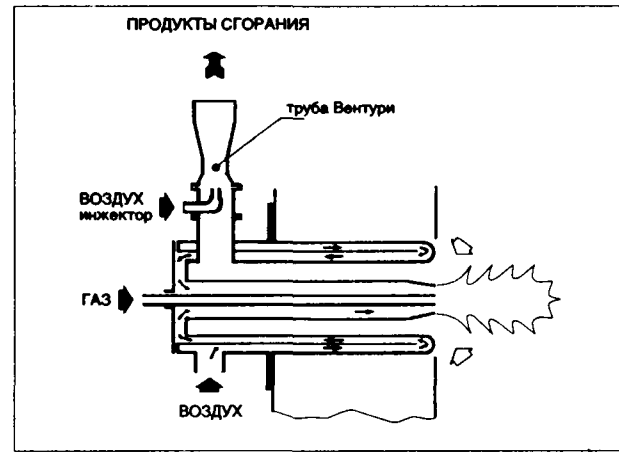
Предварительный подогрев воздуха обычно осуществляется путем использования значительного тепла продуктов сгорания на выходе из печи, особенно установок высокой температуры. Такая операция значительно повышает коэффициент полезного действия установки, если только это возможно (отсутствие агрессивных компонентов в продуктах сгорания). Например, снижение температуры продуктов сгорания с 1100°C до 600°C соответствует удвоению КПД.

Установка рекуператоров в дымоходах часто практикуется на мощных установках. Встречаются три сложности: соответствие температуры и состава продуктов сгорания, размеры рекуператора, необходимость транспорта подогретого воздуха к горелкам.

Для установок слабой и средней мощности (до 500 кВт) можно использовать горелки-авторекуператоры (см. рисунок ниже).

При совмещении с горелкой рекуператоры стараются осуществить максимальную компактность. Это ведет к установке системы отвода продуктов сгорания, связанной с регулированием давления в печи для подачи входного воздуха или выхода мешающих продуктов сгорания.

Рекуперация может быть осуществлена в два этапа: горелка в этом случае называется "горелка с двойной рекуперацией". Она может быть реализована при очень высокой температуре (до 1400 °C) с помощью керамического рекуператора; горелка в этом случае называется "регенеративная горел-



Горелка-авторекуператор.

ка", по аналогии с технологией рекуперации, применяемой на мартенах и печах плавки стекла.

8.2.6.2. Радиантные горелки

Горелка называется "радиантной", если большая часть тепла передается к нагреваемому продукту в соответствии с законами передачи лучистой энергии. Это осуществляется путем использования поверхностей из отражающих материалов, нагреваемых в процессе сгорания, служащих для передачи лучей в процессе переноса тепла.

8.2.6.2.1. Основные характеристики идеальной горелки

Идеальной радиантной горелкой считается горелка, в которой:

— теплообмен между продуктами сгорания и поверхностью идеальный;
— показатель излучения поверхности соответствует показателю черного тела;
— потери теплопроводности равны нулю.

В этих условиях, для одинаковой мощности, температура поверхности и потери с продуктами сгорания будут наименьшими.

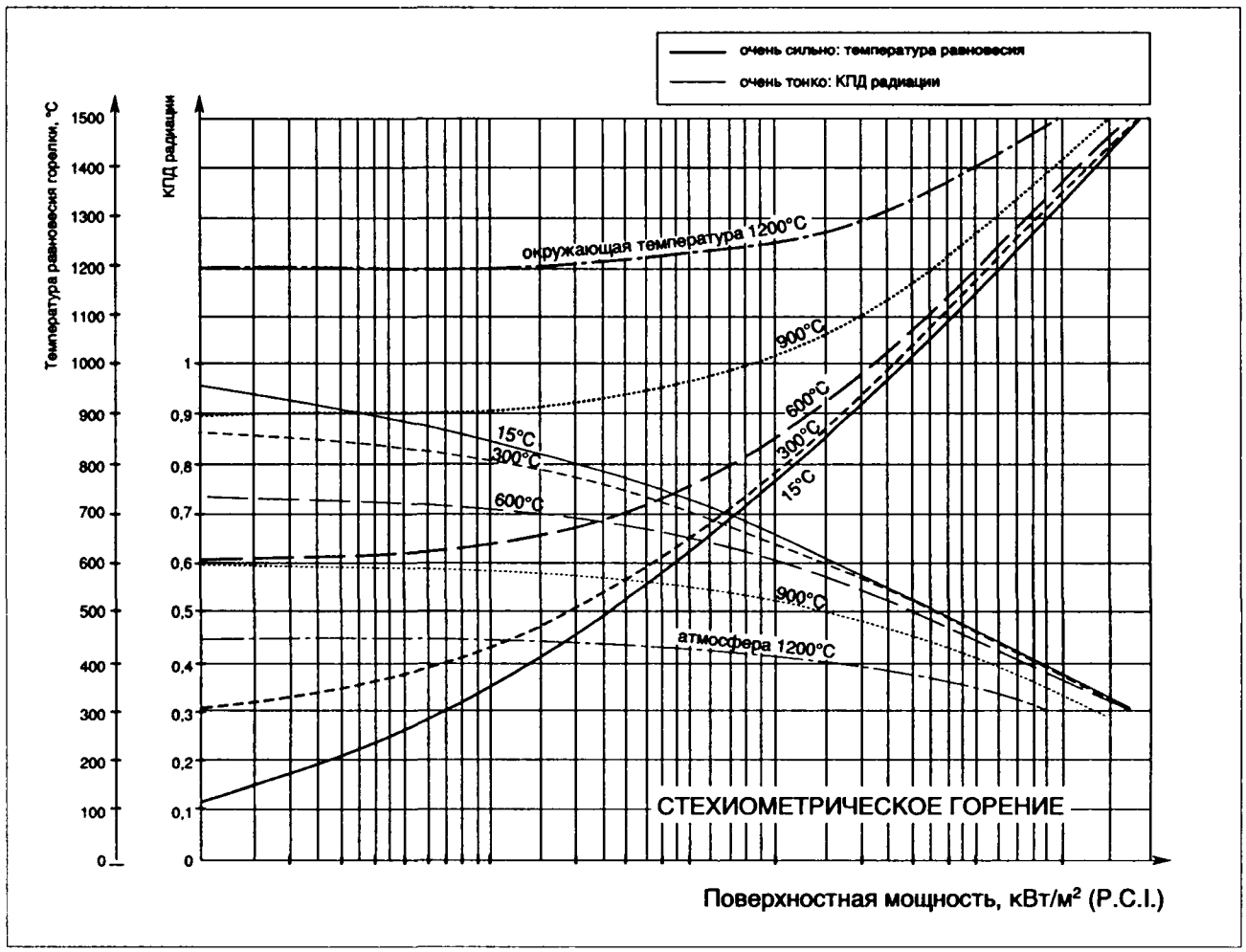
Коэффициент теплопередачи радиации η – это отношение количества тепла, передаваемого в полупространстве за счет радиации к мощности горелки, выраженной в P.C.I.

Когда потери за счет теплопроводности малы или пренебрежимо малы (что соответствует случаю радиационной горелки, горючее в которую поступает через заднюю часть), отдача тепла излучением есть разница между единицей и потерями с уходящими газами. Для каждой температуры радиационной поверхности можно определить предельный коэффициент теплопередачи, который соответствует коэффициенту идеальной радиационной горелки.

Коэффициент теплопередачи радиацией тем выше, чем ниже температура уходящих продуктов сгорания. Он обратно пропорционален удельной мощности, развиваемой поверхностью.

На рис. 8.26 для идеальной горелки дается изменение коэффициента радиации и температуры поверхности в зависимости от удельной мощности поверхности и различной температуры окружающей среды при стехиометрическом горении.

Заметим, что это горелка малой поверхностной мощности, которая имеет повышенный коэффициент радиации, т.е. используется при малых температурах.



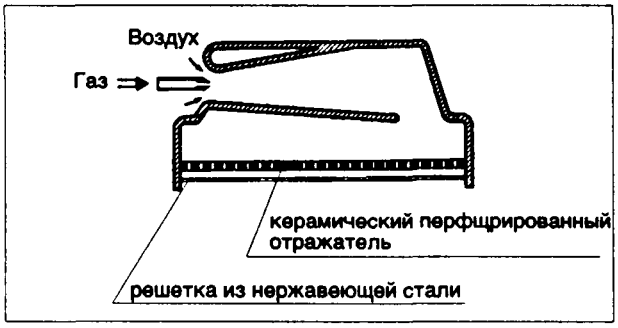
Радиационная идеальная горелка: температура равновесия и КПД радиации в зависимости от поверхностной мощности и окружающей температуры.

8.2.6.2.2. Основное оборудование

8.2.6.2.2.1. Светящиеся радиационные панели

Радиационная поверхность состоит из керамических перфорированных множеством отверстий малого диаметра панели для разделения пористой поверхности.

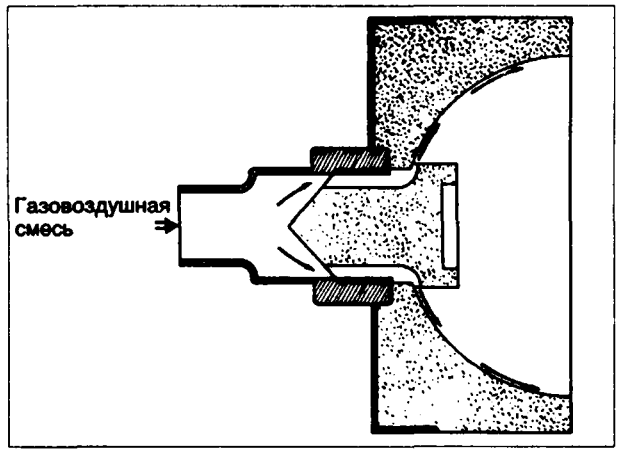
Это оборудование применяется при низких температурах: обогрев залов, сушка и т.д.



Радиационная светящаяся панель.

8.2.6.2.2.2. Чашечная радиационная горелка

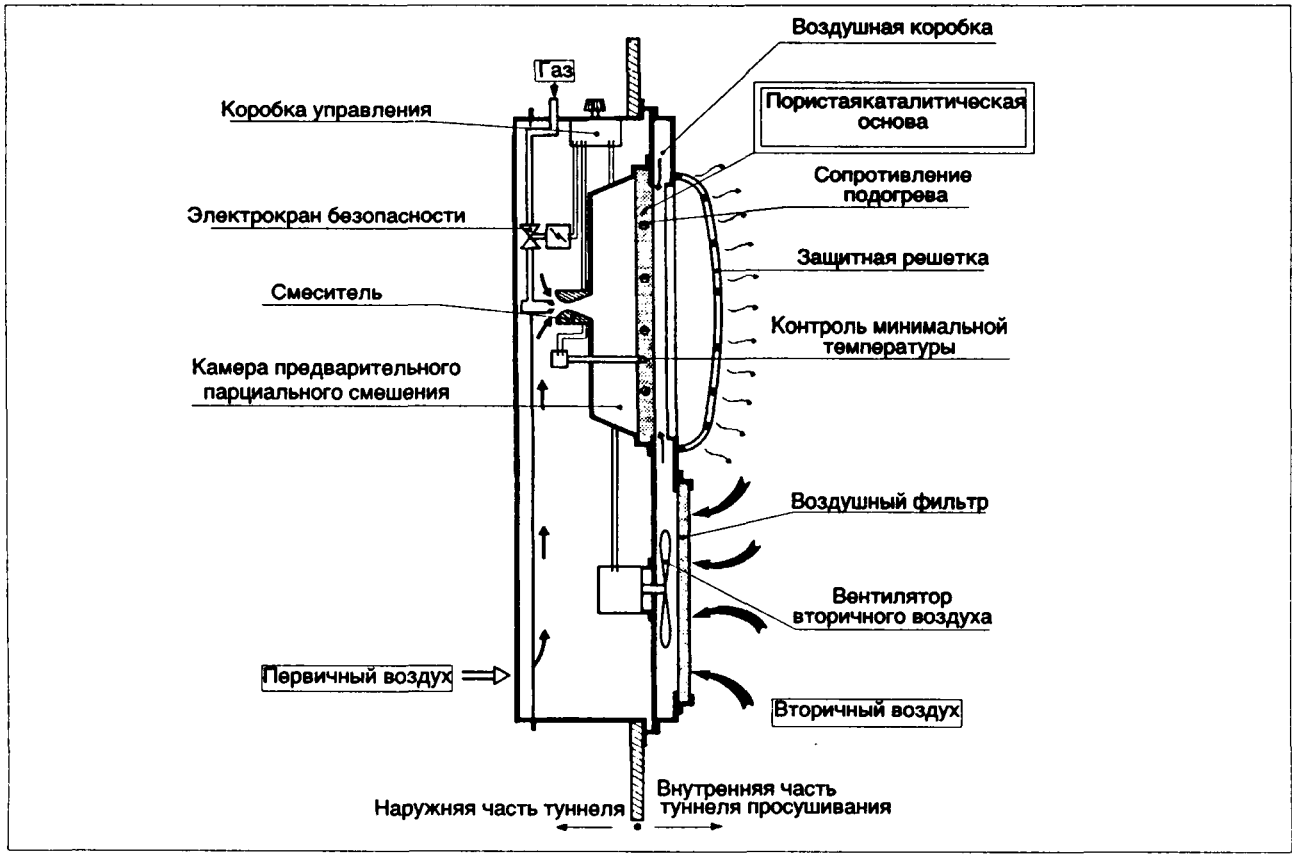
Это горелки, имеющие камеру сгорания в форме чашки, во внутрь которой подается предварительно смешанные полностью газ и воздух с помощью устройства, осуществляющего пристенное истечение. Горение происходит также в контакте с жаропрочной стенкой, которая может иметь тем выше температуру, чем лучше изолирована и чем больше имеет шероховатости, которые увеличивают передачу тепла конвекцией.



Радиационная чашечная головка.

8.2.6.2.2.3. Радиационные горелки каталитического горения

Каталитические материалы целесообразно применять во взрывоопасной атмосфере при отсутствии источника воспламенения, таких как тряпки, контакте с пористой массой, т.к. даже при температуре 1000°C большинство паров промышленных растворителей воспламеняются только во время каталитического окисления.



Принципиальная схема радиационной горелки Reansation с парциальным смешением газа с воздухом и принудительной конвекцией.

Поэтому каталитические горелки наиболее часто распространены в областях, связанных с покраской.

Речь идет, следовательно, об оборудовании, наиболее приспособленном для сушки краски.

8.2.6.3. Струйные горелки

Горелка "струя" – это горелка, создающая очень высокую скорость (более 100 м/с) продуктов полного или почти полного сгорания. Созданный поток высокой кинетической энергии используется для нагрева прямым воздействием или для перемешивания объема.

Давление в камере изменяется от 10 до 60 мбар и необходимо иметь:

— вентиляторы, создающие это давление;
— газ с давлением равным или больше, чем давление в камере.

С другой стороны, давление в камере определяет начальную скорость потока (струи).

В табл. 8.6 приводится порядок величин удельного напора, которых можно достичь с различными типами работающих с небольшим избытком воздуха горелок.

Струи, выходящие из горелок, починяются законам турбулентных струй (§ 8.2.1.2.).

Чтобы уточнить порядок величины расхода, подсасываемого струей исходящих из горелки продуктов сгорания, на рисунке представлено изменение относительного подсасываемого расхода в зависимости от установки инжектора при разных температурах окружающей среды и струи. Заметим, что в зависимости от различных параметров, подсасываемый расход колеблется от двух до двадцати начальных расходов струи.

Давление газа и воздуха должны быть выше потерь давления в горелке.

Тип горелки	Давление		Удельный напор, Н/ГВт (Р. С. J.)
	воздух	природный газ	
Диффузионная	слабое	1 бар 10 бар	9 12
Смешение в зоне горения	20 мбар*	20 мбар*	22
Смешение в зоне горения	55 мбар*	20 мбар*	35
Струя (150 м/сек)	20 мбар*	20 мбар*	35
Струя (250 м/сек)	55 мбар*	55 мбар*	100

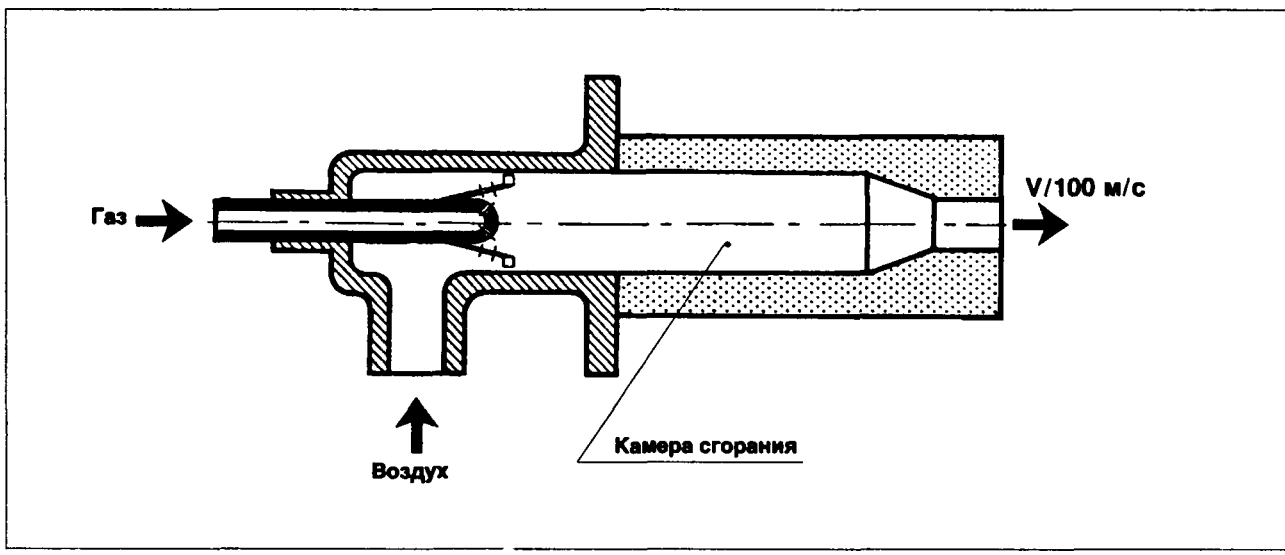
* Давление газа и воздуха должны быть выше потерь давления в горелке.

8.2.6.4. Радиантные трубы

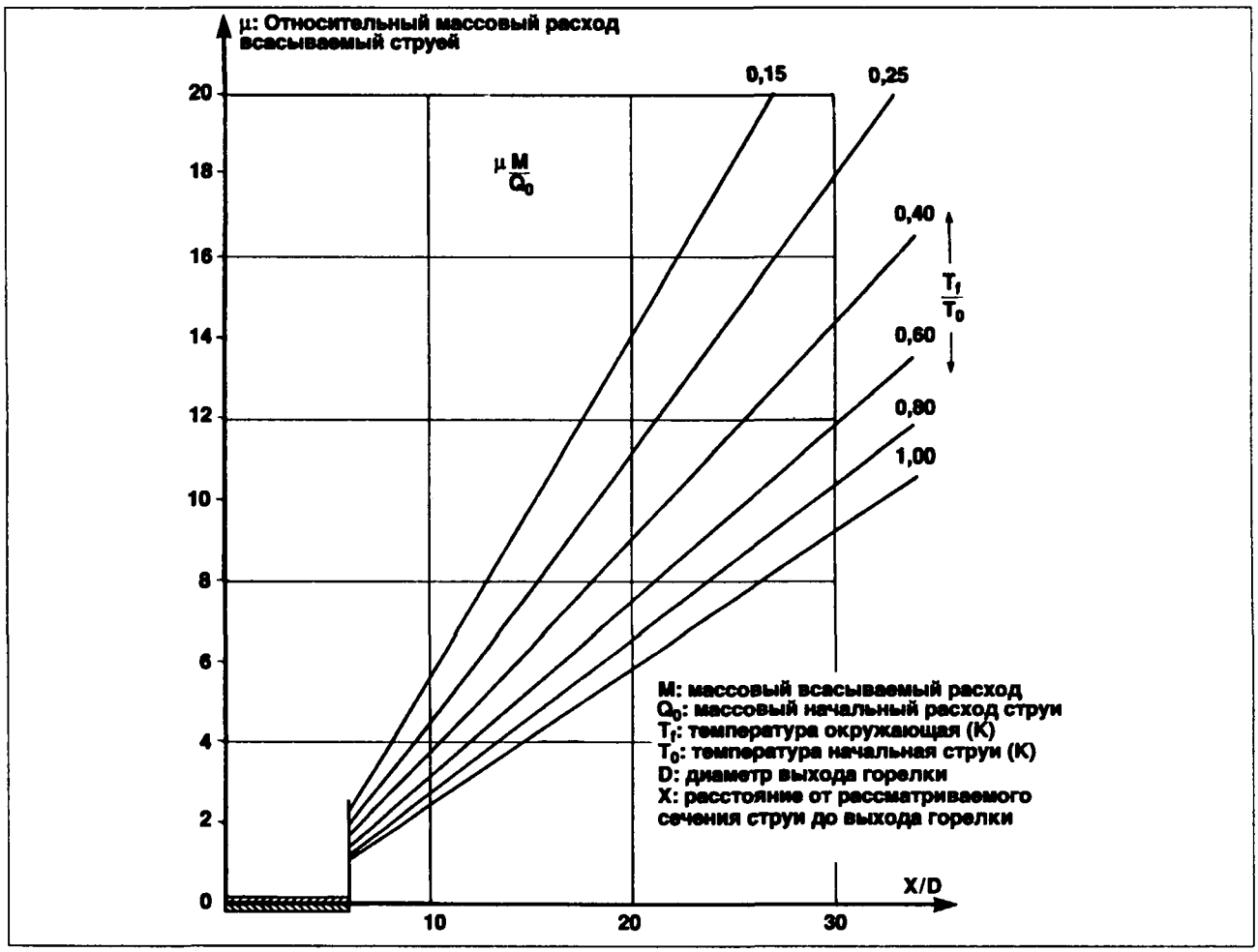
В определенных операциях нагрева необходимо избежать попадания продуктов сгорания в печь. Нагрев происходит, таким образом, с помощью труб, нагретых до высокой температуры циркулирующими внутри продуктами сгорания. Чтобы получить хорошее распределение температуры вдоль трубы, необходима частичная циркуляция продуктов сгорания. Применение термомеханической керамики, получившей распространение в последнее время, позволяет поддерживать требуемую высокую температуру.

8.2.6.5. Атмосферные горелки

Чистота сгорания используемых газов, особенно отсутствие серы, позволяет использовать разбавленные воздухом продукты сгорания для аэрации производственных помещений многочисленных помещений сушки.



Пример струйной горелки.



Относительный всасываемый расход дозвуковой струи в зависимости от дистанции в инжекторе при различной окружающей температуре.

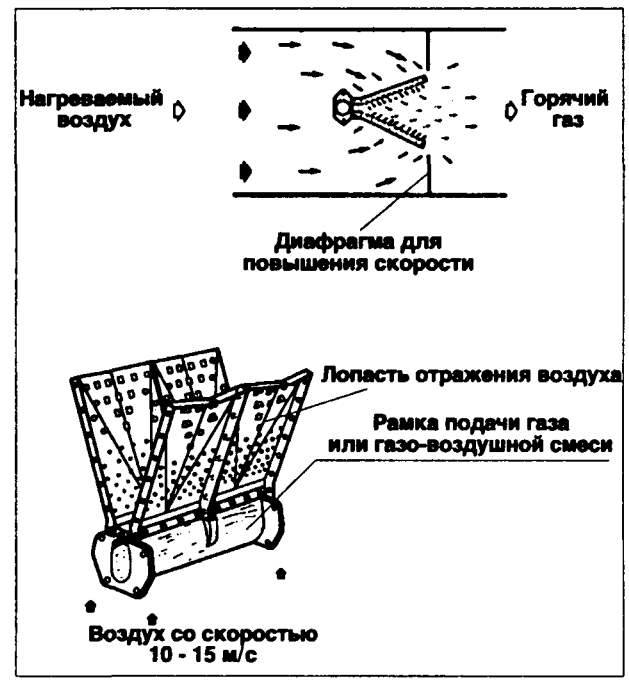
Для этого применяется особый вид горелки, называемый атмосферным или (в потоке воздуха), т.к. речь идет об оборудовании, установленном непосредственно в вентиляционных коробках.

Температура получаемого газа при этом может достигать +400°C.

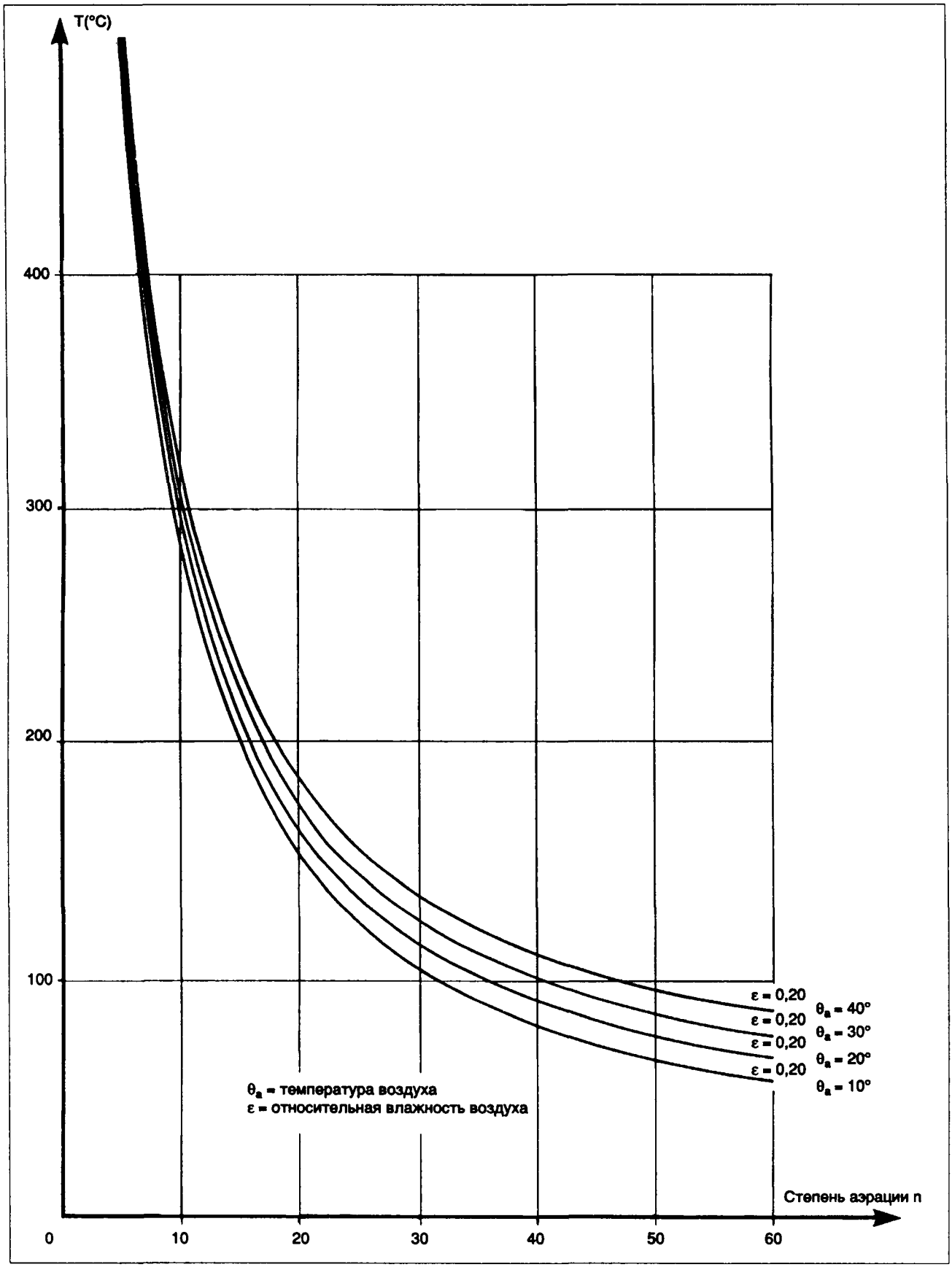
Определенные атмосферные горелки предназначены для дожигания сбрасываемых горючих газов при условии, что содержание кислорода сбрасываемых газов не менее 18% и температура смешения ниже 540°C. Это дожигание осуществляется при t – 800 - 850°C.

Получаемые в результате горячие продукты смешения используются для сушки. Чтобы изучить проблему более детально, G.D.F. подготовил диаграмму "Влажные продукты сгорания", которые представляют собой применение диаграммы Мольера влажного воздуха в этой технике использования газа; эта диаграмма находится в распоряжении дирекции исследования и новой техники.

С целью лучшего понимания на рисунке с. 696 дается температура разбавленных продуктов сгорания в зависимости от степени аэрации для начальной температуры воздуха от 10 до 40°C и относительной влажности 0.2.



Горелка воздушных потоков.



Температура продуктов сгорания природного газа в зависимости от степени аэрации. Природный газ типа Лак.

8.2.7. Горелки домашних аппаратов

Горелки, установленные на домашних аппаратах (плиты, индивидуальные котлы, водонагреватели), являются, в основном, инжекционными горелками низкого давления (§ 8.2.2.2.), для работы которых достаточно небольшого давления в пределах: 18 - 25 мбар для природного газа, 28 мбар – для бутана, 37 мбар – для пропана. Струя газа, выходящая из сопла, вовлекает в смесь воздух, называемый "первичным" в количестве меньшем, чем необходимо для полного сжигания.

Горение начинается на выходе из отверстия в головке горения в соответствии с фронтом пламени в форме конуса, который называется – голубой конус.

Работа этих горелок представлена на диаграмме: удельная тепловая нагрузка (*qc*) – степень первичной аэрации (*пр*).

Где:

qc – отношение мощности горелки и выходного сечения горелки,

пр – отношение количества первичного воздуха к теоретически необходимому для горения.

На этой диаграмме проводят 4 предела для хорошей работы:

затухание (отрыв пламени), появление желтых точек, негигиеничное горение, проскок пламени.

Точка нормальной работы соответствует *qc* = 7 - 10 кВт/м^2,

пр = 0,5 - 0,6.

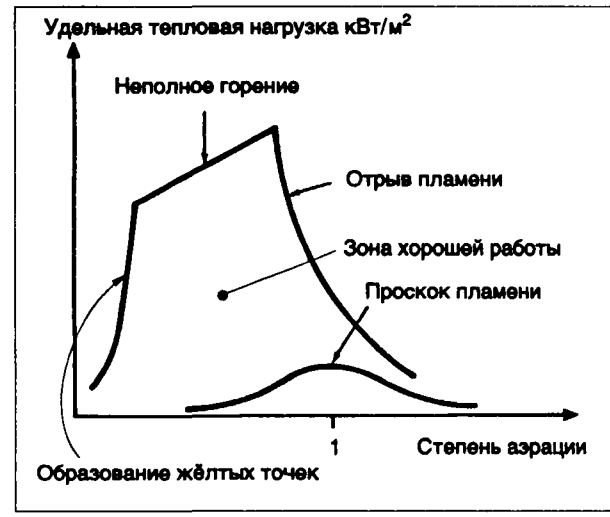


Диаграмма работы горелки домашнего аппарата.

8.3. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, БЕЗОПАСНОСТИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ УСТАНОВОК ГАЗОВОГО НАГРЕВА

8.3.1. Вступление

Система управления, безопасности и регулирования оборудования газового нагрева служит:

— для координации действий различных составляющих системы с соблюдением порядка включения в действие или остановки с учетом информации, исходящей от обслуживающей аппаратуры;

— остановки горелки в случае нарушения работы.

8.3.2. Система оборудования нагрева

Оборудование нагрева – это совокупность системы по производству пламени. Он включает, таким образом:

— собственно горелку и дополнительные устройства, предназначенные для подачи топлива и окислителя, регулирования мощности, безопасность работы и по возможности автоматическое управление.

В зависимости от направления истечения флюидов встречаются:

— элементы "фурнитура воздуха горения";

— элементы "фурнитура горючего газа";

— элементы собственно горелок и системы управления, безопасности и регулирования.

Рис. на с. 698 представляет схему работы оборудования системы отопления средней мощности (несколько сотен киловатт).

Для оборудования домашнего нагрева (порядка от нескольких киловатт до 70 киловатт, максимальный предел определяется нормами) схеме может быть придан более простой вид.

8.3.3. Анализ системы управления, безопасности и регулирования

8.3.3.1. Функционирование

Система управления, безопасности и регулирования должны осуществлять, с одной стороны проведение следующих последовательных операций:

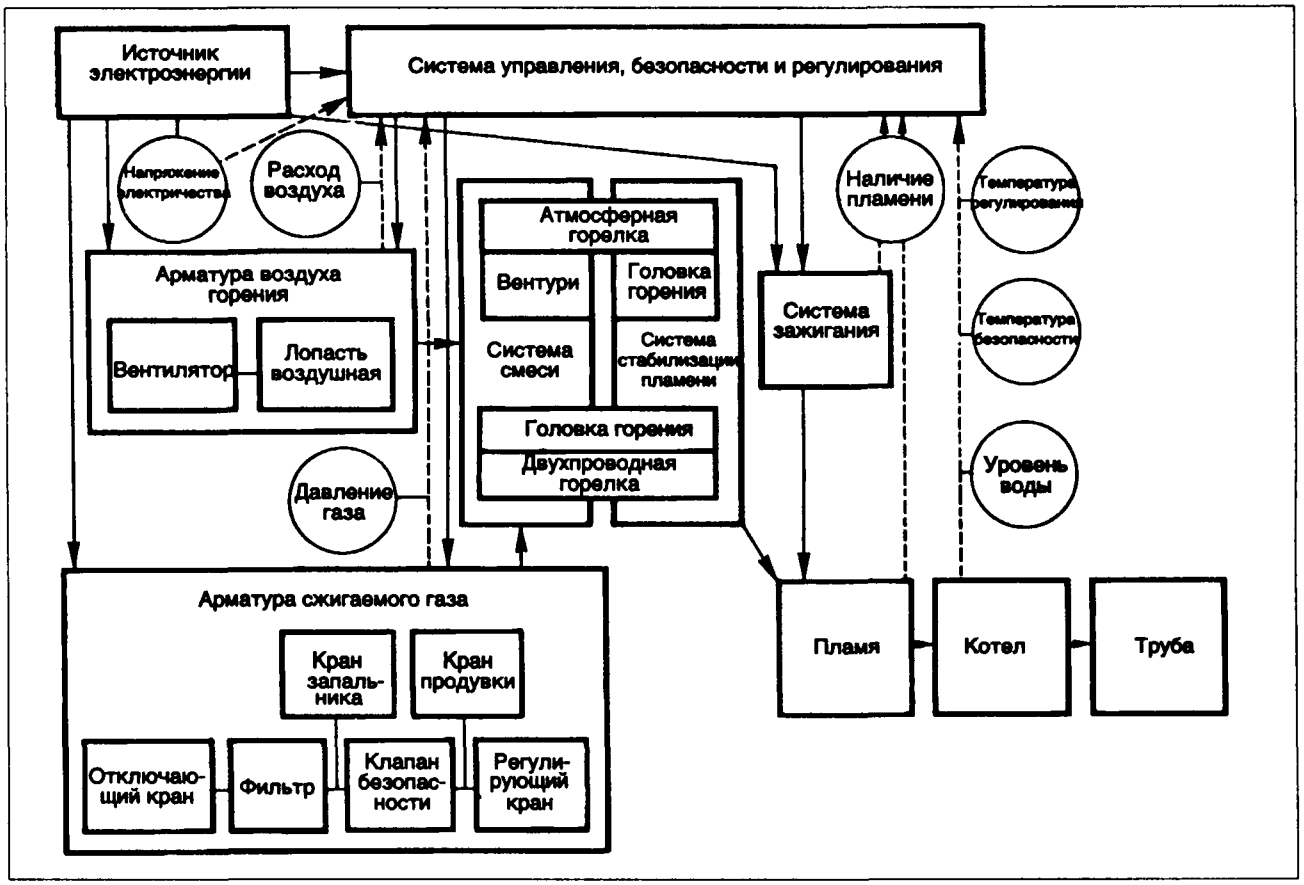


Схема работы оборудования отопления средней мощности.

- запуск,
- выход на режим,
- поддержание режима,
- изменение режима в соответствии с необходимым количеством тепла и остановка в случае нарушения работы.

С другой стороны, – контроль основных показателей работы после выполнения команды.

8.3.3.2. Состав

Общая диаграмма функционирования системы управления и безопасности регулирования газовой горелки средней мощности показывает, что система состоит из трех основных подсистем:

— управления;
— контроля (тест да/нет);
— исполнения.

Число элементов каждой части изменяется в соответствии с применяемой технологией и нормами, которым они должны соответствовать.

8.3.3.3. Подсистема управления

Это – прежде всего система, позволяющая осуществлять вручную или автоматически программу, которая даст последовательный порядок команд, необходимых для установления номинального режима.

В автоматическом режиме зафиксированы промежутки управления времени, разделяющие последовательные команды.

8.3.3.4. Подсистема контроля

Контакты подсистемы контроля, расположенные последовательно, являются точками обязательного прохождения, разделяющих два порядка команд.

Они выключают систему в случае, когда результат теста положительный и тогда может быть передан порядок команды. Когда все испытания положительны, дается разрешение на реализацию порядка.

В случае негативного результата теста на одном из устройств системы контроля осуществляется остановка горелки с возвращением в начальное положение запуска.

В зависимости от характера неполадок функционирование либо продолжается, либо прекращается, в связи с этим выделяется два типа остановок.

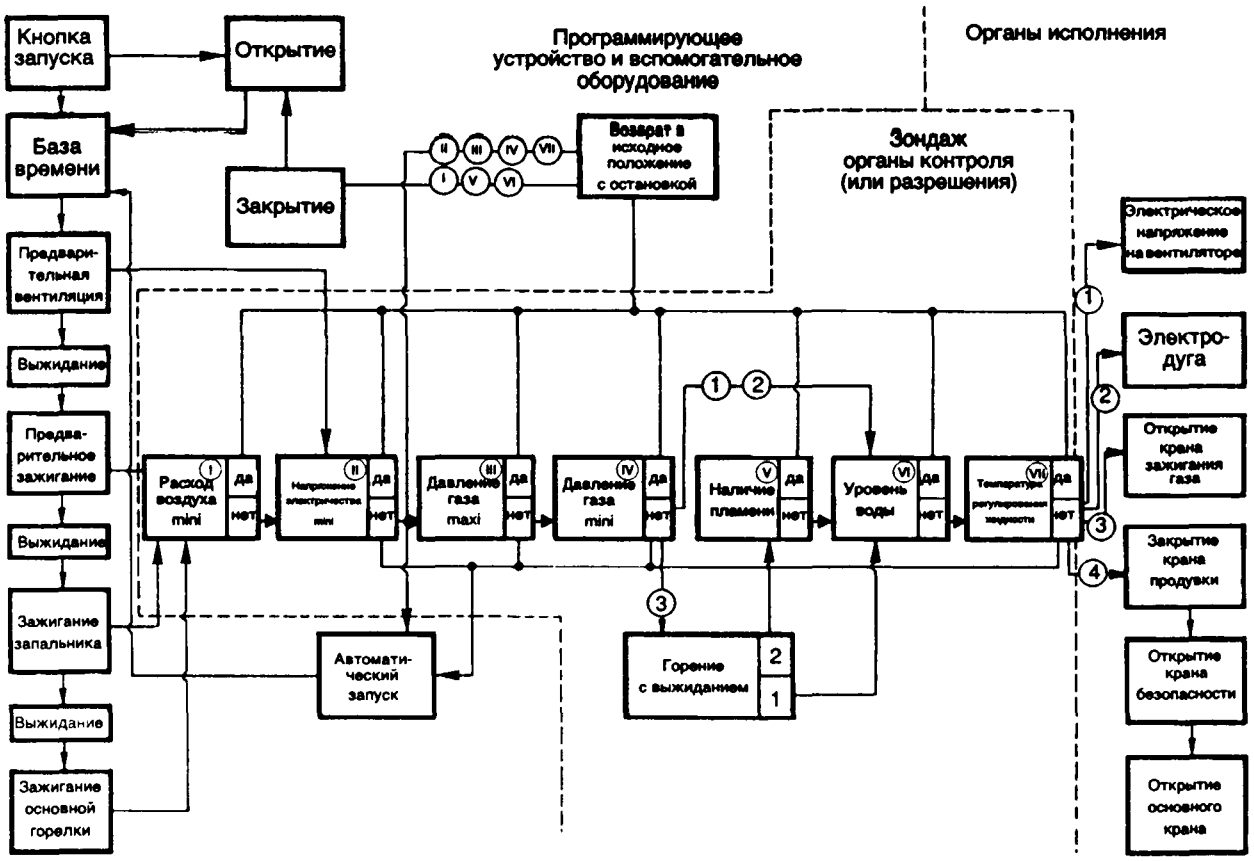


Схема работы системы управления, безопасности и регулирования газовой горелки средней мощности.

Тип остановки	Неполадки, вызвавшие остановку	Возвращение в работу
Расстройство или регулирование	— Электрическое напряжение ниже нормального, — Давление газа ниже или выше предела (интервала) снабжения не вызывает сложности горения, — Температура регулирования жидкости теплоносителя выше установленной величины.	Автоматически
Безопасность (закрытие)	— Недостаточный расход воздуха горения, — Отсутствия пламени, краны открыты, — Недостаточный уровень воды (для котла горячей воды), — Температура теплоносителя выше установленной нормы.	Вручную

8.3.3.5. Подсистемы выполнения (исполнительные механизмы)

Речь идет о вентиляторах воздуха горения, кранах, позволяющих регулировать подачу газа к горелкам, и устройствам, осуществляющих зажигание пламени.

8.3.4. Подсистемы управления

Для домашних аппаратов единственным органом системы управления является кнопка поджига. Следующая операция в зависимости от ответа системы контроля выполняется автоматически (см. § 8.3.5.).

Для некоторых домашних аппаратов и всех аппаратов средней и большой мощности команды выдаются автоматически программирующим устройством. В настоящее время программирующие устройства в большинстве электромеханического типа, т.е. каждый приказ выдается электрическим сигналом, исходящим от перемещающегося кон-

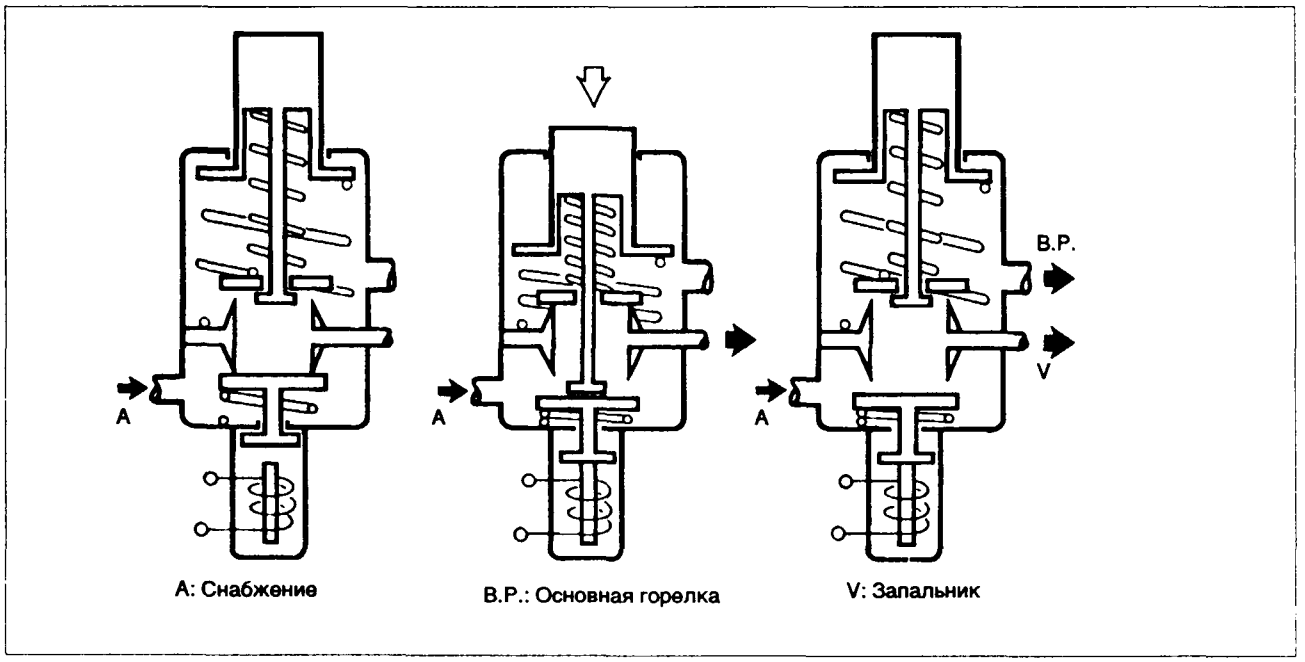
такта с помощью вращающегося на оси кулачка или плечика на диске.

Электромеханические программирующие устройства приводятся в действие синхронным двигателем, который задает временную базу.

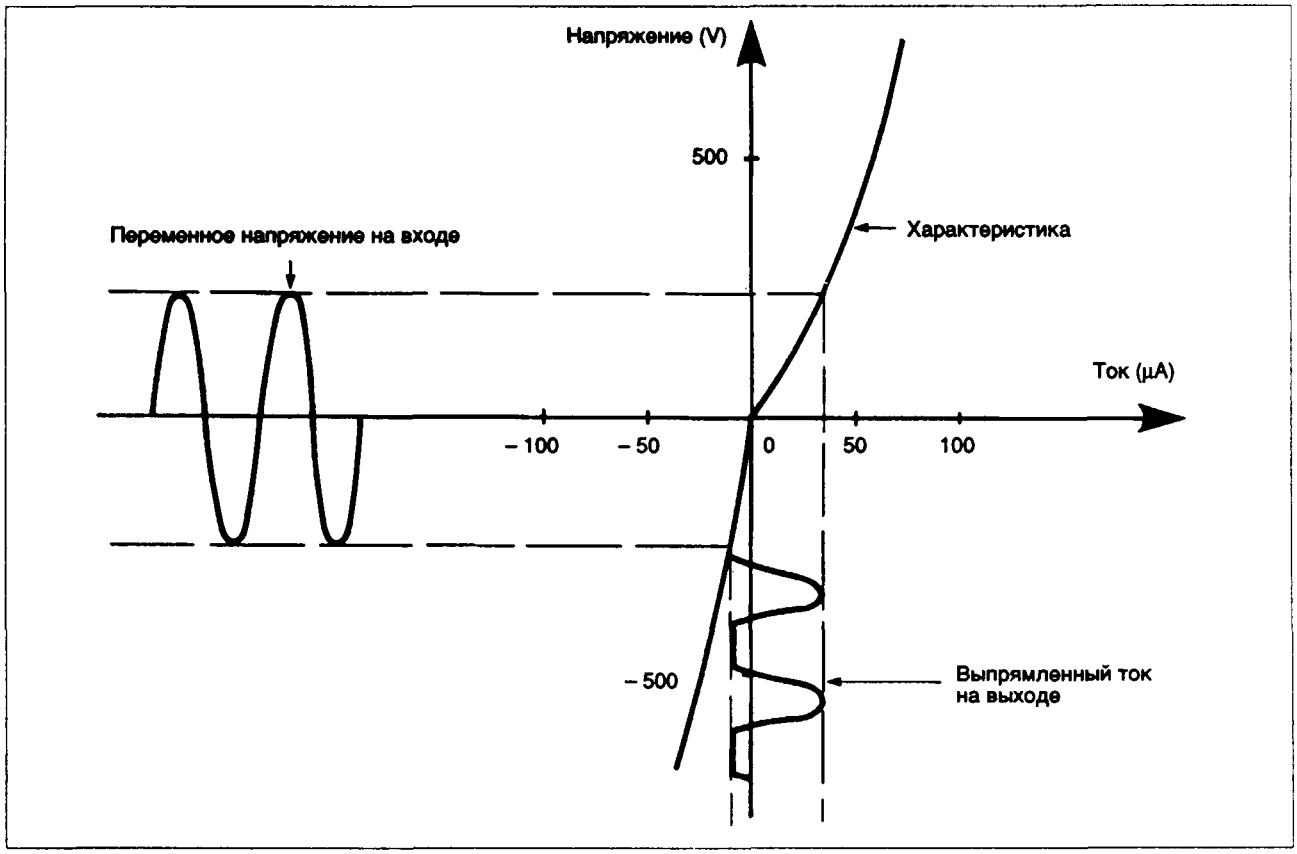
8.3.5. Подсистема контроля

8.3.5.1. Датчики пламени

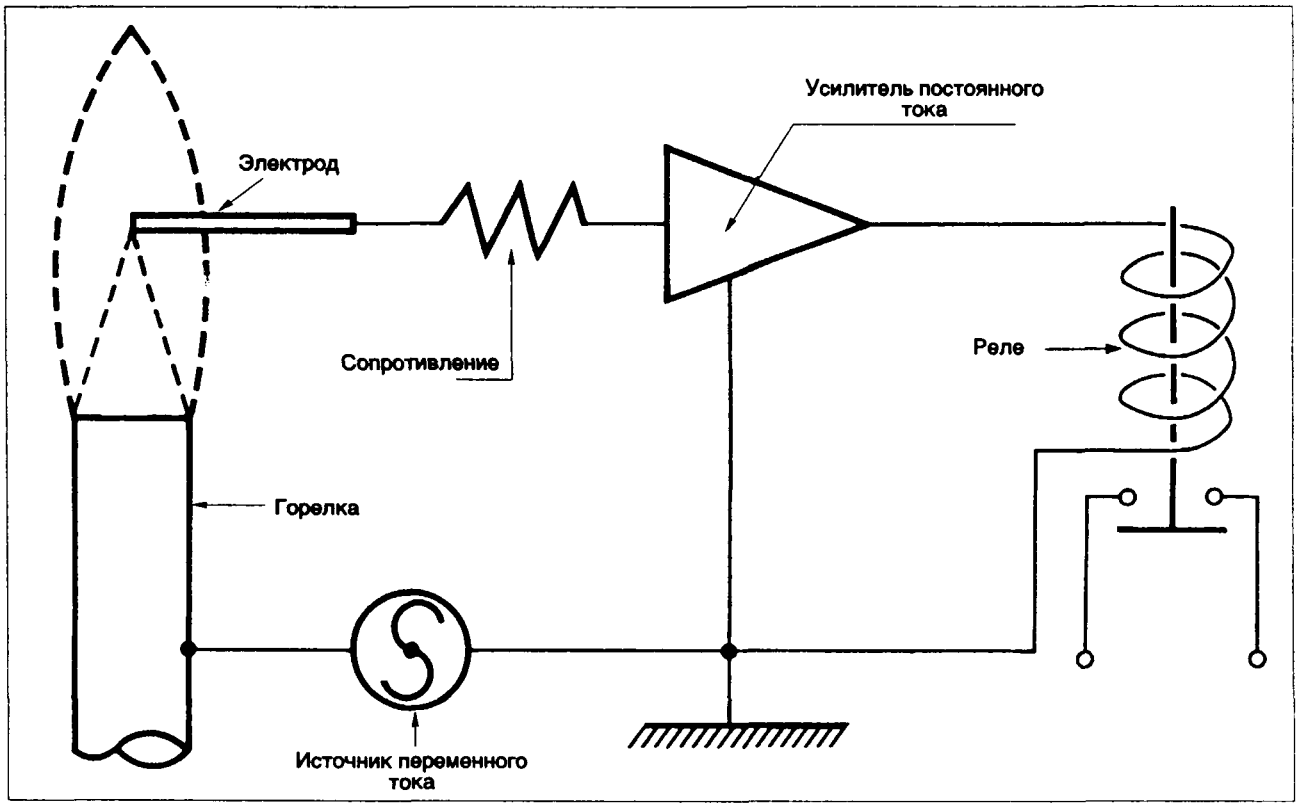
Тип датчика пламени		Принцип	Технология		Недостатки	Преимущества	Использование
Термопара		Электродвижущая сила при нагревании термопары	Прямого действия (рис. 8.37) или путем связи, поддерживающих клапан открытым или закрытым, клапан обычно открытый		Большая инерция	Хорошая работа	Аппараты малой мощности
Ионизирующий электрод		Эффект выпрямителя пламенного (достижение выпрямленного тока из тока переменного (рис. на с. 701))	Действие на электромагнит, поддерживающий закрытым запорное устройство, обычно открытое	После усиления (рисунки с. 701)	Периодическая чистка	Простота	Аппараты низкой и средней мощности
Ячейки фотоэлектронные	Ячейка фотогальваническая	Электродвижущая сила, рожденная световым потоком на полупроводник		Без усиления	Восприимчивость к видимым лучам		Системы устарелые
	Ячейки фотопроводимые	Уменьшение сопротивления субстанции, принимающей световой поток		После усиления	Восприимчивость к инфракрасным лучам		
	Ячейки фотоэмиссионные	Выделение фотонов поверхностью, принимающей световой поток			Самопроизвольная ионизация к концу срока службы приводит к необходимости автоматического контроля	Восприимчива к ультрафиолетовым лучам	
	Разрядные трубки (рисунок с. 702)	Обвальное выделение фотонов поверхностью, принимающей световой поток		Без усиления		Позволяет определить дугу зажигания	Аппараты средней и большой мощности



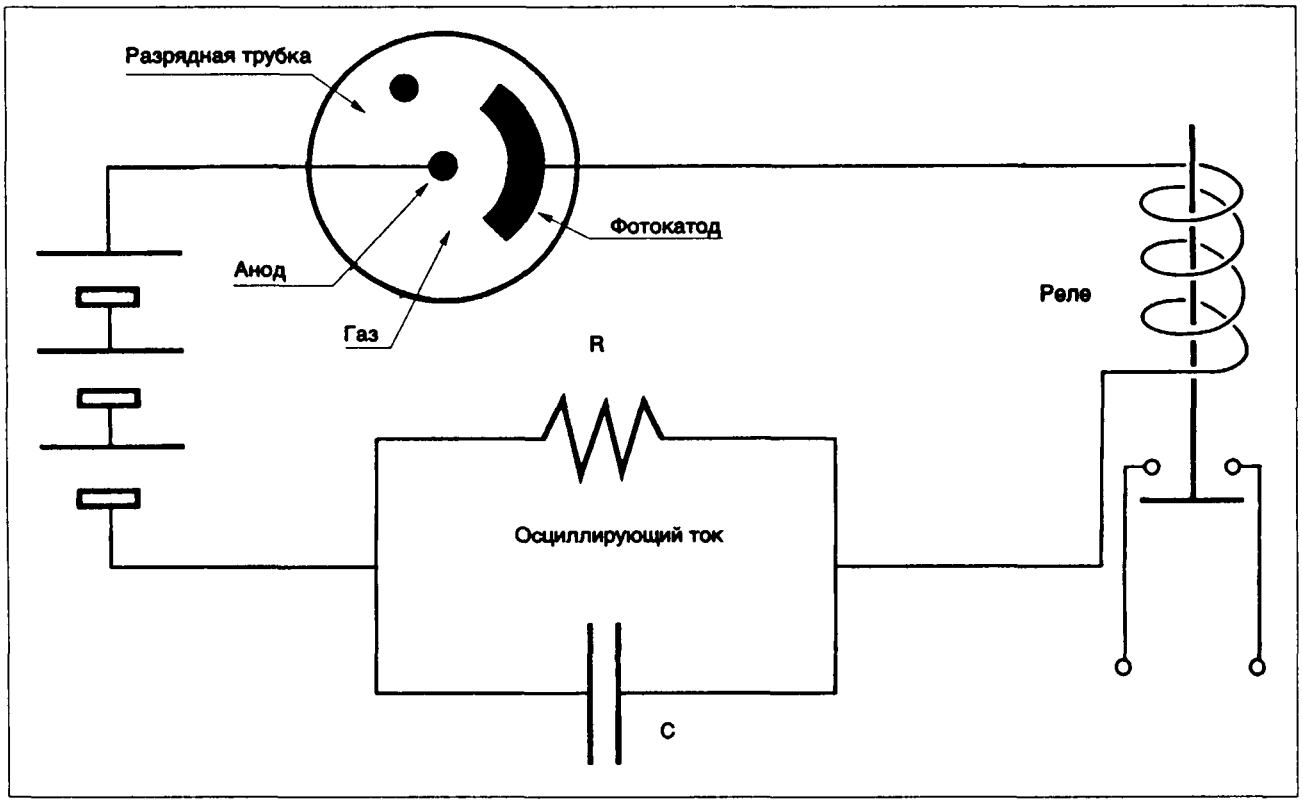
Клапан безопасности с термопарой для горелки с запальником.



Характеристика ионизационного детектора пламени.



Принцип детекции пламени ионизацией.



Разрядная трубка.

8.3.5.2. Маностаты

Роль маностата	Принцип	Технология
Контроль за давлением газа	Контроль статического давления газа внутри определенного интервала	Каучуковая мембрана, реагирующая на рычаг и поддерживающая закрытым запорное устройство нормально открытое (рисунок с. 703)
Контроль расхода воздуха	Контроль динамического давления воздуха над определенным пределом	

8.3.5.3. Термостаты

Роль термостата	Принцип	Технология
Контроль за температурой регулирования и безопасности теплоносителя или нагреваемого продукта (например, окружающий воздух)	Деформация биметаллической пластины или увеличение давления паров жидкости под воздействием температуры	Механическое закрытие запорного устройства нормально открытого

8.3.5.4. Детектор вращения вентилятора

8.3.5.4.1. Роль

Детектор вращения вентилятора или "центробежная муфта" предназначена для указания нормальной подачи воздуха. Эти системы иногда предпочтительнее маностатов, которые обычно маловосприимчивы к слабым колебаниям давления в воздуховодах.

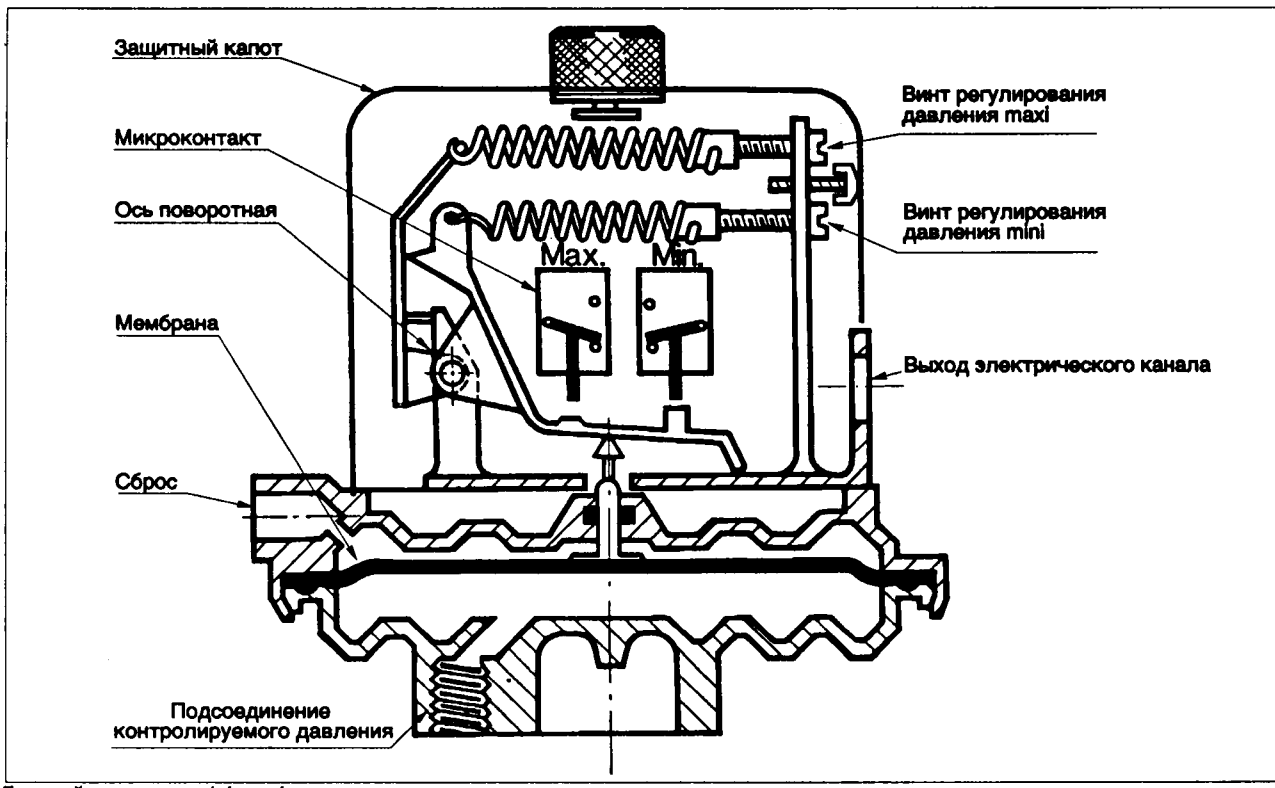
8.3.5.4.2. Технология

Все эти детекторы используют закрытие запорного устройства нормально открытого под действием центробежных сил, действующих на инерционный груз.

8.3.5.5. Контроль герметичности

8.3.5.5.1. Роль

Эти аппараты, применяемые для оборудования отопления большой мощности, позволяют проверить герметичность газовых задвижек (кранов).



Газовый маностат mini-maxi.

8.3.5.5.2. Технология

Принцип этих аппаратов состоит в контроле состояния либо давления, либо разряжения на участке между краном безопасности и регулирующим краном. В первом случае это может быть либо давление в газовой сети, либо давление вспомогательного инертного флюида, обычно азота.

Во втором случае, разряжение создается вакуумным насосом. Давление или разряжение контролируется маностатом. Система электрических команд включает аппарат перед каждым запуском горелки. Можно также предварительно осуществлять испытание герметичности после остановки.

8.3.6. Подсистемы исполнения

8.3.6.1. Автоматические краны

8.3.6.1.1. Характеристики

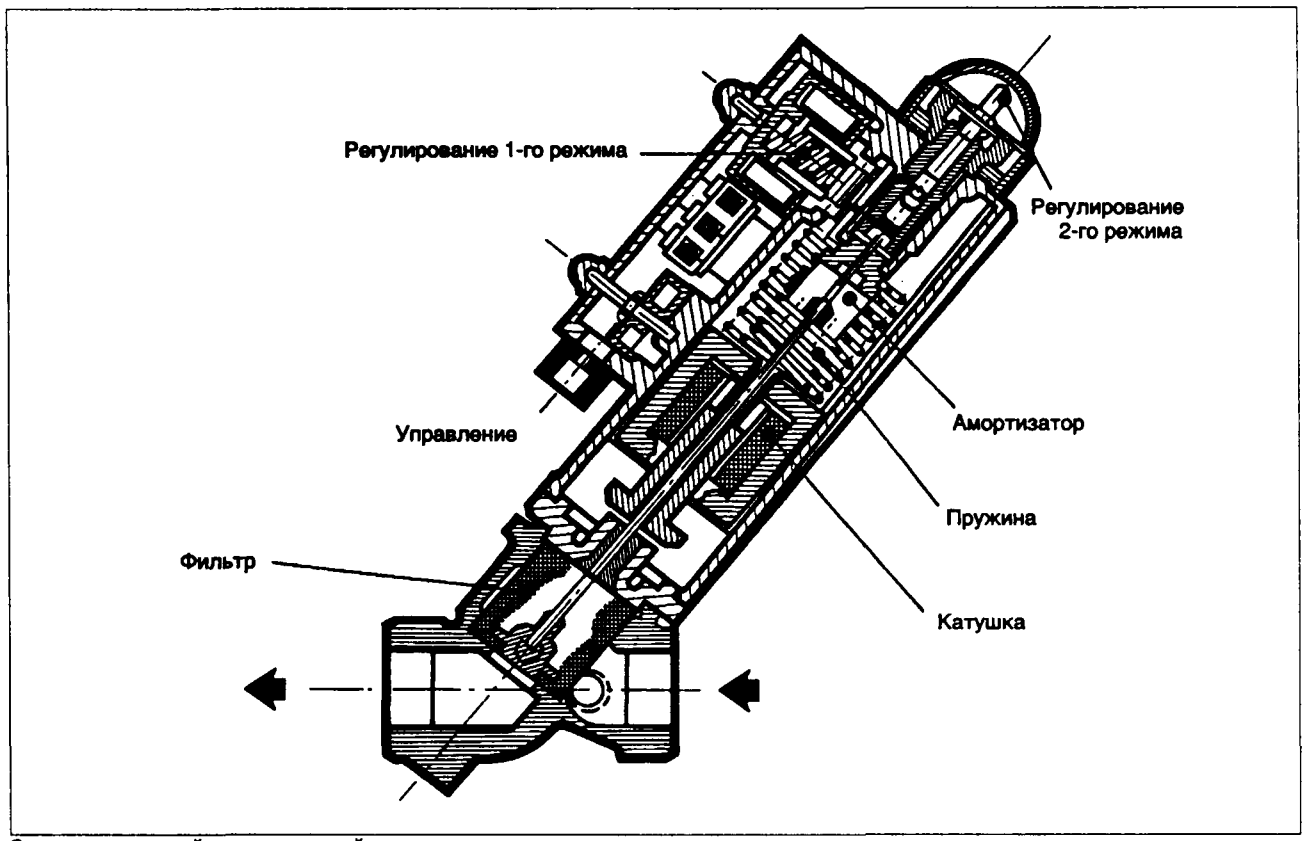
8.3.6.1.2. Приводные механизмы

Маневрирование системы закрытия осуществляется с помощью приводных механизмов, которые могут из себя представлять:

- пневматические (регулятор пилотируемый),
- электрический (сервомотор),
- электрогидравлический (гидронасос и домкрат в одном картере),
- гидравлический (насос, смонтированный на конце оси вентилятора и домкрат, действующий непосредственно на клапан).

Обычная для приводных механизмов (электрические, электрогидравлические и гидравлические) плавность открытия обеспечивается с помощью амортизаторов, т.к. органы управления электромагнитные (рисунок с. 704).

Тип кранов	Требование к качеству	Технология
Клапан безопасности	Быстрое закрытие с помощью пружины Герметичность	Клапанный кран на выходе
Регулирующие краны	Медленное изменение органа регулирования расхода	Все типы кранов (клапан на входе или выходе, бабочка)
Краны, осуществляющие регулирование и безопасность	Открытие медленное Закрытие быстрое с помощью рессоры Герметичность	Кран с клапаном на входе



Электромагнитный двухрежимный кран.

8.3.6.2. Система зажигания

Для домашних аппаратов с постоянным запальником зажигание осуществляется вручную от искры, питаемой электрической системой.

Для всех других аппаратов (домашние аппараты без постоянно действующего запальника, автоматические горелки) искра питается от трансформатора.

Управление искрой осуществляется от автоматической части установки.

8.3.7. Связь системы управления и безопасности с остальной установкой

Как элемент координации, система управления безопасности и регулирования получает всю информацию, поступающую от системы обслуживания (наблюдения), расположенных в различных частях установки. Эта информация трансформируется путем открытия или закрытия контакта, находящегося в цепи контроля, либо в цепи реагирования, либо в цепи контура нарушений, либо в контуре включения в систему безопасности, имея в виду, что возвращение к работе может потребовать или нет необходимости ручного вмешательства.

Возможно также включение контура управления безопасности другого аппарата в систему элементов координации.

8.3.8. Компоновка составляющих

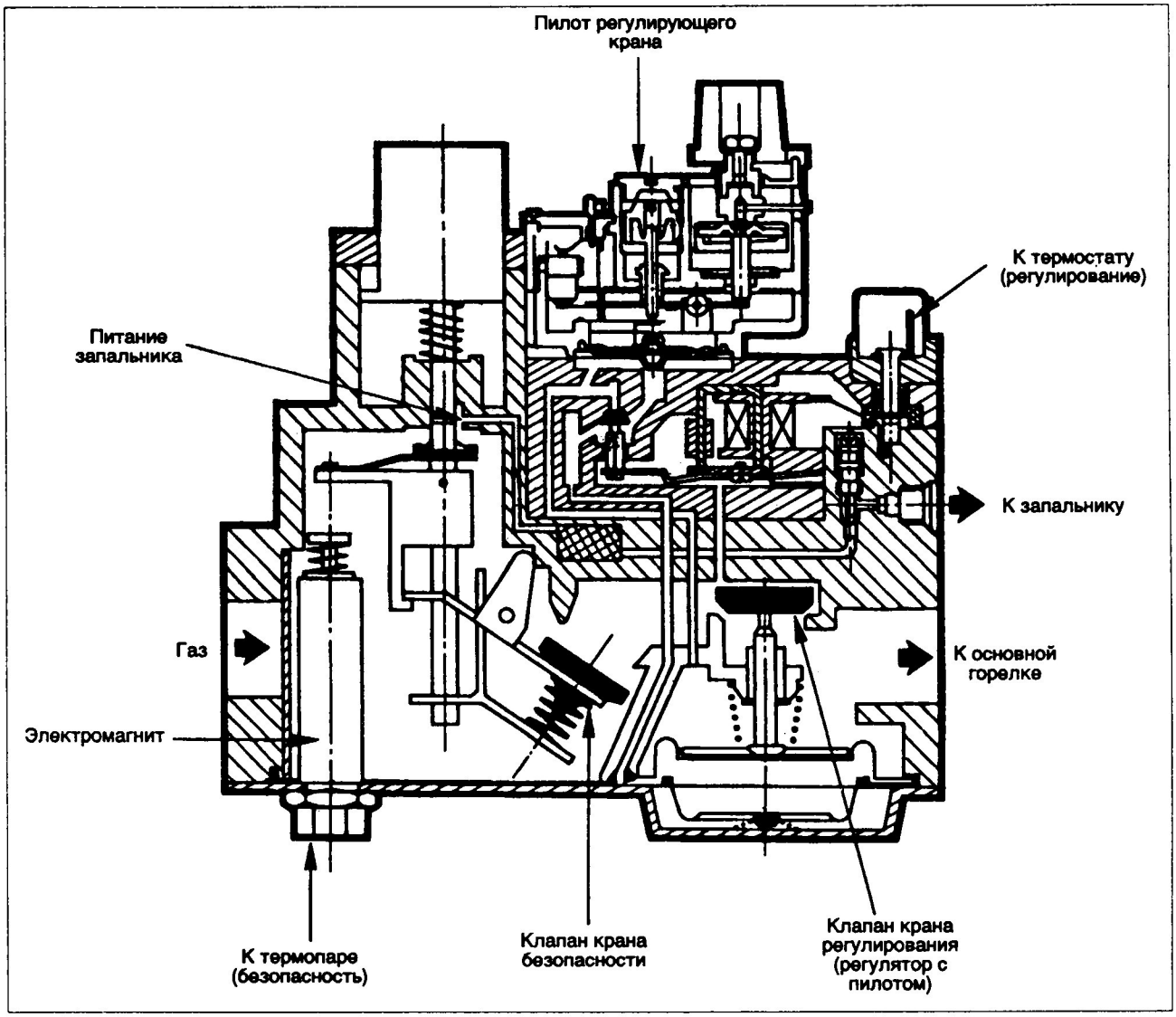
Для домашних котлов элементы ручного управления, устройства контроля давления (§ 8.3.5.2.) и исполнительные механизмы заключены в один компактный комбинированный блок (с. 705). Для горелок "моноблок", которые могут быть установлены на различных котлах, устройства управления, так же как и электронная часть управления устройства контроля, заключены в одном компактном блоке: коробка управления и безопасности (с. 705).

8.3.9. Заключение

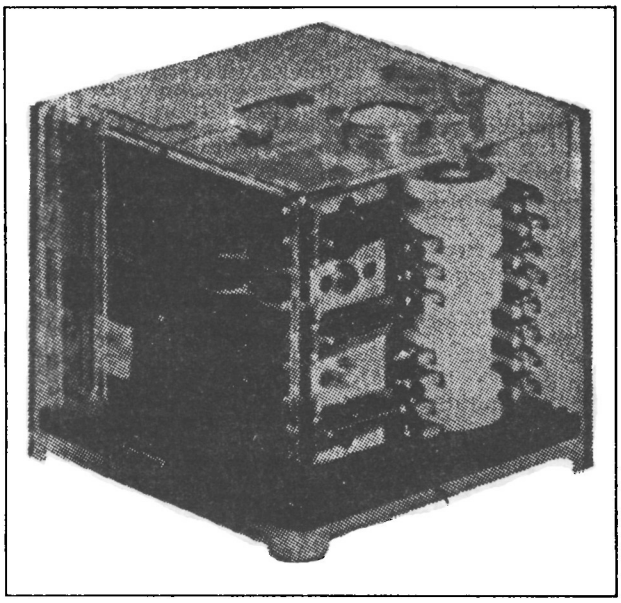
Какой бы ни была их конструкция, необходимо, чтобы системы управления и безопасности были надежны.

Это подразумевает, что ее логика не должна иметь ошибок и чтобы ее реализация не могла привести к нарушению этой логики в процессе эксплуатации.

Все возможные и неизбежные последствия поломки (аварий), таким образом, должны быть изучены. Это говорит о высоком качестве техники, которая должна иметь эта система.



Комбинированный блок для домового котла.



Коробка управления, безопасности и регулирования горелки средней мощности.

8.4. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ГАЗОВ

8.4.1. Общая часть

Работа газовой аппаратуры зависит от природы распределяемого газа и для того, чтобы получить удовлетворительную работу аппаратуры, необходимо, чтобы газ сжигался правильно, т.е.:

— пламя должно быть стабильно (не должно быть потухания, феномена отрыва, феномена проскока пламени на горелку);
— сжигание должно быть полным и гигиеничным (пламя не должно быть желтым, дающим отложения углерода, и не должно быть избытка окиси углерода);
— мощность должна соответствовать используемой горелке.

8.4.2. Число Воббе и три группы газов

Число Воббе имеет выражение:

$$W = \frac{\text{Высшая теплота сгорания}}{\sqrt{\text{плотность}}}.$$

Смысл этого числа состоит в том, что при равенстве прочих характеристик тепловая мощность горелки пропорциональна W, а первичная степень аэрации обратно пропорциональна ему.

Горючие газы делятся на три группы:

— первая группа W находится между 18 - 38 МДж/нм^3;
— вторая группа W – между 38 - 60 МДж/нм^3;
— третья группа W – между 75 - 92 МДж/нм^3.

Природный газ, относящийся ко второй группе, делится еще на 2 подгруппы:

— подгруппа L (называемая во Франции B) – W между 38 - 48 МДж/нм^3;
— подгруппа H, имеющая – W между 48 - 60 МДж/нм^3.

Первая группа соответствует старому городскому газу, который практически сейчас во Франции не распределяется.

Вторая группа соответствует прежде всего природному газу.

Третья группа соответствует пропану и бутану.

Проблема взаимозаменяемости касается прежде всего первой и второй групп.

8.4.3. Понятие взаимозаменяемости

Различные используемые газы отличаются по своему составу, в результате чего имеется изменение процесса горения и модификации.

Цель изучения взаимозаменяемости газов состоит в :

— с одной стороны, знать допустимые изменения газа (внутри одной группы);
— с другой стороны, предусмотреть, как улучшить недопустимую ситуацию – либо путем модификации горения используемого газа, либо воздействием на используемые аппараты.

Каждое явление может быть охарактеризовано индексом, рассчитанным, исходя из состава газа. Допустимый предел для каждого явления может быть, таким образом, выделен или может быть определен предельной величиной каждого индекса. Эта предельная величина была определена экспериментально на различных газах на газовой аппаратуре, представляющей реально весь парк аппаратов, находящихся в эксплуатации. С другой

Явление недопустимого сгорания	Индекс, характеризующий явление	Предельная величина
Погасание пламени	W – число Воббе C – потенциал горения	Кривая W = f(C) соответствует появлению феномена
Проскок пламени		Кривая W = f(C) соответствует $\frac{CO}{CO_2}$ = 0,01 (I группа)
Избыточное количество оксида углерода		$\frac{CO}{CO_2}$ = 0,02 (II группа)
Появление желтого пламени	I_j – "желтых точек" I_{ch} – индекс обугливания	$I_j \leq 210$ (II группа) $I_{ch} \leq 160$ (I группа)
Тепловая сверхмощность (повышенная тепловая мощность)	W – число Воббе	0,9 номинального теплового расхода

стороны, процесс горения также изменяется для одного и того же газа в зависимости от условий установки и использования аппаратов и, в особенности, в зависимости от регулирования горелки по расходу газа и первичного воздуха.

8.4.4. Как разрешить проблему взаимозаменяемости?

Классический метод "Deldourg Gaz de France" не учитывает параметры, связанные с реальными условиями установки и использования аппаратов, и особенности регулирования горелок, осуществляемыми часто неквалифицированным персоналом, особенно на старых аппаратах.

Новый метод, который учитывает эти параметры, развивался в течение десятков лет и в настоящее время может быть использован только для решения проблем взаимозаменяемости природных газов (практически единственные газы, распределяемые в настоящее время по трубопроводам во Франции), касающихся домашних аппаратов.

Таким образом, проблема взаимозаменяемости может быть рассмотрена следующим образом:

— для газов I группы: использование метода Delbourg – первая группа;

— для газов II группы: природный газ групп L и H: использование нового метода G.D.F.; другие газы (например, содержащие большое количество CO, H_2) – использование метода Delbourg – вторая группа.

8.4.4.1. Метод Delbourg

8.4.4.1.1. Принцип

Основная линия операционного процесса следующая:

— используется диаграмма взаимозаменяемости и предельные величины (рисунок с. 708);

— исходя из состава газа можно заменить его эквивалентным газом;

— рассчитывают величины индексов газов;

— наносят соответствующие точки этих индексов на диаграмму;

— если точка находится внутри диаграммы и если индексы газа меньше предельных величин, газ рассматривается как заменяемый эквивалентным;

— в противном случае необходимо модифицировать состав газа для того, чтобы он был заменяемый.

8.4.4.1.2. Индексы

Они рассчитываются на основании следующих формул:

— исправленный (скорректированный) индекс Воббе W':

$$W' = \frac{K_1 K_2 P.C.S.}{\sqrt{d}};$$

— потенциал горения C:

$$C = u\frac{H_2 + 0,7CO + 0,3CH_4 + V\Sigma a C_n H_m}{\sqrt{d}};$$

— индекс желтой точки – II группа

$$I_j = \frac{\Sigma jA}{\sqrt{d}}\left(1 - 0,418\frac{O_2}{P.C.S.}\right),$$

где P.C.S. выражается в МДж/нм³;

— углеродный индекс – первая группа

$$I_{ch} = \frac{1 + 0,01H_2 + 0,01CO}{\sqrt{d}}\Sigma bA\,(1 - 0,013O_2),$$

где

P.C.S. – высшая теплота сгорания, d – плотность,

K_1, K_2, u, V – см. рисунки с. 709,

A – процент каждого углеводорода после CH_4,

O_2 – в процентах,

a, b, j – дается в таблицах характеристик (с. 711).

8.4.4.2. Новый метод

Этот новый метод учитывает параметры, относящиеся как к газу, так и к парку аппаратов в их реальном состоянии функционирования. Он рассматривает только один газ с точки зрения взаимозаменяемости с приведенным газом. Но он дает каждому газу коэффициент, называемый индикатор взаимозаменяемости. Этот индикатор газа определяется по отношению к другому газу (например, к тому, который в настоящее время распределяется). Он дает характеристику вероятности того, что этот газ будет правильно сжигаться в парке, находящимся в эксплуатации. Он характеризует улучшение качества обслуживания реального парка, если будет распределяться новый газ.

Этот метод, сложный в общей виде, был применен к особому случаю природных газов и привел к очень простому методу, который заканчивался использованием двух кривых (одна кривая для группы H, вторая кривая – для группы L, с. 710), дающих изменение индикатора взаимозаменяемости газа в зависимости от индекса Воббе (в действительности один этот индекс достаточен для характеристики газа с необходимой точностью).

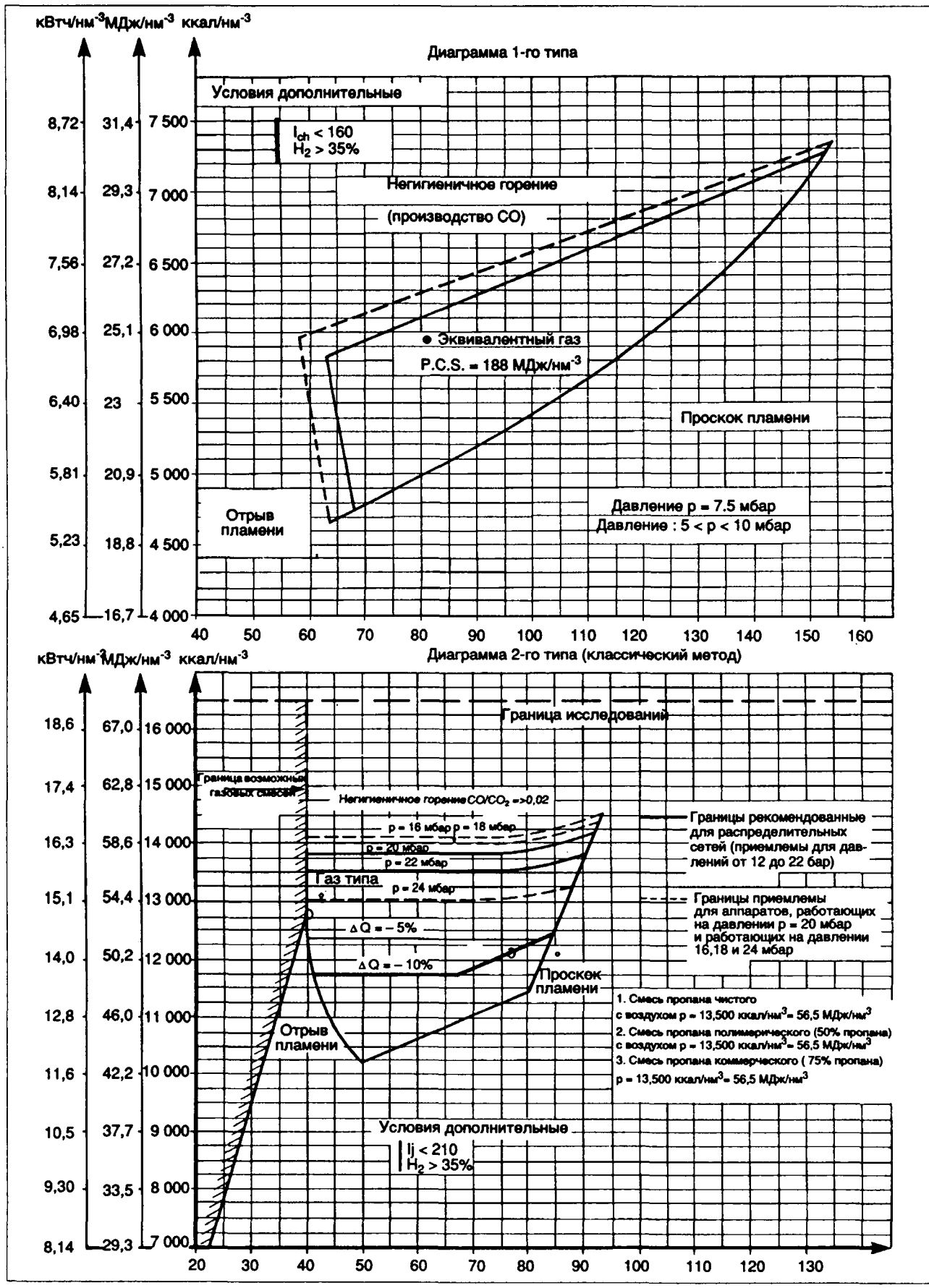
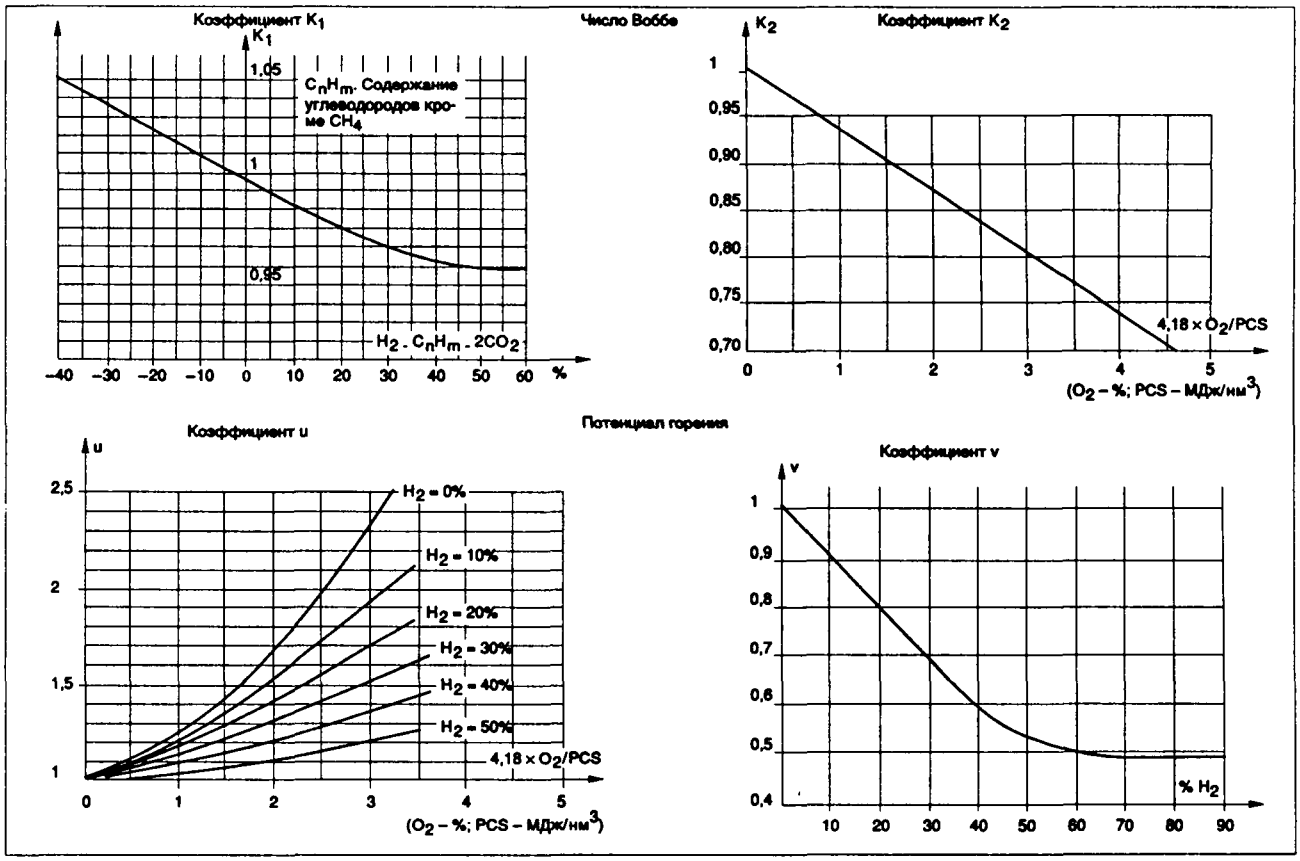
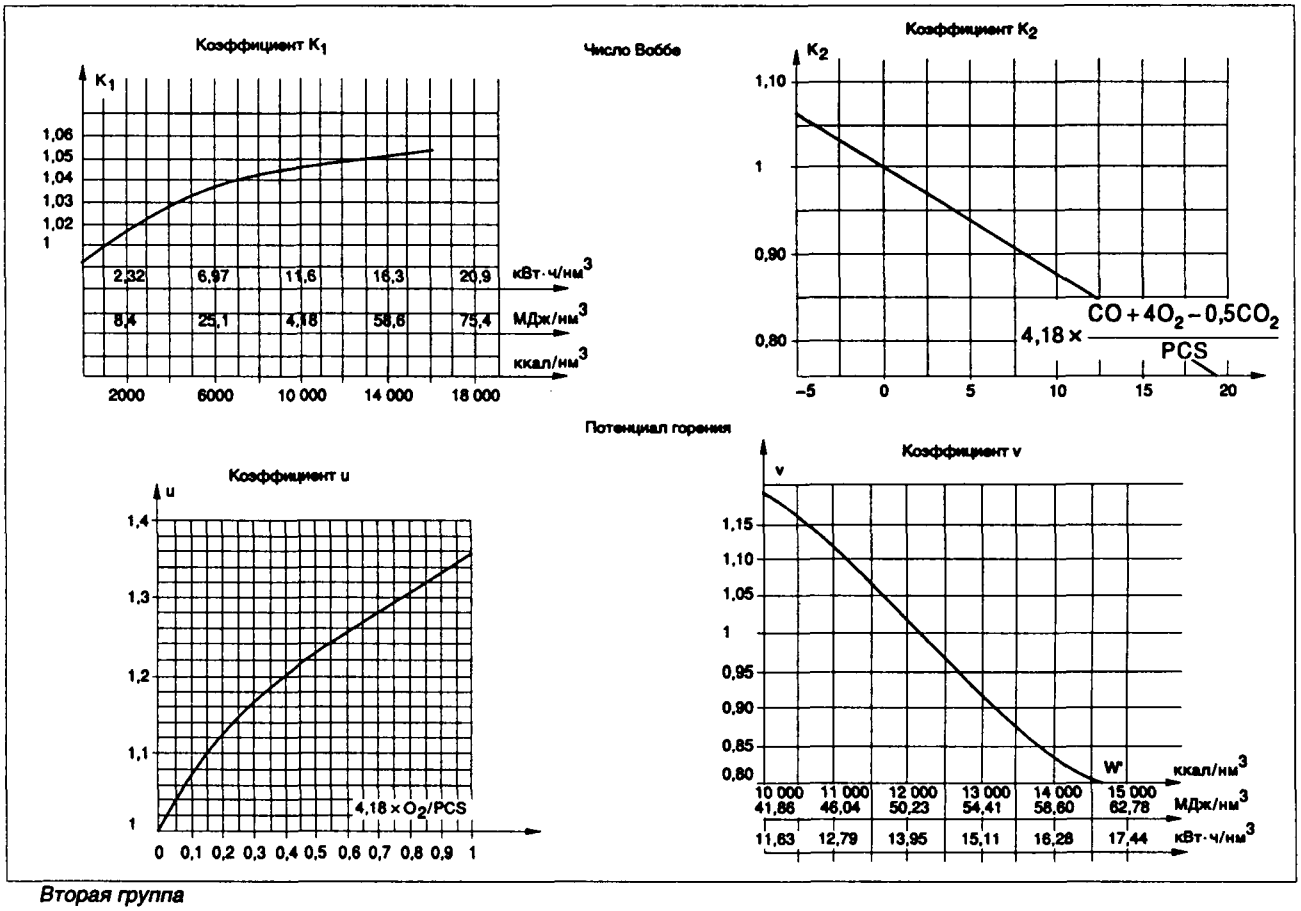


Диаграмма взаимозаменяемости

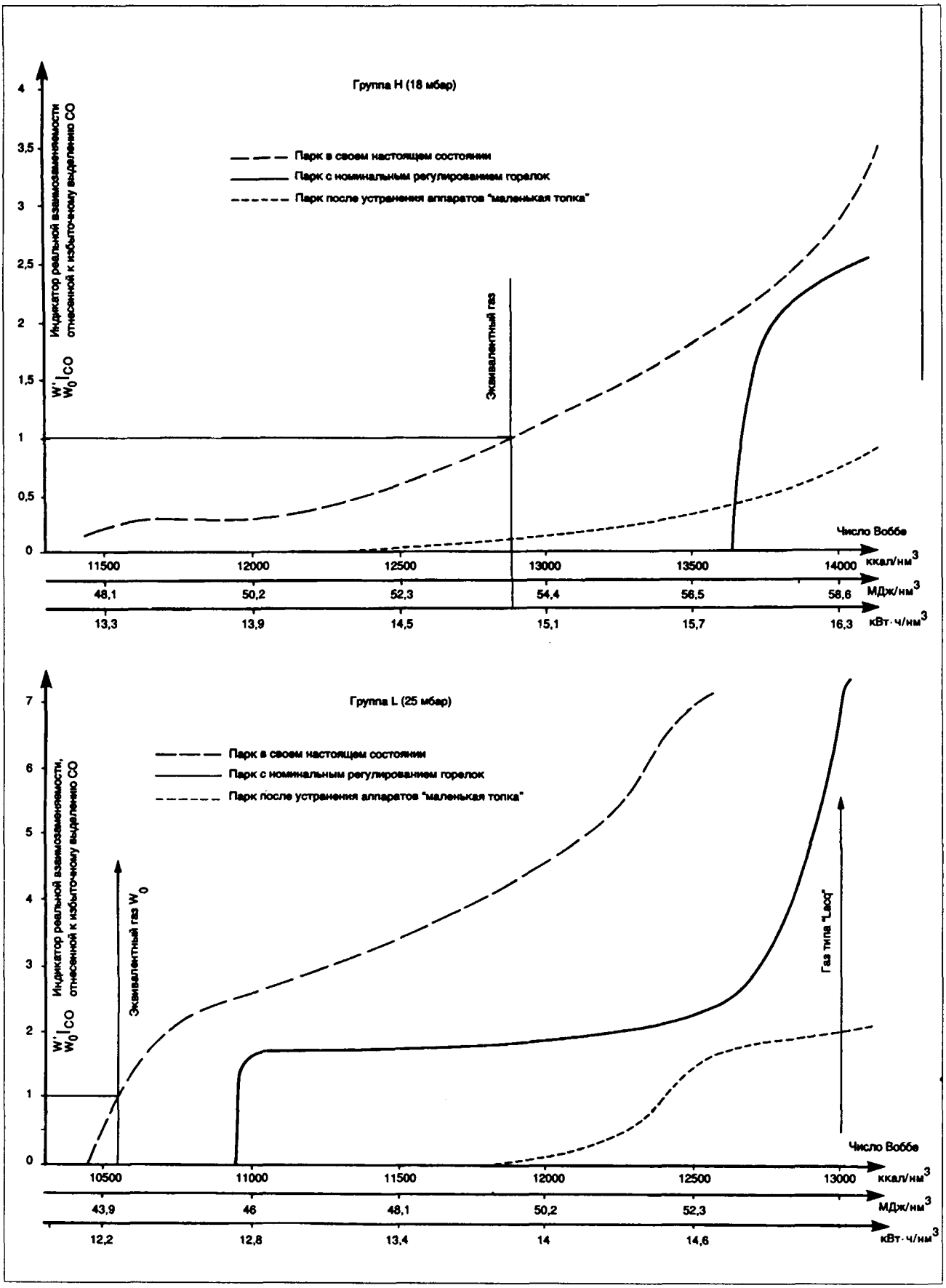
8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА



Первая группа



Вторая группа



Взаимозаменяемость природных газов (новый метод)

Газ		P. C. S., МДж/нм³	*d* – плотность	*a* – коэффициент потенциала горения	*j* – индекс "желтых точек"	*b* – индекс обугливания
Окись углерода	CO	12,64	0,967	–	0	–
Водород	H_2	12,77	0,070	–	0	–
Метан	CH_4	39,89	0,554	–	1	1
Этан	C_2H_6	70,57	1,049	0,95	2,85	2
Пропан	C_3H_8	101,9	1,562	0,95	4,80	3,60
н-Бутан	nC_4H_{10}	134,2	2,091	1,10	6,80	4,70
изо-Бутан	iC_4H_{10}	132,1	2,064	1,10	6,80	4,70
Пентан	C_5H_{12}	170,0	2,675	1,15	8,80	6
Гексан	C_6H_{14}	190,9	2,97	*	12	10
Гептан	C_7H_{16}	221,4	3,45	*	15	13
Ацетилен	C_2H_2	58,51	0,906	3	2,40	*
Этилен	C_2H_4	63,54	0,975	1,75	2,65	2,80
Пропилен	C_3H_6	93,88	1,481	1,25	4,80	6
Бутилен 1 - 2	nC_4H_8	121,6	1,937	1,50	6,80	7
изо-Бутилен	iC_4H_8	120,9	1,937	1,50	6,80	7
Бутадиен	C_4H_6	110,9	1,87	2,70	6,10	10
Бензол	C_6H_6	147,5	2,697	0,90	20	16
Толуол	C_7H_8	–		*	16	20
Азот	N_2	0	0,697	0	0	0
Двуокись углерода	CO_2	0	1,529	0	0	0
Кислород	O_2	0	1,105	0	0	0

* Величина не определена; применяют величину ближайшего по составу газа.

Характеристики различных используемых чистых газов для расчета взаимозаменяемости.

8.4.4.2.1. Принцип

Основная линия операционного процесса следующая:

— знать состав газа, распределяемого в настоящее время, и газа-"заменителя";

— рассчитать индекс Воббе (W) для каждого газа;

— определить на соответствующих кривых природного газа или H индикатор взаимозаменяемости для каждого из этих газов;

— подсчитать отношение этих индикаторов. Это отношение показывает эволюцию качества обслуживания парка (например, 1,5 – показывает, что распределение нового газа увеличит в 1,5 раза число приборов, которые при работе будут давать избыток окислов углерода) и позволяет, таким образом, судить может ли новых газ заменить старый или нет.

Примечание. Необходимо убедиться, что значения величин стабильности пламени, воспламеняемости, тепловой мощности находятся в различных пределах, и.е. индекс Воббе (W) равен:

— более 41.4 МДж/нм³ для природного газа группы L;

— более 49.3 МДж/нм³ для природного газа группы H.

Замечание. Старый метод позволяет четко отделить способность газа к взаимозаменяемости, фиксируя точный предел в области взаимозаменяемости. В действительности этот способ решения является произвольным, т.к. не учитывает реальные условия работы аппаратов и плюс к тому же обычно не учитываются (не соблюдаются) условия относительности на практике.

Очевидно, что газ тем менее взаимозаменяем, чем больше его характеристики отличаются от первоначального газа.

Новый метод позволяет не только рассчитать качество работы аппаратов в случае замены газа, но и распространить полученные результаты на существующий парк аппаратов.

Таким образом, зная состояние этого парка, метод позволяет установить каким образом улучшить работу аппаратов, если рассматриваемый газ определится как невзаимозаменяемый, – либо модифицируя парк, либо модифицируя регулировки аппаратов.

8.4.4.2.2. Пример применения

Замена природного газа группы L (W_1 = 44 МДж/нм³), распределяемого под давление 25 мбар, природным газом группы H (W_2 = 54 МДж/нм³), распределяемым под давлением 18 мбар.

График "группа L" показывает, что индикатор взаимозаменяемости должен быть умножен на семь, если замена прямая, но это недопустимо.

Номинальное регулирование "типа L" всех горелок не улучшает значительно ситуацию. Следовательно, необходимо заменить определенное число старых аппаратов (водонагреватель мощностью 8,72 кВт "маленькая топка").

Индикатор умножается на два. Это приводит к тому, что аппараты, имеющие регуляторы давления, будут иметь повышенную мощность на газе H.

Таким образом, необходимо новое регулирование аппаратов.

Осуществляют новое регулирование "типа H" горелок, имеющих регулятор давления.

График "группы H" показывает, таким образом, что индикатор взаимозаменяемости равен 0,1, что четко показывает улучшение ситуации по отношению к первоначальной.

На практике различные операции, касающиеся перехода от "L" к "H", осуществляются с использованием промежуточного газа, т.к. некоторые операции требуют определенного времени, в течение которого аппараты должны работать оптимально одновременно на газе типа "L" и типа "H".

Так как это обычно невозможно (заметим здесь, что определенные аппараты имеют специфическое оборудование для каждого газа), необходимо использовать газ, который находится выше предела газа "L" и ниже предела газа типа "H". Индекс Воббе этого газ W = 46,85 МДж/нм^3.

8.4.5. Список литературы

— Interchangeabilité des gaz. Collection des techniques gazières. A.T.G. Paris (1971), épuisé.

— P. Delbourg. – Indices d'interchangeabilite et caractéristiques d'utilisation des combustibles gazeux. 70e Congrès du gaz. A.T.G. Paris. (1953).

— H. Schneck et G. Brunet. – Nouvelles contrbutions aux problèmes posés par l'interchangeabilite gaz de lf deuxième famille. 80e Congrès du gaz. A.T.G. Paris (1963).

— Y. Deschamps. – Interchangeabilité des gaz appliquée au parc existant. 95e Congrès du gaz. A.T.G. Paris (1978) et 15e Congrès mondial du gaz, U.I.I.G., Lausanne (1982).

— Y. Deschamps. – Interchangeabilité des gaz naturels. Thèse. Université de Rouen (1981).

8.5. АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗА

8.5.1. Плита

8.5.1.1. Домашняя плита

8.5.1.1.1. Основы

8.5.1.1.1.1. Различные типы аппаратов

Гамма домашних плит включает следующие типы аппаратов:

— плита кухонная,

— настольная независимая плита,

— нагревательная печь,

— печь-гриль независимая.

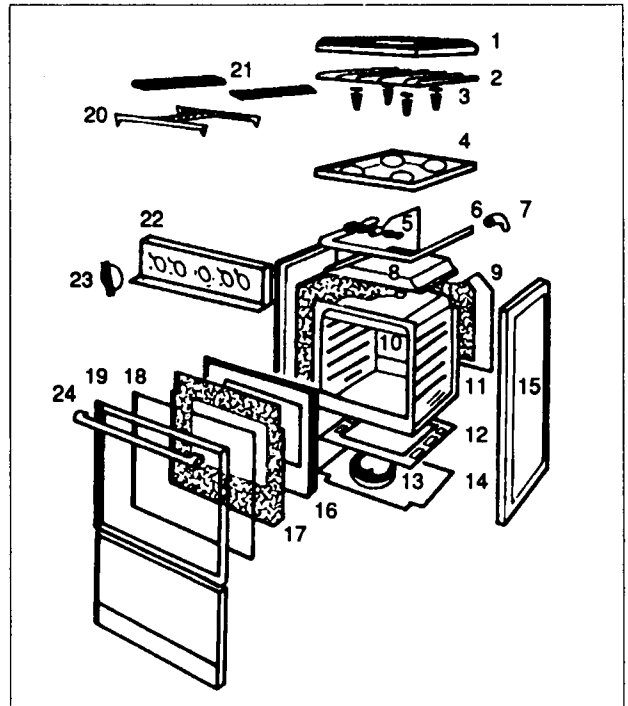
8.5.1.1.1.2. Основные элементы аппаратов

Чтобы ответить на разнообразные запросы кулинарии, выпускаемые аппараты по приготовлению пищи включают один, два или три следующих основных элемента:

— горизонтальный рабочий стол, расположенный над аппаратом;

— печь (духовка), расположенная под рабочим столом в случае нагревательной печи и кухонной плиты, или независимой плиты и входит обычно в общий аппарат "блок-плиты";

— решетка, часто входящая в печь.



1. Крышка
2. Опорная решетка
3. Горелка рабочего стола
4. Рабочий стол
5. Краны
6. Рампа подачи газа
7. Соединение подачи газа
8. Дно рабочего стола
9. Задняя стенка
10. Каркас духового шкафа
11. Утепление духового шкафа
12. Под духового шкафа
13. Горелка духового шкафа
14. Дно духового шкафа
15. Боковая стенка (левая/правая)
16. Вторая дверь духового шкафа
17. Изоляция двери духового шкафа
18. Стекло
19. Дверь духового шкафа
20. Горелка гриля
21. Элементы излучателя
22. Щиток
23. Ручка крана горелки
24. Ручка двери духового шкафа

Основные элементы кухонной плиты.

8.5.1.1.2. Рабочий стол

Рабочий стол включает следующие элементы:
— горелки из эмалированного чугуна или металлических сплавов, на которых нагреваемые сосуды подвергаются прямому воздействию пламени;
— при необходимости горелки накрываются крышкой, над которой устанавливаются нагреваемые сосуды;
— опорная решетка из эмалированной стали, хромированной или нержавеющей, либо из эмалированного чугуна;
— поддон чистоты, предназначенный собирать все, что случайно перельется;
— сеть трубопроводов снабжения, распределяющих газ по различным горелкам;
— краны со своими ручками.

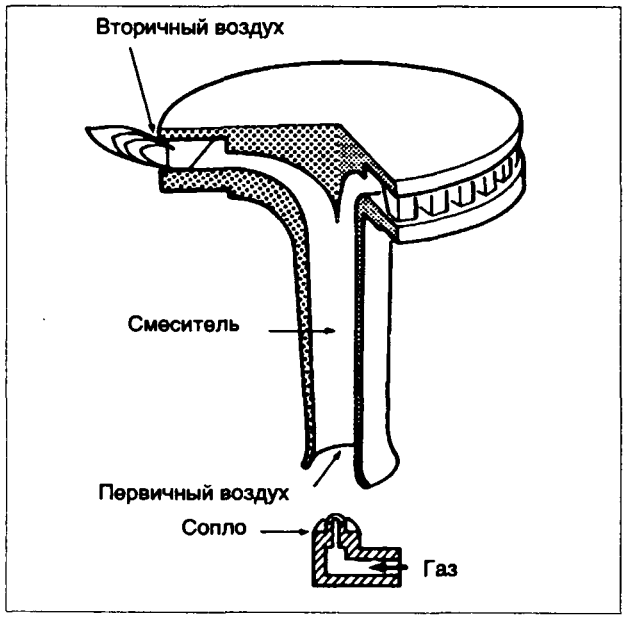
Другие диспозитивы при желании могут быть расположены на рабочем столе, например:
— крышка рабочего стола,
— приспособление зажигания,
— приспособление безопасности на случай погасания пламени.

8.5.1.1.2.1. Горелки

В основном горелки состоят из:
— сопла (инжектора), имеющего отверстие, сечение которого зависит от природы газа и мощности горелки;
— формирующего корпуса в виде трубки Вентури и корпуса смесителя, имеющего при необходимости устройство регулирования подачи первичного воздуха (кольцо или винт завихрения);
— головки или шляпки, обычно снимаемой, имеющей выходное сечение, состоящее из множества отверстий различной формы, где рождается пламя.

8.5.1.1.2.1.1. Горелка со стабилизирующимся пламенем

Выходное сечение горелки выполнено в виде щели постоянной ширины, расположенной в стенке с увеличивающейся снизу вверх толщиной.

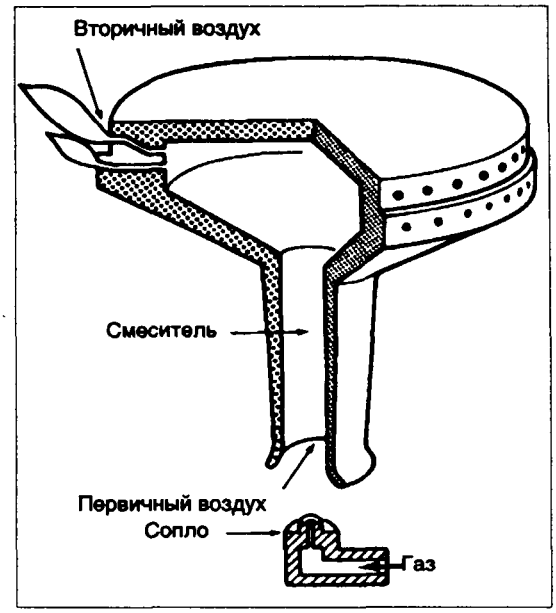


Максимальная глубина (толщина) стенки вверху создает такие потери давления при истечении через отверстие, что газо-воздушная смесь вытекает с небольшой скоростью на этом уровне и пламя горит стабильно.

Узость щели препятствует тем не менее проскоку пламени.

8.5.1.1.2.1.2. Горелка с пилотным пламенем

В этой горелке использование маленького кругового пламени, называемого пилотом, позволяет стабилизировать основание пламени основного отверстия, нагревая воздушную смесь, которая поступает в это место и увеличивает скорость горения.



8.5.1.1.2.1.3. Преимущества горелок со стабилизированным пламенем и с пилотом

Они позволяют сжечь все газы с помощью переделок или заменой простых деталей (сопло, регулятор воздуха). Выходное сечение таково, что позволяет избежать двух экстремальных явлений:
— проскока пламени и попадания пламени на сопло,
— отрыва пламени.

Улучшения в течение последних лет привели к этим типам горелок.
— Горелка пульсирующая (периодического действия). С целью улучшения приготовления кулинарных изделий, требующих невысокой температуры, как, например, томление (§ 8.5.1.2.3.1.);
— Горелка "turbo-zoom". Как и горелка периодического действия, она может работать либо с большой мощностью, либо с очень небольшой мощностью.

Величина очень небольшого расхода может быть получена с помощью прохода в выходном сечении газа и широкой головки горелки. Плюс к этому, в уменьшенном расходе, нагретый горячий газ более или менее разбавляется в воздухе, пульсирующем под головкой горелок.
— Горелка с системой зажигания и безопасности в одном корпусе.

Эти горелки, мощностью более 1,5 кВт, упрощают очистки и защищают от всех внешних опасностей свечу зажигания и термопару установки безопасности (§ 8.5.1.2.3.2.).

Рабочие характеристики, конструкция и в особенности мощность горелки должны соответствовать нормам NF32 - 321.

В действительности выделяется несколько типов горелок в зависимости от их мощности.

Тип горелки		Расход минимальный DN (кВт P. C. S.)
	Горелка вспомогательная	0,23 - 1,16
Основные горелки	полубыстрая	1,16 - 2,3
	быстрая	2,3 - 3,5
	сверхбыстрая	≥3,5

Чтобы осуществлять томление, основные горелки должны быть регулируемы в интервале 1/6 - 1/5 номинального расхода в зависимости от используемого газа.

8.5.1.1.3. Духовка (печь)

Духовка – это закрытое, изолированное пространство, предназначенное для жарения (приготовления пищи) путем подвода тепла с разных сторон.

8.5.1.1.3.1. Различные типы печей

Различают несколько типов печей.

8.5.1.1.3.1.1. Печь с естественной циркуляцией

— Печь с непрямым подогревом.

Горячие продукты сгорания, исходящие от горелки, расположенной в нижней части печи под поддоном, проходят вокруг жарочной камеры в двойной стенке без проникновения в камеру. Нагрев осуществляется в основном за счет радиации. Этот принцип почти не применяется в домашних духовых шкафах.

— Печь с прямым подогревом.

Горячие продукты сгорания проходят через духовку. Они проникают туда через равномерно расположенные отверстия либо в поддоне, либо в боковых стенках, прежде чем быть отведенными через отверстие в задней стенке, либо через короткий открытый патрубок на уровне рабочего стола, в случае кухонной плиты. Этот последний диспозитив позволяет избежать загрязнения и перегрева задней стенки аппарата и является лучшим решением.

8.5.1.1.3.1.2. Печь с принудительной циркуляцией.

Печь с вибрационным нагревом

Это печь прямого нагрева, горячие продукты сгорания пульсируют за счет действия турбины с целью получения равномерного распределения температур.

8.5.1.1.3.2. Общие характеристики горелок печей (духовых шкафов)

Горелки печей в основном составляют рамповые горелки голубого пламени, имеющие либо ряд отверстий, либо сплошную прорезь. Выполненные из чугуна или тонкой стали, они могут иметь различную форму в виде U, H или круга.

Расход горелок регулируется с целью получения температуры, необходимой для кулинарных изделий. Регулировка осуществляется либо вручную, либо термостатом.

Характеристики конструкции горелок и их работы должны удовлетворять требованиям норм NFD 32 - 321.

8.5.1.1.3.3. Печь, самоочищающаяся с помощью каталитических процессов

В этом процессе, специально примененном изготовителем, печь изнутри покрывается специальной эмалью, играющей роль катализатора разрушения жира. Операция происходит самопроизвольно при обычной температуре приготовления. Слой специальной эмали наносится на первичный слой обычной эмали. Не должны использоваться никакие абразивные и царапающие материалы для удаления возможных пятен и рекомендуется время от времени протереть холодные стенки влажной губкой.

Недостаток процесса состоит в том, что слой эмали разрушается и печь должна иметь стенки, которые можно демонтировать и заменить.

8.5.1.1.4. Гриль

Этот элемент предназначен для жарения за счет излучения. Он располагается обычно в верхней части печи и включает:

— горелку голубого пламени в форме круга или линейную с двумя или четырьмя рядами отверстий;

— излучающую поверхность, нагреваемую горелкой, представляющую собой плиту из ребристого чугуна или решетку из нержавеющей стали.

Может быть применен блок из излучающих горелок.

Горелка печи и гриля находятся в одном объеме и они не должны работать одновременно, кран управления часто общий.

8.5.1.1.5. Вспомогательная аппаратура

8.5.1.1.5.1. Краны

Каждая горелка должна управляться одним устройством, который осуществляет подачу и прекращение подачи газа; наиболее часто применяются поворотные краны с коническими пробками.

Полный расход осуществляется поворотом на 90°, и переход от полного расхода к уменьшенному осуществляется либо поворотом на 70°, либо на 120° (новые краны).

8.5.1.1.5.2. Термостат печи

В настоящее время применяется один тип термостата: речь идет о термостате с расширяющейся жидкостью.

В этом термостате чувствительный элемент представляет собой объем в форме луковицы, заполненной жидкостью, которая расширяется под воздействием температуры. Луковица соединена капилляром с деформируемой капсулой, встроенной в клапан.

8.5.1.1.5.3. Диспозитивы безопасности

Использование приспособлений безопасности зажигания и погасания по нормам не является обязательным для аппаратов приготовления пищи. Они рекомендуются для печей и панели открытого огня. Основной принцип действия – принцип термопары.

8.5.1.1.5.4. Приспособление автоматического зажигания

8.5.1.1.5.4.1. Запальник с прерывистой искрой высокой частоты

Этот тип запальника включает:

— генератор тока высокой частоты и свечи зажигания;
— кнопку-толкатель, нажатие на которую вызывает образование искры на конце каждой свечи.

8.5.1.1.5.4.2. Запальник с непрерывной искрой высокого напряжения

Этот запальник включает:

— трансформатор 110/220/6 000 V;
— блок сопротивлений, имеющий число выходов по числу свечей, который ограничивает интенсивность во вторичной обмотке трансформатора;
— электроды и командные устройства, которые позволяют получить сноп искр между массой горелки и электродом.

8.5.1.1.5.4.3. Запальник пьезоэлектрический

Принципиальное преимущество этого запальники, за исключением его повышенной себестоимости, состоит в отсутствии кабелей и электрических соединений в секторе. Воздействие на рычажок вызывают на кристаллах кварца давление, которое порождает электрическое напряжение и производит искру.

8.5.1.1.5.5. Устройство автоматического регулирования времени приготовления

Это устройство может быть применено к любой горелке, но в основном используется на горелках, установленных на печах, где приготовление пищи длится достаточно долго.

В соответствии с требуемой степенью совершенствования они могут состоять:

— либо из минутного отсекателя газа, регулирующего время остановки между 5 и 10 минутами и 60, 100 и 120 минутами;
— либо из программирующего механизма, способного регулировать время приготовления и момент начала работы.

Программирующий механизм оборудован часовым электрическим механизмом и может быть дополнен будильником (часами) и счетчиком минут со звонком. Они воздействуют на один или несколько электроклапанов.

8.5.1.2. Промышленные плиты

8.5.1.2.1. Общая часть

Профессиональное кухонное оборудование, конечно, используется в ресторанах и общепите, но также и на промежуточных объектах торговцев (колбасные (кафе), кулинария, пирожное и т.д.).

Разнообразные профессиональные потребности вызывают необходимость применения разнообразного оборудования; большая часть из него может быть оценена как традиционная с точки зрения существующей газовой техники, находящейся в эксплуатации и являющейся классической (§ 8.5.1.2.2.).

Однако в течение последних лет появляются новые и все более совершенные аппараты; они используют новую, все более совершенную эффективную газовую технику, которая все больше приближается к промышленной технике, с точки зрения систем управления (зажигание, контроль, регулирование) и коэффициента полезного действия.

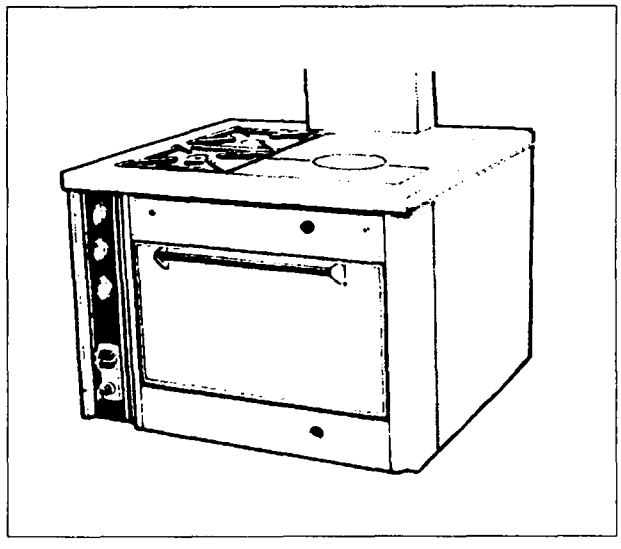
Большая часть аппаратов больших кухонь должна соответствовать нормам NF D 32-725 "Appareils de grande cuisire utilisant les combustibles gazeux". Эти нормы главным образом уточняют необходимость оборудования всех аппаратов в "общем корпусе" защитой от погасания пламени.

8.5.1.2.2. Основное традиционное газовое оборудование

8.5.1.2.2.1. Открытая горелка

Горелка обычно расположена под решеткой и нагревает непосредственно дно сосуда:

— мощность от 4 до 10 кВт;
— коэффициент полезного действия 0,5.



Аппарат, содержащий открытую горелку, закрытую жарочную поверхность и духовой шкаф.

8.5.1.2.2.2. Огневая плита или нагреваемая плита (жарочная плита)

Это – толстая металлическая плита из чугуна или стали, нагреваемая снизу и представляющая поверхность, на которой может находиться одновременно несколько сосудов для приготовления пищи (§ 8.5.1.2.2.1.):

— поверхность от 0,3 до 1 м^2,
— мощность от 7 до 15 кВт,
— коэффициент полезного действия – 0.4.

8.5.1.2.2.3. Печь

Закрытое пространство, осуществляющее приготовление пищи за счет конвекции и (или) радиации:

— объем от 0.1 до 0,2 м^3,
— мощность от 7 до 20 кВт,
— потребность энергии (потребление) – 30 Вт/дм^3.

Различают два типа печей.

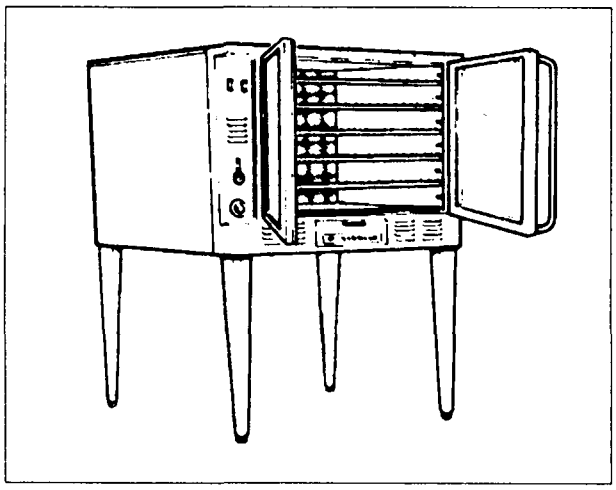
8.5.1.2.2.3.1. Печи статические

Передача тепла осуществляется одновременно путем радиации от внутренних стенок печи, естественной циркуляцией горячих продуктов сгорания (воздух или продукты сгорания) в объеме печи (рисунок с. 715).

8.5.1.2.2.3.2. Печи с пульсирующим воздухом

Жарочное пространство представляет собой герметичный шкаф по отношению к горелке и обогреваемый снаружи продуктами сгорания.

Передача тепла пище осуществляется прежде всего за счет вынужденной циркуляции горячего воздуха, который перемещается турбиной, расположенной в объеме плиты.



Печь с пульсирующим воздухом.

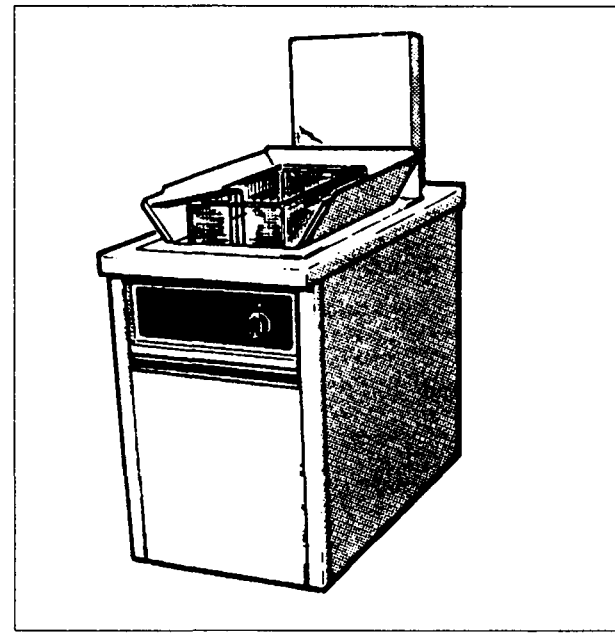
8.5.1.2.2.4. Жарочная (жаровня)

Аппарат содержит бак масла или жира, нагрев осуществляется:

— либо погружными трубами, в которых происходит горение (развитие пламени),
— либо в наружной камере горения.

Практически все жаровни находятся в "холодной зоне", что значит, что они оборудованы системой рекуперации; в нижней части зона более низких температур, чем в бане, в которую поступают отходы от жарения:

— объем от 10 до 50 литров масла,
— мощность от 12 до 60 кВт,
— производство от 20 до 100 кг/ч (картошка).

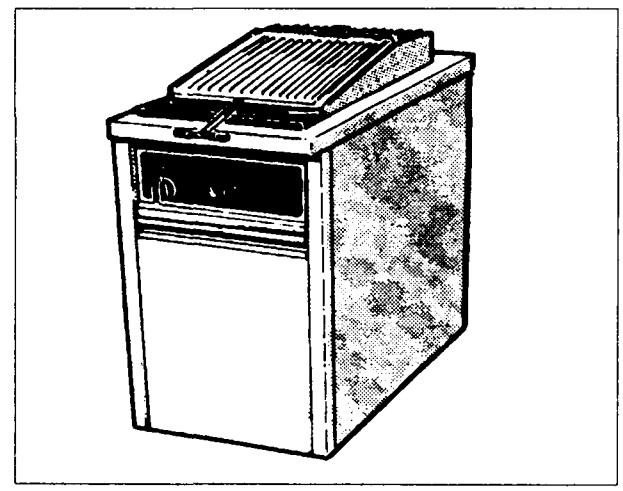


Жарочная (жаровня).

8.5.1.2.2.5. Жарочные решетки

Плита гладкая или оребренная из чугуна или армированной стали, нагреваемая снизу и предназначенная для приготовления пищи прямым контактом:

— поверхность от 0,25 до 0,5 м^2;
— мощность от 10 до 20 кВт.

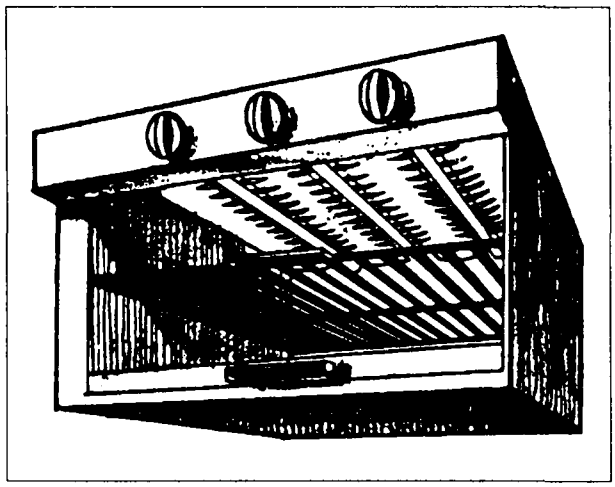


Жарочная решетка.

8.5.1.2.2.6. Саламандра

Открытый объем (ящик) со сводом из горелок инфракрасного горения:

— полезная площадь от 0,2 до 0,4 м²;
— мощность от 10 до 30 кВт.



Саламандра.

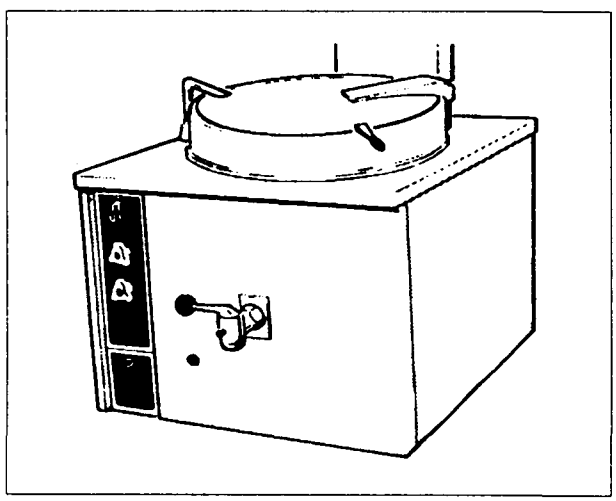
8.5.1.2.2.7. Мармит

Аппарат содержит глубокий бак в форме цилиндра или параллелепипеда, неподвижного или переворачивающегося; обсрудован крышкой и подогреваемый снизу:

— объем от 50 до 400 литров,
— мощность от 12 до 40 кВт.

Различают:

— мармит прямого нагрева, бак нагревается непосредственно горелкой и позволяет любое приготовление в воде;
— мармит-баня – бак, имеющий двойную оболочку, содержащую воду и защищенную предохранительным клапаном безопасности. Это оборудование позволяет готовить блюда, которые могут подгорать (крем, молочные и т.д.).



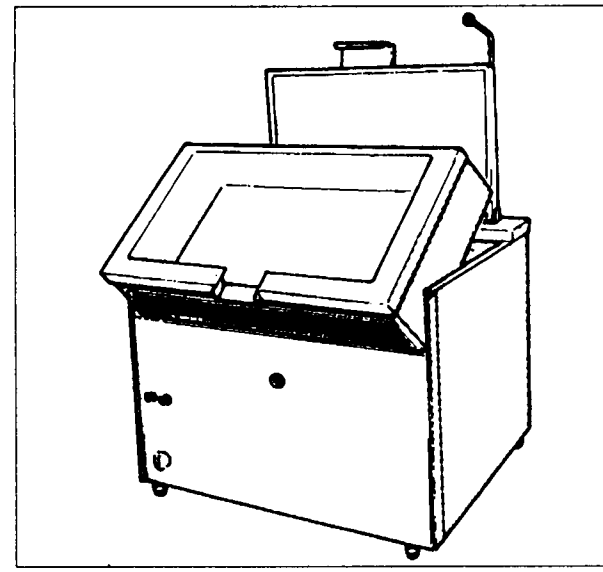
Мармит

8.5.1.2.2.8. Аппарат для жарки в масле (Sautense)

Аппарат имеет неглубокий бак в виде параллелепипеда, с тонким дном из биметалла, обычно переворачиваемый и нагреваемый снизу:

— поверхность дна 0,3 - 0,5 м²;
— мощность от 10 до 25 кВт.

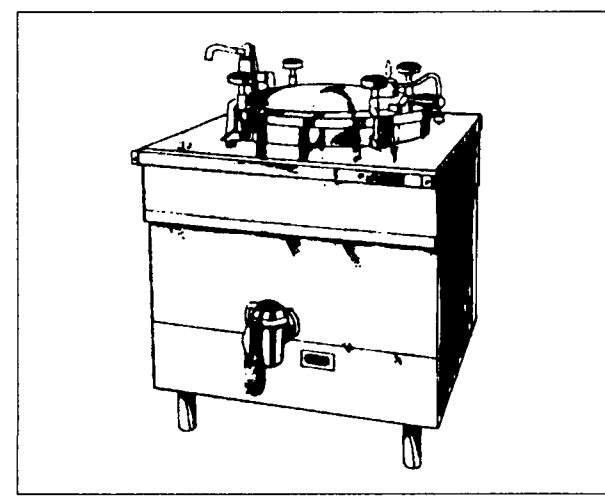
Область применения аппарата очень разнообразна: тушение, жарение, яичница, в основном – жарение.



Аппарат для жарки в масле (Sautense).

8.5.1.2.2.9. Мармит-автоклав

Мармит оборудован крышкой на шарнире, закрываемой герметично с помощью винта. Мармит-автоклав позволяет готовить пищу под небольшим давлением паров порядка 50 мбар.



Мармит-автоклав.

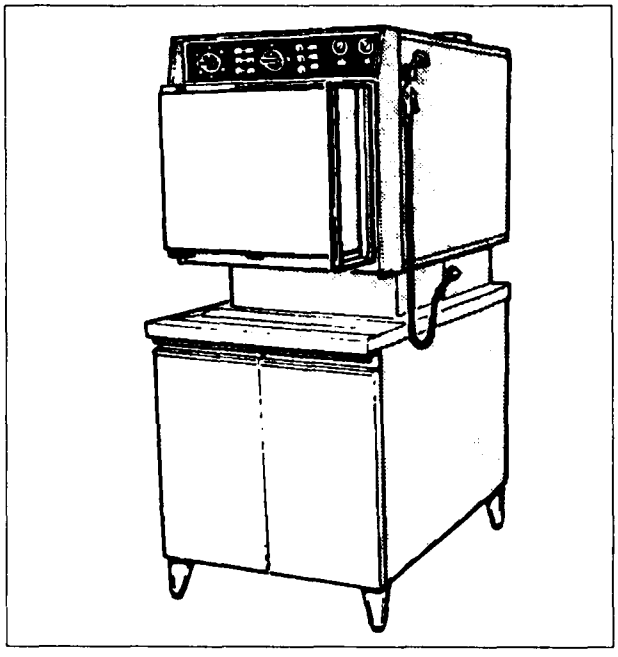
8.5.1.2.2.10. Пароварка

Аппарат, содержащий одно или два варочных отделения (камеры), снабжаемые паром от одного или двух котлов, встроенных в аппарат:

— объем камер – 50 - 160 литров;
— мощность генератора – 15 - 50 кВт;
— давление в варочных камерах – 1 - 2 атм.

В некоторых случаях аппарат попадает под действие правил для аппаратов, работающих под давлением паров.

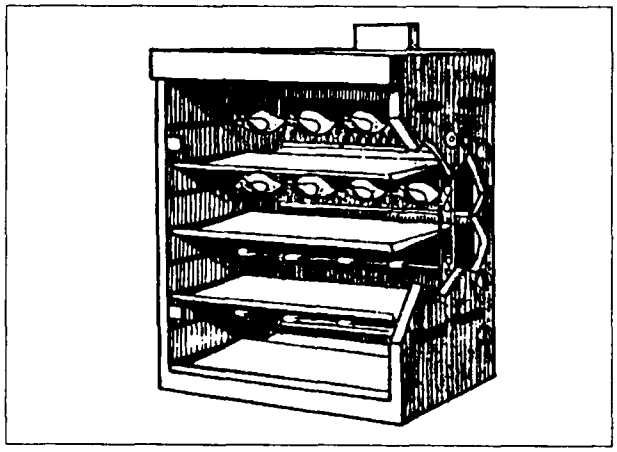
Приготовление пищи на пару является более быстрым, чем на воде; кроме того, парообработка не вымывает соли из продуктов.



Пароварка.

8.5.1.2.2.11. Жарочный шкаф

Шкаф, открытый с фасада и имеющий обычно застекленные дверки. На задней стенке расположены вертикально газовые инфракрасные горелки. Продукты для жарения нанизаны на шампуры, которые приводятся обычно в действие мотором, вращающим их перед горелками.

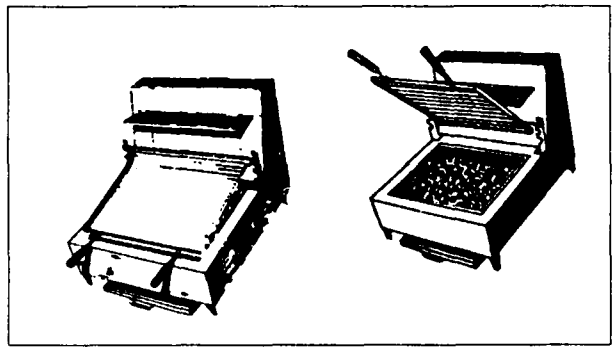


Жарочный шкаф.

8.5.1.2.2.12. Мангал
(гриль со светящимися камнями)

Он состоит из решетки, расположенной над слоем камней-отражателей, светящихся, имитирующих угли и нагреваемых докрасна живым пламенем серии горелок:

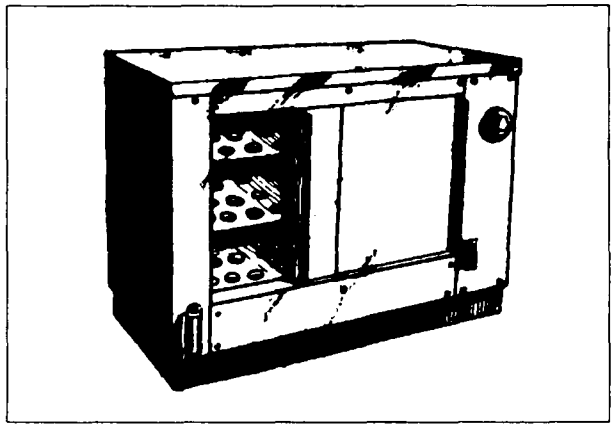
— поверхность полезная: 0,1 - 0,5 м^2,
— мощность: 10 - 50 кВт.



Мангал.

8.5.1.2.2.13. Камера-стол
для разогрева продуктов

Камера представляет собой ящик, внутренность которого нагревается одной или несколькими горелками, расположенными внизу. Стол для подогрева имеет одну или несколько горелок, нагревающих его снизу. Мощность камеры-стола менее или равна 10 кВт.



Камера-стол для разогрева продуктов.

8.5.1.2.2.14. Оборудование для кафетерия

8.5.1.2.2.14.1. Машина экспресс-кофе

Аппарат содержит кипятильник, обогреваемый газовой горелкой, и один или несколько фильтров, каждый из которых может содержать дозу молотого кофе для одной или нескольких чашек кофе.

8.5.1.2.2.14.2. Кипятильник для кофе

Он состоит из двух раздельных частей и двух диспозитивов нагрева:

— один, содержащий воду кипятильника (кипяток),
— второй, для поддержания в горячем виде и подогрева кофе, содержащегося в баке.

8.5.1.2.3. Современная газовая техника

8.5.1.2.3.1. Пульсирующая горелка

Система горелки, работающей прерывисто с частотой, выбранной эксплуатационником (от 5 до 100% времени цикла в зависимости от блюда), внутри предварительно установленного цикла от 30 сек [1] до 6 мин, в соответствии с инерцией оборудования.

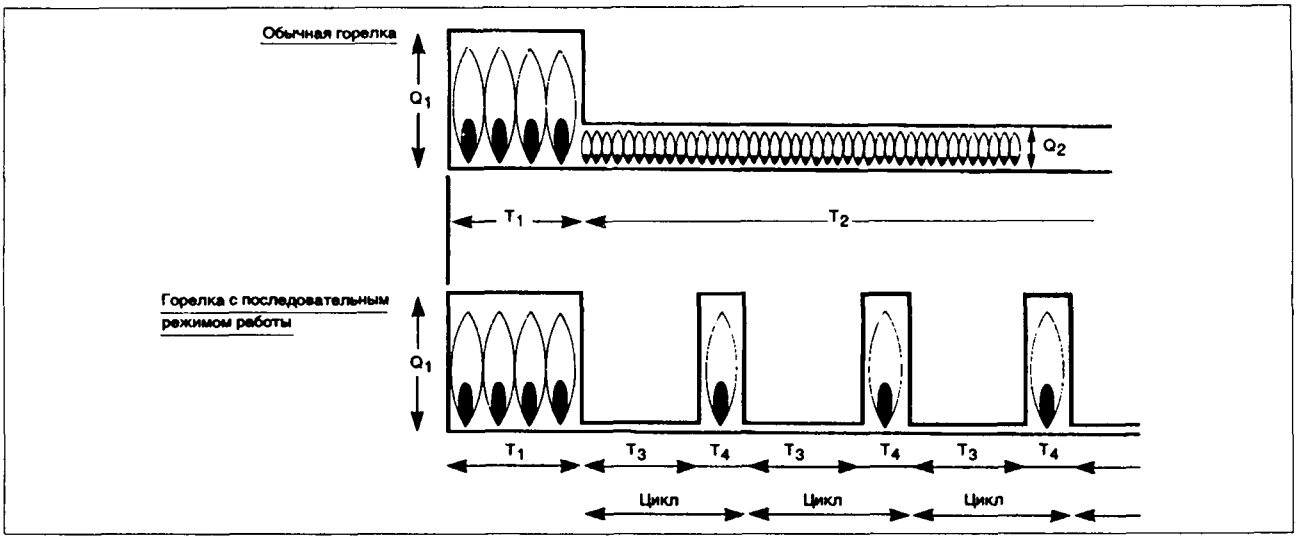
[1] для открытой горелки.

По сравнению с обычной горелкой пульсирующая имеет:

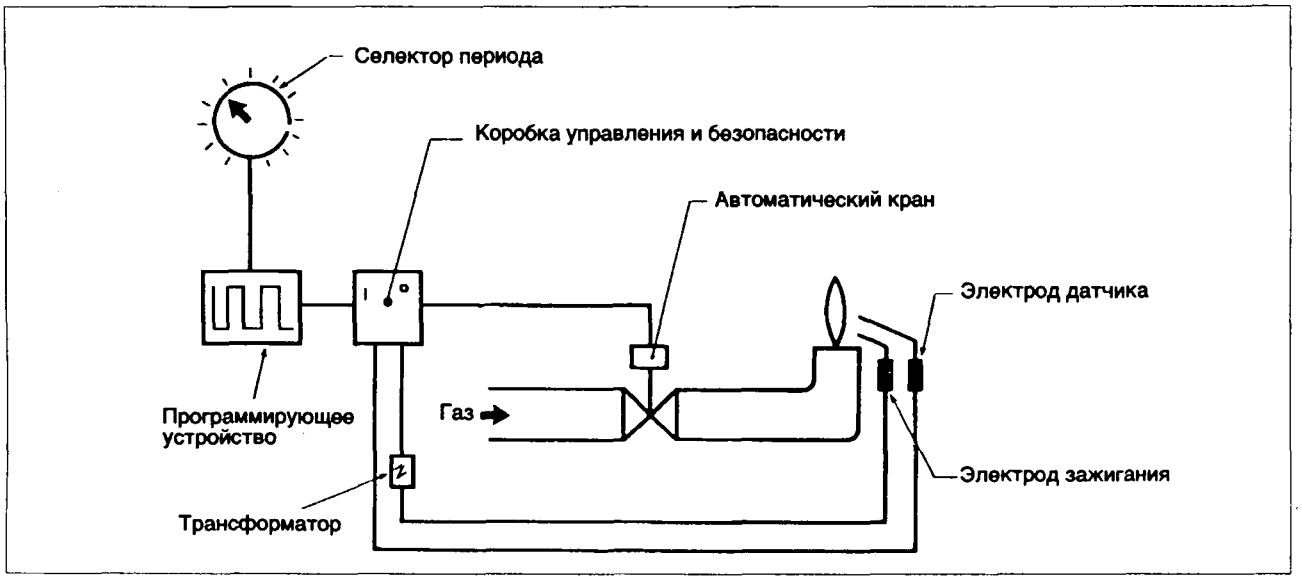
— очень гибкую работу без риска подгорания за счет широкого интервала регулирования от 5 до 100% номинальной мощности (против 20 - 100% для традиционных горелок);
— экономию энергии от 25 до 50% в зависимости от блюда;
— незначительную "потерю веса" – от 5 до 30%.

Зажигание, контроль и безопасность осуществляются автоматически. Система пульсирования была использована с успехом в основных аппаратах: открытые горелки, мармиты, жаровни и т.д., которые до сих пор были трудны в регулировке.

С другой стороны, улучшаются условия передачи тепла (результат диффузии тепла в дне сосуда в период остановки горелки), мармит прямого нагрева может также, например, заменяться мармитом непрямого обогрева (баня-мармит).



Пульсирующая горелка: принцип действия.



Пульсирующая горелка: пример монтажа.

8.5.1.2.3.2. Горелка открытого пламени с системами зажигания и безопасности в одном корпусе

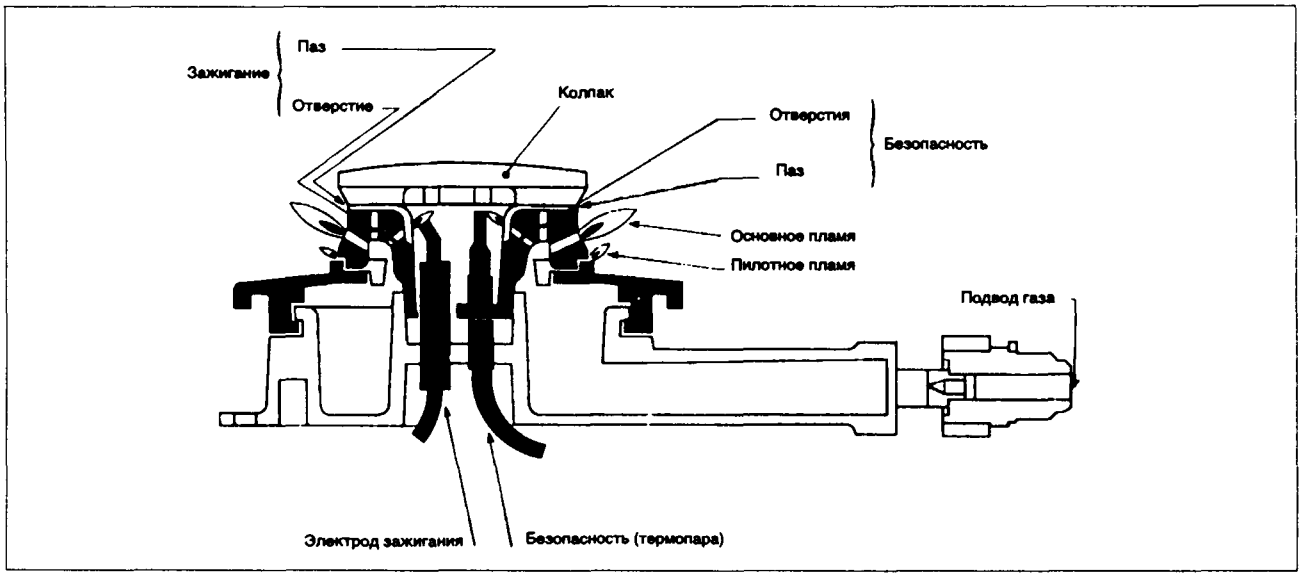
Горелка открытого пламени с системами автоматического поджига и встроенной безопасности обеспечивает защиту от риска разрегулирования и поломки: электрод запальника и детектор пламени, расположенные в центральном отверстии, снабженном колпачком; они таким образом эффективно защищены от наружного негативного воздействия, в то время как в обычных горелках они расположены снаружи горелки и могут быть повреждены при работе и даже выйти из строя при последующей очистке (изменение первоначального положения, поломка) или при случайном опрокидывании:

— мощность – 3 - 10 кВт.

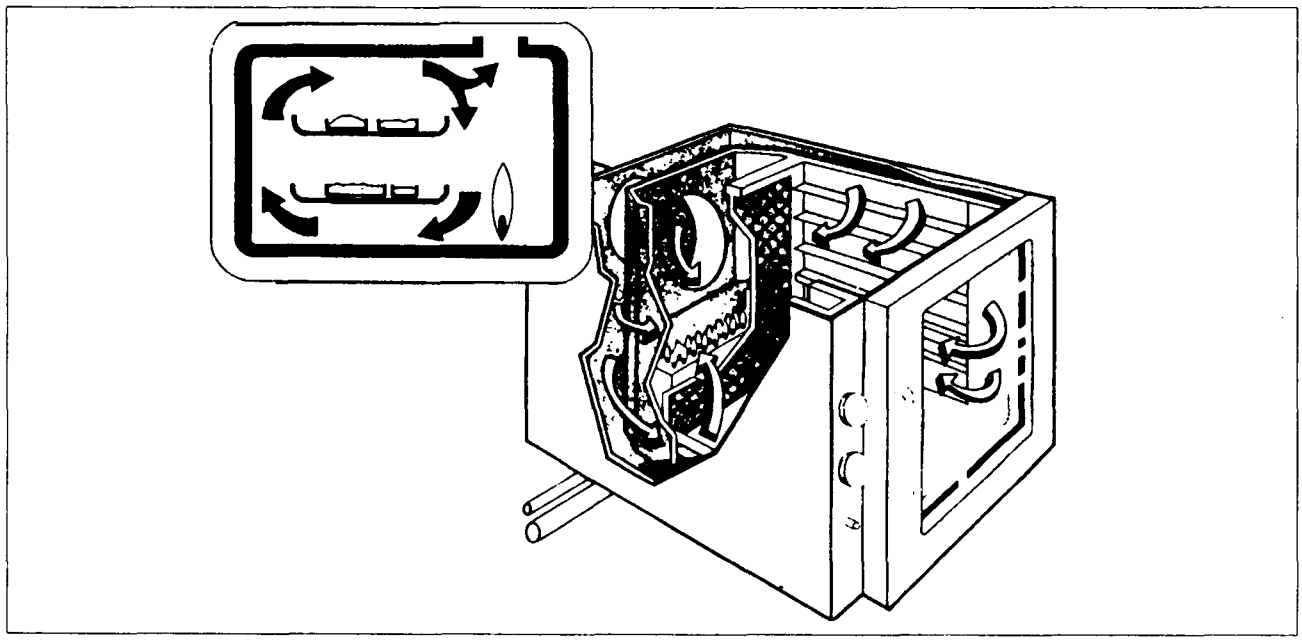
Замечание: Их применение при прерывистом функционировании позволяет разрешить проблему обслуживания электродов на пульсирующих горелках открытого пламени.

8.5.1.2.3.3. Печь с принудительной конвекцией прямого газового обогрева

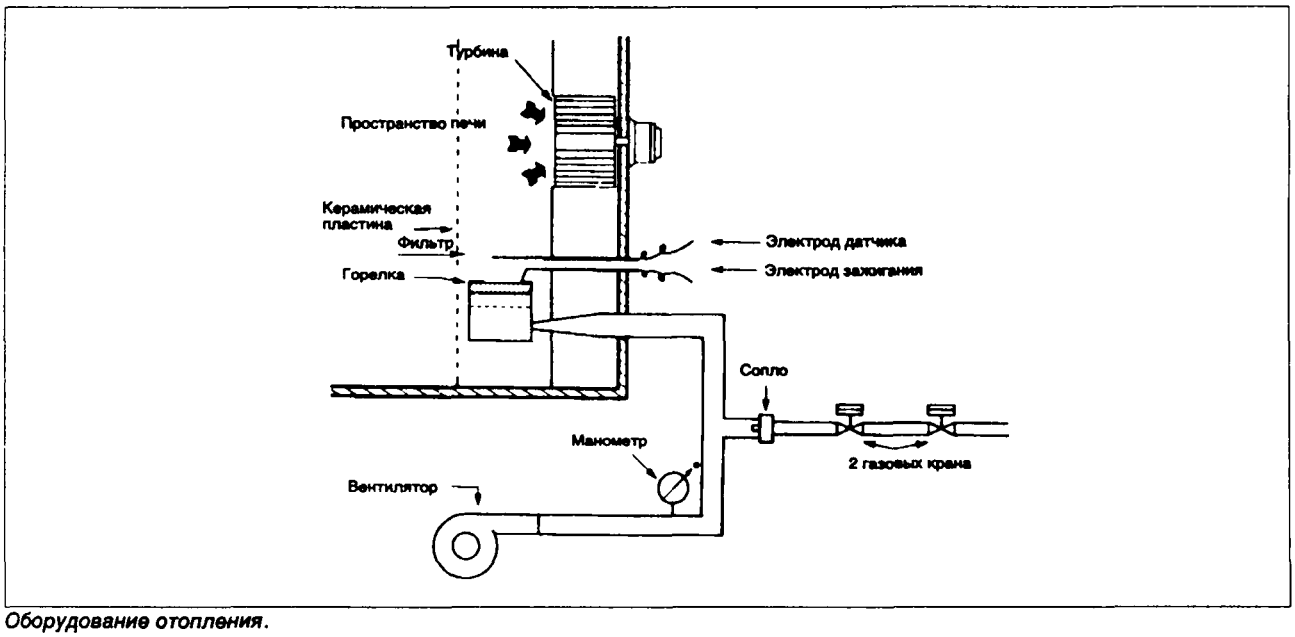
Печь с принудительной конвекцией (атмосфера циркулирует за счет работы турбины), горелка которой расположена прямо в корпусе печи.



Горелка с системой зажигания и безопасности в одном корпусе.



Печь с принудительной конвекцией и прямым _газовым обогревом.



Оборудование отопления.

Трудности, связанные с присутствием газа, циркулирующего в корпусе и соприкасающегося с пламенем (действующем на стабильность пламени), преодолеваются применением смесительной горелки полного предварительного смешения, имеющей мелкие выходные отверстия для пламени (керамическая перфорированная панель с отверстиями $\varnothing \approx 1$ мм).

Зажигание, контроль и безопасность осуществляются автоматически.

Мощность горелок от 20 до 40 кВт и более (печь хлебопекарная $N \simeq 100$ кВт).

Кроме преимуществ печи с пульсирующим воздухом (обогрев непрямой), усиленная передача тепла вынужденной конвекцией, равномерное распределение температур в корпусе печи – прямой обогрев позволяет получить:

— быстрый подъем температур (менее 10 минут);
— экономия энергии около 50% (регулирование избытка воздуха и температуры уходящих продуктов сгорания, меньше энергии, чем с теплообменником).

Замечание: Существуют также печи с принудительной конвекцией и прямого обогрева, оборудованные атмосферными горелками. Они расположены таким образом, что их работа не нарушается струями воздуха, подаваемыми турбиной. Эта техника, очевидно, менее совершенна, чем описанная выше.

8.5.2. Производство горячей воды на отопление и санитарное водоснабжение

8.5.2.1. Общая часть

8.5.2.1.1. Введение

Отопление (для жителей страны с холодным климатом) и горячая санитарная вода являются двумя основными потребностями всей деятельности человечества. Потребности в данный момент хорошо известны, т.к. они связаны с предельными потребностями комфорта индивидуума. В некоторых случаях, как в отоплении, они даже регламентированы. Изменения потребностей во времени менее известны. Они зависят в значительной степени от индивидуальных факторов (занимаемая площадь) или климата (наружная температура, солнечная ориентация) и не могут быть определены иначе, чем статистическим способом. Эти два типа данных, мгновенных и зависимых от времени, необходимы, чтобы определить полностью (мощность, отопительные приборы, регулирование и т.д.) системы отопления или нагрева воды для санитарных нужд.

8.5.2.1.2. Отопление

8.5.2.1.2.1. Выражение комфорта

Цель отопления – сделать условия жизни в жилище приятными, если наружные условия неблагоприятны.

Чтобы избежать потерь энергии, регламент предписывает, что температура воздуха в помещении не должна превышать 19°C. Температура воздуха не является единственным критерием комфорта; тип отопления (горячая вода или горячий воздух), тип нагревательных приборов (радиатор, конвектор, отопительные панели, приток теплого воздуха) также влияют , особенно на распределение температуры внутри помещения. Использование горячего воздуха как теплоносителя требует точного контроля скорости воздуха.

8.5.2.1.2.2. Потребности в тепле

8.5.2.1.2.2.1. Потребности мгновенные (единовременные)

Если учитывать только влияние наружной температуры, мгновенные потребности в тепле

выразятся уравнением:

$$Q_j = GV(\theta_c - \theta_b)$$

где

V – объем помещения, м³;

θ_c – установленная внутренняя температура, °C;

θ_b – базовая наружная температура (температура 2% риска), °C;

G – удельная объемная тепловая характеристика здания, Вт · м$^{-3}$ · K^{-1}.

Коэффициент G, который учитывает передачу тепла через стену и вентиляцию воздуха, составляет от 0,7 до 1,0.

С учетом солнечной ориентации коэффициент G заменяется на коэффициент B, который составляет порядка 0,5 - 0,75,

$$Q_j = BV(\theta_c - \theta_b)$$

8.5.2.1.2.2.2. Годовые потребности

Годовые потребности в тепле определяются из выражения:

$$Q_a = B \cdot V \cdot DH - Q_{ECS}$$

где:

B – удельная тепловая характеристика, определенная выше;

V – объем квартиры (здания);

DH – число градусов-часов, определенных из выражения

$$DH = \sum_{год} (\theta_{ch} - \theta_{bh})$$

где: θ_{ch} и θ_{bh} – среднечасовая температура.

В зависимости от района DH изменяется от 37 000 до 63 000 градусов-часов.

$Q_{E.C.S.}$ – количество тепла, полученное горячей санитарной водой.

Можно определить годовое потребление с помощью уравнения:

$$C = \frac{Q_a}{\eta}$$

где η – средний коэффициент полезного действия установки отопления. η – обычно близко к 0,58.

8.5.2.1.3. Горячая санитарная вода

8.5.2.1.3.1. Использование

Горячая вода в доме используется для двух целей: мытье (посуды, белья и т.д.) и для гигиенических целей.

На кухнях горячая домашняя вода используется для удаления жира и мытья посуды. Удаление жира требует температуры 60°C. Текущее мытье посуды требует температуры более низкой, порядка 40°C. Машины для мойки посуды, применяемые часто в общественных установках, требуют температуры выше – порядка 65 - 70°C.

В ванной комнате речь идет прежде всего о снабжении душа и ванной, температура порядка 40°C вполне достаточна. Машина стирки белья снабжается горячей водой с температурой порядка 85°C.

8.5.2.1.3.2. Потребности

8.5.2.1.3.2.1. Потребности различных абонентов

Каждое направление использования требует определенного объема и расхода.

В таблице даются данные различных направлений использования горячей воды

Использование		Температура, °C	Расход, л/мин	Потребление, литр
Кухня	Кран	60	5	5
	Машина мытья посуды	65 - 70	5	30 - 60
Ванная комната	Раковина	40	5	12
	Биде	40	5	12
	Ванна	40	10	130
	Душ	40	10	25
	Машина стирки белья	80 - 85	10	15 - 20

8.5.2.1.3.2.2. Дневное потребление

Потребности в горячей воде изменяются в течение дня. Максимум приходится на 8 ч (туалет), между 11 и 13 (кухня), около 17 ч (туалет), между 17 - 20 ч (кухня) и в 21 ч (туалет для семей с детьми). Дневной объем потребляемой горячей воды составляет порядка 150 литров для квартиры типа F 3, но величина очень меняется. Замеры, произведенные при анкетировании, показали, что колебание потребления ±100% по отношению к средней величине.

8.5.2.1.3.2.3. Необходимая мощность

Надо чтобы аппарат по производству горячей воды обеспечивал потребности, как минимум, наиболее крупного потребителя, которым является ванная. Нежелательно, чтобы аппарат имел очень большую мощность, т.к. это приводит к тому, что он работает в режиме выше оптимального, что приводит к снижению коэффициента полезного действия, за исключением случая использования аппарата, производящего горячую воду конденсированием паровой фазы.

Во Франции полезная мощность в 22,6 кВт считается комфортной мощностью, позволяющей поднять с 15°C (средняя температура холодной воды) до 60°C. 7,2 литров воды в минуту.

8.5.2.1.3.2.4. Постоянство подачи

Горячая вода для санитарных целей может производиться:

— постоянно работающим аппаратом или с аккумулятором;
— аппаратом независимым или аппаратом смешанным, осуществляющим отопление и производство горячей воды для санитарных целей.

Если выбирается решение с аккумулятором, лучше всего (необходимо) обеспечить постоянство подачи горячей воды, т.е. возможность соединения потребителей в последовательную цепь. Это ведет к увеличению объема хранимой аварийной воды.

8.5.2.1.3.2.5. Увеличение нагрузки

Если один аппарат подает горячую воду в несколько домов, установленная мощность не равна сумме индивидуальных мощностей. Она определяется из соотношения:

$$P = F(N) \times \sum_{i=1}^{i=N} P_i,$$

где:

P – общая мощность;

P_i – мощность для каждой квартиры;

F(N) – коэффициент одновременности, зависящий от числа квартир:

— F = 1 при N = 1,
— F = 0,8 при N = 10,
— F = 0,5 при N = 100.

8.5.2.1.4. Библиография

— Rèles Th – C.S.T. B., Paris.

8.5.2.2. Системы

8.5.2.2.1. Различные возможные системы отопления и горячего водоснабжения

Концепция выбора системы отопления и горячего водоснабжения зависит от предварительного выбора:

— теплоносителя: воздух или вода;
— производство индивидуальное или коллективное;
— производство горячей воды: независимое или связанное с отоплением.

Направление нагрева		Вода	Воздух
Индивидуальное производство	Отопление и горячее водоснабжение связаны	×	×
	Горячее водоснабжение независимое	×	×
Коллективное производство	Отопление и горячее водоснабжение связаны	×	
	Горячее водоснабжение не связано	×	

Различные системы отопления и горячего водоснабжения.

Действительно, в настоящее время не существует системы коллективного воздушного отопления, тем более что циркуляция в общей сети части воздуха комнат нежелательна. В § 8.5.2.6 рассмотрены различные аппараты, которыми располагают в настоящее время.

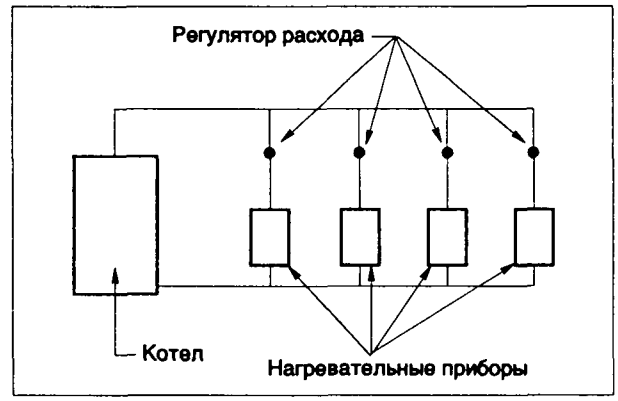
8.5.2.2.2. Циркуляция горячей воды в системе отопления

Тепло распространяется в комнатах с использованием: радиаторов, конвекторов, тепловых панелей.

Эти излучатели снабжаются горячей водой, схема циркуляции которой может быть: двухтрубной, однотрубной, однотрубной с замыкающим участком, гидрокабель (или спрут).

8.5.2.2.2.1. Двухтрубная система

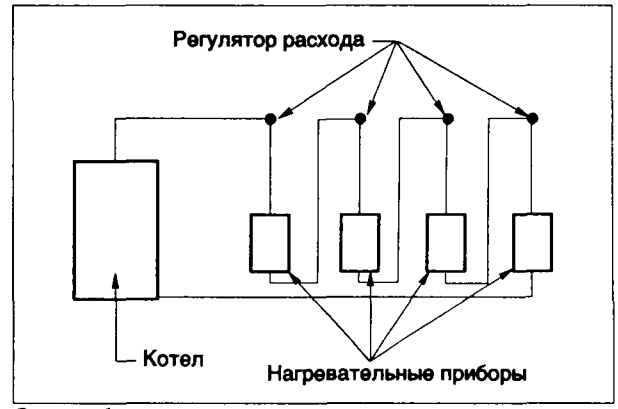
Двухтрубная система наиболее старая. Это единственная система, которая позволяет снабжать излучатели тепла (нагревательные приборы) как термосифоны. По мере увеличения циркуляции и в связи с повышенной ценой от этой системы постепенно отказались.



Двухтрубная система.

8.5.2.2.2.2. Однотрубная система

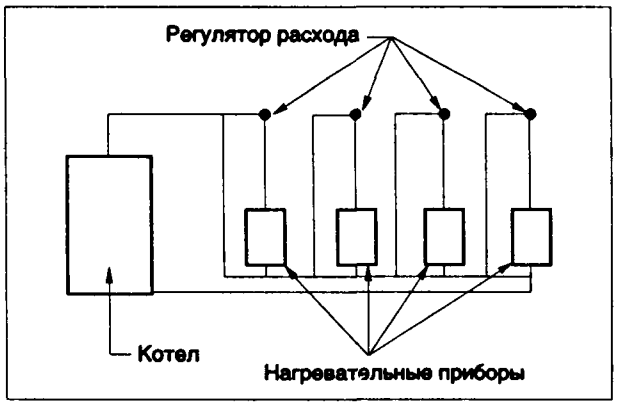
Однотрубная система имеет небольшую себестоимость, но она имеет недостатки, связанные с зависимостью работы одного радиатора от другого, что ведет к проблемам комфорта, не считая сложностей расчета.



Однотрубная система.

8.5.2.2.2.3. Однотрубная система с замыкающим участком

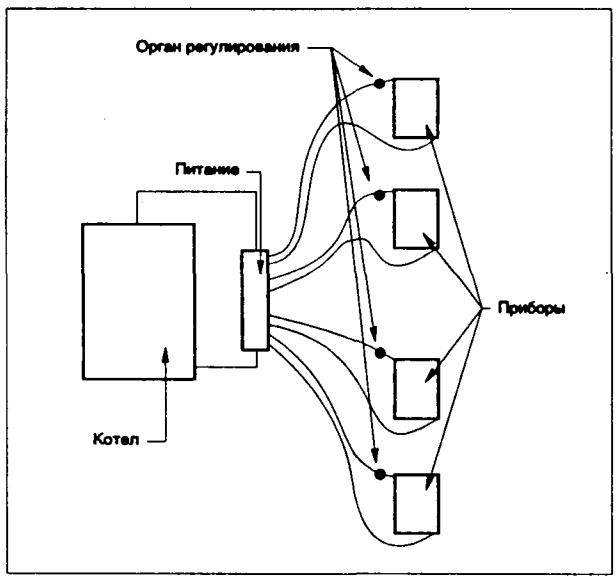
Она позволяет, сохраняя низкую стоимость установки, осуществлять независимость радиаторов.



Однотрубная система с замыкающим участком.

8.5.2.2.2.4. Система гидрокабеля (или спрут)

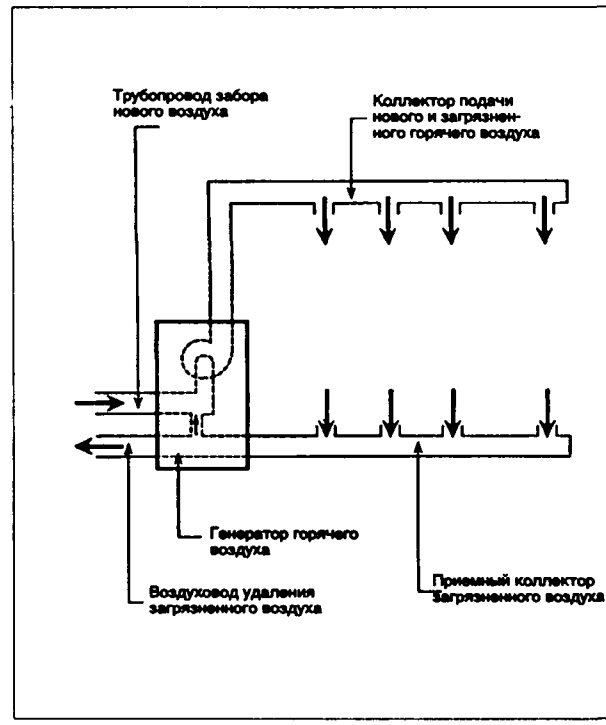
Она предусматривает снабжение каждого прибора от одного источника с помощью трубы малого диаметра. Использование для транспорта горячей воды пластиковых трубопроводов делает систему очень гибкой.



Система гидрокабеля (или спрут).

8.5.2.2.3. Система воздушного отопления

Классическая система воздушного отопления включает канал подачи свежего воздуха, канал раздачи воздуха, канал забора воздуха из помещения и канал выброса загрязненного воздуха. Подаваемый в помещение воздух частично смешивается с воздухом, выбрасываемым в атмосферу.

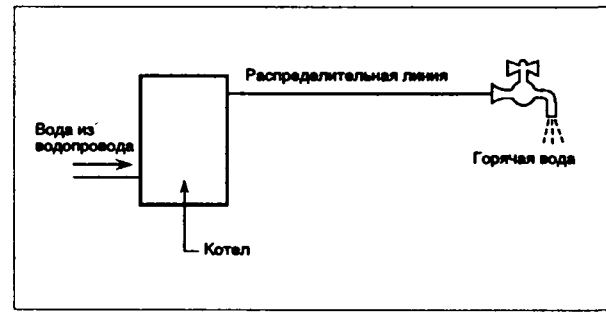


Система воздушного отопления.

8.5.2.2.4. Система горячего водоснабжения

8.5.2.2.4.1. Индивидуальная система

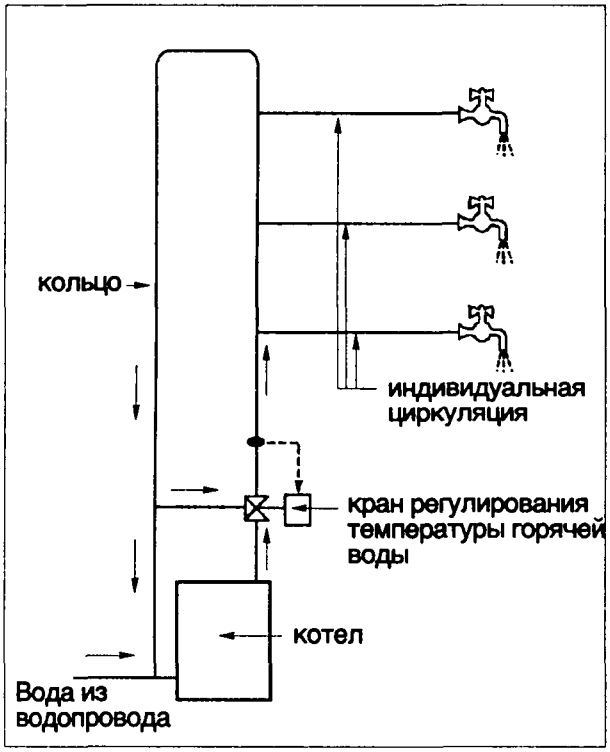
Подача горячей воды в здания всегда линейная, холодная вода из водопровода распределяется непосредственно после нагрева в котле.



Индивидуальная система горячего водоснабжения.

8.5.2.2.4.2. Коллективное водоснабжение

Коллективное водоснабжение: коллективное распределение горячей воды осуществляется путем подачи ее по кольцу, проходящему через ко тел. Забор воды ведется из этого кольца. Температура воды в кольце регулируется с помощью трехходового крана, где смешивается вода, выходящая из котла и возвращающаяся из кольца.



Коллективная система горячего водоснабжения.

8.5.2.3. Регулирование центрального водяного отопления

8.5.2.3.1. Общая часть

Регулирование водяного центрального отопления жилого сектора должно стараться установить допустимый компромисс между комфортом использования и необходимостью экономии энергии при умеренных капитальных вложениях.

Принцип регулирования должен включать три аспекта:

— регламентирования: средняя температура воздуха в жилом помещении установлена в 19°C, предписанная постановлением от 24 марта 1982 г., требующим сверх того регулирования по комнатам новых зданий;
— "комфорт применения", избегая особенно большого колебания окружающей температуры;
— "потребление энергии": позволяет газовому генератору работать при возможно низкой температуре, чтобы улучшить его практический КПД эксплуатации и стараясь эффективно рекуперировать внутреннее тепло и тепло солнечной радиации.

8.5.2.3.2. Основной принцип классического регулирования

Он приводится в таблице.

	Первичное регулирование	Дополнительное регулирование
Цель	Удовлетворение минимальных термических требований комнаты	Ограничение теплового излучения нагревательных аппаратов находящихся в других помещениях.
Способ	Влияние на температуру циркулирующей воды	Влияние на расход воды
Средства	*а*) на открытом кольце: прибор "наружный зонд"; *б*) на закрытом кольце: термостат окружающей среды	Кран термостатический

8.5.2.3.3. Оборудование для классического регулирования

В случае коллективного отопления (или иногда индивидуальных домов) первичное регулирование осуществляется системой, связывающей прямо температуру воды отопления с наружной температурой. Была бы, по возможности, предпочтительней система, которая влияет на температуру рециркуляции в котле с помощью трех или четырехходового крана, и, что принципиально, когда используется кондиционный котел.

В случае индивидуального отопления в основном используется термостат, который осуществляет первичное регулирование.

Он должен иметь:

— малую статическую разность температур (менее 0,5 K);
— небольшую термическую инерцию чувствительных элементов, которые сверх того должны хорошо проветриваться.

Термостат окружающей среды должен быть расположен на половине высоты внутренней стены соседней комнаты, не получающей много солнечной радиации и внутреннего теплоносителя.

Он должен быть защищен от влияния потоков воздуха (без заключения в корпус) и различных источников тепла и радиации.

Дополнительное регулирование влияет на термостатический клапан, который изменяет (или аннулирует) расход воды в радиаторах, расположенных в комнатах, подвергающихся влиянию солнечной радиации или внутреннему потоку тепла для того, чтобы рекуперировать этот поток.

Их рабочие характеристики приводятся в нормах NFP 52 - 002. Они, сверх того, должны обладать соответствующими гидравлическими характеристиками.

8.5.2.3.4. Регулируемое отопление

Автоматизированное часовое устройство в нужных момент вызовет понижение до необходимой величины в общем случае для всего комплекса зданий.

Регулирование температуры представляет больший интерес для индивидуального жилья, чем

для коллективного, и если добавить классическое "ночное снижение" и остановку отопления в период незанятости здания (конец недели и т.д.), экономия энергии более 100% не является утопией.

8.5.2.3.5. Будущие перспективы регулирования газового отопления

Ускоренное развитие информатики дает возможность предвидеть внедрение программного регулирования центрального водяного отопления по комнатам с увязкой работы генератора газа.

На рисунке представлен принцип работы системы индивидуального отопления. Он объединяет гибкость работы децентрализованного отопления (отопление "модулируемый газ") и преимущества двухцелевых котлов, – особенно котла с конденсацией паровой фазы. Объединяя эти функции в рабочих характеристиках, предназначенных для показа количества потребляемой энергии в обогреваемых помещениях, и развивая возможности передачи данных датчиков без специального провода, можно предвидеть значительное понижение стоимости используемого оборудования, что может привести к экономии горючего более 15% по отношению к классическим системам регулирования.

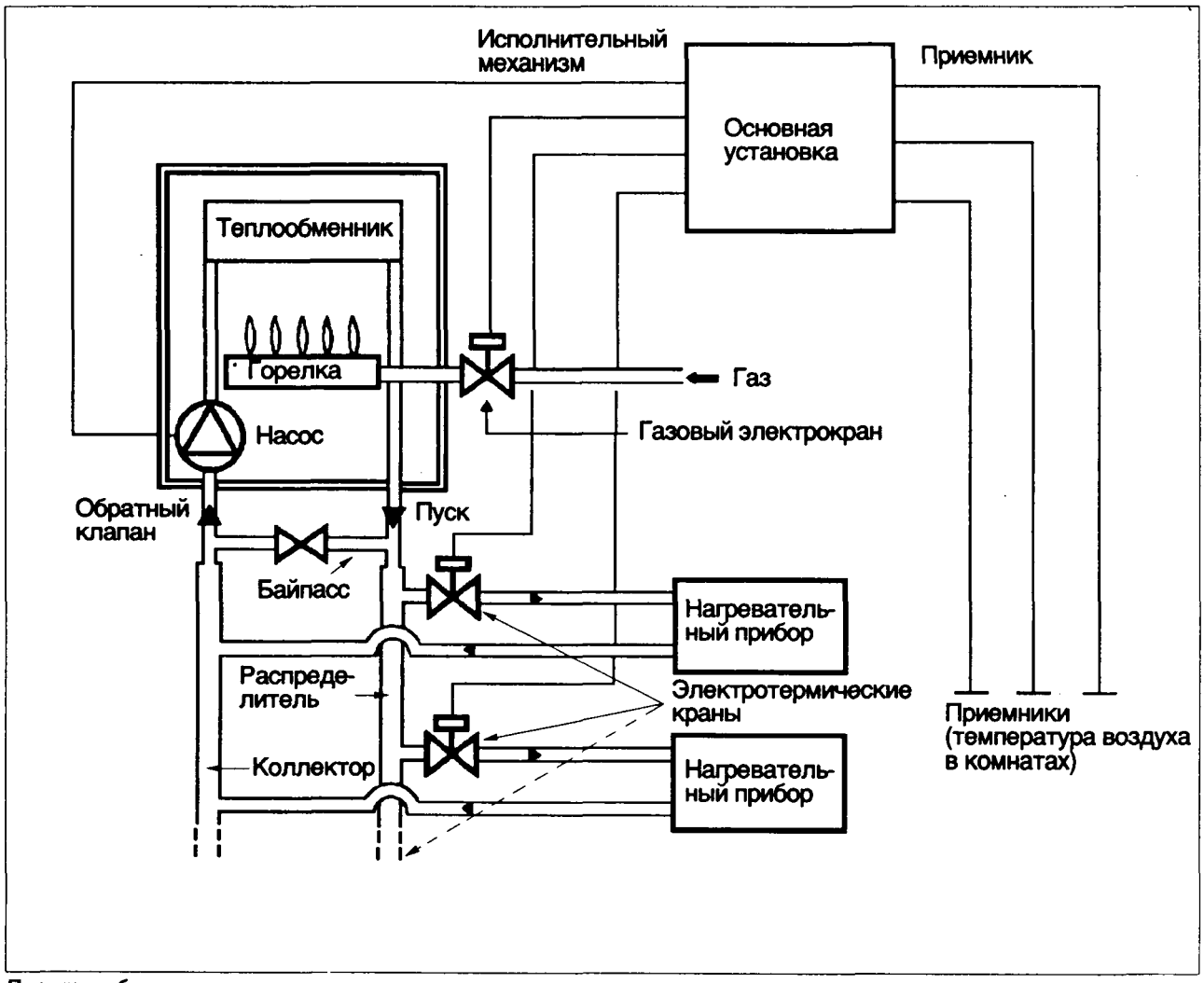
8.5.2.4. Рекуперация тепла в жилом и нежилом секторе: двойная подача газа

8.5.2.4.1. Рекуперируемое тепло

С точки зрения газового отопления в зданиях есть два источника неизбежных потерь тепла, легко поддающихся рекуперации:

— потери при смене воздуха (вентиляция) (от 0,5 до 1 объема в час для жилья и 3 объема в час в случае нежилого помещения: больницы, проектные организации, административные здания и т.д.). Они составляют 25 - 30% тепловых потерь здания;

— потери с продуктами сгорания котла. Одна часть располагаемой энергии горения уходит с продуктами сгорания в форме теплоты. Продукты сгорания удаляются при температуре больше , чем температура окружающей среды (10 - 15% энергии сгорания газа). Вторая часть – в форме скрытой теплоты парообразования , образующегося при горении (10% энергии сжигания газа).



Принцип работы системы индивидуального отопления.

8.5.2.4.2. Использование теряемого тепла для подогрева свежего воздуха: двойной поток газа

Загрязненный воздух, забираемый механически из здания для осуществления общей и постоянной вентиляции, заменяется равным объемом нового воздуха.

Он может быть подан двумя способами:

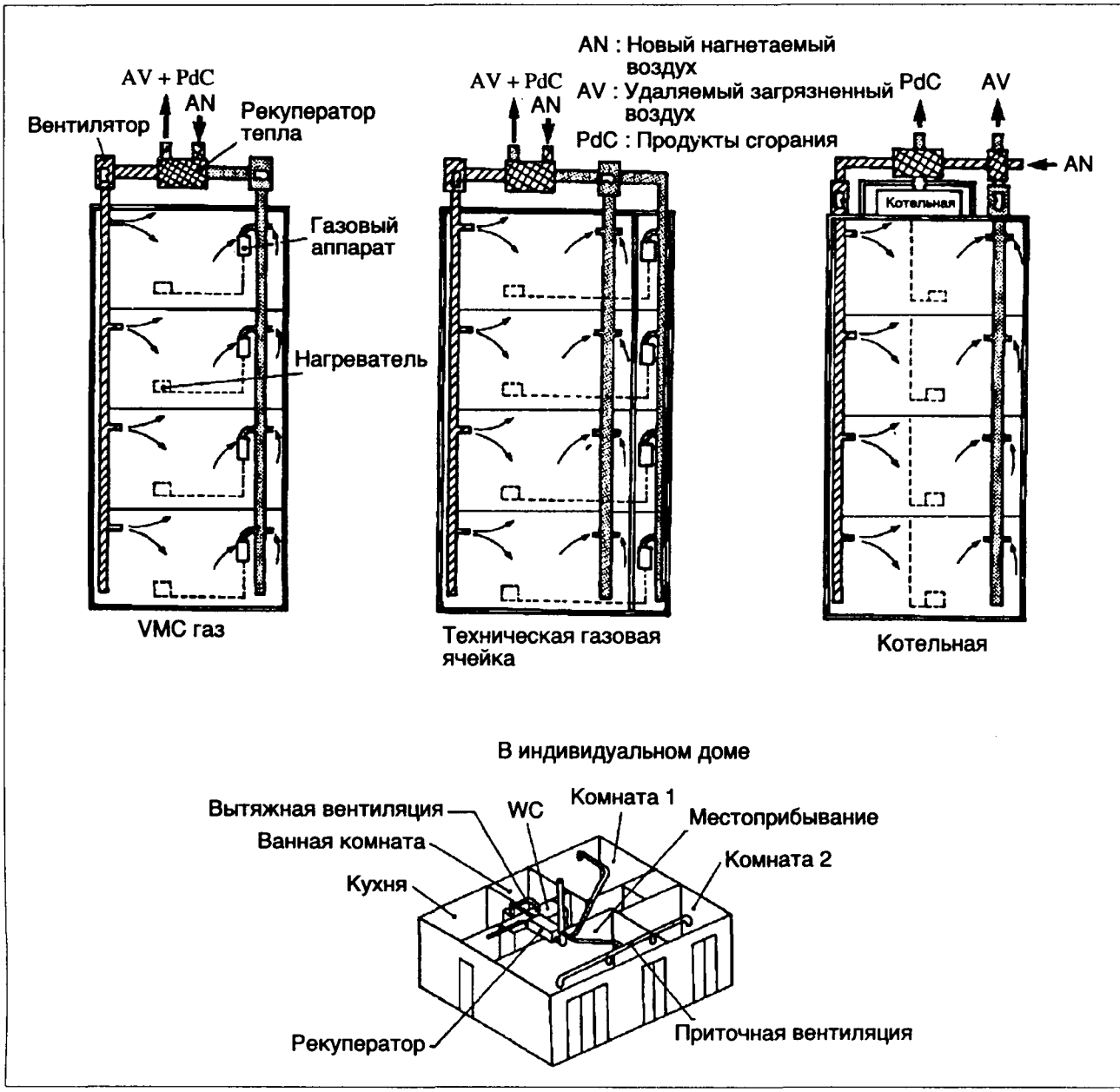
— либо естественно, через отверстие в фасаде: новый воздух попадает в помещения с температурой наружного воздуха; этот метод используется традиционно в жилом секторе (простой поток);

— либо механически, через вторую воздушную линию распределения чистого воздуха в здании (двойной поток).

В установке с двойным питанием газа один или несколько теплообменников позволяют передать энергию выходящего загрязненного воздуха и продуктов сгорания к свежему воздуху, подаваемому в здание, который подогревается рекуперацией теряемого тепла.

Большая часть классических теплообменников может использоваться без риска загрязнения продуктами сгорания газа, исходя из их конструкции (пластинчатые теплообменники, теплообменник с циркуляцией гликоля, с тепловыми трубками).

Этой технике присущи определенные достоинства в плане комфорта (лучший контроль вентиляции, возможность фильтрации, увлажнения, подогрева свежего воздуха, упразднение прямой связи с наружной средой и т.д.) и возможность экономии энергии.



Система рекуперации тепла при двойном потоке газа.

8.5.2.4.3. Экономия газа, осуществляемая с помощью двойного потока газа

В качестве примера в таблице приводятся величины экономии газа, которые можно получить.

Описание здания	Экономия потребления газа 1
Индивидуальные дома	20%
Коллективные дома	20 или 30%
Общественные здания	20 или 30%

1 Из приведенных величин необходимо вычесть электрическую энергию, потребляемую вспомогательными аппаратами (вентеляция и т.д.), порядка 3% рекуперированной энергии, или 10% от первичной энергии.

8.5.2.5. Конденсация

8.5.2.5.1. Принцип

Принцип аппаратов конденсации простой. Известно, что продукты сгорания из традиционного газового котла выходят с температурой от 120 до 250°C. Они включают, кроме избыточного кислорода и азота воздуха горения, диоксиды углерода (CO_2) и пары воды.

В конденсационном котле теплообмен между водой отопления и продуктами сгорания идет много дольше, что позволяет лучше рекуперировать энергию, лучше охлаждая продукты сгорания (рекуперация значительной теплоты). Если температура на входе в котел достаточно низкая (ниже температуры точки росы), можно рекуперировать еще скрытую теплоту конденсации водяных паров. Для данного газа температура точки росы зависит, принципиально, от избытка воздуха горения; на практике начало конденсации в котлах, работающих на природном газе, наблюдается при температуре около 50°C.

8.5.2.5.2. Технология

В коллективном отоплении (полезная мощность аппарата выше 70 кВт) принцип конденсации используется либо в рекуператоре-конденсаторе, который может дополнять обычный котел, но поставляемый независимо, либо в котле-конденсаторе. Обмен между водой и продуктами сгорания может быть прямым и непрямым.

8.5.2.5.2.1. Котел с прямым обменом

В первом случае продукты сгорания омываются водой промежуточной циркуляции, которая нагревает затем воду системы циркуляции, благодаря использованию теплообменника жидкость–жидкость. Получают, таким образом, большую поверхность обмена без привлечения большого количества дорогостоящих материалов, но область применения этих аппаратов ограничена температурой обратной воды омывания: если она выше температуры точки росы, омывающая вода частично испаряется и КПД падает очень быстро. Эти аппараты должны работать только как конденсатор.

8.5.2.5.2.2. Котел с непрямым обменом

В этих котлах теплообмен между продуктами сгорания и водой отопления осуществляется через стенку теплообменника. Котел работает таким образом как конденсатор, если температура обратной воды достаточно низкая, в среднем ниже 50 °C. Выше этой температуры нет конденсации, но котел сохраняет КПД значительно выше КПД традиционного котла, благодаря своей значительной эффективности рекуперации тепла. Можно различить два типа котлов этой категории.

8.5.2.5.2.2.1. Котел только с одним теплообменником

Единственный теплообменник-конденсатор осуществляет полный перенос тепла; он должен снабжаться водой с возможно более низкой температурой.

8.5.2.5.2.2.2. Котлы с двумя теплообменниками

Традиционный теплообменник, который не предназначен для конденсации и который часто для этого должен работать при минимальной температуре 55°C, называется конденсационным рекуператором тепла.

При использовании некоторых котлов достигается еще больший эффект за счет рекуперации тепла, еще содержащегося в продуктах сгорания после их обмена с водой отопления дополнительным источником холода. Этим дополнительным источником холода может быть:

— водопроводная вода в теплообменнике, осуществляющем производство горячей воды; дополнительный теплообменник, орошаемый водопроводной водой с t = 10 - 15°C и расположенный на выходе теплообменника, предназначенного для отопления, позволяет выиграть несколько процентов дополнительного КПД;

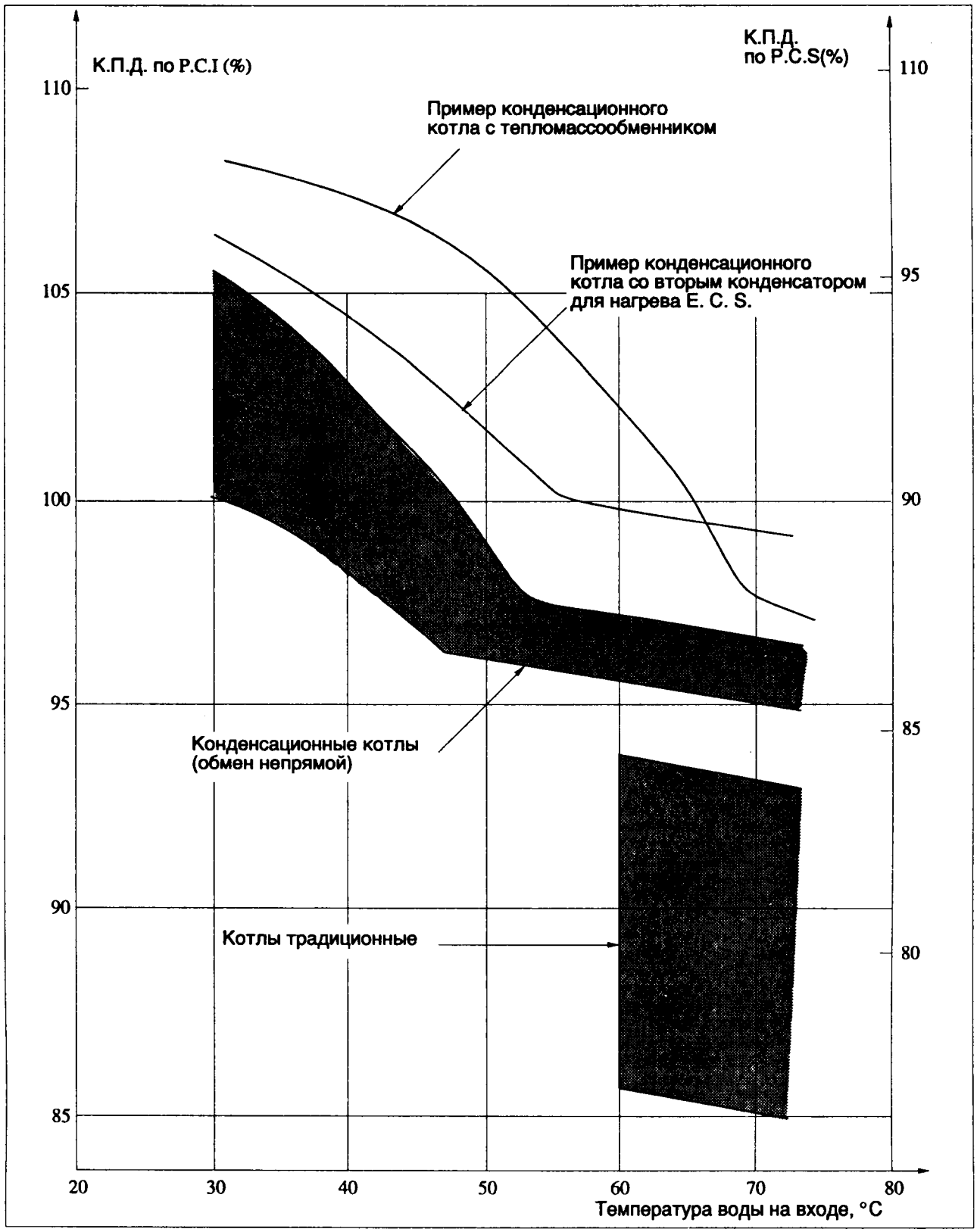
— воздух горения в котлах, оборудованных тепло- и массообменником между воздухом горения и продуктами сгорания; это устройство позволяет, подогревая и увлажняя воздух, благодаря теплу и воде, содержащимся в дыме, увеличить количество паров воды в конденсаторе котла и, таким образом, количество скрытого тепла, которое может быть рекуперировано.

Обмен воздух–дым осуществляется двумя насадками, орошаемыми конденсатом. В системе индивидуального отопления все аппараты – непрямого обмена и один теплообменник (или 2 теплообменника, соединенных гидравлически последовательно).

Существуют котлы простого и двойного назначения, горячая вода получается путем непрерывного нагрева или аккумуляции. Аппараты соединены с атмосферой дымоходом либо через вантуз, либо с помощью контролируемой механической вентиляции (V.M.C.). В продаже есть независимые аппараты-конденсаторы по производству горячей воды.

8.5.2.5.3. К.П.Д.

К.П.Д. для различных типов существующих аппаратов отопления, полученные в лаборатории, приводятся на рисунке. Они находятся между 100 и 106% P.C.J. для температуры на входе 30°C (100% минимум, определенный спецификацией ATGC-30). При температуре 45°C, часто встречающейся на установках, К.П.Д. достигает 97 - 101% P.C.I. для классического котла-конденсатора, 103% – со вто-



К.П.Д. котла при постоянной работе (котел мощностью более 70 кВт).

рым конденсатором, позволяющим подогревать водопроводную воду, 107% – с теплообменником воздух–продукты сгорания.

Для индивидуального котла предписывается нормами минимальный К.П.Д. 103% P.C.I. при 30°C обратной воды.

Эксплуатационный К.П.Д. котлов-конденсаторов очень близок к их номинальному К.П.Д. за счет небольших потерь при остановке (потери на продувку невелики за счет больших потерь давления в теплообменниках этих котлов и за счет сниженной температуры дыма). Эксплуатационный К.П.Д. до 100% P.C.J. при использовании системы (нагрев + + E.C.S.) может быть взят приближенно независимо от типа отопления.

8.5.2.5.4. Установка

Должны быть соблюдены несколько простых правил, чтобы реализовать лучшие качества котла-конденсатора. С точки зрения гидравлики, эти котлы должны питаться как можно более холодной водой, чтобы получить лучший К.П.Д.

Индивидуальные котлы устанавливаются,таким образом, на обратной линии без трех ходовых кранов и других устройств, усложняющих гидравлическую схему. Они управляются с помощью термостата окружающей среды хорошего качества. В коллективных котельных, с точки зрения технико-экономической, необходимо предусмотреть в котельной установку как котла-конденсатора, так и традиционного котла. Действительно, котлы-конденсаторы будут обеспечивать более чем 90% годовой потребности, если их мощность составляет половину общей мощности.

В этих котельных просто необходимо эффективно использовать преимущества котлов-конденсаторов и зимой и летом как для отопления, так и горячего водоснабжения, и изолировать гидравлически традиционный котел при остановке. Необходимость орошения теплообменников-конденсаторов требуемым расходом наиболее холодной водой ведет к разнообразию схем в зависимости от типа котлов-конденсаторов (с одним, двумя или тремя теплообменниками) и в зависимости от назначения котельной (отопление, с одной или несколькими циркуляциями или без горячего водоснабжения (E.C.S.)).

Устройство для отвода продуктов сгорания должно учитывать низкую температуру последних и их насыщение водой.

Для аппаратов, соединенных с трубой, необходимый диаметр для натуральной тяги будет бóльшим при равной мощности, чем для классического котла (результат уменьшения термической тяги).

Конденсация, начавшаяся в котле, продолжается в трубе. Поэтому необходимо предусмотреть удаление конденсата, выпавшего в трубе. Для этого служит трубопровод P.V.C. удаляющий конденсат из котла. Трубопровод должен быть герметичен и способен работать в газовых аппаратах (качественный алюминий, A5 или нержавеющая сталь).

Соединение с дымоходом, типа "вантузы", аппаратов герметичной циркуляции и соединительные трубопроводы в сетях V.M.C. должны быть также герметичны, в них не должно быть пониженных мест для облегчения движения воды к сливу.

В аппаратах V.M.C. спиральные устройства безопасности – анемометрические или манастатические заменяют систему безопасности (термическую) традиционных аппаратов.

8.5.2.6. Газовые аппараты для отопления и горячего водоснабжения

8.5.2.6.1. Введение

Эта глава представляет в кратком виде различные типы газовых генераторов, которые могут быть расположены в общественных и промышленных зданиях для отопления и горячего водоснабжения.

Различают три вида генераторов:

— для производства горячей воды индивидуальные и коллективные;
— для отопления коллективных или индивидуальных зданий;
— смешанные аппараты одновременного производства тепла для отопления помещений и горячей воды (производство коллективное или индивидуальное).

8.5.2.6.2. Аппараты для индивидуального производства горячей воды (водонагреватели)

8.5.2.6.2.1. Индивидуальные водоподогреватели

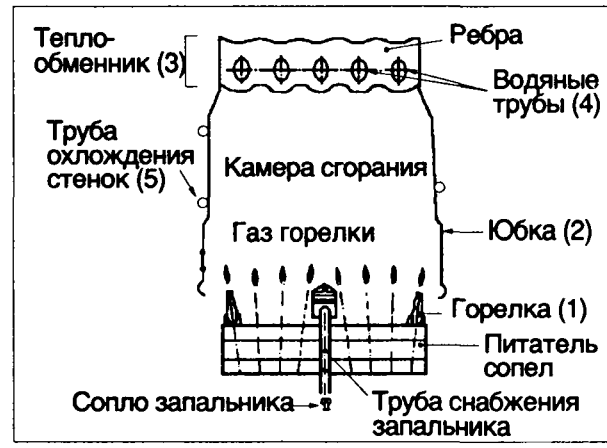
В этой области различают две большие категории аппаратов:

— аппараты мгновенного действия (проточные водонагреватели);
— аккумулирующие аппараты (аппараты с аккумулятором).

8.5.2.6.2.1.1. Аппараты проточного действия

8.5.2.6.2.1.1.1. Описание оборудования

Это оборудование состоит из теплообменника (легкой конструкции: оребренные медные трубы, обычно луженые), горелка с системой регулировки и камера сгорания (или юбка).



Принципиальная схема аппарата проточного типа.

Продукты сгорания газа, генерируемые горелкой (1) проходят по юбке (2) к теплообменнику (3), который они пересекают, оставляя большую часть тепла санитарной воде, проходящей через теплообменник из системы циркуляции (4). Характеристика работы аппарата проточного действия (рис. стр. 730) отличается тем,что зажечь горелку можно только при подаче горячей воды. Аппарат оборудован таким образом гидравлическим устройством, которое управляет открытием клапана подачи газа к горелке.

— Перечень продукции, существующей во Франции.

Существуют водонагреватели для раковин и для ванн, которые отличаются по мощности и качеству регулирующих устройств.

Водонагреватель имеет обычно мощность 8,7 кВт и состоит из базового аппарата из серии аппаратов проточного действия, т.е. наиболее простого и самого дешевого.

Сконструированные для размещения в раковине, они не оборудованы настоящей системой регулирования температуры воды. Некоторые современные аппараты имеют устройства установки температуры, которая позволяет изменять соотношение между расходом поступающего в горелку газа и расходом нагреваемой воды.

Эти аппараты мощностью 8,7 кВт обычно не соединяются с дымоходом. Чтобы избежать ухудшения качества сжигания за счет загрязнения атмосферы продуктами некачестзенного сжигания, водонагреватель, несоединенный с дымоходом, обязательно оборудуется автоматикой безопасности, которая прекращает подачу газа, если содержание CO превосходит установленный предел. Эта система безопасности базируется обычно на удалении или отрыве пламени горелки от запальника.



Водонагреватель проточного действия (здесь 5 л/мин).

— Водонагреватель для ванной

Эти аппараты более мощные, чем водонагреватели для раковин, и могут служить для ванной. Некоторая часть из новых аппаратов имеет изменяющуюся мощность. Это значит, что мощность горелки связана с расходом воды, которая потребляется, чтобы получить желаемую температуру.

Во Франции перечень предлагаемых мощностей следующий:

— 17,4 кВт;
— 22,6 кВт;
— 27,9 кВт.

Наиболее часто применяются аппараты мощностью 17,4 кВт и 22,6 кВт. Аппараты мощностью 27,9 кВт являются наиболее мощными для этого типа продукции.

8.5.2.6.2.1.1.2. Система регулирования

Совершенствование системы регулирования аппаратов производства горячей воды (E.C.S.) состоит в возможности изменения расхода газа горелкой таким образом, что температура выходящей из аппарата воды была на желаемом уровне, независимо от расхода потребления.

На практике эта идеальная ситуация не может быть достигнута по двум техническим причинам:

— горелка работает в интервале от минимальной до максимальной мощности (разница между этими величинами определяет гибкость горелки). Таким образом, регулирование практически возможно только в этом интервале мощностей;
— техника, используемая для осуществления связи мощности с расходом воды, не позволяет осуществить строгой пропорциональности между этими двумя величинами.

Тем не менее существует два технологических процесса для получения этого результата:

— регулирование гидростатическое;
— регулирование термостатическое.

— Регулирование гидростатическое

Это регулирование применяется более часто, т.к. оно имеет меньшую себестоимость, чем регулирование термостатическое.

Принцип его работы следующий:

- циркулирующая вода в аппарате проходит через трубку Вентури;
- в ее входной камере происходит снижение давления пропорционально расходу;
- за счет этого снижения давления происходит поднятие мембраны, которая открывает клапан газа;
- он отрегулирован таким образом, чтобы расход газа опережал перемещение мембраны. Наконец, на некоторых аппаратах существует байпас трубки Вентури, который позволяет перепускать через нее большее или меньшее количество воды, т.е. регулировать температуру воды косвенно.

— Регулирование термостатическое

Технически термостатическое регулирование является лучшим.

Оно состоит в измерении температуры воды, выходящей из генератора, с помощью термобаллона и использует ее с помощью приемника, который реагирует способом компенсации выполняемой команды открытием или закрытием крана подачи воды на клапане газа.

Таким образом, открытие газового клапана управляется пропорционально расходу воды с помощью гидростатической системы. Термостатическая часть служит только для уточнения расхода

газа, обеспечивающего требуемую температуру (обычно 65°C).

— Аппараты без запальников

Изготовители проточных нагревателей разработали новые аппараты без постоянно действующих запальников.

Целью является ликвидация паразитического расхода запальника. Действительно, это потребление составляет 80 - 200 Ватт на аппарат.

Зажигание основной горелки в этом случае осуществляется пучком искр, либо с помощью системы электродов, которая зажигает запальник, а от него основную горелку.

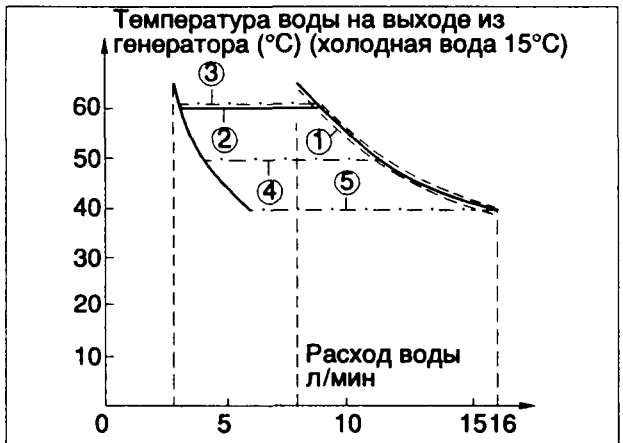
8.5.2.6.2.1.1.3. Эффективность

Качество горячего водоснабжения можно оценить по двум параметрам:

— зависимость температуры воды от расхода;

— диапазон расхода, обеспечиваемый аппаратом для температуры воды, называемой "горячей" (от 40 до 60°C), и К.П.Д. получения горячей воды.

Чтобы оценить качество аппарата, можно сравнить реальную кривую замера изменения температуры воды в зависимости от разобранного расхода с теоретической кривой для "идеального" аппарата такого же типа.



Теоретическая диаграмма генератора проточного действия.

8.5.2.6.2.1.2. Аппараты аккумуляционного типа

8.5.2.6.2.1.2.1. Описание аппаратов

Это оборудование состоит из сосуда нержавеющей стали или стали, изолированной изнутри материалом "санитарного" качества. Этот резервуар снаружи покрыт тепловой изоляцией (пористый полиуретан, стекловата и т.д.).

Горелка подает продукты сгорания в теплообменник, расположенный в резервуаре, наполненном водой.

Этот теплообменник может представлять:

— вертикальную трубу с перегородками;

— змеевик;

— несколько вертикальных труб.

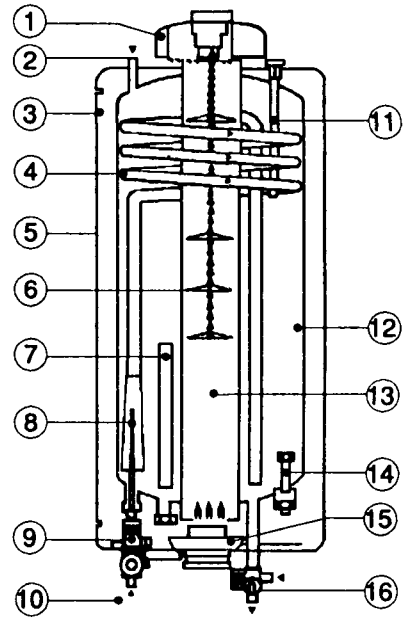
Помимо оборудования, необходимого для работы горелки (блок газовый, редуктор, электроуправляемый клапан и т.д.), аппарат оборудован устройствами регулирования температуры воды, защиты от нагрева, при необходимости – устройством подогрева холодной воды и антикоррозионным анодом и т.д.

Кроме того, они должны обязательно быть оборудованы устройством гидравлической безопасности на входе холодной воды, которое состоит из обратного клапана, клапана ограничения давления воды в аппарату и соединено с устройством опорожнения.

Емкость аппаратов для жилых домов изменяется от 50 до 200 литров. Горелка может быть атмосферного или двухпроводного типов в зависимости от применяемого вида теплообменника. Ее мощность изменяется в соответствии с размерами резервуара и категории аппарата.

Различают:

— нагревательные аппараты нормальные (время от 2-х до 6-ти часов);



1 Тягопрерыватель
2 Выход горячей воды
3 Тепловая изоляция
4 Змеевик предварительного нагрева
5 Кожух
6 Перегородка
7 Анод нижний
8 Датчик термостата
9 Термостат THC 131
10 Подвод газа
11 Верхний анод
12 Резервуар
13 Топка
14 Предохранительный клапан
15 Горелка
16 Оборудование подвода холодной воды, клапан, слив

Емкостный газовый водонагреватель.

— аппараты быстрого нагрева (от 3 кВт до 8,8 кВт для емкости от 50-ти до 200 литров, время от одного до двух часов);

— аппараты сверхбыстрого нагрева (мощность 14 - 18 кВт для емкости от 80-ти до 100 литров, время – до 225-ти минут).

8.5.2.6.2.1.2.2. Характеристики

Мощность горелки и емкость резервуара определяют максимальный часовой отбор, который позволяет аппарат.

В этом случае характеристики могут быть выражены через время набора температуры (см. таблицу) или в величинах дебита горячей воды в час (в литрах) в предположении постоянного отбора и для получения температур отбираемой воды, указанных в таблице (холодная вода входит в аппарат при 15°C).

8.5.2.6.2.1.3. Практические коэффициенты полезного действия индивидуальных водонагревателей.

На рисунке приводятся средние величины К.П.Д. различных видов аппаратов.

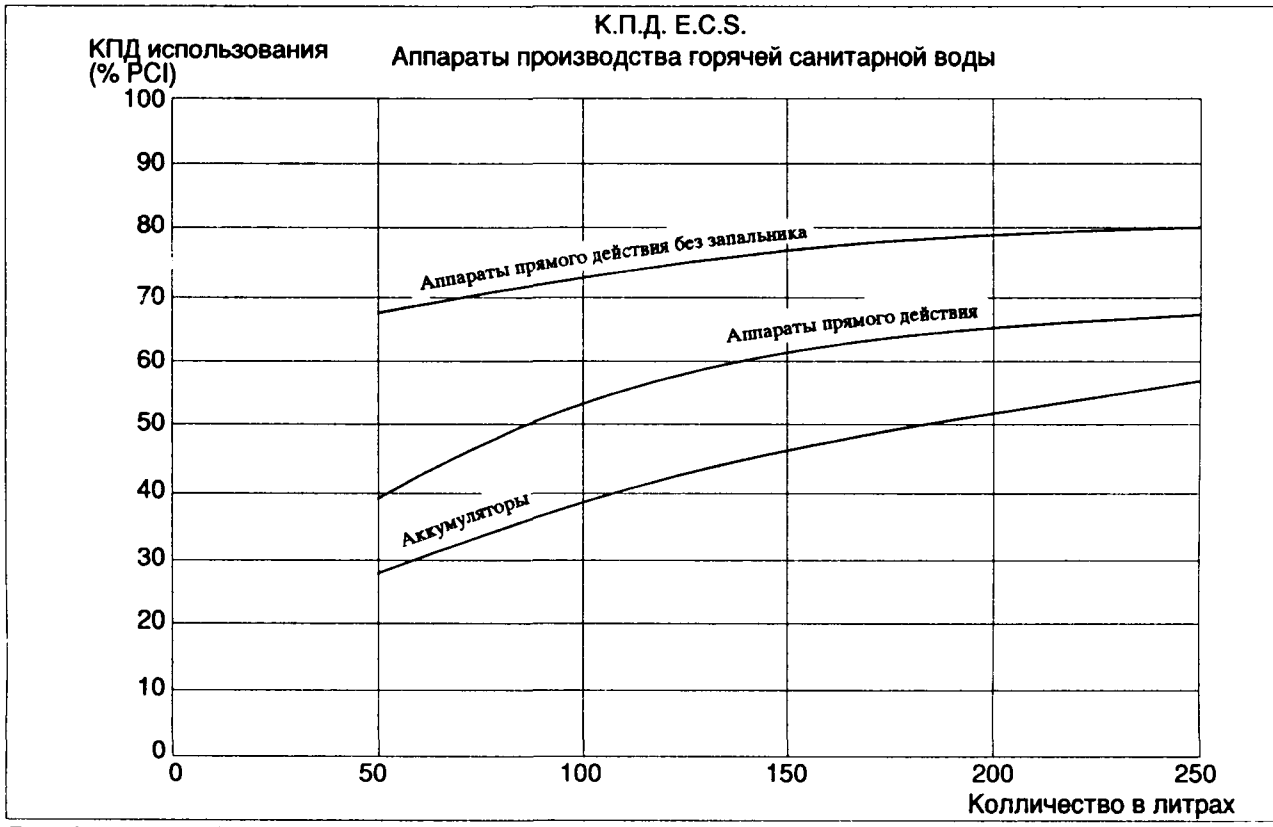
Можно констатировать, что аппараты непрерывного действия без запальника имеют более высокий К.П.Д. Практический К.П.Д. зависит от номинального К.П. Д. (предусматривающий достижение температуры) и расходов на обслуживание.

Тип	Объем в литрах	Мощность, Ватт	Время нагрева до 50°C	Размеры, мм		
				L	H	P
AG-50	50	3 000	57 мин	410	1 143	425
AG-100	100	4 400	1 ч 20 мин	480	1 216	500
AG-150	150	5 900	1 ч 25 мин	553	1 555	573
AG-200	200	8 800	1 ч 20 мин	610	1 555	665

Характеристика нагревателей, выраженная во времени подъема температур.

Температура нагрева / Тип	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C	85°C
AG-50	130	86	65	52	44	37
AG-100	190	127	95	76	63	55
AG-150	255	170	128	102	85	73
AG-200	380	254	190	152	126	110

Характеристика водонагревателей, выраженная в расходе и температуре опорожнения.



Потребление горячей воды (л/сут).

8.5.2.6.3. Генератор тепла для отопления зданий

Генераторы тепла классифицируются на два типа:

— аппараты для подогрева воздуха (воздухоподогреватели);
— аппараты подогрева воды (водоподогреватели).

8.5.2.6.3.1. Воздухоподогреватели

8.5.2.6.3.1.1. Оборудование для индивидуального отопления

8.5.2.6.3.1.1.1. Газовый радиатор

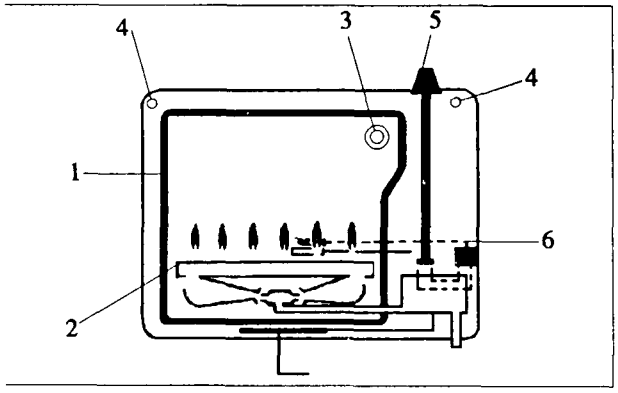


Схема газового радиатора.

Аппарат состоит из корпуса нагрева (1), снабжаемого продуктами сгорания от рамповой горелки (2), отвод продуктов сгорания осуществляется через отверстие (3); нагреваемый воздух, контактируя со стенкой теплообменника (1), циркулирует между стенкой этого теплообменника и рубашкой (4), имеющей отверстия (решетку) в своей нижней и верхней части.

Новые аппараты оборудованы устройством регулирования мощности горелки (5) и пьезоэлектрической системой зажигания (6). Большая часть аппаратов оборудована термостатом окружающей среды в том же корпусе, который заменил регулятор горелки (5); жидкостной термобаллон, расположенный в нижней части, управляет включением горелки в соответствии с установленной регулировкой (5).

8.5.2.6.3.1.1.2. Модульное газовое отопление (C.G.M.)

Эта система состоит в установке одного радиатора в отапливаемую комнату. Для того чтобы эвакуировать продукты сгорания из каждой комнаты, устанавливаются герметичные аппараты с воздушными клапанами и естественной тягой.

Мощность газового радиатора может колебаться от 1 до 10 кВт. Аппараты модульного газового отопления имеют малую мощность от 1 до 3 кВт. Они имеют хороший эксплуатационный К.П.Д. (таблица), иногда лучше номинального, который измеряется при постоянной работе, в то время как при эксплуатации они работают прерывисто.

Это особенно заметно для аппаратов с механическим движением воздуха. В этом случае не происходит омывания нагретого корпуса при остановке аппарата (нет или слабые термические потери при остановке). Во время остановки радиатор отдает в помещение тепло, которое он накопит во время работы, при этом почти без тепловых потерь.

	К.П.Д номинальный (% P. C. I.) (согласованный и утвержденный)	К.П.Д. эксплуатационный, средний, расчетный (% P. C. I.)
C. G. M. микро вантуз с механической тягой	86	97
C. G. M. мини вантуз с естественной тягой	88	87

К.П.Д. различных типов аппаратов.

8.5.2.6.3.1.1.3. Генератор для воздушного отопления

Это -"котел" нагрева воздуха, расположенный в центре отапливаемого помещения и соединенный с сетью распределения горячего воздуха.

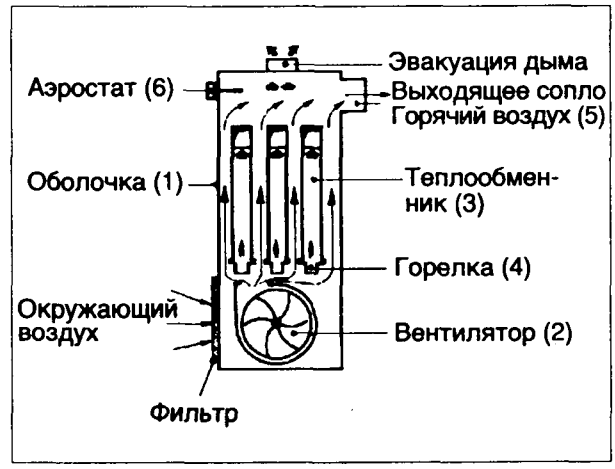


Схема генератора воздушного отопления.

Аппарат состоит из оболочки (1), которая транспортирует воздух, подаваемый вентилятором, вокруг стенки теплообменника (3). Этот воздух получает тепло от продуктов сгорания, поступающих из рамповой горелки (4), расположенной в нижней части теплообменника (3). Нагретый таким образом воздух направляется в распределительную сеть через сопло (5).

Температура воздуха может контролироваться с помощью термостата (6), который может воздействовать на горелку, работающую по принципу – все, мало или ничего.

8.5.2.6.3.2. Оборудование для общественных и индивидуальных потребителей

Данный материал см в §8.5.5.2.

8.5.2.6.3.3. Котлы для получения горячей воды

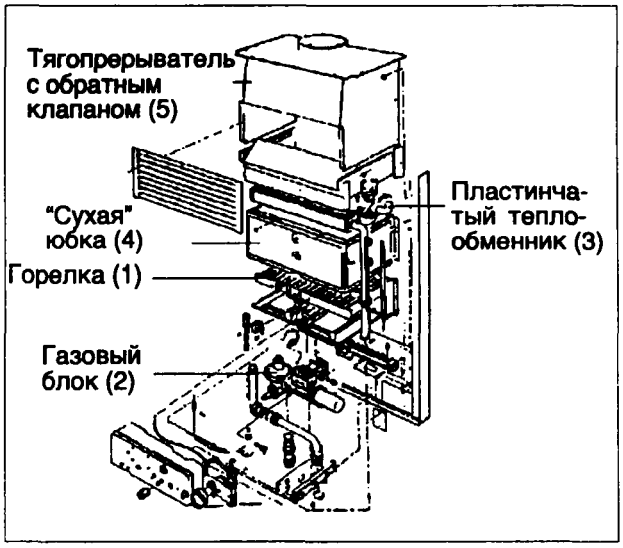
8.5.2.6.3.3.1. Аппарат для индивидуального отопления

Различают котлы традиционного типа в отличие от котлов-конденсаторов, в которых конденсируется часть воды, содержащейся в продуктах сгорания.

8.5.2.6.3.3.1.1. Традиционные котлы

8.5.2.6.3.3.1.1.1. Описание

Настенный котел



Настенный котел.

Настенный котел имеет легкую конструкцию. Он состоит из горелки (1), обычно "атмосферного" типа, снабжаемой газом, и регулируемой блоком "газ" (2); пластинчатого теплообменника (3), расположенного над камерой сгорания, представляющей собой юбку (4). Удаление продуктов сгорания осуществляется с помощью тягопрерывателя с обратным клапаном (5), расположенным над теплообменником (3).

Блок "газ" соединен с различными органами управления (кнопка выбора температуры). Он соединен с термостатом котла, который позволяет фиксировать температуру на выходе из котла в зависимости от температуры отопления. Предусмотрена защита от перегрева для безопасности и на случай непредусмотренных ситуаций.

Кроме этого, источник воды (не показан на рисунке) осуществляет циркуляцию воды в котле и тепловой сети.

Настенный котел – аппарат, хорошо подходящий для отопления индивидуальных квартир в коллективных домах из-за своего небольшого размера и доступной цены.

Наземный котел

Более приспособленный для отопления отдельных домов наземный котел более тяжел, чем настенный котел. Теплообменники наземного котла выполняются из чугуна или стали. Продолжительность его эксплуатации больше, чем настенного котла.

8.5.2.6.3.3.1.1.2. Принцип работы котлов в системе водяного отопления

Предпочтительно различать принцип работы наземных и настенных котлов.

Действительно, настенный котел – аппарат с небольшой термической инерцией, который не боится случайной конденсации в камере сгорания и теплообменнике при пуске.

Напротив, наземный стальной котел обладает сильной инерцией и, кроме того, его срок жизни уменьшается за счет коррозии, если имеет место конденсация продуктов сгорания.

Настенный котел

Обычно эти аппараты соединены с термостатом, установленным в отапливаемом помещении. Если температура в помещении опускается ниже установленной величины, термостат закрывает контакт, который может реагировать:

— на включение горелки котла,

— на пуск циркуляционной воды.

В первом случае циркуляция осуществляется в течение всего периода отопления. Во втором случае котел оборудован детектором воды, который включает горелку, как только появляется циркуляция в нагреваемом корпусе.

В двух случаях, как только контакт термостата окружающей среды закрыт, работа горелки по типу " все или ничего" управляется термостатом котла. Этот последний реагирует таким образом, чтобы температура воды на выходе из аппарата не превышала установленной величины.

Особый настенный котел

Существует новый настенный котел, горелка которого работает не только в режиме "все или ничего". Режим горения может изменяться по принципу "все – немного – ничего".

Если есть устройство "все – немного – ничего", выключение горелки осуществляется (тогда, как есть команда термостата окружающей среды) терморегулятором котла, если температура воды на выходе стала выше определенной установленной величины (*терморегулятор с двойным пределом* отключения). Регулирование работы горелки направлено на то, чтобы получать температуру на выходе котла как можно более близкую температуре, заданной термоклапаном, независимо от температуры воды на входе в котел.

8.5.2.6.3.3.1.1.3. Диапазон мощностей

Котлы настенные

Традиционные настенные котлы имеют мощности примерно от 14 до 35 кВт.

Различают два их типа:

— аппараты с постоянной мощностью;

— аппараты с регулируемой мощностью.

Каждый изготовитель указывает номинальную мощность своего аппарата. Для аппаратов с фиксированной мощностью можно определить диапазон приблизительных мощностей.

Эти величины равны (14, 18, 23, 35 кВт).

Для большей части аппаратов с регулируемой мощностью она может быть установлена от 7 или 8 кВт, в зависимости от модели, до примерно 21 кВт (23 или 23 кВт, в зависимости от модели).

Напольный котел

Напольные водяные котлы небольшой производительности с корпусом из нержавеющей стали или чугуна могут иметь систему регулирования, идентичную системе настенных котлов.

Горелка котла управляется терморегулятором и поддерживает котел при заданной температуре. Термостат окружающей среды включает и выключает циркуляцию.

Однако водяные котлы большой мощности и/или с корпусом из обычной стали используются с регулятором типа трехходового крана для того, чтобы избежать очень низкой температуры обратной воды.

В идеале (с этой точки зрения) желательно было бы управлять этим клапаном с помощью наружного, температурного зонда. В действительности, чтобы избежать конденсации на этом типе котлов, терморегулятор не может быть настроен на очень низкую температуру и для переходного сезона регулирование температуры подаваемой воды должно осуществляться трехходовым клапаном.

8.5.2.6.3.3.1.1.4. Способы удаления продуктов сгорания из домовых котлов

Оборудование дымохода

Этот тип оборудования представлен на с. 735.

Этот способ наиболее простой, он требует на аппарате или после патрубка выхода аппарата установки тягопрерывателя с обратным клапаном, который предупреждает продувку корпуса котла избытком воздуха как всасыванием через дымоход, так и нагнетанием при опрокидывании тяги. Это устройство важно с точки зрения эффективности работы аппарата.

Устройство вытяжки

Принцип состоит в установке аппарата напротив или около наружной стены здания и в заборе воздуха необходимого для горения и в выпуске продуктов сгорания через двойную трубу, проходящую через стену.

Можно установить два воздуховода, пересекающих стену параллельно, или два концентрических воздуховода. Это устройство называется "вантуз".

Различают два типа устройства "вантуз":

- с естественной тягой;
- с механической тягой.

Во всех случаях аппарат герметичен .

Аппараты с естественной тягой

Высота направляемого корпуса настенного котла может быть достаточной, чтобы вызвать движение газа (воздух и дым) по горизонтальному проходу – газоходу (вантуз), если:

— сечение газохода велико,

— длина газохода невелика – ≤ 1 м, т.е. потери давления в нем малы.

Это принцип герметичных аппаратов с естественной тепловой тягой. Газоходы вантуза имеют прямоугольную и квадратную формы, обычно – концентрические.

Аппараты с принудительной тягой

В этом случае движение газов (воздух, дым) осуществляется принудительно.

Вантуз аппаратов с принудительной тягой имеет меньшее сечение и обычно состоит из концентрических труб.

Аппараты, подсоединяемые к системе VMC–газ

Эти типы аппаратов могут подсоединяться к французской системе удаления продуктов сгорания газа и загрязненного воздуха из помещения с помощью механической контролируемой вентиляции (V.M.C.–"газ").

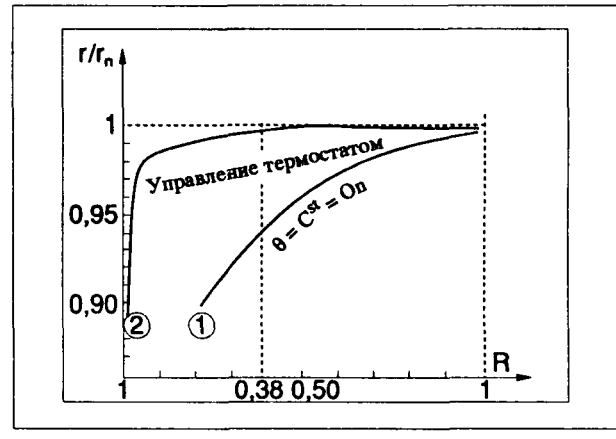
Отключатель тяги оборудован системой обнаружения выброса в случае отказа механической вентиляции.

В соответствии с типом, классическим или конденсационным, система обнаружения может быть термической, манастатической или обнаружения направления течения газов в отключателе тяги. Начиная с 1989 года, в новых установках V.M.C-"газ" индивидуальная безопасность аппаратов дублируется коллективной системой безопасности отвода от котлов продуктов сгорания.

8.5.2.6.3.3.1.1.5. Характеристика водонагревателей для индивидуального отопления

КПД этих аппаратов является функцией нагрузки (отношение полезной мощности к максимальной мощности аппарата) и средней температуры циркуляции системы отопления.

Для аппаратов с естественной циркуляцией КПД уменьшается достаточно быстро, если нагрузка уменьшается ниже определенной величины.



Изменение КПД в зависимости от нагрузки: преимущество управления термостатом окружающей среды.

Диаграмма иллюстрирует падение КПД (представлен отношением $\frac{r}{r_n}$: КПД, замеренный по отношению к номинальному) в зависимости от нагрузки R (кривая 1) и его улучшение за счет использования термостата наружной среды, когда аппарат работает на полную нагрузку, но прерывисто (кривая 2).

КПД является функцией температуры циркуляции системы отопления, т.е. возврата воды в котел.

При температуре обратной воды, равной 60°C, КПД традиционного котла с постоянным режимом работы изменяется от 77 до 92% P.C.I.

8.5.2.6.3.3.1.2. Смешанный котел

Функции производства горячей воды соединены с функцией отопления и интересны в плане экономическом. Обычно аппарат с двумя функциями (E.C.S. и отопление) обходится дешевле, чем два специализированных аппарата. Например, во Франции настенный котел с двойной функцией является наиболее экономичным для максимального использования аппаратом.

Этим объясняется наибольшая популярность этих газовых аппаратов.

Встречаются также наземные котлы, которые производят горячую воду для санитарных целей.

8.5.2.6.3.3.1.2.1. Описание

Настенный котел

В смешанных аппаратах встречаются два способа производства горячей воды:

— мгновенное (проточное),

— аккумуляционное.

Можно даже встретить комбинированное решение этих двух способов для аппаратов высшей категории.

— Отопление

Реализуется так же, как для аппаратов простого обслуживания, описанных в §8.5.2.6.3.3.1.1.1.

— Постоянное горячее водоснабжение

Этот способ наиболее подходящий в связи с небольшой себестоимостью. Действительно, возможны два решения, предлагаемых конструкторами :

· Решение № 1.

Пластинчатый теплообменник котла имеет двойную циркуляцию:

— отопления,

— горячего водоснабжения.

· Решение № 2.

Горячая вода производится в теплообменнике чашечного типа (пленочного) – компактного и эффективного. Этот теплообменник снабжается горячей водой от системы отопления с помощью насоса и трехходового крана (клапана), расположенного на выходе из котла. Этот трехходовой клапан управляется гидростатическим способом с помощью устройства, срабатывающего при разборе горячей воды и снижении давления.

— Функции горячей воды комбинированные: непрерывный разбор и циркуляция

Это устройство было создано конструкторами настенных котлов, чтобы обеспечить два типа потребностей части потребителей:

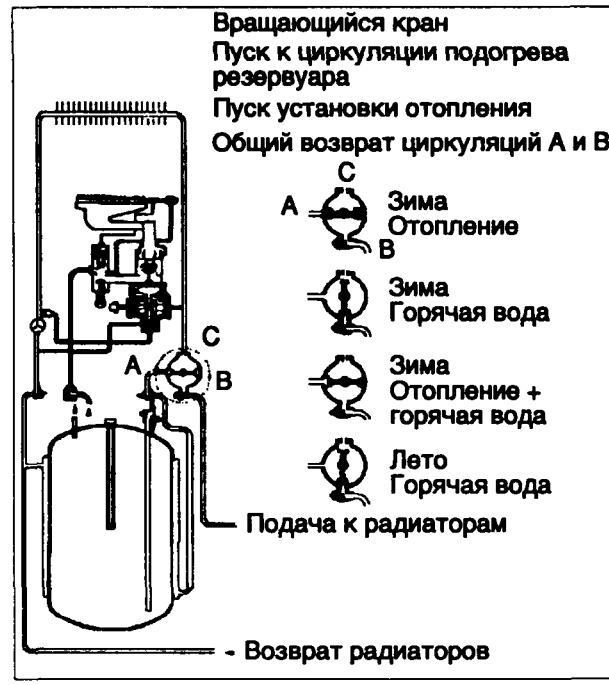
· потребитель – владелец настенного смешанного постоянно действующего котла просит увеличить количество горячей воды, производимой аппаратом (больший расход);

· требования потребителя по расходу и количеству горячей воды более высокие, чем может ему дать аппарат, который он хочет приобрести.

В этом случае комбинированный аппарат состоит из постоянно действующего смешанного котла и подсоединенного сосуда для хранения горячей воды.

— Производство горячей воды через аккумулятор

Это решение состоит в снабжении горячей водой, выходящей из котла, теплообменника системы отопления, нагревающего санитарную воду в резервуаре-аккумуляторе.



Принципиальная схема объемного водонагревателя.

Этот теплообменник может быть с обогреваемой рубашкой, как показано ниже на рисунке, или змеевиком, погруженным в сосуд. В этих случаях котел, предусмотренный для реализации этого эффекта, оборудован трехходовым краном, управляемым электрическим сервомотором, связанным с контактом термоклапана сосуда.

Когда термоклапан сосуда требует обогрева, система отопления подключается на теплообменник и котел пускается в работу.

Наземный котел.

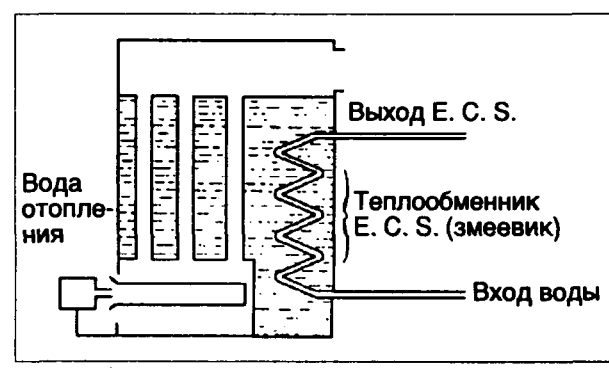
Отопление осуществляется так же, как у простого котла.

Горячее водоснабжение:

Существует 2 способа получения горячей воды по разным технологиям. Однако, в противоположность настенному котлу, способ получения путем аккумуляции является наиболее подходящим для наземного котла.

· Проточное производство

Этот способ реализуется на наземных котлах старой конструкции. Котлы обычно имеют большую емкость воды для системы отопления.



Наземный котел.

Производство аккумуляционное

Можно различить два устройства, разработанных конструкторами:

— резервуар для горячей воды погружен в воду системы отопления;
— резервуар для производства горячей воды отделен от нагреваемого корпуса (этот резервуар может быть помещен в облицовку котла).

Получение горячей воды с помощью смешанного котла.

Можно подвести итог, сказав, что котел постоянного (мгновенного) производства имеет лучший КПД, в то время как наземный котел большой емкости воды для отопления – наихудший. Это особенно верно для производства горячей воды летом (без отопления жилищ). КПД производства летом тем выше на мгновенных котлах, чем меньше потребление газа запальником, работающим непостоянно (аппарат без запальника).

На графике дается средний КПД производства горячей воды летом. Эти величины получены определением средних величин замеров на аппаратах одинаковой технологии. Как и для аппаратов производства горячей воды, констатируем, что КПД значительно возрастает по мере увеличения суточного разбора воды.

8.5.2.6.3.3.1.3. Котлы-конденсаторы

Поиски экономии энергии привели конструкторов котлов к максимальному использованию энергии, развиваемой продуктами сгорания газа. Часть этой энергии составляет скрытая теплота конденсации водяных паров, образующихся при сжигании газа.

В классических котлах это тепло не используется, температура продуктов сгорания достаточно высока, чтобы избежать конденсации в аппарате и дымоходе.

В котле-конденсаторе, который давно используется для коллективного отопления, температура выхода продуктов сгорания, напротив, достаточно низкая для того, чтобы происходила конденсация в котле, что позволяет рекуперировать скрытую теплоту конденсации воды и, кроме того, увеличить количество тепла, отбираемого от сгораемого газа.

Выигрыш, полученный таким образом, составляет 15 - 25% по отношению к классическому котлу, имеющему хорошие энергетические показатели.

Это значительное увеличение КПД сопровождается:

— выходом продуктов сгорания с низкой температурой;
— конденсацией в котле (который приспособлен к этому процессу) некоторой части паров воды, создающихся при горении газа.

Установке котла-конденсатора присуще, таким образом, некоторые особенности по сравнению с классическим котлом.

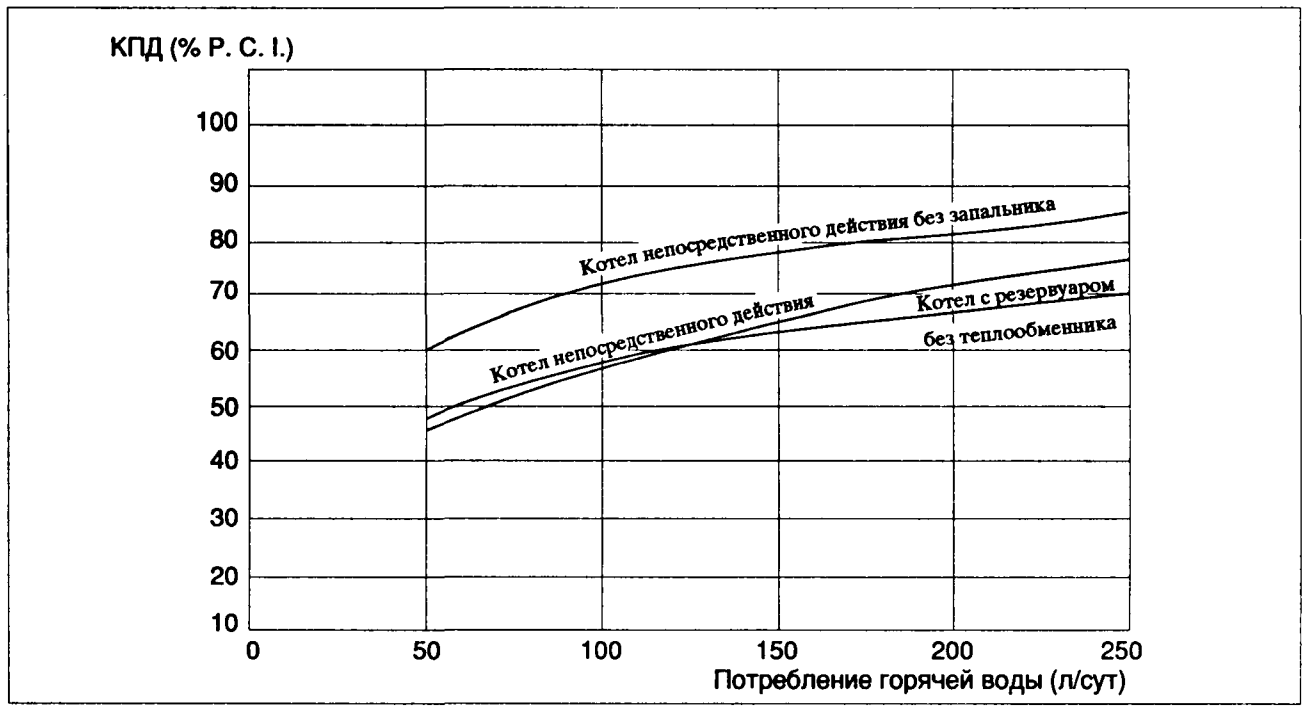
G.D.F. издала материалы, которые могут служить руководством к установке этих аппаратов с учетом имеющегося опыта и проведенных исследований.

8.5.2.6.3.3.2. Котлы для коллективного (централизованного) отопления

8.5.2.6.3.3.2.1. Описание

Имеется два типа котлов большой мощности (> 70 кВт):

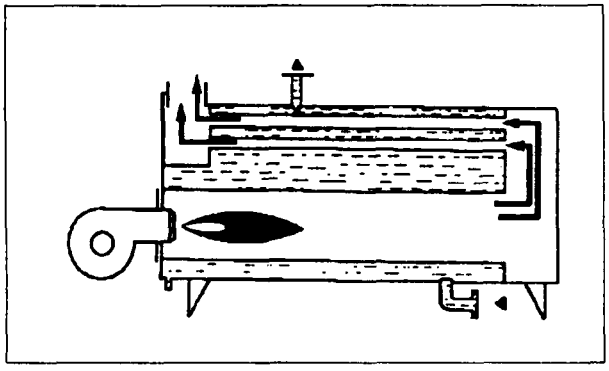
— аппараты с топкой под давлением (двухпроводные горелки);
— аппараты с естественной тягой (атмосферные горелки).



Настенный котел с двойным назначением: КПД E.S.C.

8.5.2.6.3.3.2.1.1. Котлы с топкой под давлением

Технология, часто используемая для аппаратов под давлением, состоит в создании труб-топок и домовых труб.



Котел с топкой под давлением.

Сжигание осуществляется в трубе-топке, где осуществляется передача тепла излучением от пламени к стенке; затем продукты сгорания отдают тепло воде отопления конвекцией в погруженных трубах.

Аппараты работают под давлением воды от 4 до 5 бар и их мощность изменяется от 70 до 10 000 кВт в зависимости от модели.

8.5.2.6.3.3.2.1.2. Котлы с естественной тягой

Схема этих аппаратов аналогична схеме наземного домового котла с естественной тягой. Теплообменники и корпуса нагрева часто представляют собой элементы из чугуна, меди или стали; такие элементы могут служить для создания нескольких одинаковых котлов, число элементов изменяется в зависимости от мощности. В качестве горелок используются рампы, число которых зависит от мощности. Этого типа котлы могут иметь мощность от 70 до 10 000 кВт в зависимости от модели.

8.5.2.6.3.3.2.2. Совместное производство горячей воды

Различают два способа:

— производство с помощью сосуда и теплообменника;

— производство мгновенное (постоянное) с помощью теплообменника с обязательным промежуточным хранением тепла между котлом и теплообменником.

8.5.2.6.3.3.2.2.1. Сосуд и теплообменник

Эта система аналогична применяемой в индивидуальных зданиях. Система горячего водоснабжения имеет свой собственный насос и свой трехходовой клапан, позволяющий поддерживать температуру обратной воды в котле выше 55°C. Открытие трехходового клапана горячей воды и пуск циркуляционного насоса осуществляется терморегулятором, установленным на сосуде. Горячая вода распределяется по квартирам по своей циркуляционной сети.

8.5.2.6.3.3.2.2.2. Теплообменник

Теплообменник для нагрева горячей воды, обычно – теплообменник пластинчатого типа.

8.5.2.6.3.3.2.2.3. Резервуар-тампон

Установка состоит из резервуара хранения энергии (в виде горячей воды) между котлом и системой циркуляции горячей воды (E.C.S.).

Нагрев резервуара осуществляется до момента достижения температуры нижней части 80°C.

Нагрев прекращается, когда температура верхней части достигает 60°C. Температура на выходе поддерживается 55°C с помощью трехходового крана.

Хранение энергии позволяет производить максимальное дневное количество горячей воды с одним котлом небольшой мощности.

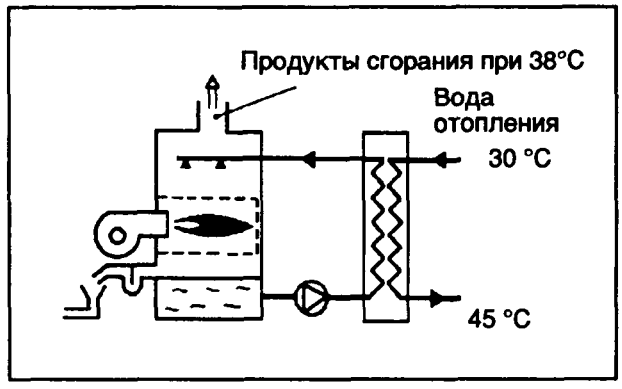
8.5.2.6.3.3.2.3. Коллективный котел-конденсатор

8.5.2.6.3.3.2.3.1. Котел с прямым обменом

Первый котел-конденсатор коллективного пользования был с прямым обменом между продуктами сгорания газа и нагреваемой водой. Эти аппараты предназначены для нагрева до низкой температуры (30 - 45°C) из-за испарения воды в продуктах сгорания при температуре выше 45°C (быстрое падение качества и большие потери воды).

Как показано на рисунке, теплообменник позволяет изолировать воду котла от воды системы нагрева. Это делается, чтобы избежать попадания закисленной CO_2; O_x; O_2 воды и улучшить (смягчить) качество циркулирующей горячей воды.

Констатируется, кроме того, что температура продуктов сгорания может опуститься до 38°C.



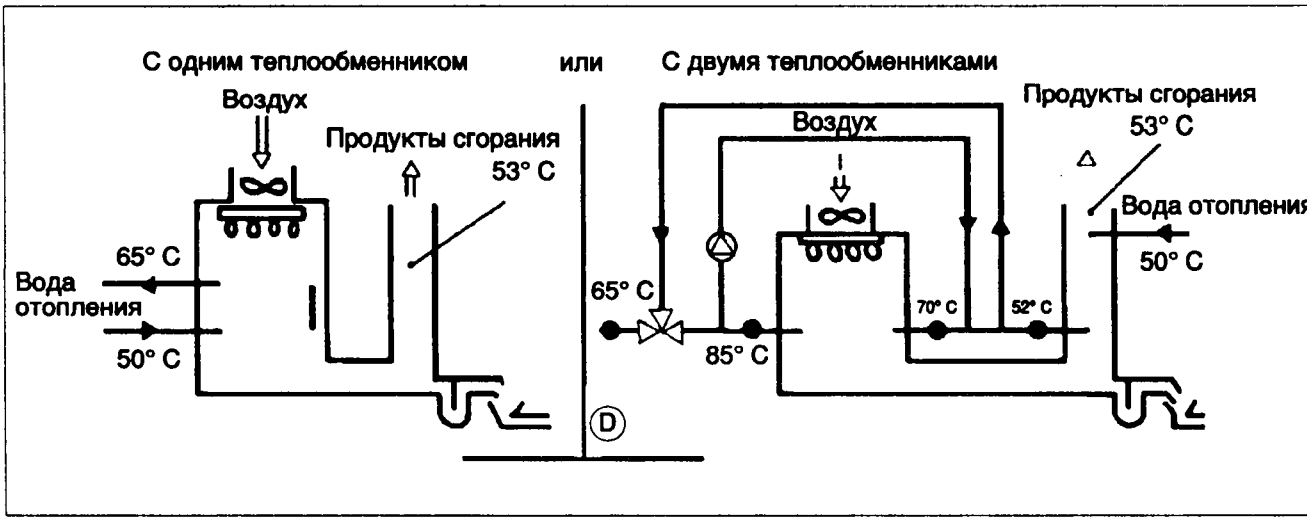
Котел-конденсатор с непрямым теплообменом (влажный способ).

Котлы непрямого обмена в процессе развития были заменены котлами прямого обмена из-за гибкости их использования (возможен нагрев до высокой температуры в нижней части). Напротив, рекуператоры прямого обмена получили широкое распространение особенно для котлов мощностью ≥1000 кВт.

8.5.2.6.3.3.2.3.2. Котел непрямого обмена

Различают котлы с одним теплообменником, улучшенные – с двумя теплообменниками (один конденсатор и основной теплообменник).

Один теплообменник котла может быть разделен на две части: зона горячая и зона холодная. Холодная зона снабжается обычно обратной водой отопления. Схема циркуляции воды этих кот-



Котел-конденсатор с непрямым теплообменом (сухой способ).

лов очень простая: соединение "выход отопления", соединение "возврат отопления".

В котле с двумя теплообменниками часть холодной воды, т.е. конденсатор, физически отличается от горячей зоны, т.е. теплообменника основного. Схема гидравлической циркуляции котла более сложная, чем у котла с одним теплообменником. Насос осуществляет орошение с расходом, достаточным для основного теплообменника.

Байпас основного теплообменника позволяет поддерживать в нем необходимый расход. В действительности, в межсезонье вода, выходящая из конденсатора, может иметь температуру ниже 55 °C, что может вызвать паразитическую конденсацию в основном теплообменнике. Байпас позволяет регулировать расход холодной воды через основной теплообменник и, таким образом, регулировать температуру на его входе. Трехходовой кран, снабженный регулятором, управляет открытием и закрытием байпаса в зависимости от температуры на входе в основной теплообменник.

8.5.2.6.4. Особые генераторы тепла

8.5.2.6.4.1. Тепловые газовые насосы

Эти аппараты описаны в § 8.5.6.

8.5.3. Коммерческое и ремесленническое применение

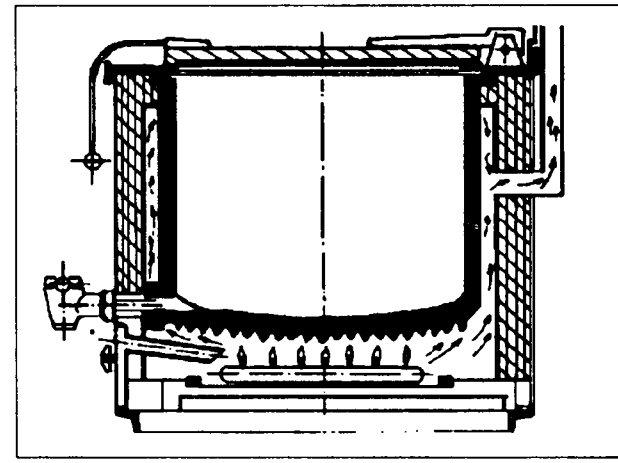
8.5.3.1. Колбасные изделия – соления

В этом секторе от 30 до 40% тоннажа колбасных изделий – солений производится семейными ремесленными предприятиями.

Печи колбасного производства мало отличаются от общественных (коллективных) ресторанов и включают следующие основные элементы:

— мармиты, баки которых, чтобы соответствовать нормам гигиены, выполнены литьем из одной детали или нержавеющей стали для облегчения очистки. Регулирование температуры варки осуществляется путем воздействия на газовый кран или, лучше, с помощью термостата. Существуют мармиты круглые, квадратные или прямоугольные, различной емкостью – от 30 до 500 литров и от 5 до 70 кВт установленной мощностью;

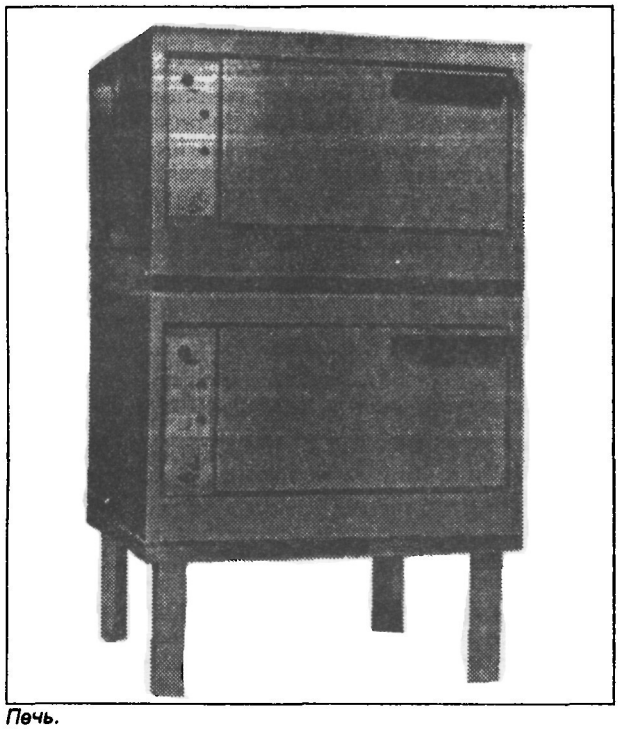
— печи (плиты) в один или несколько этажей, идентичные ресторанным печам;



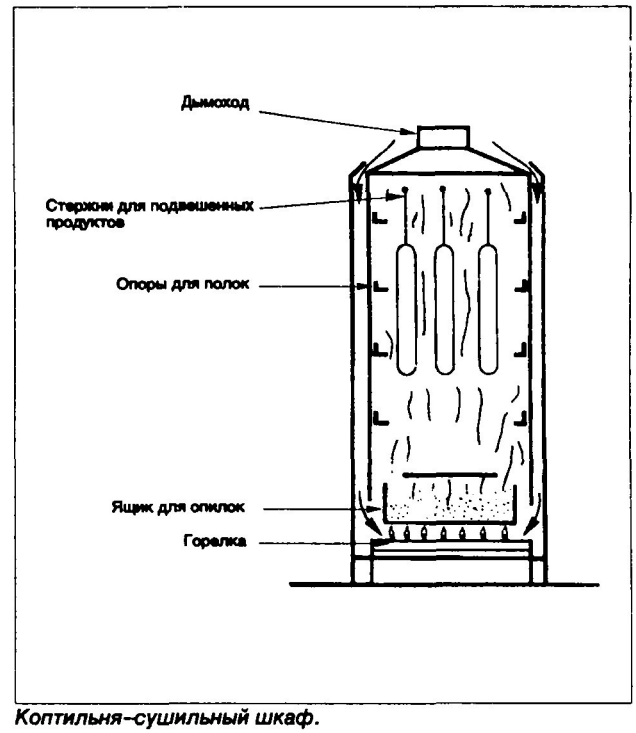
Мармит.

— котлы для ветчины, которые представляют собой квадратные мармиты, оборудованные автоматическим регулятором температуры (между 65 и 68 °C);

— сушильные шкафы, которые имеют вид шкафа, в котором можно вешать и размещать на этажерке продукты для сушки, жарения или копчения.

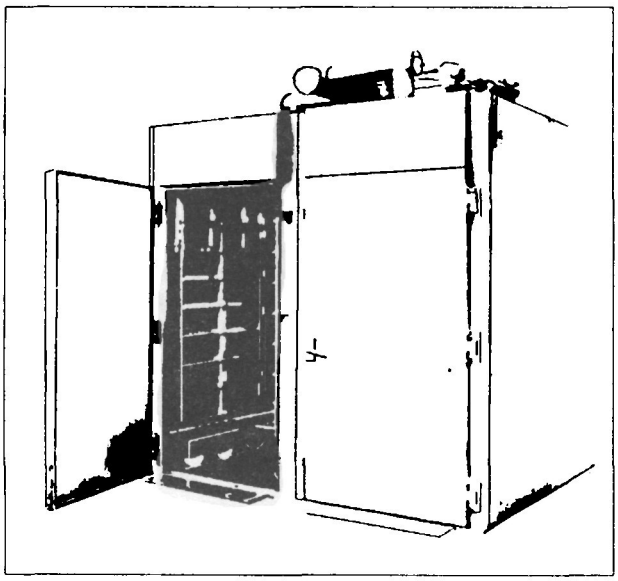


Печь.



Коптильня–сушильный шкаф.

Сушильные и жарочные шкафы оборудованы вентилятором, расположенным обычно в верхней части шкафа, который перемешивает горячий воздух, идущий от турбулентного теплообменника, в котором циркулируют продукты сгорания горелки. Горячий воздух может циркулировать по закрытой схеме или схеме с частичным обновлением воздуха. Эти шкафы могут оборудоваться системой программирования температуры, времени, вентиляции и т.д.;



Сушильный шкаф.

— коптильная печь – аппарат в нижней части, имеет ящик для древесных опилок, которые медленно горят под воздействием пламени горелки, расположенной под ящиком.

8.5.3.2. Водонагреватели коммерческого, общественного и кустарного секторов

8.5.3.2.1. Горячая вода в сфере обслуживания

Производство горячей воды обслуживания и санитарной воды является заботой, которой заняты все предприятия сферы обслуживания.

Потребности в горячей воде сектора самые различные, но существует большой перечень генераторов, отвечающих на все запросы.

8.5.3.2.2. Оборудование для производства горячей воды

Можно различить два типа оборудования:

— аппараты для маленьких учреждений сферы обслуживания (коммерческие и кустарные). Это генераторы жилого сектора или их модификации;

— аппараты для больших объектов сферы обслуживания (гостиницы, больницы), которые аналогичны аппаратам, применяемым для производства горячей воды в коллективных домах с помощью пластинчатого теплообменника или аккумуляторного резервуара большой емкости.

8.5.3.2.3. Специальное оборудование

Некоторые конструкторы предлагают перечень оборудования, которое хорошо отвечает на специфические запросы большого постоянного или прерывистого потребления сектора обслуживания. Водонагреватель с аккумулятором ультрабыстрого нагрева с конденсацией или без нее.

8.5.3.2.3.1. Общая характеристика

В принципе техника простая и надежная. Они состоят из цилиндрического сосуда, в котором находятся топка и теплообменник.

Они характеризуются временем нагрева от 20 до 30 мин, необходимым для нагрева нескольких сот литров (до 500 литров и более) от 15 до 65°C, так же как постоянным и большим расходом. Плюс к этому, благодаря своему резерву, они способны удовлетворить большие одноразовые требования в процессе опорожнения.

Заметим, что эти аппараты соединяются либо с дымоходом (трубой), либо с герметичным вантузом.

8.5.3.2.3.2. Примеры

G.D.F. разработала совместно с различными изготовителями несколько водонагревателей этого типа.

8.5.3.2.3.2.1. "Chaudagaz" – Société Collardet Trolart ("Горячий газ")

Это конденсационный аппарат. В верхней части топки трубка забирает горячий газ. Она представляет из себя змеевик и осуществляет выход газа в нижней части через дымоход или герметичный вантуз. Этот процесс позволяет охладить горячий газ и сконденсировать часть водяных паров, которые он содержит. Отсюда очень высокий КПД, близкий к 105% P.C.I. "Горячий газ" оборудован горелкой с вентилятором для того, чтобы поддерживать топку под небольшим давлением и компенсировать потери давления, создаваемые змеевиком.

Мощность, кВт	Расход от 15 до 65°C, л/ч	Емкость корпуса, л
40	680	250
70	1 200	500

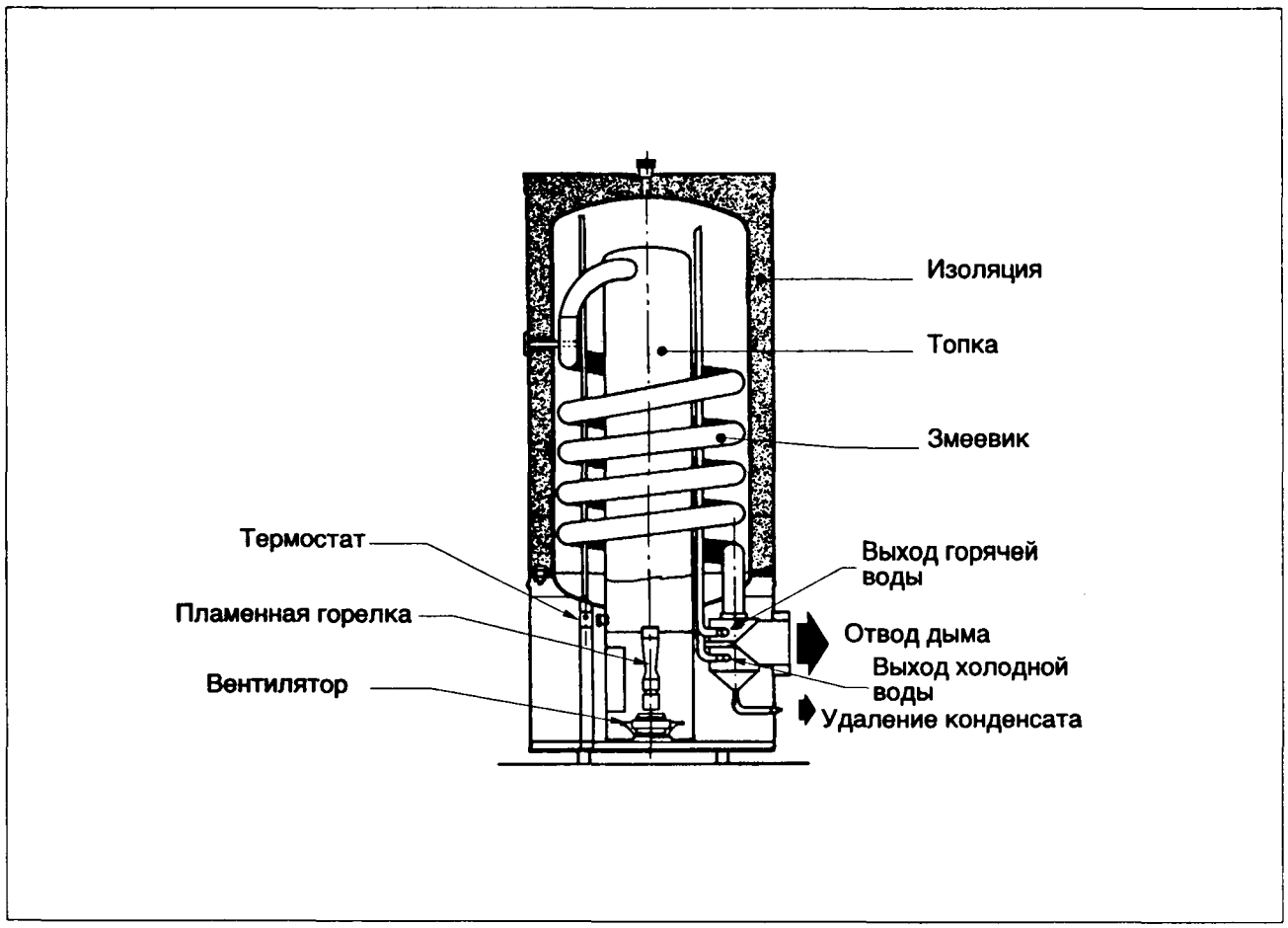
Характеристика «Горячего газа».

8.5.3.2.3.2.2. Аккумуляторы серии "HR"

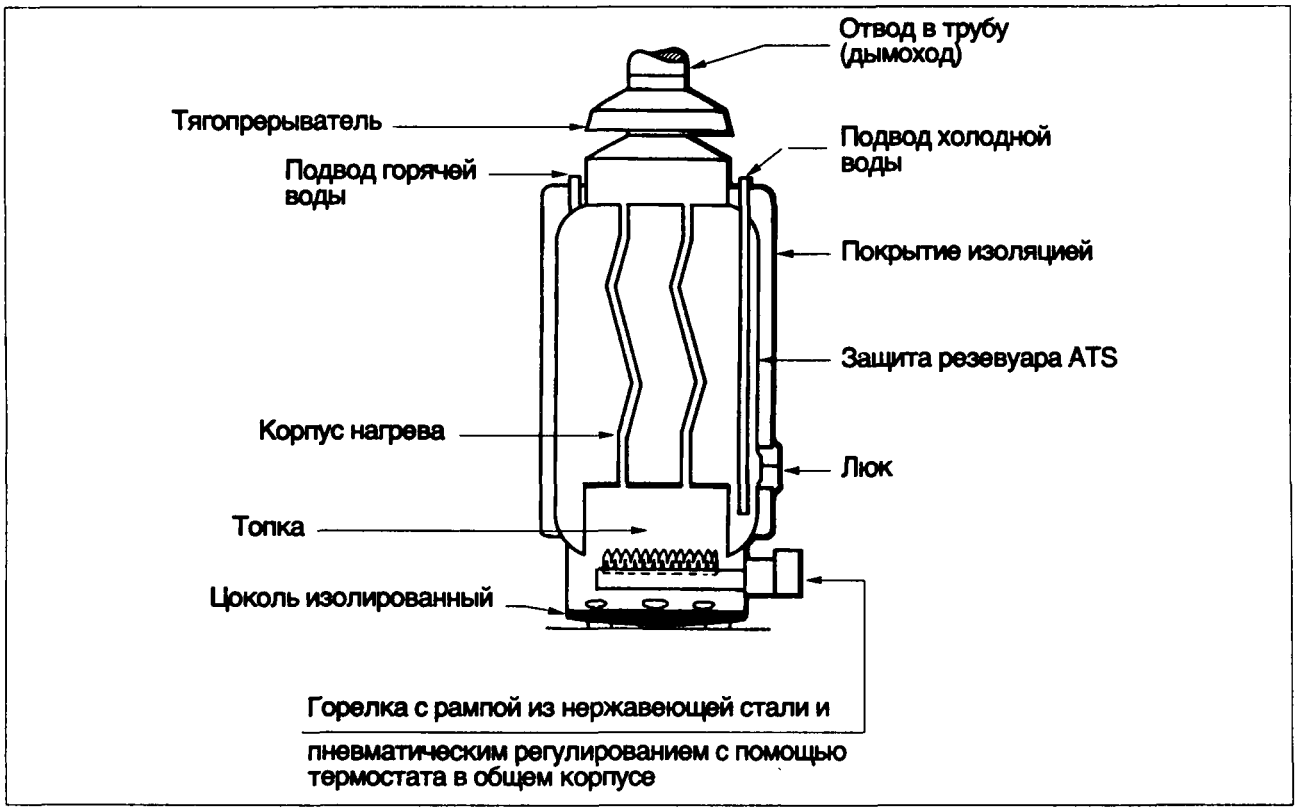
Аккумуляторывысокого КПД "HR" Societe Styx имеют газовый нагрев, функционируют без потребления электроэнергии; их КПД превосходит 90% P.C.I.

Мощность, кВт	Постоянный расход от 15 до 65°C, л/ч	Емкость корпуса, л
18	300	200
36	640	300
60	1 040	400

Характеристика аккумулятора «HR» (Styx).



Вид аппарата "Горячий газ".



Разрез аккумулятора "HR" (Styx).

8.5.3.3. Обработка текстиля. Утюжка, гладильный пункт

8.5.3.3.1. Пар

Пар при утюжке используется либо непосредственно в оборудовании обработки (прессы, гладильные столы и т.д.), либо косвенно, как теплоноситель для машин сухой чистки.

Давление использования обычно 6 бар (относительных), откуда температура пара около 165°C на выходе из котла. Этот пар должен быть "сухим насыщенным", т.е. не содержать никаких следов воды в жидкой форме.

Несколько лет назад потребность в паре составляла 120 кг/ч пара для среднего гладильного пункта, оборудованного гладильным столом, прессом и машиной для сухой чистки.

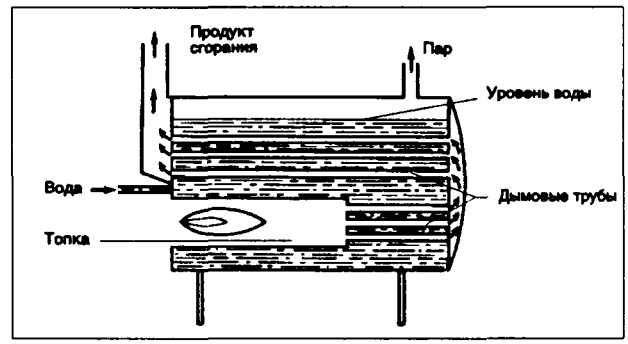
В настоящее время с новым оборудованием, более экономичным по пару, и рациональной паровой сетью это потребление не превышает 60 кг/ч.

8.5.3.3.2. Котлы

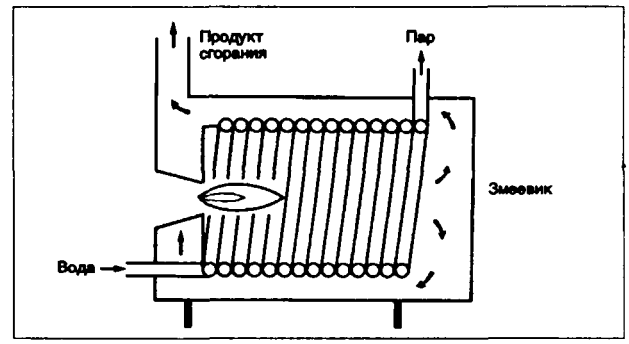
8.5.3.3.2.1. Различные типы котлов

Существует два типа котлов:

— с нормальным испарением, характеризующимся относительно большим резервом воды и пара, а также временем поднятия давления порядка 15 - 30 минут;
— с мгновенным испарением, характеризующимся очень небольшим резервом воды, позволяющим поднимать давление за несколько минут. Недостатком этого аппарата является то, что он вырабатывает пар непостоянного качества по сравнению с котлами, имеющими резерв пара.



Котел с резервом воды и пара.



Котел непосредственного действия.

8.5.3.3.2.2. Безопасность. Регламентация

Паровые котлы оборудуются системой безопасности и регулирования, которая обеспечивает работу горелки и поступление воды как при наличии воды,так и при наличии давления пара: питательный насос воды, указатель уровня воды, регулятора давления пара и т.д.

Паровой котел не попадает под правила для аппаратов, работающих под давлением водяных паров, если объем резерва воды и пара меньше 25 л. В противном случае они должны подчиняться правилам, которые требуют ежегодного обследования и гидравлических испытаний каждые 10 лет.

Зато в установках не возникает напряжения, т.к. котлы относятся к третьей категории аппаратов, работающих под давлением пара.

8.5.3.3.3. Правила установки

Прежде всего необходимо иметь котел, хорошо отвечающий потребностям. Котел, мощностью меньшей необходимой, будет причинять большие неудобства. Напротив, котел с повышенной мощностью будет иметь плохой КПД эксплуатации.

Необходимо изолировать и правильно определить размеры сети распределения пара.

Очень часто необходимо предусматривать подготовку воды.

Также желательно устанавливать котел в специальном помещении, которое изолировано от паров растворителя (перхлорэтилен, фтористые растворители), присутствующих в атмосфере глажения. Эти пары легко греют как поверхности котла, так и дымоход.

8.5.3.3.4. Тенденции и эволюция котлов

G.D.F. совместно с различными изготовителями изучают новые аппараты, позволяющие:

— иметь меньшую установленную мощность, более соответствующую новым потребностям (30 - 40 кг/ч паров);
— получить более высокий термический КПД (котел с КПД 90% P.C.I.), чем классический котел (между 70% – для котлов, оборудованных атмосферными горелками, и 80% – для котлов, оборудованных двухпроводными горелками);
— осуществить герметичное соединение с вантузом, делающим котел совершенно независимым от помещения, в котором он установлен, и выйти в дымоход.

8.5.3.4. Обработка текстиля. Прачечная

8.5.3.4.1. Описание прачечной

Некоторая деятельность сектора обслуживания (больницы, рестораны, гостиницы) требуют наличия прачечных для того, чтобы осуществлять стирку и сухую чистку. Оборудование, используемое для сухой чистки, такое же, как и для глажения.

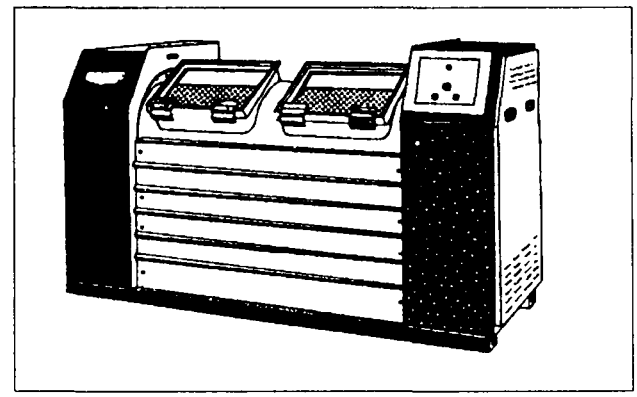
Для стирки используются в основном:

— стиральные машины (наиболее часто – автоматические);
— сушилки;
— гладильный пресс, который иногда осуществляет сушку белья.

8.5.3.4.2. Оборудование

8.5.3.4.2.1. Для стирки

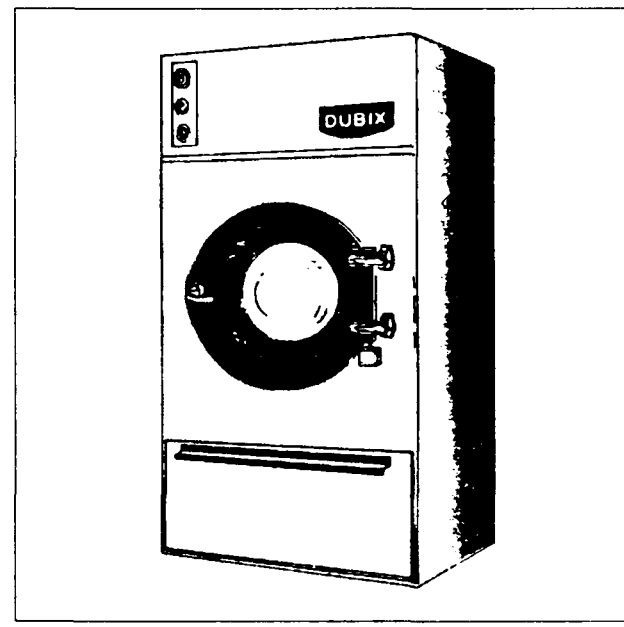
Стиральная машина включает горизонтальный барабан, содержащий белье, который совершает движение в разных направлениях внутри сосуда, наполненного водой и моющими средствами. Горячая вода производится либо путем прямого нагрева барабана, либо отдельным водонагревателем.



Стиральная машина-центрифуга.

8.5.3.4.2.2. Сушильный шкаф

Это – корпус, внутри которого находится вращающийся барабан с бельем для сушки.

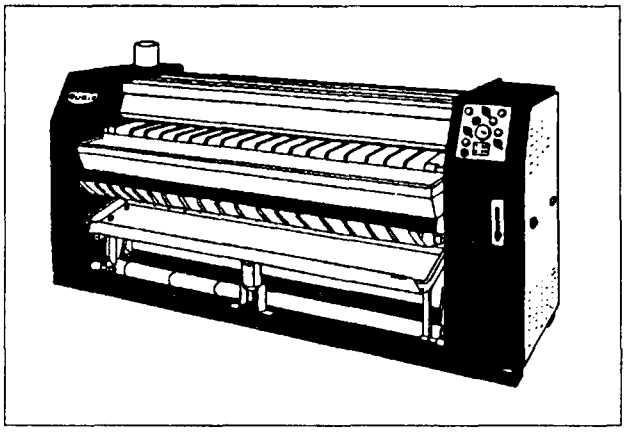


Сушильный шкаф с вращающимся барабаном.

Тепло производится либо прямым нагревом от атмосферной горелки, нагревающей непосредственно воздух, либо косвенно, посредством теплообменника.

8.5.3.4.2.3. Сушильно-гладильный пресс

Он предназначен для плоского белья. Сушильно-гладильный пресс включает нагреваемый цилиндр, имеющий по оси рамповую горелку. Белье, которое должно гладиться, поступает без протяжки между бесконечной лентой из коврового материала и наружной частью цилиндра, вес и вращение которого сжимают белье.



Сушильно-гладильный пресс.

8.5.3.5. Сушка и обжиг краски

8.5.3.5.1. Наложение и сушка краски

8.5.3.5.1.1. Наложение

В течение этого времени воздух имеет температуру около 20 - 25°C. Воздух постоянно обновляется с целью очистки в процессе наложения краски.

8.5.3.5.1.2. Сушка

В процессе этой операции максимальная температура воздуха поддерживается равной 80°C. Воздух обновляется частично или полностью.

8.5.3.5.2. Тип кабин

Обычно кабины смешанные, т.е. они способны осуществлять последовательно наложение и сушку краски, поддерживая вентиляцию между двумя операциями таким образом, чтобы избежать накопление растворителя.

Существуют также кабины, осуществляющие только сушку краски.

8.5.3.5.3. Источники тепла

8.5.3.5.3.1. Сушка воздушными струями (воздух, нагретый непосредственно пламенем)

В этом процессе, с очень высоким КПД, нагреваемый воздух проходит через пламя атмосферной горелки, расположенной в вентиляционном коробе. Нагрев воздушными струями очень хорошо подходит к смешанным кабинам.

В процессе наложения (нанесения) загрязненный воздух полностью удаляется.

В процессе сушки, с целью экономии тепла, часть горячего воздуха поступает в систему рециркуляции. Часть загрязненного воздуха (около 20%) постоянно удаляется, заменяясь новым. Воздух в системе рециркуляции постоянно содержит пары растворителя, но установка рассчитана таким образом, чтобы концентрация паров растворителя не превышала 0,2%.

8.5.3.5.3.2. Непрямой подогрев воздуха (с помощью теплообменника)

Пламя не имеет контакта с парами растворителя. Существует риск внутренней коррозии теплообменника. Процесс также хорошо адаптируется к смешанным кабинам.

8.5.3.5.3.3. Инфракрасное излучение

Два типа аппаратов могут использоваться для получения инфракрасного излучения:

— радиационные панели, формируемые беспламенным каталитическим горением. Эта техника, развиваемая в настоящее время, не содержит никакого риска воспламенения паров растворителя;

— нагретая металлическая стенка (сетка), которая испускает инфракрасное излучение.

Инфракрасное излучение особенно успешно применяется в сушке.

8.5.3.6. Кустарная (ремесленническая) булочная

Выпечка продукции в булочных кустарей осуществляется в печах непрерывного действия. Среди этих печей можно выделить шесть больших видов.

8.5.3.6.1. Печи тяжелые кирпичные

Это аккумуляционные печи, называемые "gallo-romains", обогреваются периодически. Они сделаны полностью из кирпича, имеют вес от 50 до 70 тонн и имеют дверцу в форме гильотины спереди для загрузки теста лопатой. Выпечная камера имеет отражательный под и свод. Она может обогреваться дровами или газом (жидкое топливо для прямого обогрева запрещено):

— в первом случае дрова разжигаются на поду и загрузка дров продолжается до тех пор, пока накопленное тепло достаточно для выпечки. Перед загрузкой необходимо осуществить очистку пода;

— во втором случае газовая передвижная горелка имеет подвижный колосник. Он устанавливается в положение нагрева с открытой дверью.

Выпечная камера имеет в задней части свода два газохода (начало дымохода). Эти печи имеют поверхность пода от 10 до 12 м² и требуют большой установленной мощности – 12,5 кВт/м² пода, иногда больше. Расход составляет от 160 до 180 кВт · ч на центнер выпекаемой муки.

8.5.3.6.2. Печи с паровыми трубами "Perkins"

Паровая печь была определенным прогрессом в хлебопечении, так как камеры для выпечки в этом случае не зависят от камеры нагрева.

Камера выпечки обогревается с помощью паровых труб, герметично закрытых, типа "Perkins", заполненных на две трети дистиллированной водой. Эти трубы распределены над и под камерой выпечки.

Топка оборудуется сзади и сбоку от печи: паровые трубы проходят в топку, где они получают тепло, которое должны передать в камеру выпечки.

Постоянство подогрева позволяет увеличить производительность.

Горелка, расположенная в нижней части топки, имеет две рампы вдоль нее. Рампы, расположенные горизонтально, нагревают трубы снизу, и другие, расположенные вертикально, нагревают верхние трубы.

Рампы одинаковые, можно изменять их мощность и соотношения, так же как и нагрев печи. Этот тип печи имеет часть, выполненную из кирпича, который дает ей относительно высокую термическую инерцию, и требует термической установленной мощности около 12 кВт/м² пода печи.

8.5.3.6.3. Печи с кольцеобразными паровыми трубами "Manesmann"

Камера выпечки сделана из стали. Она изолирована либо стекловолокном, либо минеральным волокном. Снаружи имеется стальной кожух. Печь обычно имеет несколько подов для выпечки (от 2 до 4). Обогрев выпечной камеры осуществляется паровыми трубами кольцеобразной формы. Каждая труба имеет две части:

— петля, расположенная под камерой выпечки;
— часть, состоящая из ответвлений, окружающих выпечную камеру.

При пуске оборудования нагрева (пламенная горелка) нагревается вода, находящаяся в нижней секции труб. Вода, находящаяся в вертикальной части этой секции, начинает кипеть. Образующиеся пары поднимаются для того, чтобы сконденсироваться в ответвлении труб, нагревая камеру выпечки. Эта сконденсированная вода возвращается в секцию по второму вертикальному ответвлению для подкачки воды в нагреваемую секцию. Этот процесс является циркуляцией термосифоном.

Нагрев осуществляется в каналах и потоках, где продукты сгорания отдают свое тепло более интенсивно, чем в трубчатых печах "Perkins". Установленная термическая мощность меньше, чем в предыдущем случае, составляет 8,5 кВт/м² жарочного пода.

8.5.3.6.4. Печь конвекции горячих газов вокруг выпечной камеры

Это металлическая легкая печь, имеющая обычно несколько жарочных подов.

Топка расположена в нижней части перед печью, и пламя горелки атмосферного или двухпроводного типа развивается внутри топки. Турбина увеличивает циркуляцию горячего газа вокруг закрытой камеры выпечки. Устройство, расположенное на выходе в дымоход, отрегулированное в ходе монтажа, позволяет создать рециркуляцию горячих газов, улучшает также КПД. Термически установленная мощность на этом типе печи составляет 9,5 кВт/м² жарочного пода.

8.5.3.6.5. Печь с принудительной конвекцией горячего воздуха в камере (с теплообменником)

Эта техника является единственной, которая используется на печах с вращающимися или неподвижными легкого типа тележками с одним или двумя жарочными шкафами (одна или две тележки). Корпус выпечной камеры принимает тележку, которая, если она вращается, захватывается вращающейся платформой и крючком, расположенным в верхней части.

Второй корпус, соединенный с первым, содержит оборудование нагрева – топку, которая заканчивается теплообменником и обычно вентилятором, который приводит в движение воздух. Этот воздух, нагретый при контакте с теплообменником, пульсирует в кожухе выпечной камеры через окна, расположенные в боковых стенках.

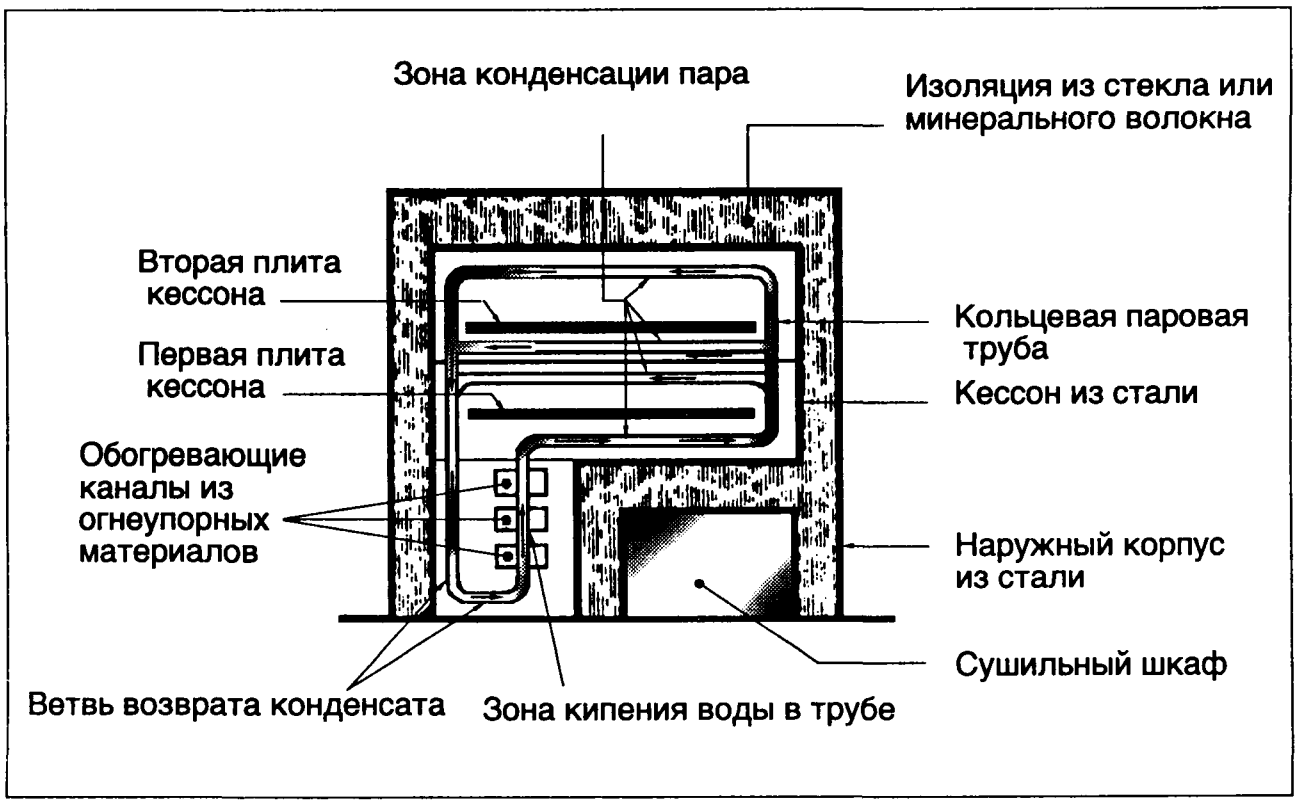
Возможная рециркуляция горячего воздуха позволяет увеличить КПД установки. Топка находится под давлением, всегда применяются двухпроводные горелки. Установленная термическая мощность около 95 кВт (содержимое тележки около 150 батонов).

Заметим, что существует модель печи с меньшей тележкой (70 - 90 батонов), требующая меньшей термической мощности (40 кВт).

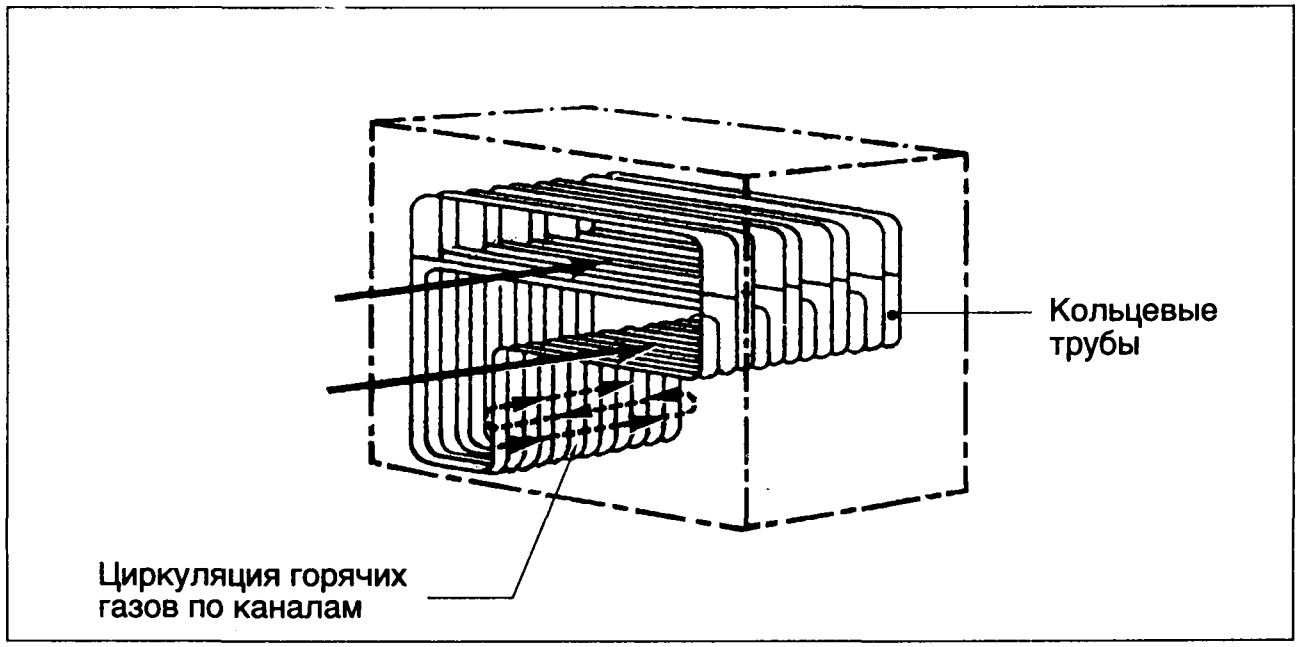
8.5.3.6.6. Печь с принудительной конвекцией горячего газа в камерах (без теплообменника)

Этот тип печи работает по принципу прямого обогрева.

Двухпроводная горелка расположена в камере выпечки, которую можно рассматривать как топку. Вентилятор, расположенный в центральной части, всасывает горячий воздух, чтобы отправить в камеру через боковую стенку, в которой имеются отверстия. Этот простой процесс позволяет очень быстро поднять температуру в корпусе выпечки, мощность горелки используется эффективно (нагрев за 20 минут против 30 - 40 минут) и близка к установленной мощности. Плюс к этому уходящие через дымоход газы имеют температуру немного ниже температуры выпечки (250°C), против 340 - 380°C в классической печи с тележками, что вызы-



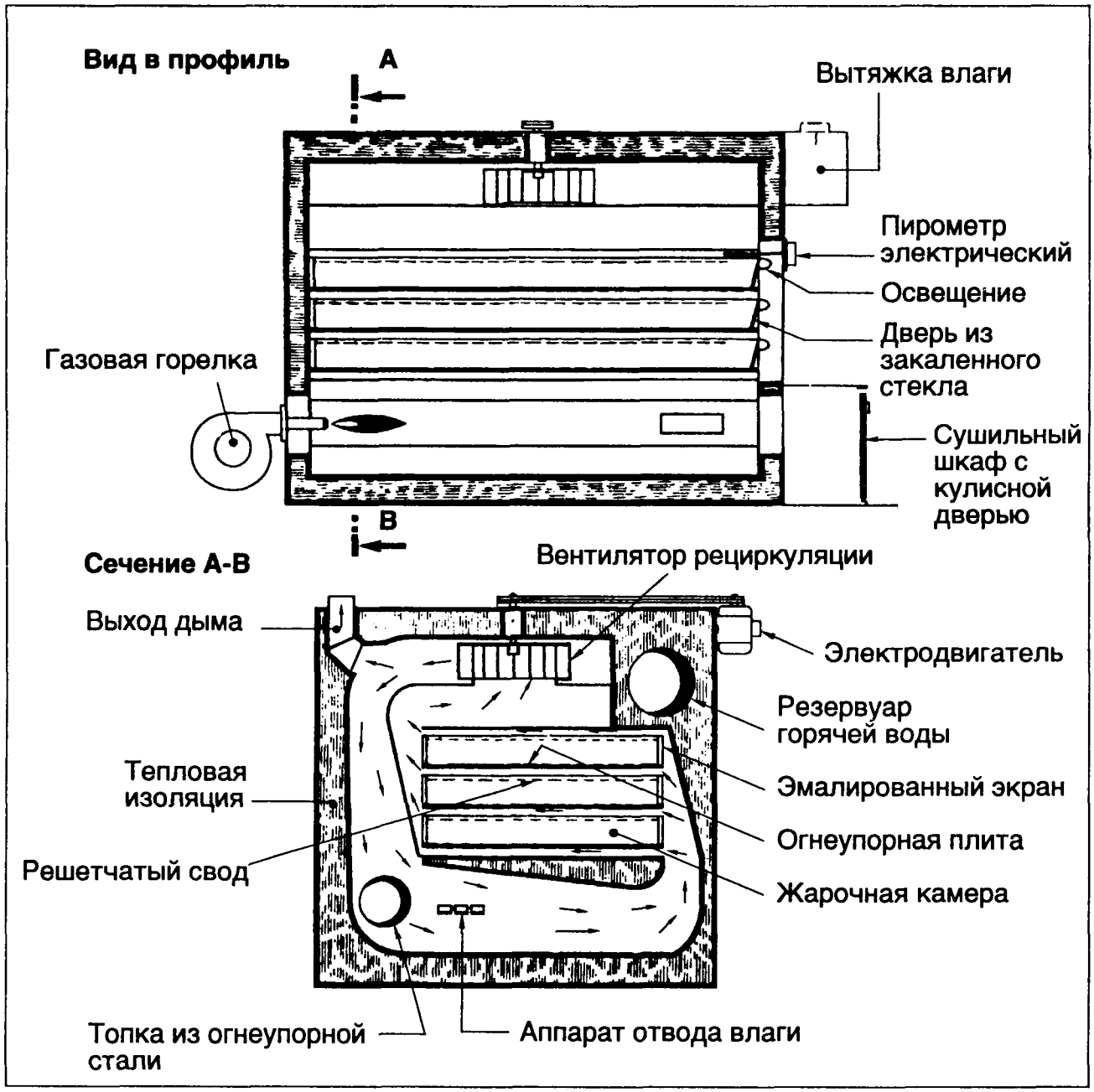
Печь с паровыми кольцевыми трубами типа "Manesmann".



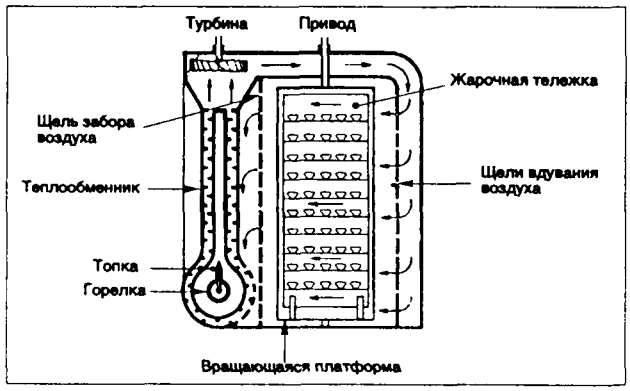
Выпечная камера печи типа "Manesmann".

вает значительное снижение потребления энергии, порядка 40%.

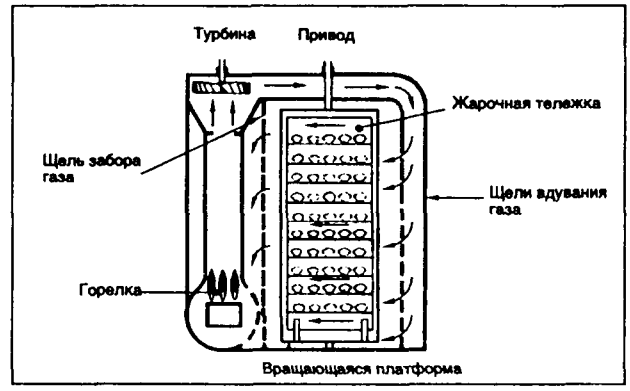
Это усовершенствование стало возможно за счет установки двухпроводной многофакельной горелки, поверхность выхода пламени которой представляет собой керамическую пластину, похожую на блоки, используемые для радиационной светящейся панели. Термическая установленная мощность печи с тележкой на 150 батонов составляет 80 кВт.



Печь с конвекцией горячих газов вокруг выпечной камеры.



Печь с конвекцией горячего воздуха в камере с теплообменником (печь с тележкой).



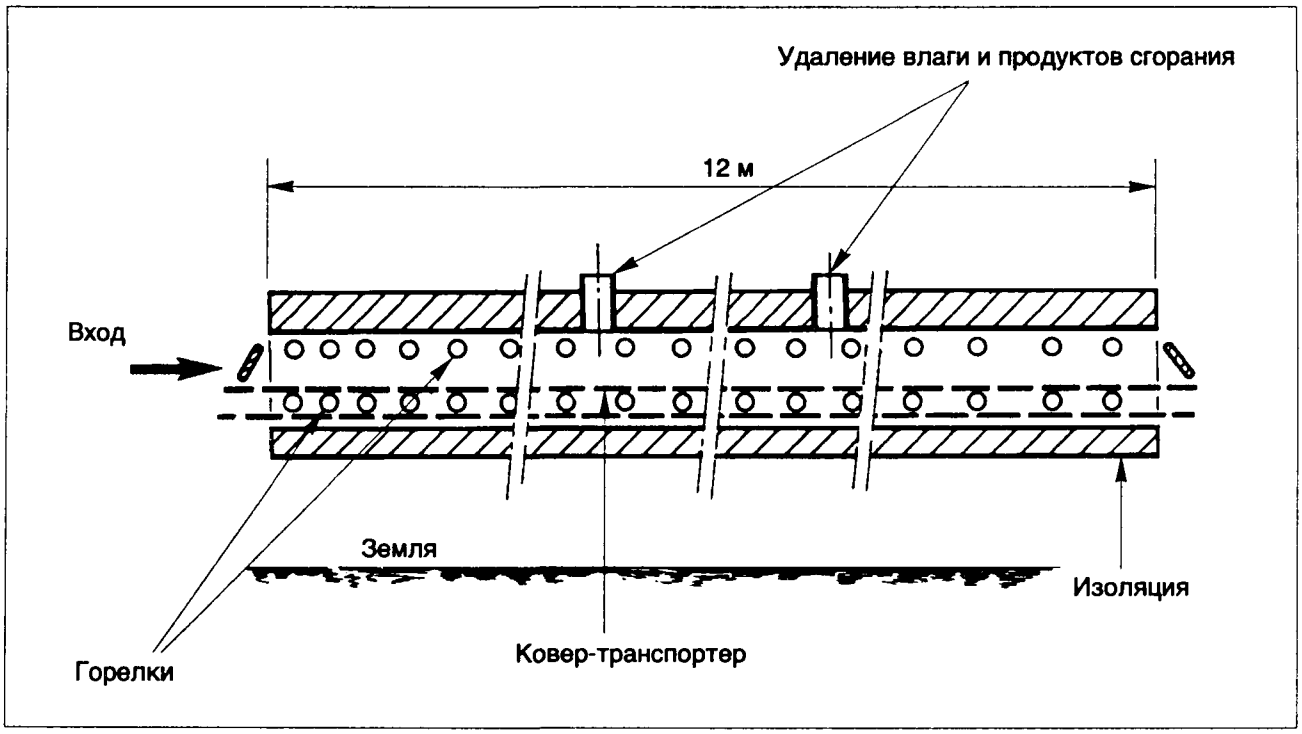
Печь с конвекцией горячего воздуха в камере без теплообменника (печь с тележкой).

8.5.3.7. Промышленные хлебопекарни. Бисквитная и сахарная фабрики

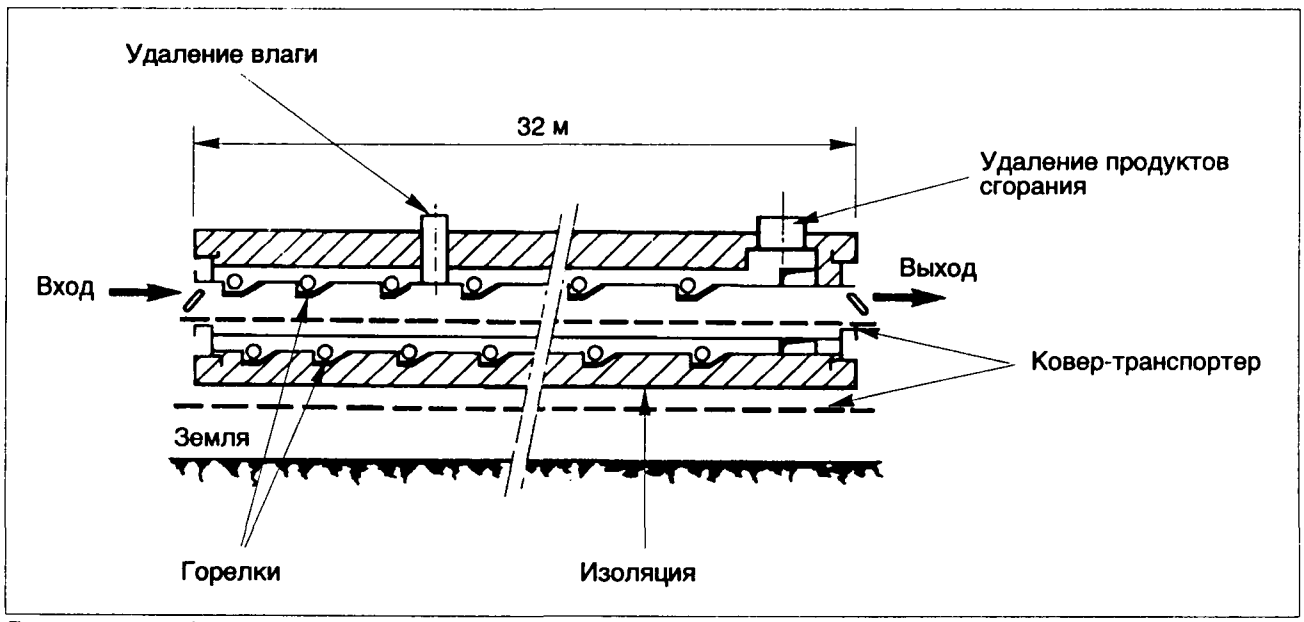
Выпечка продукции хлебопекарной промышленности, бисквитных и сухарных фабрик осуществляется в печах непрерывного действия или туннельных печах. Эти печи в соответствии со своим размером встречаются у ремесленников или в промышленности.

8.5.3.7.1. Печи прямого нагрева

Газовые горелки расположены в камере выпечки с обеих сторон транспортера. Они – небольшой производительности, чтобы избежать точек перегрева, и расположены на небольшом расстоянии друг от друга. Чтобы обеспечить хорошее сжигание, необходим избыток воздуха в газовоздушной смеси. Обычно используются атмосферные горелки с избыточным давлением газа.



Печь прямого обогрева: продольный разрез.



Печь непрямого обогрева: продольный разрез.

8.5.3.7.2. Печь непрямого обогрева

Горелки расположены в выпечной камере над и под ней. Они – полного предварительного смешения, но более мощные и их меньше, чем в предыдущем случае (рисунок с. 749).

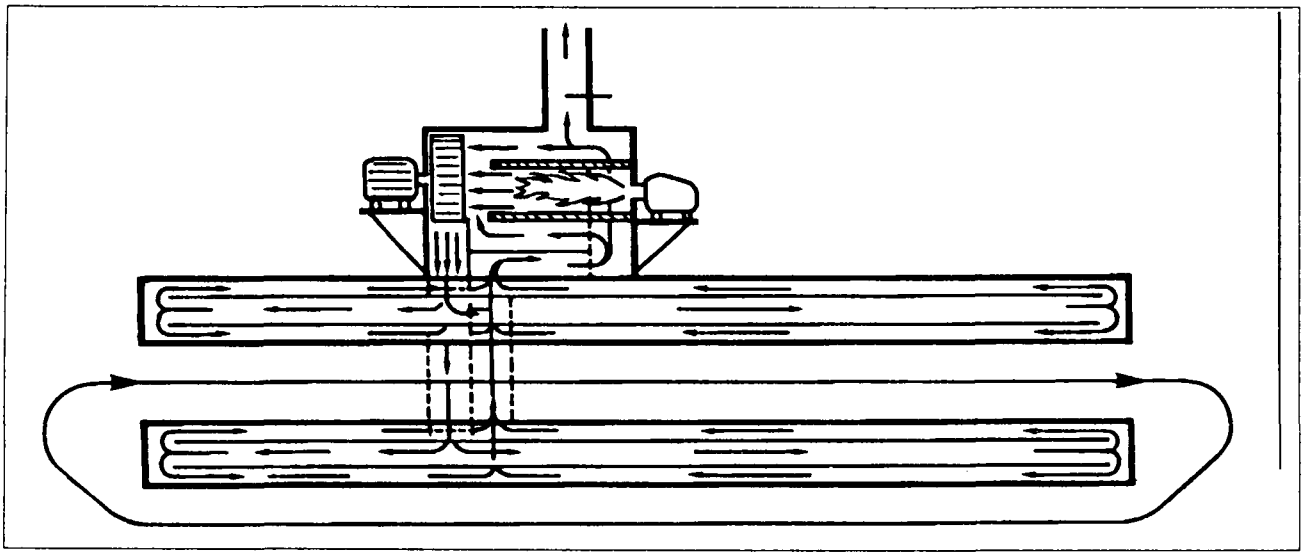
8.5.3.7.3. Циклотермическая печь с непрямым обогревом

Герметичный муфель камеры нагревается принудительной циркуляцией продуктов сгорания. Они поступают из расположенных над печью топок, находящихся на расстоянии пяти - шести метров. Вентилятор всасывает продукты сгорания и нагнетает в камеру печи.

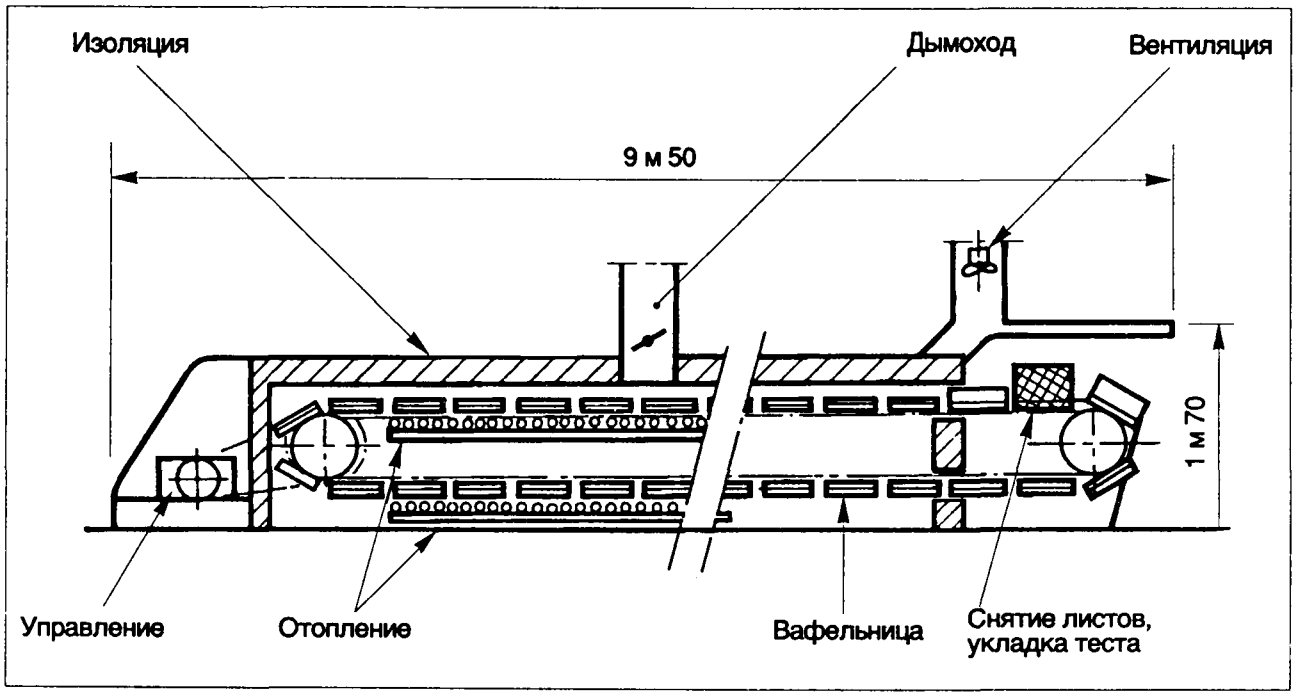
Для расчета общего расхода основываются на мощности около 15 кВт на квадратный метр поверхности печи.

8.5.3.7.4. Машины для вафель

Они включают движущуюся цепь, на которой смонтировано некоторое число вафельниц (от 16 до 36). Эта цепь циркулирует в печи, обогреваемой с помощью двух этажей горелок голубого пламени. Одна группа расположена вверху и нагревает верх вафельницы, другая расположена внизу и нагревает крышку.



Циклотермическая туннельная печь: принципиальная схема.



Машина для вафель: продольный разрез.

Производительность машин изменяется в зависимости от числа вафельниц (или железа). Она делает 400 листов в час для 16 поддонов и 1110 листов в час для 32 поддонов. Эти листы весят в среднем от 38 до 42 грамм.

8.5.3.7.5. Ориентировочное потребление для различного производства

Область применения	Операция	Предусмотренное потребление
Бисквитные фабрики	Выпечка жидкого или мягкого теста	70 - 90 кВт · ч на 100 кг пирожного
	Выпечка твердого теста	35 - 50 кВт · ч на 100 кг пирожного
Бискотные фабрики	Выпечка хлеба	60 кВт · ч на 100 кг хлеба
	Обжаривание бискотов	60 - 65 кВтч на 100 кг бискотов
Вафельные фабрики	Машины от 12 до 18 поддонов	5 - 6 кВт · ч на кг вафель
	Машины с более чем 18 поддонами	3 - 4 кВт · ч на кг вафель

8.5.3.8. Дистилляция на открытом огне

Производство спирта возможно осуществить путем дистилляции продуктов на основе свеклы или вина.

Перегонный аппарат включает:

— котел с собственно перегонным аппаратом, выполненным из электролитической меди. Перегонный аппарат расположен в камере сгорания над радиационной горелкой, работающей на природном газе. Радиационные горелки используются по аналогии с обогревом, получаемым иногда при сгорании угля. Они снабжаются газом под максимальным давлением 1,5 бар и оборудованы атмосферно-индукционными смесителями. Горелка состоит из примерно десяти брикетов, имеющих круглые отверстия, в которых происходит сжигание газа. Эти горелки позволяют осуществлять равномерный нагрев без термической энерции. Регулирование осуществляется вручную, воздействуя на давление газа перед соплом. Термическая мощность составляет примерно 200 кВт на аппарат. Безопасность обеспечивается постоянно действующим запальником с контролем пламени. Зажигание осуществляется вручную. Продукты сгорания циркулируют между стенками камеры сгорания, изолированными слоем вермикулита и аламбика по направляющим, которые улучшают теплообмен. Они удаляются за счет естественной тяги примерно при 180°C;

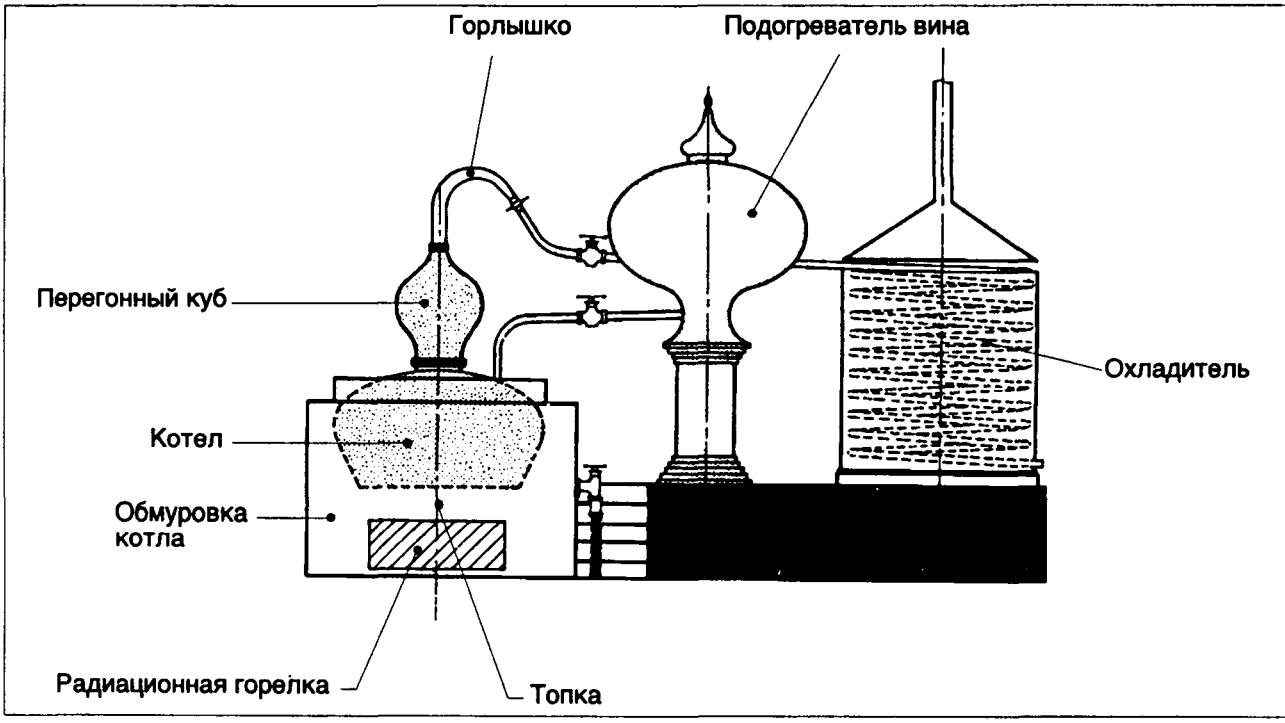
— колпак возвышается над котлом. Он имеет грибообразную форму;

— гусак (шея лебедя);

— труба, наконец, бак, наполненный водой, который позволяет охладить змеевик и сконденсировать пары спирта.

Нагрев вина осуществляется в специальном перегонном аппарате, оборудованном "нагревателем вина". Этот нагреватель вина на самом деле является рекуператором тепла: он пересекается продолжением гусака, который отдает вину часть тепла, прежде чем оно попадет в котел. На основе эксплуатационных данных, экономия энергии составляет примерно 15% для нагрева продукции, поступающей в котел при 50°C. Нагреватель вина кроме того позволяет экономить время.

Удельное потребление газа зависит в основном от процента спирта в дистиллируемом вине; тем не менее средняя величина потребления составляет около 8 кВт · ч на литр чистого спирта.



Перегонный аппарат.

8.5.4. Применение в сельском хозяйстве

8.5.4.1. Общая часть

Развитие промышленности природного и нефтяного сжиженного газа и применение их в сельском хозяйстве в течение последних двадцати лет показали большой интерес, который представляет эта форма энергии в практике.

Этот интерес объясняется специфическими свойствами природного газа и СНГ, которые обеспечивают при их использовании чистоту, многообразие условий и конкурентоспособность в различных областях применения.

8.5.4.1.1. Основные свойства газа, применяемого в сельском хозяйстве

— большая теплотворная способность на единицу объема или массы (СНГ позволяет хранить большое количество энергии в небольшом объеме);
— чистота продуктов сгорания, что является результатом незначительного содержания серы в газе. Практически независимо от того, что применяется: природный газ или СНГ, получают только водяные пары и CO_2.

Эти газы, которые могут использоваться одновременно как тепловая энергия для производства движущих сил или создания особых атмосфер, имеют широкое применение.

8.5.4.1.2. Эволюция и общие положения

В этом разделе речь идет только о примерах использования газа для профессиональных потребностей эксплуатации сельскохозяйственного производства и кооперативов, которые являются его *продолжением. Использование газа на фермах* для бытовых нужд не рассматривается.

Чтобы понять важность этой области деятельности и ее развитие в течение 30 лет, можно рассмотреть статистические данные по продаже газа в двух секторах: сельскохозяйственное производство и обработка сельскохозяйственной продукции.

Что касается СНГ. и, в основном, пропана, находящегося в стационарных резервуарах, снабжение этих двух секторов в 1988 году достигало 303000 тонн, или это эквивалентно 3,8 млрд. кВт · ч. Можно, таким образом, представить, что общее использование газа в двух секторах деятельности достигло или превосходило в 1988 году 11,4 млрд. кВт · ч.

В области сельского хозяйства, взятого изолированно, большая часть поступившей энергии распределяется на четыре принципиальные позиции:

— тепличное производство;
— скотоводство;
— сушка;
— прочее применение.

8.5.4.2. Тепличное производство

8.5.4.2.1. Действие хлорофилла

Роль хлорофилла в общем известна и различные факторы, необходимые для его получения, достаточно изучены. Тем не менее, из-за отсутствия достаточных технических средств способы улучшения и развития сельхозкультур в зависимости от развития каждого из этих факторов прошли определенный путь развития. В первое время в огородничестве и садоводстве стеклянные рамы и колпаки использовались с переменными результатами. Несмотря на то, что это были зачаточные средства, они все-таки дали тот эффект, для достижения которого они создавались:

— сохранение тепла;
— концентрация интенсивности освещения;
— поддержание определенной повышенной влажности, т.е. факторов, необходимых для роста растений.

Сооружение теплиц позволило увеличить преимущества, полученные благодаря применению системы контроля и регулирования, так же как появление обогреваемых теплиц, позволивших компенсировать зимний риск снижения температуры.

Известна очень простая схема действия фотосинтеза:

$$n\mathrm{H_2O} + n\mathrm{CO_2} + p\varphi + c\mathrm{K} = n\mathrm{CH(H_2O)} + n\mathrm{O_2}$$

либо:

вода + диоксид углерода + энергия световая и тепловая = углеводы + кислород.

Эта трансформация реализована благодаря пигменту хлорофилла. Исследование этой формулы позволяет выбрать направление развития техники в теплицах:

— $n\mathrm{H_2O}$ – предписывает применение ирригации;
— $c\mathrm{K}$ – предусматривает применение отопления (в теплицах);
— $p\varphi$ – предусматривает использование освещения.

Между тем, начиная с момента, когда один из четырех факторов, определенных предварительно, будет очень слабым, т.е. он не будет в пропорции, определенной реакцией фотосинтеза, три ос-

1955	1965	1973	1974	1975	1983	1988
249 000	420 000	1 850 000	2 200 000	2 400 000	7 000 000	17 600 000

Продажа GDF сельскохозяйственному сектору и сектору переработки сельхозпродукции в тыс. кВт · ч.

тальных могут быть рассмотрены как избыточные. Ослабленный фактор ограничивает реакцию и называется лимитирующим фактором.

На практике каждый из этих факторов становится лимитирующим по очереди: очевидно, что если последовательно воздействовать на наиболее лимитирующий, увеличивается урожайность растений.

Что касается CO_2, он может легко быть получен путем сжигания газа, когда этот фактор становится лимитирующим, т.к. сжигание природного газа или пропана позволяет производить углекислый газ, тепло и пары воды в соответствии со следующей классической формулой:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + \text{тепло},$$

$$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + \text{тепло}.$$

Наблюдения, проведенные за прошедшие десятилетия, показали, что содержание двуокиси углерода в воздухе (0,03%) оказывается часто недостаточным в теплицах, в зависимости от развития других факторов реакции возможно его увеличение при определенных условиях, путем подачи более или менее больших газовых потоков.

Наконец, надо подчеркнуть, качество сжигания, которое можно реализовать с природным газом и СНГ:

— в аппаратах с теплообменниками легко реализуется сжигание с небольшим избытком воздуха, что позволяет достичь содержания CO_2 немного меньшей величины, соответствующей нейтральному горению (сухие продукты сгорания), т.е. условия, благоприятные хорошему КПД;
— в аппаратах, работающих с прямым разбавлением дыма, природный газ и СНГ оказываются топливом первого класса из-за небольшого содержания в дыме несгоревших частиц SO_2 и NO_x.

Можно дать следующие экспериментальные величины для пропана:

для 1% CO_2:

SO_2	< 0,1p.p.m.
HCHO	< 1,0 p.p.m.
CO	< 10,0 p.p.m.
NO и NO_2	< 10,0 p.p.m

Негоревшие углеводороды < 0,1p.p.m.

Все эти величины значительно ниже технических концентраций. Это качество сжигания широко используется в сельском хозяйстве.

8.5.4.2.2. Эффективность теплицы

В зависимости от требований к температуре, культивируемые растения могут быть приближенно разделены на две группы:

— растения, способные произрастать при температуре окружающей среды менее 0°C и не опускающейся, однако, ниже –15 - –20°C, в зависимости от вида и сорта. Это зимующие растения;
— растения, не переносящие зимнюю температуру, – весенние растения.

В первом случае имеет место "вегетативное выживание" и рост происходит когда позволяют природные климатические условия.

Во втором случае нет "вегетативного выживания", при первом замерзании ткань растения разрывается, омертвляется и растение гибнет. Большая часть огородных и цветочных растений входят во вторую категорию.

Быстрый рост потребностей и вкуса потребителей заставил поставщиков развивать параллельно следующие направления:

— консервация;
— получение ранних овощей;
— и, наконец, эта эволюция продолжается, потребление требует сегодня свежие продукты в течение всего сезона; в межсезонье и при неблагоприятном климате в теплицах, которые должны рассматриваться как "среда с искусственным климатом".

Конструкция застекленной теплицы должна удовлетворять следующим требованиям:

— поддержание наилучшей температуры воздуха и почвы;
— поддержание наилучшей влажности воздуха и почвы;
— нахождение наилучшего естественного или искусственного освещения;
— наконец, наилучший химический состав воздуха (содержание CO_2).

8.5.4.2.3. Поддержание температуры воздуха и почвы

Температура играет определяющую роль в развитии растений. В теплице необходимо поддерживать температурные параметры.

Подъем температуры, который проявляется естественно под укрытием на солнце, – результат парникового эффекта (прозрачный материал кровли пропускает почти всю солнечную радиацию, видимую и инфракрасную, близкую и среднюю в диапазоне 0,25 - 2,5 мкм, и она поглощает всю радиацию с большой длиной волны в приземной и атмосферной зоне от 5 до 50 мкм), что также снижает обмен с наружной средой.

На самом деле этот обмен существует:

— прежде всего потому, что конструкция теплицы некогда не бывает герметичной и это отсутствие герметичности увеличивается за счет влияния ветра, который надавливает на стенки теплицы с большой и изменяющейся силой. В соответствии со своей герметичностью теплица обновляет объем своего воздуха от 1,8 до 3 раз в час. Существуют, таким образом, потери тепла с утечками воздуха (потери конвекцией); затем теплица теряет тепло излучения и через стенки (теплопроводность-конвекция).

Чтобы компенсировать все эти потери, надо подвести к теплице тепло искусственным способом. С этой целью используется теплоноситель, которым может быть либо вода, либо воздух.

8.5.4.2.3.1. Процесс отопления теплиц горячей водой

Горячая вода с высокой температурой (65 - 70°C) производится котлом, и отопление теплицы осуществляется посредством оребренных или гладких труб простым увеличением диаметра или регист-

ром труб, расположенных обычно вдоль стен на столбиках, немного над поверхностью почвы.

Многие из этих котельных, ранее работавших на жидком топливе, переведены на газ.

Использование газового топлива позволяет значительно улучшить КПД котельной:

— за счет использования котлов-конденсаторов. В этих котлах конденсация водяных паров дыма вызывает дополнительную передачу тепла к стенкам теплообменника. Это рекуперированное количество тепла далеко не маленькая величина, т.к. представляет в общем 10% высшей теплоты сгорания газа;
— за счет конденсационного рекуператора на уходящих газах котла. Речь идет об установке на существующем классическом котле, позволяющем рекуперировать энергию, еще содержащуюся в дыме.
Эти рекуператоры на дыме являются теплообменниками, расположенными на выходе из котла и позволяющими подогревать обратную воду или подогревать дополнительную петлю низкой температуры.
Существует два типа рекуператоров на дымовых газах:
  · сухого типа (стенка разделяет дым и воду);
  · промывочного типа (контактного) (вода разбрызгивается в продуктах сгорания).

Можно, более того реализовать систему использования всего газа на производство теплой воды, теплового насоса (система вода–вода, источник холода в горизонте грунтовых вод) с газовым двигателем, коэффициент совершенства которого в этом случае очень высок, рекуперируя все тепло, производимое двигателем.

8.5.4.2.3.2. Процесс нагревания теплиц горячим воздухом

Можно отапливать теплицу генератором горячего пульсирующего воздуха.

Преимущество над классической системой (горячая вода, производимая котельной) в том, что при равной мощности она требует меньших капитальных вложений.

В этом процессе отопления газ (природный или СНГ) показывает еще свое превосходство по отношению к жидкому топливу.

8.5.4.2.3.2.1. Генерация горячего воздуха путем прямого разбавления продуктов сгорания

Чистота продуктов сгорания газа позволяет использовать для отопления теплицы генераторы горячего воздуха, получаемого прямым разбавлением дыма. Действительно, как показывает уравнение горения газа, продукты сгорания не содержат ничего, кроме водяных паров и углекислоты. Итак, водяные пары не мешают, напротив, всегда стараются иметь большую влажность и больше CO_2 в теплицах, что, как показано дальше, необходимо для растений.

Преимущество этого процесса заключается в небольших капитальных вложениях, с одной стороны, и превосходном КПД (100%) – с другой стороны.

Можно с этими аппаратами, учитывая гибкость газовых горелок, получить очень тонкое регулирование при условии правильного расположения термостата в теплице. На практике термическая мощность ограничена концентрацией CO_2 в теплице.

8.5.4.2.3.2.2. Генератор горячего воздуха с теплообменником: газовый воздухонагреватель

Чтобы избежать указанных выше недостатков, можно использовать генератор горячего воздуха с теплообменником.

8.5.4.2.3.3. Обогрев теплиц радиационными трубами низкой температуры

Трубы горячей воды и нагретый воздух не эффективны для обогрева теплиц большой высоты. Выделяя тепло прежде всего конвекцией, они приводят к большому потреблению энергии.

Радиационные трубы низкой температуры являются решением проблемы.

Это темные излучатели, характеризуемые внутренним сжиганием, осуществляемым внутри корпуса обогревателя, имеющего относительно низкую температуру (250 - 500°C)

Длина волны, соответствующая максимальной интенсивности спектра, – порядка 4 мкм.

8.5.4.2.3.4. Увеличение содержания углекислого газа. Регулирование

Растения заимствуют углерод, необходимый для их метаболизма из углекислого газа воздуха, который их окружает. Они черпают другие питательные вещества в почве с помощью своих корней. Растение, благодаря хлорофиллу – зеленому пигменту, служащему катализатором, и используя энергию света солнечных лучей, способно диссоциировать молекулы углекислого газа. Оно удерживает углерод и выделяет кислород: это фотосинтез или хлорофилловая ассимиляция.

В теплицах в солнечные дни три первых параметра обычно находятся на достаточном уровне. Напротив, если растение потребляет много углекислого газа, его концентрация в теплице уменьшается.

В хороший солнечный день замер концентрации CO_2 в теплице, имеющей большую вегетацию (томаты, огурцы), дает величину, близкую к 0,01%. В то время, как в атмосфере концентрация составляет 0,03%.

Слишком слабая концентрация CO_2 становится лимитирующим фактором. Растение останавливает свое развитие. Лечение состоит в искусственном обогащении теплицы CO_2.

8.5.4.2.3.4.1. Генератор CO_2

Техника наиболее простая и наименее разорительная, состоящая в реализации горения, освобождающего от всех токсических для растений продуктов.

Единственным топливом, позволяющим реализовать это чистое горение, является газ. Генератор углекислого газа простой конструкции имеется в продаже.

8.5.4.2.3.4.2. Регулирование

Регулирование с помощью фотоэлектрической ячейки в зависимости от интенсивности освещения было заброшено, т.к. было неизвестно, как эталонировать ячейку, имея неопределенность порога

освещенности, необходимой для прекращения фотосинтеза (изменяющийся в зависимости от места и стадии вегетации).

Регулируют, таким образом, в зависимости от содержания CO_2 в теплице.

Когда концентрация CO_2 уменьшится, т.е. растения его ассимилировали, и необходимо компенсировать падение концентрации путем эмиссии CO_2. Когда концентрация стабилизируется или увеличивается, это означает, что растение прекратило ассимиляцию. Надо прекратить эмиссию CO_2. На практике для определения этого изменения концентрации используется явление деформации конуса голубого пламени маленькой индукционной горелки в зависимости от изменения состава воздуха, идущего на его горение, при прочих равных условиях.

Термопара, расположенная в пламени, производит электрический ток более или менее интенсивный в зависимости от высоты голубого конуса (горячая часть пламени). Достаточно увеличить этот ток и использовать его на эталонном аппарате для открытия или закрытия электрокрана. С помощью этого процесса относительно точную технику регулирования, которая позволяет поддерживать в теплице содержание CO_2 от 0,12% ± 0,01%, обычно рассматривают для практики как оптимальную.

8.5.4.3. Скотоводство. Биоклиматическое кондиционирование скотоводческих помещений

8.5.4.3.1. Потребности животных

Все специалисты зоотехники знают, что для откорма животных, желая получить максимальный привес в минимальное время, содержание скота в закрытом помещении часто является решением наиболее экономичным.

Индекс потребления, который играет преобладающую роль в себестоимости животных с точки зрения откармливания, значительно улучшается в закрытых помещениях, где можно регулировать основные факторы окружающей среды:

— температура;
— относительная влажность;
— химический состав воздуха;
— скорость циркуляции воздуха и его траектория.

Что касается химического состава воздуха, допустимое содержание основных вредных газов, выделяемых животными, может быть резюмировано, как следующее:

Природа газа	Допустимая концентрация по объему, %
Углекислый газ (CO_2)	3,5
Аммиак (NH_3)	0,1
Сероводород (H_2S)	0,02

С другой стороны, потеря энергии или тепла животными в форме испарения и дыхания зависит от способности воздуха воспринять эту воду, отсюда важность относительной влажности воздуха.

Может быть указан диапазон относительной влажности, внутри которого при определенных температурах животные не будут испытывать никакого серьезного риска развития микробных заболеваний.

Действие фактора температуры является определяющим, таким образом, предпочтительнее поддерживать температуры в диапазоне влажности, чем наоборот. В качестве примера ниже в таблице приведены некоторые желательные величины.

Обычно обозначают W количество паров воды, выделяемых животными в здоровом состоянии, количество, которое соответствует практически парам воды, вдыхаемым в большинстве случаев из нормальной окружающей среды в зданиях, содержащихся в чистоте с эффективной естественной вентиляцией. Эта физическая величина, на которую почти нельзя влиять, на уровне скотоводства, хотя бы для одного места.

Так же обычно обозначают Q_a – количество тепла, способного выделиться животным при хорошем здоровье. Наконец, полагают, что влияние веса является определяющим фактором.

Животные	Q_a, мДж/ч	W, г/ч
Телята:		
50 кг	355	90
100 кг	481	125
150 кг	627	180
220 кг	794	230

Параметры количества тепла, которое способны выделить телята.

Животные	Температура, °C			Относительная влажность	
	нижний предел	желательная		точный предел, %	рассматривается как желательная, %
		начало периода	конец периода		
Молочные коровы	1	16	10	80	70 - 80
Свиньи на откорме	12	21	16	80	70 - 80
Куры несушки	7	16	10	70	60 - 65

Температура и процент влажности в скотоводстве.

8.5.4.3.2. Изоляция, вентиляция и регулирование

Конструкция помещения, таким образом, важна, особенно с точки зрения потоков воздуха, способа динамической вентиляции и изоляции, которые будут служить источником комфорта и, таким образом, роста животных.

Животные и их испражнения выделяют вредные, неприятные или тошнотворные запахи, газы, содержание которых не должно превосходить определенную величину, определяющую кратность вентиляции, достаточной, но не вызывающей значительных тепловых нарушений.

Выделение углекислого газа здоровым животным изменяется в зависимости от его веса. Теленок, начиная с веса в 40 кг, выделяет 15 л CO_2 в ч, что требует минимального расхода воздуха вентиляции 5 м^3/ч, при весе животного в 200 кг оно выделяет 40 л CO_2 в ч, что требует расхода воздуха вентиляции 13 м^3/ч.

В настоящее время электронное регулирование интегрирует все необходимые для комфорта параметры, упрощает тепловое регулирование помещения с целью экономии энергии.

8.5.4.3.3. Техника газового отопления

Есть два наиболее распространенных способа: отопление горячим воздухом всего помещения и местное отопление ультракрасной радиацией.

8.5.4.3.3.1. Нагрев окружающей среды (общее отопление помещения)

Некоторые типы животноводства требуют невысокой температуры, но постоянной, одинаковой и равномерно распределенной.

В других случаях концепция животноводческого помещения, особенно тип помещения для животных, не позволяет распространить и использовать радиационное инфракрасное отопление.

Во всех этих случаях надо использовать отопление окружающей среды с помощью аппаратов горячего пульсирующего воздуха. Они имеют преимущество – превосходно распределять горячий воздух и подавать достаточное количество мягкого и равномерного тепла во все части помещения. Энергия газа является идеальной для производства горячего пульсирующего воздуха.

Она позволяет использовать аппараты, работающие без теплообменника, т.е. путем прямого смешения воздуха с продуктами сгорания в атмосфере помещения. Расчеты и практика показывают, действительно, что для данной тепловой производительности количество CO_2, выделяемое в помещение продуктами сгорания газа, всегда немного ниже количества CO_2, производимого животными.

Расчет показывает также, что даже в условиях минимального обновления воздуха зимой его разбавление достаточно, чтобы результирующая концентрация CO_2 оставалась ниже допустимого уровня (3,5%).

Количество водяных паров, возникающих при горении, его можно рассматривать как незначительное (едва 20%) по сравнению с парами воды, выделяемыми животными. Они мало влияют на относительную влажность, уровень которой и так повышен.

Основные преимущества этих аппаратов следующие:

— КПД – 100%;
— точное регулирование температуры;
— простота установки;
— большая мощность при небольшом объеме;
— аппараты занимают небольшую площадь и имеют малые размеры;
— небольшие капитальные вложения;
— прочность и надежность.

С другой стороны, эти аппараты могут управляться автоматически системой электронного регулирования, указанной выше.

8.5.4.3.3.2. Местное отопление

В некоторых случаях молодые животные требуют повышенной температуры (30 - 40°C) в их первые недели. Эту температуру трудно и дорого получить с помощью общего отопления.

В других случаях повышенная температура, необходимая молодым животным, ненужна или даже вредна для взрослых животных, живущих с ними: это случай отделения свинарника, где молодые поросята требуют высокой температуры, но это тепло вредно для хорошей лактации свиньи.

Наконец, некоторые здания плохо приспособлены к использованию горячего пульсирующего воздуха; либо плохо изолированы; и улучшение их изоляции сложно и дорого, либо его конфигурация не позволяет осуществить хорошую циркуляцию теплого воздуха или проход воздуховодов.

Во всех этих случаях реализуют местное отопление. В этих условиях используется радиационное, инфракрасное отопление, которое:

— распространяется по прямой линии;
— не абсорбируется воздухом;
— превращается в тепло в предмете.

Радиантные панели и трубы особенно хорошо адаптированы к способу использования.

8.5.4.3.4. Производство горячей воды

Многие виды животноводства требуют большого количества горячей воды. Горячая вода необходима:

— для производства молочных смесей;
— для приготовления жидкой и полужидкой пищи;
— для водопоя зимой.

Горячая вода может производиться газовым водонагревателем либо проточного, либо аккумуляционного типа, которые составят дополнительную часть установки отопления.

8.5.4.4. Сушка в сельском хозяйстве

Сельскохозяйственная продукция является живой материей и после ее уборк диастаза и микроорганизмы, которые она содержит, способствуют

ее физико-химическому превращению под влиянием различных факторов, среди них:

— природа продукции;
— объем хранимой массы;
— тип хранения;
— температура и влажность окружающего воздуха;
— влажность продукции.

Этот последний фактор является наиболее важным. Часто необходимо сушить сельскохозяйственную продукцию перед окончательным хранением или продажей. Операция состоит в прогоне через массу продукции определенного количества воздуха с установленной температурой и контролируемой влажностью. Этот вентиляционный воздух позволяет отобрать из хранимой массы избыток влаги. Эта операция осуществляется либо в кооперативе на специальной сушильной установке, работающей на природном газе, либо на индивидуальной сушилке прямо на ферме, оборудованной генератором горячего воздуха, работающем на СНГ.

8.5.4.4.1. Сельскохозяйственная продукция, подлежащая сушке

Некоторые продукты имеют повышенную природную влажность: это фураж (люцерна, злаковые, клевер), фрукты (слива Ажана), табак и т.д.; доза воды в них превосходит часто 70% и масса испарений в процессе сушки воды превосходит в два - четыре раза полученную сухую массу.

Другие продукты имеют относительно небольшую влажность в убранном виде, например, кукуруза, для которой пропорция отобранной воды составляет одну треть сухой массы, или зерновые (зерно, ячмень) и масляничные (подсолнечник, рапс) культуры, которые убираются в условиях оптимальных для хранения или с небольшой массой воды, подлежащей испарению. Техника искусственной сушки этих двух видов продукции, очевидно, значительно отличается. Скорость сушки зависит от количества воды, которое необходимо испарить, испарительной способности используемого воздуха и его расхода. Количество испаряемой воды определяется начальной влажностью продукта, который хотят сушить, и конечной заданной влажностью, которую надо получить для консервации.

В сельском хозяйстве это процентное содержание удаляемой воды часто выражается в пунктах (разность процентов), влажность в процентах, отнесенная к общему количеству влажного продукта. Надо заметить, что величина пункта неодинакова в зависимости от начальной влажности.

Это так же как для уменьшения влажности на один пункт массы в 100 кг продукции, имеющей содержание воды 80%, надо отобрать 4,76 кг воды. Если содержание воды 50%, снижение на один пункт представляет потерю воды в 15% и величина пункта будет 1,96 кг воды.

Испарительная способность воздуха, который будет использоваться для эвакуации воды, является функцией его влажности и температуры. При определенной температуре воздух поглощает пары до насыщения. Содержание воды в насыщенном воздухе является функцией только температуры.

Температура воздуха, °C	Содержание воды в насыщенном воздухе (кг воды на кг сухого воздуха)
0	0,0038
10	0,0076
20	0,0147
30	0,0273
40	0,0486
50	0,0853
60	0,1515
70	0,2750
80	0,5425

Содержание воды в насыщенном воздухе в зависимости от температуры.

8.5.4.4.2. Сушка зерна

Искусственная сушка зерна используется при сушке риса и масленичных культур.

В некоторые годы оказывается необходимым также сушить злаковые с соломой (пшеница, ячмень), но особенно кукурузу, которая развита во Франции и ее влажность значительно выше, чем другого зерна (от 25 до 50% содержания воды), что требует сушки при каждой уборке для доведения влажности до стандартной величины – 15%.

В сельском хозяйстве выбирают одно из двух решений.

8.5.4.4.2.1. Сушка зерна на ферме

Существуют многочисленные типы сушилок с маркой "фермерские", маленькой и средней мощности, предусмотренные для эксплуатации в сельском хозяйстве. Это сушилки либо типа рециркуляции зерна в закрытом контуре, либо типа сушильных ячеек системы "in Bin Drying" или более редко – сушилка стационарная.

Некоторые из этих сушилок подвижные и не требуют подготовки площадки.

8.5.4.4.2.2. Сушка зерна в хранилище

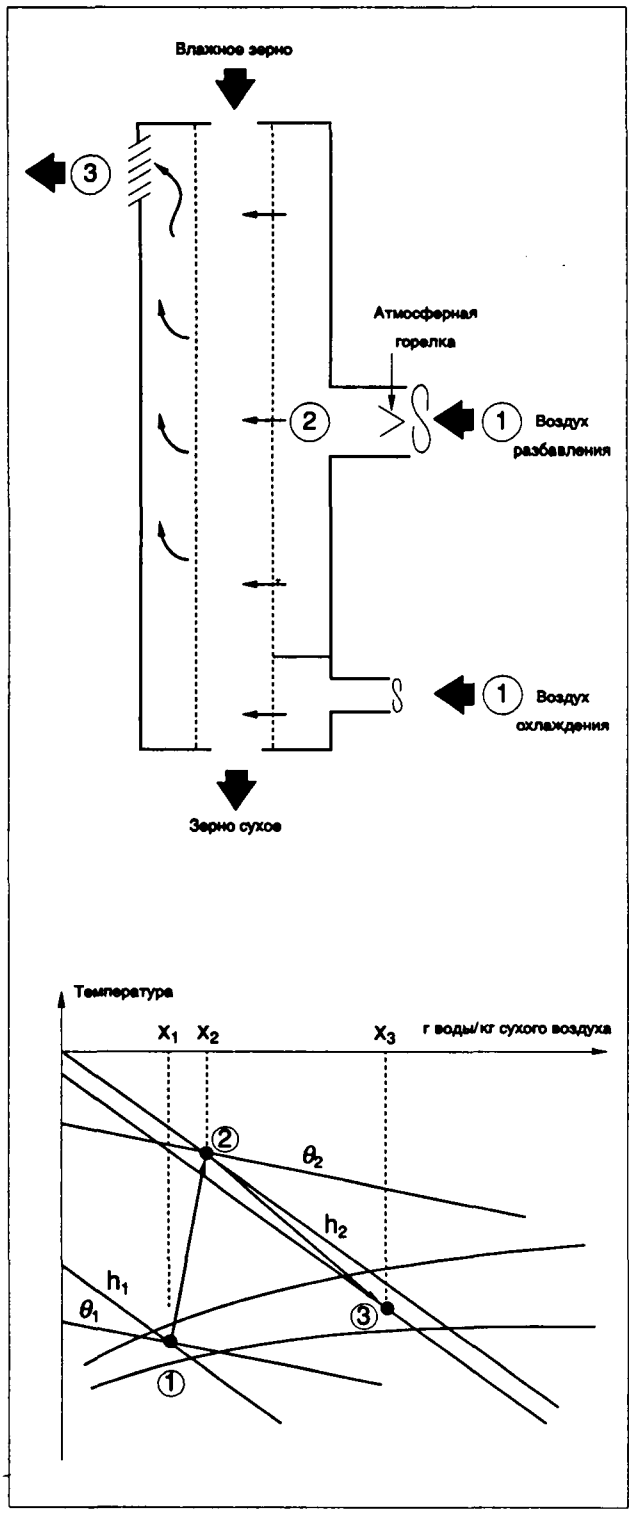
Кооперативы или торговцы зерна наиболее часто имеют сушилки непрерывного действия, вертикальные с большой способностью испарения. Эти аппараты потребляют большое количество энергии; все усилия должны быть направлены на уменьшение удельных затрат энергии, т.е. количества тепловой энергии, необходимой для испарения 1 кг воды.

Являются ли они стационарными или передвижными, работают ли постоянно или периодически, имеют ли большую мощность или малую, большая часть этих аппаратов состоит из трех основных элементов:

— сушильная колонна;

— вентилятор, осуществляющий циркуляцию сушильного агента;

— генератор, нагревающий воздух (не требующий никаких теплообменников в случае газа) и позволяющий при удобном случае увеличить КПД примерно на 12%.



Прямая сушка.

8.5.4.4.2.3. Рециркуляция использованного воздуха

Общий КПД остается достаточно низким несмотря на то, что был убран теплообменник, к тому же благодаря энергетическому кризису предприятия C.N.E.E.M.A.[1] и I.T.C.F.[2] провели многочисленные исследования, которые дали новые технологии. Упомянем "сушку" или медленное обширное охлаждение, которое представляет собой особую технику использования сушилки, позволяющую рекуперировать накопленное в зерне тепло, и которая ценой дополнительных вложений уже позволила получить существенный экономический эффект. В то же время при изменении конструкции сушилки были достигнуты более решительные успехи в экономии энергии.

Конструкторы не остались безучастны и предложили процессы, направленные на увеличение КПД существующих установок.

Находят, что эти разнообразные технологии более легко реализуются с использованием газовых горелок. Эта новая технология состоит в создании двух зон сушки в одной и той же сушилке за счет перемещения перегородок. Действительно, в ходе сушки зерна скорость испарения влаги непостоянна в сушилке, работающей непрерывно. Она очень велика в верхней части (вход влажного зерна) колонны и она достаточно слаба в своей нижней части.

Соответственно, в верхней части колонны использованный воздух имеет характеристику, близкую к насыщению, в особенности с относительно низкой температурой, в то время как в средней части температура воздуха, выходящего из сушилки, относительно высока и он далек от насыщения.

Это ограничивает КПД этого типа аппаратов.

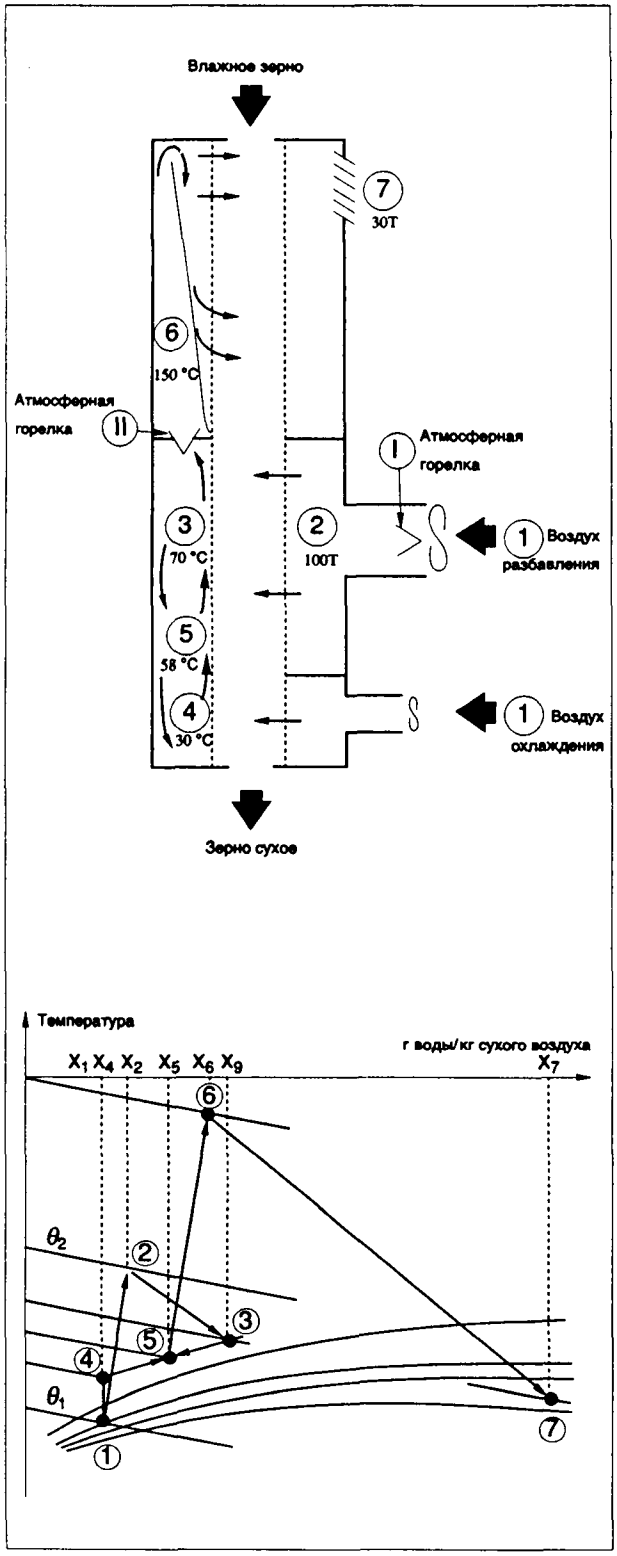
Кроме того, температура воздуха на входе на этом уровне ограничена 120°C, более высокая температура вызывает повреждение зерна. Созданные две зоны позволяют работать с разной температурой между входом и выходом колонны, что улучшает способность испарения с сохранением температуры низа колонны порядка 100°C. Эта концепция требует установки второй горелки в корпусе (камере) рециркуляции. И здесь хорошо видно, что единственным незаменимым оборудованием является атмосферная газовая горелка, делающая возможным реализацию этой технологии. Расчеты и эксперименты показывают, что удельное потребление такой сушилки находится между 0,872 кВт · ч и 0,906 кВт · ч. на кг испаренной воды в зависимости от характеристики воздуха на входе и конечной влажностью зерна. Это дает, таким образом, новую экономию энергии около 22% по сравнению с сушилкой без теплообменника, но работающую без рециркуляции.

8.5.4.4.3. Сушка фуража

Трава составляет базовый элемент питания молочных коров. Зеленая трава содержит около 80% воды. Когда она скошена, биологические процессы быстро изменяют ее состав.

[1] Centre national d'études et d'expérimentation de machinisme agricole.

[2] Institut technique des céréales et tourrages.



Регенеративная сушка.

Для максимального сохранения качества фуража необходимо его быстро высушить, чтобы довести влажность до 10 - 15%, при которой он стабилизируется. Но сушить скошенную траву полностью в поле достаточно трудно из-за климатического риска, т.к. для этого требуется 3 - 4 дня хорошей погоды. Фураж часто увлажняется дождем, и ворошение, которое состоит в потряхивании и переворачивании продукта, вызывает потери сухого вещества тем больше, чем будет суше продукт. Искусственная сушка осуществляется мягкой вентиляцией массы фуража, хранящегося на гумне, ангаре, стоге. Установка сушки фуража теплой вентиляцией состоит из:

— вентилятора, геликоидного или центробежного типа;
— устройств нагрева воздуха: воздухонагревателя, работающего на природном газе или пропане;
— системы распределения горячего воздуха, включающую основной воздуховод, вспомогательный воздуховод и решетку (вспомогательный пол), позволяющую транспортировать производимый горячий воздух и распределять его в массе фуража независимо от состояния продукта: длинный или рубленый (порезанный), навалом или в снопах.

Характеристики окружающего воздуха не позволяют получить фураж достаточно сухой и окончательно стабильный, необходим легкий подогрев воздуха.

Увеличение на один градус дает уменьшение влажности воздуха примерно на четыре позиции.

На практике воздух нагревают на 4 - 7°C и необходимая тепловая мощность изменяется от 12 до 23 кВт (при расходе вентилятора) на 10 тыс. куб. в ч.

Газовый нагреватель легко адаптируется к различным типам вентиляции. Он имеет широкий диапазон мощностей, от 7 до 290 кВт, дающих большую гибкость использования.

Преимущества газовых нагревателей:

— они просты, легки и требуют небольших капиталовложений;
— за счет отсутствия теплообменника они имеют очень хороший термический КПД, экономичны и не требуют больших расходов в обслуживании.

8.5.4.4.4. Сушка табака

Прежде чем составить первосортную, дорогую всемирнокоммерческую продукцию – табак, являющийся растением, – это культура, обработка которого требует больших усилий.

Финансовый успех от продажи урожая любого плантатора зависит от качества конечного продукта.

Однако, это качество зависит, в большой степени, от проведения операций высушивания. Понятен интерес, с которым плантатор выполняет эту операцию, т.к. неудача представляет для него значительную потерю.

Однако натуральная длительная сушка при повышенной влажности и при нормальной наружной температуре летнего сезона вызывает появление плесени, т.е. большой брак, могущий испортить весь урожай.

Поэтому искусственная сушка нашла широкое применение.

Во время уборки табак содержит около 85% воды. Сушка табака осуществляется в три фазы:

— пожелтение, которое приводит к 70% содержанию воды в листах (примерно);
— потемнение или обезвоживание средней части листа,которое приводит приблизительно к 35%;
— уменьшение стороны и высушка прожилок, которые приводят примерно к 15%.

В зависимости от того как собран урожай, в стеблях или листах, техника сушки будет различная.

В некоторых районах все операции происходят в сушилке. Для уменьшения сторон гирлянды транспортируют в специальное помещение, называемое "камерой уменьшения сторон".

На стадии сушки можно вмешаться, чтобы оздоровить атмосферу нагревателем пульсирующего воздуха, для которого природный газ или пропан являются идеальной энергией.

На стадии "камеры уменьшения сторон" речь идет о быстром подъеме температуры примерно от 65 до 70°C и поддержании этой температуры в течение времени, необходимого для высушивания прожилок.

Этот тип установок при минимальных капитальных вложениях и умеренных эксплуатационных расходах дает удовлетворительную сушку в любых атмосферных условиях.

Использование очень гибкое, оно дает табак прекрасного качества, без риска передачи постороннего запаха листьям.

8.5.4.4.5. Разное

Наконец, существует значительное число малых разнообразных потребителей газа, либо природного, либо пропана, например:

— сушка хмеля;
— сушка лука: лука-шарлотта, орехов, эндивий (цикорий);
— консервация фруктов и люцерны, обезвоженных в контролируемой атмосфере;
— применение в сельском хозяйстве тепловых двигателей на газе, среди которых:
  · группы электрогенераторов безопасности;
  · группы мотонасосов для орошения и полива;
  · привод вакуумнасосов для доильных машин;
  · привод машин срывания и калибровки фруктов;
  · подъемная техника профессиональной машины для стрижки деревьев;
  · газовое освещение.

8.5.5. Промышленное применение

8.5.5.1. Котлы

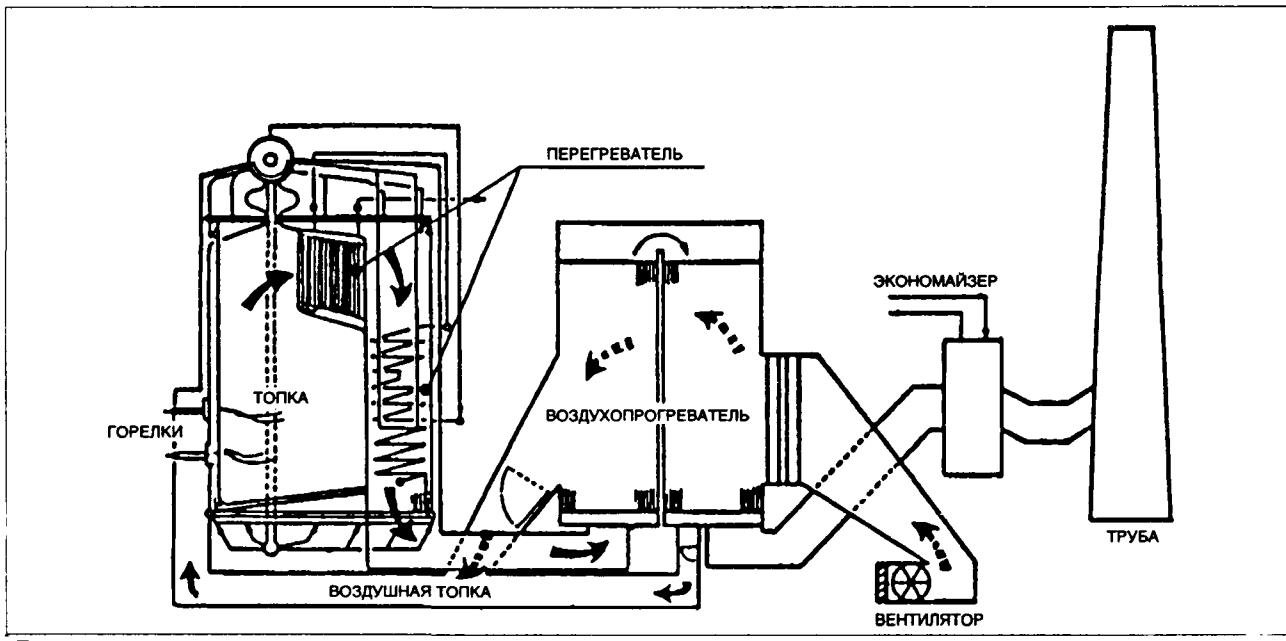
8.5.5.1.1. Определение. Общая часть

Котел представляет собой устройство, состоящее из теплообменников и вспомогательного оборудования, позволяющего передавать тепловую энергию, производимую топливом или источником тепла к жидкому (вода, масло, расплавленная соль и т.д.) или газовому (воздух, пар насыщенный или перегретый, CO_2 и т.д.) теплоносителю.

В классическом котле теплообмен осуществляется прежде всего излучением и конвекцией с газовой стороны и теплопроводностью и конвекцией со стороны флюида теплоносителя.

Циркуляция последнего внутри котла осуществляется путем:

— естественной циркуляции (паровой котел);
— принудительной циркуляции (другие жидкости).



Принципиальная схема промышленного котла.

8.5.5.1.2. Элементы, составляющие классический котел

8.5.5.1.2.1. Горелки

Функции горелок состоят в:

— осуществлении качественного сгорания топлива;
— создании формы пламени, адаптированного к топке;
— обеспечении стабильности пламени на всех режимах;
— создании возможности работать на нескольких видах топлива (горелки газ–мазут, газ–пылеобразный уголь).

Газовые горелки, устанавливаемые на котлах, имеют большую мощность. Она может превосходить 50 000 кВт. Котлы очень большой мощности оборудуются несколькими горелками, чтобы не иметь очень длинную топку.

Используются горелки следующего типа:

— предварительного смешения, небольшой мощности в топках под разрежением;
— двухпроводные в топках под давлением, подача газа может быть (см. рисунки на с. 762):
  · центральной (давление газа 0,5 - 3 бар),
  · круговой, через большое число отверстий малого диаметра, откуда газ выходит с большой скоростью (150 м/с). Давление газа изменяется от 0,05 до 0,5 бар. Эти горелки хорошо работают на смешанном топливе: мазут-газ, и обеспечивает хорошую стабилизацию пламени;
  · через множество отверстий радиантных отводов (типа осьминога) или множество струй.

Давление газа составляет 0,05 - 0,7 бар и скорость выхода порядка 300 м/с.

Горелки этого типа часто имеют большую мощность (30 000 кВт).

Основные горелки оборудованы запальниками или "пилотом", очень надежным в работе, очень надежным в работе, оборудованным электродом зажигания и электродом ионизации, служащим для контроля наличия пламени.

В случае С.Н.Г. горелки могут снабжаться прямо жидким бутаном.

8.5.5.1.2.2. Топка

Топка – это пространство, где развивается пламя. Различают:

— топки с "горячей стенкой" (parois chaudes,) где стенка выполнена из огнеупорного материала. Это топка под разрежением или под небольшим давлением, его тепловое напряжение ниже 1200 кВт/м^3;
— топки с "холодной стенкой" (parois froides), стенка которой состоит из экрана смыкающихся труб, обеспечивающих герметичность топки, и в которых циркулирует теплоноситель.

  Эти топки, работающие под давлением, называются "топка под наддувом". Ее тепловое напряжение достигает 12000 кВт/м^3.

Топки под наддувом, средняя температура которых примерно 1400°C, обеспечивают основную передачу тепла: 35 - 40% общей энергии и прежде всего радиацией.

8.5.5.1.2.3. Теплообменники

8.5.5.1.2.3.1. Экранные трубы

Речь идет о пучке труб, образующих стенку, непосредственно воспринимающую излучение пламени.

8.5.5.1.2.3.2. Испарительный пучок (паровой котел)

Это – пучок труб, образующий теплообменник, расположенный на выходе из топки и пересекаемый газом высокой температуры (900 - 1100°C), где происходит испарение воды.

Общая передача тепла, если она осуществляется в основном конвекцией, составляет 40 - 60% общей энергии.

8.5.5.1.2.3.3. Перегреватель

Это змеевик, расположеный на выходе из топки перед испарителем, в котором насыщенный пар имеет высокую температуру (500°C) и становится перегретым.

Передача тепла осуществляется конвекцией и излучением: 10 - 20% общей энергии.

8.5.5.1.2.3.4. Регулятор температуры перегрева

Аппарат служит для снижения и регулирования температуры перегретого пара на выходе из котла.

Различают понижение перегрева:

— путем впрыска воды;
— путем контакта (теплообменник).

8.5.5.1.2.3.5. Экономайзер

Теплообменник, расположенный на выходе из котла, где дым (примерно 400°C) позволяет нагреть питательную воду котла до 150°C. Теплообмен происходит прежде всего конвекцией и составляет 5% общей энергии.

8.5.5.1.2.3.6. Воздухоподогреватель

Теплообменник, расположенный в системе циркуляции дыма перед или после экономайзера, позволяет нагреть воздух горения от 100 до 200°C.

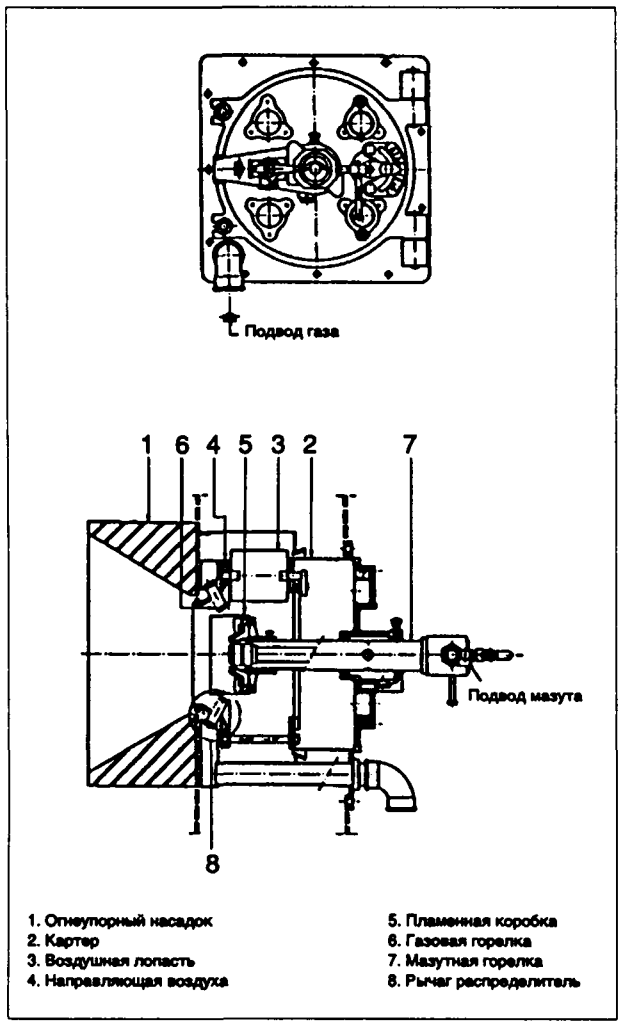
8.5.5.1.2.3.7. Рекуператор

Котел, отапливаемый природным газом, благодаря его свойствам и отсутствию коррозионности дыма может быть оборудован дополнительным теплообменником, позволяющим рекуперировать энергию для вспомогательного использования низкой температуры.

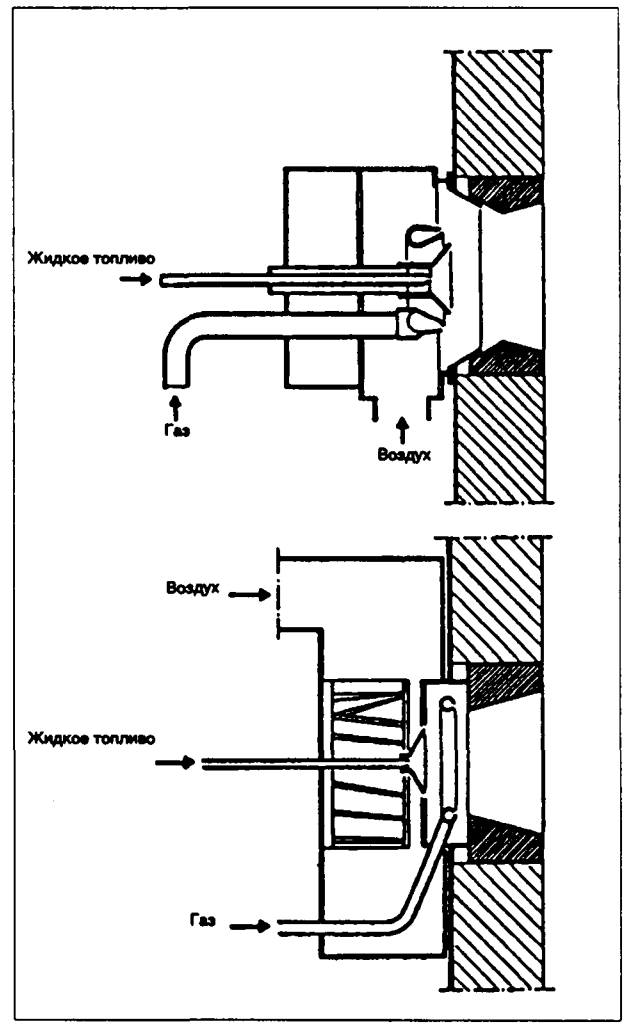
8.5.5.1.2.4. Вспомогательное оборудование

Речь идет о:

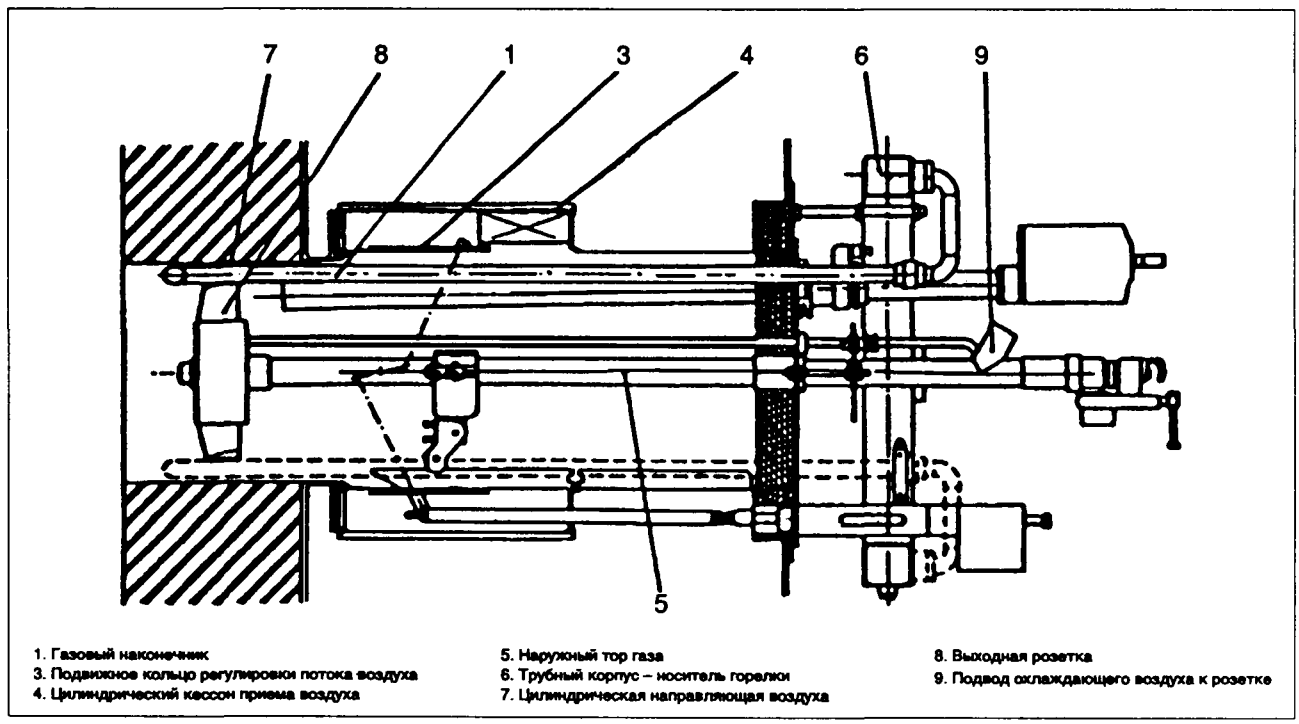
— вентиляторах воздуха, иногда для дома;
— регуляторном посте газа;
— питальных насосах циркуляции теплоносителя и питательных насосах паровых котлов;
— регулировании:
  · расхода топлива в зависимости от требуемого расхода тепла;



Горелка с центробежным вращением (Pillard).



Горелка с круговой подачей газа (Pillard и Foyers-Turbine).



Горелка с многоструйным вспрыском.

- расхода воздуха горения в зависимости от расхода топлива;
- расхода воды для поддержания уровня воды в котлах;
- температуры теплоносителя или температуры перегрева пара;
- избытка воздуха горения путем замера содержания кислорода;
- давления в топке;

— оптимизации:
- работы: предварительной вентиляции,
- очередности зажигания горелок,
- безопасности: наличия пламени, отсутствие воды, расхода теплоносителя, давления (воздух, газ, пар), температуры;

— контроле и регистрации:
- температуры, прозрачности и анализа продуктов сгорания,
- температуры и давления различных жидкостей;

— обработке и поддержании качества воды во избежание коррозии накипи в системах циркуляции воды и пара; питательная вода парового котла должна подвергаться нескольким обработкам: фильтрации, умягчению, декарбонизации, обезжелезиванию, деминерализации, термической или химической дегазации, гарантирующей анализ воды котла, который зависит от давления пара (см. таблицу ниже).

8.5.5.1.3. Типы котлов

Французский парк котлов составляет примерно 17000 единиц, общая мощность которых соответствует производству 100 000 т/ч пара или эквивалентно ему.

Число (% от парка)	Мощность, т/ч	Производство (% от общего)
50	2	5
5	20	50

Паровые котлы достаточно широко используются в качестве теплоносителя, так как пар:
- менее дорогой,
- имеет большую теплоемкость (скрытую теплоту испарения),
- имеет очень хороший коэффициент теплопередачи.

С точки зрения технологии различают три принципиально различных типа котлов:
— с дымовыми трубами (60% парка);
— с водяными трубами (25% парка);
— различного типа (15% парка).

8.5.5.1.3.1. Котлы с дымовыми трубами (газотрубные котлы)(с. 765)

Эти типы котлов характеризуются:
— повышенной постоянной максимальной мощностью, достигающей 30 т/ч,
— хорошей компактностью,
— очень конкурентноспособной ценой,
широко распространены и составляют 75% аппаратов из строящихся в последние десять лет.

Эти котлы, имеющие среднюю мощность 5 т/ч, работают в основном на жидком топливе или газе.

Газ имеет значительные преимущества при прочистке и ремонте дымоходов.

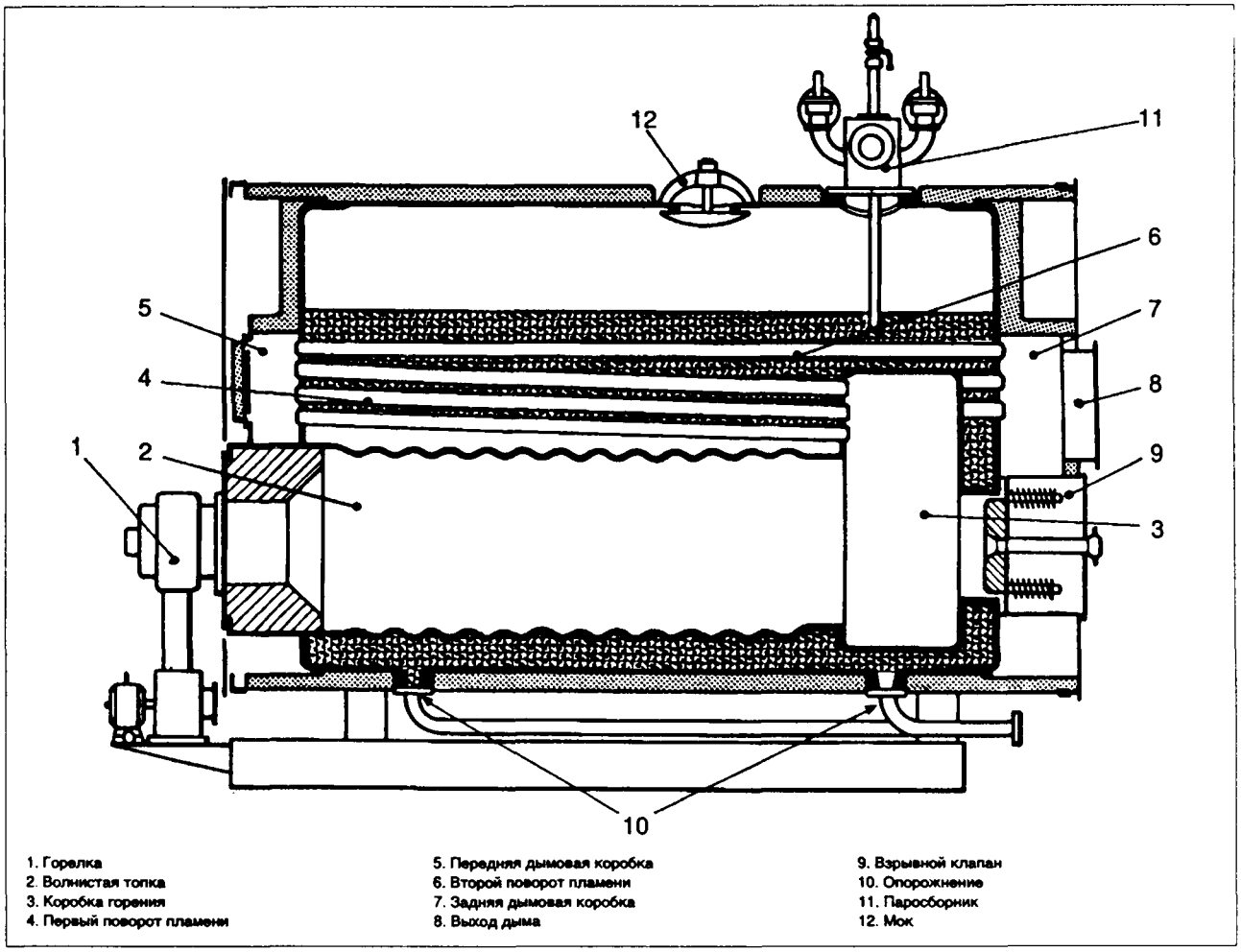
Рабочее давление, бар	≤15	15 - 25	25 - 35	35 - 45	45 - 55
1. Питательная вода					
*p*H холодной воды	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
THmax в d°f *	0,3	0,2	0,15	0,1	0,05
Кислород, max, мг/л	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01
2. Горячая вода					
*p*H при 25°C	11,5	11,4	11,2	11	10,5
TACmax в d°f	120	80	50	30	20
TACmin в d°f	25	20	15	10	5
Содержание солей (общее), мг/л	2 500	2 000	1 500	1 200	1 000
Фосфаты, мг/л PO_4	>30	>30	>30	>30	>30
Кремнезем, max, мг/л SiO_2	150	80	40	25	15
Отношение max SiO_2/TAC	1,5	1,5	1	1	1

* d°f – французские градусы (1 °f = 10 мг $CaCO_3$ на 1 литр воды).

Характеристика питательной воды парового котла с естественной циркуляцией, работающего под давлением меньше 55 бар, с подпиткой водой, дополнительно умягченной или декарбонизованно умягченной.

Давление, бар	Температура, °С	Объем массовый		Масса объемная		Энтальпия, кДж/кг		Энтропия, кДж/(кг·К)		Теплоиспарения, кДж/кг
		Вода, л/кг	Пар, м³/кг	Вода, л/кг	Пар, м³/кг	Вода	Пар	Вода	Пар	
0,010	6,982	1,000	129,20	1,000	0,00774	29,34	2 514	0,106	8,977	2 485
0,05	32,898	1,005	28,19	0,995	0,0355	137,8	2 561	0,476	8,396	2 424
0,10	45,833	1,010	14,67	0,990	0,0681	191,83	2 858	0,649	8,151	2 393
0,20	60,086	1,017	7,650	0,983	0,1307	252,45	2 610	0,832	7,909	2 358
0,30	69,124	1,022	5,229	0,978	0,1912	289,3	2 627	0,944	7,769	2 336
0,40	75,886	1,0265	3,993	0,974	0,2504	317,65	2 637	1,026	7,671	2 319
0,50	81,345	1,0301	3,240	0,971	0,3086	340,56	2 646	1,091	7,595	2 305
0,60	85,954	1,0333	2,732	0,968	0,3661	359,9	2 653	1,145	7,533	2 293
0,80	93,512	1,039	2,087	0,963	0,4792	391,7	2 666	1,233	7,435	2 274
1,0	99,632	1,0434	1,694	0,958	0,5904	417,5	2 675	1,303	7,360	2 258
1,0133	100,0	1,0437	1,673	0,958	0,5977	419,06	2 676	1,307	7,355	2 257
1,5	111,37	1,053	1,159	0,950	0,8628	467,1	2 693	1,433	7,223	2 226
2,0	120,23	1,061	0,8854	0,943	1,129	504,7	2 706	1,530	7,127	2 201
2,5	127,43	1,0675	0,7184	0,937	1,392	535,3	2 716	1,607	7,052	2 181
3,0	133,54	1,0735	0,6056	0,931	1,651	561,4	2 725	1,672	6,991	2 163
3,5	138,87	1,079	0,5240	0,927	1,908	584,3	2 732	1,727	6,939	2 147
4,0	143,62	1,084	0,4622	0,923	2,163	604,7	2 738	1,776	6,894	2 133
4,5	147,92	1,0885	0,4138	0,919	2,417	623,16	2 743	1,820	6,855	2 120
5,0	151,84	1,093	0,3747	0,915	2,669	640,1	2 747	1,860	6,819	2 107
6,0	158,84	1,101	0,3155	0,908	3,170	670,4	2 755,5	1,931	6,7575	2 085
7,0	164,96	1,108	0,2727	0,902	3,667	697,06	2 762	1,992	6,705	2 065
8,0	170,4	1,115	0,2403	0,897	4,162	720,94	2 767,5	2,046	6,660	2 046
9,0	175,36	1,121	0,2148	0,892	4,665	742,64	2 772	2,094	6,619	2 029
10,0	179,88	1,127	0,1943	0,887	5,147	762,6	2 776	2,138	6,583	2 013
12,0	187,96	1,139	0,1632	0,878	6,127	798,5	2 782,5	2,216	6,519	1 984
14,0	195,04	1,149	0,1407	0,870	7,106	830,1	2 788	2,284	6,465	1 958
16,0	201,37	1,159	0,01237	0,863	8,085	858,6	2 791,7	2,344	6,417	1 933
18,0	207,11	1,168	0,1103	0,856	9,065	884,6	2 795	2,398	6,375	1 910
20,0	212,42	1,177	0,995	0,850	10,05	908,6	2 797	2,447	6,337	1 888
22,5	218,41	1,187	0,08867	0,842	11,28	936	2 799	2,503	6,239	1 863
25,0	223,94	1,197	0,0799	0,835	12,51	962	2 801	2,554	6,254	1 839
27,5	229,07	1,207	0,07268	0,828	13,76	986,9	2 801	2,601	6,217	1 816
30,0	233,84	1,216	0,06663	0,822	15,01	1 008	2 802	2,645	6,184	1 794
35,0	242,54	1,234	0,05703	0,810	17,54	1 050	2 802	2,725	6,123	1 752
40,0	250,33	1,252	0,04975	0,799	20,10	1 087	2 800	2,796	6,068	1 713
45,0	257,41	1,269	0,04404	0,788	22,71	1 122	2 798	2,816	6,019	1 675
50,0	263,91	1,286	0,03943	0,778	25,36	1 154	2 794	2,921	5,973	1 640
55,0	269,93	1,302	0,03563	0,768	28,07	1 185	2 790	2,976	5,931	1 605
60,0	275,55	1,319	0,03244	0,748	30,83	1 214	2 785	3,027	5,891	1 571
65,0	280,82	1,335	0,02972	0,738	33,65	1 241	2 779	3,076	5,853	1 538
70,0	285,79	1,351	0,02737	0,740	36,53	1 267	2 773	3,122	5,816	1 506
75,0	290,5	1,368	0,02533	0,731	39,48	1 293	2 767	3,166	5,781	1 474
80,0	294,97	1,384	0,02353	0,772	42,51	1 317	2 760	3,216	5,740	1 443
85,0	299,23	1,401	0,02193	0,714	45,61	1 341	2 753	3,248	5,714	1 412
90,0	303,31	1,418	0,02050	0,705	48,79	1 364	2 745	3,287	5,682	1 381
95,0	307,21	1,435	0,01921	0,697	52,06	1 386	2 736	3,324	5,651	1 350
100,0	310,96	1,453	0,01804	0,688	55,43	1 408	2 728	3,361	5,620	1 320
110,0	318,05	1,489	0,01601	0,672	62,48	1 450,5	2 709	3,430	5,559	1 258,5
120,0	324,65	1,527	0,01428	0,655	70,01	1 492	2 689	3,497	5,500	1 197
130,0	330,83	1,567	0,01280	0,638	78,14	1 532	2 667	3,562	5,441	1 135
140,0	336,64	1,611	0,01150	0,621	86,99	1 572	2 643	3,624	5,380	1 071
150,0	342,13	1,658	0,01034	0,603	96,71	1 611	2 615	3,686	5,318	1 004
160,0	347,33	1,710	0,00931	0,585	107,4	1 651	2 585	3,747	5,253	934
170,0	352,26	1,770	0,00837	0,565	119,5	1 692	2 552	3,811	5,185	860
180,0	356,96	1,840	0,00750	0,544	133,4	1 735	2 514	3,877	5,113	779
190,0	361,43	1,926	0,00668	0,519	149,8	1 779	2 471	3,943	5,033	692
200,0	365,70	2,037	0,00588	0,491	170,2	1 826	2 418	4,015	4,941	592
210,0	369,78	2,201	0,00502	0,454	199,1	1 886	2 348	4,105	4,822	461
220,0	373,69	2,671	0,00373	0,374	268,3	2 011	2 196	4,295	4,580	184,5
221,2	374,15	3,17	0,00317	0,3155	315,5	2 107	2 107	4,443	4,443	0

Таблица насыщения паров.



Современный котел с внутренней топкой и дымовыми трубами.

Эти котлы цилиндрической формы состоят из:

— топки – горизонтальной трубы, часто гофрированной для увеличения поверхности теплообмена и восприятия тепловых напряжений;
— труб, в которых проходят продукты сгорания, делающие второй или третий "проход";
— оболочки, закрытой с обеих сторон барабанами, в который вварены или запрессованы дымовые трубы топки, открывающейся в дымовую коробку.

Конструкция этих генераторов подчиняется нормам NF E 32 - 104.

8.5.5.1.3.2. Котлы с водяными трубами (водотрубные котлы)

Эти котлы отличаются:

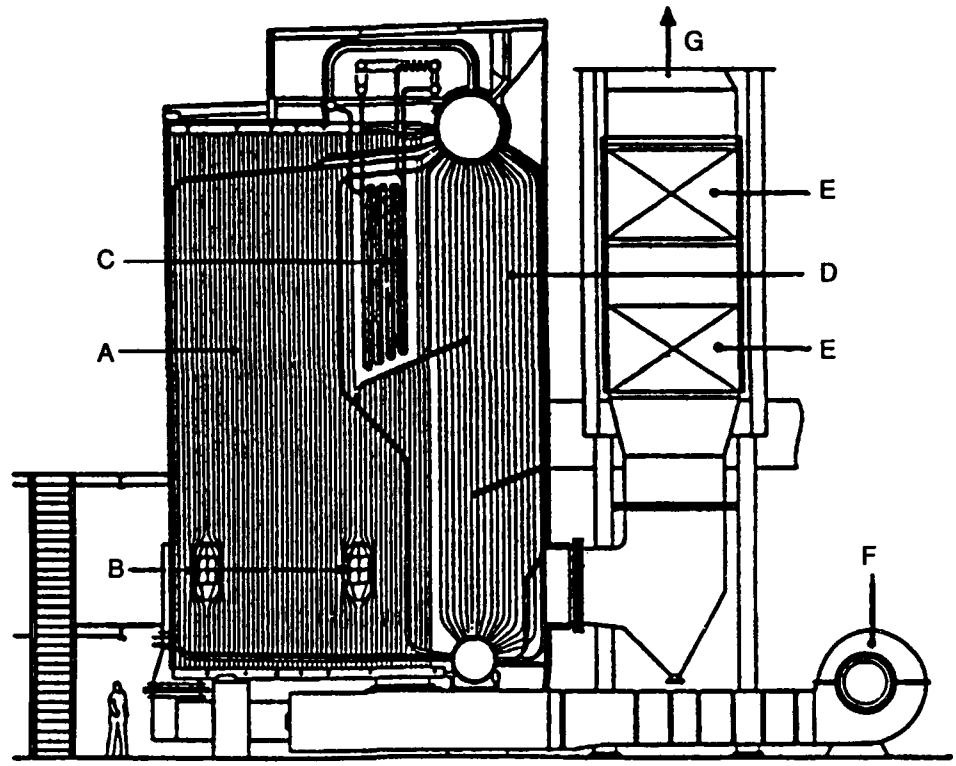
— высокой надежностью;
— высоким качеством (150 бар, 500°C) производимого пара;
— большой производительностью: 450 т/ч – в промышленности, 2000 т/ч – на теплоцентралях.

Они состоят из двух цилиндрических резервуаров-коллекторов: верхнего (испаритель) и нижнего, соединенных водяными трубами, создающими стенки топки (трубный экран) и паровой пучок.

Выбор этого типа котла часто отвечает жестким техническим требованиям. Эти котлы могут легко адаптироваться к различным видам топлива: твердого, жидкого, газообразного, и часто могут работать на нескольких видах топлива.

Характеристика	Дымовые трубы	Водяные трубы
Производство	Перегретая вода	Насыщенный пар
	Насыщенный пар	Перегретый пар
Производительность	25 - 30 т/ч	До 450 т/ч
Давление	25 бар max	До 150 бар
Объем воды	Большой	Малый
Тепловая энерция	Большая	Малая
Гибкость	Средняя	Хорошая
Способность воспринимать большое изменение расхода	Хорошая	Слабая
Качество пара	Хорошее	Очень хорошее
Топливо	Жидкое, газовое	Жидкое, твердое или газовое

Паровые котлы.



A : Топка
B : Горелки
C : Перегреватель
D : Испаритель
E : Экономайзер
F : Дутьевой вентилятор
G : Выход дыма
Расход пара 70 т/ч
Давление воды 54 бар
Перегрев 445 °C
Топливо: мазут, газ, CO

Котел Stein-Industrie тип VU-60.

8.5.5.1.3.3. Другие типы котлов

8.5.5.1.3.3.1. Котлы с "закрытыми" трубами и с "пальцами перчаток"

8.5.5.1.3.3.2. Котлы мгновенного испарения (прямоточные)

— Циркуляция принудительная;
— очень небольшая тепловая инерция;
— небольшая производительность (4-5 т/ч max);
— высокое давление (100 бар).

8.5.5.1.3.3.3. Котлы перегретой воды с контролируемой циркуляцией

8.5.5.1.3.3.4. Котлы со специальным теплоносителем

8.5.5.1.3.3.5. Электрические котлы для производства

— Горячей воды или пара;
— с обогревательными трубами, с индукционными трубами, с термопогружными трубами или с электродами для большой мощности (6 - 50 МВт).

8.5.5.1.3.3.6. Котлы на угле

Они характеризуются большим объемом топки, превышающим в два, три раза размеры топок котлов на газе или жидком топливе.

Различают топки:

— с механической решеткой;
— с самозабрасывателем;
— с жидким слоем;
— с пылеугольной горелкой.

8.5.5.1.4. Элементы, характеризующие котел

8.5.5.1.4.1. Теплоноситель

— Состав, максимальная допустимая температура;
— коэффициент теплового расширения, вязкость;
— теплоемкость;
— расход.

8.5.5.1.4.2. Водяной объем циркуляции теплоносителя

Современные паровые котлы имеют небольшой объем воды и пара, что позволяет увеличить давление и гибкость работы.

8.5.5.1.4.3. Объем топки

Она должна соответствовать типу и мощности горелки.

8.5.5.1.4.4. Поверхность обмена

Это общая поверхность, подвергаемая воздействию радиации пламени и конвекции, которая характеризуется:

— природой материала;
— температурой поверхности;
— тепловым потоком.

8.5.5.1.4.5. Клеймо

Клеймо – это расчетное давление (с точки зрения сопротивления материалов) частей, находящихся под давлением. Это давление, выраженное в барах, при котором открывается предохранительный клапан, обычно выше на 10% максимального рабочего давления.

Гидравлическое давление испытания, которое проводится один раз в десять лет, при нормальной работе равно 1,5 давления "клейма".

8.5.5.1.4.6. Термический коэффициент полезного действия

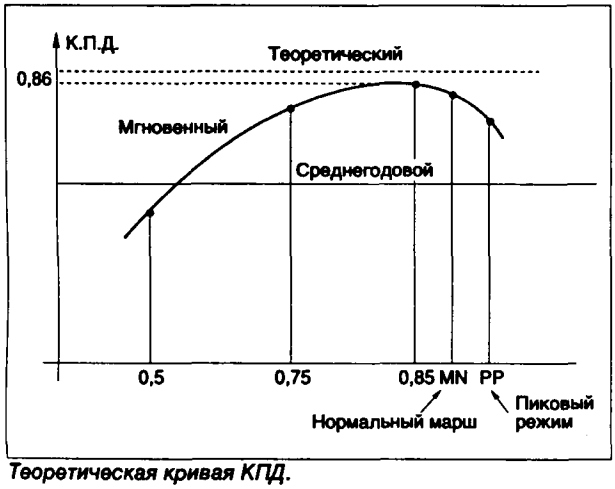
Коэффициент полезного действия котла – это отношение полезной его тепловой мощности, которую он производит, к мощности, подведенной при сжигании топлива с помощью горючего или других источников тепла.

КПД, указанный изготовителем, относится к новому и очень чистому котлу. В действительности, средний КПД ниже КПД, указанного изготовителем, из-за различных потерь, возникающих в процессе эксплуатации. Причины, приводящие к потерям, следующие:

— нагрузка котла;
— состояние загрязнения;
— продувка разрегулирования;
— остановка производства.

Прямой замер КПД осуществить затруднительно. Предпочтительней определить различные потери:

— тепло, уносимое продуктами сгорания (наибольшие по величине);



Теоретическая кривая КПД.

— тепловые потери через стенки и в процессе вентиляции топки при остановке горелки;
— энергия, забираемая в процессе приготовления топлива (разогрев тяжелого топлива, размельчение угля);
— потери с недожигом,

сумма которых представляет разницу между подведенной энергией и пригодной к использованию на выходе из котла.

При полном сгорании топлива потери с продуктами сгорания в % P.C.J. определяются в зависимости от содержания кислорода в дыме по формуле:

$$\text{Потери (\% к P.C.J.)} = K\frac{\Delta T}{21 - \%\,O_2}.$$

Величина K равна:

— уголь – 0,779,
— тяжелое топливо – 0,769,
— домашнее топливо – 0,760,
— природный газ – 0,836;

ΔT = (температура дыма – температура воздуха горения), °C.

Нормы NF E 32 - 130 определяют правила испытания, замеров потерь и прямое определение КПД.

8.5.5.1.4.7. Избыток воздуха в дыме

Избыток воздуха и температура дыма являются определяющими факторами КПД. Избыток воздуха в дыме может быть результатом избытка воздуха горения или подсасывания воздуха в топке (в топке под разряжением или подогревателе воздуха).

Очень большой избыток воздуха увеличивает потери тепла с продуктами сгорания, избыток воздуха очень небольшой увеличивает потери с недожигом. Оптимальный избыток воздуха регулируется при номинальной работе котла. При малой нагрузке относительно большое оборудование нагрева требует с целью сохранения полноты сгорания большего избытка воздуха, что приводит к снижению КПД.

КПД быстро падает ниже 50% по отношению к номинальной нагрузке.

Газ позволяет работать с небольшим избытком воздуха: 5 - 15% по отношению к номинальному.

Прогресс системы анализов "in situ" содержания кислорода в дыме (с помощью зонда из циркония) позволяет осуществлять постоянный контроль и регулирование избытка воздуха, поддерживая его равным оптимальной величине (2 - 5%), рентабельной даже на котлах малой мощности.

При равной температуре снижение содержания кислорода в дыме на один пункт ведет к выигрышу в КПД на 0,5 пункта.

8.5.5.1.4.8. Температура продуктов сгорания

Значительные потери тепла прямо пропорциональны разнице между температурами дыма и воздуха горения, часто равной температуре окружающей среды.

Снижение температуры дыма на 20°C дает выигрыш в один пункт КПД.

Снижение температуры дыма, а следовательно, улучшение КПД ограничено:

— появлением серной коррозии при использовании топлива, содержащего серу, когда температура снижается ниже точки росы серы (например, 150°C примерно для тяжелого топлива);
— температурой холодной жидкости на входе в котел.

При использовании природного газа, возможно, если располагать достаточно холодной жидкостью, охладить дым до температуры меньше точки росы (60°C) и рекуперировать за счет конденсации всю или часть скрытой теплоты дыма и выиграть около 15% КПД.

8.5.5.1.4.9. Потери тепла через стенки

На котлах улучшение изоляции стенок уменьшило эти потери, которые составляют порядка 1 - 2% энергии, потребляемой при нормальной работе.

Эти потери практически не зависят от нагрузки котла и становятся заметными, если котел работает на пониженной нагрузке.

Нормы NF E 32 - 131 уточняют изменения потерь через стенки.

8.5.5.1.4.9.1. Потери от недожига и осадков (унос)

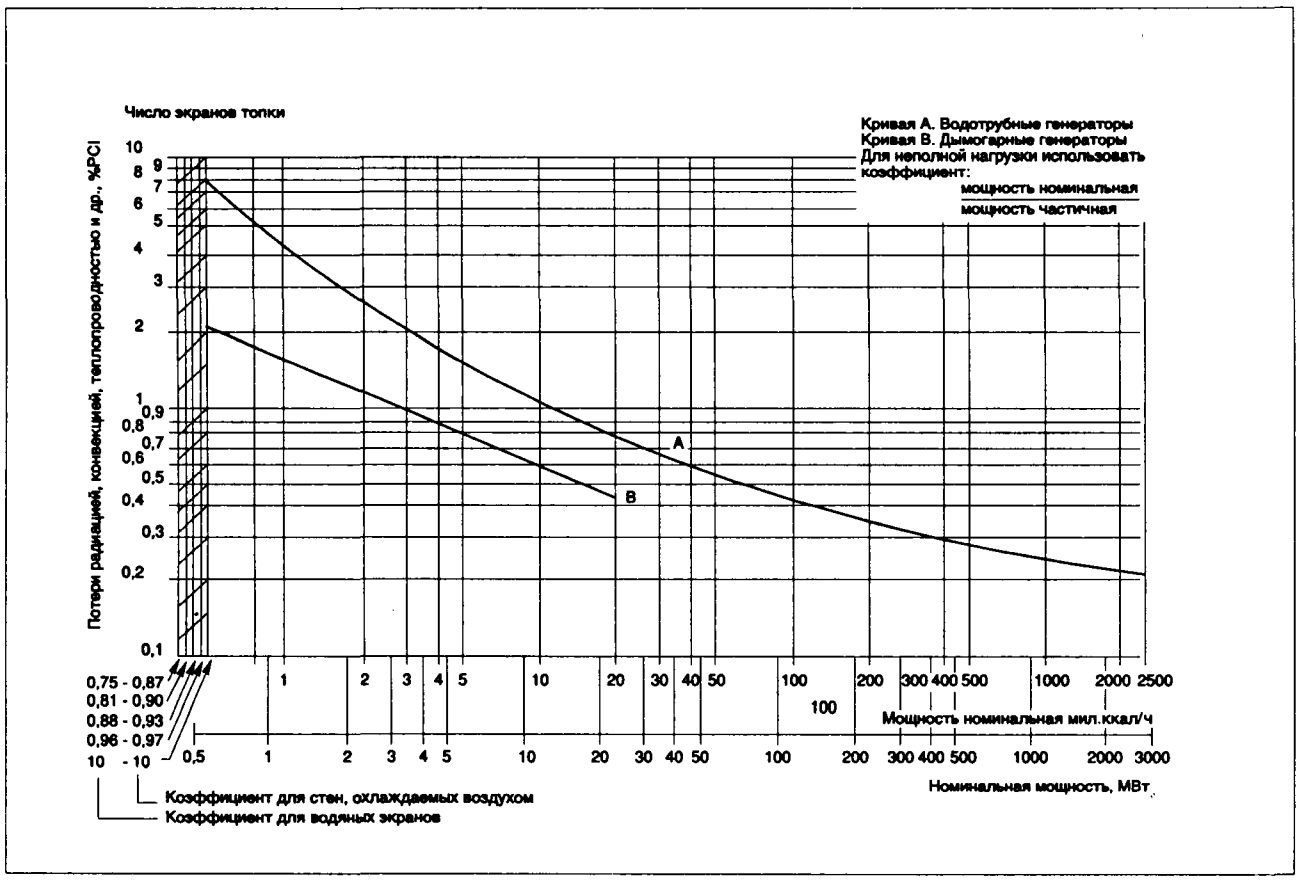
Если регулировка сгорания сделана правильно, эти потери равны нулю при использовании газовых топлив, или практически равны нулю при использовании тяжелых мазутов, но становятся значительными при сжигании твердых топлив. В этом случае они суммируются с потерями тепла, накопленного в пепле и в золе.

8.5.5.1.4.9.2. Потери в процессе вентиляции топки

Эти потери становятся заметными и влияют на средний КПД эксплуатации, когда котел имеет чрезмерные размеры и часто останавливается. Вентиляция осуществляется за счет естественной тяги и предварительной вентиляции топки в процессе очередного зажигания горелки (см. рисунок).

8.5.5.1.5. Перевод котлов на природный газ

Обычно, когда перевод на природный газ котла, первоначально предназначенного для работы на жидком топливе или угле, выполнен корректно, эффективность работы котла сохраняется или улучшается. При использовании газа уменьшение обмена радиацией на уровне топки может привести в некоторых случаях в зависимости от качества труб к увеличению температуры газа в перегревателе.



Потери тепла в зависимости от мощности котлов (код ABMA).

	Котел на жидком топливе	Котел на угле
Необходимая модификация	— Замена и адаптация горелок	— Демонтаж или защита решетки огнеупорным материалом — Прекращение снабжения
Проверка и основная модификация	— Перегреватель, если необходимо после консультации с изготовителем — Тщательная очистка холодной части в контакте с дымом — Проверка производительности вентилятора	— Защита огнеупорной части с помощью экрана водяных труб — Увеличение напора вентилятора — Уменьшение производительности дымососа — Герметичность топки
Возможное улучшение	— Дополнительная рекуперация на отводе продуктов сгорания: подогрев воздуха (например)	— Увеличение мощности путем установки дополнительного экрана водяных труб в зависимости от объема топки
	— Установка дополнительного рекуператора, позволяющая снизить температуру дыма, можно достичь конденсации, если располагать достаточно холодным источником — Часто в условиях работы выигрыш в эксплуатации эквивалентен выигрышу КПД	
Результаты	4 - 10 пунктов — Устранение коррозии «холодной» части со стороны дыма	8 - 12 пунктов — Выигрыш места
	— Улучшение гибкости эксплуатации — Упрощение установок и дополнительных напряжений — Упразднение хранилища топлива — Возможность увеличения автоматизации, телеобслуживания и автоматического контроля — Устранение серной коррозии — Устранение загрязнения — Улучшение условий работы	

Применение газа в котлах.

8.5.5.2. Отопление промышленных зданий

8.5.5.2.1. Введение

Отопление промышленных зданий преследует разнообразные цели:

— поддерживать работу механизмов;
— избегать повреждения продукции;
— обеспечивать состояние комфорта работающих.

Надо заметить, что ощущение комфорта воспринимается индивидуумом в зависимости от:

— температуры воздуха;
— скорости и влажности воздуха;
— температуры ближайших стенок.

Так, для оценки состояния комфорта существует понятие "результирующей сухой температуры" (trs). На практике говорят о внутренней температуре (ti)

$$ti = \frac{ta + tp}{2} + R,$$

где:

ta – температура воздуха;

tp – температура стенки;

R – эффект, создаваемый радиацией системы отопления.

Отопление помещений может осуществляться двумя способами:

— горячий воздух; в этом случае поправка R = 0 и приравнивая T_p и T_a, получаем ti = ta;
— радиация; для зон, подверженных ей, имеем tp = ta и окончательно ti = ta + R.

8.5.5.2.2. Отопление горячим воздухом

8.5.5.2.2.1. Расчет установленной мощности и расчетный баланс потребления

— Установленная мощность

Теоретически полезная установленная мощность должна быть равна потерям тепла здания. На практике, чтобы ограничить время, необходимое для расчета требуемой внутренней температуры ti, применяется коэффициент повышения мощности S, который будет применен к потерям через стенки. Таким образом, полезная установленная мощность для отопления помещения рассчитывается следующим образом:

$$P = [(1 + S)\, d_1 + d_2]\, (ti - tb) \times 10^3,$$

где:

P – установленная мощность, кВт;

d_1 – потери через стенку, Вт/°C, при разности температур в 1°C;

d_2 – потери радиацией воздуха, Вт/°C, при разности температур в 1°C;

tb – температура базовая наружная, °C (см. D.T.U., правила Th);

ti – внутренняя желательная температура (воздуха), °C

S: 0,1 – для постоянного отопления,

· 0,15 – для непостоянного отопления легкого здания,

· 0,25 – для непостоянного обогрева тяжелых конструкций (кирпичных).

— Расчетный баланс годового потребления газа, необходимого для отопления здания, может быть установлен с помощью следующего выражения:

$$C = 24 d DJ\theta_{nc} \alpha_h \theta_{nc} \beta \frac{1}{\eta} \times 10^{-3},$$

где:

C – кВт · ч; P.C.I. в год;

d – $d = d_1 + d_2$ – общие потери для разности температур в 1°C, Вт/°C;

$DJ\theta_{nc}$ – число градусов-дней при температуре остановки отопления в данном месте;

$\alpha_h \theta_{nc}$ – коэффициент часового разделения градусов-дней θ_{nc} в первом приближении "prorata temporis" - число часов отопления в сутки;

β – недельный коэффициент разделения, например, 5/7, если нет отопления в течение двух дней недели;

η – общий средний коэффициент рассматриваемой установки в P.C.I. газа,

или

$$\theta_{nc} = ti - \frac{A}{d},$$

A – доля стороннего притока в Вт, если d выражено в Вт/°C.

8.5.5.2.2.2. Разнообразная техника

8.5.5.2.2.2.1. Тепловой вентиляционный генератор

— Принцип и общие характеристики.

Воздух, взятый снаружи здания, нагревается и смешивается с продуктами сгорания газа атмосферной горелки. Таким образом, нет промежуточной жидкости и КПД нагрева составляет 100% P.C.I. Эти типы аппаратов имеют три составные части. Диапазон характеристик и использования стандартного оборудования:

— расход воздуха от 3.5 до более чем 100 000 м³/ч;
тепловая мощность от 60 до 2 000 кВт;

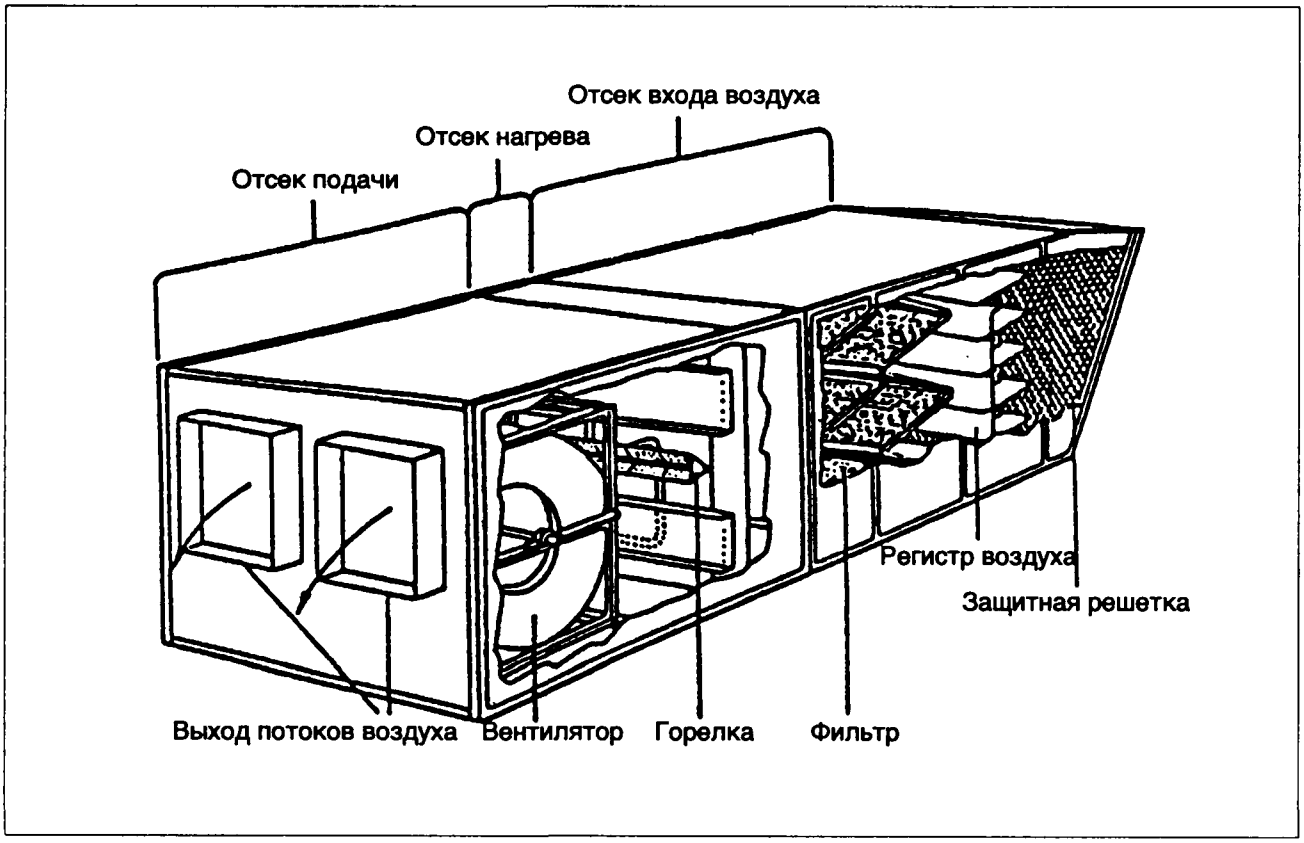
— Различные способы применения.

Тепловые вентиляционные агрегаты могут использоваться для удовлетворения различных потребностей:

— нагрев свежего воздуха до температуры близкой к внутренней температуре цеха;

— нагрев свежего воздуха до температуры более высокой, позволяющей компенсировать полностью или частично потери тепла через стенки здания;

— производство горячего воздуха тепловой воздушной завесы, чтобы препятствовать проникновению холодного воздуха в открытую дверь и созданию дискомфортных условий для работающих.



Тепловой вентиляционный генератор.

— Регламентация

Полезно обратиться к спецификации A.T.G.C. 32.2, которая уточняет, в первую очередь, что забор воздуха из помещения на выходе из горелки запрещен. К тому же, если в вентилируемом помещении находится персонал, нельзя,чтобы суммарная концентрация подаваемой газовой смеси превосходила следующие величины:

- оксид углерода (CO) - 10 p.p.m.,
- диоксид азота (NO_2) - 1 p.p.m.,
- формальдегиды (CH_2) - 1 p.p.m.,
- диоксид углерода (CO_2) - 2200 p.p.m.

Если суммарная концентрация CO при использовании атмосферных горелок значительно ниже 10 p.p.m., то предел концентрации CO_2 в 2 200 p.p.m. предполагает, что температура воздуха не превысит 60°C при использовании природного газа и 51°C при использовании коммерческих пропана и бутана.

8.5.5.2.2.2.2. Генератор горячего воздуха

— Принцип и общие характеристики

Воздух, обычно забираемый внутри здания, нагревается в теплообменнике, в котором циркулируют продукты сгорания. КПД этих аппаратов изменяется от 80 до 90% P.C.I.

Этот тип генератора состоит из следующих элементов (см. рисунок):

- горелка (1)
- пламя (2),
- камера сгорания (3)
- турбулентный теплообменник (4),
- центробежный вентилятор (5),
- электродвигатель вентилятора (6),
- заборная решетка (7),
- выброс продуктов сгорания (8),
- решетка подачи горячего воздуха (9).

Полезная мощность аппаратов, разработанных различными изготовителями, изменяется от 50 до 1200 кВт.

Некоторые аппараты могут поднять температуру до 80°C. Наибольшая мощность достаточна для того, чтобы поднять температуру до 200°C. Желательно ограничить температуру в помещении до 50°C, чтобы избежать большой стратификации воздуха в нем.

Но представляется, что в этом случае необходимо иметь сеть воздуховодов, оборудованных электроконвекторами.

— Различные способы установки

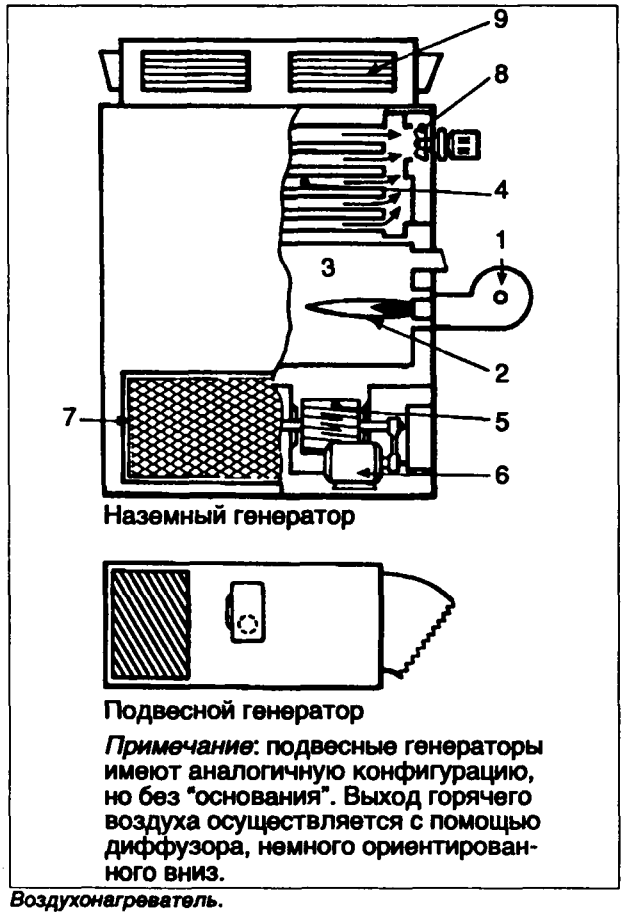
Они могут устанавливаться на земле или быть подвешены, установлены в центре цеха или отнесены на его периферию.

Стараются их не устанавливать в плохо изолированных помещениях большой высоты (более 10 м).

8.5.5.2.2.2.3. Газовые воздухонагреватели

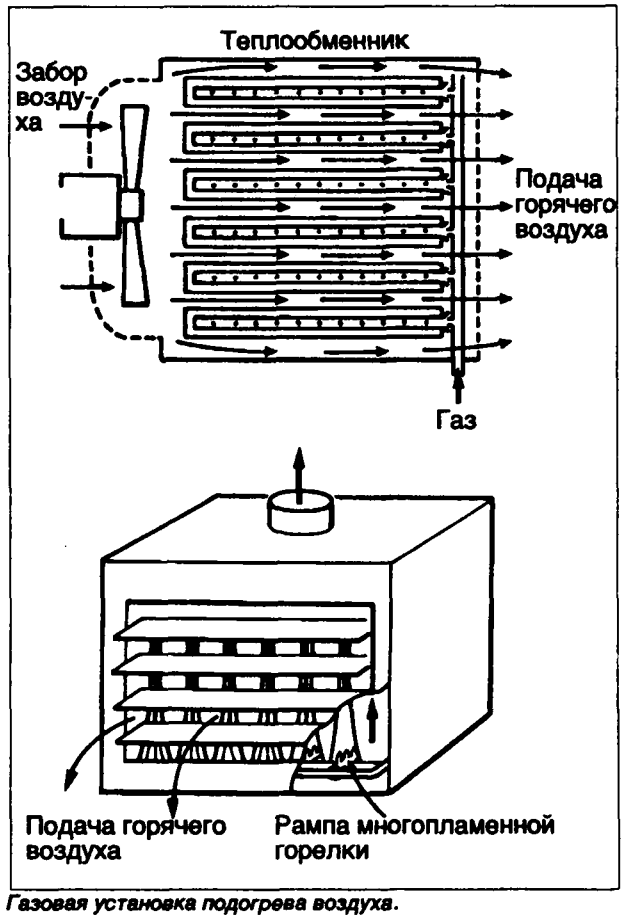
— Принципы и основные характеристики

Воздух, забранный наиболее часто внутри помещения, а иногда прямо снаружи, нагревается в теплообменнике, внутри которого движутся продукты сгорания (см. рисунок).



Примечание: подвесные генераторы имеют аналогичную конфигурацию, но без "основания". Выход горячего воздуха осуществляется с помощью диффузора, немного ориентированного вниз.

Воздухонагреватель.



Газовая установка подогрева воздуха.

КПД этих аппаратов порядка 85% по P.C.I.

Диапазон мощностей находится в пределе от 25 до 120 кВт.

Чтобы избежать значительных колебаний температуры горячего воздуха, температура подачи остается всегда средней, обычно ниже 50°C.

Установленные в соответствии со своей мощностью воздухоподогреватели находятся друг от друга на расстоянии от 12 до 25 м. Таким образом, они заранее предназначены для небольших зданий.

— Расположение

Они поднимаются на высоту 2,5 - 3 м на периферии отапливаемого помещения и располагаются друг от друга на расстоянии 15 м.

— Регламентация

Условия, которые надо соблюдать при установке, такие же как у генератора горячего воздуха, если только это цех не под разряжением.

8.5.5.2.2.2.4. Котлы и воздухонагреватели

Речь идет об отоплении "централизованным" способом. Промежуточная жидкость воспринимает в котле часть энергии сжигания газа, транспортирует ее к отапливаемому помещению и отдает через воздухонагреватель в окружающий воздух.

Описание используемых котлов приведено в § 8.5.5.1.

Промежуточные жидкости бывают четырех типов:

— пар низкого и среднего давления;

— горячая вода с максимальной температурой на выходе из котла 105°C;

— перегретая вода, температура которой остается выше 200°C;

— теплоноситель на минеральной основе (естественной или синтетической), который может работать при очень небольшом давлении до температуры 300°C без испарения. Основные элементы воздухонагревателя представлены на рисунке с. 773.

8.5.5.2.3. Радиационное отопление

8.5.5.2.3.1. Общая часть

В отоплении используется инфракрасное излучение, длина волн которого составляет примерно от 2 до 8 мкм.

Инфракрасные лучи перемещаются по прямой линии без значительной потери энергии, они могут отражаться и не поглощаться воздухом.

Когда лучи воспринимаются телом, они трансформируются в тепло. Основные преимущества радиационного отопления заключаются в следующем:

— не нагревается воздух, а только твердые и жидкие тела, потери через стенки и с вентиляцией незначительны;

— мощность может использоваться точно по назначению и позволяет обогревать только часть помещения;

— за счет малой инерции можно быстро поднять температуру в помещении.

8.5.5.2.3.2. Разнообразная техника

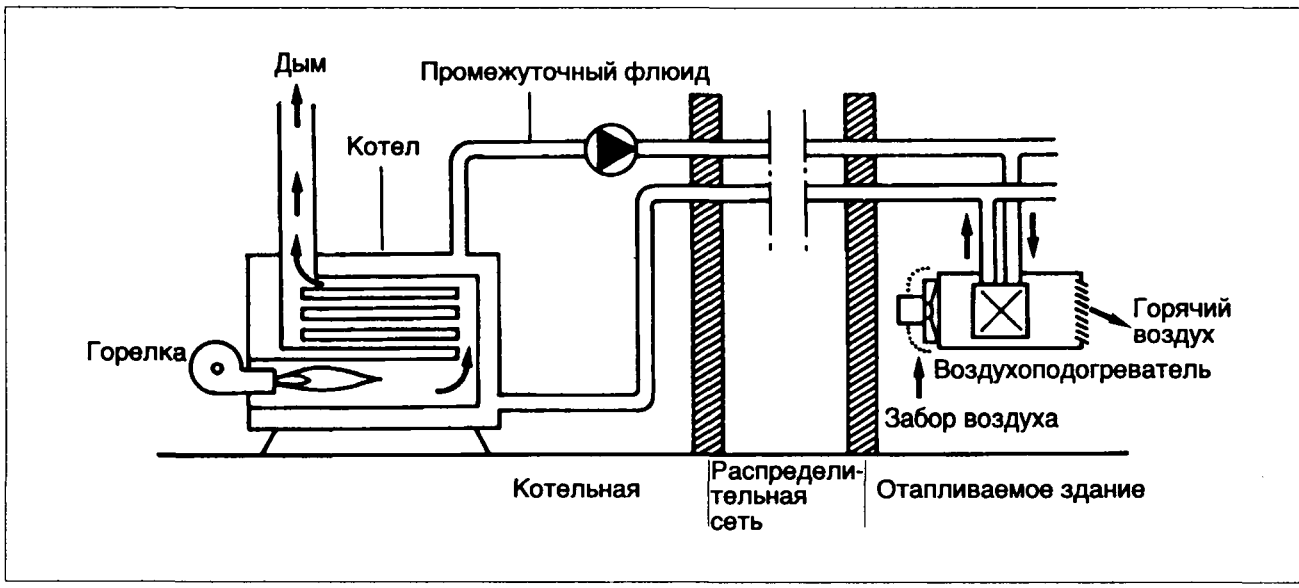
8.5.5.2.3.2.1. Светящиеся радиационные панели

— Принцип

Они выделяют лучи длиной волн $\lambda \simeq 3$ мкм, соответствующие температуре излучающей поверхности между 750 и 950°C. Радиация этих аппаратов имеет большую способность к проникновению, чем радиационных труб низкой температуры. Газовоздушная смесь вытекает по тонким каналам через отражательные панели. Сжигание осуществляется около наружной поверхности отражателей, поддерживая ее при высокой температуре (с. 773).

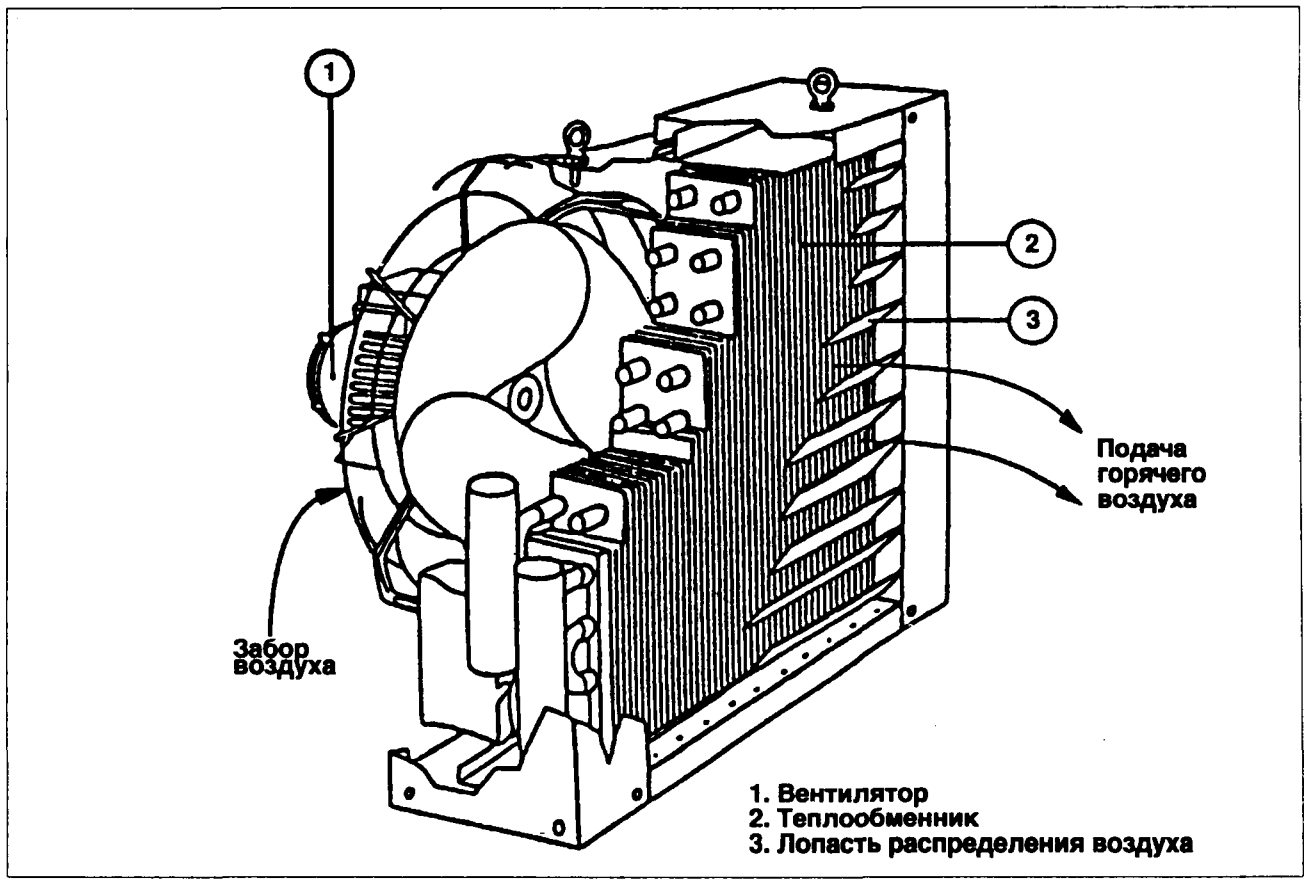
Аппараты работают при полном предварительном смешении воздуха.

Продукты сгорания, поступающие в отапливаемое помещение, не создают никакой гигиенической опасности. Они содержат пары воды, которые могут немного конденсироваться на стенках.

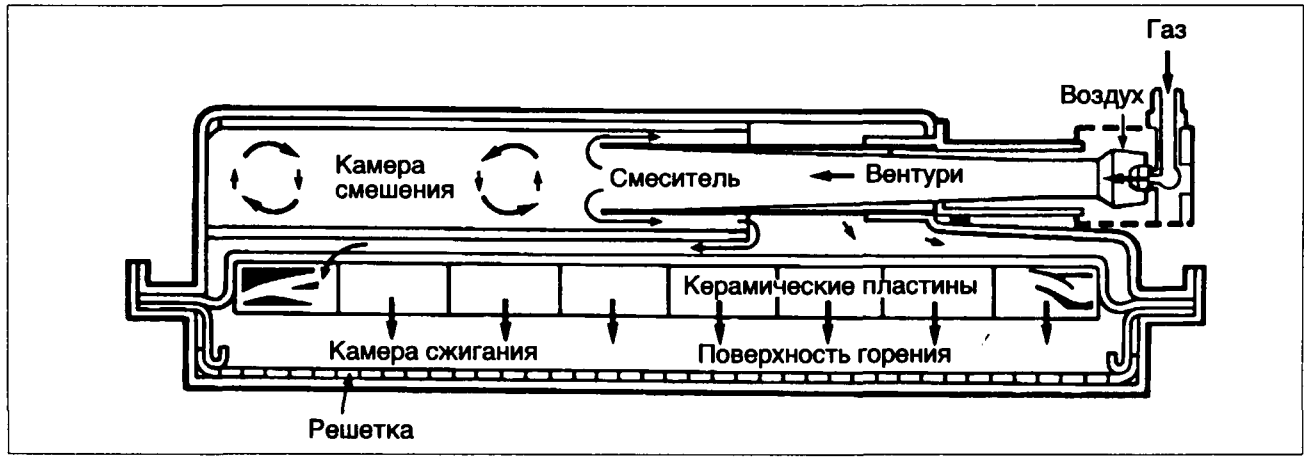


Котел + воздухонагреватель.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА



Воздухонагреватель.



Светящаяся радиационная панель.

Чтобы избежать конденсации, помещение может легко вентилироваться.

— Технические характеристики
- номинальная тепловая мощность – от 4 до 60 кВт;
- радиационный КПД – от 45 до 60%;
- термический КПД – 100% для P.C.I.;
- высота установки в зависимости от типа – от 3,5 до 12 м.

— Установка

Не существует общих правил расчета и установки радиационных панелей. Каждый строитель вырабатывает свои собственные правила расчета.

Во всяком случае, излучатель должен располагаться достаточно высоко, чтобы избежать всех неудобств для персонала и перегрева предметов. Минимальное расстояние до воспламеняющейся поверхности – 1,5 м.

8.5.5.2.3.2.2. Радиационные трубы низкой температуры

— Принцип

Они испускают лучистую энергию с длиной волн 4 - 5 мкм, соответствующих температуре поверхности между 250 и 500°C.

Принцип действия состоит в нагреве стальных труб продуктами сгорания газовых горелок.

Можно встретить два типа труб:

- ряд труб, оборудованных горелками, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга, и имеющих один или несколько вентиляторов. Отражатель, расположенный под трубами, направляет радиационное излучение вниз;
- аппарат-моноблок, имеющий трубу в форме булавки и рефлектор (см. с. 775).

Каждый аппарат оборудован одной горелкой и одним вентилятором для отвода дыма.

— Техническая характеристика аппарата
- Номинальная тепловая производительность 13 - 38 кВт в зависимости от изготовителя;
- длина 3,5 - 6 м в зависимости от модели;
- термический КПД 75 - 87% для P.C.I. в зависимости от изготовителя;
- длина установки 3 - 7 м.

— Установка

Не существует точных правил расчета установки отопления с помощью радиационных труб. Предпочтительнее пользоваться рекомендациями изготовителей оборудования.

Минимальное расстояние до воспламеняющейся поверхности 1,25 м вниз.

8.5.5.2.3.2.3. Генератор горячего воздуха и радиационные трубы

— Принцип

Трубы излучают радиацию, длина волн которых находится между 4,5 и 7,5 мкм.

Эта система состоит из следующий частей (рис. с. 775):

- генератор горячего воздуха, оборудованный горелкой атмосферного типа;
- каналы распределения и возврата горячего газа из спиральных, тонких оцинкованных труб.

Вентилятор осуществляет циркуляцию смеси воздух–продукты сгорания в трубах, второй подает воздух на горение.

Мощность генераторов горячего воздуха составляет 250 - 500 кВт.

Радиационные трубы могут группироваться в один циркуляционный контур из 2, 3, 4 или 6 труб, соединенных параллельно, подвешенных на высоте от 4 до 10 метров.

— Установка

Расчет устанавливаемой мощности и баланс расчетного потребления осуществляются эмпирическим способом каждым изготовителем.

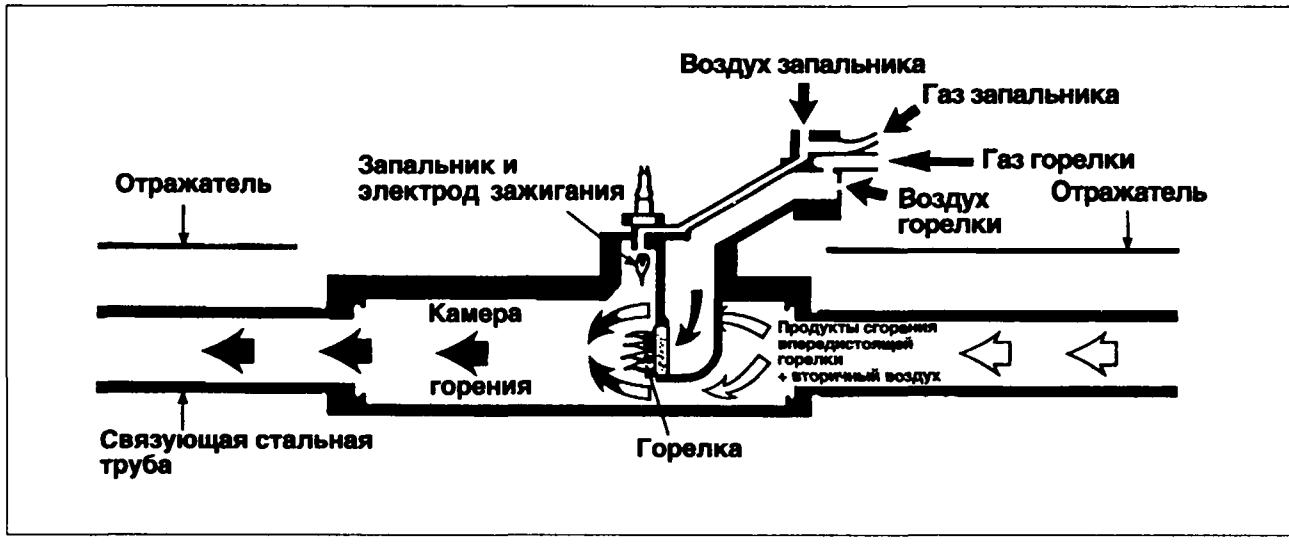
8.5.5.3. Сушка

8.5.5.3.1. Несколько теоретических аспектов

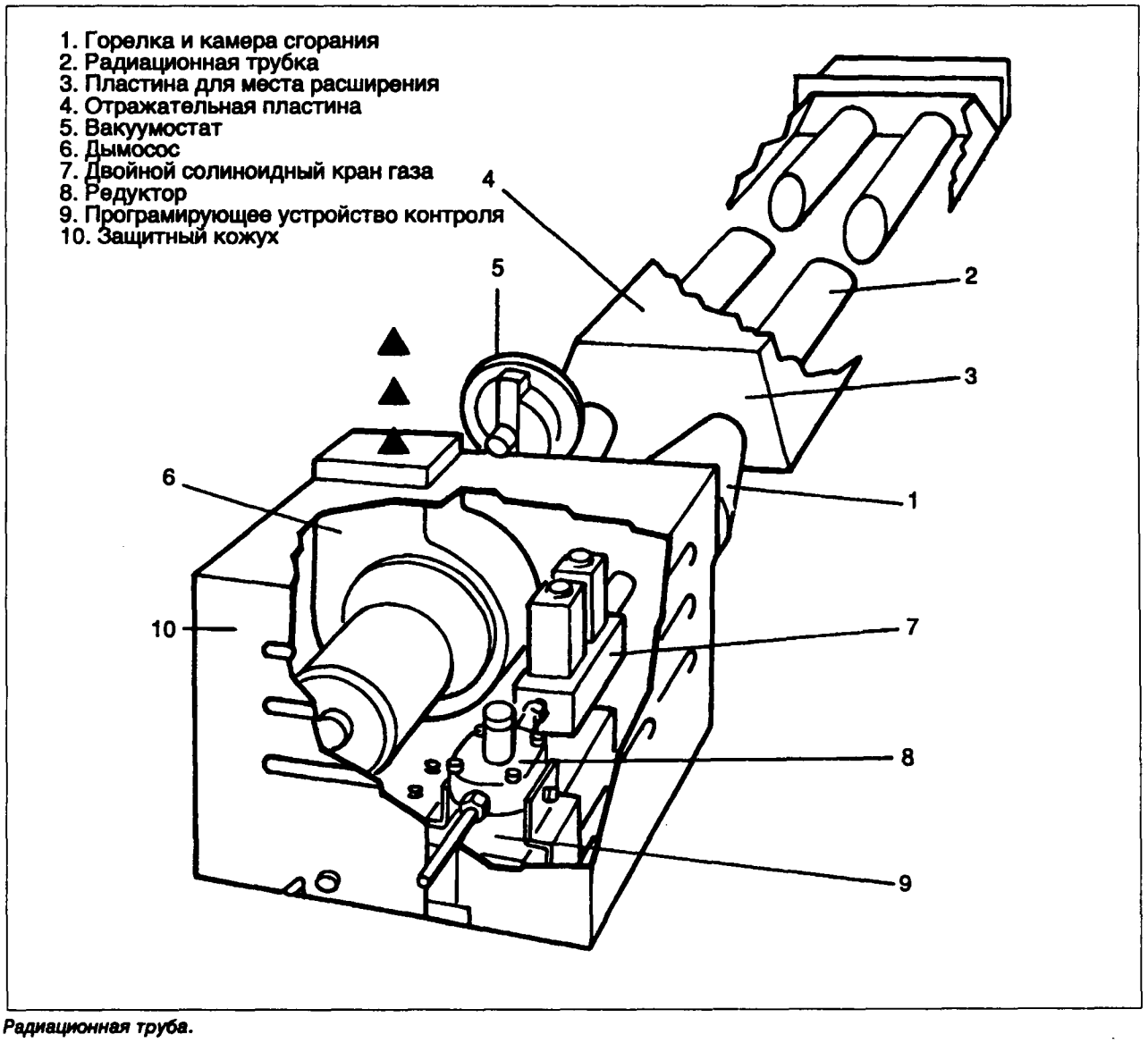
8.5.5.3.1.1. Определение

Сушка может определяться как процесс в свободном воздухе, в горячем воздухе, в паре или с помощь других процессов.

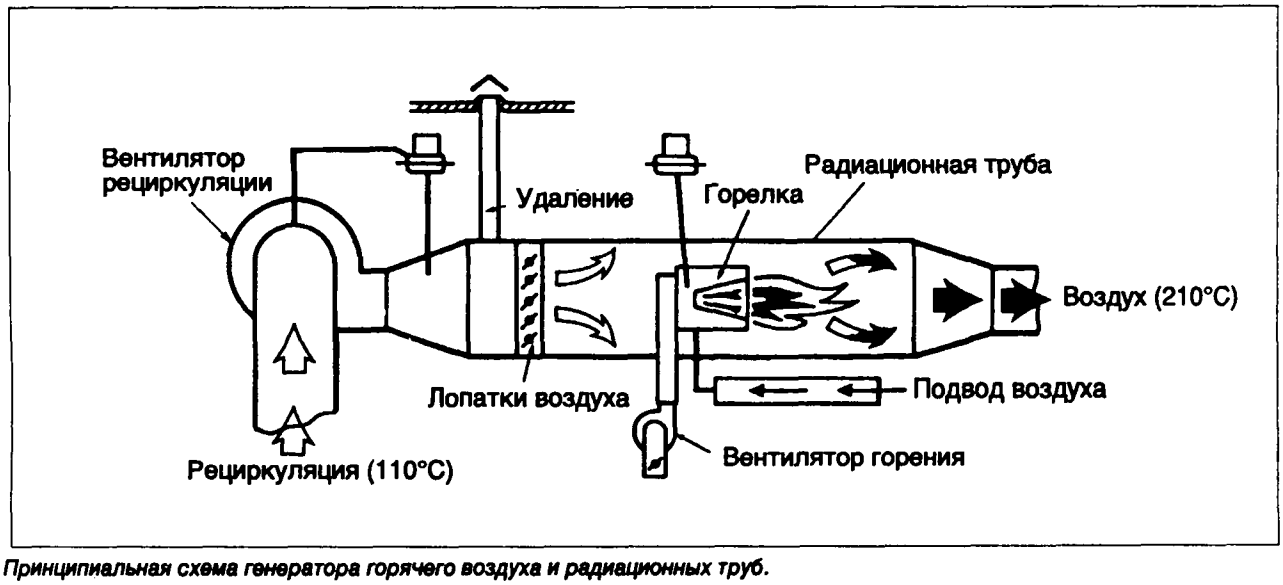
Она позволяет понизить содержание растворителя или воды в предмете, чтобы улучшить или трансформировать его качество.



Радиационная труба низкой температуры: принцип действия.



Радиационная труба.



Принципиальная схема генератора горячего воздуха и радиационных труб.

8.5.5.3.1.2. Элементы теории

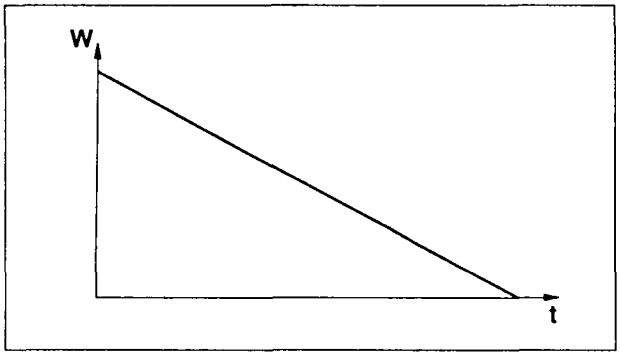
8.5.5.3.1.2.1. Степень влажности

Степень влажности может быть определена как отношение веса воды, которую содержит подлежащее сушке тело, к весу тела в вышеуказанном состоянии, полностью освободившегося от влаги.

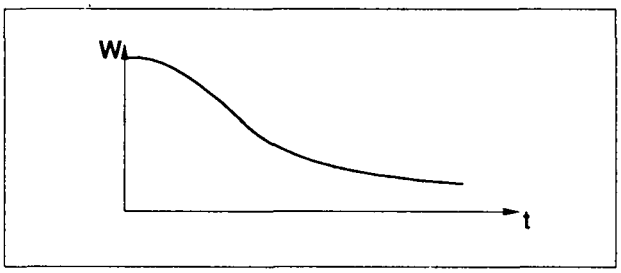
8.5.5.3.1.2.2. Кривая сушки

Это кривая (рис. ниже) позволяет определить уменьшение веса жидкости (W), пропитывающей твердое тело, в зависимости от времени сушки (*t*). Характер этих кривых изменяется в зависимости от типа тела, которое сушится, но различают два принципиальных типа кривых:

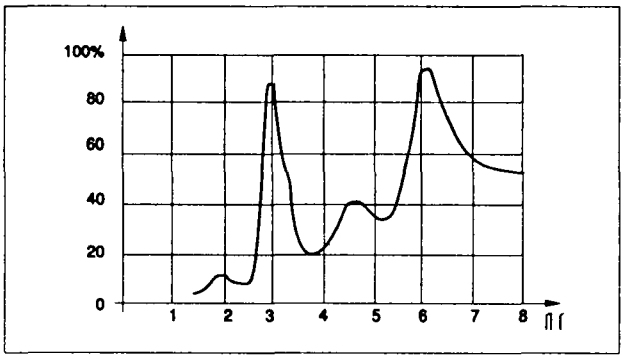
— для тел (таких как песок), поверхность которых составляет сумму смоченных поверхностей, без клеточной воды (абсорбированной воды или удерживаемой диффузией), скорость испарения постоянна во времени;



— для других тел (шерсть, глина, зерновые и т.д.) она имеет вид, представленный на рисунке ниже.



8.5.5.3.1.2.3. Спектр поглощения воды



8.5.5.3.1.2.4. Энергия, необходимая для испарения воды

Энергия, необходимая для испарения тонны воды, составляет 1300 кВт · ч и распределяется следующим образом:

12 кВт · ч – энергия связей
95 кВт · ч – подъем температуры
630 кВт · ч – скрытая теплота
} Необходимая минимальная энергия

563 кВт · ч – разнообразные потери.

8.5.5.3.1.3. Основные типы сушки, используемые в промышленности

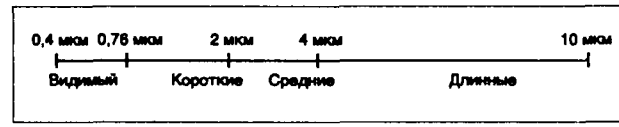
8.5.5.3.1.3.1. Сушка механическая

Этот тип сушки путем механического воздействия (сжатие, вибрация, отжим, стекание и т.д.) остается очень специфическим способом, без использования какой-либо тепловой энергии.

Механическая сушка может отобрать максимум только 40% содержащейся влаги и требует в среднем от 10 до 30 кВт · ч/т извлеченной воды.

8.5.5.3.1.3.2. Сушка инфракрасным излучением

Тепловая радиация характеризуется теплообменом с помощью электромагнитных волн между телами на расстоянии, определяющем тепловую энергию. Большая часть радиации находится в инфракрасном спектре.



Волны	Инфракрасные короткие	Инфракрасные средние	Инфракрасные длинные
Проникновение радиации	Хорошее	Среднее	Слабое
Отражение продукцией	Большое	Слабое	Слабое
КПД радиации	Средний	Хороший	Хороший
Тепловая инерция	Слабая	Средняя	Большая

Различные типы инфракрасной радиации.

8.5.5.3.1.3.3. Конвективная сушка

Конвекция – это способ теплопередачи, который сопровождается переносом массы.

Сушка с помощью конвекции использует естественную и принудительную конвекцию воздуха, имеющего более высокую температуру, чем продукт.

Конвекция называется принудительной, если флюиды приводятся в движение за счет разницы давлений, создаваемой машиной. Состояние воздуха, используемого для испарения, определяется по двум параметрам (например, содержание в нем воды и его температура), другие параметры определяются по диаграмме Mollier, устанавливающей энтальпию и влажность, или диаграмме Carrier, устанавливающей температуру и влажность.

8.5.5.3.1.3.4. Сушка теплопроводностью

Теплопроводность – это физический процесс передачи тепла от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой. Техника сушки теплопроводностью состоит в установлении между сушильным продуктом и осушаемым продуктом хорошего равномерного контакта, чтобы осуществить достаточную передачу тепла.

8.5.5.3.2. Сельскохозяйственное и промышленное применение

Описание техники в этой части не претендует на исчерпывающее, и единственное, на чем здесь делается акцент, это – особенность применения газа.

Промышленность	Тип сушки
Агроснабжение	
— Молочное	Конвекция
— Зерновое	Конвекция Теплопроводность
— Люцерновое	Конвекция
— Сахарное	Теплопроводность Конвекция механическая
Текстиль	Радиация Конвекция Теплопроводность
Бумажная	Радиация Конвекция Теплопроводность
Металлургия:	
— Плавка	Конвекция
— Поверхностная	Радиация
Строительные материалы:	
— Кафельная плитка	Конвекция
Керамика:	
— Черепица и кирпич	Конвекция
— Фарфор и санитария	Конвекция механическая

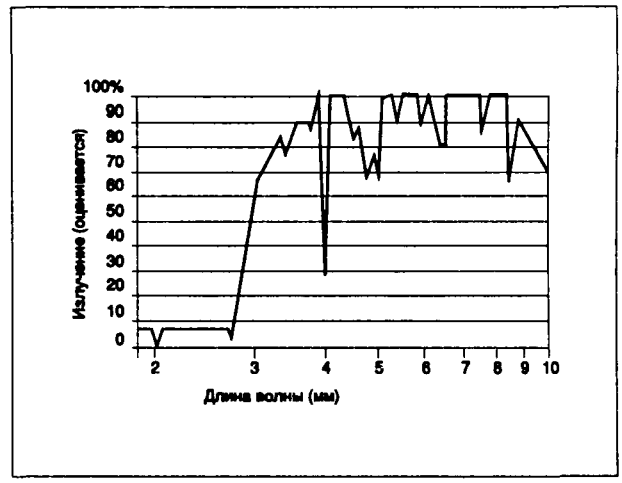
Анализ различных типов сушки, применяемых в промышленности.

8.5.5.3.2.1. Сушка инфракрасная

8.5.5.3.2.1.1. Представление различных типов промышленных излучателей

На практике различают три больших класса инфракрасных излучателей:

— аппараты, которые излучают "инфракрасную длинную" радиацию при температуре излучающей поверхности ниже 700°C: радиационные каталитические панели газа (или термореакторы). Около 40% энергии природного газа трансформируется в инфракрасную радиацию; 50% передается окружающему воздуху в форме конвекции; 10% – различные потери (видимая радиация и UV; теплопроводность). Рис. с. 693 показывает детали каталитической панели;



Спектр излучения термореактора.

— радиационные аппараты инфракрасного излучения волн средней длины с температурой излучающей поверхности от 700 до 1 500°C: радиационная светящаяся панель.

От 45 до 60% тепловой мощности газа используется в форме инфракрасной радиации с длиной волны, близкой 3 мкм. На с. 693 представлены детали радиационной светящейся панели.

8.5.5.3.2.1.2. Использование в текстильной области

Цикл окраски в текстильной промышленности следующий:

— пропитка ткани красящим раствором;

— отжим ткани до 70% влажности;

— предварительная сушка обычно инфракрасной радиации до 30% остаточной влажности;

— сушка в термопечи "Hotflue" (§ 8.5.5.3.2.2.2. Сушка конвекцией в текстильной промышленности).

Предварительная сушка – важная операция: влажность должна быть постоянной, чтобы обеспечить постоянную и одинаковую окраску ткани. Одно из решений – установка радиационной светящейся панели, перед которой двигается полоса ткани. Экраны из армированной ткани защищают ткань на случай остановки ткани и в начале работы.

8.5.5.3.2.1.3. Применение при сушке краски

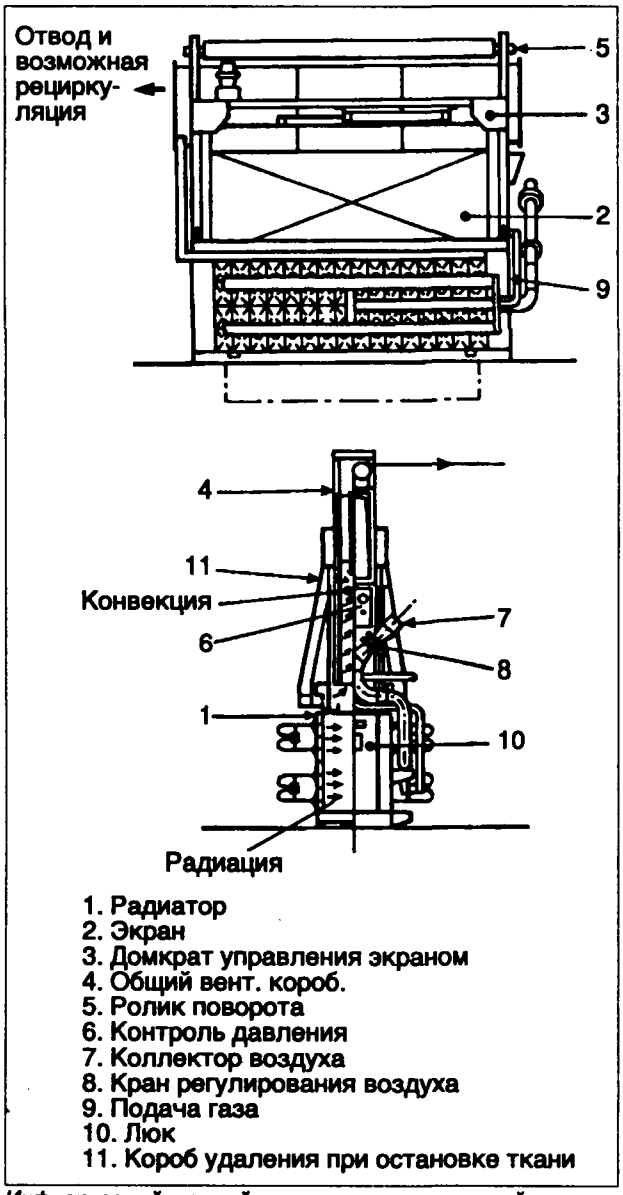
Оборудование сушильных и обжигных кабин покраски радиационными каталитическими панелями позволяет значительно улучшить сушку:

— сушка в основе изоляции;

— уменьшение времени сушки;

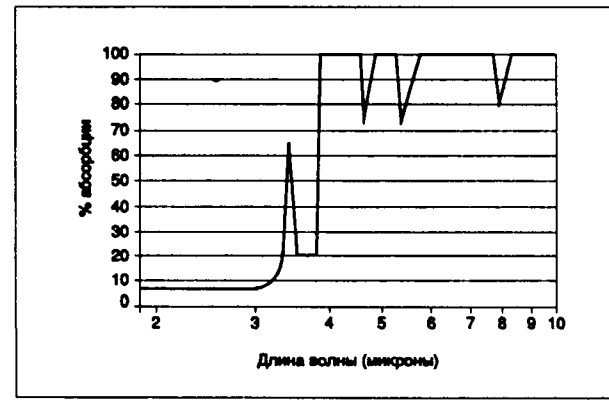
— возможность использования воспламеняющейся атмосферы;

— уменьшение удельного потребления.

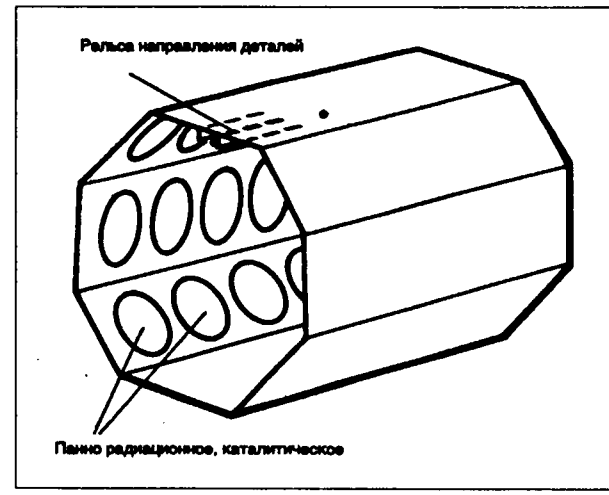


1. Радиатор
2. Экран
3. Домкрат управления экраном
4. Общий вент. короб.
5. Ролик поворота
6. Контроль давления
7. Коллектор воздуха
8. Кран регулирования воздуха
9. Подача газа
10. Люк
11. Короб удаления при остановке ткани

Инфракрасный газовый аппарат предварительной сушки.



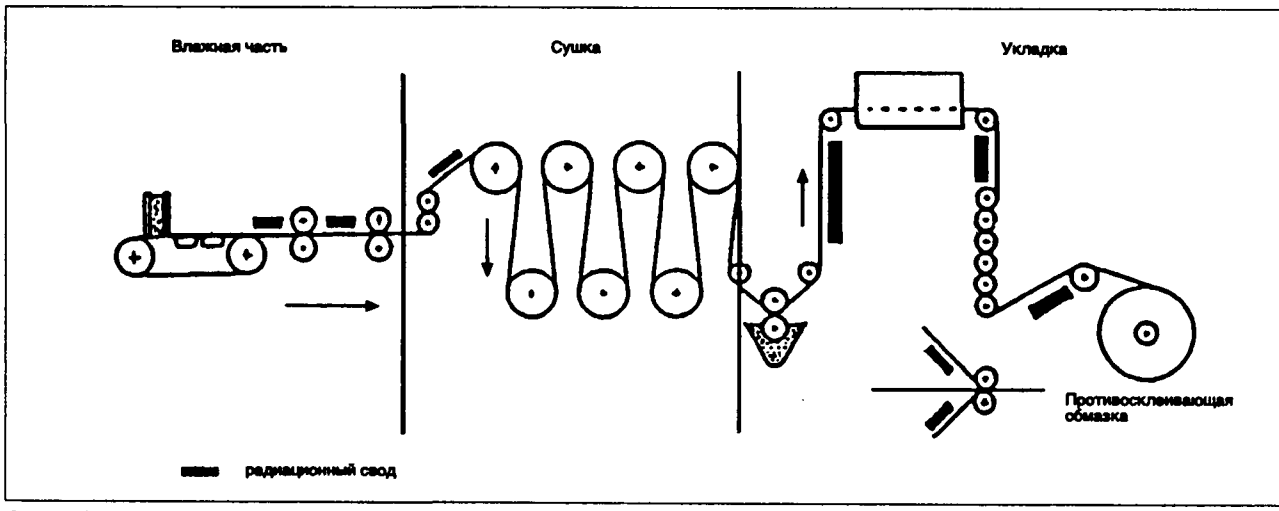
Спектр адсорбции акрилиновой краски.



Пример цепи обработки органической изоляции.

8.5.5.3.2.1.4. Бумажная промышленность

Использование радиационных светящихся горелок в бумажной промышленности становится все более частым. Они используются для увеличения производительности и дают повышение качества сушки. Во влажной части роль радиации при осуш-



Сушка бумаги.

ке состоит в подогреве осушаемой массы таким образом, чтобы снизить вязкость воды (при 5°C = = 1,52 сз, при 40°C = 0,66 сз).

Сжимаемость воды также улучшается.

В сушильной части установка радиационного свода с сушильным цилиндром позволяет увеличить мощность испарения. К тому же увеличение температуры листа увеличивает КПД первого цилиндра.

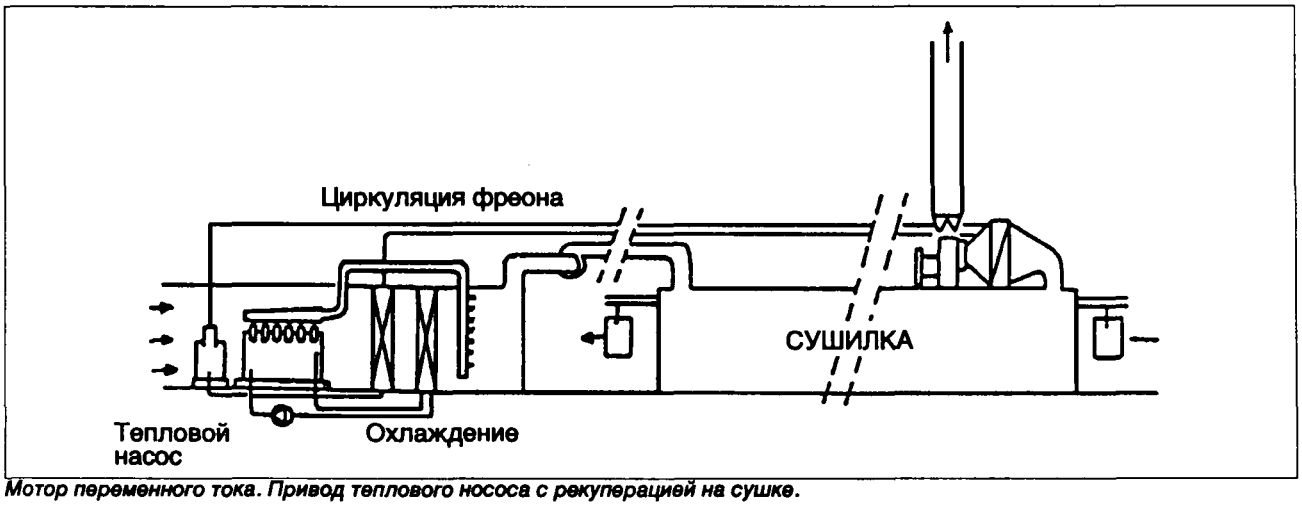
Укладка бумаги – операция наиболее деликатная: речь идет о быстрой сушке бумаги по всей ее толщине с целью сохранения равномерного распределения гибкости.

Радиационная инфракрасная сушка особенно хорошо адаптирована к этой части процесса.

8.5.5.3.2.2. Конвективная сушка

8.5.5.3.2.2.1. Описание процессов

Используемые процессы также разнообразны, как и осушаемая продукция. Действительно, каждый продукт требует специфической сушильной установки.



Мотор переменного тока. Привод теплового насоса с рекуперацией на сушке.

Условия работы	Без теплового насоса			С тепловым насосом					
				Без сверхохлаждения			Со сверхохлаждением		
Относительная влажность воздуха на выходе	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
Температура воздуха на входе:									
80	1 240	1 100	1 020	750	665	610	690	615	560
100	1 150	1 050	990	780	710	665	740	680	630
120	1 090	1 010	960	790	730	695	770	710	670

Удельное потребление (Вт · ч/кг испаряемой воды). Сушка без рециркуляции.

Условия работы		Без теплового насоса						С тепловым насосом					
Температура воздуха на входе в сушилку, °C		80			100			80			100		
Относительная влажность воздуха на выходе		0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
Содержание воды в воздухе на входе, г/кг	50	980	930	890	960	920	890	720 550	560 490	490 470	770 670	660 620	600 590
	70	940	910	880	930	900	870	790 590	570 500	470 460	810 700	670 630	600 590
	100	910	890	870	900	870	850	1 020 740	630 540	490 470	880 780	710 670	625 615

Верхняя цифра – 1-я зона или единственная [720]
Нижняя цифра – следующая зона [550]

Удельное потребление (Вт · ч/кг испаренной воды) в зависимости от температуры на входе в сушилку, влажности на выходе, уровня рециркуляции (сушка с рециркуляцией).

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА

Специфическая техника использования природного газа может быть разделена на две категории:
— замена батарей теплообменников воздух–горячая вода или воздух–пар газовыми атмосферными горелками и прямым использованием газа; преимущества прямого использования в сушке многочисленны:
  · гибкость эксплуатации (быстрое изменение режима, выигрыш времени пуска и т.д.);
  · стоимость обслуживания снижена;
  · удельное потребление значительно снижено;
— адаптация теплового насоса к газовому двигателю.

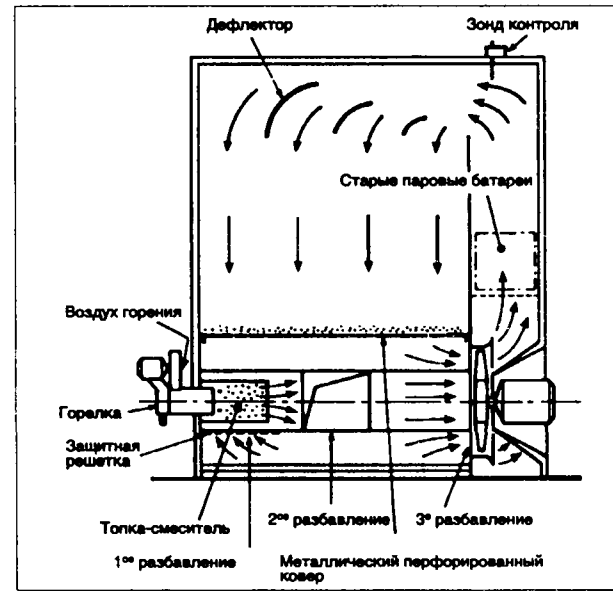
8.5.5.3.2.2.2. Применение в текстильной промышленности

8.5.5.3.2.2.2.1. Сушилка для шерсти Mallard, типа Charpentier, оборудованная установкой прямого использования газа (5 камер)

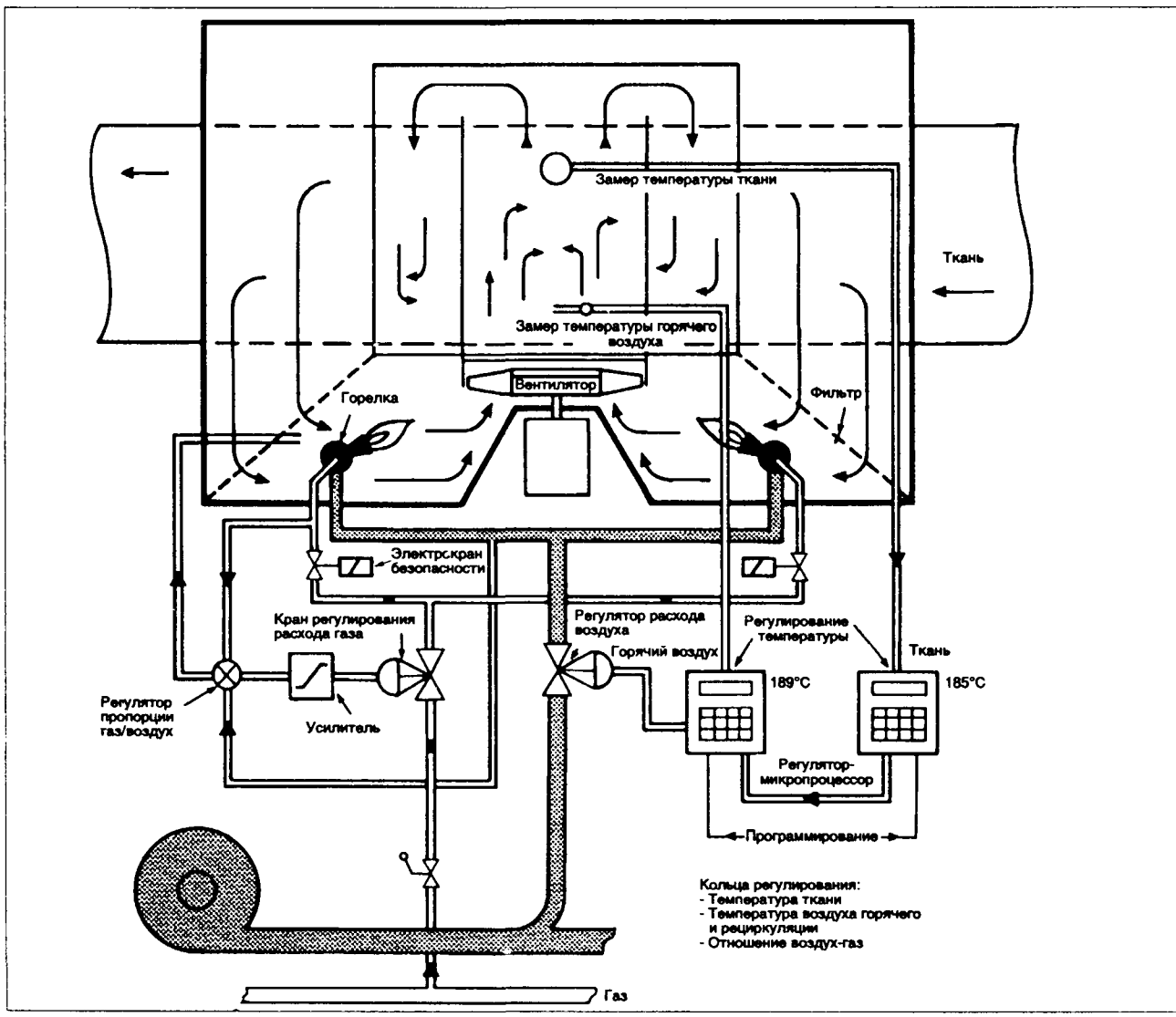
Удельное потребление этого типа сушилки находится между 1,1 и 1,4 кВтч/кг испаренной воды.

8.5.5.3.2.2.2.2. Последовательная цепь сушки и полимеризации для окраски и выделки

Наилучший результат 1,1 кВт · ч/кг испаренной воды.



Сушка текстиля.



Сушильная цепь.

8.5.5.3.2.2.3. Агропищевая промышленность

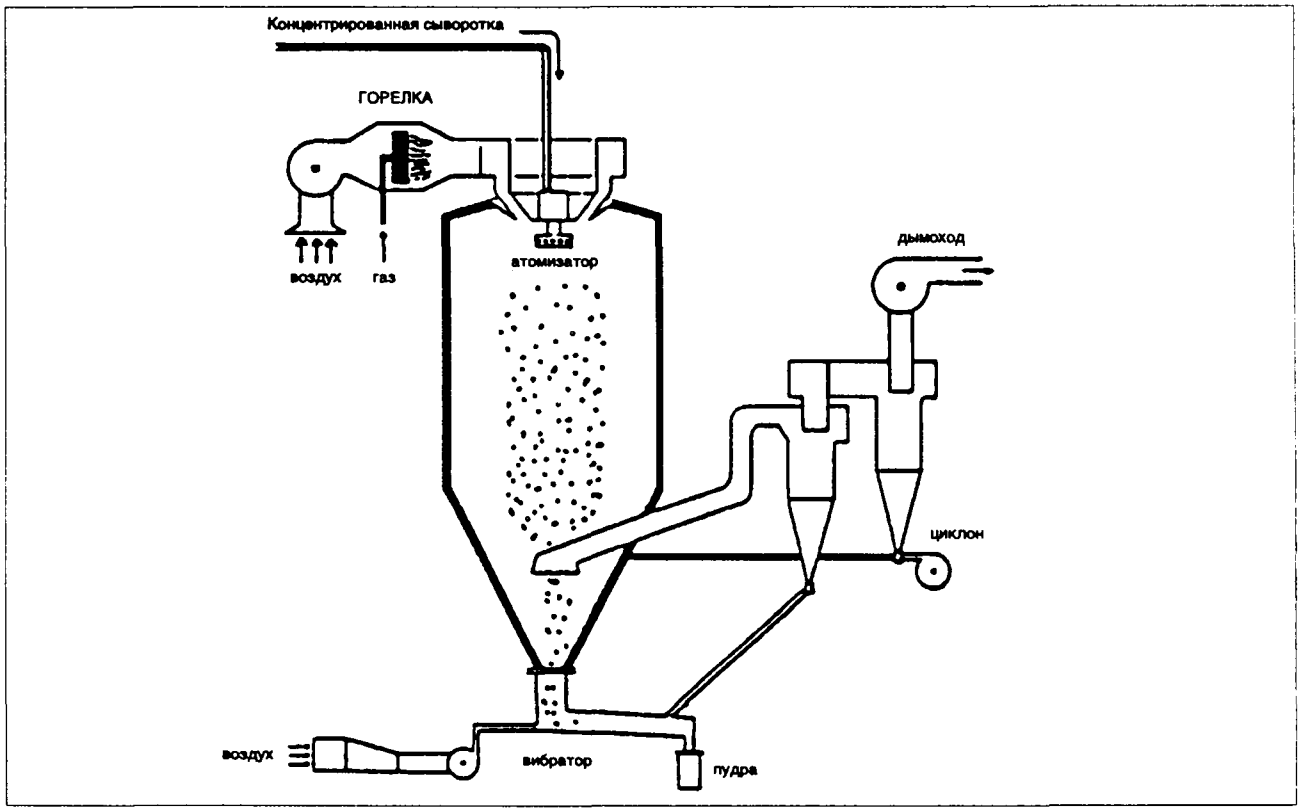
8.5.5.3.2.2.3.1. Молочная промышленность

Производство сухого молока и сыворотки осуществляется в несколько этапов:

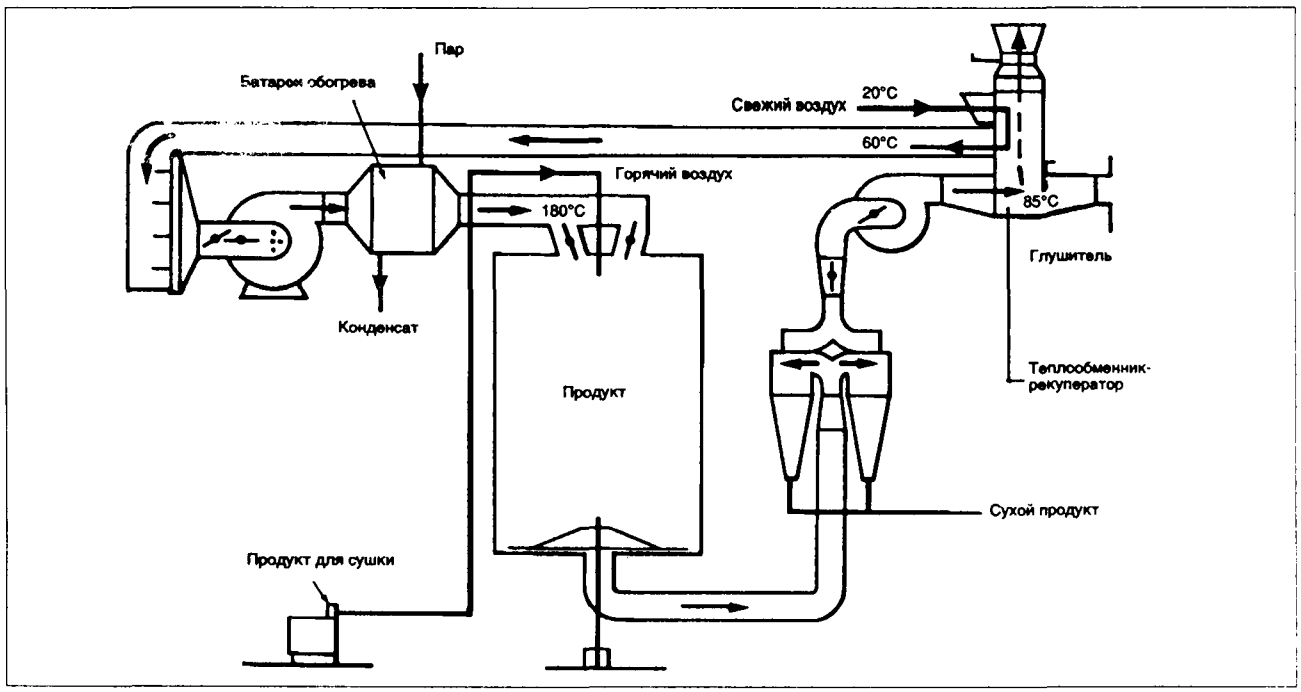
— обогащение происходит в испарителях (более совершенная система механической рекомпрессии осевшего пара). Остаточная влажность составляет порядка 5%. Сейчас она оценивается как имеющая меньшую величину;

— парциальная кристаллизация сыворотки;

— сушка, производство сухого молока или концентрированной сыворотки в один или два этапа до влажности в 2,5%.



Атомизация концентрированного молока прямой сушкой. Сушильная башня оборудована газовой горелкой воздушных потоков. Башня Alfa Laval, системы Cande дополнена вентилятором на выходе. Результат: 1,4 кВт · ч/кг воды и 2 кВт · ч/кг пудры.



Атомизация концентрированного молока с непрямой сушкой. Сушильная камера с рекуператором.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА

Первый этап атомизации концентрированного молока осуществляется в камере атомизации, либо напрямую (температура продуктов сгорания на входе от 170 - 220°C), либо через промежуточный теплоноситель. Эта техника имеет превосходный КПД благодаря рекуперации тепла влажного воздуха и высокую чистоту отрабатываемого продукта, который не находится в прямом контакте с газовыми потоками. (см. с. 781).

Второй этап состоит прежде всего в окончании сушки порошка в жидком слое.

Подсоединение одной или двух сушилок к жидкому слою на выходе из башни атомизации приводит к более высокой степени влажности порошка.

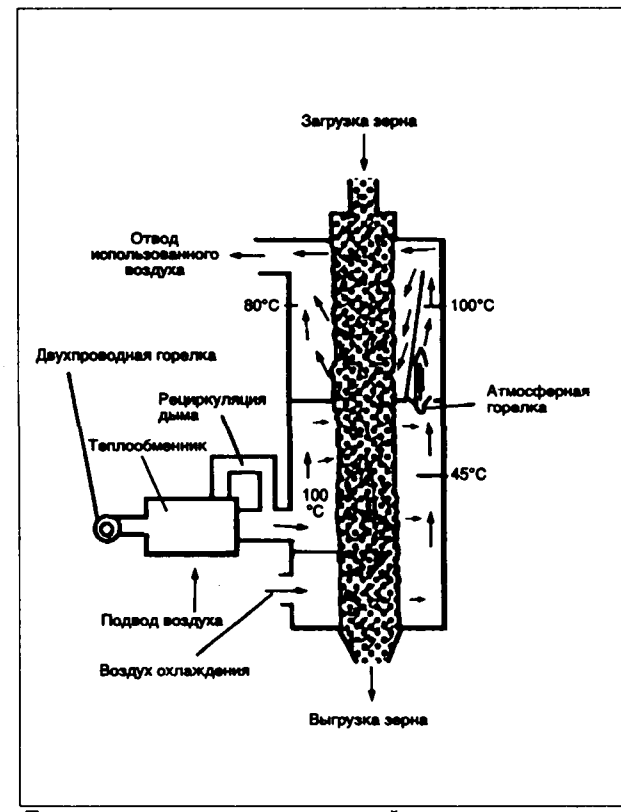
8.5.5.3.2.2.3.2. Сушка зерновых

Сушилки зерна (см. § 8.5.4.4) обычно стационарного типа:

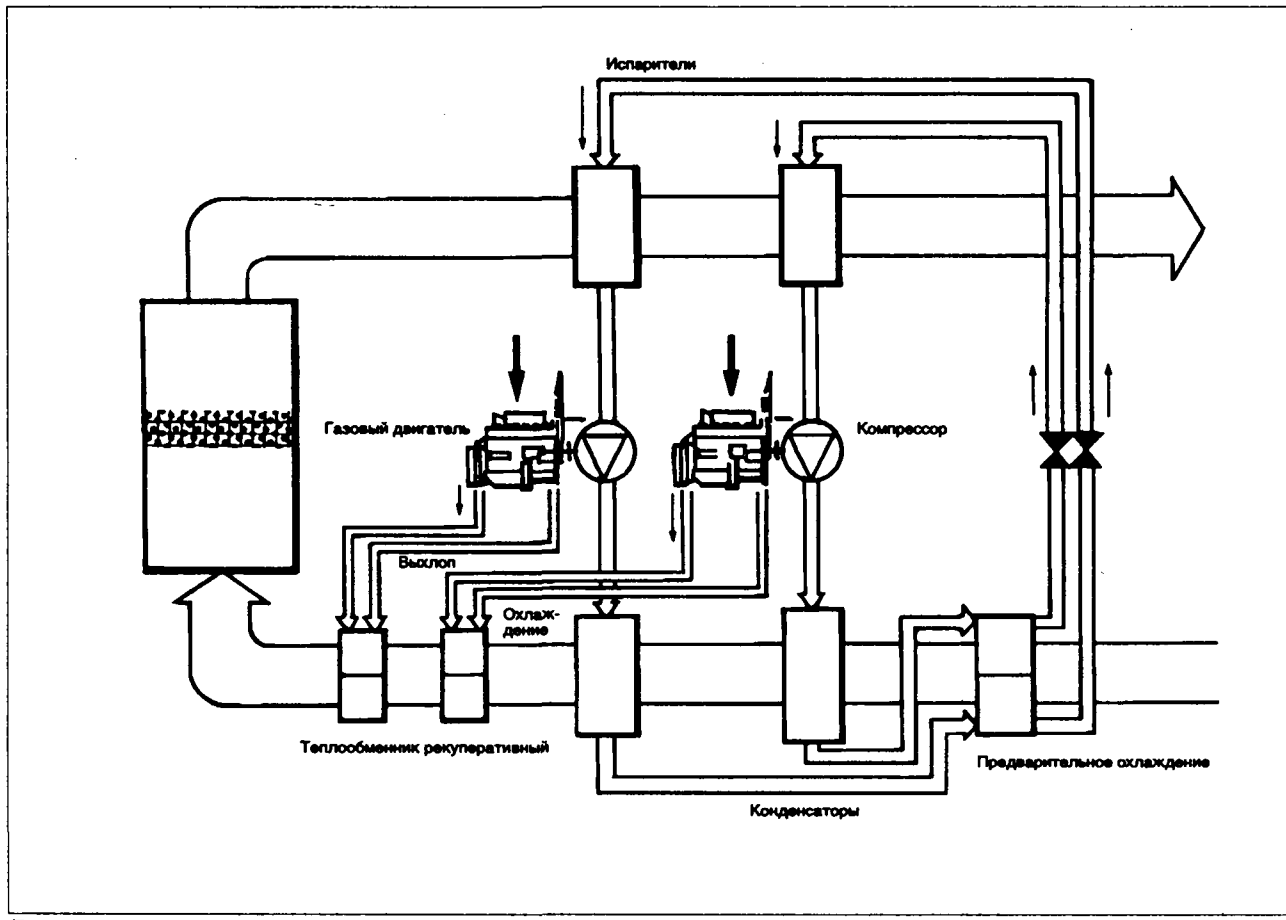
— зерно спускается вдоль колонны. В это время его пересекает горячий воздух. Прохождение газа через такую сушилку позволяет улучшить ее КПД и производительность путем подсоединения второго этажа сушки с атмосферной горелкой.

Выигрыш КПД по отношению к традиционной сушилке составляет 40%. Наилучший показатель этой сушилки составляет около 0,9 кВт · ч/кг испаренной воды.

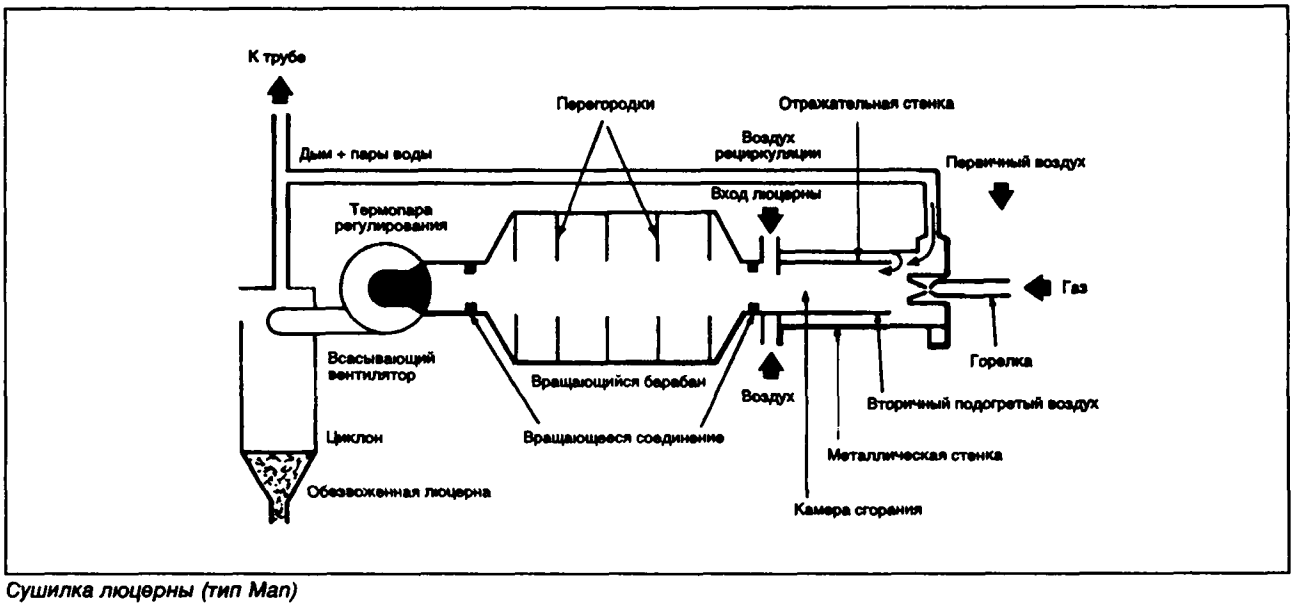
Надо также отметить возможность использования тепловых насосов с газовым двигателем.



Принципиальная схема двухэтажной сушилки зерна.



Принцип сушки солода с помощью теплового насоса, приводимого в действие газовым двигателем.



Сушилка люцерны (тип Man)

8.5.5.3.2.2.3.3. Люцерна

В процессе (см. рисунок, представленный выше, а также § 8.5.4.4), продукты сгорания природного газа прямо используются на фураже при температуре 900 - 1 100°C. Природный газ позволяет регулировать процесс и адаптироваться к различной влажности свежей люцерны. Ее степень влажности колеблется наиболее часто между 65 и 90%. 30% воздуха, выходящего из циклона, возвращается как вторичный в камеру сгорания. Удельное потребление составляет порядка 2,9 кВт · ч/кг (P.C.I.) гранул с влажностью 10%.

8.5.5.3.2.2.4. Керамика

8.5.5.3.2.2.4.1. Черепица и кирпич

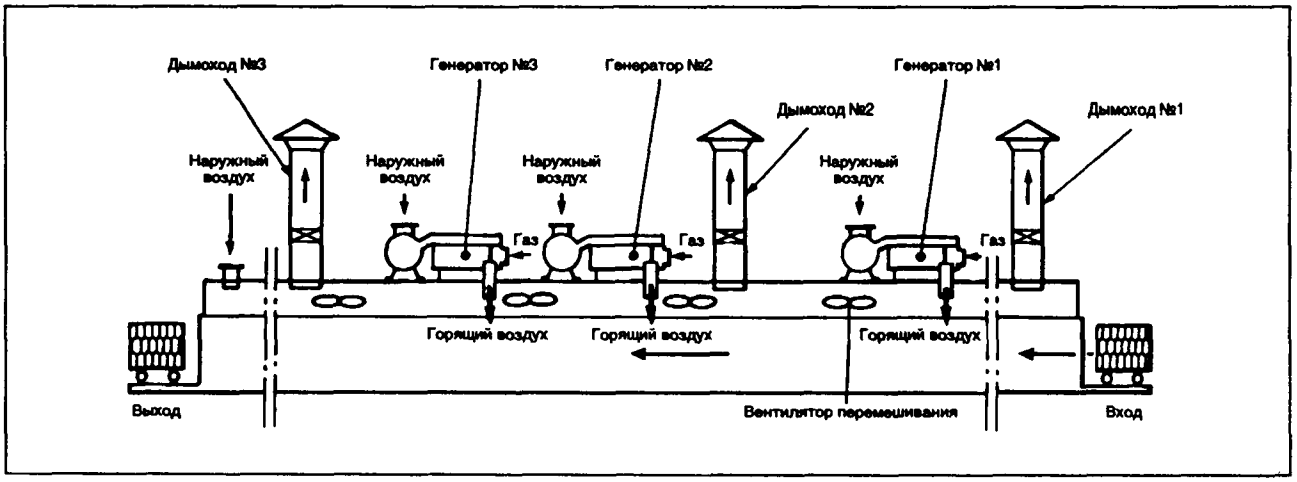
Эта сушка осуществляется свободной конвекцией (свободный воздух) или принудительной конвекцией: сушка в камере, снабжаемой горячим воздухом либо от рекуператора, установленного на дыме камерной печи, либо от атмосферной газовой горелки. Удельный расход около 1,4 кВт · ч/кг испаренной воды. Для черепицы используется сушилка со сводовыми горелками плоского пламени. Удельный расход этих сушилок близок 1,13 кВт · ч/кг испаренной воды.

8.5.5.3.2.2.4.2. Сантехническое оборудование и фарфор

В большинстве случаев снабжение горячим воздухом сушилок осуществляется посредством теплообменников на дымовых газах печей или прямого отбора газовых потоков таким же образом, как в секторе "Черепица и кирпич".

8.5.5.3.2.2.4.3. Гипс

Для этого типа сушки удельные расходы составляют примерно 1,25 кВт · ч/кг испаренной воды.



Сушилка гипсовых плиток

8.5.5.3.2.2.5. Бумажная промышленность

8.5.5.3.2.2.5.1. Сушка бумаги с помощью влажного потока

Теплообмен между испаряющим флюидом и бумагой (см. § 8.5.5.3.2.1.4) осуществляется двумя способами:

конвекцией в сушильном шкафу и теплопроводностью через вращающийся цилиндр.

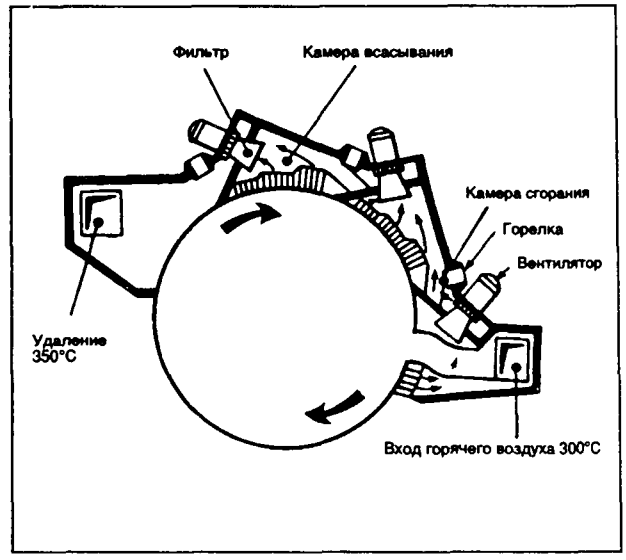
Потребление газа примерно 2,6 кВтч/т производимой бумаги.

8.5.5.3.2.2.5.2. Операция укладки бумаги и прямой сушки с помощью природного газа (см. рисунок на с. 785)

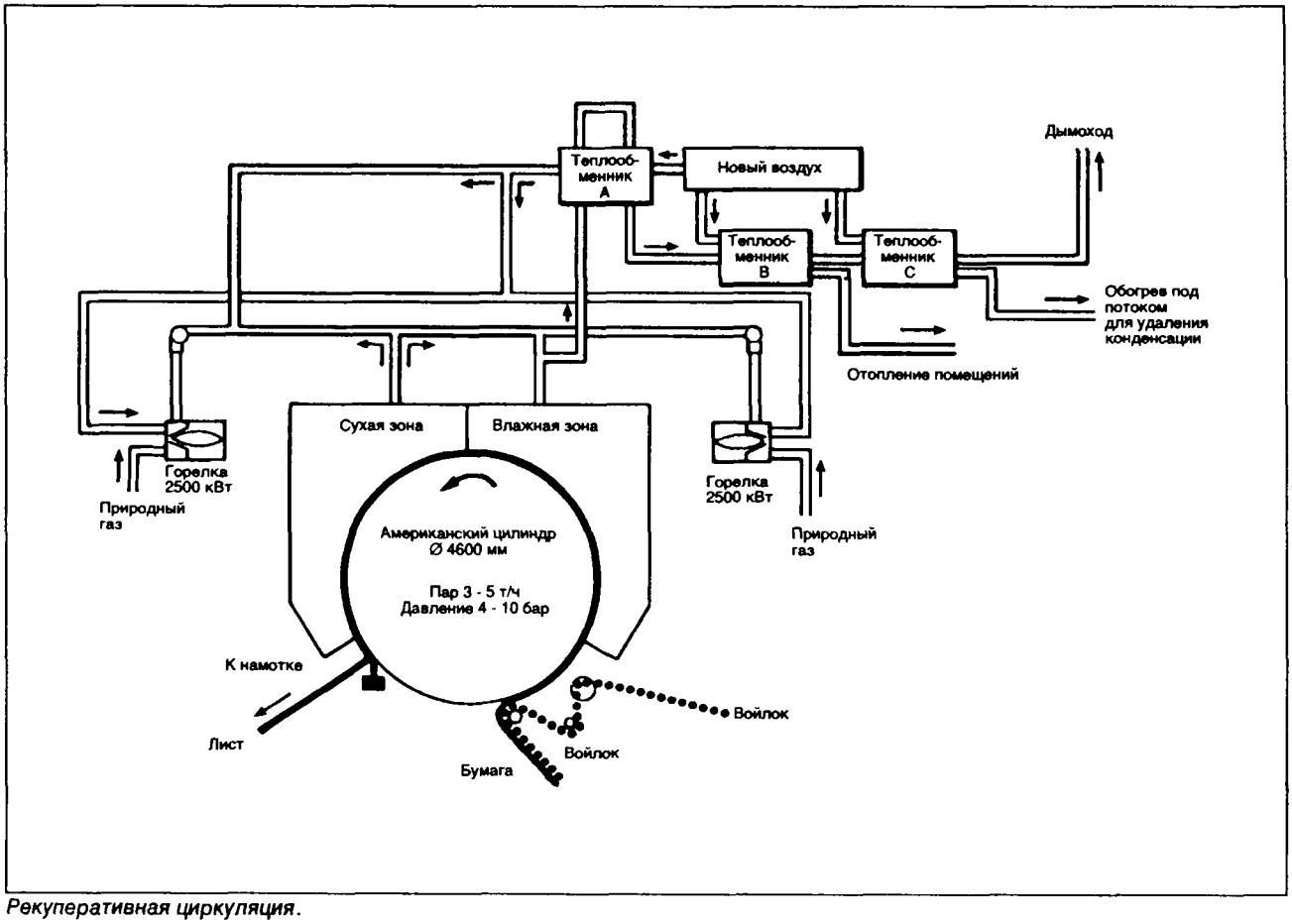
8.5.5.3.2.3. Сушка теплопроводностью

8.5.5.3.2.3.1. Общая часть

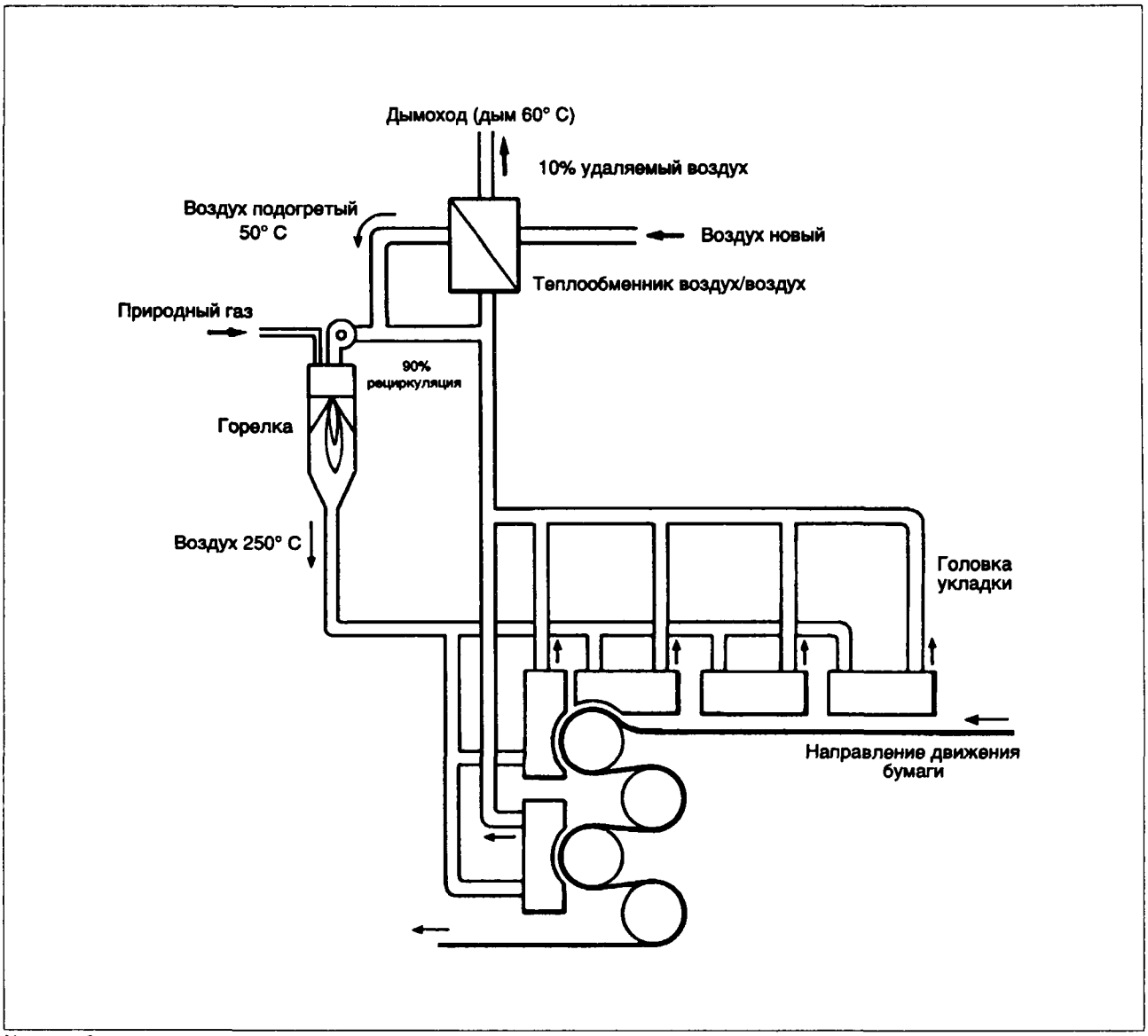
Сушка теплопроводностью обычно сопровождает сушку конвекцией или радиацией. Этот тип сушки сопровождает сушку с помощью горячего воздуха, встречающуюся при сушке первичной продукции (сушильные барабаны) или зерна (дисковая сушилка). Наиболее специфическое применение сушки с помощью теплопроводности встречается в текстильной или бумажной промышленности, где сушат полосы материи или бумаги на обогреваемых рулонах.



Сушильный шкаф.



Рекуперативная циркуляция.



Укладка бумаги.

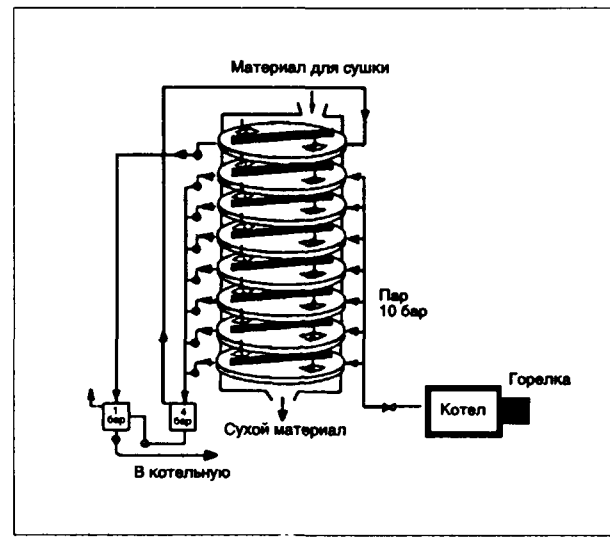
8.5.5.3.2.3.2. Текстильная и бумажная промышленность

Используемый процесс в значительной степени одинаков в этих областях промышленности: вращающиеся цилиндры, обогреваемые обычно паром, сушат продукт, который наворачивается на них. Этот метод сушки все более и более дсполняется или радиационным шкафом (дополнение радиационной сушки), либо вытяжным шкафом горячего воздуха (дополнение конвективной сушки).

8.5.5.3.2.3.3. Сельхозпищевая промышленность

Речь идет о сушке и нагреве муки с целью облегчения удаления загрязняющих материалов.

Это дисковая сушилка, обогреваемая паром. Перевод котла на газ позволяет использовать тепло дыма, так же как автоматизацию процесса.



Сушилка.

8.5.5.3.3. Несколько экономических показателей

Национальное потребление энергии на сушку поднялось в 1988 году до 6,5 Mtep со следующим распределением:

Промышленность	Потребление	
	Mtep/год	% от общего потребления
Снабжение сельскохозяйственной продукцией	2,0	30
Химия	1,6	25
Картон бумажный	1,22	18
Цементная	0,93	15
Текстильная	0,34	5
Кирпичная	0,2	3
Лесная	0,15	2
Гипсовая	0,05	<1
Керамика	0,03	<1

8.5.5.4. Нагрев промышленных жидкостей

8.5.5.4.1. Введение

Значительное число отраслей промышленности еще осуществляют нагрев жидкости теплообменом (или впрыском) с теплоносителем. Поступая от центральной котельной, она распределяется по заводу через сеть, иногда достаточно протяженную.

Эта энергетическая схема предполагает каскад КПД, который ведет к потреблению энергии большей, чем теоретически необходимо для нагрева жидкости.

В действительности, общий КПД нагрева является произведением трех КПД:

— КПД котла:

$$\eta_к = \frac{\text{тепло переданное жидкости}}{\text{тепло сгорания топлива}} = \frac{Q_1}{Q_c};$$

— КПД распределения:

$$\eta_р = \frac{\text{тепло пригодное к потреблению}}{\text{тепло переданное жидкости}} = \frac{Q_2}{Q_1};$$

— КПД использования газа:

$$\eta_u = \frac{\text{полезное тепло в жидкости}}{\text{тепло пригодное к потреблению}} = \frac{Q}{Q_2}.$$

Общий КПД нагрева жидкостей через часто встречающиеся централизованные установки находятся в пределах 50 - 70%. Он может быть значительно ниже этих величин, когда не существует необходимого соотношения между средствами производства (и распределения) тепла и потребностью использования.

8.5.5.4.2. Удобства специальных способов использования газа

Возможность газовой аппаратуры располагаться рядом с нагреваемой жидкостью и ее высокие характеристики позволяют значительно улучшить КПД нагрева.

К тому же, она придает оборудованной установке автономию по отношению к остальным установкам завода.

8.5.5.4.3. Специальная аппаратура

8.5.5.4.3.1. Погружное горение

8.5.5.4.3.1.1. Принцип и оборудование нагрева

Процесс состоит во введении в прямой контакт продуктов сгорания газа и нагреваемой жидкости.

Чтобы это сделать, используются два технических решения:

— барботаж продуктов сгорания через жидкость;

— всасывание жидкости продуктами сгорания.

8.5.5.4.3.1.1.1. Оборудование барботажного нагрева

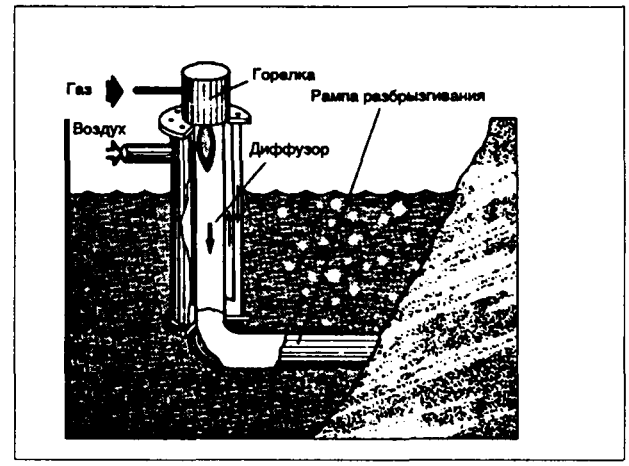
Оно состоит из горелки, диффузора и дисперсионной рампы дыма.

Диффузор охлаждается воздухом горения во избежание контакта жидкости с горячей стенкой, чтобы избежать "намокания" (погасания) пламени.

Распределительная рампа выпускает продукты сгорания в сосуде на глубине от 500 до 800 мм высоты, необходимой, чтобы они выходили насыщенные водой при температуре жидкости.

Снабжение горелки должно осуществляться под давлением достаточным, чтобы преодолеть гидростатическое давление и потери давления в горелке, т.е. порядка 150 - 200 мбар.

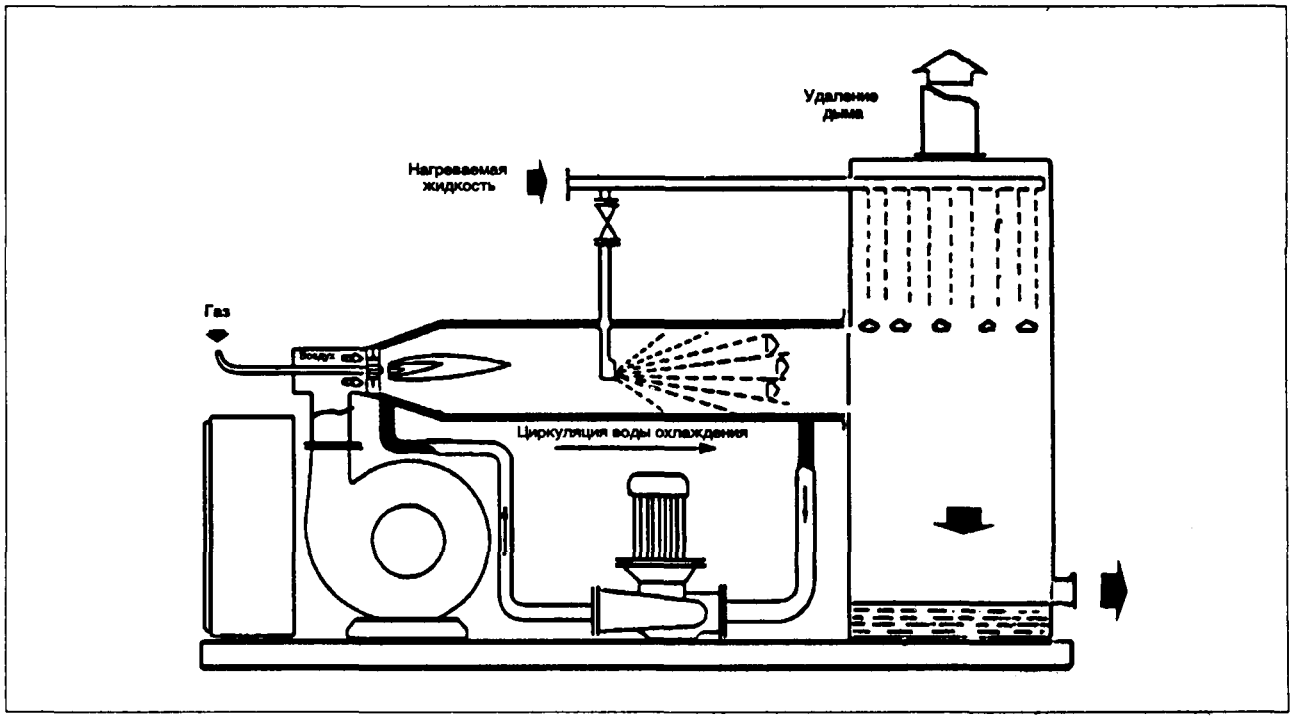
Располагаемое оборудование имеет диапазон изменяемых мощностей от 100 до 1000 кВт.



Оборудование барботажного подогрева.

8.5.5.4.3.1.1.2. Оборудование нагрева с помощью впрыскивания жидкости в продукты сгорания

Это оборудование с разнообразными конструкциями сопровождается наиболее часто впрыскиванием жидкости в отводимых продуктах сгорания с промежуточной стенкой. Этот тип аппаратов сейчас включается в цепь циркуляции нагреваемой жидкости (см. рисунок с. 787).

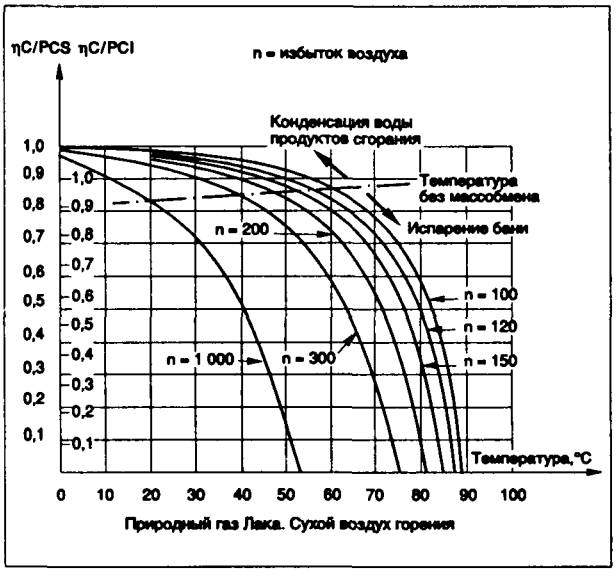


Оборудование для нагрева "впрыскиванием" (документ Mat Klöckher).

8.5.5.4.3.1.2. КПД и характерная температура

Здесь будет изучаться только случай барботажа; модификация оборудования разбрызгивания может быть осуществлена, если известны температура и гидрометрия продуктов сгорания.

Для высоты барботажа, относительно небольшой (500 - 800 мм), поверхность обмена между баней и дымом очень велика, последний эвакуируется с температурой бани и обусловливает КПД нагрева.



Погружное горение в воде. КПД нагрева в зависимости от температуры для разных условий регулирования.

При температуре продуктов сгорания горелки ниже точки росы (θ_r) будет иметь место конденсация части пара в продуктах сгорания, т.е. разбавление бани; КПД нагрева составляет более 100% P.C.I.

При температуре дыма выше точки росы будут иметь место испарение воды и обогащение бани.

При температуре свыше 70°C КПД нагрева быстро уменьшается, чтобы стать равным нулю при максимальной температуре нагрева (θ_m).

	θ_r	θ_m
Газ типа Лак	59,2	89,5
Газ Гронинген	58,7	89,4
Пропан коммерческий	53,9	89,6
Водород	76,1	92,4

Величины температуры точки росы θ_r и максимальной температуры нагрева θ_m для стехиометрического сжигания в сухом воздухе при 0°C.

8.5.5.4.3.1.3. Обмен вода–продукты сгорания

Контакт между водным раствором и продуктами сгорания способствует взаимному обмену составляющих частей. Различные газы, входящие в продукты сгорания, растворяются в воде до насыщения; они обусловливают также процесс окисления.

Так, диоксид углерода (CO_2), который составляет около 10% объема дыма, хорошо растворяется в воде. Вода превращается в слабую кислоту с $pH = 5$.

Диоксид азота (NO_2) приводит к образованию азотной и азотистой кислот; *p*H, равное 3, достигается только после большого времени нагрева.

Кислород при обычном содержании от 1 до 4% не оказывает влияния на происходящий процесс, его растворимость не превосходит 1 мг/л.

Разнообразие нагреваемых промышленных жидкостей ведет к многочисленным исследованиям. Очевидны определенные правила, которым надо следовать:

— кислотная баня может быть нагрета продуктами сгорания;

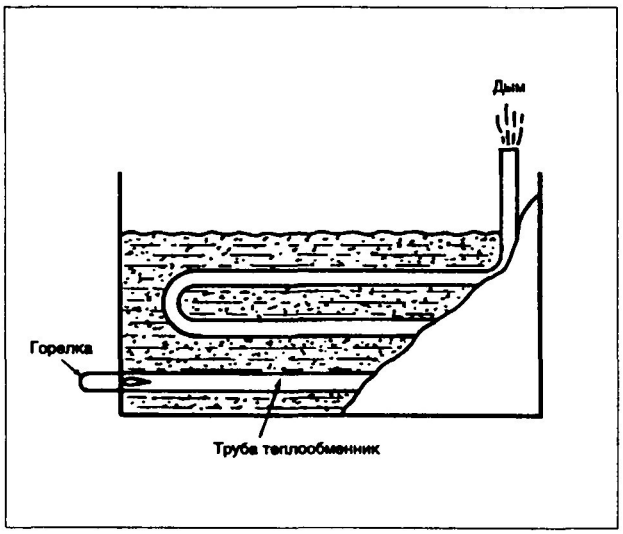
— возможен нагрев слабощелочной периодически обновляемой бани, т.к. продукт теряет свои качества относительно медленно;

— в сильно щелочных банях (*p*H ≥ 9) интенсивны процессы нейтрализации и карбонизации. Поэтому их нельзя нагревать.

8.5.5.4.3.2. Погружные трубы

8.5.5.4.3.2.1. Традиционные погружные трубы

Оборудование состоит прежде всего из горелки, обычно с принудительной подачей воздуха, и металлической трубы, в которой развивается пламя и охлаждаются продукты сгорания. Труба-теплообменник полностью погружена в нагреваемую жидкость. Диаметр трубы определяется минимально необходимым для развития пламени сечением.



Оборудование подогрева погружной трубой.

Диаметр, определенный таким образом, оказывается достаточно большим в силу небольших скоростей движения дыма.

Вследствие этого:

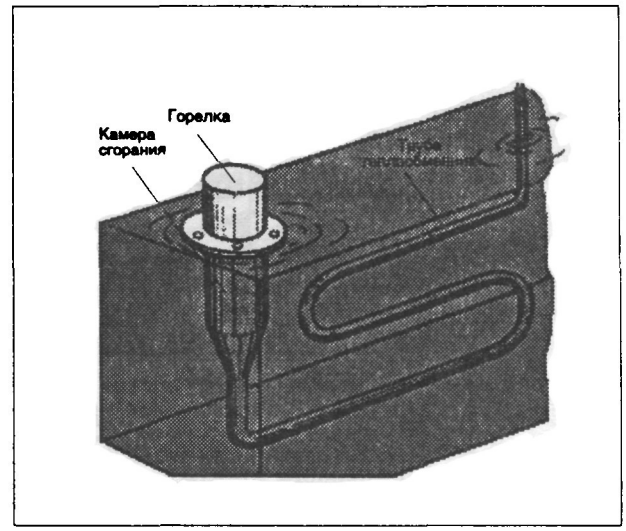
— удельная поверхностная мощность относительно невелика и находится между 10 и 30 кВт/м² (в зависимости от температуры выхода дыма);

— большая длина трубы;

— КПД ≅ 80% по P.C.I.

8.5.5.4.3.2.2. Компактная погружная труба

С целью большой компактности используются горелки, дающие высокую интенсивность сгорания (горелки предварительного смешения или противовращающиеся), которые позволяют снизить размеры камеры сжигания.



Компактная погружная труба.

Небольшой диаметр трубы-теплообменника позволяет получить высокую скорость истечения дыма и в связи с этим получить:

— высокий коэффициент передачи тепла, порядка 35 - 55 кВт/м²;

— меньшую длину трубы при приемлемом КПД.

На практике длина и диаметра трубы определяются таким образом, чтобы КПД был от 85 до 95% по P.C.I.

8.5.5.4.3.2.3. Сравнение погружных труб – традиционных и компактных

Коэффициент теплообмена погружных компактных труб в два раза больше, чем у традиционных. Поэтому поверхность теплопередачи при той же мощности для компактной погружной трубы будет в два раза меньше.

8.5.5.4.3.3. Компактные погружные теплообменники

Компактный погружной теплообменник – это моноблок в форме параллелепипеда, погруженный в нагреваемую жидкость.

В первой зоне обмена циркулируют, с одной стороны, между гладкими трубами продукты сгорания, с другой стороны, внутри их жидкость, перемещающаяся за счет термосифона. В этой зоне теплопередача имеет большую величину, от 40 до 160 кВт/м²; и составляет около 70% общей передаваемой жидкостью мощности.

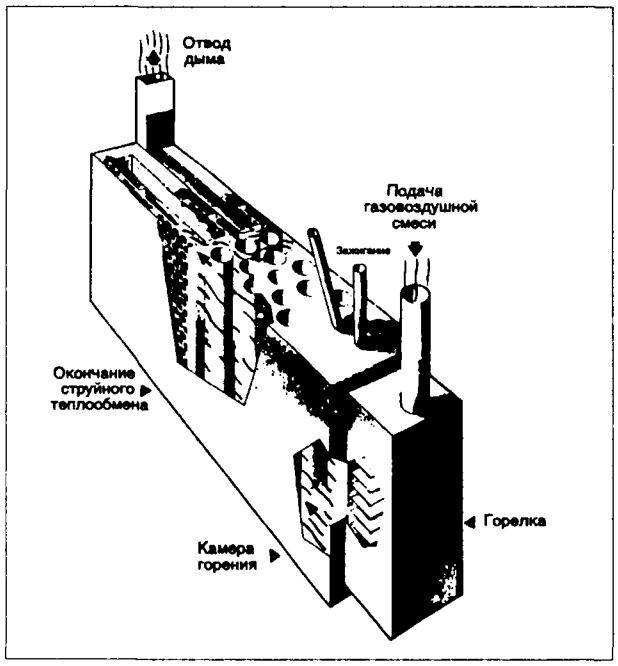
Во второй зоне – струйный теплообменник или теплообменник с гофрированными стенками; высокий коэффициент теплопередачи позволяет отбирать у дыма оставшиеся 30% тепла; продукты сгорания покидают, таким образом, теплообменник с температурой, близкой к температуре жидкости.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА

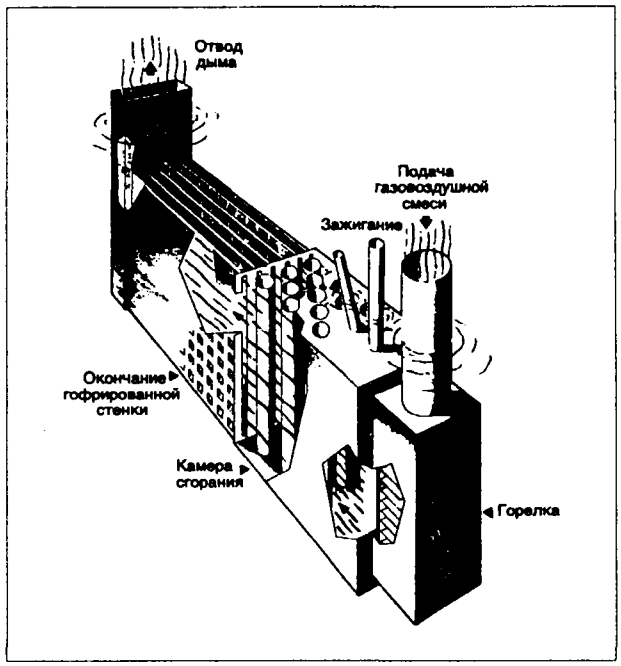
Как показывает таблица, этот тип теплообменника обладает одновременно большой мощностью и значительным энергетическим совершенством.

Компактный теплообменник может нагревать практически любые жидкости. Однако, обладая большой поверхностной мощностью первой части, надо избегать погружения в жидкость сильно "загруженной" части, что часто может привести к закупорке и, таким образом, к разрушению аппарата.

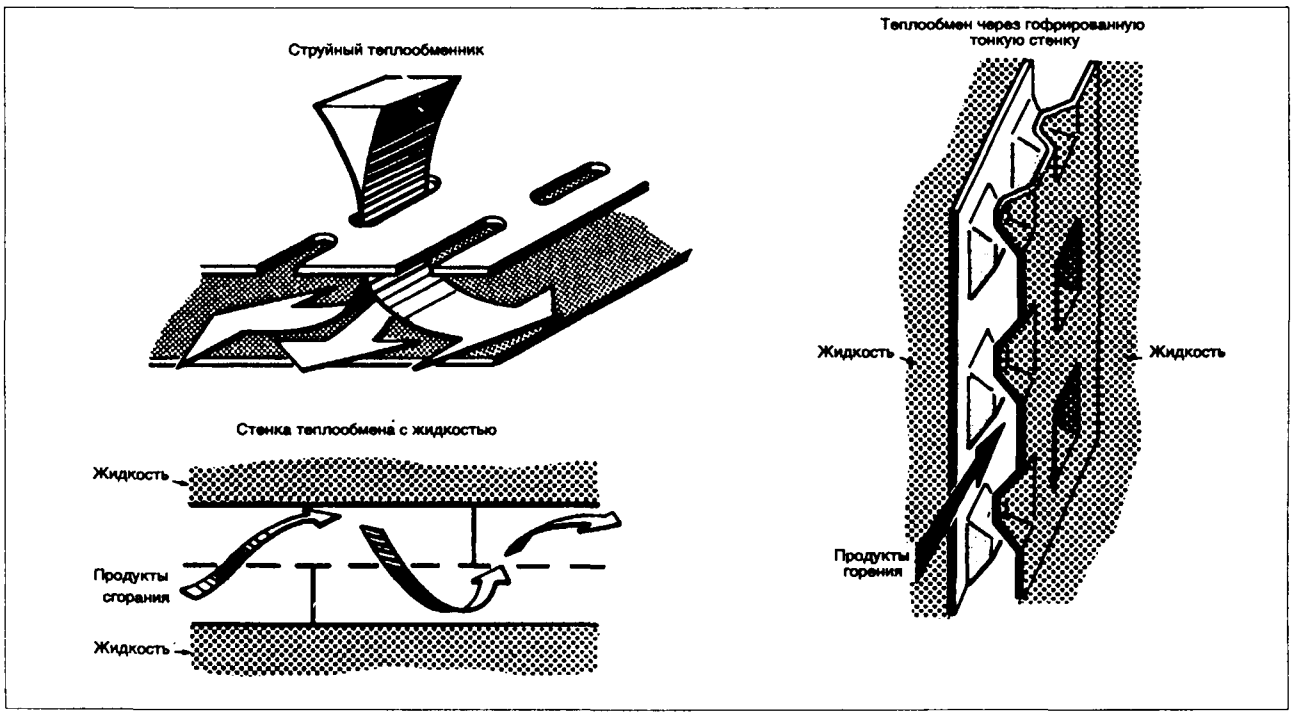
Характеристика компактного теплообменника	CPJ-150	CPJ-300	CTG-200	CTG-400
Мощность Р. С. I., кВт	100 - 200	200 - 350	100 - 250	250 - 500
Высота, мм	500	500	500	500
Длина, мм	1 150	1 800	1 245	1 325
Ширина, мм	250	250	150	250
КПД, % Р. С. I.	92 - 96	93 - 95	94 - 96	93 - 96



Струйный компактный погружной теплообменник CPJ-150.



Теплообменник погружной с гофрированными стенками CTG-400.



Принципиальная схема двойного теплообменника.

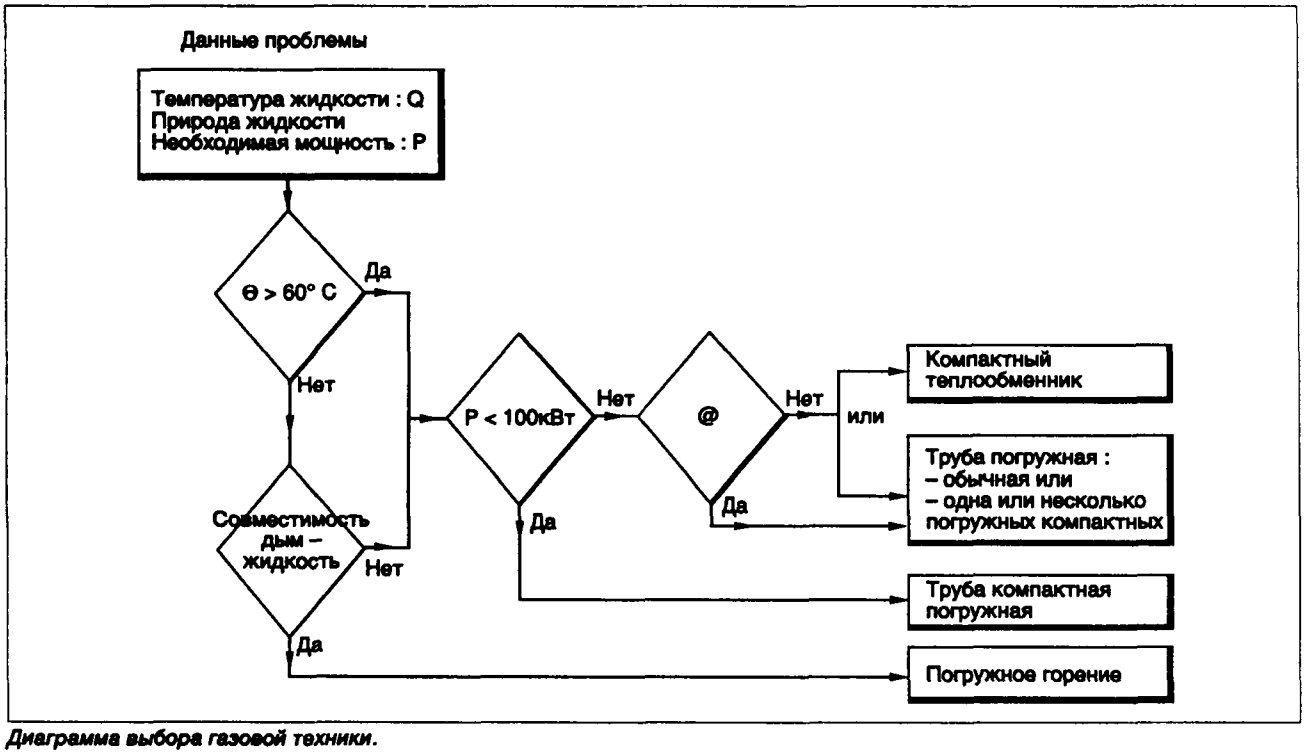


Диаграмма выбора газовой техники.

8.5.5.4.4. Выбор специальной газовой техники

Прежде чем заняться проблемами выбора техники в зависимости от располагаемого места, определенное число параметров позволяет уже сделать выбор с точки зрения нагрева жидкости.

8.5.5.4.5. Применение

— Отопление помещений;
— обезжиривание;
— очистка;
— производство горячей воды.

8.5.5.5. Нагревательные печи металлургической и керамической промышленности

8.5.5.5.1. Общее использование

Этот тип печей особенно интересен для металлургической промышленности. Под другими названиями они также используются в производстве керамики и, в некоторых случаях, в производстве стекла.

8.5.5.5.2. Принцип устройства и работы

Эти печи имеют постоянное нагреваемое пространство разнообразной формы, адаптированное к размерам, форме и природе деталей, нагреваемым продуктам или продуктам варки, находящимся в неподвижном или мобильном положении, в соответствии с типом используемой в течение всего времени нагрева печи.

Встречаются печи следующих типов:
— печи с мобильным и неподвижным подом;
— толкательные печи;
— печи с продольной балкой и с прорезью;
— печи с прорезью;
— печи с вращающимся подом;
— печи "Pits" или мостовые;
— печи с металлическим ковром;
— печи колесные;
— печи с вагонетками.

Нагрев деталей может осуществляться продуктами сгорания, циркулирующими в печи, или путем нагрева деталей, помещенных в муфли, вокруг которых циркулируют продукты сгорания.

Как вариант непрямой обогрев может осуществляться с помощью радиантных труб.

При прямом нагреве печи обогреваются с помощью горелок, тщательно размещаемых вокруг пространства, чтобы создать наилучшую равномерность отопления. За счет возможного создания большого числа точек нагрева газ имеет с этой точки зрения большое преимущество.

Можно использовать горелки всех типов: индукционные с использованием в качестве движущей силы жидкости, воздуха или газа; горелки с раздельным снабжением воздух–газ или в некоторых случаях смешанные горелки: газ–жидкое топливо, позволяющие применять отдельное или совместное сжигание двух видов топлива.

С точки зрения экономии энергии, кроме установки рекуператоров,предназначенных для нагрева окислителя и прежде всего топлива, надо выделить использование в последние годы керамического волокна, имеющего небольшую тепловую инерцию, для сооружения отражающих стенок, а так же применение нового обогревающего оборудования, среди которого:
— струйные горелки, интенсифицирующие конвекцию внутри топки и обеспечивающие хорошее распределение температур;

— авторекуператорные горелки, которые могут в определенных случаях успешно заменить металлические рекуператоры и осуществляющие снижение потребления тепла на 25 - 35%;
— регенеративные горелки, позволяющие достичь высоких температур порядка 1 400 - 1 500 °С в зависимости от температуры нагрева продукта.

8.5.5.5.3. Результаты эксплуатации

8.5.5.5.3.1. Металлургия и машиностроение

8.5.5.5.3.1.1. Толкательные или балочные печи

— Для слитков: 450 - 700 кВт · ч/т в зависимости от способа работы – постоянно или непостоянно.
— Для болванок: 350 - 700 кВт · ч/т.

8.5.5.5.3.1.2. Печи "Pit" (рис. с. 792)

— Слитки горячей посадки: 210 - 280 кВт · ч/т;
— слитки холодной посадки: 420 - 500 кВт · ч/т.

8.5.5.5.3.1.3. Печи с неподвижным подом

Подогрев слитков для холодной посадки около 500 кВт · ч/т.

8.5.5.5.3.1.4. Печи балочные

Подогрев слабый – около 420 - 530 кВт · ч/т.

8.5.5.5.3.1.5. Печи с вращающимся подом

Ковка и штамповка: около 450 - 1000 кВт · ч/т в зависимости от техники нагрева и условий эксплуатации.

8.5.5.5.3.2. Керамика

8.5.5.5.3.2.1. Камерные печи

— Подогрев фарфора (960°С): 2,5 - 1,8 кВт · ч/кг.
— Керамические изделия (1260°С): 4,8 - 2,3 кВтч/кг.
— Обжиг фарфора (1 400°С): 2,4 - 2,7 кВт · ч/кг.

8.5.5.5.3.2.2. Печи с вагонетками или туннельные печи (рис. с. 792)

— Обжиг кирпича (950/1000°С): 280 - 350 кВт · ч/т.
— Обжиг черепицы (950/1000°С): 280 - 410 кВт · ч/т.

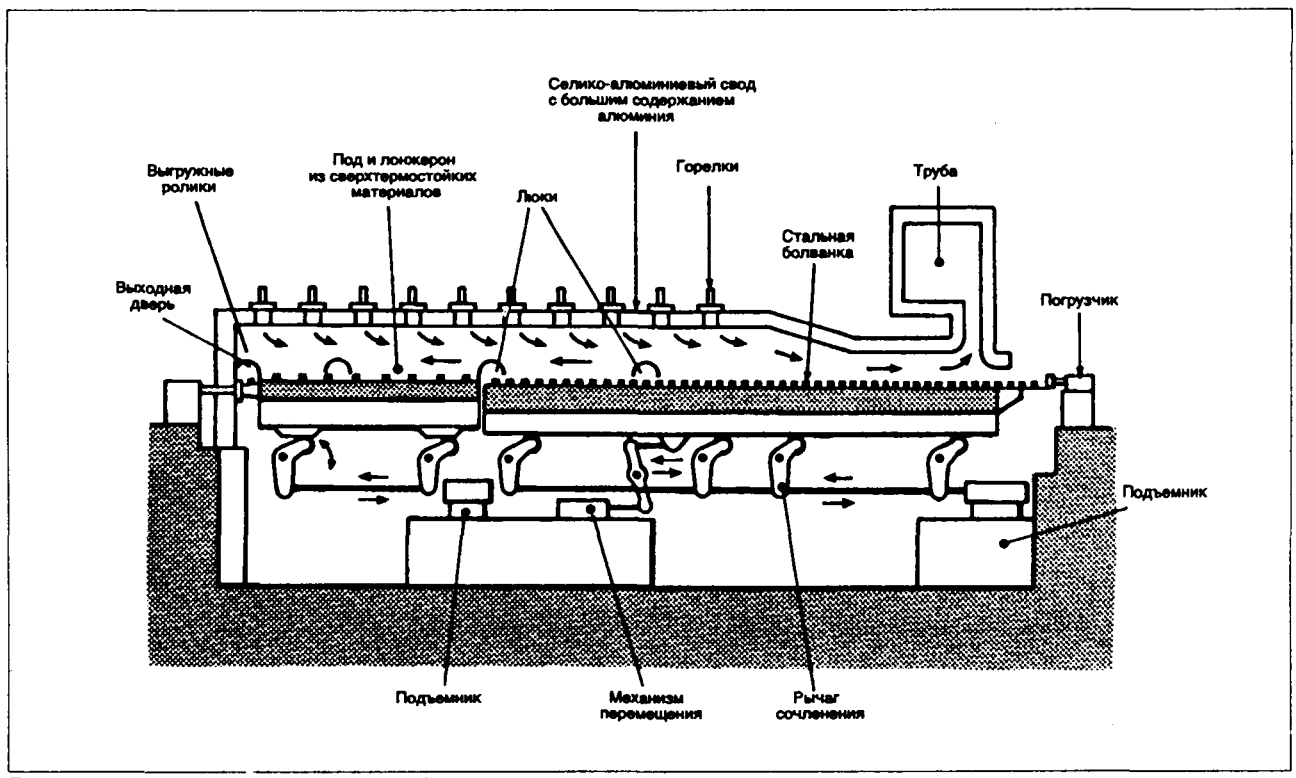
8.5.5.6. Плавильные печи

8.5.5.6.1. Общая часть

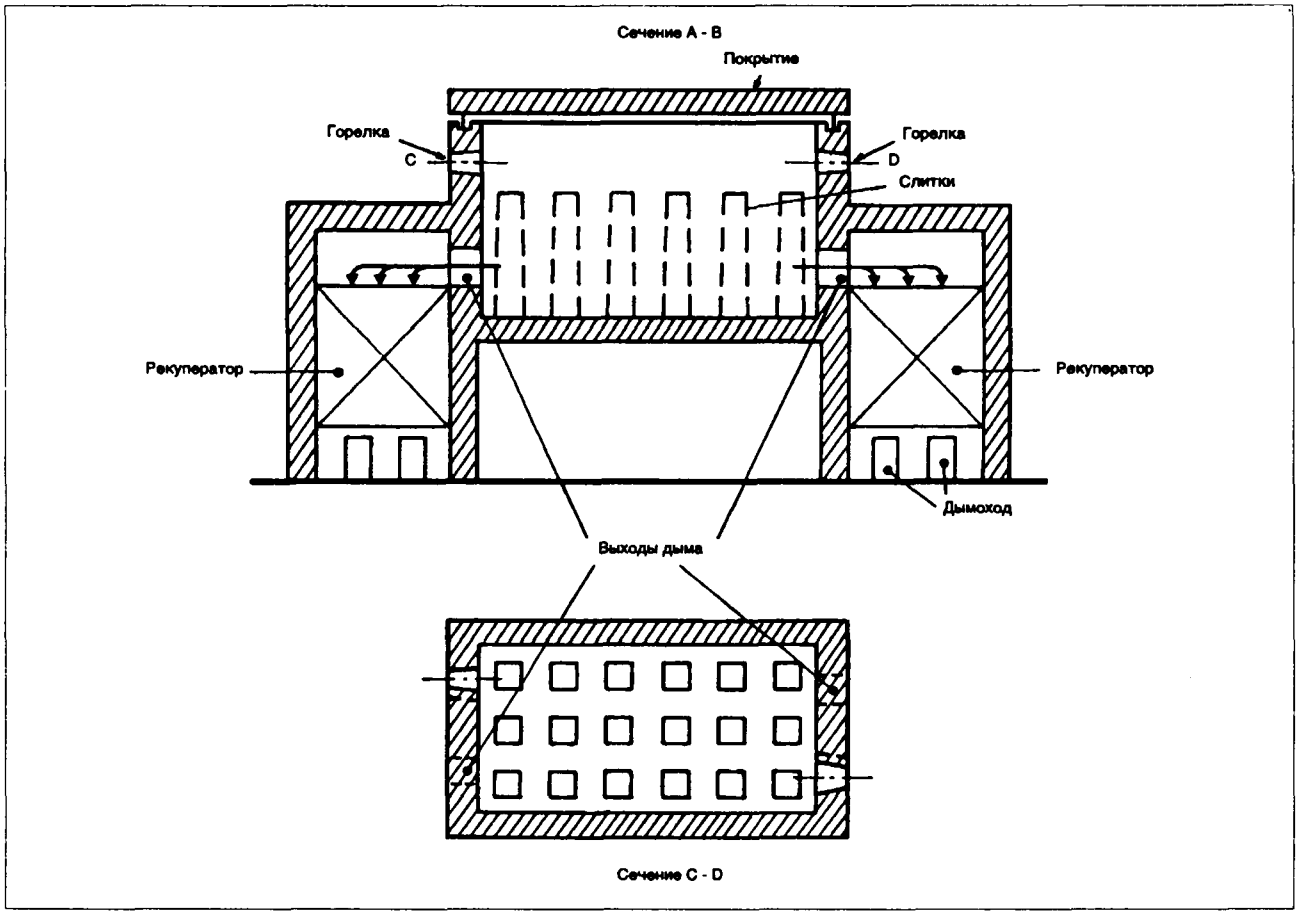
Литейное производство из отходов второй плавки, это процесс, при котором расплавленный металл заливается в формы, чтобы изготавливать определенные детали (промышленные изделия, литье), имеет во Франции четыре принципиальных сектора:

— литье стали,
— литье чугуна,
— литье медных сплавов,
— литье легких сплавов.

Таблица на с.793 содержит несколько величин энтальпии при температуре текучести наиболее часто встречающихся и наиболее характерных металлов.



Балочная печь для подогрева стальных болванок.



Прямоугольная печь типа "Pit" с двумя горелками по диагонали.

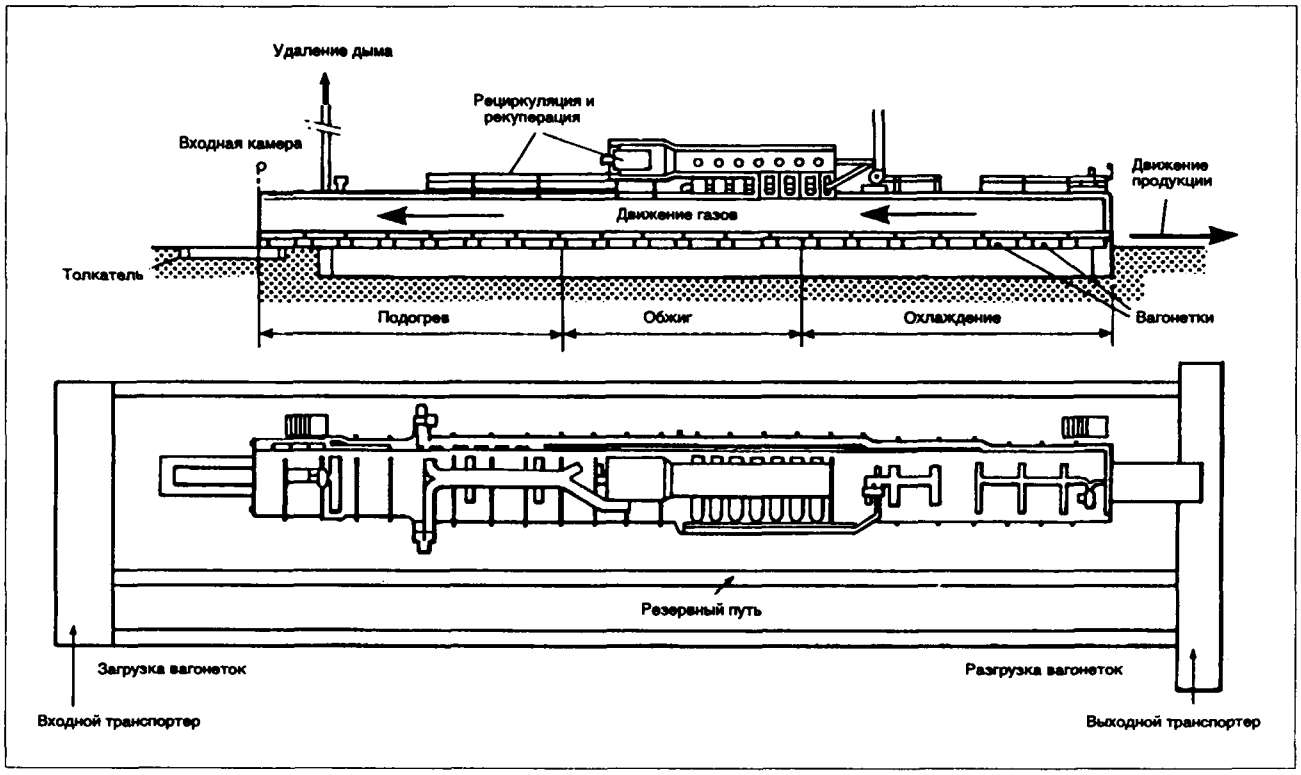


Схема туннельной печи для обжига деталей из керамики.

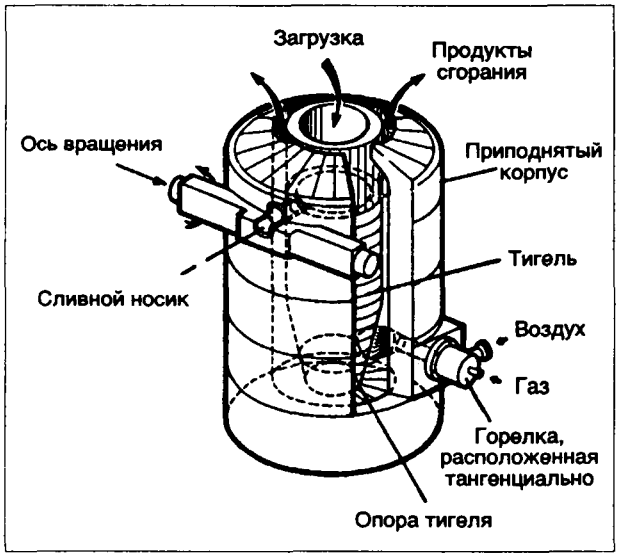
Температура текучести, °C	Металлы	Энтальпия, кВт · ч/т
1 500	Чугун	360
1 400	Монель (70% Ni, 30% Cu)	280
1 300	Сплав меди и алюминия (84% Cu, 11% Al, 5% Ni)	250
1 200	Бронза (88% Cu, 12% Sn)	190
1 050	Латунь (65% Cu, 35% Zn)	180
750	Алюминий (20% Si)	400
720	Алюминий (5% Cu)	300

Плавление: величина энтальпии при температуре текучести некоторых металлов.

8.5.5.6.2. Классификация плавильных печей

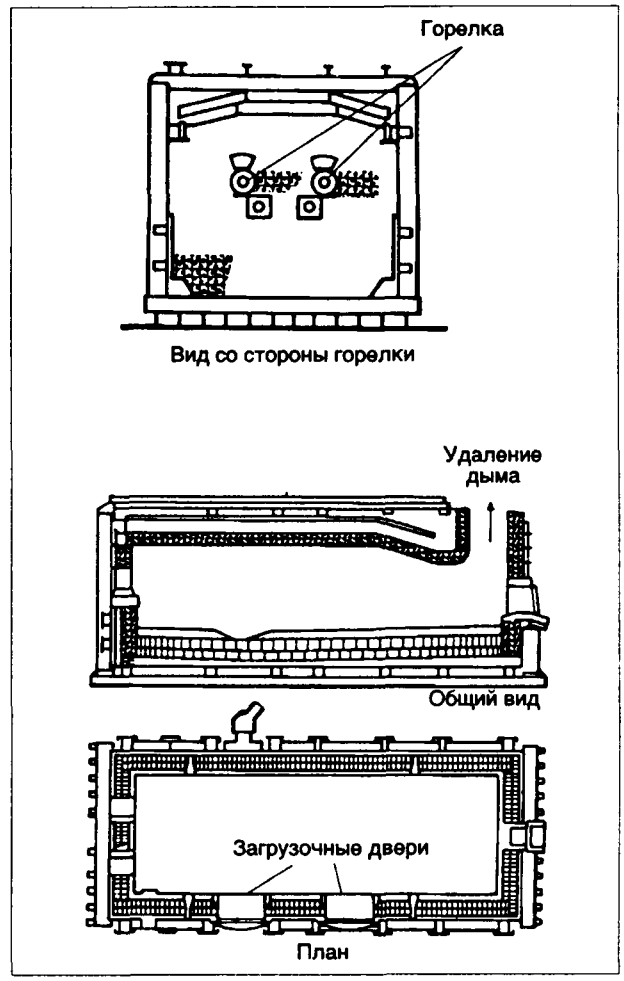
Различают следующие типы печей:

— мартеновские печи (эти типы печей практически исчезли во Франции);



Принципиальная схема тигельной печи для плавки бронзы, оборудованной футляром.

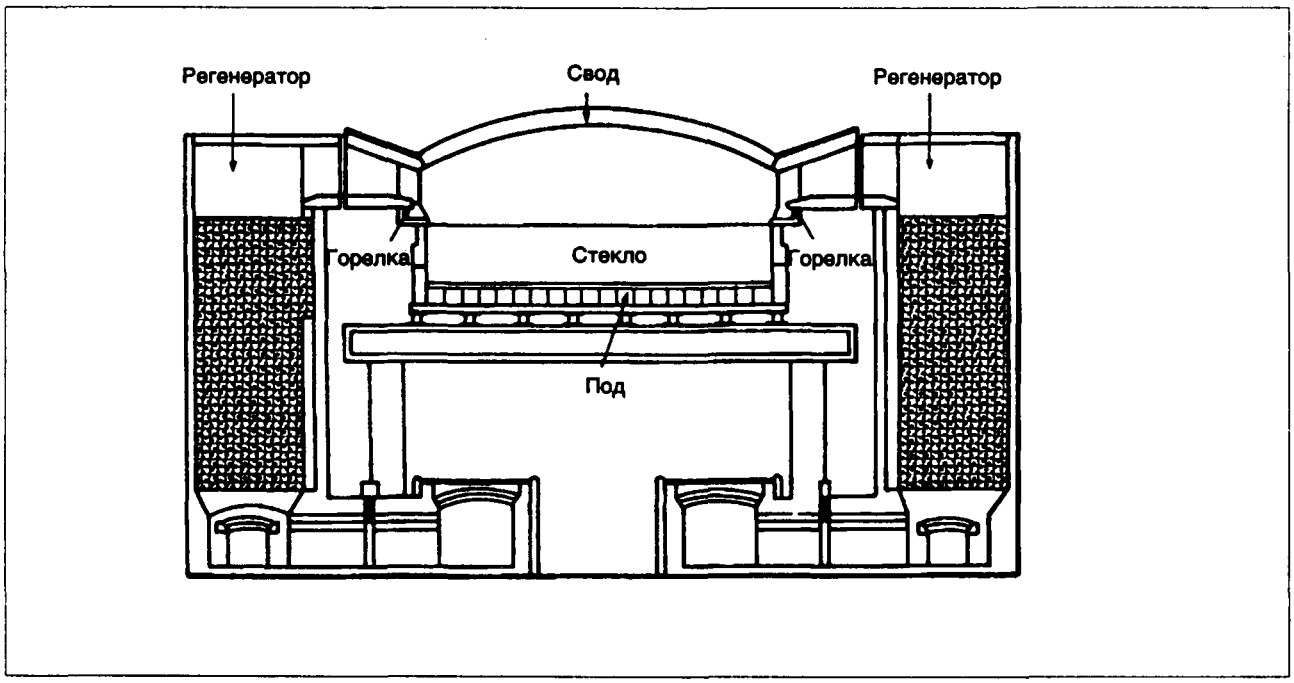
— вагранки;
— ванные печи;
— тигельные печи;
— вращающиеся печи.



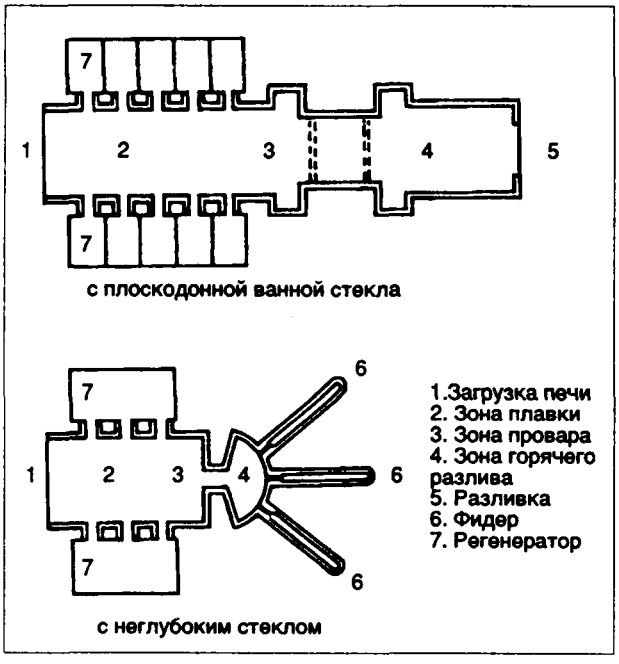
Отражательная печь для плавки цветных металлов.

Металлы	Тип печи	Температура текучести	Потребление энергии
Сталь	Ванная (Мартеновская) Вагранка + конвертер Вращающаяся	1 550°C	2 500 - 1 500 кВт · ч/т
Чугун	Вагранка Ванная (отражательная) Тигель (малые количества)		
Чугун ковкий	Дуплекс (вагранка → электропечь) Вращающаяся	1 400°C	
Сплавы меди	Тигельные Вращающаяся Ванная (отражательная)	1 200°C	1 500 - 800 кВт · ч/т
Легкие сплавы	Тигельные Ванные (отражательные)	700°C	
Сплавы цинка	Тигельная с камером	450°C	400 кВт · ч/т

Различные типы газовых печей, используемых в литейном производстве металлов.



Ванная печь поперечными горелками. Вид сбоку.



Ванные печи поперечными горелками.

8.5.5.6.3. Принципы строительства и работы

В этих типах печей пространство, в котором проводится операция (обычно плавка), является пространством, в котором происходит и горение.

Пространство может быть разной формы:

— печь с вертикальным объемом у вагранок;
— печь с прямоугольным объемом (неподвижным или опрокидывающимся) для железистых и цветных металлов;
— вращающаяся печь для плавки железистых и цветных металлов.

8.5.5.6.3.1. Наиболее распространенные устройства

Наиболее распространенные устройства следующие:

— Обогрев продольный

Пламя распространяется параллельно большой оси прямоугольника, либо с обеих сторон его, либо в форме заколки для волос (печь-петля). Горелка и выход продуктов сгорания часто расположены на одной и той же малой стороне прямоугольника;

— Обогрев поперечный

Пламя перпендикулярно продольной печи. В этом случае его движение должно быть ограничено шириной печи.

Условия работы печей могут быть следующими:

— горелка работает постоянно с возможностью нагрева воздуха горения в рекуператорах до температуры от 500 до 700°C;
— горелка работает периодически (система инверсии) и требует использования керамических регенераторов, позволяющих подогреть воздух горения более чем до 1 000°C.

8.5.5.6.3.2. Другие плавильные печи

В случае небольшого производства цветных металлов или необходимости производства большого числа сплавов разнообразного состава доста-

точно часто используются тигельные печи с горшком из материалов на базе графита (графит и глина, или графит и карборунд), производительность которых определяется в пунктах (один пункт представляет объем, занятый килограммом бронзы). Тигель в 300 пунктов может содержать 300 кг. бронзы или 100 кг. алюминия, т.к. он в три раза легче бронзы.

Этот тип печей использует непрямой обогрев. Пламя развивается тангенциально между стенкой печи и тиглем. Горелка расположена с наружной стороны печи.

8.5.5.6.4. Применение

8.5.5.6.4.1. Черная металлургия

В черной металлургии используются:

— мартеновские печи для плавки стали (практически не применяются);
— электропечи с использованием кислородно-газовых горелок с целью ускорения плавки (горелки располагаются обычно в загрузочной двери);
— отражательные печи для цветных металлов, неподвижные и опрокидывающиеся. Некоторые отражательные печи, предназначенные для плавки меди, работают практически без рекуперации, из-за возможного последующего засорения пылью, уносимой продуктами сгорания в дымоход;
— вагранки (ванные печи), использующие чугун (первая плавка проведена в доменной печи) смешанный с коксом, смесь доводится до температуры плавления за счет горения кокса, поддерживаемого подачей воздуха через фурмы, расположенные в нижней части вагранки.

Газ может быть, в некоторых случаях, (черный нормальный чугун), использован в качестве тепловой добавки к коксу. Горелки располагаются над фурмами на расстоянии около метра.

Добавка газа позволяет увеличить часовую производительность на 25 - 60%, уменьшить на 30 - 60% расход кокса и улучшить тепловой КПД от 25 до 50%.

— вращающиеся печи, представляющие собой металлический цилиндр, изолированный внутри термостойким кирпичом, осуществляют очень часто плавку чугуна и цветных металлов. Обогрев осуществляется осевыми горелками.

8.5.5.6.4.2. Производство стекла

Плавка стекла осуществляется в отражательных печах, с использованием продольного кольцевого или поперечного обогрева.

Отметим, что в печах этого типа, с целью облегчения конвективного движения стекла в ванной устанавливаются электрический подогреватель (boosting) так же как и "кипятильник" (закачка сжатого воздуха для ускорения дегазации стекла).

8.5.5.6.5. Результаты эксплуатации

Констатируют в зависимости от типа печей следующие результаты:

— Мартеновские печи: 1250 - 1700 кВт · ч/т;
— Печи плавки стекла, в зависимости от размеров печи, температуры воздуха горения, изоляции печи и природы полученного продукта (без потребления электроэнергии): 1100 - 2100 кВт · ч/т;
— Цветная промышленность:
  · алюминий между 600 и 1 000 кВт · ч/т;
  · медь между 1 200 и 1 500 кВт · ч/т.

8.5.5.7. Цементные печи

8.5.5.7.1. Изготовление цемента

Цемент – новый материал, открытый в начале XIX века. Обжигом приблизительно при 1450°C смеси, состоящей из 80% известняка и 20% глины, получают силикатную смесь би- и триизвестняка и алюможелеза кальция, называемого клинкером.

Быстро охлажденный, затем тонко измельченный в смеси с 3 - 6% гипса и других добавок (шлак, летучий пепел и т.д.), он дает цемент.

Операция приготовления включает четыре фазы:

— 0 - 200°C – сушка сырья;
— 200 - 800°C – подогрев;
— 800 - 1100°C – декарбонизация;
— 1100 - 1450°C – клинкеризация.

8.5.5.7.2. Процессы изготовления

Цементные печи – это вращающиеся печи в виде стального цилиндра, изолированного внутри термостойким материалом, диаметром до 7 м и длиной до 200 м. Этот цилиндр медленно вращается вокруг своей продольной оси (1 - 2 об/мин) и наклонен по отношения к горизонту (наклон 3 - 6%).

Сырье подается в верхнюю часть – либо в подогреватель, либо прямо в печь, где оно подогревается, подвигаясь навстречу дыму к нижней части, где находится горелка.

Клинкер попадает затем в охладитель, где отдает свое тепло вторичному воздуха горения. Охладители могут быть ротационного типа с цепным приводом или поднимающимся с решеткой или с шарами.

Различают три основных процесса изготовления.

8.5.5.7.1.1. Влажный способ

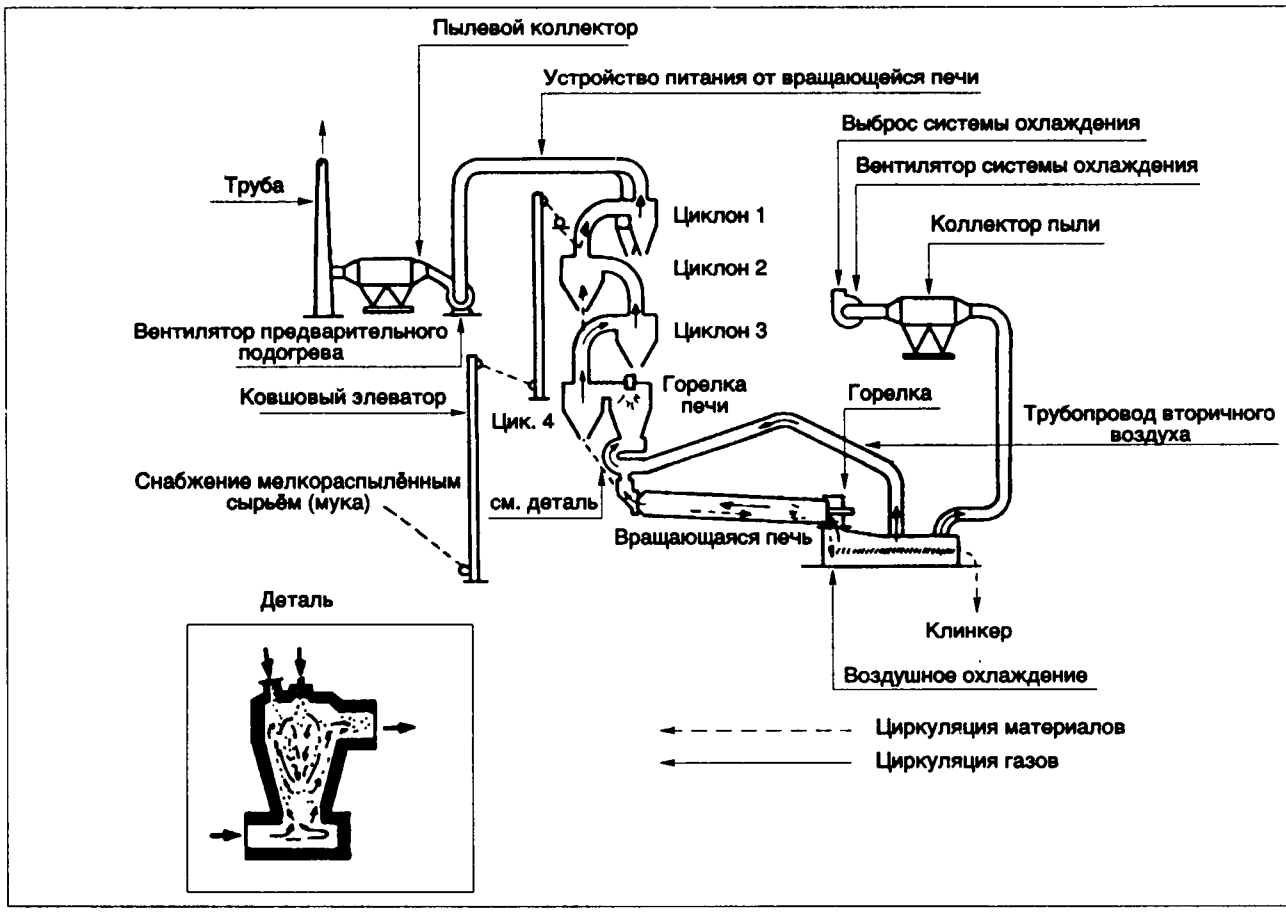
Влажный способ практически нигде не применяется из-за плохого энергетического коэффициента полезного действия.

Сырье разбавляется водой и подается во вращающуюся печь в форме теста, содержащего 35 - 40% воды.

Все трансформации материала происходят внутри печей обычно длинного типа (100 - 200 м). На входе в печь, цепная заслонка улучшает теплообмен продуктом и газом.

8.5.5.7.1.2. Полусухой способ

В полусухом способе исходный материал представлен в форме гранул, содержащих 12 - 15% воды и полученных либо из отфильтрованного под давлением теста, используемого при влажном способе, либо из сухой агломерированной пудры.



Обжиг исходного материала перед клинкеризацией.

Обычно гранулы помещаются в подогреватель с механической решеткой типа Lepol, где происходят фазы сушки и подогрева. Фазы декарбонизации и клинкеризации происходят в более коротких печах, чем при влажном способе.

8.5.5.7.2.3. Сухой способ

Сухой способ в настоящее время применяется наиболее часто, т.к. он менее энергоемкий (90% производства).

Фазы сушки, подогрева, частичной или полной декарбонизации происходят в циклонном теплообменнике, куда сырье поступает в виде пудры, называемой "мука", гранулы которой не превосходят 0,2 мм.

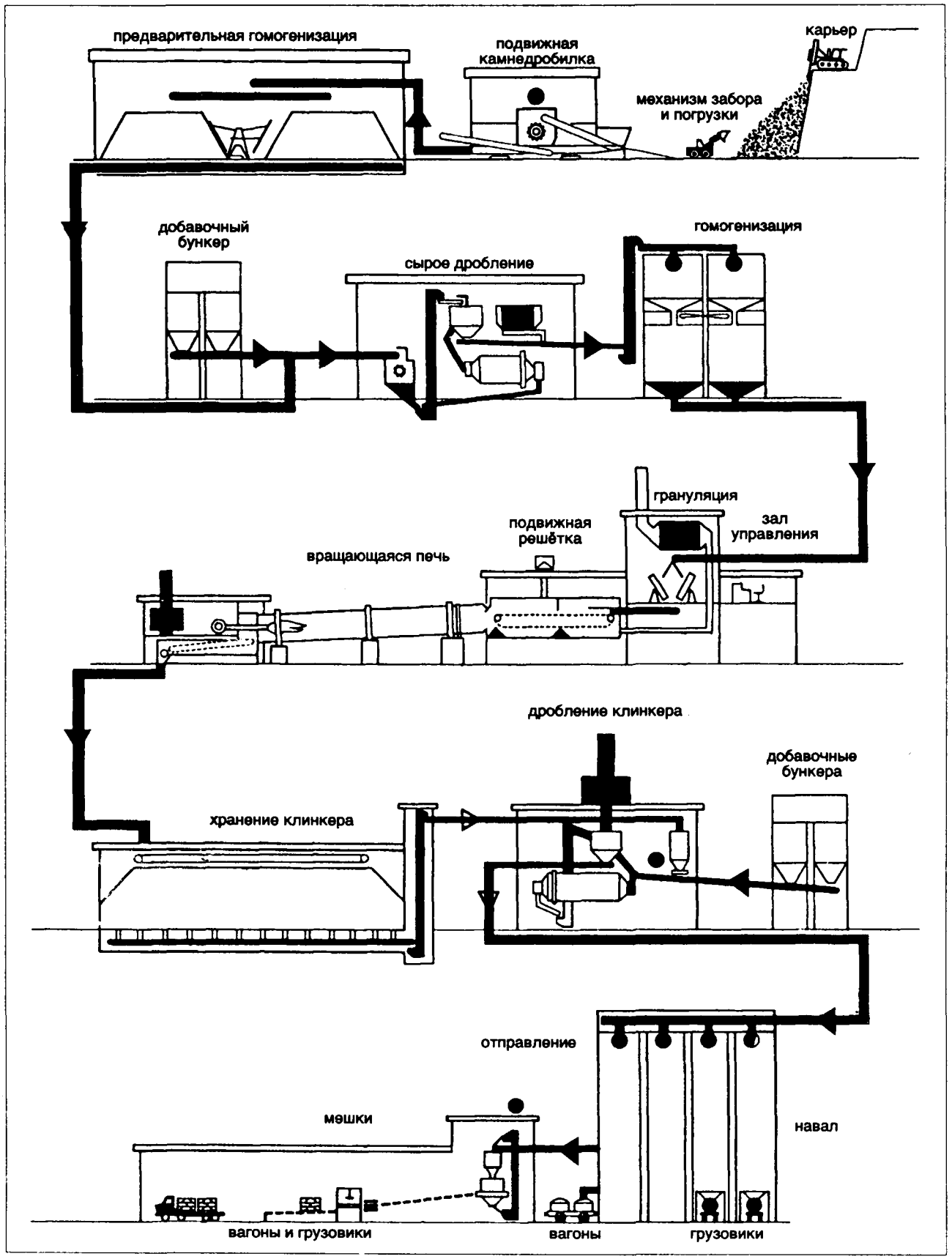
Только реакция клинкеризации происходит во вращающейся печи короткого типа (50 - 80 м)

Многие установки этого типа построены на месте заводов влажного способа, на которых печь была обрезана и заменена циклоном с дополнительной горелкой или без нее.

8.5.5.7.3. Характеристики цементных печей

См. таблицу ниже.

Характеристика	Влажный способ	Полусухой способ	Сухой способ
— Сырье (исходное)	Тесто	Гранулы	Пудра или мука
— Сушка, подогрев 0 - 800°C	Внутри вращающейся печи	Вращающаяся печь, подвижная решетка	Циклоны
— Декарбонизация 800 - 1 100°C	Печь вращающаяся	Печь вращающаяся	Циклон Печь вращающаяся
— Клинкеризация 1 450°C	Печь вращающаяся	Печь вращающаяся	Печь вращающаяся
— Охлаждение	Охладитель с подвижной решеткой, шаровой или вращающийся		
— Печь вращающаяся	L = 100 - 200 м Ø = 3 - 7 м	L = 50 - 80 м Ø = 3 - 7 м	L = 50 - 80 м Ø = 3 - 7 м
— Производительность	400 - 3 000 т/сут	1 000 - 4 000 т/сут	1 000 - 5 000 т/сут
— Удельное часовое потребление	1 450 - 1 950 кВт · ч/т	950 - 1 150 кВт · ч/т	900 - 1 000 кВт · ч/т
— Топливо	Уголь, жидкое топливо, природный газ		



Процесс обжига исходного материала перед клинкеризацией. Схема сухого способа.

8.5.5.7.4. Оборудование обогрева

Цементные печи имеют одну горелку, расположенную в нижней части печи, называемой соплом, назначение которого состоит в следующем:

передать топливо (пылеобразный уголь, мазут или газ), первичный воздух горения и прежде всего пары через нагреваемый продукт;

смешать топливо и первичный воздух;

регулировать форму пламени.

Цементные печи могут отапливаться:

— распыленным углем с дополнительной подачей жидкого или газового топлива;

— жидким тяжелым топливом с механическим или пневматическим распылением с помощью пара или природного газа;

— одним газом: в этом случае газ подается в печь через два отверстия: центральное и кольцевое.

Таким образом получают один поток газа, у которого можно изменить импульс путем изменения распределения расходов и таким образом сохранить форму пламени постоянной, когда тепловой расход изменяется.

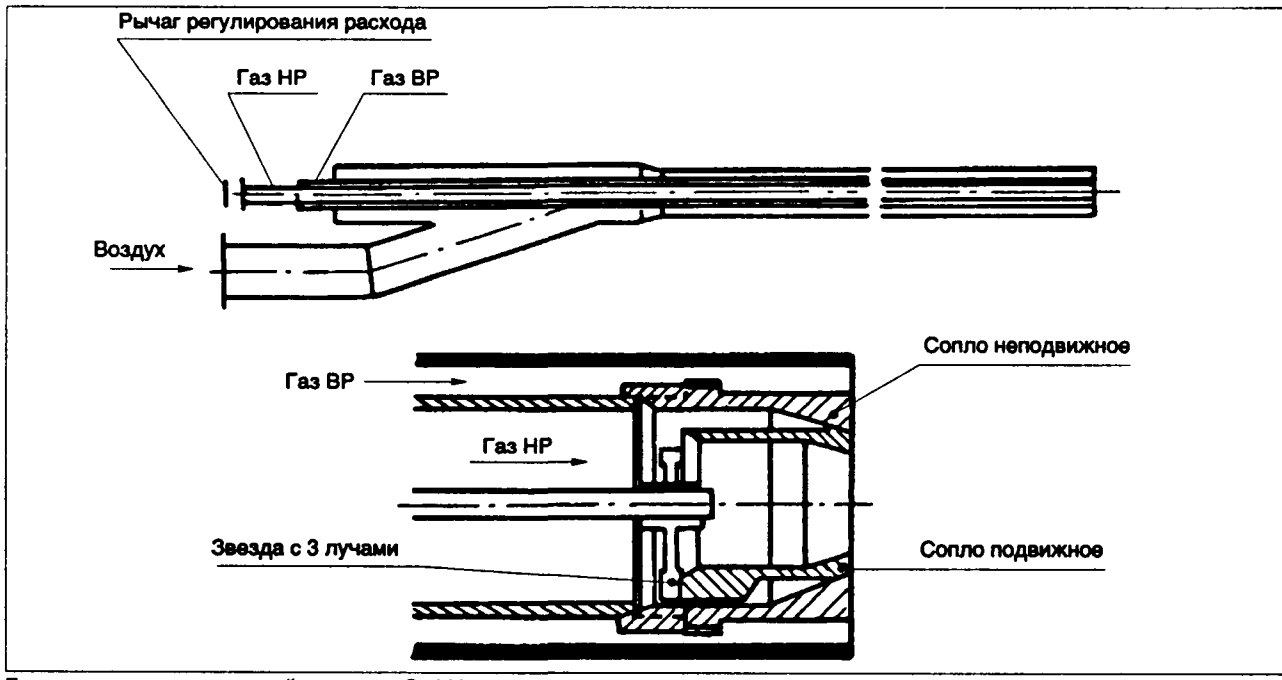
Это сопло, разработанное G.E.F.G.N. – группа изучения пламени природного газа, известная под названием "Сопло двойного импульса".

Газ имеет определенные преимущества, которые могут быть использованы во вспомогательном оборудовании:

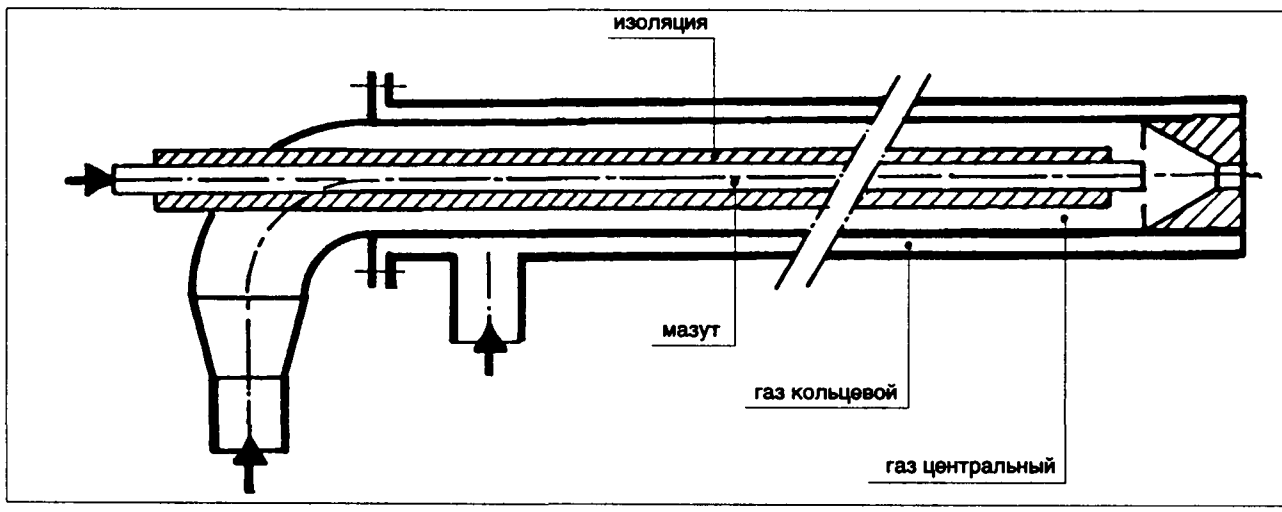
— горелки в подогревательных циклонах, где происходит предварительный обжиг "муки";

— горелки, подводящие тепло к решеткам; (полусухой способ);

— горелки, подводящие тепло к сушильному шкафу сырья или угля.



Газовая горелка туннельной печи типа Smidth.



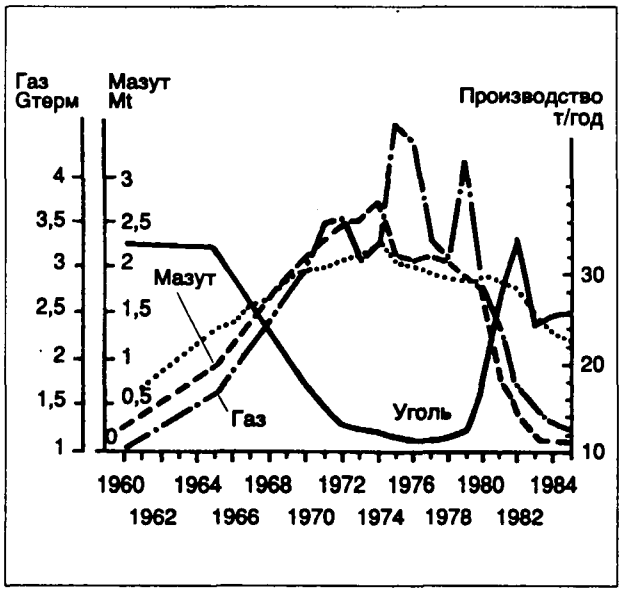
Принципиальная схема горелки G.E.F.G.N. с пневматическим разбрызгивателем мазута газом.

8.5.5.7.5. Цемент во Франции

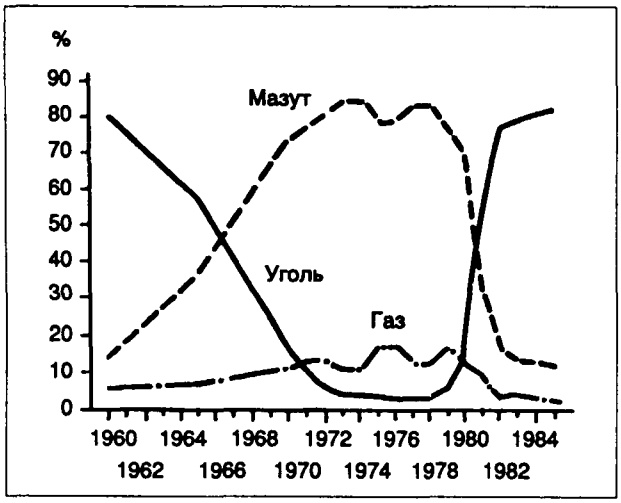
Потребление связующих материалов (цемент и гидравлическая известь) во Франции в 1988 году составляло 24,2 млн.т. Сектор строительства зданий потреблял 65,5%, т.е. на 5% меньше, чем в 1985 году. Сектор жилищного строительства потребляет 34,5%, с увеличением на 5% по сравнению с1985 г. Потребление топлива в 1988 году составляло 1,76 Mtep, в то время, как удельное часовое потребление составляло 802 кВт · ч/т цемента и 1040 кВт · ч/т клинкера.

Распределение между различными видами топлива такое же, как в 1985 году.

Начиная с 1985 года уголь заменил тяжелое жидкое топливо, как основной вид топлива, и составляет 86% общего потребления.



Потребление топлива цементной промышленностью Франции.



Распределение различных видов топлива в цементной промышленности.

8.5.5.8. Известковые печи

8.5.5.8.1. Производство извести

Известь – один из наиболее старых известных человеку материалов получается путем обжига известняка при температуре выше 900°C.

Негашеная известь представляет собой оксид кальция – результат декарбонизации известняка.

Гашеная известь или гидрат получается из природной извести с помощью реакции гидратации, называемой гашением.

$CaCO_3$			⟶	CaO	+	CO_2
Карбонат кальция	+	Обжиг 900°C	⟶	Оксид кальция	+	Диоксид углерода
Известняк			⟶	Известь негашеная	+	Углекислый газ
1 786 кг	+	876 квт	⟶	1 000 кг	+	786 кг

Негашеная известь.

CaO	+	H_2O	⟶	$Ca(OH)_2$
56 кг		18 кг		74 кг
Оксид	+	Вода	⟶	Гидроксид
Негашеная известь	+	Вода	⟶	Гашеная известь

Гашеная известь.

Гашеная известь получается из известняка, содержащего от 15 до 20% глины. Обжиг известняка осуществляется в двух типах печей.

8.5.5.8.2. Вертикальные печи

Этот тип печи, наиболее подходящий для Франции, представляет собой вертикальный стальной цилиндр, имеющий термостойкую внутреннюю изоляцию, которая представляет собой сосуд.

Известняк загружается с верхней части печи и опускается, пересекая последовательно при этом три зоны:

— подогрева;
— обжига или кальцинации;
— охлаждения.

Газовые потоки проходят печь в обратном направлении: свежий воздух, забранный в нижней части печи, подогревается в контакте с известью и обеспечивает сжигание топлива. Горючие газы нагревают загрузку материала перед выходом из верхней части печи. Старые прямые печи обогревались обычно твердым топливом (кокс, уголь и т.д.) в смеси с известняком. Этот тип печи не позволяет получить хорошее качество извести при использовании жидкого или газового топлива, когда производительность превосходит 150 - 200 т в сутки.

Это топливо подается в печь через стенки и трудно осуществить хорошее распределение тепла в пространстве загрузки камня, когда сечение емкости увеличивается.

Новые прямые печи используют жидкое и газовое топливо (обычно мазут и природный газ).

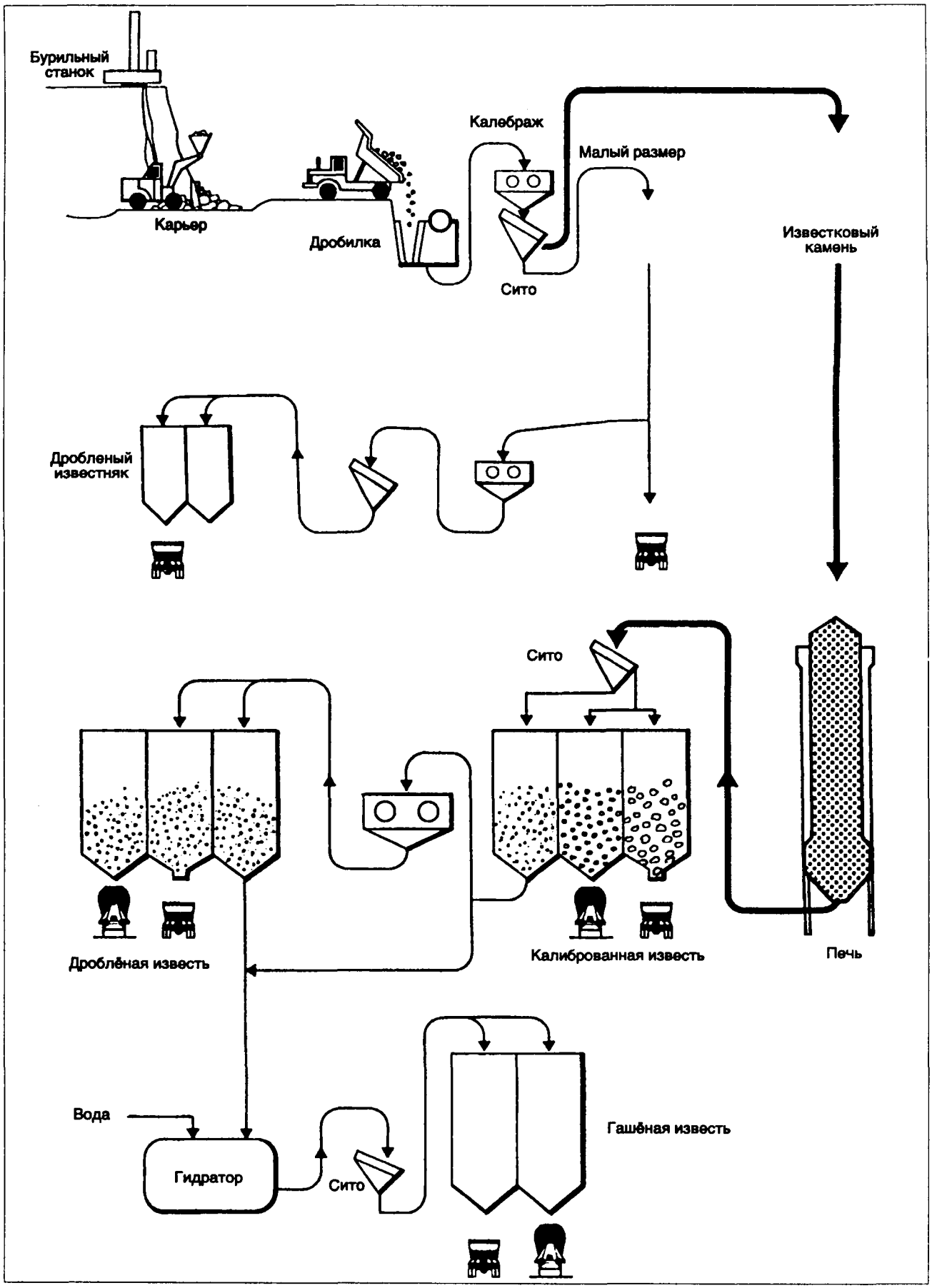
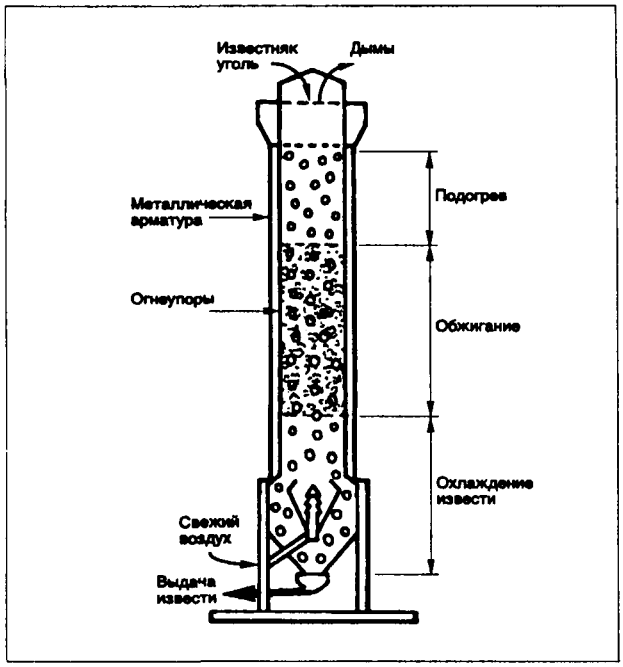
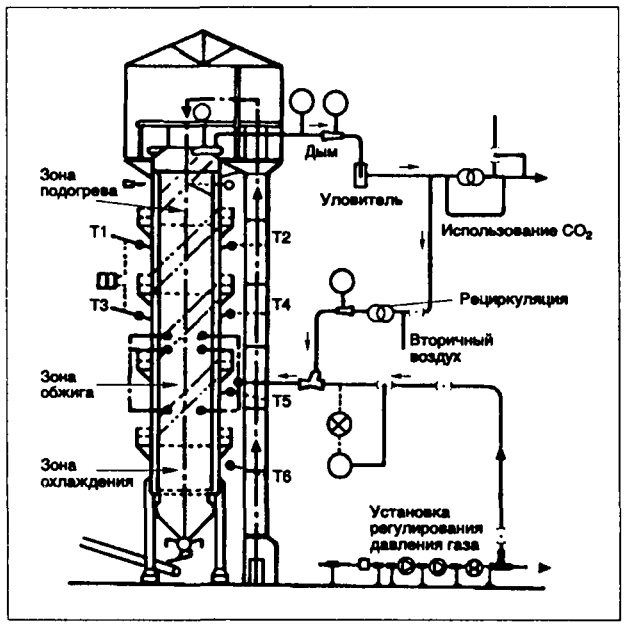


Схема производства извести.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА



Принцип простой классической печи, отапливаемой углем.

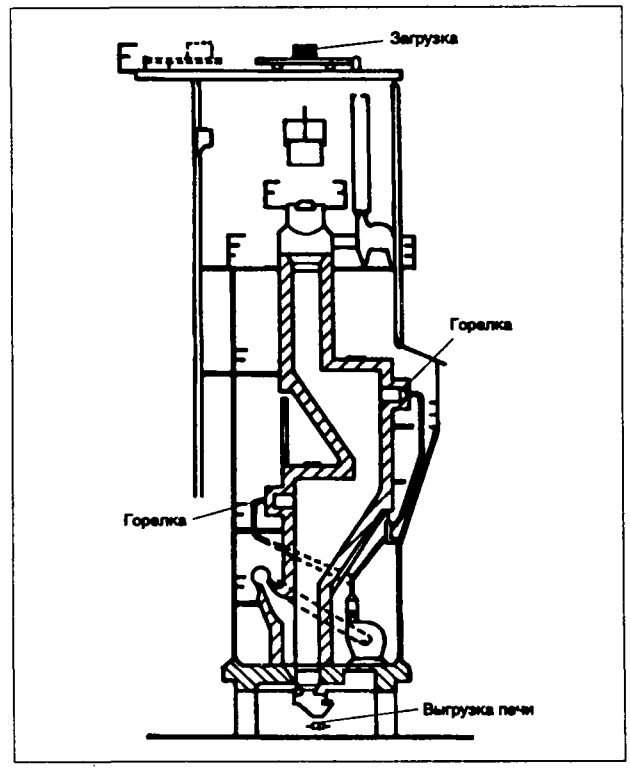


Известковая печь процесса "Discar".

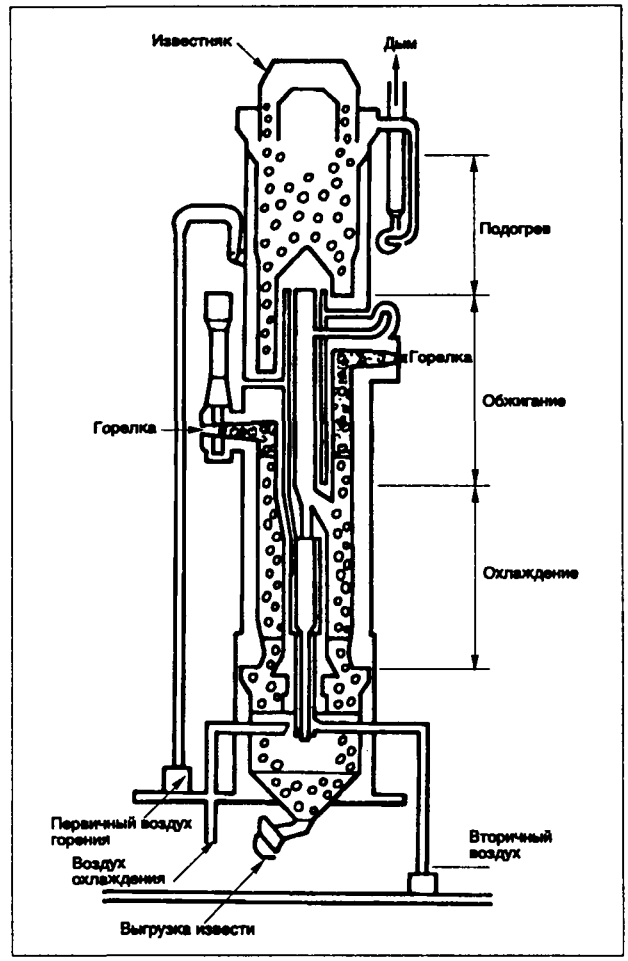
Некоторые новые печи работают на твердом пылевидном топливе и могут быть многотопливными.

На новых печах были созданы различные системы, позволяющие улучшить качество извести и уменьшить расход энергии:

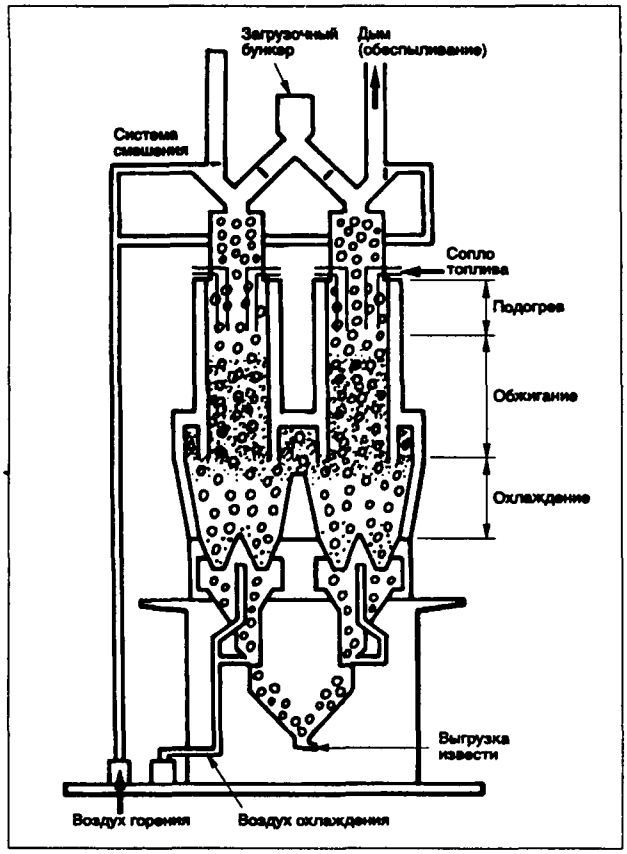
— ванные печи "zig - zag";
— рециркуляция продуктов сгорания;
— увеличение точек подачи топлива;
— наклонные наконечники топлива;
— печи с круговой ванной;
— печи с несколькими ваннами и альтернативными циклами.



Печь "zig-zag".



Современная кольцевая прямая печь.



Современная прямая печь с емкостью и переменным циклом.

Новые прямые печи позволяют осуществлять равномерное производство извести очень хорошего качества и с превосходным энергетическим КПД (около 1000 кВт · ч/т извести).

8.5.5.8.3. Вращающиеся печи

Они представляют собой цилиндр,вращающийся вокруг своей немного наклоненной оси (уклон от 3 до 5%).

Зона подогрева может состоять из решетки на входе в печь или подъемников или цепей внутри печи, способствующих теплообмену между газом и сырым известняком.

Охлаждение извести осуществляется во вращающемся холодильнике или холодильнике с решеткой.

Эти печи используют газовое, жидкое и твердое в пылевидной форме топливо. Эти печи не имеют такого достаточно хорошего энергетического КПД (1400 - 1500 кВт · ч/т извести), как прямые печи, но они более гибкие, имеют более высокую производительность, превосходящую более 1000 т в день. Качество извести очень хорошее и равномерное, без примесей, содержащихся в топливе (сера, например).

8.5.5.8.4. Известь во Франции

Промышленность	Потребление в 1988 г.	
	тонн	%
Черная металлургия (с экспортом)	1 590 000	51,5
Сельское хозяйство	311 000	10
Дороги и стабилизация почвы	301 000	9,7
Обработка воды	207 000	6,7
Цветная металлургия	107 000	3,5
Химическая промышленность	105 000	3,4
Здания: материалы и детали конструкции	71 000	2,3
Бумажная промышленность	69 000	2,2
Очистка дыма	38 000	1,2
Карбид кальция	35 000	1
Разное	105 000	3,3
Экспорт (известь сталелитейных заводов)	150 000	4,8
Сумма	3 089 000	100

Потребление в тоннах (1988 г.).

Жидкое (мазут № 2) . . .	676	19%
Газ	2 339	65%
Кокс	577	16%
Общее	3 592	100

Часовое потребление топлива (миллион кВт · ч/P.C.I.).

Использование газа улучшает гибкость эксплуатации и позволяет на прямых печах получить известь со слабым содержанием серы.

Характеристики	Печи прямые старые	Печи прямые новые	Печи вращающиеся
Производительность, т/сут	20 - 200	200 - 600	200 - 1 000
Размеры:			
Ø ванны, м	1 - 4	2 - 4	2 - 5
L или H, м	5 - 20	10 - 20	50 - 120
Топливо	Твердое в кусках	Твердое, пылевидное, жидкое, газообразное	Твердое, жидкое, газообразное
Удельный расход, кВт · ч/т	1 300	1 000	1 400
Размер загружаемых камней в мм	40 - 140	30 - 200	5 - 40
Гибкость управления	Среднее	Хорошее	Очень хорошее
Равномерность обжига	Посредственное	Хорошее	Очень хорошее
Качество извести	Среднее	Хорошее	Очень хорошее
Давление печи	Небольшое давление или разрежение	Давление до 400 мбар	Разрежение

Характеристики известковых печей.

8.5.5.9. Комбинированное производство механической энергии тепла и холода

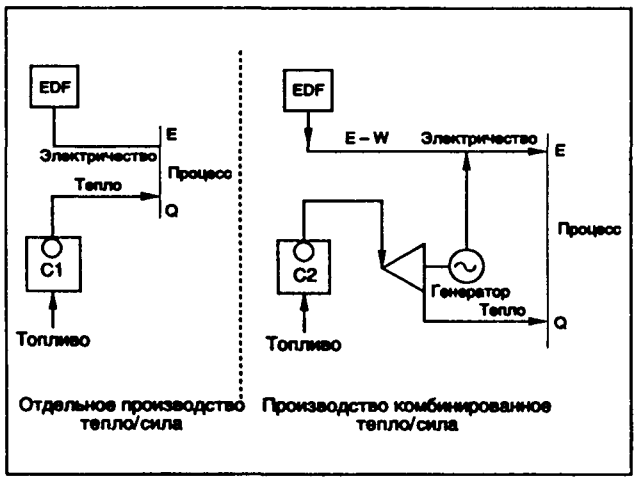
8.5.5.9.1. Определение

Говорят "Совместная генерация", совместное производство или комбинированное производство, цикл трансформации, в котором на основе какого-то топлива производят одновременно две полезные энергии: механическую и тепловую.

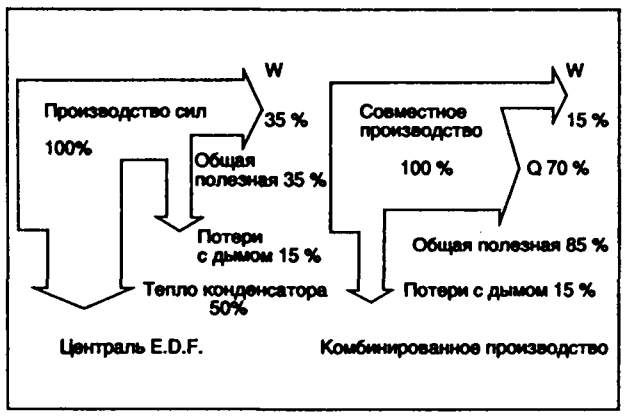
Механическая энергия используется для привода машин (вентилятор, компрессор и т.д.) или более часто электрогенераторов. Тепловая энергия существует в форме теплоносителя, который легко использовать: пар, горячая вода, горячий воздух и т.д.

8.5.5.9.2. Различные способы использования

Характеристики установок зависят от их конечных целей. Их можно разделить на три больших класса:



Снабжение E.D.F. и комбинированное производство.



Использование первичной энергии.

— тепло является основным продуктом: электроэнергия (или движущаяся сила) является промежуточным продуктом, подаваемым в кабель для производства тепла. Это комбинированное использование продукции часто называется "тепло–сила";

— электрическая автономия (или механическая) является основной целью. Тепло является промежуточным иногда избыточным продуктом. Этот тип установок часто называется "общая энергия";

— установка обеспечивает только часть потребностей. Дополнение осуществляется: электроэнергией E.D.F. и теплом классической котельной.

8.5.5.9.3. Приводные машины

Сердце системы совместной генерации - приводная машина: она производит механическую энергию.

Ее термические выбросы используются для производства тепла. Различают две категории машин:

— двигатели наружного сгорания (паровые турбины с противодавлением). Топливо сжигается в котле. Произведенный пар дросселируется в турбине – производящем элементе системы. Выхлопной пар используется для производства тепла. Общий КПД этого типа установки достигает или превосходит 90%;

— двигатели внутреннего сгорания (это поршневые двигатели и газовые турбины). Общий КПД этого типа установки достигает или превосходит 85%.

Сгорание создает газ высокой температуры и высокого давления, их энергия трансформируется в движущую силу с помощью поршня (поршневой двигатель) или с помощью редуцирования в турбине (газовая турбина).

Эти двигатели могут использовать только жидкое или газовое топливо.

8.5.5.9.3.1. Двигатели внутреннего сгорания

См. рис. с. 804.

8.5.5.9.3.2. Газовая турбина

См. рис. с. 804.

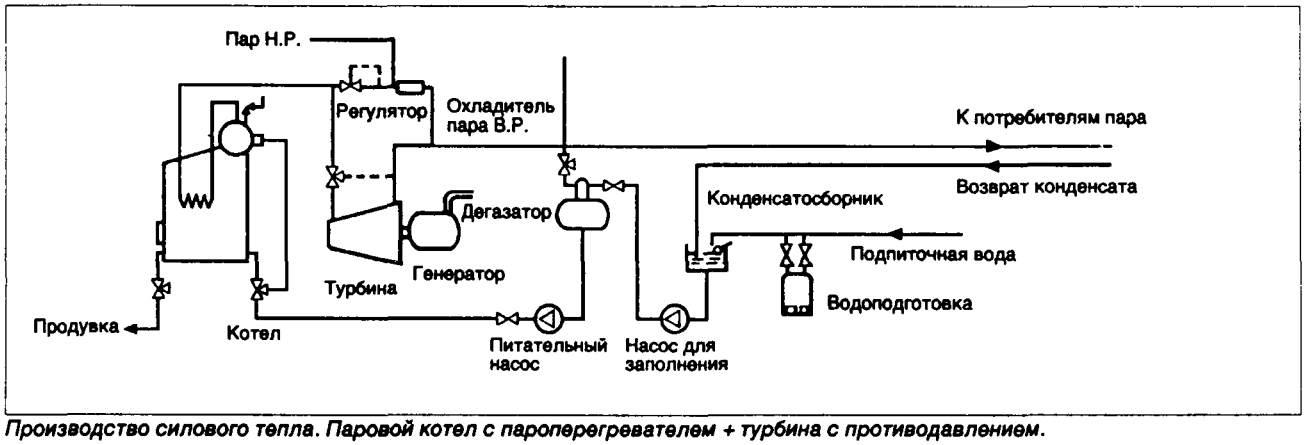
8.5.5.9.3.3. Тепловой насос с газовым двигателем

Схема (с. 805) интересна во многих случаях, когда для сушки требуется сухой воздух низкой температуры (дерево, штукатурка), в установках кондиционирования воздуха больших помещений, таких как больницы, гостиницы, институты и т.д. Однако применение тепловых насосов требует соблюдения определенных условий:

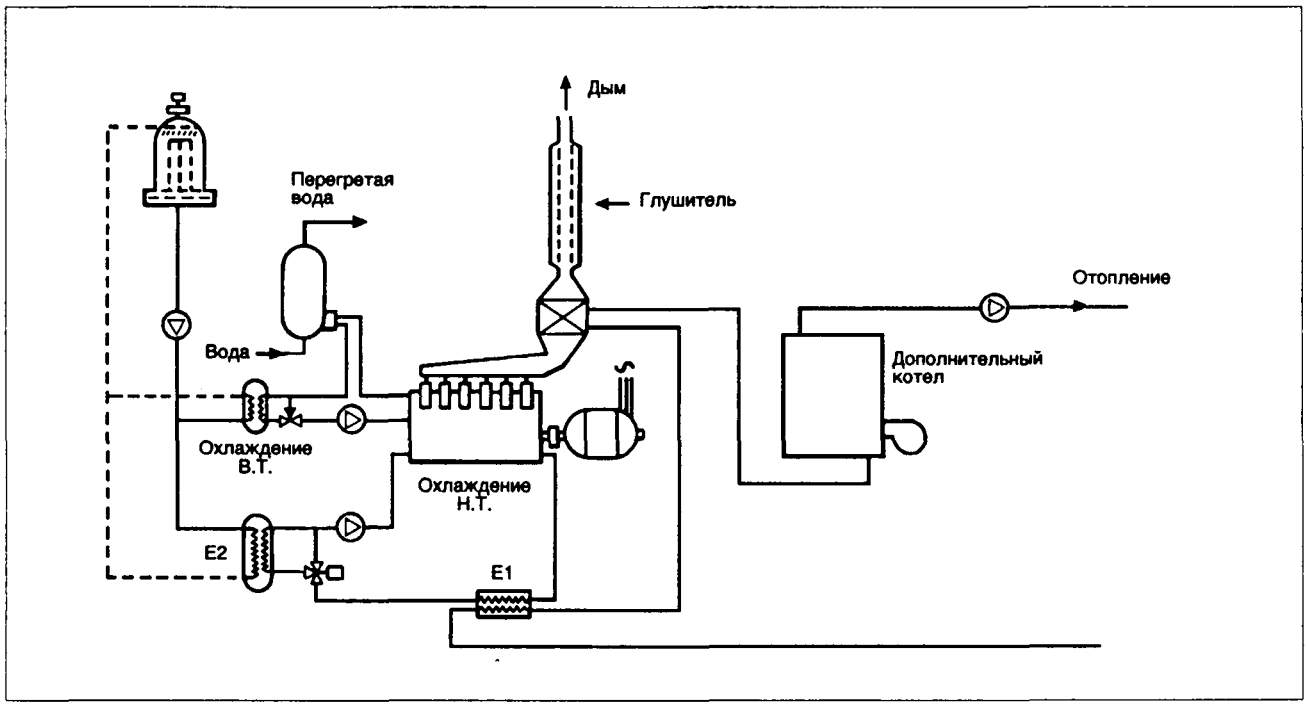
— необходимость источника холода;

— производство тепла низкого уровня, порядка 50 - 60°C;

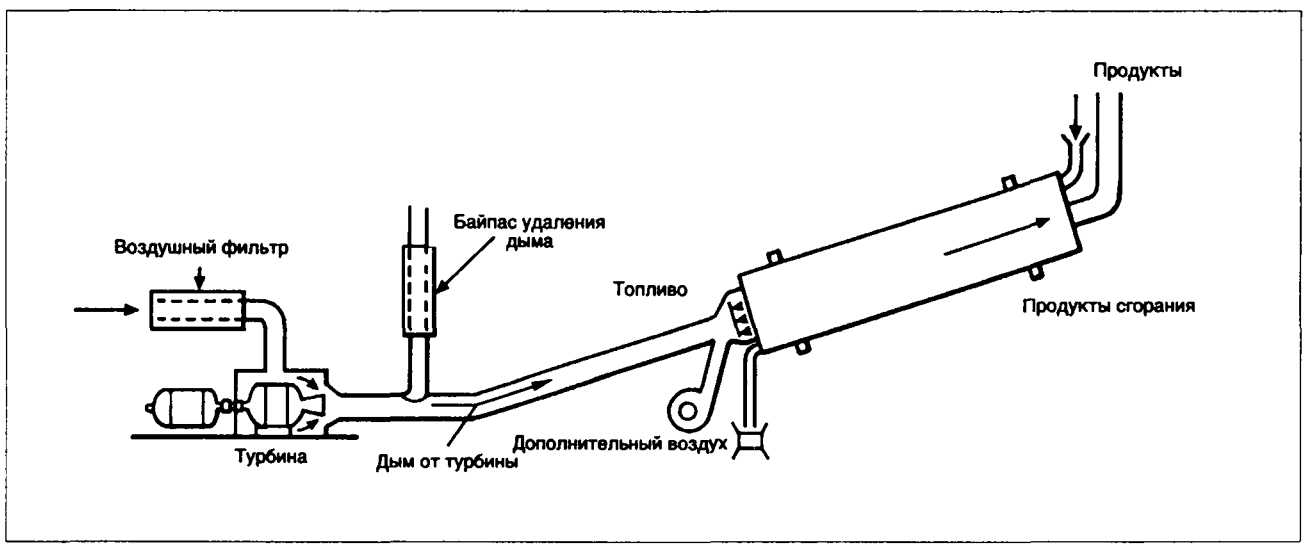
— стоимость установки немного выше.



Производство силового тепла. Паровой котел с пароперегревателем + турбина с противодавлением.

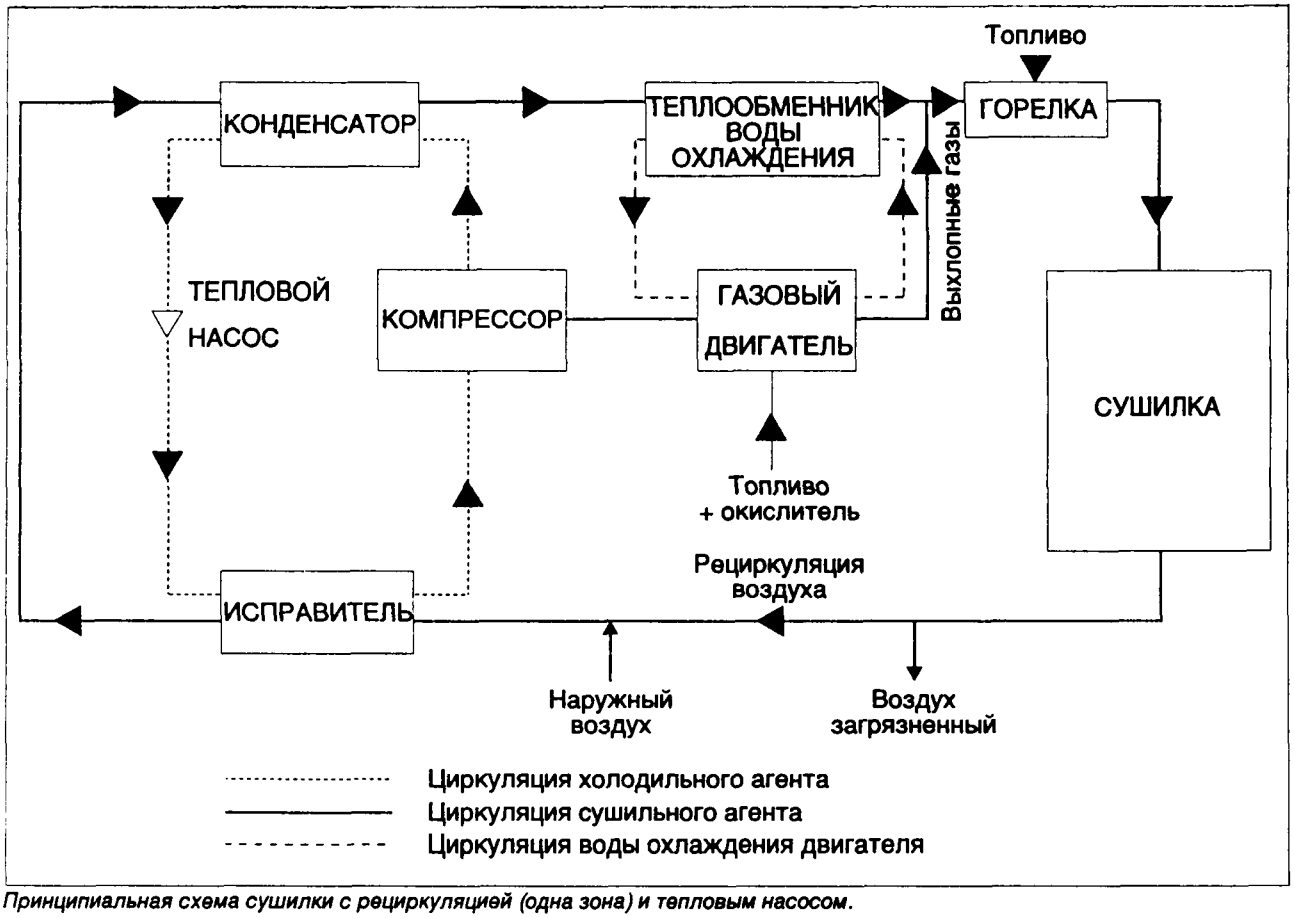


Двигатель внутреннего сгорания. Рекуперация в форме горячей воды при t = 80 -105 °C7

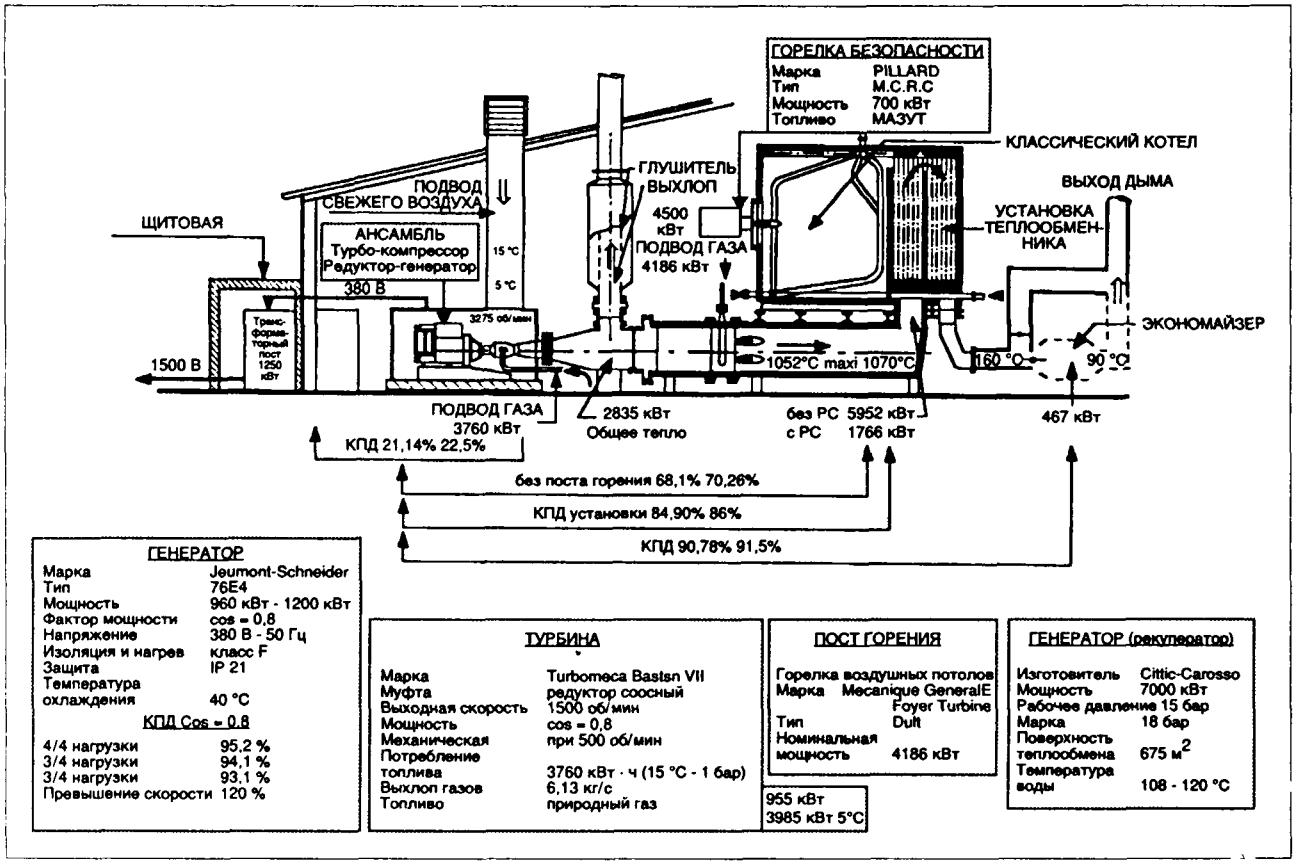


Использование газовой турбины для прямой сушки.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА



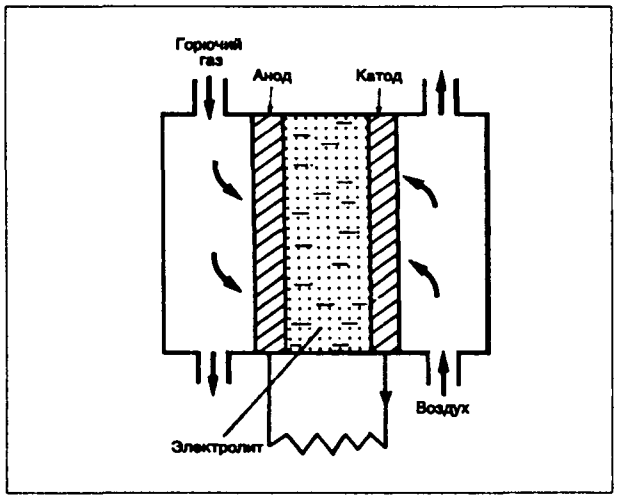
Принципиальная схема сушилки с рециркуляцией (одна зона) и тепловым насосом.



Комбинированная электроцентраль C.E.A. Le Ripault (документы C.E.A.).

8.5.5.10. Топливные элементы

Принцип топливного элемента состоит в прямой конверсии химической энергии в энергию электрическую, используя принцип Карно, который позволяет достичь повышенного КПД конверсии (0,8).

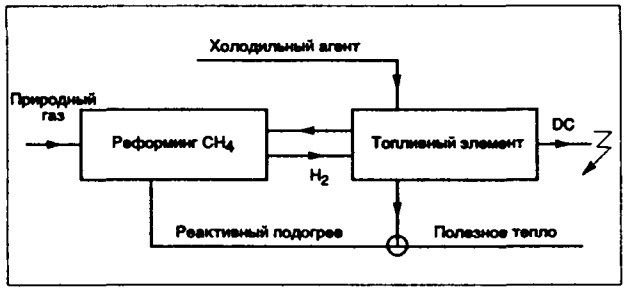


Принципиальная схема топливного элемента.

Могут быть использованы несколько видов топлива, наиболее простой – водород. Чтобы использовать природный газ, нужно:

— либо создать прямой контакт природного газа и анода, передняя часть которого должна быть из платины: созданная таким образом батарея может работать при низкой температуре (менее 150°C); средняя теоретическая массовая мощность будет порядка 100 - 600 Вт/м^2 при 0,4 - 0,5 вольт;

— либо использовать природный газ для производства водорода.



Топливный элемент для производства H_2 путем реформинга CH_4.

В качестве примера использования тепловых элементов можно отметить:

— космическую область (Apollo, Gemini), Токио батареи H_2/O_2;

— две электроцентрали 4,8 МВт (Нью-Йорк и Токио);

— несколько установок промышленного применения в Канаде и Англии.

8.5.5.10.1. Список литературы

— B.S. Baker. – Hydrocarbon Fuel Cell Technology. Academic Press. New York (1965).

— W. Mitchell. – Fuel Cells. Academic Press. New York (1963).

— C.A. Roberts. – 40 kW on site Fuel Cell Power POlant becomes a reality; National Fuel Cell Seminar. Newport Beach, Californie (novembre 1982).

8.5.6. Тепловые газовые насосы

8.5.6.1. Определение

Тепловой насос – это машина, которая с помощью потребления энергии высокого качества (механическая, термическая высокой температуры, электрическая и т.д.) может:

— поднять температуру горячей среды (источник горячий);

— понизить температуру холодной среды (источник холодный).

Если

W – потребляемая энергия;

Q_c – количество тепла, подаваемое к горячему источнику;

Q_f – количество тепла, забранное в холодном источнике.

Имеет равенство:

$$Q_c = W + Q_f.$$

Количество энергии, воспринятое горячим источником, больше того, которое израсходовано. Некоторое количество тепла передано с увеличением от холодного источника к горячему.

8.5.6.2. Концепция

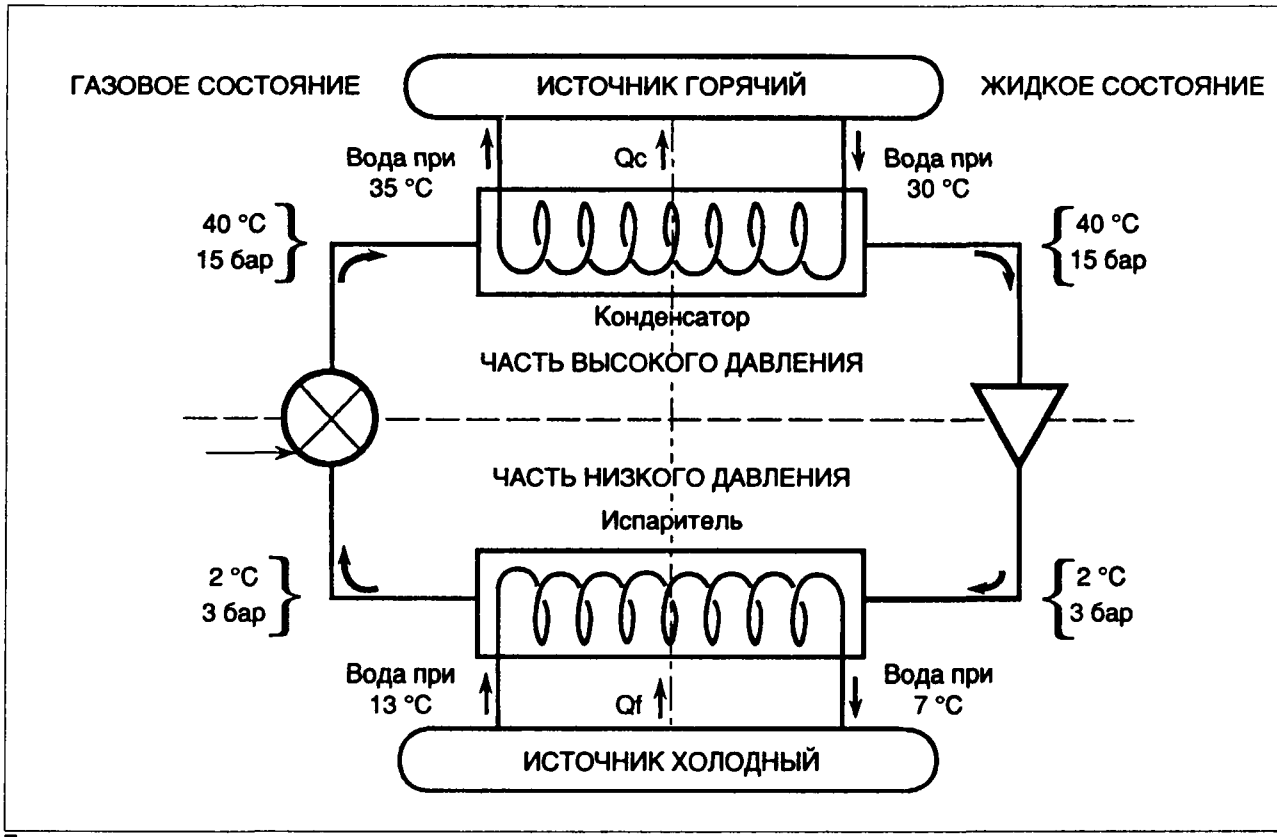
Тепловые насосы, применяемые при отоплении жилых домов, помещений ремесленников и промышленных значений, работают в соответствии с циклом (рисунок с. 807), проходя с жидкостью последовательно следующие этапы:

— сжатие в газообразном состоянии (увеличение температуры и давления), требующее подачи энергии W;

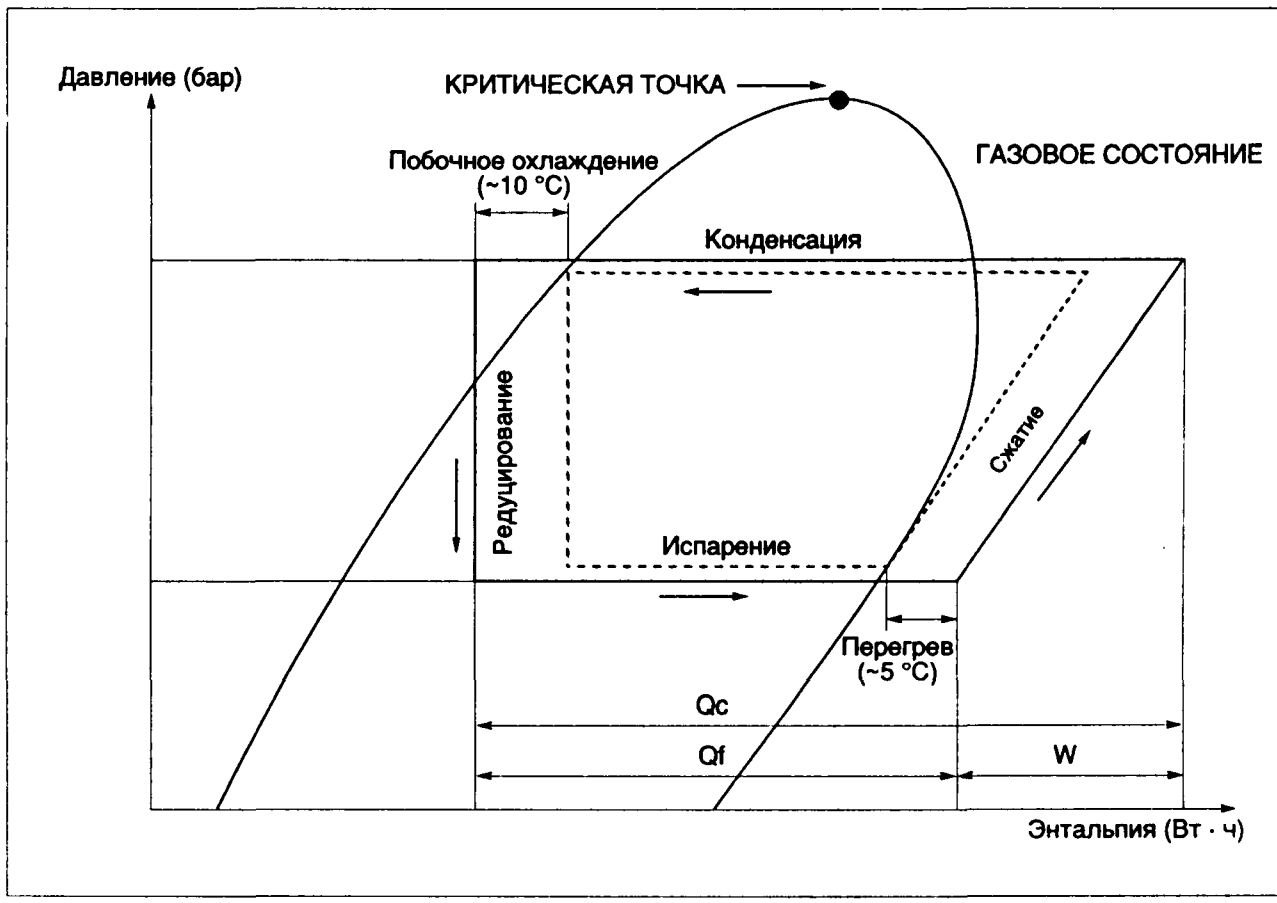
— конденсация (переход из газового состояния в жидкое при постоянном давлении) с потерей скрытой теплоты конденсации Q_c;

— редуцирование без совершения работы в жидком состоянии (низкое давление и температура);

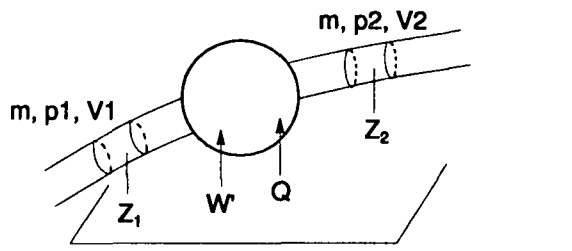
— испарение (переход из жидкого состояния в газообразное с постоянным давлением) с отбором тепла в количестве Q_f.



Принцип теплового насоса.



Рабочий цикл теплового насоса.



$W' + Q = H_2 + H_1 + (Wcin)_2 \cdot (Wcin)_1 + mg(Z_2 - Z_1)$

Если силы тяжести и кинетическая энергия незначительные:

$H_2 \cdot H_1 = W' + Q$

Выражение первого начала термодинамики для открытой системы.

8.5.6.3. Графическое представление цикла теплового насоса

Представление цикла теплового насоса наиболее часто производится на диаграмме давление (абсолютное) – энтальпия, где нужные величины W, Q_c и Q_f можно определить непосредственно.

Напомним, что энтальпия – это функция, служащая для выражения первого начала термодинамики в открытом цикле.

8.5.6.4. Основные соотношения

Исходя из:

Q_c – тепло, подаваемое горячему источнику;

Q_f – тепло, отобранное в холодном источнике;

W – потребление механической энергии, определяют с целью выражения энергетического совершенства теплового насоса следующие отношения COP (коэффициент совершенства):

$COP_{тепл} = \frac{Q_c}{W}$, если это тепло выделено используемым конденсатором. Машина называется тепловым насосом.

$COP_{хол} = \frac{Q_f}{W}$, если это тепло забрано используемым испарителем. Машина называется холодильником.

$COP_{(тепл + хол)} = \frac{Q_c + Q_f}{W}$, если используются два источника. Машина называется теплохолодильным насосом.

Коэффициент $COP_{тепл}$ иногда называется COA (коэффициент усиления). Эти величины имеют максимальную теоретическую величину, которая зависит от абсолютной температуры T_c и T_f горячего и холодного источников.

Например, максимальная теоретическая величина $COP_{тепл}$ имеет индекс "*th*" – теоретическая и "*p*" – практическая.

$$(COP_{th})_{тепл} = \frac{T_c}{T_c - T_f}.$$

На практике величина (COP_p) меньше (COP_{th}). Определен коэффициент K:

$$(COP_p) = K(COP_{th})$$

Величина K изменяется обычно от 0,4 до 0,7.

8.5.6.5. Производство энергии сжатия

Сжатие флюида в ходе первого этапа цикла может быть реализовано:

— механически (тепловой насос сжатия),
— химически (тепловой абсорбционный насос).

8.5.6.6. Компрессионные тепловые насосы

8.5.6.6.1. Флюиды

Флюидами, используемыми в компрессорном тепловом насосе, являются хлористые соединения фтора (фреон – это марка).

Флюиды	Конденсация			Испарение		
	Давление, бар	Температура, °C	Теплота конденсации, кДж/кг	Давление	Температура, °C	Теплота конденсации, кДж/кг
R12 (CCl2 F2)	23	80	93	3,1	0	151
	13,6	55	–	2,9	–2	–
R22 (CH CL F2)	21,7	55	147	5	0	205
	15,3	40	–	4,7	–2	

Характеристика тепловых насосов в зависимости от выбранного флюида.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА

Термические и геометрические размеры теплового насоса зависят от выбранного флюида.

Например, флюид R12 по сравнению с R22 позволяет получить более высокую температуру в конденсаторе, но машина будет при равной мощности больше по размеру, т.к теплота конденсации и испарения R12 меньше, чем у R22.

8.5.6.6.2. Состав компрессионного теплового насоса

Поршневой или винтовой компрессор, приводимый в действие газовым двигателем с рекуперацией:

— тепла, отбираемого испарителем;

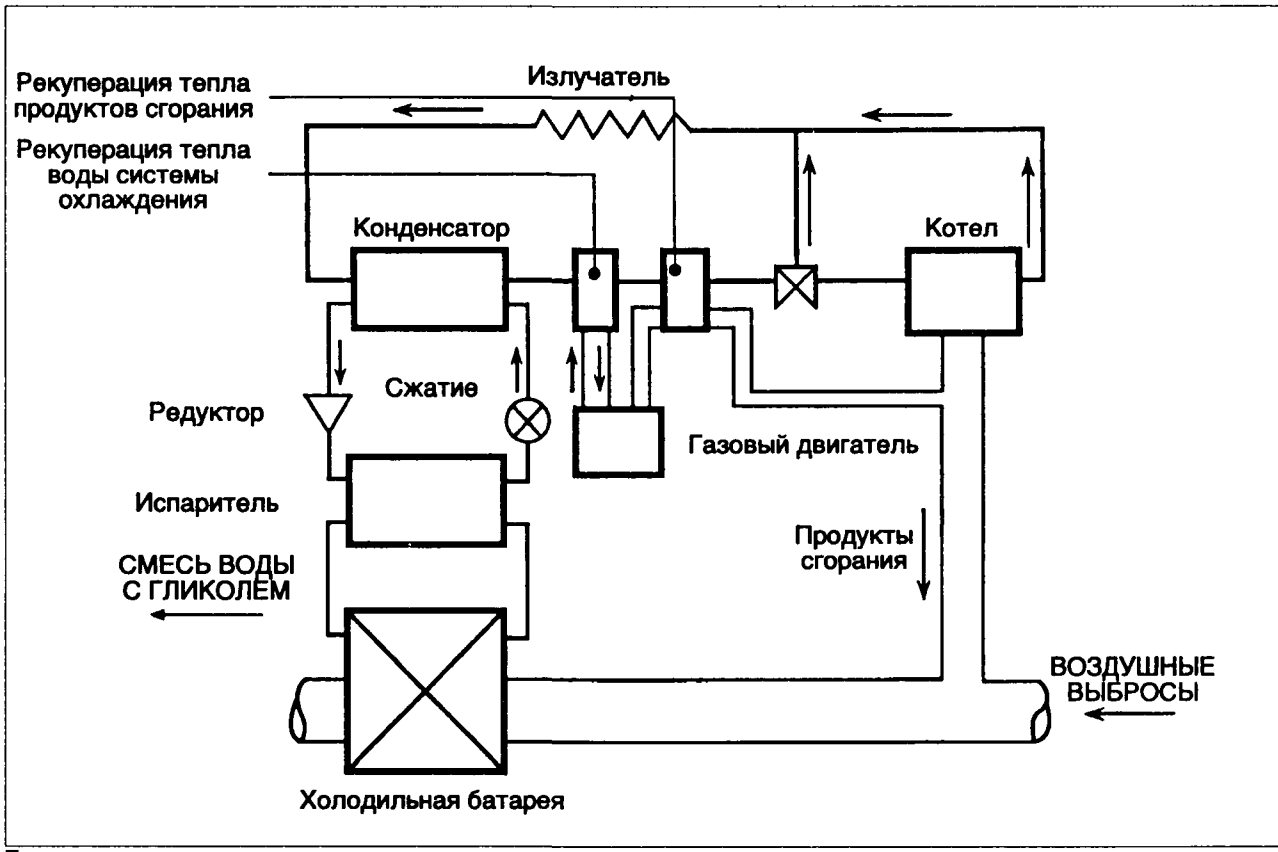
— тепла системы охлаждения двигателя;

— тепла отходящих дымовых газов.

Температура горячей жидкости выше температуры на уровне конденсатора, что позволяет, например, подавать горячую санитарную воду без использования котла, т.к. этот тип теплового насоса его полностью заменяет.

Энергетический баланс компрессионного теплового насоса часто представляется в форме диаграммы "SanKey", (с. 810) на котором представлен пример насоса автомобильного двигателя, работающего на газе.

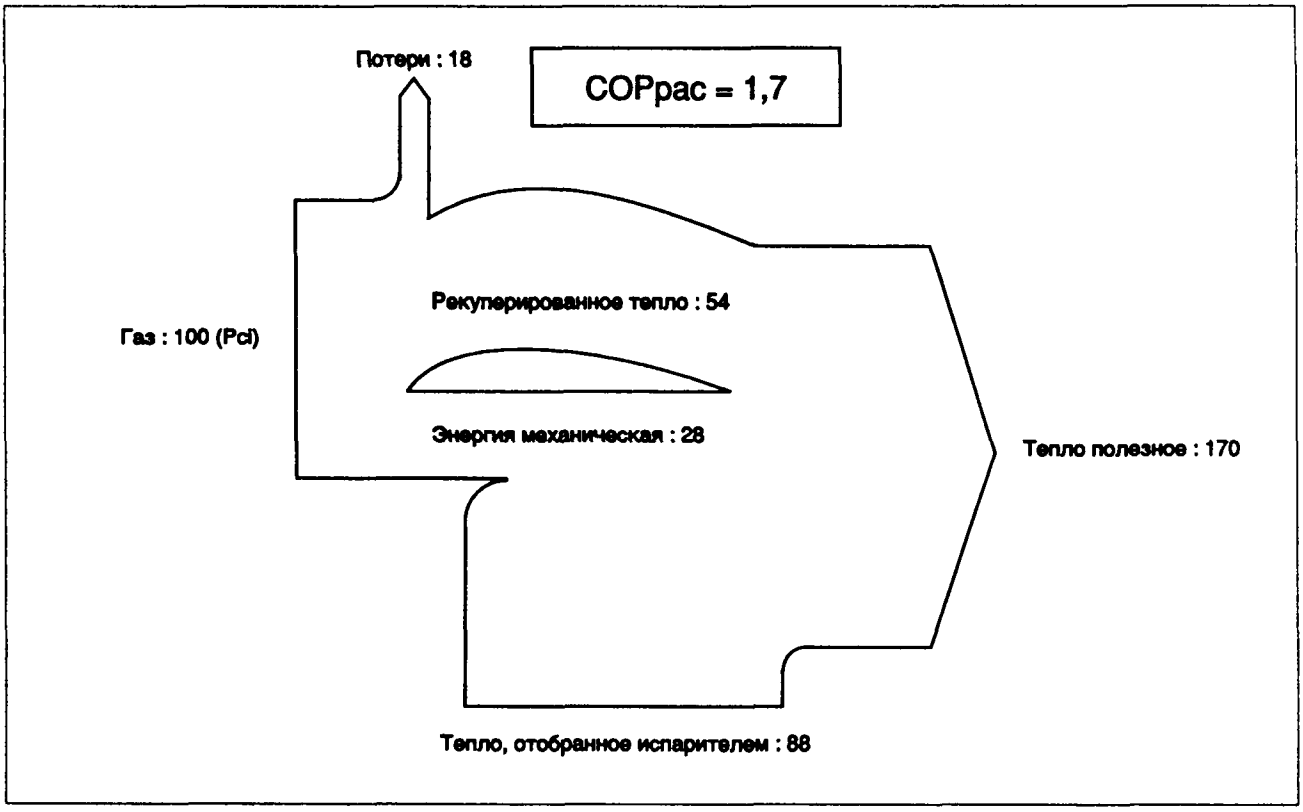
COP более высокий может быть получен с промышленным газовым двигателем, степень сжатия



Пример установки теплового насоса на газовом двигателе.

Источники	Преимущества	Недостатки
Вода	Повышенная теплоемкость (маленькие насосы)	Необходим нагрев при низкой температуре
Воздух	Температура подачи невысокая и хорошо регулируемая	Проблема акустики Стоимость подачи, плохое сжатие
Грунтовые воды t > 0°C	Температура постоянная, хорошо адаптированная	Стоимость бурения, стоимость перекачки, проблема загрязнения
Воздух наружный –7°C < t < 16°C	Простота размещения	Изменяющаяся температура и необходимость борьбы с загрязнением
Удаляемый воздух t = 19°C	Температура постоянная при установившемся режиме	Необходимость вентиляционной сети, ограниченный расход

Разнообразные приемлемые источники.



Образец применения теплового насоса с газовым двигателем.

которого порядка 12 и механический КПД выше 30%.

8.5.6.7. Абсорбционные тепловые насосы

8.5.6.7.1. Принцип "химического компрессора"

Принцип химического компрессора состоит в использовании двух жидкостей, которые:

— смешиваются при низком давлении и низкой температуре;
— разделяются нагревом при высокой температуре и высоком давлении.

Жидкость, которая движется в типовом цикле теплового насоса, называется абсорбированной жидкостью, которая позволяет предыдущей двигаться, называется абсорбентом (поглотителем).

Пара бромлитий – вода не может быть использована как источник холода при температуре ниже 4 - 5°C (либо температуре немного выше 0°C в испарителе, случай зимнего обогрева) и пара–вода аммиак не может быть использована внутри жилых помещений (токсичность и повышенное давление).

В настоящее время ищут новые пары, например хлористый фтор как абсорбированная жидкость.

Изображение работы абсорбционного теплового насоса обычно производится на диаграмме Oldham (давление, температура) (рисунок с. 811).

8.5.6.7.2. Совершенствование и эволюция абсорбционных тепловых насосов

COP абсорбционного теплового насоса, приведенного на схеме (с. 811), достаточно низкий, порядка 1,2 - 1,3. Будущее, кажется, за конструированием тепловых насосов в несколько ступеней.

8.5.6.8. Использование тепловых насосов

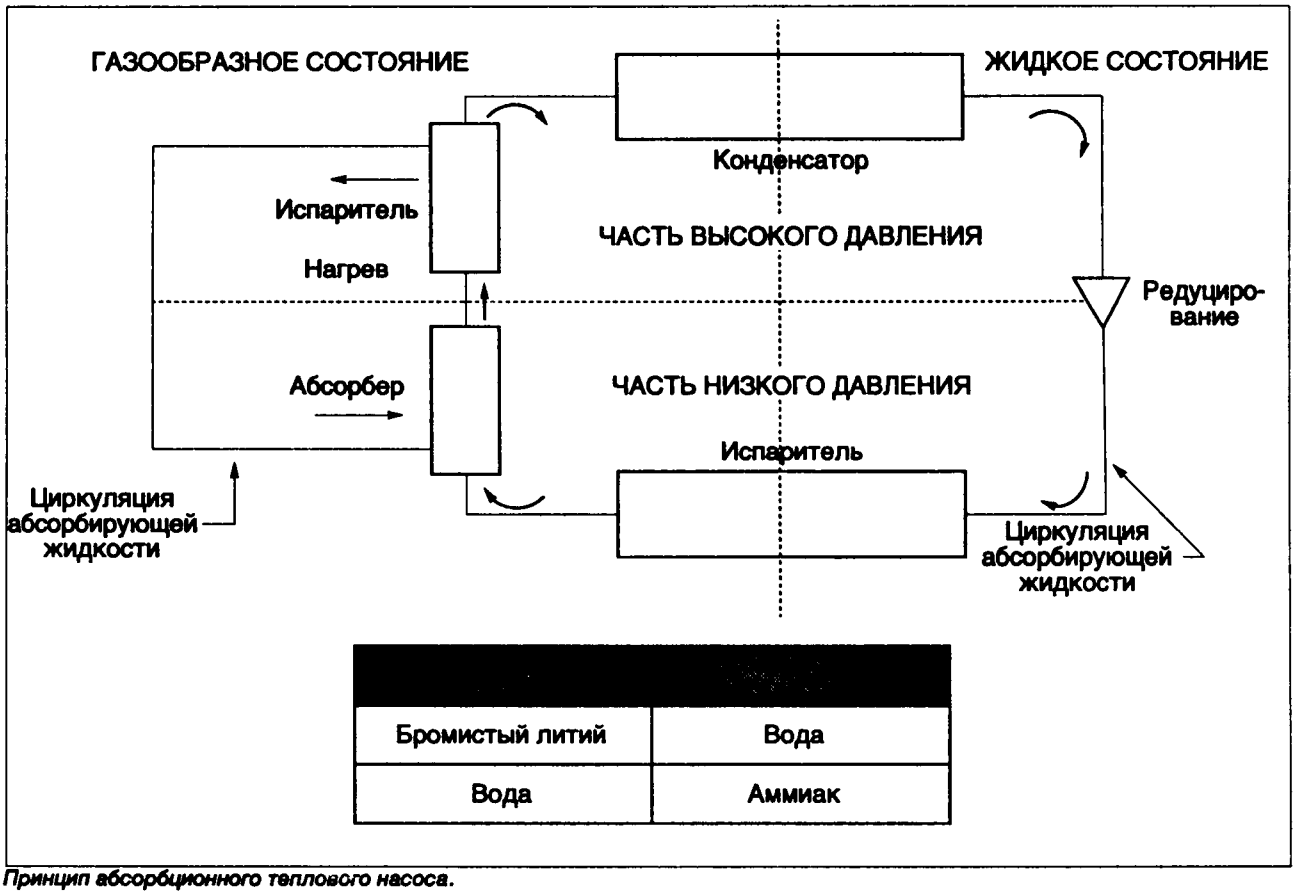
8.5.6.8.1. В области индивидуального жилья

Существуют компрессионные или абсорбционные тепловые насосы малой мощности (порядка 20 кВт). Они находятся в стадии широкого производства.

8.5.6.8.2. В области коллективного жилья и ремесла (мелкого производства)

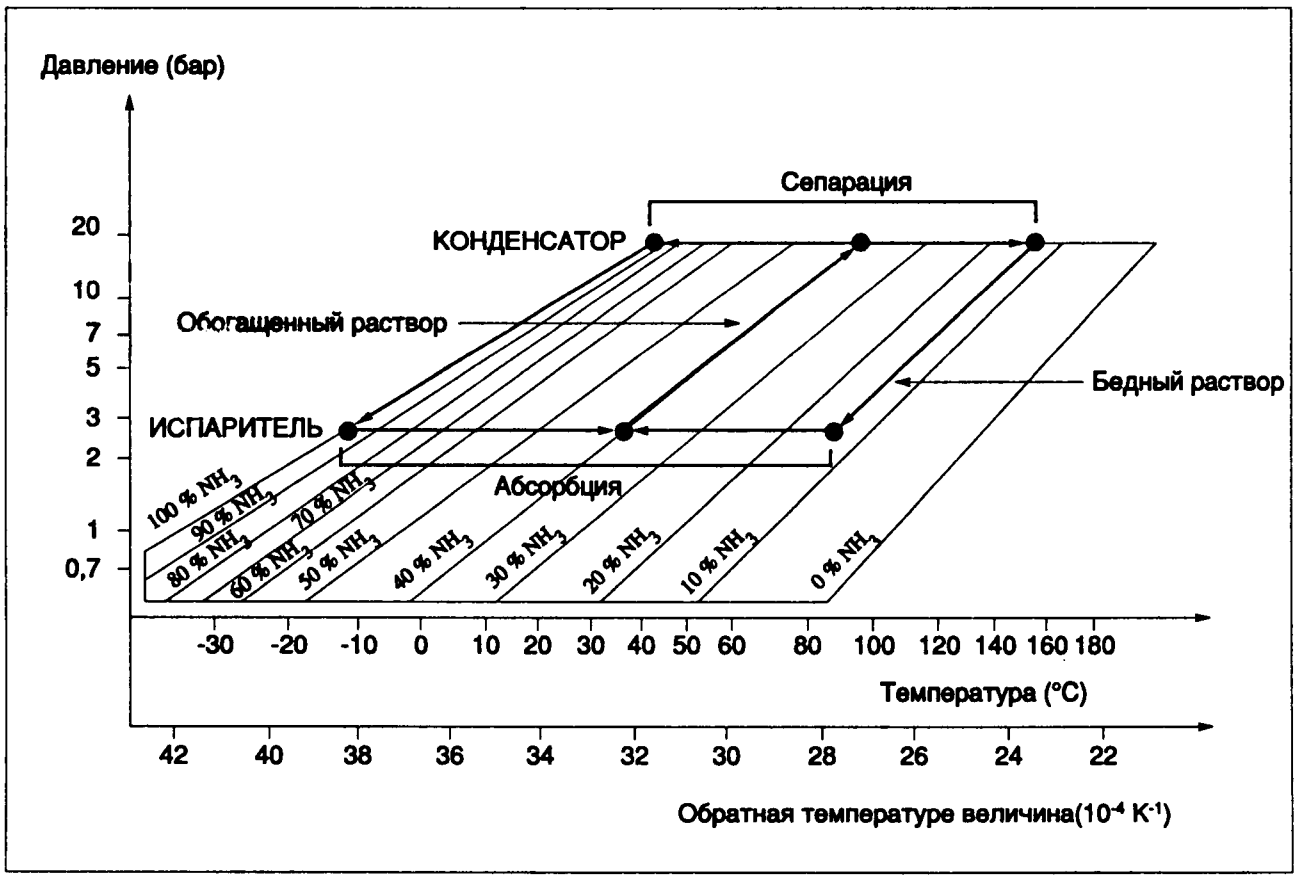
Существуют тепловые насосы, использующие автомобильные или промышленные двигатели тепловой мощностью порядка 150 кВт или больше.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА



Бромистый литий	Вода
Вода	Аммиак

Принцип абсорбционного теплового насоса.



Абсорбционный тепловой насос. Диаграмма "Oldham" для смеси воды с аммиаком.

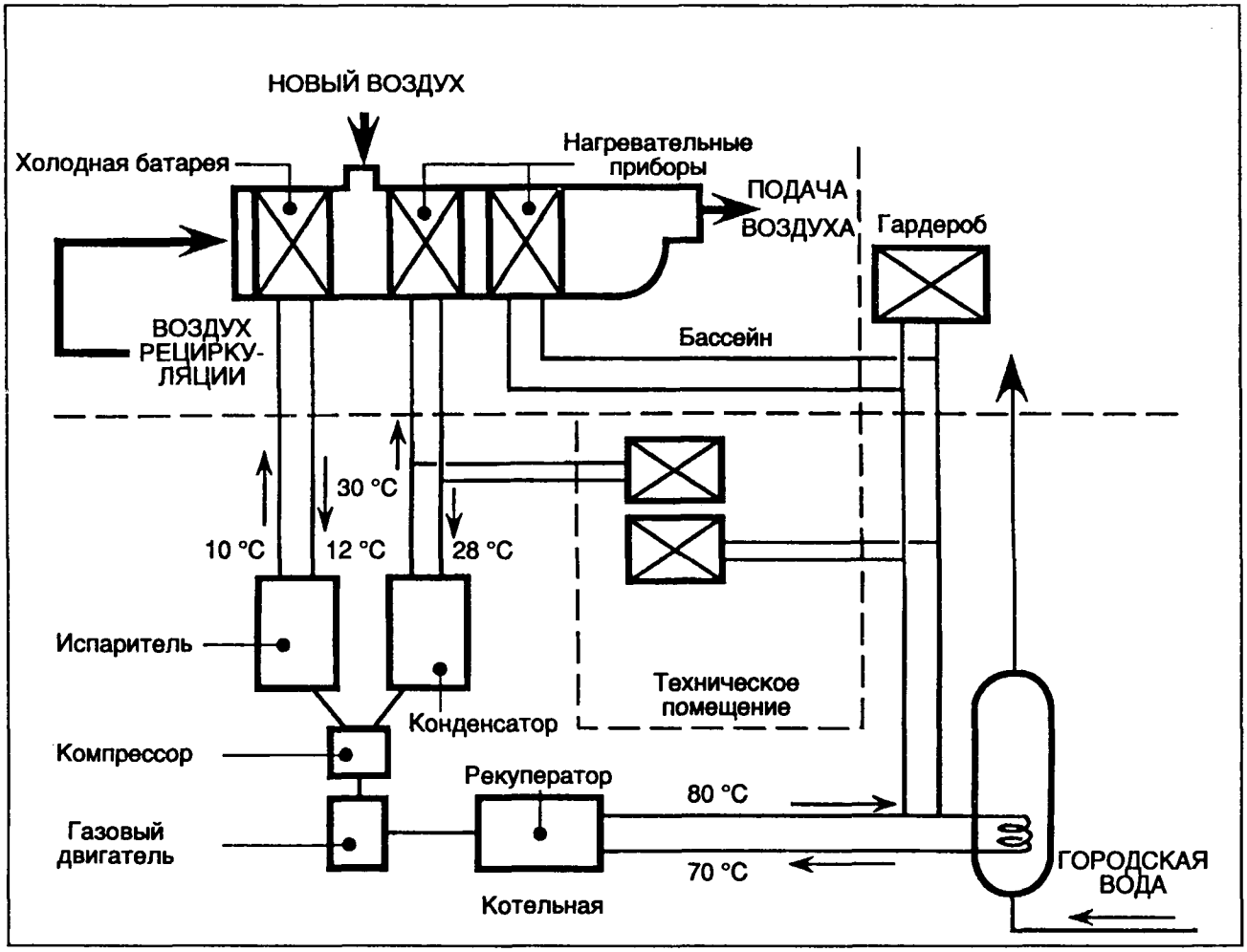


Схема установки для бассейна "Argues".

С их помощью можно производить отопление и в сфере обслуживания, осушку бассейна.

8.5.6.8.3. В промышленной области

Их область применения – снижение влажности и сушка (сушка зерна, изготовление гипсовых плиток и т.д.).

8.5.6.9. Другие тепловые насосы

Существуют другие типы тепловых насосов, использующих другие принципы (эффект "Peltier", адсорбция). Они находятся на стадии разработки, или в лучшем случае, как с насосами эффекта "Peltier", в стадии небольшого производства и научного применения, их мощность очень мала.

8.5.7. Газ – горючее

8.5.7.1. Общая часть

Термин газ – горючее обозначает автомобильное горючее, которое находится в газообразном состоянии в процессе смешения с воздухом горения. Наиболее часто используются смеси G.P.L./C (сжиженный нефтяной газ/горючее), G.N.A (природный газ автомобильный) и метан из биомассы.

Газ может с успехом использоваться как на карбюраторных двигателях, так и на дизелях. В последнем случае это наиболее распространенный метод конверсии, заключающийся в одновременном снабжении смесью газ-дизтопливо путем впрыска: воздух горения смешивается с газом перед подачей в цилиндр, и эта смесь воспламеняется путем плотного впрыска дизтоплива. Содержание дизтоплива по отношению к газу составляет 20% для G.P.L./C и 80% для G.N.A. (речь идет об энергетическом процентном содержании). В случае карбюраторных двигателей обычно достаточно добавить систему карбюрации газ–воздух и изменить начало зажигания.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА

По сравнению с жидким классическим горючим (бензин, дизтопливо) газ имеет несколько отличий:

— его газообразное состояние облегчает создание карбюрированной смеси;
— его высокое октановое число позволяет обходиться без антидетанационных добавок (октановое число G.N.A равно 130, а G.P.L./C – 100. Бензин имеет обычно октановые числа от 75 до 99).
— его чистота;
— его небольшая теплота сгорания стехиометрической смеси, по сравнению с бензином, приводит к снижению на 10 - 20% максимальной мощности по сравнению с бензином.

8.5.7.2. Адаптация бензиновых автомобилей к G.P.L./C

За некоторым исключением (учитывая недостатки седел клапанов некоторых моделей) большая часть машин, оборудованных двигателем с управляемым зажиганием, могут работать на G.P.L./C.

Монтаж включает:

— один или несколько (одинаковых) резервуаров, оборудованных:
  · отверстием заполнения (оборудованное обратным клапаном), адаптированным к подсоединению "пистолета" заполнения распределительной станции;
— специальный клапан (с обратным клапаном), укрывающий устройство прекращения заполнения на 85%, уровнемер, устройство отбора жидкой фазы (с ограничением расхода), и прежде всего отбор газовой фазы для запуска в холодную пору;
— жесткую трубу, соединяющую резервуар с моторным отсеком;
— фильтр;
— электрокран, прекращающий подачу топлива при остановке двигателя или работе на бензине;
— испаритель сжиженного газа.
  Необходимое тепло подается либо от охлаждающей жидкости, либо от теплоносителя, поступающего от теплообменника на выхлопной трубе. Практически, испаритель и редуктор соединены в одном аппарате, называемом "испаритель–регулятор". Он может быть оборудован дополнительным устройством, облегчающим запуск, осуществляющим снижение расхода, обогащающим карбюраторную смесь на высоких режимах или обеспечивающим дополнительные меры безопасности в случае нарушений на выходе;
— естройство, принимающее и дозирующее газ, чтобы подготовить необходимую газо-воздушную смесь.
  Различают два типа дозаторов в зависимости от конечного давления регулирования;
— конечное давление ниже или равно атмосферному давлению:
  · система вентури:

  карбюраторный воздух, циркулирующий в вентури создает разрежение, которое всасывается G.P.L./C. Расход газа пропорционален расходу воздуха. Винт регулировки позволяет скорректировать состав смеси. Можно использовать вентури карбюрации бензина, добавить дополнительный вентури, вставить его в воздушную сеть между воздушным фильтром и карбюратором или заменить бензиновый карбюратор на газовый (монокарбюратор);

  система с краном дозатором (управляемым, например, заслонкой) регулирующим расход G.P.L., который поступает перед заслонкой;

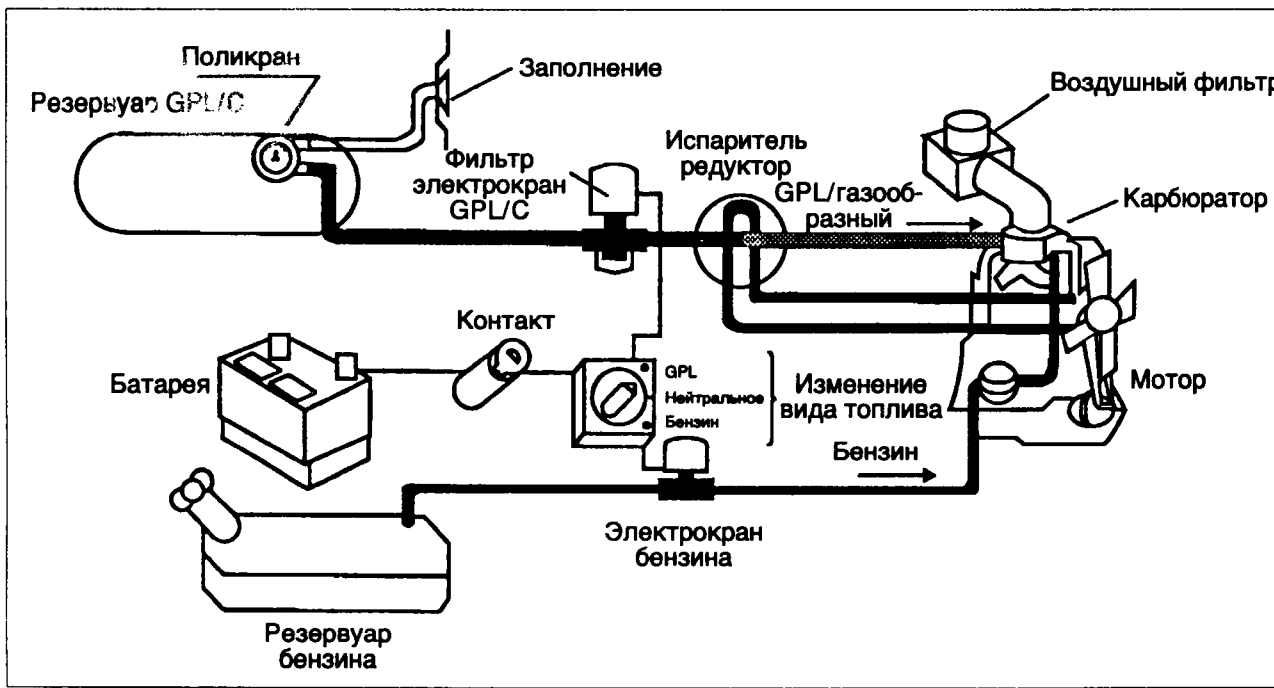


Схема установки питания двигателя от двух видов топлива.

— конечное давление регулирования выше атмосферного.

G.P.L. впрыскивается под постоянным или переменным давлением в воздушную сеть.

Система, которая может быть механической, электронной или пневматической, включает:

- один или несколько приборов детекции, которые определяют режим двигателя;
- счетчик расхода воздуха, датчик температуры воздуха, давления, скорости вращения и т.д.
- устройство связи: кулачок, электронный регулятор и т.д.
- дозатор: кран, инжектор и т.д.

Этот тип монтажа постоянно адаптирует расход инжектируемого газа и всасываемого воздуха. Необходим переключатель топлива в случае применения двух видов топлива. Он должен иметь обязательно нейтральную позицию и управлять открытием электрокрана в соответствии с выбранным топливом.

8.5.7.3. Производство и использование G.N.A.

Давление в резервуарах автомобилей, использующих в качестве топлива G.N.A., находится в интервале от 100 до 200 бар. Под этим давлением надо иметь четыре-пять литров природного газа, чтобы он был эквивалентен одному литру бензина.

8.5.7.3.1. Станции распределения

Автомобили могут быть заправлены прямо с помощью компрессора, но для этого необходимо затратить на автомобиль несколько часов. Эта система представляет интерес в том случае, если автомобиль не движется в течение нескольких часов, например ночью.

Если требуется заполнить автомобиль так же быстро как бензином, необходимо иметь промежуточные резервуары, заполненные под давлением в 250 - 300 бар.

Компрессорные станции обычно расположены на газовых сетях с давлением до 10 бар.

Некоторые распределительные станции, которые очень далеко от сети, снабжаются автомобильными платформами с баллонами G.N.A. под давлением в 250 - 300 бар.

Обычно, используют классические двух- и трехступенчатые компрессоры. На некоторых станциях в газ вспрыскивается метанол для предотвращения гидратообразования.

8.5.7.3.2. Адаптация автомобилей

Часто бензиновые автомобили переводятся на снабжение смесью природный газ–бензин (с. 815). Переход с одного горючего на другое производится без остановки движения с помощью переключателя, расположенного на щите автомобиля. Дизельные автомобили обычно переводятся на смешанное снабжение G.N.A.–дизтопливо.

8.5.7.3.2.1. Баки горючего

Внутри автомобиля G.N.A. хранится в стальных или усиленных композитными материалами алюминиевых баллонах. Его объем изменяется от 50 до 100 литров. Он обычно располагаются в шкафу в багаже, если речь идет о грузовике, сбоку, если речь идет об автобусе и за кабиной водителя, если речь идет о фургоне и тяжеловесном грузовике. Обычный автомобиль может принять от одного до трех баллонов емкостью 50 литров, в то время, как большегрузный автомобиль может принять до десяти больших баллонов. Баллоны оборудуются устройствами безопасности, позволяющими сбросить газ в атмосферу при чрезвычайном повышении давления или аномальном повышении температуры.

8.5.7.3.2.2. Система снабжения

Трубопроводы снабжения, выполненные из стали и рассчитанные на высокое давление, соединяют резервуары и регуляторы давления. Они не должны проникать в отделения автомобиля, предназначенные для пассажиров.

Регулятор давления передает газ в смеситель газ–воздух после снижения давления до величины использования. Используют обычно регуляторы в две - три степени. Чтобы избежать обледенения системы, регулятор обогревается водой от системы охлаждения двигателя.

Расположенный за регулятором смеситель готовит смесь воздух–газ и с точностью регулирует снабжение карбюратора.

8.5.7.3.2.3. Прочее оборудование

Может быть установлено электронное устройство с целью опережения зажигания, когда используется природный газ.

Прочие элементы безопасности (краны) или контроля (измерители) дополняют оборудование.

8.5.8. Использование газа в химической промышленности

8.5.8.1. Общая часть

Химическая промышленность потребляет искусственный и природный газ не только как источник энергии, но, главным образом, как сырье.

Искусственный газ, главным образом, коксовый газ, это смесь водорода, окиси углерода, двуокиси углерода, метана и азота. Химическая промышленность его перерабатывает с целью получения синтетического газа.

Под словом синтетический газ понимают водород и различные смеси водорода и азота, водород и окись углерода, служащие для синтеза аммиака, метанола, спирт.

Природный газ, состоящий, в основном, из метана, используется как сырье для производства син-

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА

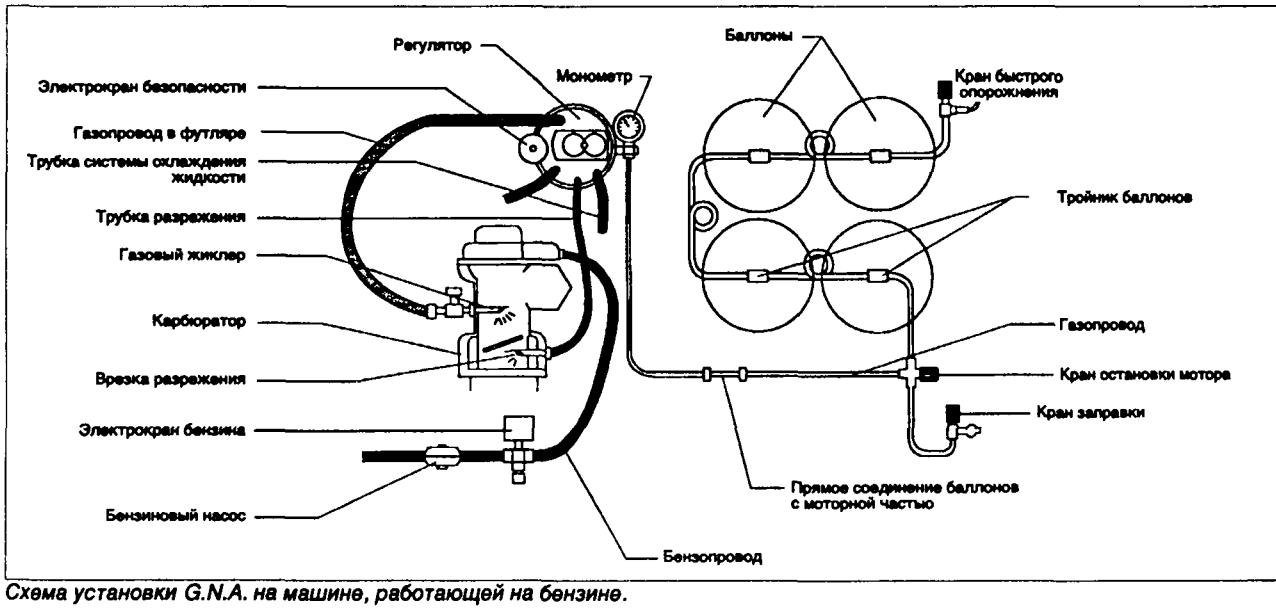
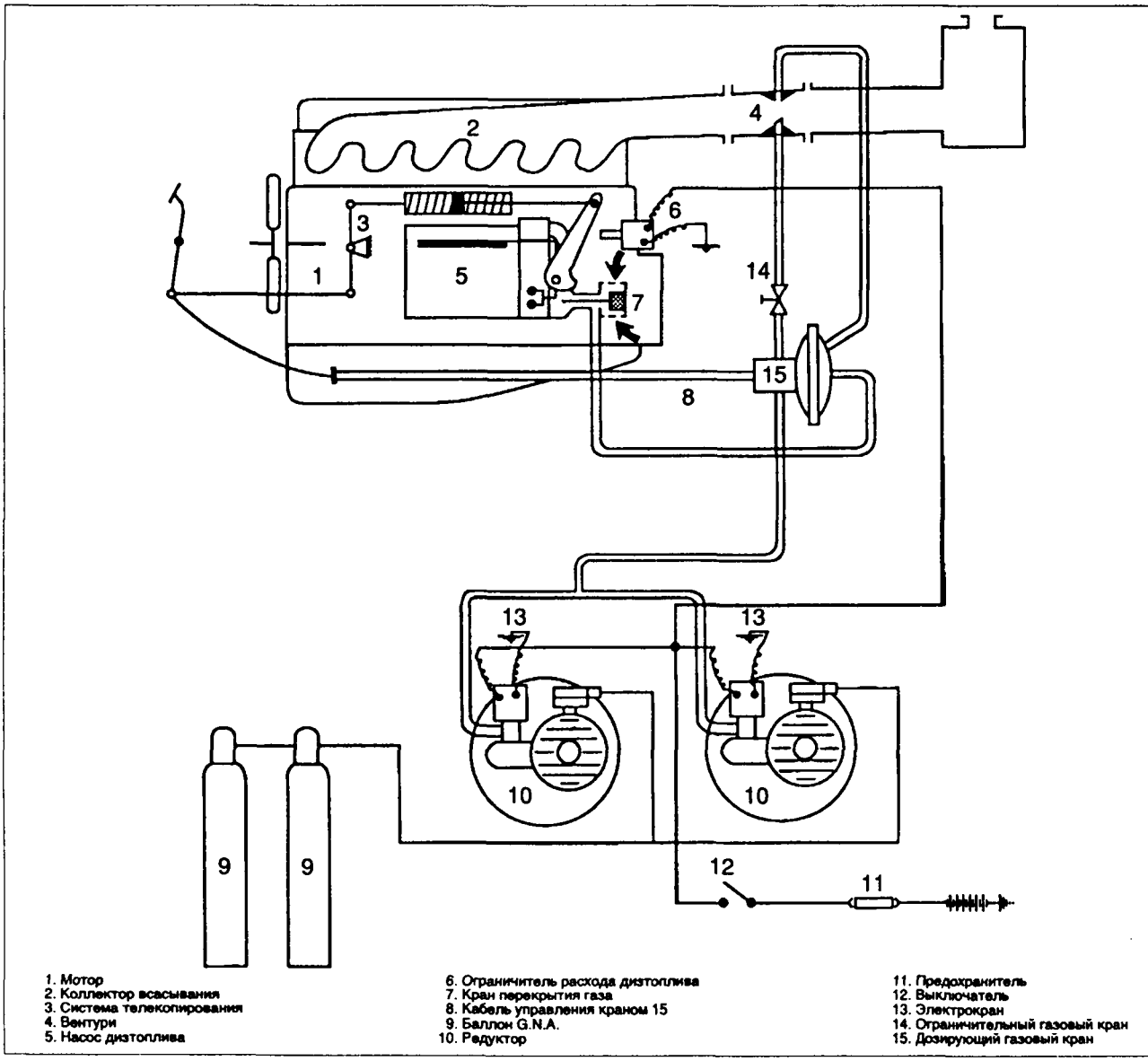


Схема установки G.N.A. на машине, работающей на бензине.



1. Мотор
2. Коллектор всасывания
3. Система телекопирования
4. Вентури
5. Насос дизтоплива
6. Ограничитель расхода дизтоплива
7. Кран перекрытия газа
8. Кабель управления краном 15
9. Баллон G.N.A.
10. Редуктор
11. Предохранитель
12. Выключатель
13. Электрокран
14. Ограничительный газовый кран
15. Дозирующий газовый кран

Схема смешанного снабжения дизтоплива–G.N.A., установленная на дизельном двигателе.

тетического газа (газа синтеза), либо как метан - реактивов в химических реакциях.

Примерно 95% метана сырья, используется в производстве газа синтеза.

Другие углеводороды в газообразном состоянии при нормальном давлении и температуре, отобранные из природного газа, также используются как сырье.

Этан крекингом переводится в этилен, пропан – в этилен и пропилен, сырье для получения пластмассы (полиэтилен, полипропилен, хлористые соединения, ацетат винила) и акролеин, глицерин и акрилик нитрила (синтетическое волокно и пластмасса).

Изобутан за счет крекинга переводится в изобутелен, сырье для изопрена и бутилового каучука мало проницаемого для газа.

8.5.8.2. Производство газа синтеза

8.5.8.2.1. Реакции и анализ производимых газов

Превращение метана реформингом в водяные пары – реакция эндотермическая:

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 - 206{,}8 \text{ кДж/моль} \quad (1)$$

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 4H_2 - 166{,}3 \text{ кДж/моль} \quad (2)$$

Реакции (1) и (2) сильно эндотермические и убыстряются при повышении температуры.

Эндотермические реакции часто сопровождаются частичным экзотермическим горением.

$$CH_4 + 1/2\ O_2 \rightarrow CO + 2H_2 + 35{,}7 \text{ кДж/моль} \quad (3)$$

Эти каталитические реакции реализуются в установках, работающих постоянно.

В соответствии с видом синтез газа, который хотят получить, окись углерода может быть подвержена частичному или полному каталитическому при 300 - 400°C.

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 + 40{,}5 \text{ кДж/моль}$$

Двуокись углерода затем удаляется с помощью промывки водой под давлением или различными растворителями.

8.5.8.2.2. Водород

Газ конверсии в водяном паре, после конверсии CO, производит качественный водород после удаления последних следов CO путем каталитического метанирования при (1) t = 200 - 250°C. Этот водород используется так же часто в химических реакциях, как в нефтепереработке, так и нефтехимии.

8.5.8.3. Использование газа синтеза в химии

8.5.8.3.1. Синтез аммиака

$$N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3 - 91{,}40 \text{ кДж/моль}$$

Газ синтеза должен содержать один объем азота на три объема водорода.

Азот N_2 производится дистилляцией воздуха.

Остаточный кислород используется для конверсии метана или для окисления аммиака в азотную кислоту.

Водород H_2 образуется:

— либо конверсией природного газа (§ 8.5.8.2.1.)
— либо фракционированием при низкой температуре коксового газа или конверсией воздухом (§ 8.5.8.2.1., уравнение 3). В последнем случае получают прямо смесь $3H_2 + N_2$. Синтез аммиака осуществляется под давлением 200 - 600 бар. Современные установки производят 1000 т/день и более в одном каталитическом реакторе.

Аммиак используется особенно часто в качестве удобрения, либо как таковой, либо в виде сульфатов, фосфатов, нитратов или мочевины; он служит для изготовления взрывчатых веществ и в органической химии.

8.5.8.3.2. Синтез метанола

$$CO + 2H_2 \rightleftharpoons CH_3OH + 90{,}7 \text{ кДж/моль}$$

Формирование метанола термодинамически убыстряется понижением температуры и повышением давления; чтобы реакция приближалась к равновесию в приемлемых условиях давления и температуры, необходимо присутствие катализатора. Используют газ синтеза (CO/H_2 = 0,5), ранее получавшийся из водяного газа, в настоящее время получаемый из коксохимического газа, природного газа или газа реформинга углеводородов или

Типы	(1)	(2)		(3)
Средний состав	Крекинг в паре	Постоянный процесс с продувкой		Газ коксовый (коксохимич.)
		кислородный	воздушный	
Оксид углерода	10 - 11	30	15	4,5
Водород	70 - 75	65	43	50 - 60
Метан	1,5 - 8	0,8	4	25 - 30
Диоксид углерода	8 - 19	1,4	4	5 - 1,8
Кислород	–	–	–	0,2
Азот	Следы	2,8	34	2 - 6

Типовой состав газа (в объемных %), полученного из сухого газа.

в некоторых случаях из остаточного газа производства ацетилена. Если необходимо, газы обогащаются водородом путем конверсии окиси углерода, для того, чтобы получить обогащенную пропорцию. Синтез метанола осуществляется под давлением от 20 до 30 бар.

Современная тенденция состоит в увеличении производительности установок до 1000 т в день, работающих при относительно небольшом давлении, низкой температуре в присутствии медных катализаторов.

8.5.8.3.3. Синтез "ОХО" (оксосинтез)

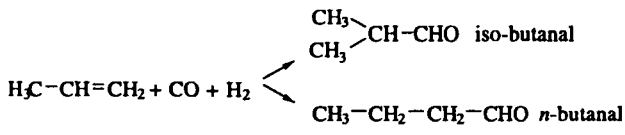
Реакция называется оксо- или гидроформирование, т.е. при соединении оксида углерода к водороду в этиленовую группу с получением альдегида.

В качестве катализатора реакции используется карбонил кобальта.

Эта реакция позволяет получить из олефинов с *n* атомами углерода альдегид с *n* + I.

Эта реакция, в основном, применяется к пропилену.

В обычных условиях реакции (200°C и 300 бар) получают три части *n*-бутанала, для одной части изобутанала.



Газ синтеза должен содержать H_2 и CO в равных пропорциях. Обычно альдегиды затем трансформируются в соответствующие спирты путем гидрогенизации.

n-бутанал – это либо гидрогенизированный *n*- бутанол, либо бутиловый спирт (I), либо конвертируемый в этил – 2 гексанол, либо октиловый спирт (II).

$$CH_3-(CH_2)_2-CH_2OH \qquad (I)$$

$$CH_3-(CH_2)_3-\underset{\displaystyle C_2H_5}{CH}-CH_2OH \qquad (II)$$

Бутанол и этилгексанол являются важным сырьем для производства пластификаторов для виниловой резины, в особенности для производства виниловой пластмассы.

8.5.8.3.4. Уксусная кислота

Новый процесс производства уксусной кислоты появился в последние годы в результате работ Socéité Monsanto. Речь идет о карбонизации метанола в соответствии с реакцией.

$$CH_3OH + CO \rightarrow CH_3COOH$$

Этот новый процесс заменяет старый, основанный на получении этилена аксетал гидрида (способ "ОХО") и оксидитации альдегида в кислоту.

8.5.8.4. Химическое использование метана

Метан – это наиболее простой углеводород вступает в реакцию только при сверхвысоких давлениях и температурах. Большая часть этих производных – простые структуры. Отметим только их промышленное использование. Более подробная информация приводится в таблице с.818.

8.5.8.4.1. Производство ацетилена

Основанные на работах Berthelot (1860) – это производство, вначале осуществляемое на основе карбида кальция, затем стало производится на основе метана и нефтяных углеводородов.

Базовая реакция

$$2CH_4 + 399{,}6\ кДж/моль \rightarrow C_2H_2 + 3H_2$$

требует подвода энергии.

Напротив, для большинства углеводородов энергия формирования ацетилена уменьшается с увеличением температуры. При температуре 1600 K ацетилен более стабилен, чем другие углеводороды, но менее, чем элементы углерод и водород.

На практике очень быстрый нагрев метана с целью предотвращения реакции разложения на углерод и водород осуществляется с помощью электродуги или смещением с горючими газами (важность горелок).

Время реакции – тысячная доля секунды. Существует несколько процессов:

— процесс B.A.S.F., используемый Aquitaine Chimie в Pardies из газа Lacq (1960);
— процесс Бельгийской азотной кампании (специальные чертежи горелок полного и предварительного сжигания);
— процесс Montecatini (6 бар) и японский процесс с пониженным давлением. Остаточный газ служит для синтеза аммиака и метанола.

Значительное развитие в последние двадцать лет нефтехимического парового крекирования нанесло фатальный удар по химии ацетилена, который в настоящее время исчез почти повсеместно.

8.5.8.4.2. Сероуглерод

Принцип получения из метана:

$$CH_4 + 4S = CS_2 + 2H_2S \text{ (пар)}$$

Даже небольшое содержание углеводородов более тяжелых, чем метан, создает недопустимые сернистые соединения, которые провоцируют твердые скопления на теплообменниках установки.

Эндотермическая реакция реализуется при температуре 650°C на катализаторах.

Сероуглерод – хороший промышленный растворитель. Он является реактивом растворения целлюлозы до состояния, необходимого при производстве вискозы (нити и полотна). Он используется также для получения четыреххлористого углерода.

Прямая продукция	Первичная производная продукция	Конечный продукт и использование
$3H_2 + N_2$ Аммиак		— удобрения — химическая и фармацевтическая продукция
	Мочевина	— удобрения — пища для скота — пластмасса (уре-формалин)
	Азотная кислота	— химическая и фармацевтическая продукция — пища для скота — красящие материалы — порох и взрывчатые вещества — пропергол
	Цианистоводородная кислота (реакция с метаном)	— эфиры метакрилика — прозрачные пластмассы — оптическая промышленность
	Нитрил акрилик (реакция с пропиленом)	— полиакрилат: волокно, краска, лаки — каучук нитрил: спецприменение — сельское хозяйство: стабилизация почв
	Гидроксиламин (частичное окисление)	— полиамиды: волокно, пластмассы
	Гидрозин (частичное окисление)	— фармацевтическая продукция — пропергол
$2H_2 + CO$ Метанол		— промышленные растворители — моторное, специальное топливо — противообледенитель — М. Т. В. Е. добавка к моторному топливу (метилтертибутилятор)
	Формол	— фармацевтия — взрывчатые вещества — пластмасса пенопласт учеформол — клей специальный — изоляция — танин синтетический
$H_2 + CO$ Оксоспирты		— промышленные растворители; бутанол — станол, хеканол — пластификаторы
	Химические продукты метанола	
	Конверсия серой	
	Сероуглерод	— промышленные растворители, изготовление вискозы, очистка металлофлотацией
	Галогенирование	
	Хлористый метил	— анестезия, инсектицид, пожаротушение — силикаты: смазка краски, водонепроницаемость
	Хлористый метилен	— растворитель, растворитель пластмассовых клеев
	Хлороформ	— анестезия — холодильный агент
	Четыреххлористый углерод	— растворитель, очиститель, пожаротушение — фтористые производные: холодильные агенты

Конверсия метана в синтез газ. Получаемая продукция.

8.5.8.4.3. Хлористые производные от метана

Избыток метана CH_4 позволяет получить прямым хлорированием различные хлористые соединения, которые используются в промышленности, а именно:

		Точка кипения °C
$CH_4 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + HCl$	хлористый метил	−23,7
$CH_3Cl + Cl_2 \rightarrow CH_2Cl_2 + HCl$	хлористый метилен	+40,1
$CH_2Cl_2 + Cl_2 \rightarrow CHCl_3 + HCl$	хлороформ	+61,2
$CHCl_3 + Cl_2 \rightarrow CCl_4 + HCl$	четыреххлористый углерод	+76,7

Какой бы ни была реализация реакции, поток из реактора охлаждается и производные хлора конденсируются, затем фракционируется путем дистилляции. Избыток метана рециркулируются.

Фреон (CCl_3F), полученный на основе четыреххлористого углерода, используется в холодильниках. Его производство расширяется:

$$CCl_4 + HF \rightarrow CCl_3F + HCl$$

Существует целый набор таких продуктов, не токсичных и не горючих, которые являются холодильными жидкостями. Для всякого химического применения газа необходимо соблюдать часто очень жесткие спецификации.

Они содержат обычно данные о содержании сернистых компонентов, которые являются ядами для катализаторов конверсии. Каждому химическому применению соответствует особый регламент.

8.6. Нормализация и квалификация аппаратов и оборудования, использующих газ

Нормализация – это деятельность по созданию и модификации норм. Она существовала всегда. Вначале она касалась только вопросов размеров или точности. В промышленную эру она получает все большее значение и сегодня известна как компонент промышленной области. По справочнику ISO 2 (издание 1978 г.) технической нормой является: техническая спецификация или другой доступный документ, разработанный в кооперации и соглашении или с общего одобрения всех заинтересованных сторон, основанный на совместных результатах науки, технологии и практики, имеющий целью оптимальную выгоду всех заинтересованных сторон и одобренный квалифицированным органом в плане национальном, региональном или интернациональном. Нормализация объединяет последние технические достижения, полученные научными изысканиями, она позволяет осуществлять их распространение благодаря серийности, рационализации видов продуктов, уменьшению объемов хранения и уменьшению стоимости, которая с этим связана. Нормализация позволяет также избежать многочисленных расходов, способствует развитию новой техники, давая гарантию потребителю.

8.6.1. Цель нормализации

Нормализация аппаратов индивидуального использования газов имеет целью зафиксировать уровень качества и безопасности, отвечающий лучшим условиям использования этого оборудования на практике. Две цели должны быть достигнуты: одна практическая, которая касается прочности и легкости управления, внешнего вида и срока службы; вторая – более техническая, относящаяся к КПД и безопасности использования, должна давать корректное решение проблем, сопутствующих сжиганию газов, которые могут быть использованы аппаратами. Соответствующие предписания являются объектом создаваемых норм, особенно для газовых аппаратов.

Каждое из них подразделяется на четыре части:

— терминология;
— характеристика конструкций;
— характеристика работы;
— техника испытаний.

Нормализация предусматривает определенное число критериев, простых, но эффективных, которые могут быть резюмированы следующим образом.

8.6.1.1. Прочность, долговечность

Испытание надежности предусмотрено для каждого вида аппаратов. Они имеют целью убедиться, что различные элементы этих аппаратов могут работать при нагрузке, превышающей условия нормальной эксплуатации и что при продолжительной работе в этих условиях используемые материалы сохраняют свою прочность и первоначальные качества.

8.6.1.2. Функционирование, КПД

Какой бы ни был тип аппарата, КПД или удельное потребление требует постоянного внимания. В общем случае КПД был зафиксирован в разумных пределах, соответствующий компромиссу с другими условиями, прежде всего безопасности.

8.6.1.3. Безопасность

Аппарат не должен быть для абонента источником заболевания (гигиена сжигания) или опасности (все аномалии должны привести к прекращению подачи газа), не должен представлять риска для него самого (повышенная температура поверхности) и должен быть простым в обслуживании. Безопасность оценивается по следующим критериям:

— конструктивные характеристики;
— видимость пламени;
— герметичность газовых коммуникаций;
— простота в управлении и обслуживании (избегать острых частей, иметь свободный доступ к различным системам управления, регулирования и движущимся деталям);
— рабочие характеристики: гигиеническое сгорание, т.е. содержание CO достаточно низкое, устройства безопасности поддерживания пламени или защиты для некоторых типов аппаратов, точные условия удаления продуктов сгорания, точная спецификация устанавливаемых автоматических кранов, клапанов и вентилей, разумное распределение температуры.

8.6.1.4. Эффективность вспомогательного оборудования

Абонент должен быть способен получить на аппарате, находящемся в эксплуатации, примерно такие же результаты, какие и в лаборатории. Следовательно, устройства контроля расхода газа, поступления первичного воздуха, безопасности, регулирования температуры или давления и т.д. должны быть задуманы таким способом, чтобы они работали надежно и безопасно и, чтобы управление системой регулирования не требовало никаких сложных инструментов.

8.6.1.5. Адаптация к разным газам

Распределяемые в настоящее врем разнообразные га : природный газ, бутан, пропан и смесь воздуха с пропаном, заставили лаборатории G. D. E., фирмы распределяющие организации, с одной стороны, институты проектирования аппаратов, с другой стороны, изучить совместно решения, внедрение которых позволит избежать при переделке аппаратов больших расходов. Поэтому старались ограничить операции по переходу с одного газа на другой либо простым регулированием горелки, либо стандартной заменой деталей одинаковых размеров.

Чтобы убедиться, что КПД, стабильность пламени и индекс горения аппарата остались корректными, каким бы ни было использованное топливо, правила были нормализованы для определения внутри каждой группы газов эквивалентный газ и предельные газы, значительно отличающиеся от эквивалентного газа, что позволяет убедиться в ходе испытаний, что, во всех случаях использования, которое может представиться, аппарат будет работать удовлетворительно.

8.6.1.6. Пригодность к использованию

Для того чтобы аппарат получил сертификат (N.F., A.T.G.) недостаточно хорошего качества работы горелки или горелок. Поставленная цель не будет достигнута, если для каждой категории аппаратов не будут рассмотрены специфические требования.

Иначе говоря, кухонные плиты должны иметь качества, необходимые для кулинарии, как в части духовки, гриля, так и варочного стола; водоподогреватель, ванная колонка должны позволять отбирать горячую воду с разной температурой и разным режимом работы: независимые радиаторы подвергаются различным исследованиям в зависимости от того производят они тепло конвекцией или излучением и в соответствии с тем подсоединены ли они к одному дымоходу или установлены в герметичной системе с помощью специальных устройств (например воздушные клапаны) циркуляция специального герметичного устройства (вантуз, например). Эти особые спецификации составляют без всякого сомнения один из способов наиболее эффективных достижений технического

КАТЕГОРИИ АППАРАТОВ

Первая категория

Аппараты этой категории предназначены для работы на одном типе газов:

Пример: – I_2: аппараты, предназначенные для работы исключительно и неизменно на газах 2-го типа (природный газ).

– I_3: аппараты, предназначенные для работы исключительно и неизменно на газах 3-го типа (бутан и пропан).

Вторая категория

Аппараты, приспособленные использовать два типа газов.

Пример: II_{23}: – аппарат "газ 2-го типа" (природный газ), "газ 3-го типа (пропан и бутан).

Третья категория

Эти аппараты "всех газов" и могут быть адаптированы на либо искусственный газ, либо природный, либо пропан и бутан. Эта категория не используется больше во Франции.

Адаптация к различным газам.

Переход от газа одного типа к газу другого типа.

Представляют интерес только аппараты второй и третьей категории. Обычно требуют, чтобы переделка производилась без перемещения аппарата, с помощью простых операций, таких как замена диафрагмы,возможная регулировка дебита газа, первичного воздуха, отключения или демонтаж регуляции давления, если аппарат его имеет аппарат или регулятор, если он существует.

Адаптация к другим газам того же типа.

Органы регулирования и регулятор давления, если он существует, выключаются для использования газа третьего типа; выбор давлений использования бутана (28 мбар) и пропана (37 мбар), таков, что аппарат получает одинаковое количество тепловой энергии в горелке. Единственное уточнение в некоторых ограниченных случаях – регулирование первичного воздуха горелки и запальника.

прогресса в области разработки бытовых газовых аппаратов.

8.6.1.7. Техника испытаний

Для того, чтобы испытания имели смысл, они должны быть проведены в определенных условиях. Нормы уточняют эти условия, если необходимо, средства и соответствующие установки.

8.6.2. Выработка норм

Решение о создании норм – результат требования промышленности. Выработка нормы осуществляется на основе определенного опыта, относящегося к типу аппарата и методам его контроля. Когда появляется новое оборудование, необходимо определить качество аппарата в соответствии с критериями, которые уже используются или которых пока нет.

Надо прежде всего установить новые критерии, новые методы испытаний, новый текст. Этот текст должен быть без двухсмысленностей, не иметь места для различной интерпретации, не являться прежде всего препятствием к прогрессу техники и охватывать как можно большее число подобных случаев.

Необходимо, чтобы все заинтересованные партнеры в распространении этого оборудования (изготовители аппаратов, фирмы-распределители газа) участвовали в выработке норм.

8.6.3. Организация нормализации во Франции

Во Франции нормализация является функцией французской ассоциации нормализации (Afnor), которая может поручить специализированным организациям нормализацию в специфической области.

Ответственный за нормализацию дает задание Бюро нормализации аппаратов, использующих горючие газы (B.N.G.), подготовить текст, касающийся оборудования, использующего газ (в области домашнего использования, промышленного и вспомогательного использования).

B.N.G. включает наряду с советом директоров семь комиссий, которые занимаются следующими вопросами:

— аппараты отопления для производства горячей воды полезной мощностью менее 70 кВт;
— аппараты, использующие менее 70 кВт, кроме аппаратов отопления и производства горячей воды;
— вспомогательное оборудование аппаратов мощностью менее 70 кВт;
— оборудование для внутренней установки;
— аппараты с полезной мощностью более 70 кВт.;
— аппараты, использующие G.P.L.;
— объем общего назначения.

Afnor является равноправным членом всех этих комиссий.

Роль комиссии состоит в следующем:

— выработать программу предстоящих работ, которая будет представлена на утверждение совета директоров;
— назначить докладчика на все предстоящие работы с целью подготовки или модификации текста (норм или спецификации) относящегося к его компетенции;
— обсудить и уточнить проект текста, подготовленного подписавшимся докладчиком.

Нормы не являются окончательным текстом.

Наоборот, они постоянно изменяются, чтобы учесть приобретенный опыт, новости техники и новые требования работы и обслуживания. Ревизия норм может быть затребована всеми заинтересованными лицами.

B.N.G определяет целесообразность учета запросов.

НОРМЫ, КАСАЮЩИЕСЯ ГАЗОВЫХ АППАРАТОВ

Французские нормы, касающиеся газовых аппаратов, относятся принципиально к группам NFD (домашние аппараты) и NFE (механика). Список обязательных норм фигурирует в приложении постановлений от 22 октября 1980 г. Он дополнен и модифицирован дополнительными указами.

Нормы NFD 30 - 504. "Правила и общие директивы для испытания аппаратов, использующих горючие газы". Определяют, в особенности, газы и давление испытания, которые должны быть использованы в зависимости от типа газов, способных снабжать бытовые аппараты.

Существует некоторое число французских норм (NF - GAZ), касающихся бытовых аппаратов, использующих газ. Ресторанные плиты, гибкие трубопроводы, гибкие шланги, соединяющие бытовые аппараты, краны управления, являются также объектом норм. Оборудование отопления коллективных зданий является объектом спецификации ATG (спецификация A.T.G.C. 30).

8.6.4. Международная нормализация

Международная нормализация должна учитывать особые трудности, проистекающие из:

— различия в экономике между странами;
— различия уровня жизни, разнообразия привычек;
— различия распределения газа в отличных условиях;
— языкового барьера.

Между тем, в течение многих лет были проделаны большие усилия, прежде всего в европейском плане со стороны "Cometec" (комитет исследования экономики газовой промышленности общего рынка), затем C.E.N. (Европейский комитет нормализации), объединяющий организации нормализации европейских стран, с другой стороны, в мировом плане ISO, который разрабатывает рекомендации.

С увеличением мощности общего рынка, международная организация и особенно европейская проникает в национальную нормализацию. Национальные комиссии устанавливают все больше своих положений в европейских документах или предлагают европейские тексты.

Современная европейская нормализации базируется на Едином Европейском акте (Acte unique européen), вступившем в действие в 1987 г., Белой книге (Livre blanc), подготовленной Общеевропейской комиссией в 1985 г., и резолюцией Совета от 7 мая 1985 г.

Единый европейский акт предусматривает, что большинство мер, предназначенных на включение в список единого рынка, будут приняты до 31 декабря 1992 г. Он уточняет также, что европейские директивы были приняты квалифицированным большинством.

Белая книга дает сроки принятия мер. Она предусматривает в особенности принятие документов, касающихся "газового аппарата". Резолюция от 7 мая 1985 г. подчеркивает, что только "основные потребности", представляющие коллективные интересы (безопасность, гигиена, окружающая среда и т.д.) будут обязательно отражены в декларациях.

Соответствие единым нормам (т.е., европейским) или при отсутствии национальных норм, одобренных Советом является главным средством доказательства, соответствия "основным потребностям". Директива "газовый аппарат" должна была быть принята в 1990 году.

Работа по Европейской нормализации поручена общей комиссией комитету Европейской нормализации. Он через комитет программирования (существует комитет программирования газа, называемым "PC-3") создал технический комитет, которому поручено выработать необходимые европейские нормы.

Что касается газовой аппаратуры, существует специальный технический комитет (водонагреватели, котлы малой мощности, кухонные плиты, радиаторы, различное оборудование).

Другие технические комитеты могут быть общими для нескольких типов энергии. В области транспорта и распределения газа до настоящего времени не существует специального технического комитета, но внутри технических комитетов, имеющих общий характер (чугун, сталь, медь, пластмасса и т.д.), могут существовать специальные рабочие группы по транспорту и распределению газа.

Предложенная документация для общественного рынка, директивные предложения для общественного рынка в секторах воды, энергии и транспорта, а следовательно, транспорта и распределения газа предусматривают, что рассматриваемые рынки должны базироваться на увязанных нормах и что они должны быть объектом открытых предложений ко всем поставщикам Общего рынка.

Если эти директивы приняты недавно, надо установить относительные нормы, касающиеся составных частей сетей поставки газа. Отныне, вопрос о составе технического комитета C.E.N. в этой области поставлен.

В общем, каждый может представить текст и потребовать, чтобы он был изучен C.E.N. и представлен на голосование, одобрен квалифицированным большинством. Обычно, такой проект представляет страна и профессиональная ассоциация. Marcogaz – ассоциация распределения газа по трубопроводам особенно активна в этой области. Она представляет одна или вместе с A.E.G.P.L. (Европейская ассоциация сжиженного нефтяного газа) и с европейской ассоциацией (табл. с. 823) общий проект (газ и давление испытаний, например) или соответствующий тому или другому аппарату.

8.6.5. Сертификация материалов

Выдать сертификат оборудованию, это решить, что он соответствует нормам или соответствующему сертификату и присвоить ему марку и выдать документ о соответствии нормам. Это может быть сделано различным способом и требует участия различных партнеров: изготовителей, лабораторий, организаций по сертификации, потребителей. Важной проблемой, находящейся на обсуждении, является вопрос одновременной сертификации французской и европейской. Одновременно ищут прозрачность и простоту системы, а следовательно экономию времени денег и средств, в любом случае это не должно в случае газового аппарата приводить к уменьшению безопасности.

В общеевропейском плане не предусмотрена единая централизованная сертификация. Действительно необходимо, чтобы выданные гарантии в одной стране были бы эквивалентны гарантиям, выданным в другой. Общий подход к сертификации и испытаниям (в Европе), которые является сегодня объектом предложения Комиссии и ближайшей резолюции Совета, имеет целью обеспечить этих соответствия. Этот документ обращает внимание на критерии, соблюдаемые организациями, занятыми сертификацией (органы сертификации, лаборатории испытаний), привилегии в привлечении страхования, качество и основы Европейской организации E.O.T.C. (European Organization for

Европейские ассоциации производства аппаратов и вспомогательного оборудования		Страна-член	Адрес дирекции
A. F. E. C. I.:	Европейская ассоциация производства водонагревателей и ванных колонок на газе мгновенного действия (проточного типа)	Австрия	21, rue des Drapiers, B-1050, Bruxelles, Belgique
A. F. E. C. O. R.:	Европейская ассоциация производства аппаратуры контроля и регулирования	Швейцария	c/o D. I. N., Postfach 11007, D 1000, Berlin 30
C. E. B.:	Европейский комитет по производству горелок	Швейцария, Швеция, Финляндия	Bismark Strasse, 92, 7410 Reutlingen, Allemagne fédérale
C. E. F. A. C. D.:	Европейский комитет по производству кухонных плит, домовых аппаратов отопления	Австрия, Швейцария	21, rue des Drapiers, B-1050, Bruxelles, Belgique
C. E. I. R.:	Европейский комитет промышленной аппаратуры	Швейцария, Австрия, Швеция, Финляндия, Норвегия	Lyoner Strasse 18, D-6000 Francfort, Allemagne federale
E. F. C. E. M.:	Европейская федерация производства оборудования больших кухонь	Швейцария, Австрия, Швеция, Финляндия, Норвегия	10, avenue Hoche, 75008 Paris, France
Eurovent:	Европейский комитет производства воздушного оборудования	Швеция, Швейцария, Финляндия	21, avenue des Drapiers, B-1050, Bruxelles, Belgique
Facogaz:	Европейский союз производства газовых счетчиков	Общий рынок	36, avenue Hoche, 75008 Paris, France
Faregaz:	Европейский союз производства регуляторов газа	Общий рынок	36, avenue Hoche, 75008 Paris, France
U. E. C.:	Европейский союз котлов	Общий рынок	c/o B.D.H., Kaiserswerther Strasse 135, 4000 Dusseldorf 30, Allemagne federale

Список европейских производителей газового оборудования.

Testingand Certification), обязанной поддерживать доктрину и законность общих соглашений. Разработаны модули сертификации, которые могут быть использованы в различных документах. Проект директоров "газовые аппараты" включает несколько таких модулей.

Критерии качества, которым должны соответствовать лаборатории организации сертификации, предприятия производители отныне выражаются в форме Европейских норм. Разнообразные организации существуют в различных странах, чтобы утвердить, что данные критерии полностью выполняются предприятиями. Так, Франция располагает сейчас Национальной сетью испытаний (R.N.E.), которая создает лаборатории, осуществляющие сертификатные испытания, и Французской ассоциацией сертификации качества (A.F.A.Q), способной одобрить систему паспортов качества предприятий.

В других странах, продвинувшихся более или менее в этой области, подписано несколько взаимных ознакомительных документов.

Франция особенно активно в этой области (R.N.E. с английским аналогом N.A.M.A.S., A.F.A.Q. с немецким аналогом D.Q.S., договор франко-немецкий в области газовой аппаратуры).

Ансамбль устройств, которые устанавливаются без задержки должны проходить общую сертификацию, которая необходима для такой продукции, как газовая аппаратура и, которая будет получать общую марку CE, может без дополнительных формальностей циркулировать в странах общего рынка.

Что касается Франции, сертификация оборудования имеет целью выдачи марки A.T.G. или соответствия спецификации A.T.G. Эти марки выдаются посредством испытаний оборудования, посещениями заводов с целью того, чтобы убедиться, что изготовитель способен производить и контролировать продукцию, подлежащую сертификации и пригласить комиссию, где представлены все заинтересованные участники (изготовители, абоненты, организации по сертификатам и лаборабории, монтажники, администрация). Осуществляется коммерческий контроль. Предусмотрено положение, когда условия, необходимые для присвоения марки не выполняются. Система находится сегодня (конец 1989 г.) в ходе переделки.

8.7. РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

8.7.1. Общие сведения

Окончательная цель регламентации газовой установки состоит в строительстве установки надежной и прочной. Для этого она должна быть:

— хорошо спроектирована; это значит, что трубопроводы газа (материал, расположение, прежде всего защита) и даже их окружение и аппараты использования (объем помещения), размещение аппаратов, условия аэрации) хорошо изучены и применены;
— на стадии концепции соответствующие описания должны быть регламентированы или иметь характер искусственных правил;
— технически хорошо реализована: реализация поручается профессионалам, хорошо знакомыми с газовыми установками и квалифицированными, прежде всего в выполнении соединений (сварка, пайка и т.д.) и в общем для пуска частей установке.

Качество реализации определяется испытанием на герметичность и подтверждается аттестатом соответствия установки, существующим правилам. Ансамбль технических правил и правил безопасности газовых установок включает типовой регламентированный текст и другой текст, имеющий нормативный характер или искусственных правил. Регламентация, применяемая к установкам газа, является только одним элементом составляющим правила строительства, выработанные применением статей 111 - 1 в 17 Коде строительства и поселения.

8.7.2. Уставный текст

8.7.2.1. Газовые установки

В жилых зданиях, базовым текстом является указ от 2 августа 1977 г., относящийся к установкам горючих и сжиженных газов, расположенных внутри жилых домов и зависящих от них строений.

Предписания этого указа являются основой безопасности распределения газа внутри жилых зданий и базируются на следующих принципах:

— качество выполнения и герметичность установки при пуске и их поддержание во времени;
— ограничение, в случае аварийных утечек, их объема, автоматическое перекрытие или быстрое закрытие арматуры и возможно быстрое удаление воспламеняющихся газов;
— хорошая вентиляция внутренних помещений, учитывая модификацию, введенную в 1969 г. в области аэрации помещений;
— использование материалов и аппаратов, соответствующих французским нормам или обязательным спецификация;
— градация предписаний в зависимости от риска, связанного с объемом квартиры и типа распределения (низкое или среднее давление).

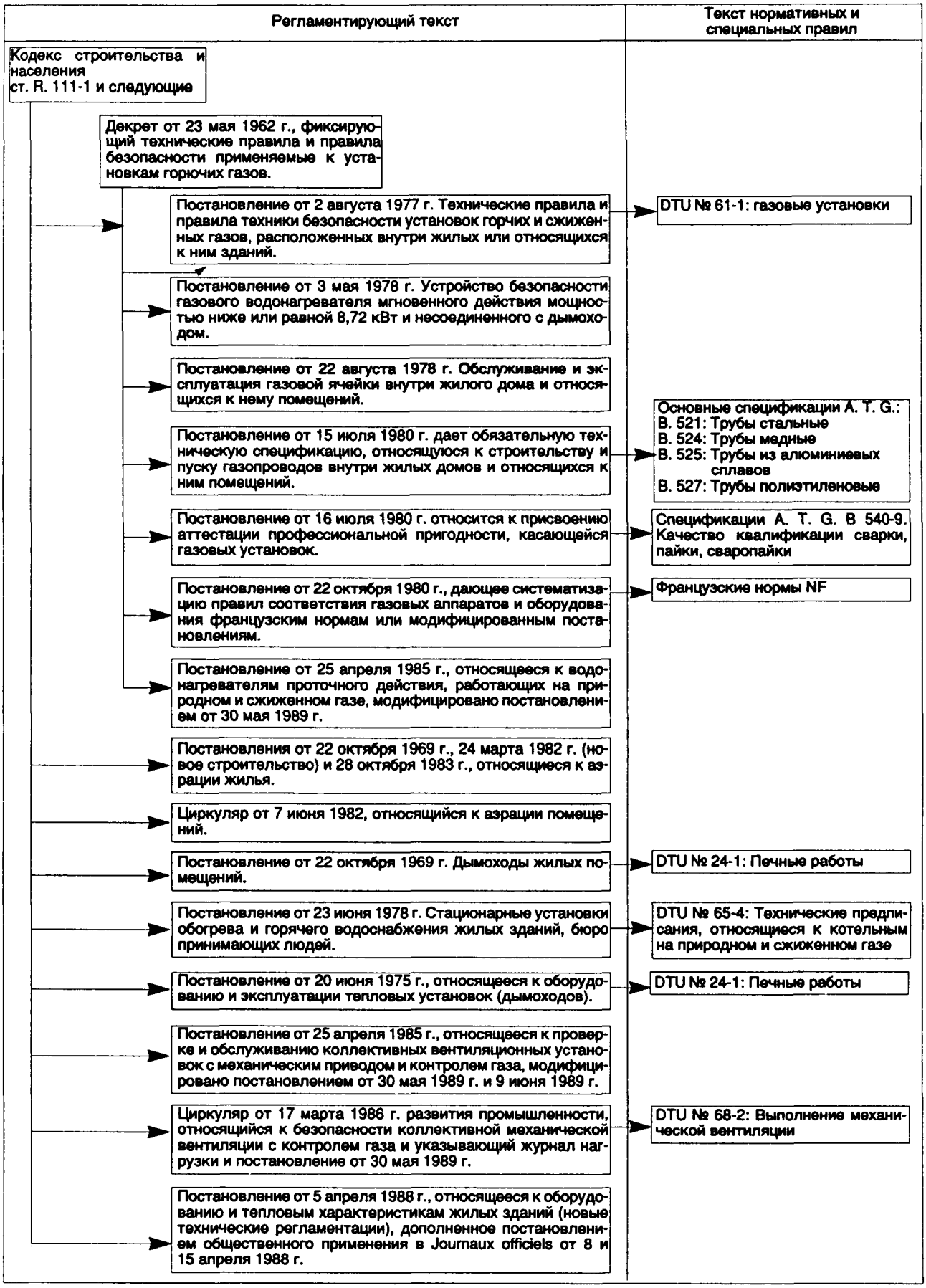
8.7.2.2. Окружающая среда газовых установок

Эта окружающая среда состоит из ансамбля зданий или месторасположение, в котором находится установка, работающая на газе. Регламентирующий текст, относящийся к этим помещениям не является специфическим газовым текстом, применим к различным видам энергии или топлива. Это текст, относящийся к условиям горения, коллективного отопления, аэрации помещений.

8.7.3. Искусство регламентирования

Как бы она ни была точна, регламентация не может опускаться до технических деталей. Впрочем, это не ее роль, этому посвящаются специальные правила, которые содержат унифицированную техническую документацию (D.T.U) 61 - 1: "Газовые установки" (Installation de gaz), опубликованные C.S.T.B (Научный и технический центр сооружений зданий) они включают четыре выпуска:

— регламент, содержащий технические условия, которые должны соблюдать строители и сантехники для пуска в действие оборудования и аппаратов;
— инструкция, относящаяся к общим работам, которая определяет практические правила, применимые к работам, выполняемым прочими государственными органами, кроме либо предназначенные для приема газовых установок (например, изоляция газопроводов), либо необходимые для корректной и надежной работы этих установок (снабжение аппаратов воздухом для горения, эвакуация продуктов сгорания);
— регламент специальных условий, который является административным документом – части



Список регламентирующих документов и специальных правил.

контракта по проведению частных работ. Он определяет в общем виде отношение между руководителем работ, посредником, распределителем и т.д. и предназначен для решения большого числа проблем, которые могут появиться по поводу содержания работ, документации поставок и т.д.

— терминология в конце концов определяет технические термины, используемые в основе D.T.U Унифицированная техническая документация).

Кроме D.T.U. № 61 - 1, существует несколько других D.T.U, которые относятся к газовым установкам и их окружению.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ 1

1.1.1. Обозначения 1

1.1.2. Единицы измерения 1

1.1.3. Соотношения между различными видами энергии 7

1.2. МАТЕМАТИКА 8

1.2.1. Арифметика 8

1.2.1.1. Прогрессии 8

1.2.1.2. Л арифмы 8

1.2.1.3. Средние значения 8

1.2.1.4. Комбинаторика 8

1.2.2. Тригонометрия 9

1.2.2.1. Тригонометрические функции некоторых углов 9

1.2.2.2. Основные тригонометрические формулы 9

1.2.2.3. Тригонометрические формулы, относящиеся к треугольникам 10

1.2.3. Алгебра и анализ 10

1.2.3.1. Алгебраические символы 10

1.2.3.2. Гиперболические функции 10

1.2.3.3. Производные основных функций 10

1.2.3.4. Интегралы основных функций 12

1.2.3.5. Разложения в ряды 13

1.2.3.6. Асимптотические разложения 13

1.2.3.7. Наиболее употребительные асимптотические разложения 14

1.2.4. Матрицы 14

1.2.4.1. Определение 14

1.2.4.2. Частные случаи 14

1.2.4.3. Транспонированная матрица 14

1.2.4.4. Сумма двух матриц 15

1.2.4.5. Произведение двух матриц 15

1.2.4.6. Произведение матрицы на действительное число 15

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.2.4.7. Система линейных уравнений. Линейное преобразование . . . 15
1.2.4.8. Обратная матрица . . . 15
1.2.4.9. Определитель матрицы . . . 15
1.2.4.10. Решение системы линейных уравнений . . . 16
1.2.4.11. Ранг матрицы . . . 16
1.2.4.12. Общий случай системы, когда число уравнений не совпадает с числом неизвестных . . . 16

1.2.5. Геометрия . . . 16
1.2.5.1. Соотношения между элементами правильных многоугольников . . . 16
1.2.5.2. Различные формулы . . . 17

1.2.6. Численные методы . . . 19
1.2.6.1. Численное интегрирование . . . 19
1.2.6.2. Решение системы линейных уравнений . . . 19
1.2.6.3. Решение системы нелинейных уравнений . . . 19

1.3. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ . . . 20

1.3.1. Элементы описательной статистики . . . 20
1.3.1.1. Выборка . . . 20
1.3.1.1.1. Графическое описание выборки . . . 20
1.3.1.1.1.1. Диаграмма частот . . . 20
1.3.1.1.1.2. Гистограмма . . . 20
1.3.1.1.2. Численное описание . . . 20
1.3.1.1.2.1. Характеристики центра . . . 20
1.3.1.1.2.2. Характеристики рассеяния . . . 20
1.3.1.1.3. Индексы . . . 20
1.3.1.1.4. Оценки . . . 21
1.3.1.2. Двумерная выборка . . . 21
1.3.1.3. Случай временных рядов . . . 21
1.3.1.4. Исследование числовых таблиц: многомерный анализ . . . 21
1.3.1.4.1. Факторные методы . . . 21
1.3.1.4.2. Классификационные методы . . . 21

1.3.2. Статистические решения . . . 21
1.3.2.1. Случайная величина . . . 21
1.3.2.1.1. Примеры дискретных случайных величин . . . 21
1.3.2.1.1.1. Величина B, распределенная по биномиальному закону . . . 21
1.3.2.1.1.2. Величина H, распределенная по гипергеометрическому закону . . . 21
1.3.2.1.1.3. Величина P, распределенная по закону Пуассона . . . 21
1.3.2.1.2. Пример непрерывной случайной величины . . . 22
1.3.2.2. Критерий согласия χ^2 (хи-квадрат) между законом распределения вероятностей P и выборкой . . . 22
1.3.2.3. Параметрические статистические критерии . . . 22
1.3.2.4. Непараметрические критерии . . . 22

1.3.3. Экспликативные детерминистские модели . . . 22
1.3.3.1. Схема разложения временного ряда . . . 22
1.3.3.2. Методы оценки тенденции . . . 22
1.3.3.2.1. Метод скользящего среднего . . . 22

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.3.3.2.2. Метод экспоненциального сглаживания . . . 23
1.3.3.3. Связи между двумя рядами . . . 23
1.3.3.4. Эконометрика . . . 23

1.3.4. Стохастические модели . . . 23
1.3.4.1. Модель для одной переменной . . . 23
1.3.4.1.1. Стационарность . . . 23
1.3.4.1.2. Практика моделирования . . . 24
1.3.4.2. Моделирование нескольких рядов . . . 24

1.4. ИНФОРМАТИКА . . . 24

1.4.1. Диалог человек–машина . . . 25

1.4.2. Что такое информационная система? . . . 25

1.4.3. Базы данных . . . 25
1.4.3.1. Определения . . . 25
1.4.3.1.1. Уровень представления . . . 25
1.4.3.1.2. Структура баз данных . . . 26
1.4.3.1.2.1. Иерархическая модель . . . 26
1.4.3.1.2.2. Сетевая модель . . . 26
1.4.3.1.2.3. Реляционная модель . . . 26

1.4.4. Методы анализа . . . 27
1.4.4.1. Предварительное изучение . . . 27
1.4.4.1.1. Определение задания . . . 27
1.4.4.1.2. Изучение и критическая оценка состояния дел . . . 27
1.4.4.1.3. Выработка новых решений . . . 27
1.4.4.1.4. Заключительный документ . . . 27
1.4.4.2. Детальная (или функциональная) проработка . . . 27
1.4.4.3. Реализация . . . 27
1.4.4.4. Запуск . . . 28

1.4.5. Проблемные пакеты . . . 28

1.4.6. Передача данных . . . 28
1.4.6.1. Введение и общие положения . . . 28
1.4.6.2. Принципы передачи данных . . . 28
1.4.6.2.1. Носители передачи . . . 28
1.4.6.2.2. Эксплуатация . . . 29
1.4.6.2.3. Терминалы и передача данных . . . 29
1.4.6.3. Принципы сетей . . . 29
1.4.6.3.1. Нормы, модели O. S. I. . . . 29
1.4.6.3.2. Топология сетей, возможности . . . 29
1.4.6.3.3. Коммутирование пакетов . . . 29
1.4.6.4. Протоколы и сети . . . 29
1.4.6.4.1. Функции протоколов передачи данных . . . 29
1.4.6.4.2. Слои модели O. S. I. . . . 29
1.4.6.4.2.1. Физический слой или уровень 1 . . . 29
1.4.6.4.2.2. Связь данных или уровень 2 . . . 30
1.4.6.4.2.3. Сетевой слой или уровень 3 . . . 30
1.4.6.4.2.4. Верхние слои . . . 30

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.4.6.5. Сети дополнительной ценности . . . 30

1.4.7. Экспертные системы . . . 31

1.4.7.1. Функциональность экспертных систем . . . 31

1.4.7.2. Общая структура . . . 31

1.4.7.3. Общие характеристики . . . 31

1.4.8. Информационная безопасность . . . 31

1.4.8.1. Обеспечить долговременную работу компьютера . . . 31

1.4.8.1.1. Пожар . . . 32
1.4.8.1.2. Климатизация . . . 32
1.4.8.1.3. Электричество . . . 32
1.4.8.1.4. Электромагнетизм . . . 32
1.4.8.1.5. Защита от воды . . . 32
1.4.8.1.6. План действий и инструкции по безопасности . . . 32
1.4.8.1.7. Страхование . . . 32
1.4.8.1.8. Контракты обслуживания . . . 32

1.4.8.2. Обеспечить наиболее дешевое функционирование и совершенствование системы . . . 32

1.4.8.2.1. Безопасность программ и документации . . . 32
1.4.8.2.2. Безопасность на уровне приложений . . . 32
1.4.8.2.3. Безопасность процедур . . . 32
1.4.8.2.4. Возможности доступа к системе и время ответа . . . 32
1.4.8.2.5. План защиты . . . 33
1.4.8.2.5.1. План быстрого возобновления работ . . . 33
1.4.8.2.5.2. План "Back up" . . . 33

1.4.8.3. Сохранить информацию . . . 33

1.4.8.3.1. Надежность системы . . . 33
1.4.8.3.2. Нарушение безопасности данных . . . 33
1.4.8.3.3. Безопасность терминалов и оборудования связи . . . 33
1.4.8.3.4. Меры безопасности, связанные с системой эксплуатации . . . 33
1.4.8.3.4.1. Произвольно регулируемый доступ . . . 33
1.4.8.3.4.2. Идентификация . . . 33
1.4.8.3.4.3. Система контроля . . . 33
1.4.8.3.4.4. Защита с помощью ограничения привилегий . . . 33
1.4.8.3.4.5. Защита сети . . . 33
1.4.8.3.5. Меры безопасности, связанные с администрацией . . . 34
1.4.8.3.5.1. Общая организация и информационная политика . . . 34
1.4.8.3.5.2. Внутренняя и внешняя проверка безопасности . . . 34
1.4.8.3.5.3. Доступ к информационному центру . . . 34
1.4.8.3.5.4. Безопасность, связанная с персоналом . . . 34

1.5. МЕХАНИКА И СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ . . . 34

1.5.1. Введение . . . 34

1.5.1.1. Классическая механика . . . 34

1.5.1.1.1. Статика . . . 34
1.5.1.1.2. Кинематика . . . 34
1.5.1.1.3. Динамика . . . 34
1.5.1.1.4. Экспериментальная идентификация сил . . . 34
1.5.1.1.4.1. Дистанционные силы . . . 34
1.5.1.1.4.2. Контактные силы . . . 34

1.5.1.2. Механика сплошных сред . . . 35

1.5.2. Векторная геометрия . . . 35

1.5.2.1. Скалярное произведение двух векторов (число) . . . 35

1.5.2.2. Векторное произведение двух векторов . . . 35

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.5.2.3. Поля . . . 36
1.5.2.3.1. Скалярное поле . . . 36
1.5.2.3.2. Векторное поле . . . 36
1.5.2.3.3. Силовое поле . . . 36
1.5.2.3.4. Поле скоростей . . . 36
1.5.2.4. Торсор . . . 36

1.5.3. Теоретическая механика . . . 36

1.5.3.1. Материальная точка . . . 36
1.5.3.1.1. Траектория . . . 36
1.5.3.1.2. Относительное движение . . . 37
1.5.3.1.2.2. Произвольный вектор $\overline{AB}$ . . . 37
1.5.3.1.2.1. Анализ скоростей . . . 37
1.5.3.1.2.3. Разложение ускорений . . . 38
1.5.3.1.2.4. Основной принцип динамики в произвольной системе отсчета . . . 38
1.5.3.1.3. Другие записи закона для материальной точки . . . 38
1.5.3.1.3.1. Количество движения . . . 38
1.5.3.1.3.2. Кинетический момент . . . 38
1.5.3.1.3.3. Кинетическая энергия . . . 38
1.5.3.2. Материальная система . . . 39
1.5.3.2.1. Центр тяжести, или центр инерции, или барицентр . . . 39
1.5.3.2.2. Теорема о движении центра инерции . . . 39
1.5.3.2.3. Теорема о кинетическом моменте . . . 39
1.5.3.2.4. Теорема о кинетическом моменте относительно G . . . 39
1.5.3.2.5. Теорема кинетической энергии . . . 39
1.5.3.2.6. 2-ая теорема Кенига . . . 39
1.5.3.2.7. Теорема мощностей . . . 39
1.5.3.3. Вращение твердого тела вокруг оси . . . 40
1.5.3.3.1. Момент инерции вращения . . . 40
1.5.3.3.2. Пара вращения . . . 40
1.5.3.3.3. Теорема Гюйгенса . . . 40
1.5.3.3.4. Количество движения . . . 40
1.5.3.3.5. Кинетическая энергия вращения . . . 41
1.5.3.3.6. Работа сил, действующих на твердое тело . . . 41
1.5.3.4. Потенциальная энергия и механическая энергия . . . 41
1.5.3.4.1. Потенциальная энергия системы . . . 41
1.5.3.4.2. Обратимое преобразование . . . 41
1.5.3.4.3. Механическая энергия системы . . . 41
1.5.3.4.4. Потенциал, зависящий от времени . . . 41
1.5.3.4.5. Устойчивое равновесие . . . 43
1.5.3.4.6. Первый интеграл движения . . . 43
1.5.3.5. Изолированные системы . . . 43
1.5.3.5.1. Сохранение количества движения . . . 43
1.5.3.5.2. Сохранение кинетического момента . . . 43
1.5.3.5.3. Удары . . . 43
1.5.3.6. Удар двух тел . . . 44
1.5.3.6.1. Импульс силы . . . 44
1.5.3.6.2. Абсолютно неупругий удар . . . 44
1.5.3.6.3. Абсолютно упругий удар . . . 44
1.5.3.6.3.1. Удар двух частиц или "фронтальный" удар . . . 44
1.5.3.6.3.2. Закон упругого отражения: . . . 45
1.5.3.6.3.3. Удар сфер, без трения . . . 45
1.5.3.6.3.4. Удар произвольных тел с центрами тяжести A и B без трения . . . 46
1.5.3.6.4. Реальные удары . . . 47
1.5.3.6.4.1. Энергия деформации не полностью восстанавливается за время $t_2 - t_1$ . . . 47
1.5.3.6.4.2. Касательный импульс есть . . . 47
1.5.3.7. Осцилляторы . . . 47
1.5.3.7.1. Осциллятор с вязким трением . . . 47

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.5.3.7.2. Вынужденные колебания . . . 48

1.5.3.8. Моменты инерции твердого тела . . . 48

1.5.3.8.1. В системе координат $Oxyz$ . . . 48
1.5.3.8.2. Эллипсоид инерции в точке O твердого тела . . . 49
1.5.3.8.3. Центральный эллипсоид инерции – в центре тяжести G . . . 49
1.5.3.8.4. Центральный эллипсоид – эллипсоид вращения. Примеры семейств твердых тел . . . 49
1.5.3.8.4.1. Каждый ломтик – это фигура, для которой G_R является центром симметрии порядка $n \geq 3$ . . . 49
1.5.3.8.4.2. Каждый ломтик – это один или несколько витков винта . . . 50

1.5.3.9. Движение твердого тела с одной неподвижной точкой O. Общие уравнения . . . 50

1.5.3.9.1. Кинетический момент относительно O . . . 50
1.5.3.9.2. Теорема о кинетическом моменте . . . 51
1.5.3.9.3. Кинетическая энергия . . . 51

1.5.3.10. Свободное движение или движение Пуансо . . . 51

1.5.3.10.1. Тело, приведенное во вращение вокруг главной оси инерции . . . 51
1.5.3.10.2. Тело, приведенное во вращение вокруг произвольной оси . . . 51
1.5.3.10.3. Тело, у которого эллипсоид инерции есть эллипсоид вращения с осью Oz_1 . . . 52
1.5.3.10.4. Относительное движение вокруг центра тяжести . . . 52

1.5.3.11. Задача Лагранжа. Движение волчка . . . 52

1.5.3.11.1. Вращение волчка . . . 52
1.5.3.11.1.1. Плоскость zOx вращается вокруг $\overrightarrow{Oz}$ . . . 52
1.5.3.11.1.2. Плоскость zOn вращается вокруг On, узловой оси . . . 53
1.5.3.11.2. Плоскость wOn вращается вокруг Oz_1 . . . 53
1.5.3.11.3. Движение волчка . . . 53
1.5.3.11.4. Гироскоп . . . 53
1.5.3.11.5. Применения гироскопа . . . 54

1.5.3.12. Моменты инерции распространенных линий, поверхностей и объемов . . . 54

1.5.4. Сопротивление материалов . . . 58

1.5.4.1. Базовые эксперименты . . . 58

1.5.4.1.1. Растяжение . . . 58
1.5.4.1.1.1. Условные величины . . . 58
1.5.4.1.1.2. После разрыва . . . 58
1.5.4.1.1.3. В упругой зоне . . . 58
1.5.4.1.1.4. Изотропные материалы . . . 59
1.5.4.1.1.5. Анизотропные материалы . . . 59
1.5.4.1.2. Чистый сдвиг и кручение . . . 59
1.5.4.1.2.1. Кручение тонкой трубы парой C . . . 59
1.5.4.1.2.2. Кручение толстой трубы . . . 59

1.5.4.2. Напряженное состояние в сплошной среде . . . 60

1.5.4.2.1. Практически важный случай . . . 61
1.5.4.2.2. Уравнения равновесия . . . 61

1.5.4.3. Деформации и перемещения . . . 62

1.5.4.4. Связи между напряжениями и деформациями в сопротивлении материалов . . . 63

1.5.4.4.1. Упругость (упругие тела): обобщенный закон Гука . . . 63
1.5.4.4.1.1. Изотропные материалы . . . 63
1.5.4.4.1.2. Другая точка зрения . . . 63
1.5.4.4.2. Термический эффект . . . 63

1.5.4.5. Закон предельных состояний материала . . . 63

1.5.4.5.1. Предел на разрыв . . . 63
1.5.4.5.2. Предел упругости . . . 64
1.5.4.5.3. Коэффициент безопасности . . . 64

1.5.4.6. Тонкие стержни и балки . . . 65

1.5.4.6.1. Плоское напряженное состояние в балке или стержне . . . 65
1.5.4.6.1.1. Напряжение, вызванное нормальным усилием N . . . 65

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.5.4.6.1.2. Простой изгиб (случай, изображенный на рисунке) . . . 65
1.5.4.6.1.3. Изгиб с отклонением . . . 67
1.5.4.6.1.4. Сложный изгиб . . . 67
1.5.4.6.1.5. Срезывающее усилие . . . 68
1.5.4.6.2. Детали с большой кривизной (крюк, кольцо) . . . 68
1.5.4.6.2.1. Напряжение изгиба . . . 68
1.5.4.6.2.2. Напряжение, вызванное нормальным усилием . . . 68
1.5.4.6.3. Спиральные пружины . . . 69
1.5.4.6.3.1. Пружины растяжения или сжатия . . . 69
1.5.4.6.3.2. Пружина кручения . . . 69

1.5.4.7. Задачи с вращательной симметрией . . . 69

1.5.4.7.1. Толстостенная труба . . . 69
1.5.4.7.1.1. Задача Ламе . . . 69
1.5.4.7.1.2. Равновесие элемента . . . 70
1.5.4.7.1.3. Перемещение *u* . . . 70
1.5.4.7.2. Быстро вращающийся диск . . . 70
1.5.4.7.2.1. Динамическое уравнение . . . 70
1.5.4.7.2.2. Напряжения . . . 70
1.5.4.7.3. Изгиб круговых пластин . . . 71
1.5.4.7.3.1. Напряжения . . . 71
1.5.4.7.3.2. Равновесие элемента . . . 71
1.5.4.7.4. Осесимметричные оболочки . . . 72

1.5.4.8. Неустойчивость. Искривление . . . 73

1.5.4.8.1. Искривление стержней (задача Эйлера) . . . 73
1.5.4.8.2. Искривление труб путем овализации . . . 73

1.5.4.9. Концентрация напряжений . . . 73

1.5.4.9.1. Круговые отверстия, вырезы . . . 73
1.5.4.9.2. Малое эллиптическое отверстие в пластине . . . 74

1.5.4.10. Вибрации структур . . . 74

1.5.4.10.1. Продольные вибрации стержня . . . 74
1.5.4.10.2. Поперечные или изгибные вибрации стержня . . . 74
1.5.4.10.3. Стержень с массой в середине . . . 75
1.5.4.10.3.1. На опорах . . . 75
1.5.4.10.3.2. Заделанные концы . . . 75
1.5.4.10.4. Консоль с массой на конце . . . 75
1.5.4.10.5. Вибрации в бесконечной среде . . . 75

1.5.4.11. Бетон . . . 76

1.5.4.11.1. Цемент . . . 76
1.5.4.11.2. Минимальная дозировка цемента . . . 76
1.5.4.11.3. Расчеты, разрыв . . . 76
1.5.4.11.3.1. Сопротивление сжатию . . . 76
1.5.4.11.3.2. Сопротивление растяжению . . . 76
1.5.4.11.3.3. Усушка: уменьшение объема бетона при высыхании . . . 76
1.5.4.11.3.4. Течение . . . 76
1.5.4.11.3.5. Армированный бетон . . . 76
1.5.4.11.3.6. Расчетные нагрузки . . . 76
1.5.4.11.3.7. Допустимые напряжения . . . 76
1.5.4.11.3.8. Внутренняя кривая Како для бетонов . . . 77

1.5.4.12. Механические характеристики распространенных материалов . . . 77

1.5.5. Термопластики . . . 78

1.5.5.1. Механическое поведение . . . 78

1.5.5.2. Реологические методы . . . 78

1.5.5.2.1. Уравнение течения . . . 78
1.5.5.2.2. Уравнение релаксации . . . 78
1.5.5.2.3. Текучесть . . . 78
1.5.5.2.4. Релаксация . . . 78

1.5.5.3. Механическая характеризация . . . 79

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.5.5.4. Механизмы разрыва 79
1.5.5.5. Влияние температуры 80

1.5.6. Литература 80

1.6. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО 81

1.6.1. Основные понятия электротехники 81

1.6.1.1. Наиболее употребительные формулы (постоянный ток) 81
1.6.1.1.1. Соединение сопротивлений 81
1.6.1.1.2. Соединение равных сопротивлений 82
1.6.1.1.3. Удельные сопротивления ρ 82
1.6.1.2. Наиболее употребительные формулы (переменный ток) 82
1.6.1.2.1. Расчет коэффициента мощности cos φ 82
1.6.1.2.2. Трехфазная сеть 83
1.6.1.2.3. Эквивалентные импедансы 83

1.6.2. Выбор сечения электрических кабелей 83

1.6.2.1. Принципы выбора 83
1.6.2.2. Сечение, необходимое с учетом разогрева при нормальном режиме 84
1.6.2.3. Сечение, необходимое с учетом разогрева при коротком замыкании 84
1.6.2.4. Сечение, необходимое для учета падения напряжения 84

1.6.3. Трансформаторы 87

1.6.4. Электродвигатели 87

1.6.4.1. Электродвигатели постоянного тока 87
1.6.4.1.1. Преимущества 87
1.6.4.1.2. Неудобства 87
1.6.4.1.3. Области приложения 87
1.6.4.1.3.1. Моторы с последовательным возбуждением 87
1.6.4.1.3.2. Шунтовые моторы 87
1.6.4.1.3.3. Компаунд-моторы 87
1.6.4.2. Электродвигатели переменного тока 87
1.6.4.2.1. Асинхронные двигатели 89
1.6.4.2.1.1. Асинхронные двигатели с неподвижными обмотками 89
1.6.4.2.1.2. Асинхронные двигатели с роторной обмоткой 89
1.6.4.2.2. Синхронные двигатели 89
1.6.4.2.3. Асинхронные синхронизованные двигатели. 90

1.6.5. Электронные решения проблемы регулируемого привода 90

1.6.5.1. Двигатель постоянного тока с питанием через управляемый тиристорный выпрямитель 90
1.6.5.2. Двигатель постоянного тока с питанием от преобразователя тока 91
1.6.5.3. Асинхронный двигатель с фазным ротором и с подсинхронным каскадом 91
1.6.5.4. Короткозамкнутый асинхронный двигатель с питанием от выпрямителя с коммутацией 91
1.6.5.5. Синхронный двигатель с питанием от выпрямителя-инвертора с авторегулировкой . . 92
1.6.5.6. Синхронный или асинхронный двигатель с питанием от циклического преобразователя частоты 92

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.6.6. Процесс запуска синхронного или асинхронного двигателя 92

1.6.6.1. Прямой пускатель в цепи статора под полным напряжением 92

1.6.6.1.1. Достоинства и недостатки 92
1.6.6.1.2. Изменение крутящего момента и силы тока при прямом запуске 92

1.6.6.2. Пуск в цепи статора при пониженном напряжении 93

1.6.6.2.1. Снижение напряжения сопротивлениями 93
1.6.6.2.2. Снижение напряжения реактивным сопротивлением 94
1.6.6.2.3. Снижение напряжения автотрансформатором 94

1.6.6.3. Пуск в цепи статора с конденсатором 95

1.6.6.4. Пускатель в цепи статора с переключением со звезды на треугольник 96

1.6.6.5. Изменение крутящего момента и силы тока при статорном запуске 96

1.6.6.6. Пускатели в цепи ротора 96

1.6.6.6.1. Преимущества роторного пуска 96
1.6.6.6.2. Принципиальная схема функционирования 97
1.6.6.6.3. Изменение крутящего момента и силы тока при роторном запуске 97
1.6.6.6.4. Кривые крутящего момента и силы тока при использовании жидкостного реостата 98

1.6.7. Улучшение коэффициента мощности 98

1.7. ТЕРМОДИНАМИКА 99

1.7.1. Общие сведения 99

1.7.1.1. Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии) 99

1.7.1.1.1. Замкнутая система 99
1.7.1.1.2. Открытая система, энтальпия 99

1.7.1.2. Второе начало термодинамики (различие между работой и теплотой) 99

1.7.1.2.1. Закрытие системы 99
1.7.1.2.1.1. Приложение: циклическая эволюция однотемпературной системы 100
1.7.1.2.1.2. Приложение: циклическая эволюция двухтемпературной системы (определение энтропии) 100
1.7.1.2.2. Открытая система 100

1.7.1.3. Термодинамические соотношения 100

1.7.1.3.1. Термодинамические функции 100
1.7.1.3.1.1. Свободная энергия 100
1.7.1.3.1.2. Термодинамический потенциал Гиббса 100
1.7.1.3.1.3. Избыточная энергия 101
1.7.1.3.2. Балансовые соотношения и коэффициент полезного действия 101
1.7.1.3.3. Связь функций и параметров состояния 101

1.7.1.4. Термодинамические диаграммы 103

1.7.1.4.1. Диаграмма P–V (Клапейрона) 103
1.7.1.4.2. Диаграмма T–S (энтропийная) 103
1.7.1.4.3. Диаграмма H–S (Мольера) 103
1.7.1.4.4. Диаграмма P–H (энтальпийная) 104

1.7.2. Свойства газов 104

1.7.2.1. Модель идеального газа 104

1.7.2.1.1. Уравнение состояния 104
1.7.2.1.2. Термодинамические свойства совершенных газов 105
1.7.2.1.2.1. Соотношение Клапейрона 105
1.7.2.1.2.2. Соотношение Майера 105
1.7.2.1.2.3. Функции состояния 105
1.7.2.1.2.4. Законы Джоуля 105

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.7.2.1.3. Приложение: цикл Карно совершенного газа . . . 105
1.7.2.1.3.1. Адиабатический процесс . . . 105
1.7.2.1.3.2. Изотермический процесс . . . 107
1.7.2.1.4. Идеальная смесь совершенных газов . . . 107
1.7.2.1.4.1. Закон Дальтона . . . 107
1.7.2.1.4.2. Законы Рауля и Генри . . . 107

1.7.2.2. Свойства реальных газов . . . 107

1.7.2.2.1. Общие сведения. Применение уравнения состояния . . . 107
1.7.2.2.1.1. Уравнения состояния реальных газов . . . 107
1.7.2.2.1.2. Расчет свойств газов . . . 110
1.7.2.2.1.3. Фазовое равновесие . . . 111
1.7.2.2.2. Основные свойства компонентов газов распределительных сетей . . . 114
1.7.2.2.3. Коэффициент сжимаемости, плотность и относительная плотность . . . 114
1.7.2.2.3.1. В газообразном состоянии . . . 114
1.7.2.2.3.2. В жидком состоянии . . . 116
1.7.2.2.4. Удельные теплоемкости и изэнтропические показатели . . . 118
1.7.2.2.5. Теплота сгорания. Число Вобба. Коэффициент окисляемости . . . 121
1.7.2.2.5.1. Теплота сгорания . . . 121
1.7.2.2.5.2. Число Вобба . . . 121
1.7.2.2.5.3. Окислительная способность и коэффициент окисляемости . . . 121
1.7.2.2.6. Вязкость и теплопроводность . . . 122
1.7.2.2.6.1. Динамическая и кинематическая вязкость . . . 122
1.7.2.2.6.2. В паровой фазе . . . 123
1.7.2.2.6.3. В жидкой фазе . . . 124
1.7.2.2.7. Влагосодержание природного газа, образование гидратов . . . 124
1.7.2.2.7.1. Влагосодержание природного газа . . . 124
1.7.2.2.7.2. Гидратообразование . . . 126

1.8. ХИМИЯ . . . 130

1.8.1. Теория атома и химические связи . . . 130

1.8.1.1. Строение атома . . . 130
1.8.1.1.1. Атомная масса, грамм-атом . . . 130
1.8.1.1.2. Молекулярная масса, моль . . . 130

1.8.1.2. Электронная структура атома . . . 130
1.8.1.2.1. Главное квантовое число . . . 130
1.8.1.2.2. Вторичное квантовое число . . . 130
1.8.1.2.3. Магнитное квантовое число . . . 130
1.8.1.2.4. Спиновое квантовое число . . . 131

1.8.1.3. Периодическая классификация элементов (таблица Менделеева, 1869) . . . 131

1.8.1.4. Понятие химической связи . . . 131
1.8.1.4.1. Ионная связь . . . 131
1.8.1.4.2. Ковалентная связь . . . 131
1.8.1.4.3. Гибридная связь . . . 133

1.8.2. Химическая термодинамика . . . 134

1.8.2.1. Определения . . . 134

1.8.2.2. Мольные величины . . . 134

1.8.2.3. Термодинамические функции . . . 134

1.8.2.4. Термодинамические функции простых веществ . . . 135
1.8.2.4.1. Химический потенциал совершенного газа . . . 135
1.8.2.4.2. Химический потенциал реального газа . . . 135

1.8.2.5. Термодинамические функции газовых смесей . . . 135
1.8.2.5.1. Смесь совершенных газов . . . 135
1.8.2.5.2. Смесь реальных газов . . . 136

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.8.2.6. Растворы 136
1.8.2.6.1. Идеальные растворы (закон Рауля) 136
1.8.2.6.2. Разбавленные растворы (закон Генри) 136
1.8.2.6.3. Реальные растворы. Понятие активности 136

1.8.2.7. Равновесие 137
1.8.2.7.1. Условия равновесия и эволюции термодинамической системы 137
1.8.2.7.2. Правило фаз Гиббса 137
1.8.2.7.3. Равновесие чистых веществ 137
1.8.2.7.4. Химическое равновесие 138
1.8.2.7.4.1. Энтальпия и энергия Гиббса химической реакции 138
1.8.2.7.4.2. Закон действующих масс 139
1.8.2.7.4.3. Различные выражения закона действующих масс 139
1.8.2.7.4.4. Зависимость константы равновесия от температуры и давления 140
1.8.2.7.4.5. Расчет констант равновесия 141
1.8.2.7.4.6. Совместное равновесие 142
1.8.2.7.4.7. Тройная диаграмма C–H–O (определение областей образования простого углерода в тройной системе C–H–O) 143

1.8.2.8. Электролиты 145
1.8.2.8.1. Определение 145
1.8.2.8.2. Активность 146
1.8.2.8.2.1. Определение 146
1.8.2.8.2.2. Расчет средней активности 146
1.8.2.8.3. Ионное произведение воды, pH 147
1.8.2.8.4. Кислотность, щелочность 147
1.8.2.8.4.1. Классическая теория 147
1.8.2.8.4.2. Теория Бронстеда 147
1.8.2.8.4.3. Теория Льюиса 147
1.8.2.8.5. Буферные растворы. Амфотерные электролиты 147
1.8.2.8.6. Области преобладания кислотно-щелочных свойств в зависимости от pH 148
1.8.2.8.7. Окисление–восстановление 148
1.8.2.8.8. Закон Нернста 148
1.8.2.8.9. Окислительно-восстановительные реакции. Дисмутация 148
1.8.2.8.10. Гальванические элементы 149

1.8.3. Химический анализ 149

1.8.3.1. Анализ воды 149
1.8.3.1.1. Отборы проб 149
1.8.3.1.2. Физико-химический анализ 149
1.8.3.1.2.1. pH 149
1.8.3.1.2.2. Электросопротивление (NF T 90 - 031) 149
1.8.3.1.3. Химический анализ 149
1.8.3.1.3.1. Щелочность (NF T 90 - 036) 149
1.8.3.1.3.2. Жесткость или гидротиметрический показатель (ГП) (NF T 90 - 003) 150
1.8.3.1.3.3. Определение элементов, растворенных в воде 150
1.8.3.1.3.4. Химическая потребность в кислороде (NF T 90 - 101) 150
1.8.3.1.4. Биохимический анализ. Биохимическая потребность в кислороде (NF T 90 - 103) . 150
1.8.3.1.5. Бактериологический анализ 150
1.8.3.1.5.1. Подсчет микроорганизмов 150
1.8.3.1.5.2. Поиск специальных типов бактерий 150
1.8.3.1.6. Библиография 150

1.8.3.2. Анализ газов и дымов 150
1.8.3.2.1. Автоматический анализ в трубопроводах природного газа 150
1.8.3.2.1.1. Принцип хроматографии в газовой фазе (напоминание) 150
1.8.3.2.1.2. Наиболее практикуемые виды анализа во время эксплуатации 151
1.8.3.2.1.3. Последовательный расчет физических характеристик по результатам хроматографии 152
1.8.3.2.2. Анализ продуктов горения 152
1.8.3.2.2.1. Распространенные общие методы 152
1.8.3.2.2.2. Углекислый газ (CO_2) 152
1.8.3.2.2.3. Оксид углерода (CO) 152
1.8.3.2.2.4. Кислород 152

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.8.3.2.2.5. Оксиды азота (NO_x) . . . 152
1.8.3.2.2.6. Диоксид серы (SO_2) . . . 153
1.8.3.2.3. Точный анализ проб различных газов . . . 153
1.8.3.2.3.1. Принцип масс-спектроскопии . . . 153
1.8.3.2.3.2. Анализ методом газовой хроматографии . . . 153
1.8.3.2.3.3. Взаимодополняемость масс-спектрометрии и газовой хроматографии . . . 154
1.8.3.2.4. Отборы проб газа. Тарирование анализаторов . . . 154
1.8.3.2.4.1. Отборы проб . . . 154
1.8.3.2.4.2. Тарирование . . . 154

1.9. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА . . . 154

1.9.1. Передача тепла излучением . . . 154

1.9.1.1. Преимущества перед другими формами теплопередачи . . . 154

1.9.1.2. Излучение твердых тел. Черное тело (или полный излучатель) . . . 154

1.9.1.2.1. Физические величины, описывающие излучение . . . 155
1.9.1.2.1.1. Поток энергии F . . . 155
1.9.1.2.1.2. Энергетическая светимость M . . . 155
1.9.1.2.1.3. Энергоосвещенность E . . . 155
1.9.1.2.1.4. Сила излучения I в направлении Δ . . . 155
1.9.1.2.1.5. Энергетическая яркость L в направлении Δ . . . 155
1.9.1.2.2. Излучение черного тела . . . 155
1.9.1.2.2.1. Величина константы Стефана σ . . . 155
1.9.1.2.2.2. Величины констант C_1 и C_2 в уравнении Планка . . . 155
1.9.1.2.2.3. Величина константы Вьена (C_w) . . . 155
1.9.1.2.3. Коэффициент излучения . . . 156
1.9.1.2.4. Величины энергетических светимостей черного тела . . . 157

1.9.1.3. Излучение прозрачных тел . . . 157

1.9.1.4. Излучение реальных тел . . . 158

1.9.1.5. Излучение газов . . . 158

1.9.1.5.1. Общие сведения . . . 158
1.9.1.5.2. Светящееся пламя . . . 159
1.9.1.5.3. Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda p}$ . . . 159
1.9.1.5.4. Коэффициент излучения ε_p . . . 159
1.9.1.5.5. Коэффициент излучения паров воды . . . 159
1.9.1.5.6. Коэффициент излучения ε углекислого газа . . . 161

1.9.2. Передача тепла кондукцией . . . 161

1.9.2.1. Связующее соединение . . . 161

1.9.2.2. Теплопроводность металлов, изолирующих и строительных материалов . . . 162

1.9.2.3. Теплопроводность газов и паров . . . 162

1.9.2.3.1. Коэффициент теплопроводности λ . . . 162
1.9.2.3.2. Формула Сазерленда . . . 163
1.9.2.3.3. Теплопроводность воздуха . . . 163
1.9.2.3.4. Теплопроводность паров воды . . . 163

1.9.3. Передача тепла конвекцией . . . 163

1.9.3.1. Определение . . . 163

1.9.3.2. Безразмерные числа, применяемые в соотношениях для коэффициента тепловой конвекции . . . 163

1.9.3.3. Значения числа Прандтля $\frac{\eta C_p}{\lambda}$ для некоторых газов и жидкостей при атмосферном давлении и 100°C . . . 163

1.9.4. Смешанная передача тепла кондукцией, конвекцией и излучением . . . 163

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.9.5. Физико-химические и энергетические аспекты горения газов 164

1.9.5.1. Стехиометрическое горение 164

1.9.5.2. Полное сгорание при избытке воздуха 164

1.9.5.3. Полное сгорание при недостатке воздуха 167

1.9.5.4. Неполное горение 167

1.10. МАТЕРИАЛЫ 168

1.10.1. Стальные газопроводные трубы 168

1.10.1.1. Соотношения между наиболее употребляемыми обозначениями 168

1.10.1.2. Стальные бесшовные газопроводные трубы внешним диаметром от 42,4 мм до 406,4 мм (по техническим спецификациям GDF 521 - 10) 168

1.10.1.3. Трубы сварные стальные газопроводные 169

1.10.1.4. Каталог сварных стальных газопроводных труб 170

1.10.1.5. Каталог стальных бесшовных газопроводных труб 174

1.10.1.6. Сварные соединения труб или стальных деталей из нелегированных или слаболегированных сталей 177

1.10.2. Чугунные газовые трубы 178

1.10.2.1. Характеристики чугунов, используемых для изготовления газопроводных труб 178

1.10.2.2. Характеристика труб серии K = 9 (под это название подпадают трубы с DN ≤ 200) . . 178

1.10.2.3. Различные типы чугунных соединений 178

1.10.2.4. Монтаж одного из соединений на чугуне 178

1.10.3. Медные газопроводные трубы. 178

1.10.3.1. Характеристики меди и ее сплавов. 178

1.10.3.1.1. Медные сплавы 179

1.10.3.1.2. Спецификации 179

1.10.3.2. Характеристики труб 179

1.10.3.2.1. Размеры 179

1.10.3.2.2. Минимальные механические характеристики 179

1.10.3.3. Характеристики соединительных деталей. 179

1.10.3.4. Различные способы соединений 180

1.10.3.4.1. Капиллярная пайка 180

1.10.3.4.2. Сварка паянием 180

1.10.3.4.3. Наплавляемые металлы (припои) 180

1.10.3.4.3.1. Жесткая капиллярная пайка (B. 524.3) 180

1.10.3.4.3.2. Мягкая капиллярная сварка (B. 524.4) 180

1.10.3.4.3.3. Сварка паянием (B. 524.7) 180

1.10.3.4.4. Квалификация персонала 180

1.10.4. Алюминиевые газопроводные трубы 180

1.10.4.1. Характеристики алюминия 180

1.10.4.1.1. Физические характеристики 180

1.10.4.1.2. Химические свойства 180

1.10.4.2. Трубки и соединительные детали для газопроводов. 180

1.10.4.3. Сборка труб и трубные соединения из сплава алюминия 181

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.10.5. Полиэтиленовые газопроводные трубы 181

1.10.5.1. Свойства полиэтилена марки "5" (PE "5") 181

1.10.5.2. Размеры труб (NF T 54-072) 184

1.10.5.3. Классификация труб 184

1.10.5.4. Трубные соединения 184

1.10.5.5. Условия применения полиэтиленовых труб и изделий 185

1.11. ТЕЧЕНИЕ ФЛЮИДОВ 186

1.11.1. Установившееся течения флюидов 186

1.11.1.1. Определение режима 186

1.11.1.2. Общие уравнения 186

1.11.1.3. Частные случаи 186

1.11.2. Установившиеся течения газа в цилиндрических трубопроводах 187

1.11.2.1. Общая формула для потерь напора 187

1.11.2.2. Число Рейнольдса 187

1.11.2.3. Потери напора в горизонтальных трубопроводах 187

1.11.2.3.1. Совершенный газ. Низкие давления 187

1.11.2.3.1.1. Законы совершенных газов 187

1.11.2.4. Потери напора в негоризонтальных трубопроводах 188

1.11.2.4.1. Общее уравнение 188

1.11.2.4.2. Вертикальный трубопровод (восходящий) при низких давлениях 188

1.11.2.4.3. Реальный газ. Высокие давления 188

1.11.2.5. Расчеты потерь напора (определение коэффициента сопротивления λ) 188

1.11.2.5.1. Опыты Никурадзе 188

1.11.2.5.2. Законы изменения λ из опытов Никурадзе 188

1.11.2.5.3. Промышленные трубопроводы (практические расчеты) 189

1.11.2.5.3.1. Трубы из чугуна 189

1.11.2.5.3.2. Полиэтиленовые трубы 189

1.11.2.5.3.3. Стальные трубы 189

1.11.2.5.3.4. Реальные значения внутренней шероховатости 190

1.11.2.5.4. Практические методы расчета потерь напора 190

1.11.3. Адиабатические течения газа при больших скоростях 190

1.11.3.1. Соотношение Сен-Венана 190

1.11.3.2. Трубка Вентури 190

1.11.3.3. Адиабатическое дросселирование в штуцере 190

1.11.3.4. Смесители 191

1.11.4. Нестационарное течение газа 191

1.11.4.1. Теория нестационарного течения 191

1.11.4.2. Численные решения 192

1.11.5. Течения жидкостей в цилиндрических трубопроводах 192

1.11.5.1. Общая формула 192

1.11.5.2. Течение воды: потери напора в водопроводных сетях 192

1.11.5.2.1. Формула Дарси 192

1.11.5.2.2. Формула Мориса Леви 192

1.11.5.2.3. Формула Кольбрука 192

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.11.5.2.4. Неровности трассы . . . 193
1.11.5.3. Течение жидкого пропана и бутана . . . 193
1.11.5.3.1. Течение жидкого пропана . . . 193
1.11.5.3.2. Течение жидкого бутана . . . 193

1.11.6. Дросселирование газа . . . 193
1.11.6.1. Общие положения . . . 193
1.11.6.2. Принципы работы штуцеров . . . 193
1.11.6.2.1. Схема функционирования . . . 196
1.11.6.2.2. Общие соотношения . . . 196
1.11.6.2.3. Явления, связанные с дросселированием . . . 196
1.11.6.2.4. Штуцеры . . . 197

1.12. МЕТРОЛОГИЯ . . . 197

1.12.1. Измерение температур . . . 197
1.12.1.1. Принципы . . . 197
1.12.1.2. Жидкостные стеклянные термометры расширения . . . 198
1.12.1.3. Манометрические термометры . . . 198
1.12.1.4. Конденсационные манометрические термометры . . . 198
1.12.1.5. Твердые термометры расширения . . . 198
1.12.1.6. Термометры сопротивления . . . 198
1.12.1.6.1. Принцип действия . . . 198
1.12.1.6.2. Электрические характеристики используемых металлов . . . 198
1.12.1.6.3. Термометры с термосопротивлением . . . 199
1.12.1.7. Термопары . . . 199
1.12.1.8. Оптические пирометры . . . 199
1.12.1.8.1. Оптические пирометры полного излучения (тип Фери) . . . 199
1.12.1.8.2. Оптические пирометры с исчезающей нитью . . . 199
1.12.1.9. Сравнительные характеристики приборов для измерения температуры . . . 199
1.12.1.10. Температурные реперы с изменяемой формой . . . 199
1.12.1.11. Цветовые индикаторы температуры . . . 200

1.12.2. Измерение давления . . . 200
1.12.2.1. Определения . . . 200
1.12.2.2. Манометр Фортена . . . 200
1.12.2.3. Манометр с U-образной трубкой . . . 200
1.12.2.4. Манометр с вертикальной трубкой . . . 201
1.12.2.5. Манометр с наклонной трубкой . . . 201
1.12.2.6. Микроманометры . . . 201
1.12.2.6.1. Микроманометр Асканиа . . . 201
1.12.2.6.2. Микроманометр Дебро . . . 201
1.12.2.7. Манометр Бурдона . . . 202
1.12.2.8. Сильфонный манометр . . . 202
1.12.2.9. Грузопоршневой манометр . . . 202
1.12.2.10. Электрические манометры, датчики давления . . . 202
1.12.2.10.1. Емкостные датчики . . . 202
1.12.2.10.2. Датчики сопротивления . . . 202

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.12.2.10.3. Датчики с дифференциальным трансформатором . . . 203
1.12.2.10.4. Датчики с незатухающими колебаниями . . . 203

1.12.3. Измерение расходов методом сужения потока . . . 204

1.12.3.1. Общие соображения . . . 204
1.12.3.1.1. Принцип . . . 204
1.12.3.1.2. Основные формулы . . . 204
1.12.3.1.3. Обозначения . . . 205
1.12.3.1.4. Общие условия использования приборов . . . 205
1.12.3.1.5. Первичные элементы: определения . . . 205

1.12.3.2. Типы отбора давления, используемые с диафрагмой . . . 205
1.12.3.2.1. Отбор давления у фланца . . . 205
1.12.3.2.2. Отбор давления на расстоянии D и D/2 . . . 205
1.12.3.2.3. Отбор давления в углах . . . 205

1.12.3.3. Расходомеры с классичес- кой трубой Вентури (стандарт NF X 10 - 102) . . . 206
1.12.3.3.1. Характеристики . . . 206
1.12.3.3.2. Потери давления . . . 206

1.12.3.4. Область применения сопел Вентури . . . 206

1.12.3.5. Выбор первичных элементов для измерения расхода флюида . . . 207
1.12.3.5.1. Расход флюида . . . 207
1.12.3.5.2. Диаметр трубопровода, отношение диаметров. Число Рейнольдса . . . 207
1.12.3.5.3. Прямые участки на входе и выходе . . . 207
1.12.3.5.4. Потери давления . . . 207

1.12.4. Объемные счетчики . . . 207

1.12.4.1. Общие соображения . . . 207

1.12.4.2. Принципы коррекции плотности . . . 207
1.12.4.2.1. Коррекция плотности поставляемого газа . . . 207
1.12.4.2.2. Автоматическая коррекция плотности . . . 208
1.12.4.2.2.1. Механика . . . 208
1.12.4.2.2.2. Электроника . . . 208

1.12.4.3. Регламентирующие тексты . . . 208

1.12.4.4. Калибр счетчика . . . 208

1.12.4.5. Погрешности . . . 208

1.12.4.6. Основные типы счетчиков . . . 208
1.12.4.6.1. Лопастные счетчики . . . 208
1.12.4.6.2. Турбинные (тахометрические) счетчики . . . 208
1.12.4.6.3. Ротационные счетчики . . . 209
1.12.4.6.4. Объемные вихревые счетчики . . . 210

1.12.5. Измерение плотности . . . 211

1.12.5.1. Определение . . . 211

1.12.5.2. Статические плотномеры . . . 211

1.12.5.3. Динамические плотномеры . . . 211

1.12.6. Измерение относительной плотности . . . 212

1.12.6.1. Определение . . . 212

1.12.6.2. Весовой метод . . . 212

1.12.6.3. Динамический метод . . . 212

1.12.6.4. Плотномер Шиллинга . . . 212

1.12.6.5. Плотномер Гидро . . . 212

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.12.6.6. Гидростатические плотномеры 212
1.12.6.7. Коромысловые плотномеры 213
1.12.6.8. Турбинные плотномеры 213

1.12.7. Измерение шума 213
1.12.7.1. Шум 213
1.12.7.2. Акустическое давление, или звуковое давление 213
1.12.7.3. Акустическая мощность 213
1.12.7.4. Акустическая интенсивность (сила звука) 213
1.12.7.5. Сферическое распространение 214
1.12.7.6. Физиологический уровень 214
1.12.7.7. Характеристика шумов 214
1.12.7.7.1. Характеристика звукового поля 214
1.12.7.7.2. Характеристика источника звука 214
1.12.7.8. Характеристика звуковых полей 214
1.12.7.9. Характеристика источников звука 214
1.12.7.10. Измерения в заглушенных камерах 214
1.12.7.11. Измерение в реверберационных камерах 215
1.12.7.12. Микрофоны 215
1.12.7.13. Измерители силы звука 215
1.12.7.14. Анализаторы шума 215
1.12.7.15. Регистраторы шума 215
1.12.7.16. Измерение шума от работы некоторых устройств 215
1.12.7.17. Измерения в архитектурной акустике 215

1.13. ЭКОНОМИКА 216

1.13.1. Национальные счета 216
1.13.1.1. Что такое национальные счета? 216
1.13.1.2. Какова их структура? 216
1.13.1.3. Каким целям они служат? 216
1.13.1.4. Агрегированные показатели 216
1.13.1.5. Стоимость и объем (I) 218
1.13.1.6. Институциональные единицы и институциональные отрасли 218
1.13.1.6.1. Акционерные и квазиакционерные нефинансовые общества 218
1.13.1.6.2. Кредитные институты 218
1.13.1.6.3. Страховые компании 218
1.13.1.6.4. Государственные административные службы 218
1.13.1.6.5. Частные административные структуры 219
1.13.1.6.6. Домашние хозяйства 219
1.13.1.7. Не финансовые акционерные и квазиакционерные общества 219
1.13.1.7.1. Характеристика сектора 219
1.13.1.7.2. Подсекторы 219
1.13.1.8. Добавленная стоимость 219
1.13.1.9. Валовая добавленная стоимость 219

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.13.2. Производство 220

1.13.2.1. Определения и характеристика 220

1.13.2.1.1. Товарное производство 220
1.13.2.1.2. Производство нетоварных услуг 220

1.13.2.2. Оценка производства 221

1.13.2.3. Формирование валовой стоимости постоянного капитала 221

1.13.2.4. Формирование чистой стоимости постоянного капитала (чистые инвестиции) 221

1.13.3. Инвестиции 221

1.13.3.1. Норма инвестиций в национальной экономике 221

1.13.3.2. Маржинальная эффективность инвестиций 221

1.13.3.3. Различные виды инвестиций 222

1.13.3.4. Производственные инвестиции 222

1.13.3.5. Самофинансирование 222

1.13.4. Внешняя торговля 222

1.13.4.1. Некоторые определения 222

1.13.4.2. Связь экспорта и импорта: внешние потребности 223

1.13.4.3. Связь экспорта и импорта: внутренние потребности 223

1.13.4.4. Значение равновесия текущего баланса 224

1.13.4.4.1. Необходимость импорта 224
1.13.4.4.2. Необходимость экспорта 224
1.13.4.4.3. Равновесие текущего баланса 224

1.13.4.5. Выводы 224

1.13.5. Население. Занятость. Безработица 224

1.13.5.1. Население 224

1.13.5.1.1. Переписи населения 224
1.13.5.1.2. Ежегодные оценки 224

1.13.5.2. Активное население. Занятость. Безработица 224

1.13.5.2.1. Общая численность резидентов страны 224
1.13.5.2.2. Активное население – резиденты страны 226
1.13.5.2.3. Активное занятое население – резиденты страны 226
1.13.5.2.4. Активное занятое внутреннее население 226

1.13.5.3. Рынок труда 226

1.13.6. Потребление и инвестиции в жилье. Доходы 227

1.13.6.1. Конечное потребление домашних хозяйств: товарное и нетоварное 227

1.13.6.1.1. Товарное потребление 227
1.13.6.1.2. Нетоварное потребление 227

1.13.6.2. Источники 227

1.13.6.3. Инвестиции в жилье 227

1.13.7. Производственный аппарат. Промышленное производство 227

1.13.7.1. Производственный аппарат 227

1.13.7.1.1. Определение 227
1.13.7.1.2. Источники информации 228

1.13.7.2. Промышленное производство 228

1.13.7.2.1. Концепция производственного сектора и отрасли 228

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.13.7.2.2. Индекс промышленного производства . . . 228
1.13.7.2.2.1. Область использования индексов . . . 228
1.13.7.2.2.2. Область охвата . . . 228
1.13.7.2.2.3. Перечень показателей . . . 228
1.13.7.2.2.4. Отрасли, не охваченные расчетами . . . 228

1.13.8. Индекс цен . . . 228

1.13.8.1. Месячный индекс потребительских цен . . . 228
1.13.8.1.1. Период отсчета . . . 231
1.13.8.1.2. Область наблюдений . . . 232
1.13.8.1.3. Коэффициенты взвешивания . . . 232
1.13.8.1.4. Переменные . . . 232
1.13.8.1.5. Наблюдение за ценами . . . 232
1.13.8.1.6. Правила расчета . . . 232
1.13.8.1.7. Свежие продукты . . . 232
1.13.8.1.8. Квартирная плата . . . 233
1.13.8.1.9. Реклама . . . 233

1.13.8.2. Промышленность: индексы оптовых цен и цен реализации продукции . . . 233
1.13.8.2.1. Индексы оптовых цен энергоносителей и некоторых видов промышленной продукции . . . 233
1.13.8.2.2. Индексы цен реализации на стадии производства . . . 236
1.13.8.2.2.1. Сельскохозяйственное производство . . . 236
1.13.8.2.2.2. Отрасли, не включаемые в сельскохозяйственное производство . . . 237

1.13.8.3. Сельское хозяйство: индекс цен на промышленную продукцию, используемую для сельскохозяйственного производства . . . 237

1.13.8.4. Строительство: индекс стоимости строительства . . . 238

1.13.9. Деньги . . . 238

1.13.9.1. Пересмотр методологии денежной статистики . . . 238
1.13.9.1.1. Первый этап (1985 - 1986) . . . 238
1.13.9.1.2. Второй этап (1987 г.) . . . 239

1.13.9.2. Денежные агрегаты . . . 239

1.13.9.3. Кредит. Процентная ставка . . . 240

1.13.9.4. Финансовый рынок . . . 241

1.13.10. Словарь экономических терминов . . . 244

1.14. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ . . . 251

1.14.1. Условные обозначения . . . 251

1.14.2. Численные данные . . . 252

1.15. СВОЙСТВА ЧИСТЫХ ГАЗОВ . . . 288

2. ДОБЫЧА И ПЕРЕРАБОТКА

2.1. ВВЕДЕНИЕ . . . 299

2.2. СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ . . . 300

ОГЛАВЛЕНИЕ

2.3. СЫРЬЕ 307

2.3.1. Угли 307

2.3.1.1. Классификация углей 307

2.3.1.1.1. Разделение на классы 307
2.3.1.1.2. Подразделение на группы 307
2.3.1.1.3. Подразделение на подгруппы 307

2.3.1.2. Химический состав угля 309

2.3.2. Характеристика жидких нефтепродуктов. 309

2.3.3. Характеристики коммерческих пропана и бутана. 309

2.3.4. Газ нефтезаводов 311

2.3.5. Неочищенный природный газ 312

2.4. ДОБЫЧА ПРИРОДНОГО ГАЗА 312

2.4.1. Требования к товарным и сжиженным газам для транспорта 312

2.4.1.1. Требования, связанные с транспортом в газообразном состоянии 312

2.4.1.2. Требования, связанные с транспортом газа в жидком виде (С.Н.Г.) 313

2.4.2. Типовая схема эксплуатационной скважины 313

2.4.3. Типовая схема переработки 314

2.4.3.1. Цель переработки 314

2.4.3.2. Схема переработки 314

2.4.4. Сепарация конденсата и воды 315

2.4.4.1. Типы сепараторов 315

2.4.4.2. Технический расчет сепараторов 315

2.4.4.2.1. Вертикальный двухфазный сепаратор 315
2.4.4.2.2. Вертикальный трехфазный сепаратор 315
2.4.4.2.3. Двухфазный или трехфазный горизонтальный сепаратор 315

2.4.5. Извлечение кислых компонентов 315

2.4.5.1. Критерии выбора метода извлечения кислых компонентов 315

2.4.5.1.1. Вид примесей, которые необходимо извлечь 316
2.4.5.1.2. Избирательность 317
2.4.5.1.3. Расход газа, подлежащего переработке. Давление, температура 317
2.4.5.1.4. Извлечение серы 317
2.4.5.1.5. Потребление энергии 317
2.4.5.1.6. Соображения оперативные и экономические 317

2.4.5.2. Представление процессов извлечения кислых компонентов 318

2.4.5.2.1. Процессы, базирующиеся на химическом равновесии, зависящем от давления и температуры 318
2.4.5.2.1.1. Аминовый процесс 318
2.4.5.2.1.2. Процессы с использованием карбоната калия 318
2.4.5.2.2. Процессы, базирующиеся на физической абсорбции 318
2.4.5.2.3. Процессы превращения H_2S непосредственнов серу 319
2.4.5.2.4. Процессы на твердом слое 319

2.4.5.3. Аминовые процессы 319

2.4.5.3.1. Сравнение аминовых процессов 320

ОГЛАВЛЕНИЕ

2.4.5.3.2. Описание типовой установки . . . 320
2.4.5.3.2.1. Качество серы . . . 320
2.4.5.3.2.2. Дополнительный контур . . . 320
2.4.5.3.2.3. Экономия энергии . . . 320
2.4.5.3.3. Основа технического расчета . . . 321

2.4.5.4. Процессы очистки карбонатом калия . . . 321

2.4.5.4.1. Базовый процесс ("Горячий поташ") . . . 321
2.4.5.4.2. Различные процессы . . . 324

2.4.5.5. Процессы с физическими растворителями . . . 324

2.4.5.5.1. Характеристики физической абсорбции . . . 324
2.4.5.5.1.1. Влияние давления и температуры . . . 324
2.4.5.5.1.2. Растворимость газов. . . . 324
2.4.5.5.1.3. Регенерация растворителя . . . 324
2.4.5.5.2. Характеристика физических растворителей . . . 325
2.4.5.5.3. Описание принципиальной схемы установки . . . 325
2.4.5.5.4. Промышленные процессы . . . 325

2.4.5.6. Процессы прямой конверсии . . . 326

2.4.5.6.1. Общие характеристики . . . 326
2.4.5.6.2. Процесс "Стретфорд" . . . 327

2.4.5.7. Процессы на твердом слое . . . 327

2.4.5.7.1. Оксид железа . . . 327
2.4.5.7.2. Активированный уголь . . . 328
2.4.5.7.3. Молекулярные сита . . . 328

2.4.5.8. Список литературы . . . 329

2.4.6. Точка росы по воде . . . 329

2.4.6.1. Поведение системы вода–углеводороды . . . 329

2.4.6.1.1. Влагосодержание природного газа . . . 329
2.4.6.1.1.1. Номограмма Мак Кита . . . 329
2.4.6.1.1.2. Таблицы Бюкачека [1] . . . 329
2.4.6.1.2. Гидраты . . . 331
2.4.6.1.2.1. Метод Катца . . . 331
2.4.6.1.2.2. Метод Катца и Карсона . . . 331
2.4.6.1.2.3. Метод Трекела и Кемпбела [4] . . . 332
2.4.6.1.3. Осушка природного газа . . . 332

2.4.6.2. Ингибирование гидратов . . . 332

2.4.6.2.1. Расход ингибитора . . . 332
2.4.6.2.2. Различные типы используемых ингибиторов . . . 333
2.4.6.2.2.1. Метанол . . . 333
2.4.6.2.2.2. Гликоли. . . . 334
2.4.6.2.3. Описание процесса ингибирования . . . 334

2.4.6.3. Абсорбция жидким растворителем . . . 335

2.4.6.3.1. Различные типы растворителей . . . 335
2.4.6.3.2. Описание установки гликолевой осушки . . . 335
2.4.6.3.3. Условия работы и рабочие параметры . . . 336
2.4.6.3.4. Проблемы использования . . . 336
2.4.6.3.4.1. Абсорбция углеводородов . . . 336
2.4.6.3.4.2. Потери гликоля . . . 337
2.4.6.3.4.3. Разложение гликоля . . . 337
2.4.6.3.4.4. Коррозия . . . 337
2.4.6.3.4.5. Безопасность . . . 337
2.4.6.3.4.6. Автоматизация . . . 337

2.4.6.4. Адсорбция твердым сорбентом . . . 337

2.4.6.4.1. Осушка газов адсорбцией и различные типы адсорбентов . . . 337
2.4.6.4.1.1. Осуществление адсорбции . . . 337
2.4.6.4.1.2. Адсорбенты . . . 338
2.4.6.4.2. Описание установки осушки . . . 339
2.4.6.4.3. Проблемы использования . . . 339

ОГЛАВЛЕНИЕ

2.4.6.5. Обезвоживание охлаждением и снижением давления . . . 339

2.4.6.6. Список литературы . . . 339

2.4.7. Точка росы по углеводородам и извлечение C_2, C_3, C_4 . . . 339

2.4.7.1. Введение . . . 339

2.4.7.2. Отбензинивание абсорбцией . . . 340

2.4.7.2.1. Принцип и схема обработки . . . 340
2.4.7.2.1.1. Принцип . . . 340
2.4.7.2.1.2. Факторы, обусловливающие абсорбцию . . . 340
2.4.7.2.1.3. Этапы отбензинивания абсорбцией . . . 341
2.4.7.2.2. Описание установки . . . 341
2.4.7.2.3. Применение . . . 341
2.4.7.2.3.1. Области применения . . . 341
2.4.7.2.3.2. Преимущества. . . . 341
2.4.7.2.3.3. Недостатки . . . 342
2.4.7.2.4. Оперативные меры предосторожности . . . 342

2.4.7.3. Отбензинивание охлаждением. . . . 342

2.4.7.3.1. Принципы и различные процессы. . . . 342
2.4.7.3.2. Внешнее охлаждение . . . 342
2.4.7.3.3. Изоэнтальпийное расширение. . . . 342
2.4.7.3.3.1. Область применения и ограничения. . . . 342
2.4.7.3.3.2. Оперативные меры предосторожности. . . . 343
2.4.7.3.4. Политропное расширение в турбине . . . 343
2.4.7.3.4.1. Области применения . . . 343
2.4.7.3.4.2. Описание установки отбензинивания . . . 343
2.4.7.3.4.3. Термический сепаратор . . . 344

2.4.7.4. Отбензинивание адсорбцией . . . 344

2.4.7.4.1. Принцип. Адсорбция нескольких компонентов . . . 344
2.4.7.4.2. Практические аспекты . . . 345
2.4.7.4.3. Обычные адсорбенты. . . . 345
2.4.7.4.4. Описание установки . . . 346

2.4.7.5. Особые аспекты некоторых процессов отбензинивания . . . 346

2.4.7.6. Список литературы . . . 347

2.4.8. Извлечение ртути . . . 347

2.4.8.1. Количество ртути, присутствующей в природном газе . . . 347

2.4.8.2. На каком этапе необходимо извлекать ртуть? . . . 347

2.4.8.2.1. Для распределительных сетей . . . 347
2.4.8.2.2. Установки сжижения . . . 347

2.4.8.3. Процессы извлечения ртути . . . 347

2.4.8.3.1. Для распределительных сетей . . . 347
2.4.8.3.2. Перед сжижением газа . . . 348

2.4.8.4. Список литературы . . . 348

2.4.9. Извлечение азота (дезазотирование) . . . 348

2.4.9.1. Определение . . . 348

2.4.9.2. Принципиальная схема классической установки извлечения гелия в жидком виде . . . 349

2.4.9.3. Деталь части сжижения–дистилляции . . . 350

2.4.9.4. Пример результатов, полученных на установке Одолянов ("Odolanov", Польша) . . . 350

2.4.9.5. Установка завода Альфортвиль ("Alfortville") для переработки газа Гронинга ("Groninque") . . . 351

2.4.9.6. Список литературы . . . 351

ОГЛАВЛЕНИЕ

2.5. ПРОИЗВОДСТВО ИСКУССТВЕННОГО ГАЗА 352

2.5.1. Общие соображения 352

2.5.2. Производство газов из твердых топлив 352

2.5.2.1. Производство газа пирогенизацией угля 352

2.5.2.2. Газификация твердых минеральных топлив 352

2.5.2.2.1. Введение 352
2.5.2.2.2. Основные реакции 353
2.5.2.2.3. Реакции газификации 353
2.5.2.2.4. Газогенераторы с неподвижным слоем, работающие на воздухе при атмосферном давлении 353
2.5.2.2.4.1. Газогенераторы на коксе 353
2.5.2.2.4.2. Газогенераторы на угле 354
2.5.2.2.5. Циклическая работа на воздухе 354
2.5.2.2.5.1. Водяной газ чистый ("голубой"), или карбюраторный 354
2.5.2.2.5.2. Газификация угля паром 355
2.5.2.2.6. Использование кислорода 355
2.5.2.2.6.1. Неподвижный слой (процесс Лурги) 355
2.5.2.2.6.2. Кипящий слой (процесс Винклера) 356
2.5.2.2.6.3. Уголь, измельченный в порошок (процессы Копперс-Тотцек и Тексако) . . 356
2.5.2.2.6.4. Усовершенствование процессов 356
2.5.2.2.6.5. Примеры процессов 356

2.5.3. Изготовление газа первого семейства из нефтепродуктов 357

2.5.3.1. Общие соображения 357

2.5.3.1.1. Принцип 357
2.5.3.1.2. Классификация и основные характеристики 357

2.5.3.2. Аутотермические процессы (1-я группа) 357

2.5.3.2.1. Общие соображения 357
2.5.3.2.1.1. Принципы 357
2.5.3.2.1.2. Оборудование 358
2.5.3.2.1.3. Неудобства 358
2.5.3.2.1.4. Преимущества 359
2.5.3.2.1.5. Использование 359

2.5.3.3. Циклические процессы (2-я группа) 359

2.5.3.3.1. Общие соображения 359
2.5.3.3.1.1. Принципы 359
2.5.3.3.2. Преимущества 359
2.5.3.3.3. Использование 359

2.5.3.4. Непрерывные процессы под давлением (3-я группа) 359

2.5.3.4.1. Общие соображения 359
2.5.3.4.1.1. Принципы 359
2.5.3.4.1.2. Преимущества 361
2.5.3.4.1.3. Использование в газовой промышленности 361

2.5.3.5. Выбор катализаторов 361

2.5.3.6. Тяжелые нефтепродукты 363

2.5.4. Переработка искусственного газа 363

2.5.4.1. Переработка угольного газа 364

2.5.4.1.1. Охлаждение и смолоотделение 364
2.5.4.1.2. Сепарация нафталина 364
2.5.4.1.3. Сепарация аммиака 364
2.5.4.1.4. Сепарация бензолов 364

2.5.4.2. Конверсия CO водяным паром (или Шифт конверсия) 365

2.5.4.2.1. Общие соображения 365
2.5.4.2.2. Термодинамический аспект 365

ОГЛАВЛЕНИЕ

2.5.4.2.3. Каталитический аспект 366
2.5.4.2.3.1. Катализаторы конверсии при высокой температуре 366
2.5.4.2.3.2. Катализаторы конверсии при низкой температуре (170 - 275°C) 366
2.5.4.2.3.3. Тиорезистентные катализаторы конверсии 367

2.5.4.3. Список литературы 367

2.5.4.4. Раскисление (обезуглероживание, обессеривание) 368

2.5.5. Производство З.П.Г. 368

2.5.5.1. Газификация паром, или риформинг и метанизация 368
2.5.5.1.1. Риформинг и метанизация 368
2.5.5.1.2. Реакция метанизации и производство З.П.Г. 369
2.5.5.1.2.1. Классический путь 369
2.5.5.1.2.2. Новый путь 369
2.5.5.1.2.3. Блок-схема установки производства З.П.Г. из угля 369

2.5.5.2. Производтсво З.П.Г. гидрогенизацией 369
2.5.5.2.1. Гидрогенизация жидких углеводородов 369
2.5.5.2.2. Гидрогенизация угля 371
2.5.5.2.2.1. Гидрогенизация в жидкой фазе 371
2.5.5.2.2.2. Гидропиролиз "flash" 371

2.5.5.3. Список литературы 371

2.6. НОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ 372

2.6.1. Производство водорода путем электролиза 372

2.6.1.1. Общие соображения 372

2.6.1.2. Принцип 372

2.6.1.3. Промышленные электролизеры 372

2.6.1.4. Условия работы и результаты 374

2.6.2. Подземная газификация угля 374

2.6.2.1. Рассматриваемые процессы и основные технические проблемы 374

2.6.2.2. Краткая история 375

2.6.2.3. Перспективы 375

2.6.3. Биогаз 375

2.6.3.1. Определение, общие соображения, история 375

2.6.3.2. Производство 375
2.6.3.2.1. Механизмы 375
2.6.3.2.2. Субстраты 376
2.6.3.2.3. Режимы созревания. Системы ферментации 376
2.6.3.2.3.1. Непрерывный режим 376
2.6.3.2.3.2. Прерывистый режим 377
2.6.3.2.4. Особые случаи свалок 377

2.6.3.3. Состав и характеристики биогаза 377

2.6.3.4. Использование биогаза 379

2.6.3.5. Обработка биогаза 379

2.6.3.6. Список литературы 380

ОГЛАВЛЕНИЕ

3. ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 381

3.1.1. Роль подземных хранилищ 381

3.1.2. Различные типы подземных хранилищ газа 382

3.2. ХРАНЕНИЕ В ВОДОНОСНОМ ПЛАСТЕ 383

3.2.1. Основы хранения в водоносном пласте. Геологические данные. Эксплуатация 383

3.2.1.1. Геология и хранение в водоносном пласте 383

3.2.1.1.1. Петрография 383
3.2.1.1.2. Стратиграфия 384
3.2.1.1.3. Тектоника: структурная геология 385

3.2.1.2. Разведка структур, пригодных для хранения в водоносном пласте (методология) . . . 385

3.2.2. Физические механизмы течения в пористых средах 385

3.2.2.1. "Гидравлические" свойства пород: пористость, проницаемость и сжимаемость 386

3.2.2.1.1. Пористость 386
3.2.2.1.2. Проницаемость характерная или абсолютная 386
3.2.2.1.3. Сжимаемость 387
3.2.2.1.3.1. Сжимаемость пород 387
3.2.2.1.3.2. Сжимаемость флюидов (β_ϕ) 387
3.2.2.1.3.3. Кажущаяся сжимаемость 387

3.2.2.2. Влияние одновременного присутствия двух флюидов (вода и газ) в пористой среде (насыщенность, капиллярное давление, гистерезис) 387

3.2.2.2.1. Насыщенность 387
3.2.2.2.2. Капиллярное давление 387
3.2.2.2.3. Гистерезис гидравлических свойств 387

3.2.3. Поведение водоносного горизонта, используемого для хранения газа; технический расчет хранилища газа в водоносном горизонте 388

3.2.3.1. Основные уравнения двухфазного изотермического течения в пористой среде 389

3.2.3.1.1. Несмешивающиеся течения 389
3.2.3.1.2. Смешивающиеся течения 389

3.2.3.2. Максимальное давление 390

3.2.3.3. Максимальный темп закачки при первом заполнении 390

3.2.3.3.1. Критическая скорость 390
3.2.3.3.2. Предельное давление 390

3.2.3.4. Максимальная емкость хранилища 390

3.2.3.5. "Дыхание" 391

3.2.3.6. Пиковый расход 391

3.2.4. ОБОРУДОВАНИЕ ХРАНИЛИЩ 392

3.2.4.1. Скважины 392

3.2.4.1.1. Основные функции скважин 392
3.2.4.1.1.1. Разведочная скважина 392
3.2.4.1.1.2. Эксплуатационная скважина 392
3.2.4.1.1.3. Контрольная скважина 392
3.2.4.1.2. Бурение и крепление скважин 392
3.2.4.1.3. Освоение скважин (complétion) 392

ОГЛАВЛЕНИЕ

3.2.4.2. Наземное оборудование 395

3.2.5. Общие соображения по эксплуатации хранилищ 395

3.2.5.1. Контроль 395

3.2.5.1.1. Обычные наблюдения 395
3.2.5.1.2. Распространение газового пузыря 395
3.2.5.1.3. Потенциал резервуара: давление в недрах газового пузыря; продуктивность скважин 395
3.2.5.1.3.1. Потери давления в призабойной зоне скважины, продуктивность скважины 396
3.2.5.1.3.2. Потери давления в скважине 396
3.2.5.1.3.3. Продуктивность скважины и приток воды 396
3.2.5.1.3.4. Продуктивность скважин и вынос песка 396

3.2.5.2. Ремонт скважин 396

3.2.5.2.1. Легкий ремонт 396
3.2.5.2.1.1. Работа на кабеле ("wire-line") 396
3.2.5.2.1.2. Работа под давлением "snubbing" 397
3.2.5.2.1.3. Намотанная труба ("coil-tubing") 397
3.2.5.2.1.4. Ремонт устьев скважин 397
3.2.5.2.1.5. Проверка предохранительных клапанов и их поверхностных аппаратов управления и контроля 397
3.2.5.2.2. Капитальный ремонт 397

3.2.6. Стоимость хранения в водоносном горизонте 397

3.2.7. Список литературы 398

3.2.7.1. Книги 398

3.2.7.2. Сообщения 398

3.3. ХРАНЕНИЕ В СОЛЯНЫХ ПОЛОСТЯХ 400

3.3.1. Геологические данные. Разведка 400

3.3.1.1. Геология и соленосные отложения 400

3.3.1.2. Разведка 402

3.3.1.2.1. Задачи 402
3.3.1.2.2. Программа разведки соленосных отложений 402
3.3.1.2.2.1. Гравиразведка 402
3.3.1.2.2.2. Сейсморазведка 402
3.3.1.2.2.3. Разведочное бурение 402
3.3.1.2.2.4. Постоянное изучение (в процессе бурения) 402
3.3.1.2.2.5. Изучение кернов 402
3.3.1.2.2.6. Различные геофизические методы исследований (в конце проходки) . . . 402

3.3.2. Основные положения эксплуатации хранилища газа в соляной полости 402

3.3.3. Устойчивость полостей 403

3.3.3.1. Изменение объема полостей; текучесть каменной соли 404

3.3.3.2. Размеры и расположение полости в пространстве 405

3.3.3.2.1. Устойчивость в отношении предупреждения разрушений 406
3.3.3.2.1.1. Учет опасностей 406
3.3.3.2.1.2. Требования к размерам с точки зрения предупреждения разрушения . . . 406
3.3.3.2.2. Герметичность 406
3.3.3.2.3. Сохранение потенциальной емкости хранилища 406

3.3.4. Термодинамические аспекты хранения газа в полостях: модель эксплуатации 406

3.3.5. Наблюдение за полостями; контроль за эксплуатацией 410

ОГЛАВЛЕНИЕ

3.3.6. Размыв полостей 411

3.3.7. Эксплуатационное газовое оборудование 411

3.3.7.1. Скважины 411

3.3.7.1.1. Бурение и крепление 412

3.3.7.1.2. Обустройство газовой скважины 412

3.3.7.2. Поверхностное оборудование 412

3.3.8. Стоимость хранения в соляной полости 412

3.3.9. Список литературы 414

3.3.9.1. Конгрессы 414

3.3.9.2. Журналы 414

3.3.9.3. Книги 414

3.3.9.4. Сообщения 414

3.4. ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ С.Н.Г. 415

3.4.1. Хранение в соляных полостях 415

3.4.1.1. Проходка полостей 415

3.4.1.2. Эксплуатация 415

3.4.2. Хранение в горных выработках 415

3.4.2.1. Условия хранения 415

3.4.2.2. Динамическая герметичность 415

3.4.2.3. Проходка 416

3.4.2.4. Эксплуатация 416

3.5. ДРУГИЕ ВИДЫ ХРАНЕНИЯ 418

3.6. ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ – ПРАВИЛА 418

3.6.1. Тексты, относящиеся к работам по поискам, оборудованию и эксплуатации подземных хранилищ 418

3.6.2. Общие тексты 419

3.6.3. Декларация на изыскание и разрешение на изыскание 419

3.6.4. Правила, связанные с подземными водами 419

3.6.5. Статья 131 Горного кодекса 419

3.6.6. Случай полостей, сделанных в соли 420

3.6.7. Тексты по вопросу о защите природы и окружающей среды 420

3.6.8. Другие процедуры, пригодные для применения 420

ОГЛАВЛЕНИЕ

3.7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДОКУМЕНТЫ 423

3.7.1. Определение параметров водоносного пласта по данным гидродинамических исследований: исследования взаимодействия скважин 423

3.7.1.1. Исследования скважин 423

3.7.1.2. Исследования взаимодействия скважин 423

3.7.2. Основные геофизические методы исследований в конце бурения 424

3.7.3. Основные геофизические методы при эксплуатации 425

3.7.4. Технические данные парка подземных хранилищ газа, используемых во Франции . . . 425

3.7.5. Список литературы 427

4. СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ (СПГ)

4.1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СПГ И ТИПЫ УСТАНОВОК СЖИЖЕНИЯ 429

4.1.1. Этапы развития 429

4.1.2. Типовые схемы установок СПГ 432

4.1.2.1. Завод сжижения и метановый терминал 432

4.1.2.2. Станция сглаживания пиковых нагрузок ("пик-шейвинг") 432

4.1.2.3. Вспомогательная (спутниковая) станция СПГ 433

4.1.3. Установки и морской транспорт СПГ в мире 433

4.2. ТЕРМОДИНАМИКА И МЕТРОЛОГИЯ СПГ 434

4.2.1. Термодинамика 434

4.2.2. Метрология 435

4.2.2.1. Измерение давления 435

4.2.2.2. Измерение температуры 435

4.2.2.3. Замер и обнаружение уровня СПГ в резервуаре 435

4.2.2.3.1. Измерители уровня 435

4.2.2.3.1.1. Емкостные измерители с постоянным изменением (вариацией) 435

4.2.2.3.1.2. Ультразвуковые измерители 435

4.2.2.3.1.3. Измерители на основе измерения давления 435

4.2.2.3.1.4. Поплавковые измерители уровня (уровнемеры) 435

4.2.2.3.2. Сигнализаторы предельного уровня 436

4.2.2.3.2.1. Поплавковые сигнализаторы предельного уровня 436

4.2.2.3.2.2. Сигнализаторы уровня ультразвуковые 436

4.2.2.4. Измерение объемов 436

4.2.2.5. Измерение расходов СПГ и холодного газа 436

4.2.2.6. Определение состава СПГ 437

4.2.2.6.1. Отбор проб СПГ 437

4.2.2.6.1.1. Непрерывный отбор пробы 437

4.2.2.6.1.2. Точечный (разовый) отбор проб 438

ОГЛАВЛЕНИЕ

4.2.2.6.2. Система анализа 438
4.2.2.7. Измерение плотности 439
4.2.2.8. Измерение теплоты сгорания 439
4.2.2.9. Внутренний осмотр резервуаров, наполненных СПГ 439

4.2.3. Расчет физических свойств СПГ 439

4.3. ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ 443

4.3.1. Металлы и низкотемпературные (криогенные) сплавы 443
4.3.1.1. Металлургия и низкие температуры 443
4.3.1.2. Металлы и сплавы без зоны перехода пластичности 443
4.3.1.2.1. Медь, алюминий, никель 443
4.3.1.2.2. Аустенитные стали 444
4.3.1.3. Металлы и сплавы, имеющие зону перехода пластичности 445
4.3.1.4. Частный случай сталей со структурным отвердением 446
4.3.1.5. Сварка металлов и сплавов, используемых в области СПГ 446
4.3.1.5.1. Медь и медные сплавы 446
4.3.1.5.2. Алюминий и его сплавы 446
4.3.1.5.3. Аустенитные стали 446
4.3.1.5.4. Стали с 9% содержанием никеля 446

4.3.2. Другие криогенные материалы 446
4.3.2.1. Земля 446
4.3.2.2. Бетоны 447
4.3.2.3. Древесные материалы 447
4.3.2.4. Пластмассы для стыковых соединений и арматуры 447

4.3.3. Изолирующие материалы 448
4.3.3.1. Критерии выбора термоизоляции в криогенной технике 448
4.3.3.1.1. Физические критерии 448
4.3.3.1.1.1. Коэффициент теплопроводности 448
4.3.3.1.1.2. Непроницаемость 448
4.3.3.1.1.3. Старение 448
4.3.3.1.2. Механические критерии 448
4.3.3.1.2.1. Плотность 448
4.3.3.1.2.2. Термическая усадка 448
4.3.3.1.2.3. Жесткость 448
4.3.3.1.2.4. Ударопрочность 448
4.3.3.1.3. Критерии безопасности 448
4.3.3.1.4. Эксплуатационные критерии 448
4.3.3.1.5. Экономические критерии 448
4.3.3.2. Различные типы теплоизолирующих материалов 448
4.3.3.2.1. Многослойные теплоизолирующие материалы 448
4.3.3.2.2. Насыпные и волоконные материалы 449
4.3.3.2.3. Жесткие материалы 449
4.3.3.2.3.1. Пенополистирол 449
4.3.3.2.3.2. Пеностекло 449
4.3.3.2.3.3. Поливинилхлорид (ПВХ) 449
4.3.3.2.3.4. Пенополиуретаны 449
4.3.3.2.4. Сравнение теплопроводностей различных теплоизолирующих материалов . . . 450
4.3.3.3. Примеры применения теплоизолирующих материалов в промышленности СПГ 450
4.3.3.3.1. Трубопроводы 450

ОГЛАВЛЕНИЕ

4.3.3.3.2. Резервуары малой емкости . . . 450
4.3.3.3.3. Хранилища . . . 450
4.3.3.3.3.1. Мембранные резервуары (см. § 4.8.3) . . . 450
4.3.3.3.3.2. Резервуары с плавающей крышей (см. § 4.8.3) . . . 450

4.4. СООРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ СПГ . . . 450

4.4.1. Проблемы, связанные с термодинамическим состоянием СПГ . . . 450

4.4.1.1. Испарение . . . 450

4.4.1.2. Старение СПГ . . . 451

4.4.1.3. Температура СПГ и оборудование, в котором он находится . . . 451

4.4.1.3.1. Осушка оборудования после гидравлических испытаний и перед пуском в эксплуатацию . . . 451
4.4.1.3.2. Захолаживание и поддержание холода . . . 451
4.4.1.3.3. Соединения между нагретыми и холодными частями . . . 451
4.4.1.3.4. Теплоизоляция элементов оборудования . . . 451

4.4.2. Проблемы чисто газовые . . . 452

4.4.2.1. Техника безопасности в области СПГ . . . 452

4.4.2.2. Качество газа . . . 452

4.4.2.3. Одоризация газа . . . 452

4.5. СЖИЖЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА . . . 452

4.5.1. Особенности сжижения природного газа . . . 452

4.5.2. Процессы сжижения природных газов . . . 452

4.5.2.1. Общие сведения о процессах . . . 452

4.5.2.2. Принципиальные схемы холодильных циклов . . . 453

4.5.2.2.1. Циклы с чистым веществом и фазовым переходом . . . 453
4.5.2.2.2. Газовые циклы с расширительной машиной . . . 453
4.5.2.2.3. Циклы со смесью флюидов . . . 456

4.5.2.3. Критерии выбора холодильных циклов . . . 456

4.5.2.3.1. Термодинамическая эффективность . . . 456
4.5.2.3.2. Капитальные вложения . . . 456
4.5.2.3.3. Простота и гибкость эксплуатации . . . 456

4.5.2.4. Основные применяемые циклы . . . 456

4.5.2.4.1. Газовые циклы с турбодетандером . . . 456
4.5.2.4.2. Классические газовые циклы . . . 457
4.5.2.4.3. Смешанные циклы . . . 458

4.5.2.5. Очистка и фракционирование . . . 461

4.5.2.5.1. Осушка . . . 461
4.5.2.5.2. Очистка от углекислого газа . . . 461
4.5.2.5.3. Извлечение сероводорода . . . 461
4.5.2.5.4. Другие компоненты . . . 461

4.5.3. Оборудование установок сжижения . . . 461

4.5.3.1. Теплообменники . . . 461

4.5.3.1.1. Теплообменники с горячим источником в окружающей среде . . . 461
4.5.3.1.2. Криогенные теплообменники . . . 461
4.5.3.1.2.1. "Навитые теплообменники" . . . 461

ОГЛАВЛЕНИЕ

4.5.3.1.2.2. Теплообменники алюминиевые пластинчатые, паянные с погружением в баню . . . 462

4.5.3.2. Компрессоры . . . 465

4.6. ТРАНСПОРТ СПГ . . . 465

4.6.1. Морской транспорт . . . 465

4.6.1.1. Общие соображения . . . 465

4.6.1.2. Технические характеристики метановоза . . . 465

4.6.1.2.1. Конструкция криогенных танков . . . 465

4.6.1.2.1.1. Мембранные танки . . . 465

4.6.1.2.1.2. Самонесущие или независимые танки . . . 465

4.6.1.2.2. Общая конструкция метановозов . . . 468

4.6.1.2.2.1. Грузовой отсек . . . 468

4.6.1.2.2.2. Двигательные установки . . . 468

4.6.1.2.2.3. Вспомогательное оборудование танков . . . 470

4.6.1.2.2.4. Оборудование безопасности . . . 470

4.6.1.3. Эксплуатация метановозов . . . 470

4.6.1.3.1. Контрактные вопросы . . . 470

4.6.1.3.2. Различные фазы эксплуатации . . . 471

4.6.1.3.2.1. Процедура стоянки метановоза . . . 471

4.6.1.3.2.2. Особенности операций налива . . . 471

4.6.1.3.2.3. Особенности операции слива . . . 471

4.6.1.3.2.4. Расчет количеств энергии . . . 472

4.6.1.3.2.5. Плавание с грузом . . . 472

4.6.1.3.2.6. Обратное плавание . . . 472

4.6.1.3.2.7. Некоторые особые операции . . . 472

4.6.2. Наземный транспорт . . . 474

4.7. РЕГАЗИФИКАЦИЯ . . . 474

4.7.1. Принцип и технологический расчет . . . 474

4.7.1.1. Корректировка параметров распределяемого газа . . . 474

4.7.1.2. Рекуперация холода из СПГ . . . 474

4.7.1.2.1. Основные внутренние способы . . . 475

4.7.1.2.1.1. Перекачка СПГ под высоким давлением . . . 475

4.7.1.2.1.2. Рекуперация испарений . . . 475

4.7.1.2.1.3. Регулирование качества сетевого газа . . . 476

4.7.1.2.2. Основные внешние способы . . . 476

4.7.1.2.2.1. Сепарация и ожижение компонентов воздуха . . . 477

4.7.1.2.2.2. Сжижение и получение твердого диоксида углерода . . . 477

4.7.1.2.2.3. Замораживание и низкотемпературное хранение пищевых продуктов . . . 479

4.7.1.2.2.4. Производство электроэнергии . . . 479

4.7.2. Регазификаторы . . . 480

4.7.3. Передвижные установки регазификации . . . 480

4.7.3.1. Общие сведения . . . 480

4.7.3.2. Функционирование . . . 480

4.8. РЕЗЕРВУАРЫ ХРАНЕНИЯ СПГ . . . 481

4.8.1. Общие сведения . . . 481

ОГЛАВЛЕНИЕ

4.8.2. Типы резервуаров 481

4.8.3. Конструкции резервуаров 481

4.8.3.1. Классические резервуары 481

4.8.3.1.1. С металлическим внутренним корпусом 481
4.8.3.1.2. Внешний корпус 482
4.8.3.1.3. Теплоизолируемое кольцевое пространство 482
4.8.3.1.4. Схемы классических резервуаров 482

4.8.3.2. Особые резервуары 483

4.8.3.2.1. Резервуары с бетонной внутренней емкостью, система Прелоад (предварительно-напряженный бетон) 483
4.8.3.2.2. Подземные резервуары в замороженном грунте, система Конч 483
4.8.3.2.3. Экспериментальные подземные резервуары в замороженных емкостях; система Жеосток-Дистригаз 483

4.8.3.3. Сравнение различных конструкций 483

4.8.4. Оборудование резервуаров 483

4.8.4.1. Обвязка (трубопроводы) 483

4.8.4.1.1. Главные трубопроводы 483
4.8.4.1.1.1. Заполнение СПГ 483
4.8.4.1.1.2. Слив СПГ 483
4.8.4.1.1.3. Удаление испарений 483
4.8.4.1.2. Прочие трубопроводы 485
4.8.4.1.2.1. Захолаживание 485
4.8.4.1.2.2. Контроль кольцевого изоляционного пространства 485
4.8.4.1.2.3. Перемешивание 485
4.8.4.1.2.4. Переполнение (возможное) 485

4.8.4.2. Дополнительное оборудование и приборы 485

4.8.5. Пусковые работы и эксплуатация 485

4.9. ПЕРЕКАЧКА 486

4.9.1. Перекачка СПГ 486

4.9.1.1. Краткие теоретические сведения о центробежных насосах 486

4.9.1.1.1. Принцип работы 486
4.9.1.1.2. Абсолютная высота всасывания 487
4.9.1.1.3. Кавитация 487
4.9.1.1.4. Характеристики насоса (зависимость напора от подачи) 487
4.9.1.1.5. Изменение скорости 487
4.9.1.1.6. Практическая расчетная формула для мощности насоса 487
4.9.1.1.7. Возможности регулирования производительности (подачи) 487
4.9.1.1.8. Возможности различной группировки насосов 488

4.9.1.2. Типы насосов 488

4.9.1.2.1. Горизонтальные насосы 488
4.9.1.2.2. Вертикальные, погружные в загрузочную емкость, с внешним приводом 488
4.9.1.2.3. Групповые мотонасосы вертикальные, погружные в емкость СПГ 489
4.9.1.2.4. Погружные насосы для резервуаров СПГ 489
4.9.1.2.5. Сводные данные об особенностях насосов СПГ 489

4.9.2. Сливные и наливные стоянки 489

4.9.2.1. Общие сведения о сливных и наливных системах 489

4.9.2.1.1. Назначение и состав системы налива (слива) 489
4.9.2.1.2. Описание стояка 490
4.9.2.1.3. Описание основного электрического и гидравлического оборудования 490

ОГЛАВЛЕНИЕ

4.9.2.1.4. Важнейшие особенности конструкции установки слива (налива) . . . 490
4.9.2.1.4.1. Уравновешивание стояка . . . 490
4.9.2.1.4.2. Система контроля движений стояка . . . 491

4.9.2.2. Устройства и стояки слива (налива) СПГ . . . 491

4.9.2.2.1. Используемые материалы . . . 492
4.9.2.2.2. Криогенные поворотные соединения . . . 492
4.9.2.2.3. Термические напряжения . . . 492
4.9.2.2.4. Механические напряжения . . . 492

4.9.3. Трубопроводы обвязки . . . 492

4.9.3.1. Описание обвязки установки СПГ . . . 492

4.9.3.1.1. Основные трубопроводы (сети) . . . 492
4.9.3.1.2. Вспомогательные трубопроводы СПГ . . . 492
4.9.3.1.3. Прочие вспомогательные трубопроводы (сети) . . . 493

4.9.3.2. Особые технические элементы трубопроводов СПГ . . . 493

4.9.3.2.1. Материалы . . . 493
4.9.3.2.2. Испытания . . . 493
4.9.3.2.3. Расчеты толщины стенки, предельной длины, сопротивления изгибу . . . 493
4.9.3.2.3.1. Расчет толщины . . . 493
4.9.3.2.3.2. Расчет предельной длин и сопротивления изгибу . . . 493
4.9.3.2.4. Потери давления . . . 494
4.9.3.2.5. Опоры (см. рис. стр. 495) . . . 494
4.9.3.2.6. Компенсация напряжений, вызванных низкими температурами . . . 494
4.9.3.2.7. Гидравлический удар . . . 494
4.9.3.2.8. Теплоизоляция . . . 494

4.9.3.3. Особый случай гибких трубопроводов . . . 496

4.9.4. Вспомогательные устройства на трубопроводах . . . 496

4.9.4.1. Краны . . . 497

4.9.4.1.1. Особые характеристики . . . 497
4.9.4.1.2. Типы запорных кранов и их применение . . . 497

4.9.4.2. Регуляторы дебита . . . 497

4.9.4.2.1. Основные характеристики . . . 497
4.9.4.2.2. Типы регуляторов дебита и их применение . . . 497

4.9.4.3. Предохранительные клапаны . . . 497

4.9.4.3.1. Особые характеристики . . . 497
4.9.4.3.2. Типы клапанов . . . 497
4.9.4.3.3. Область применения . . . 497

4.10. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЛАСТИ СПГ . . . 497

4.10.1. Утечки СПГ: физические явления и оборудование безопасности . . . 497

4.10.1.1. Поведение СПГ в процессе утечки . . . 497

4.10.1.2. Предотвращение утечек СПГ . . . 500

4.10.1.3. Разлив СПГ . . . 500

4.10.1.3.1. Распространение и испарение разлива СПГ . . . 500
4.10.1.3.1.1. Влияние понижения давления . . . 500
4.10.1.3.1.2. Влияние теплообмена . . . 500
4.10.1.3.1.3. Моделирование распространения слоя и испарения СПГ . . . 501
4.10.1.3.2. Обнаружение и предупреждение разливов СПГ . . . 501

4.10.1.4. Рассеяние облаков паров СПГ . . . 501

4.10.1.4.1. Оценка газовой дисперсии . . . 501
4.10.1.4.2. Контроль рассеивания газового облака СПГ . . . 502

4.10.1.5. Возгорание и ликвидация пожара . . . 502
4.10.1.5.1. Общие сведения о пламени СПГ . . . 502
4.10.1.5.2. Моделирование излучения пожара СПГ . . . 503
4.10.1.5.3. Обнаружение пожара СПГ . . . 503
4.10.1.6. Противопожарная защита . . . 503
4.10.1.6.1. Защита от излучения . . . 503
4.10.1.6.2. Ограничение пламени . . . 504
4.10.1.6.3. Тушение огня СПГ . . . 504
4.10.2. Поведение СПГ в резервуарах . . . 504
4.10.2.1. Общие сведения . . . 504
4.10.2.2. Стратификация . . . 505
4.10.2.2.1. Стратификация, возникающая при наливе . . . 505
4.10.2.2.2. Самопроизвольная стратификация . . . 505
4.10.2.2.3. Математическое моделирование ролл-овера . . . 505
4.10.2.3. Антистратификационные устройства . . . 506
4.10.2.3.1. Налив через отверстия для перемешивания . . . 506
4.10.2.3.2. Рециркуляция через отверстия для перемешивания . . . 506
4.10.2.3.3. Налив через перфорированные трубы . . . 506
4.10.2.3.4. Перемешивание закачкой газа . . . 506
4.11. РЕГЛАМЕНТАЦИЯ В ОБЛАСТИ СПГ . . . 507
4.11.1. Наземные установки СПГ . . . 507
4.11.2. Метановозы . . . 507

5. СЖИЖЕННЫЕ НЕФТЯНЫЕ ГАЗЫ (СНГ)

5.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СНГ В ЕМКОСТЯХ . . . 509
5.1.1. Спецификации . . . 509
5.1.1.1. Таможенные спецификации . . . 509
5.1.1.2. Административные спецификации . . . 510
5.1.2. Организация распределительной сети . . . 510
5.1.3. Баллоны . . . 511
5.1.4. Резервуары хранения небольшой емкости у потребителя . . . 511
5.1.5. Состав газораздаточного пункта . . . 512
5.1.5.1. Баллоны . . . 512
5.1.5.1.1. Средний расход баллона . . . 512
5.1.5.1.2. Расчет количества баллонов, необходимых для одного пункта . . . 512
5.1.5.2. Резервуары . . . 512
5.1.5.2.1. Емкость . . . 512
5.1.5.2.2. Максимальный постоянный расход малых резервуаров пропана (прекращение отбора при 25% емкости). . . . 513

ОГЛАВЛЕНИЕ

5.1.6. Пункт хранения баллонов 513

5.1.6.1. Состав баллонного пункта 513

5.1.6.2. Несколько правил безопасности, касающихся пунктов хранения баллонов (постановление от 2 августа 1977 г. Д.Т.U. 61 - 1) 513

5.1.6.2.1. Бутановые баллоны 513

5.1.6.2.2. Пропановые баллоны 513

5.1.6.2.3. Пункты пропановых баллонов 515

5.1.7. Пункт стационарных резервуаров 516

5.1.7.1. Размещение 516

5.1.7.2. Использование ограничителя давления 516

5.1.7.3. Устройство налива стационарных резервуаров (постановление от 30 июля 1979 г., статья 7 и 9) 516

5.2. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ СЖИЖЕННЫХ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ 516

5.2.1. Подача СНГ в бытовые сети 516

5.2.2. Подача СНГ в смеси с воздухом 518

5.2.2.1. Смесители с соплами и буферным газометром 518

5.2.2.2. Генераторы под давлением 518

5.3. РЕГЛАМЕНТАЦИЯ В ОБЛАСТИ ХРАНЕНИЯ 518

5.3.1. Классификация установок 518

5.3.2. Правила обустройства и эксплуатации 519

5.3.2.1. Хранилища в мобильных емкостях (баллонах) 519

5.3.2.1.1. Хранилища (≤2,5 тонн) 519

5.3.2.1.1.1. Пункт подключенных к потребителю баллонов 519

5.3.2.1.1.2. Склады неподключенных емкостей 519

5.3.2.1.2. Хранилища (>2,5 тонн) 519

5.3.2.2. Хранение в стационарных емкостях (резервуарах) 520

5.3.2.2.1. Хранилища ≤12 м³ 520

5.3.2.2.1.1. Вне зоны влияния общественных зданий 1, 2, 3 и 4ᵉ категорий 520

5.3.2.2.1.2. В зданиях общественных 1, 2, 3 и 4ᵉ категорий 520

5.3.2.2.2. Хранилища >12 м³ 520

5.3.3. Схема установки резервуаров 520

5.3.3.1. Стационарные неклассифицированные хранилища (постановление от 30 июля 1979 г.) 520

5.3.3.2. Стационарные хранилища, подлежащие декларации 520

5.3.3.2.1. Расстояния, которые необходимо соблюдать 520

5.3.3.2.2. Минимальные горизонтальные расстояния между стенками резервуаров СНГ . . 520

5.3.3.3. Особый случай хранилищ в общественных зданиях 524

5.3.4. Стационарные хранилища, требующие разрешения 524

ОГЛАВЛЕНИЕ

5.4. ГАЗОСНАБЖЕНИЕ УСТАНОВОК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ 526

5.4.1. Редукторы-регуляторы давления 526

5.4.1.1. Бутан 526

5.4.1.2. Пропан 526

5.4.2. Системы трубок 526

5.4.3. Определение диаметра трубок подачи пропана и бутана к внутренней газовой аппаратуре (Правила, разработанные Французским комитетом пропана и бутана) 526

5.5. ТРАНСПОРТ СЖИЖЕННЫХ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ 529

5.5.1. Конструкция резервуаров 529

5.5.2. Основные правила перевозки резервуаров 529

5.5.3. Транспорт по железным дорогам и шоссе 529

5.5.3.1. Железнодорожные цистерны 529

5.5.3.1.1. Характеристики 529
5.5.3.1.2. Опознавательные знаки 530

5.5.3.2. Автоцистерны 530

5.5.3.2.1. Транспортные автоцистерны 530
5.5.3.2.2. Автоцистерны разовой доставки 530
5.5.3.2.3. Спецоборудование автоцистерн для перевозки нефтепродуктов 532
5.5.3.2.4. Опознавательные знаки 532
5.5.3.2.5. Огнетушители 532
5.5.3.2.6. Карточка безопасности 532
5.5.3.2.7. Проверка и контроль 532

5.5.4. Перевозка речными судами 532

5.5.5. Наливные суда 533

5.5.6. Трубопроводный транспорт 533

5.6. СЖИЖЕННЫЕ НЕФТЯНЫЕ ГАЗЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ 534

6. ТРАНСПОРТ ПО ТРУБОПРОВОДАМ

6.1. КОНЦЕПЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ 535

6.1.1. Определение 535

6.1.1.1. Данные 535

6.1.1.2. Характеристики, которые должны быть определены 535

6.1.1.3. Физические уравнения проблемы 535

6.1.1.4. Критерии выбора 536

6.1.1.5. Общая методика рассмотрения концепции транспортной сети 536

ОГЛАВЛЕНИЕ

6.1.2. Определение расчетного расхода газа 537

6.1.2.1. Расход газа постоянен и определен в процессе проектирования 537

6.1.2.2. Расход, изменяющийся во времени 537

6.1.3. Выбор трассы 537

6.1.4. Физические уравнения 538

6.1.4.1. Формулы потерь давления 538

6.1.4.1.1. Формула Панхандля 538
6.1.4.1.2. Формула Колебрука (обычная) 538
6.1.4.1.3. Улучшенная формула Колебрука 538

6.1.4.2. Формулы для расчета мощности сжатия 538

6.1.5. Экономические данные 539

6.1.5.1. Определение капвложений 539

6.1.5.1.1. Трубопроводы 539
6.1.5.1.2. Компрессорные станции 539

6.1.5.2. Оценка годовых эксплуатационных расходов 539

6.1.5.2.1. Расходы на эксплуатацию и персонал 539
6.1.5.2.2. Энергетические затраты 539

6.1.5.3. Экономические критерии 539

6.1.6. Метод определения оптимального решения 540

6.1.6.1. Метод дифференциальных расчетов 540

6.1.6.2. Метод моделирования 540

6.1.7. Классические результаты типовых проблем дифференциального метода 540

6.1.7.1. Общие упрощенные гипотезы, используемые для решения типовых проблем 540

6.1.7.1.1. Физические уравнения 540
6.1.7.1.1.1. Трубопроводы 540
6.1.7.1.1.2. Компрессорные станции 540
6.1.7.1.2. Экономическая зависимость 540
6.1.7.1.2.1. Трубопроводы 540
6.1.7.1.2.2. Компрессорные станции 541

6.1.7.2. Случай транспорта со сжатием в одной точке в начале трубопровода 541

6.1.7.3. Случай транспорта газа из одной точки в другую с помощью одного трубопровода без изменения расхода с промежуточным сжатием 541

6.1.7.4. Газопровод без компремирования с расходом газа по пути 542

6.1.7.5. Трубопровод с расходом газа по пути с компремированием в начале 543

6.1.7.6. Разветвленная сеть и метод Комбета 543

6.1.7.6.1. Промежуточный результат для сети в виде звезды 543
6.1.7.6.2. Метод Комбета 543

6.2. СТРОИТЕЛЬСТВО ТРУБОПРОВОДОВ 544

6.2.1. Изучение трассы транспортных трубопроводов 544

6.2.1.1. Предпроект 544

6.2.1.2. Административные процедуры 544

6.2.1.3. Детальный проект 544

6.2.1.4. Заключение договоров 544

ОГЛАВЛЕНИЕ

6.2.2. Характеристика используемых труб . . . 545

6.2.2.1. Изготовление труб . . . 545

6.2.2.2. Характеристика труб . . . 545

6.2.2.3. Расчет труб . . . 545

6.2.3. Выполнение работ по укладке. Подготовка трассы . . . 546

6.2.3.1. Состояние местности . . . 546

6.2.3.2. Планировка трассы . . . 546

6.2.3.3. Развозка труб . . . 546

6.2.3.4. Сгибание труб . . . 546

6.2.3.5. Сварка . . . 547

6.2.3.6. Контроль сварки . . . 547

6.2.3.7. Соединение труб изоляцией . . . 547

6.2.3.8. Траншея . . . 547

6.2.3.9. Укладка в траншею . . . 547

6.2.3.10. Засыпка и восстановление земель . . . 547

6.2.3.11. Пересечение шоссейных и железных дорог и водных препятствий . . . 547

6.2.3.12. Регламентированные испытания . . . 547

6.2.4. Оценка комплекса операций одного из способов сварки . . . 555

6.2.4.1. Характер и число образцов испытаний . . . 555

6.2.4.1.1. Стали первой и второй категории (R_m > 450 МПа) . . . 555

6.2.4.1.2. Сталь, относящаяся к третьей категории (R_m < 450 МПа) . . . 555

6.2.4.2. Выполнение испытаний сварки . . . 555

6.2.4.2.1. Сварка "один первый проход" . . . 555

6.2.4.2.2. Сварка "все проходы" . . . 555

6.2.4.3. Условия квалификации способа выполнения операции . . . 555

6.2.4.3.1. Сварка "один первый проход (шов)" . . . 555

6.2.4.3.1.1. Визуальный осмотр . . . 555

6.2.4.3.1.2. Микрографическое исследование . . . 555

6.2.4.3.1.3. Испытание на твердость . . . 555

6.2.4.3.2. Сварка "все швы" . . . 555

6.2.4.3.2.1. Визуальный осмотр . . . 555

6.2.4.3.2.2. Радиографическое исследование . . . 555

6.2.4.3.2.3. Испытания с разрушением . . . 555

6.2.4.3.2.4. Металлографическое изучение и испытание твердости . . . 556

6.2.5. Наружная изоляция . . . 556

6.2.5.1. Изоляция на углеводородной основе . . . 556

6.2.5.2. Клейкие пленки . . . 556

6.2.5.3. Полиэтиленовая изоляция . . . 556

6.2.5.4. Другие типы изоляции . . . 556

6.2.6. Внутренняя изоляция . . . 556

6.2.7. Отключающие устройства на газопроводе . . . 556

6.2.8. Контроль и испытание . . . 557

ОГЛАВЛЕНИЕ

6.2.9. Сушка трубопроводов после гидроиспытаний 557

6.2.9.1. Операции, предшествующие операции сушки 557

6.2.9.1.1. Опорожнение 557
6.2.9.1.2. Осушка 557

6.2.9.2. Разнообразные способы сушки 557

6.2.9.2.1. Осушка газом с проходом матенольной пробки 557
6.2.9.2.2. Осушка путем испарения в циркулируемый газ 558
6.2.9.2.2.1. Осушка природным газом 558
6.2.9.2.2.2. Сушка сухим воздухом 558
6.2.9.2.3. Осушка путем испарения под вакуумом (пониженном давлении) 558
6.2.9.2.3.1. Схема операции по осушке путем испарения под вакуумом 558
6.2.9.2.3.2. Механизмы (средства) для осуществления работ 559

6.2.9.3. Сравнение различных способов осушки 559

6.2.10. Гидраты природного газа 561

6.2.10.1. Природа 561

6.2.10.2. Кривая формирования гидратов 561

6.2.10.3. Количество воды, насыщающей природный газ 561

6.2.10.4. Предупреждение образования гидратов, действие ингибиторов 561

6.2.11. Список литературы 561

6.3. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ПОДЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ 562

6.3.1. Общая часть 562

6.3.2. Защита гальваническим анодом 562

6.3.2.1. Принцип 562

6.3.2.2. Применение 563

6.3.2.3. Эксплуатация 563

6.3.3. Защита путем дренажа тока (электродренажная) 563

6.3.3.1. Принцип 563

6.3.3.2. Аппаратура 563

6.3.3.3. Эксплуатация 563

6.3.4. Защита против блуждающих токов: электродренаж 564

6.3.4.1. Принцип 564

6.3.4.2. Аппаратура 564

6.3.4.3. Эксплуатация 565

6.3.5. Пассивная защита сооружений 565

6.3.6. Оборудование сетей 565

6.3.7. Законодательство 565

6.4. ПОДГОТОВКА (ОБРАБОТКА) ГАЗА 565

6.4.1. Осушка природного газа 565

ОГЛАВЛЕНИЕ

6.4.2. Очистка природного газа от серы 565

6.4.2.1. Регламентация (требования) 565

6.4.2.2. Процесс очистки от серы 566

6.4.3. Одоризация газа 566

6.4.3.1. Необходимость одоризации газа 566

6.4.3.1.1. Риск, связанный с недостаточно одоризированным газом 566
6.4.3.1.2. Регламентация и рекомендации 566
6.4.3.1.3. Принцип одоризации. Определение места одоризации 566

6.4.3.2. Принцип одоризационных установок 566

6.4.3.2.1. Установка централизованного впрыска 566
6.4.3.2.2. Установка (пунктирного) точечного впрыска 567
6.4.3.2.2.1. Система с естественным испарением 567
6.4.3.2.2.2. Система, использующая потерю давления 568
6.4.3.2.2.3. Система, использующая показания счетчика 568

6.4.3.3. Особенности установок одоризации 570

6.4.3.3.1. Характеристика и предосторожности использования Т.Н.Т. 570
6.4.3.3.1.1. Характеристика 570
6.4.3.3.1.2. Контактируемый материал 570
6.4.3.3.1.3. Хранение 570
6.4.3.3.1.4. Токсичность 570
6.4.3.3.1.5. Нейтрализация 570
6.4.3.3.2. Замер количества одоранта 570
6.4.3.3.3. Техника для впрыска 571
6.4.3.3.4. Система впрыска 571

6.4.4. Взаимозаменяемость природного газа 571

6.4.4.1. Обеднение 571

6.4.4.2. Обогащение 571

6.4.4.3. Смесь 572

6.5. КОМПРЕССОРНЫЕ СТАНЦИИ 572

6.5.1. Общие соображения 572

6.5.2. Компрессоры 572

6.5.2.1. Поршневые компрессоры 572

6.5.2.1.1. Описываемый объем, объемный КПД, дебит сжатый (цилиндр с двойным эффектом) 573
6.5.2.1.2. Мощность сжатия 573
6.5.2.1.3. Регулирование расхода 573
6.5.2.1.4. Преимущества и недостатки поршневого компрессора 573
6.5.2.1.4.1. Преимущества 573
6.5.2.1.4.2. Недостатки 573
6.5.2.1.5. Пример характеристики 574

6.5.2.2. Центробежные компрессоры 574

6.5.2.2.1. Высота (давление) и мощность компрессора 574
6.5.2.2.2. Регулирование расхода 575
6.5.2.2.3. Преимущества и недостатки центробежных компрессоров 575
6.5.2.2.3.1. Преимущества: 575
6.5.2.2.3.2. Недостатки: 575
6.5.2.2.4. Пример характеристики 575
6.5.2.2.5. Приспособление против помпажа 575

ОГЛАВЛЕНИЕ

6.5.3. Приводы 576

6.5.3.1. Газомоторные двигатели 576

6.5.3.2. Газовые турбины 576

6.5.3.3. Электродвигатели 576

6.5.3.3.1. Двигатели постоянного тока 576
6.5.3.3.2. Двигатели синхронные и асинхронные 576
6.5.3.3.3. Преимущества и недостатки 576
6.5.3.3.3.1. Преимущества 576
6.5.3.3.3.2. Недостатки 576

6.5.4. Концепция компрессорных станций 576

6.6. РЕГУЛЯТОРНЫЕ ПУНКТЫ 578

6.6.1. Общая часть 578

6.6.2. Принципы работы регуляторов 578

6.6.3. Технология регулирования 578

6.6.4. Типовая схема регуляторного пункта 578

6.6.5. Устройства безопасности (Клапан и кран безопасности) 578

6.6.5.1. Регламентация 578

6.6.5.2. Давление регулирования 578

6.6.6. Детали конструкции 578

6.6.7. Размещение регуляторного пункта 579

6.6.7.1. Три типа регуляторных пунктов 579

6.6.7.2. Выбор места расположения 579

6.6.8. Охлаждение при дросселировании 579

6.7. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГАЗОВЫХ СЕТЕЙ 580

6.7.1. Вступление 580

6.7.2. Отношение с посторонними организациями 580

6.7.3. Обследование трубопроводов 580

6.7.4. Обслуживание трубопроводов 580

6.7.5. Обслуживание регуляторных пунктов 580

6.7.6. Обслуживание установок катодной защиты 581

6.7.7. Ремонт трубопровода 581

6.8. УЧЕТ 582

6.8.1. Роль подсчета 582

ОГЛАВЛЕНИЕ

6.8.2. Принципы измерений 582

6.8.2.1. Без подведения внешней энергии 582

6.8.2.2. С подведением внешней энергии 582

6.8.3. Применение 582

6.8.3.1. Регламентация определения расхода (счетчика) и условия соблюдения правил 582

6.8.3.2. Точность 582

6.8.3.3. Надежность, отклонения (разброс) 582

6.8.3.4. Адаптация расхода 582

6.8.3.5. Контроль 583

6.8.3.6. Качество газа 583

6.9. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ 583

6.9.1. Общие положения 583

6.9.2. Информационный канал передачи данных 584

6.9.2.1. Определения 584

6.9.2.2. Используемые цепи передачи данных 584

6.9.2.3. Кодирование данных 584

6.9.2.3.1. Код МККТТ № 2 (C.C.I.T.T. № 2) 584
6.9.2.3.2. Десятично-двоичный код (D.C.B. - Decimal Coded Binary) 584
6.9.2.3.3. Код МККТТ № 5 584
6.9.2.3.4. Код E.B.C.D.I.C. (Extended Binary Coded Decimal Interehange Code) 584

6.9.2.4. Передача по паре металлических проводов или по коаксиальному кабелю 584

6.9.2.4.1. Передача на базовом диапазоне 584
6.9.2.4.2. Передача на основе преобразования частоты 587
6.9.2.4.3. Скорость передачи и пропускная способность 587
6.9.2.4.3.1. Скорость передачи 587
6.9.2.4.3.2. Пропускная способность 587
6.9.2.4.4. Ширина полосы. Полоса прохождения 587
6.9.2.4.5. Полоса пропускания и скорость передачи информации 588
6.9.2.4.5.1. Теорема Найквиста 588
6.9.2.4.5.2. Теорема Шеннона 588

6.9.2.5. Семиуровневая эталонная модель 588

6.9.3. Имеющиеся средства передачи 588

6.9.3.1. Телефонная сеть с коммутацией (R.T.C. – Réseau Téléphonique Commuté) 588

6.9.3.2. Телеграфная сеть с коммутацией 588

6.9.3.3. Специализированные линии 589

6.9.3.4. Сеть Транспак 589

6.9.3.5. Другие средства 589

6.9.4. Телекоммуникации в газовой индустрии 589

6.9.4.1. Управленческая (административная) информация 589

6.9.4.2. Техническая информация 589

ОГЛАВЛЕНИЕ

6.10. РУКОВОДЯЩИЕ ДОКУМЕНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ К СООРУЖЕНИЯМ ТРАНСПОРТА ГАЗА 589

6.10.1. Транспортная сеть 590

6.10.1.1. Декрет № 85-1108 от 15 октября 1985 г. 590
6.10.1.1.1. Область применения 590
6.10.1.1.2. Концессия на транспорт 591

6.10.1.2. Декрет № 70-492 от 11 июня 1970 г. 591

6.10.1.3. Изучение экологической нагрузки 591

6.10.1.4. Указ от 11 мая 1970 г. модифицированный 591

6.10.1.5. Постановление министерства от 28 января 1981 г. относительно содержания серы и состава сернистого природного газа, транспортируемого по трубопроводам 592

6.10.1.6. Работы посторонних организаций 592

6.10.2. Компрессорные станции 592

6.10.2.1. Административный и юридический режим 592

6.10.2.2. Техническая регламентация 592

6.10.3. Подземные резервуары 592

6.10.3.1. Собственно хранилище 593

6.10.3.2. Компрессорные станции подземных хранилищ 593
6.10.3.2.1. Сооружения для сухого газа 593
6.10.3.2.2. Компрессоры 593
6.10.3.2.3. Установки для влажного газа 593
6.10.3.2.4. Колонны очистки от серы и влаги 593
6.10.3.2.5. Установки влажного газа, расположенные вне сооружения 593

7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

7.1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 595

7.1.1. Оценка объема распределения и его колебаний 595

7.1.1.1. Анализ рынка 595

7.1.1.2. Показатели, используемые при анализе сбыта 595
7.1.1.2.1. Существующий рынок 595
7.1.1.2.2. Рынок сбыта 595
7.1.1.2.3. Зона обслуживания газом 595
7.1.1.2.4. Степень обеспечения населенного пункта 596
7.1.1.2.5. Степень коммерческого успеха 596
7.1.1.2.6. Степень внедрения 596
7.1.1.2.7. Степень снабжения 596

7.1.1.3. Потребление и подача 596

7.1.1.4. Случай холодного периода газа 596
7.1.1.4.1. Средняя температура "трех часов" (T_j) 596
7.1.1.4.2. Температурный порог отопления (T_s) 596
7.1.1.4.3. Разница в температурном пороге для одного дня ($T_s - T_j$) 596
7.1.1.4.4. Число градусо-дней 596
7.1.1.4.5. Градиент (G) 596
7.1.1.4.6. Дополнительное потребление в зимнее время (C. S. P. F) 597
7.1.1.4.7. Потребление, не входящее в дополнительный расход в зимнее время (H. C. S. P. F) 597

ОГЛАВЛЕНИЕ

7.1.1.4.8. Понятие риска . . . 597

7.1.1.5. Модель прогноза потребление–климат . . . 597

7.1.1.6. Время использования . . . 597

7.1.1.7. Практическое определение годового потребления . . . 597

7.1.1.7.1. Расчет потребления на бытовые нужды (H. C. S. P. F) и градиента для бытовых потребителей . . . 597

7.1.1.7.2. Потребление вне бытовых объектов . . . 599

7.1.1.8. Расчет максимального суточного потребления . . . 599

7.1.1.9. Расчет максимального часового потребления бытовым объектом . . . 599

7.1.1.9.1. Использование газа (H, C, S, P, F) . . . 599

7.1.1.9.2. Использование газа (C. S. P. F) . . . 599

7.1.1.9.3. Суммарный максимальный часовой расход с данным риском . . . 599

7.1.1.10. Подсоединение потребителей в узлах сети . . . 599

7.1.2. Концепция и расчет распределительных сетей . . . 599

7.1.2.1. Структура распределительных сетей . . . 599

7.1.2.1.1. Тип сетей . . . 599

7.1.2.1.2. Структура сетей . . . 599

7.1.2.1.2.1. Первичная сеть . . . 599

7.1.2.1.2.2. Вторичная сеть . . . 600

7.1.2.1.2.3. Третичная сеть . . . 600

7.1.2.1.3. Критерии сетей . . . 600

7.1.2.2. Расчет сетей . . . 600

7.1.2.2.1. Топология сети . . . 600

7.1.2.2.1.1. Участок . . . 600

7.1.2.2.1.2. Узел . . . 600

7.1.2.2.1.3. Степень . . . 600

7.1.2.2.1.4. Потребление, расход (подача) . . . 600

7.1.2.2.1.5. Узел p_i . . . 600

7.1.2.2.1.6. Сеть . . . 600

7.1.2.2.1.7. Разветвленная сеть . . . 600

7.1.2.2.1.8. Закольцованная сеть . . . 601

7.1.2.2.1.9. Подсети . . . 601

7.1.2.2.2. Потери давления на участке . . . 601

7.1.2.2.2.1. Гипотеза распределения . . . 601

7.1.2.2.2.2. Формула Ренуарда (Renouard) . . . 601

7.1.2.2.2.3. Потери давления . . . 601

7.1.2.2.3. Расчет сети . . . 602

7.1.2.2.3.1. Потери давления в сетях . . . 602

7.1.2.2.3.2. Формулировка задачи . . . 602

7.1.2.2.3.3. Решение задачи . . . 602

7.1.2.2.4. Схематизация сети . . . 602

7.1.2.2.4.1. Схематизация разветвления . . . 602

7.1.2.2.4.2. Схематизация сеткой . . . 602

7.1.2.2.5. Упрощение сетей . . . 603

7.1.2.2.5.1. Параллельные трубопроводы . . . 603

7.1.2.2.5.2. Последовательные трубопроводы . . . 603

7.1.3. Картография . . . 603

7.1.3.1. Цель картографии . . . 603

7.1.3.2. Анализ потребностей . . . 603

7.1.3.2.1. Регламентированные потребности . . . 603

7.1.3.2.1.1. Журнал нагрузок . . . 603

7.1.3.2.1.2. Правила безопасности от 11 мая 1970 г. . . . 604

7.1.3.2.1.3. Постановление префектуры о выполнении работ вблизи газовых сооружений . . . 604

7.1.3.2.2. Внутренние потребности распределительных фирм . . . 604

7.1.3.2.2.1. Эксплуатация . . . 604

ОГЛАВЛЕНИЕ

7.1.3.2.2.2. Общее исследование 604

7.1.3.3. Составные части картографии 604

7.1.3.3.1. Выбор масштаба 604
7.1.3.3.2. Форматы 604
7.1.3.3.3. Символы 604
7.1.3.3.4. Элементы детального плана в масштабе 1/200 или 1/500 604
7.1.3.3.5. Элементы плана сооружения в масштабе 1/2 000 и 1/5 000 604
7.1.3.3.5.1. Тип "A" 604
7.1.3.3.5.2. Тип " B" 605

7.1.3.4. Основы изготовления 605

7.1.3.4.1. Бумага 605
7.1.3.4.2. Микрофильмы 605
7.1.3.4.3. Информатика 605

7.1.3.5. Применение новых графических методов 605

7.1.3.5.1. База графических данных 605

7.1.3.6. Развитие картографии 605

7.1.3.6.1. Применение информатики в картографии на основе детального плана в масштабе 1/200 и 1/500 605
7.1.3.6.2. Картографическая информация с плана ансамбля в масштабе 1/2 000 или 1/5 000 606

7.2. СООРУЖЕНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 606

7.2.1. Трубопроводы и соединения 606

7.2.1.1. Существующие материалы сетей 606

7.2.1.2. Материалы, применяемые в настоящее время 606

7.2.1.2.1. Допустимые напряжения 606
7.2.1.2.2. Эксплуатационные напряжения 607

7.2.1.3. Соединения 607

7.2.1.3.1. Сварка электродуговая 607
7.2.1.3.2. Сварка кислородно-ацетиленовая 607
7.2.1.3.3. Пайка капиллярная, прочная 607
7.2.1.3.4. Пайка-сварка на меди 607

7.2.1.4. Размеры труб. Соединения 607

7.2.1.4.1. Сталь 607
7.2.1.4.2. Полиэтилен 607
7.2.1.4.3. Ковкий чугун 609
7.2.1.4.3.1. Сжатие соединений из чугуна 609
7.2.1.4.3.2. Соединения, еще встречающиеся на сетях 610
7.2.1.4.4. Медь 611
7.2.1.4.5. Алюминий 611

7.2.2. Проектирование сооружений распределения 611

7.2.2.1. Предпроект 611

7.2.2.2. Определение трассы 611

7.2.2.3. Административное анкетирование 611

7.2.2.4. Финансирование работ 612

7.2.3. Промерзание грунта после поста регулирования 612

7.2.3.1. Влияние холода после редуцирования 612

7.2.3.2. Замерзание грунта после дросселирования 612

7.2.3.2.1. Геофизические аспекты 612
7.2.3.2.2. Термические аспекты 612

7.2.3.2.3. Упрощенные решения . . . 613
7.2.3.2.4. Ответы на практические проблемы . . . 613

7.2.4. Реализация работ . . . 614

7.2.4.1. Укладка трубопроводов . . . 614
7.2.4.1.1. Подготовка строительства . . . 614
7.2.4.1.2. Земляные работы . . . 614
7.2.4.1.2.1. Ширина траншеи . . . 614
7.2.4.1.2.2. Глубина траншеи . . . 615
7.2.4.1.2.3. Встречающиеся сооружения, вспомогательные работы, вырубка . . . 615
7.2.4.1.2.4. Особые установки (диспозитивы) . . . 615
7.2.4.1.2.5. Сооружение ниш . . . 615
7.2.4.1.2.6. Обустройство дна траншеи . . . 615
7.2.4.1.3. Укладка трубопровода . . . 615
7.2.4.1.3.1. Перевозка труб . . . 615
7.2.4.1.3.2. Подготовка элементов трубопровода . . . 615
7.2.4.1.3.3. Соединение труб . . . 615
7.2.4.1.3.4. Квалификация персонала . . . 615
7.2.4.1.3.5. Опускание в траншею . . . 616
7.2.4.1.3.6. Защита . . . 616
7.2.4.1.3.7. Тюбаж (протаскивание) . . . 616
7.2.4.1.4. Выполнение плана и испытания . . . 616
7.2.4.1.4.1. Съемка плана . . . 616
7.2.4.1.4.2. Испытания . . . 616
7.2.4.1.4.3. Коррекция давления . . . 616

7.2.4.2. Засыпка траншей . . . 617
7.2.4.2.1. Расположение слоев траншеи по отношению к зоне дороги. Качество утрамбовки . . . 617
7.2.4.2.2. Информация о материалах заполнения . . . 617
7.2.4.2.3. Выбор техники утрамбовки . . . 618
7.2.4.2.4. Применение таблиц трамбования . . . 618

7.2.4.3. Восстановление поверхности шоссе . . . 619
7.2.4.3.1. Составные части шоссе . . . 619
7.2.4.3.2. Дорожное покрытие над траншеей . . . 620

7.2.4.4. Контроль и регламент работ . . . 620

7.2.5. Список литературы . . . 620

7.3. ОБРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЯЕМОГО ГАЗА . . . 620

7.3.1. Обработка и ее эволюция . . . 620

7.3.1.1. Почему? . . . 620

7.3.1.2. Как? . . . 621

7.3.2. Снижение требований . . . 621

7.3.2.1. Почему? . . . 621

7.3.2.2. Как? . . . 621

7.3.3. Жидкие углеводороды . . . 621

7.3.3.1. Происхождение . . . 621

7.3.3.2. Негативные последствия . . . 621

7.3.3.3. Описание явления . . . 621

7.3.3.4. Способы определения риска конденсации . . . 622

7.3.3.5. Средства предотвращения . . . 623

ОГЛАВЛЕНИЕ

7.3.4. Проблемы пыли 623

7.3.4.1. Происхождение пыли 623

7.3.4.2. Средства обработки 623

7.4. ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ГАЗА (РЕГУЛИРОВАНИЕ) 623

7.4.1. Технология регуляторов 623

7.4.1.1. Регулирование классическое 623

7.4.1.2. Бесшумные регуляторы 624

7.4.1.3. Регулятор-счетчик 624

7.4.1.4. Технологический выбор 625

7.4.2. Конструкция поста регулирования 625

7.4.2.1. Оборудование, сопровождающее регулятор 625

7.4.2.2. Типовой блок регулирования 626

7.4.2.2.1. С простой (одной) линией 626

7.4.2.2.2. С двойной линией 626

7.4.2.3. Правила устройства поста регулирования 626

7.4.2.3.1. Регламент административный 626

7.4.2.3.2. Техническая регламентация 626

7.5. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СЕТЕЙ 627

7.5.1. Фильтры 627

7.5.2. Задвижки (краны) 628

7.5.2.1. Терминология 628

7.5.2.2. Классификация задвижек в соответствии с их конструкцией 628

7.5.2.3. Классификация задвижек в зависимости от их функций 628

7.5.2.4. Критерии выбора задвижек, используемых на сетях 629

7.5.2.4.1. Типы соединений 630

7.5.2.4.2. Способы управления 630

7.5.3. Сифон 630

7.6. ПОДСОЕДИНЕНИЯ – ДОМОВЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ – УСТАНОВКИ 630

7.6.1. Подсоединения и домовые трубопроводы 630

7.6.1.1. Терминология и структура 630

7.6.1.1.1. Терминология 630

7.6.1.1.2. Регламентированная классификация различных видов зданий 630

7.6.1.1.2.1. Жилые здания 630

7.6.1.1.2.2. Здания, принимающие публику (общественные здания) (ERP) 630

7.6.1.1.2.3. Котельные 630

7.6.1.1.3. Классификация жилых домов 631

7.6.1.1.3.1. Первый род 631

7.6.1.1.3.2. Второй род 631

7.6.1.1.3.3. Третий род 631

7.6.1.1.3.4. Четвертый род 631

7.6.1.1.3.5. Пятый род 631

ОГЛАВЛЕНИЕ

7.6.1.1.4. Классификация общественных зданий (EPP) . . . 631
7.6.1.1.5. Структура подсоединений . . . 631
7.6.1.1.6. Установка футляров на трубопроводах стояков . . . 634

7.6.1.2. Размеры ответвления и трубопроводов жилых домов, снабжаемых природным газом 634

7.6.1.3. Сооружение ответвлений и домовых трубопроводов . . . 641

7.6.1.3.1. Врезка ответвлений . . . 641
7.6.1.3.2. Используемые материалы . . . 641
7.6.1.3.3. Технология соединения . . . 642
7.6.1.3.3.1. Часто применяемые соединения труб при сооружении ответвлений . . . 642
7.6.1.3.3.2. Соединение труб с арматурой . . . 642
7.6.1.3.4. Правила сооружения . . . 643
7.6.1.3.5. Квалификация персонала . . . 643
7.6.1.3.6. Арматура . . . 643
7.6.1.3.6.1. Задвижки (краны) . . . 643
7.6.1.3.6.2. Отсекатель расхода среднего давления (DDMP) . . . 643
7.6.1.3.6.3. Регулятор давления . . . 643
7.6.1.3.7. Счетчики . . . 643
7.6.1.3.8. Испытания . . . 643
7.6.1.3.8.1. Трубопроводы, находящиеся перед общим отключающим устройством . . . 643
7.6.1.3.8.2. Трубопроводы, расположенные за общим отключающим устройством . . . 644
7.6.1.3.9. Приемка установок . . . 644

7.6.2. Внутренние установки . . . 644

7.6.2.1. Терминология . . . 644

7.6.2.2. Условия установки . . . 645

7.6.2.2.1. Ограничение давления . . . 645
7.6.2.2.2. Прокладка трубопроводов . . . 645
7.6.2.2.3. Краны управления аппаратов . . . 645
7.6.2.2.4. Подсоединение аппаратов . . . 645
7.6.2.2.5. Испытание трубопроводов . . . 645
7.6.2.2.6. Приемка установок . . . 645

7.6.2.3. Определение размеров быто-вых приборов (установок) . . . 647

7.6.2.3.1. Практическое определение диаметров трубопроводов бытовых установок . . . 647
7.6.2.3.2. Допустимые потери давления . . . 647
7.6.2.3.3. Определение длины трубопровода . . . 647
7.6.2.3.4. Определение теплового расхода . . . 647
7.6.2.3.5. Номограммы . . . 647
7.6.2.3.6. Пример использования номограммы . . . 647
7.6.2.3.7. Разрешенный минимальный диаметр . . . 649

7.6.2.4. Технология материалов и приспособлений . . . 649

7.6.2.4.1. Трубы . . . 649
7.6.2.4.2. Типы трубопроводов и способы соединения . . . 649
7.6.2.4.3. Особый случай мягкой пайки . . . 649

7.7. УЧЕТ ГАЗА . . . 649

7.7.1. Основные принципы . . . 649

7.7.2. Терминология . . . 650

7.7.3. Метрология . . . 650

7.7.3.1. Пределы измерений . . . 650

7.7.3.2. Допустимые ошибки и потери давления . . . 650

7.7.3.2.1. Примитивная проверка . . . 650
7.7.3.2.2. Периодическая проверка . . . 651

ОГЛАВЛЕНИЕ

7.7.4. Функционирование 651

7.7.5. Коррекция замеров 651

7.7.6. Область применения различных счетчиков 651

7.7.6.1. Мембранный счетчик 651

7.7.6.2. Счетчик скоростной 652

7.7.6.3. Счетчик с вращающимися поршнями 652

7.7.7. Условия установки 652

7.8. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ 652

7.8.1. Знание сооружений 652

7.8.1.1. Перечень сооружений (Досье) 652

7.8.1.1.1. Определение 652
7.8.1.1.2. Сопутствующие сооружения 652
7.8.1.1.3. Сборник информации 653

7.8.1.2. Систематические поиски утечек 653

7.8.1.2.1. Аппараты детекции 653
7.8.1.2.2. Описание операций и интерпретация результатов 653

7.8.1.3. Оценка потерь газа 653

7.8.1.3.1. Замеры 654
7.8.1.3.1.1. Сеть низкого давления (BP) 654
7.8.1.3.1.2. Сеть среднего давления (MP) 654
7.8.1.3.2. Расчет 654

7.8.2. Трубопровод и эксплуатация сооружений 654

7.8.2.1. Запрос посторонних организаций по поводу запаха газа. Первое вмешательство . . . 654

7.8.2.1.1. Обработка сообщений со стороны 654
7.8.2.1.2. Задача первой помощи 654

7.8.2.2. Эксплуатация регуляторных постов 655

7.8.2.2.1. Коллективный пост распределения 655
7.8.2.2.2. Пост снабжения непосредственно абонентов 655

7.8.2.3. Эксплуатация катодной защиты 655

7.8.2.3.1. Эксплуатация защиты с помощью реактивного анода 655
7.8.2.3.2. Эксплуатация дренажной защиты 655
7.8.2.3.3. Эксплуатация дренажной защиты 655
7.8.2.3.4. Поиски нарушений детектором изоляции 655

7.8.2.4. Эксплуатация установок обработки газа 656

7.8.2.5. Контроль одоризации 656

7.8.2.5.1. Одоризация природного газа 656
7.8.2.5.2. Контроль одоризации 656

7.8.3. Обслуживание сооружений 657

7.8.3.1. Политика обслуживания 657

7.8.3.1.1. Посты снабжения, подачи и регулирования сетей 658
7.8.3.1.2. Абонентские пункты регулирования 658
7.8.3.1.3. Сети 658
7.8.3.1.4. Обработка газа 659
7.8.3.1.5. Катодная защита 659
7.8.3.1.6. Ответвления и стоянки 659
7.8.3.1.7. Станция пропана или бутана. Смеситель воздуха с пропаном или бутаном 659

ОГЛАВЛЕНИЕ

7.8.3.1.8. Одоризация 659

7.8.3.2. Ликвидация аварий и ремонт сооружений 659

7.8.3.2.1. Оборудование для ликвидации аварий на сетях 659
7.8.3.2.2. Оборудование для ремонта сетей 659
7.8.3.2.3. Таблицы, характеризующие оборудование для ликвидации аварий и ремонта сети 660
7.8.3.2.3.1. Муфты для ликвидации аварий и ремонта (см. с. 660) 661
7.8.3.2.3.2. Кольца для ликвидации утечек в соединениях 661
7.8.3.2.3.3. Пластические муфты 662
7.8.3.2.3.4. Закупоривающие материалы 663

7.8.4. Работы на трубопроводах под нагрузкой (газом) 663

7.8.4.1. Подготовка работ 663

7.8.4.2. Оборудования перекрытия 664

7.8.4.2.1. Баллоны 664
7.8.4.2.2. Запор мембранный 664
7.8.4.2.3. Запор чашечный или гибкий 664
7.8.4.2.4. Сплющиватель труб 664
7.8.4.2.5. Дополнительные уплотнительные устройства 664
7.8.4.2.5.1. Уплотнительный поршень 664
7.8.4.2.5.2. Полное покрытие 664

7.8.4.3. Соединение сооружений 664

7.8.4.3.1. Соединение сооружений низкого давления (BP и BPA) 667
7.8.4.3.1.1. Общие случаи 667
7.8.4.3.1.2. Особые случаи 667
7.8.4.3.2. Соединение трубопроводов среднего давления 667
7.8.4.3.2.1. Техника соединения на сооружениях среднего давления 667
7.8.4.3.2.2. Соединение конструкций из полиэтилена при среднем давлении (B) 669

7.9. РЕГЛАМЕНТАЦИЯ, ОТНОСЯЩАЯСЯ К СООРУЖЕНИЯМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗА 670

7.9.1. Регламентация технологической концепции установок и безопасности 670

7.9.1.1. Правила безопасности сооружений транспорта горючих газов по трубопроводам . . . 670

7.9.1.2. Технические правила и правила безопасности, применяемые к установкам горючих газов и сжиженных углеводородов, расположенных в жилых зданиях или зависимых от них 670

7.9.1.3. Примечания 670

7.9.2. Регламентация 670

7.9.2.1. Создание концессии системы общественного распределения газа 670

7.9.2.2. Заявление о намерении вести работы рядом с сооружениями газа 671

7.9.2.3. Дорожный кодекс (Закон от 22 июня 1989 г. и декрет от 4 сентября 1989 г.) 671

7.9.2.4. Другие общественные сферы 671

7.9.2.5. Частные владения 671

8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗА

8.1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ 673

8.1.1. Соотношение использования газа в жилом фонде, на общественные нужды и в промышленности 673

ОГЛАВЛЕНИЕ

8.1.2. Использование в жилом фонде . . . 673

8.1.3. Использование в общественном секторе . . . 674

8.1.4. Использование в промышленности . . . 674

8.2. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ . . . 675

8.2.1. Истечение флюидов в горелках . . . 675

8.2.1.1. Истечение на выходе инжектора . . . 675

8.2.1.1.1. О режимах истечения . . . 675
8.2.1.1.2. Коэффициент расхода инжектора . . . 675
8.2.1.1.3. Уравнение расход–давление Бернулли для очень низкого давления . . . 675
8.2.1.1.4. Отношение расход–давление для звукового режима . . . 675
8.2.1.1.5. Соотношение расход–давление при дозвуковом режиме . . . 676
8.2.1.1.6. Отношение тяга инжектора–давление. . . . 677
8.2.1.1.6.1. Истечение дозвуковое . . . 679
8.2.1.1.6.2. Звуковое истечение . . . 679
8.2.1.1.7. Коэффициент уменьшения Ар в зависимости от давления . . . 679
8.2.1.1.7.1. Дозвуковое истечение . . . 680
8.2.1.1.7.2. Звуковое истечение . . . 680
8.2.1.1.8. Понятие об удельном напоре . . . 680

8.2.1.2. Смешение в аксиальных потоках . . . 681

8.2.1.2.1. Свободная струя. Явление индукции. . . . 681
8.2.1.2.2. Ограниченная турбулентная струя . . . 681

8.2.2. Горелки предварительного смешения. Топливо-окислитель . . . 682

8.2.2.1. Стабильность пламени . . . 682

8.2.2.2. Горелки предварительного смешения за счет давления газа . . . 682

8.2.2.3. Замена топлива в атмосферных горелках . . . 684

8.2.2.4. Горелки с предварительным смешением под давлением . . . 687

8.2.3. Горелки кислород–газ . . . 687

8.2.4. Смесительные горелки со слабыми скоростями воздуха в зоне горения . . . 688

8.2.4.1. Пламя с оксиальной (осевой) диффузией . . . 688

8.2.4.1.1. Диффузионное пламя при ламинарном режиме истечения . . . 688
8.2.4.1.2. Диффузионное пламя при турбулентном режиме истечения . . . 689
8.2.4.1.2.1. Длина пламени в свободной атмосфере . . . 689
8.2.4.1.2.2. Длина пламени в сжатой (ограниченной) атмосфере . . . 689

8.2.5. Горелки смешения в зоне горения с воздухом под давлением . . . 689

8.2.5.1. Пламя осевое с большой скоростью воздуха . . . 689

8.2.5.2. Пламя с пересекающимися флюидами . . . 690

8.2.5.3. Пламя с вращением вытекающего воздуха . . . 690

8.2.5.4. Пламя с истечением контрвращением . . . 690

8.2.5.5. Горелки "моноблок" . . . 690

8.2.6. Горелки с особенностями в работе . . . 690

8.2.6.1. Авторекуперативные горелки . . . 691

8.2.6.2. Радиантные горелки . . . 692

8.2.6.2.1. Основные характеристики идеальной горелки . . . 692

8.2.6.2.2. Основное оборудование . . . 693
8.2.6.2.2.1. Светящиеся радиационные панели . . . 693
8.2.6.2.2.2. Чашечная радиационная горелка . . . 693
8.2.6.2.2.3. Радиационные горелки каталитического горения . . . 693
8.2.6.3. Струйные горелки . . . 694
8.2.6.4. Радиантные трубы . . . 694
8.2.6.5. Атмосферные горелки . . . 694
8.2.7. Горелки домашних аппаратов . . . 697
8.3. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, БЕЗОПАСНОСТИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ УСТАНОВОК ГАЗОВОГО НАГРЕВА . . . 697
8.3.1. Вступление . . . 697
8.3.2. Система оборудования нагрева . . . 697
8.3.3. Анализ системы управления, безопасности и регулирования . . . 697
8.3.3.1. Функционирование . . . 697
8.3.3.2. Состав . . . 698
8.3.3.3. Подсистема управления . . . 698
8.3.3.4. Подсистема контроля . . . 698
8.3.3.5. Подсистемы выполнения (исполнительные механизмы) . . . 699
8.3.4. Подсистемы управления . . . 699
8.3.5. Подсистема контроля . . . 700
8.3.5.1. Датчики пламени . . . 700
8.3.5.2. Маностаты . . . 702
8.3.5.3. Термостаты . . . 702
8.3.5.4. Детектор вращения вентилятора . . . 702
8.3.5.4.1. Роль . . . 702
8.3.5.4.2. Технология . . . 702
8.3.5.5. Контроль герметичности . . . 702
8.3.5.5.1. Роль . . . 702
8.3.5.5.2. Технология . . . 703
8.3.6. Подсистемы исполнения . . . 703
8.3.6.1. Автоматические краны . . . 703
8.3.6.1.1. Характеристики . . . 703
8.3.6.1.2. Приводные механизмы . . . 703
8.3.6.2. Система зажигания . . . 704
8.3.7. Связь системы управления и безопасности с остальной установкой . . . 704
8.3.8. Компоновка составляющих . . . 704
8.3.9. Заключение . . . 704
8.4. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ГАЗОВ . . . 706
8.4.1. Общая часть . . . 706

ОГЛАВЛЕНИЕ

8.4.2. Число Воббе и три группы газов . . . 706

8.4.3. Понятие взаимозаменяемости . . . 706

8.4.4. Как разрешить проблему взаимозаменяемости? . . . 707

8.4.4.1. Метод Delbourg . . . 707

8.4.4.1.1. Принцип . . . 707

8.4.4.1.2. Индексы . . . 707

8.4.4.2. Новый метод . . . 707

8.4.4.2.1. Принцип . . . 711

8.4.4.2.2. Пример применения . . . 711

8.4.5. Список литературы . . . 712

8.5. АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗА . . . 712

8.5.1. Плита . . . 712

8.5.1.1. Домашняя плита . . . 712

8.5.1.1.1. Основы . . . 712

8.5.1.1.1.1. Различные типы аппаратов . . . 712

8.5.1.1.1.2. Основные элементы аппаратов . . . 712

8.5.1.1.2. Рабочий стол . . . 713

8.5.1.1.2.1. Горелки . . . 713

8.5.1.1.3. Духовка (печь) . . . 714

8.5.1.1.3.1. Различные типы печей . . . 714

8.5.1.1.3.2. Общие характеристики горелок печей (духовых шкафов) . . . 714

8.5.1.1.3.3. Печь, самоочищающаяся с помощью каталитических процессов . . . 714

8.5.1.1.4. Гриль . . . 714

8.5.1.1.5. Вспомогательная аппаратура . . . 714

8.5.1.1.5.1. Краны . . . 714

8.5.1.1.5.2. Термостат печи . . . 714

8.5.1.1.5.3. Диспозитивы безопасности . . . 715

8.5.1.1.5.4. Приспособление автоматического зажигания . . . 715

8.5.1.1.5.5. Устройство автоматического регулирования времени приготовления . . . 715

8.5.1.2. Промышленные плиты . . . 715

8.5.1.2.1. Общая часть . . . 715

8.5.1.2.2. Основное традиционное газовое оборудование . . . 715

8.5.1.2.2.1. Открытая горелка . . . 715

8.5.1.2.2.2. Огневая плита или нагреваемая плита (жарочная плита) . . . 716

8.5.1.2.2.3. Печь . . . 716

8.5.1.2.2.4. Жарочная (жаровня) . . . 716

8.5.1.2.2.5. Жарочные решетки . . . 716

8.5.1.2.2.6. Саламандра . . . 717

8.5.1.2.2.7. Мармит . . . 717

8.5.1.2.2.8. Аппарат для жарки в масле (Sautense) . . . 717

8.5.1.2.2.9. Мармит-автоклав . . . 717

8.5.1.2.2.10. Пароварка . . . 718

8.5.1.2.2.11. Жарочный шкаф . . . 718

8.5.1.2.2.12. Мангал (гриль со светящимися камнями) . . . 718

8.5.1.2.2.13. Камера-стол для разогрева продуктов . . . 718

8.5.1.2.2.14. Оборудование для кафетерия . . . 718

8.5.1.2.3. Современная газовая техника . . . 719

8.5.1.2.3.1. Пульсирующая горелка . . . 719

8.5.1.2.3.2. Горелка открытого пламени с системами зажигания и безопасности в одном корпусе . . . 720

8.5.1.2.3.3. Печь с принудительной конвекцией прямого газового обогрева . . . 720

ОГЛАВЛЕНИЕ

8.5.2. Производство горячей воды на отопление и санитарное водоснабжение 721

8.5.2.1. Общая часть 721

8.5.2.1.1. Введение 721
8.5.2.1.2. Отопление 721
8.5.2.1.2.1. Выражение комфорта 721
8.5.2.1.2.2. Потребности в тепле 721
8.5.2.1.3. Горячая санитарная вода 722
8.5.2.1.3.1. Использование 722
8.5.2.1.3.2. Потребности 722
8.5.2.1.4. Библиография 723

8.5.2.2. Системы 723

8.5.2.2.1. Различные возможные системы отопления и горячего водоснабжения 723
8.5.2.2.2. Циркуляция горячей воды в системе отопления 723
8.5.2.2.2.1. Двухтрубная система 723
8.5.2.2.2.2. Однотрубная система 723
8.5.2.2.2.3. Однотрубная система с замыкающим участком 724
8.5.2.2.2.4. Система гидрокабеля (или спрут) 724
8.5.2.2.3. Система воздушного отопления 724
8.5.2.2.4. Система горячего водоснабжения 724
8.5.2.2.4.1. Индивидуальная система 724
8.5.2.2.4.2. Коллективное водоснабжение 724

8.5.2.3. Регулирование центрального водяного отопления 725

8.5.2.3.1. Общая часть 725
8.5.2.3.2. Основной принцип классического регулирования 725
8.5.2.3.3. Оборудование для классического регулирования 725
8.5.2.3.4. Регулируемое отопление 725
8.5.2.3.5. Будущие перспективы регулирования газового отопления 726

8.5.2.4. Рекуперация тепла в жилом и нежилом секторе: двойная подача газа 726

8.5.2.4.1. Рекуперируемое тепло 726
8.5.2.4.2. Использование теряемого тепла для подогрева свежего воздуха: двойной поток газа 727
8.5.2.4.3. Экономия газа, осуществляемая с помощью двойного потока газа 728

8.5.2.5. Конденсация 728

8.5.2.5.1. Принцип 728
8.5.2.5.2. Технология 728
8.5.2.5.2.1. Котел с прямым обменом 728
8.5.2.5.2.2. Котел с непрямым обменом 728
8.5.2.5.3. К.П.Д. 729
8.5.2.5.4. Установка 730

8.5.2.6. Газовые аппараты для отопления и горячего водоснабжения 730

8.5.2.6.1. Введение 730
8.5.2.6.2. Аппараты для индивидуального производства горячей воды (водонагреватели) 730
8.5.2.6.2.1. Индивидуальные водоподогреватели 730
8.5.2.6.3. Генератор тепла для отопления зданий 734
8.5.2.6.3.1. Воздухоподогреватели 734
8.5.2.6.3.2. Оборудование для общественных и индивидуальных потребителей 734
8.5.2.6.3.3. Котлы для получения горячей воды 735
8.5.2.6.4. Особые генераторы тепла 740
8.5.2.6.4.1. Тепловые газовые насосы 740

8.5.3. Коммерческое и ремесленническое применение 740

8.5.3.1. Колбасные изделия – соления 740

8.5.3.2. Водонагреватели коммерческого, общественного и кустарного секторов 741

8.5.3.2.1. Горячая вода в сфере обслуживания 741
8.5.3.2.2. Оборудование для производства горячей воды 741
8.5.3.2.3. Специальное оборудование 741
8.5.3.2.3.1. Общая характеристика 742
8.5.3.2.3.2. Примеры 742

ОГЛАВЛЕНИЕ

8.5.3.3. Обработка текстиля. Утюжка, гладильный пункт . . . 743
8.5.3.3.1. Пар . . . 743
8.5.3.3.2. Котлы . . . 743
8.5.3.3.2.1. Различные типы котлов . . . 743
8.5.3.3.2.2. Безопасность. Регламентация . . . 744
8.5.3.3.3. Правила установки . . . 744
8.5.3.3.4. Тенденции и эволюция котлов . . . 744
8.5.3.4. Обработка текстиля. Прачечная . . . 744
8.5.3.4.1. Описание прачечной . . . 744
8.5.3.4.2. Оборудование . . . 744
8.5.3.4.2.1. Для стирки . . . 744
8.5.3.4.2.2. Сушильный шкаф . . . 744
8.5.3.4.2.3. Сушильно-гладильный пресс . . . 745
8.5.3.5. Сушка и обжиг краски . . . 745
8.5.3.5.1. Наложение и сушка краски . . . 745
8.5.3.5.1.1. Наложение . . . 745
8.5.3.5.1.2. Сушка . . . 745
8.5.3.5.2. Тип кабин . . . 745
8.5.3.5.3. Источники тепла . . . 745
8.5.3.5.3.1. Сушка воздушными струями (воздух, нагретый непосредственно пламенем) . . . 745
8.5.3.5.3.2. Непрямой подогрев воздуха (с помощью теплообменника) . . . 745
8.5.3.5.3.3. Инфракрасное излучение . . . 745
8.5.3.6. Кустарная (ремесленническая) булочная . . . 745
8.5.3.6.1. Печи тяжелые кирпичные . . . 745
8.5.3.6.2. Печи с паровыми трубами "Perkins" . . . 746
8.5.3.6.3. Печи с кольцеобразными паровыми трубами "Manesmann" . . . 746
8.5.3.6.4. Печь конвекции горячих газов вокруг выпечной камеры . . . 746
8.5.3.6.5. Печь с принудительной конвекцией горячего воздуха в камере (с теплообменником) . . . 746
8.5.3.6.6. Печь с принудительной конвекцией горячего газа в камерах (без теплообменника) . . . 746
8.5.3.7. Промышленные хлебопекарни. Бисквитная и сахарная фабрики . . . 749
8.5.3.7.1. Печи прямого нагрева . . . 749
8.5.3.7.2. Печь непрямого обогрева . . . 750
8.5.3.7.3. Циклотермическая печь с непрямым обогревом . . . 750
8.5.3.7.4. Машины для вафель . . . 750
8.5.3.7.5. Ориентировочное потребление для различного производства . . . 751
8.5 3.8. Дистилляция на открытом огне . . . 751

8.5.4. Применение в сельском хозяйстве . . . 752

8.5.4.1. Общая часть . . . 752
8.5.4.1.1. Основные свойства газа, применяемого в сельском хозяйстве . . . 752
8.5.4.1.2. Эволюция и общие положения . . . 752
8.5.4.2. Тепличное производство . . . 752
8.5.4.2.1. Действие хлорофилла . . . 752
8.5.4.2.2. Эффективность теплицы . . . 753
8.5.4.2.3. Поддержание температуры воздуха и почвы . . . 753
8.5.4.2.3.1. Процесс отопления теплиц горячей водой . . . 753
8.5.4.2.3.2. Процесс нагревания теплиц горячим воздухом . . . 754
8.5.4.2.3.3. Обогрев теплиц радиационными трубами низкой температуры . . . 754
8.5.4.2.3.4. Увеличение содержания углекислого газа. Регулирование . . . 754
8.5.4.3. Скотоводство. Биоклиматическое кондиционирование скотоводческих помещений . . . 755
8.5.4.3.1. Потребности животных . . . 755
8.5.4.3.2. Изоляция, вентиляция и регулирование . . . 756
8.5.4.3.3. Техника газового отопления . . . 756
8.5.4.3.3.1. Нагрев окружающей среды (общее отопление помещения) . . . 756
8.5.4.3.3.2. Местное отопление . . . 756

ОГЛАВЛЕНИЕ

8.5.4.3.4. Производство горячей воды . . . 756

8.5.4.4. Сушка в сельском хозяйстве . . . 756

8.5.4.4.1. Сельскохозяйственная продукция, подлежащая сушке . . . 757
8.5.4.4.2. Сушка зерна . . . 757
8.5.4.4.2.1. Сушка зерна на ферме . . . 757
8.5.4.4.2.2. Сушка зерна в хранилище . . . 757
8.5.4.4.2.3. Рециркуляция использованного воздуха . . . 758
8.5.4.4.3. Сушка фуража . . . 758
8.5.4.4.4. Сушка табака . . . 759
8.5.4.4.5. Разное . . . 760

8.5.5. Промышленное применение . . . 760

8.5.5.1. Котлы . . . 760

8.5.5.1.1. Определение. Общая часть . . . 760
8.5.5.1.2. Элементы, составляющие классический котел . . . 761
8.5.5.1.2.1. Горелки . . . 761
8.5.5.1.2.2. Топка . . . 761
8.5.5.1.2.3. Теплообменники . . . 761
8.5.5.1.2.4. Вспомогательное оборудование . . . 761
8.5.5.1.3. Типы котлов . . . 763
8.5.5.1.3.1. Котлы с дымовыми трубами (газотрубные котлы)(с. 765) . . . 763
8.5.5.1.3.2. Котлы с водяными трубами (водотрубные котлы) . . . 765
8.5.5.1.3.3. Другие типы котлов . . . 766
8.5.5.1.4. Элементы, характеризующие котел . . . 766
8.5.5.1.4.1. Теплоноситель . . . 766
8.5.5.1.4.2. Водяной объем циркуляции теплоносителя . . . 766
8.5.5.1.4.3. Объем топки . . . 767
8.5.5.1.4.4. Поверхность обмена . . . 767
8.5.5.1.4.5. Клеймо . . . 767
8.5.5.1.4.6. Термический коэффициент полезного действия . . . 767
8.5.5.1.4.7. Избыток воздуха в дыме . . . 767
8.5.5.1.4.8. Температура продуктов сгорания . . . 767
8.5.5.1.4.9. Потери тепла через стенки . . . 768
8.5.5.1.5. Перевод котлов на природный газ . . . 768

8.5.5.2. Отопление промышленных зданий . . . 769

8.5.5.2.1. Введение . . . 769
8.5.5.2.2. Отопление горячим воздухом . . . 769
8.5.5.2.2.1. Расчет установленной мощности и расчетный баланс потребления . . . 769
8.5.5.2.2.2. Разнообразная техника . . . 770
8.5.5.2.3. Радиационное отопление . . . 772
8.5.5.2.3.1. Общая часть . . . 772
8.5.5.2.3.2. Разнообразная техника . . . 772

8.5.5.3. Сушка . . . 774

8.5.5.3.1. Несколько теоретических аспектов . . . 774
8.5.5.3.1.1. Определение . . . 774
8.5.5.3.1.2. Элементы теории . . . 776
8.5.5.3.1.3. Основные типы сушки, используемые в промышленности . . . 776
8.5.5.3.2. Сельскохозяйственное и промышленное применение . . . 777
8.5.5.3.2.1. Сушка инфракрасная . . . 777
8.5.5.3.2.2. Конвективная сушка . . . 779
8.5.5.3.2.3. Сушка теплопроводностью . . . 784
8.5.5.3.3. Несколько экономических показателей . . . 786

8.5.5.4. Нагрев промышленных жидкостей . . . 786

8.5.5.4.1. Введение . . . 786
8.5.5.4.2. Удобства специальных способов использования газа . . . 786
8.5.5.4.3. Специальная аппаратура . . . 786
8.5.5.4.3.1. Погружное горение . . . 786
8.5.5.4.3.2. Погружные трубы . . . 788
8.5.5.4.3.3. Компактные погружные теплообменники . . . 788
8.5.5.4.4. Выбор специальной газовой техники . . . 790
8.5.5.4.5. Применение . . . 790

ОГЛАВЛЕНИЕ

8.5.5.5. Нагревательные печи металлургической и керамической промышленности 790
8.5.5.5.1. Общее использование 790
8.5.5.5.2. Принцип устройства и работы 790
8.5.5.5.3. Результаты эксплуатации 791
8.5.5.5.3.1. Металлургия и машиностроение 791
8.5.5.5.3.2. Керамика 791
8.5.5.6. Плавильные печи 791
8.5.5.6.1. Общая часть 791
8.5.5.6.2. Классификация плавильных печей 793
8.5.5.6.3. Принципы строительства и работы 794
8.5.5.6.3.1. Наиболее распространенные устройства 794
8.5.5.6.3.2. Другие плавильные печи 794
8.5.5.6.4. Применение 795
8.5.5.6.4.1. Черная металлургия 795
8.5.5.6.4.2. Производство стекла 795
8.5.5.6.5. Результаты эксплуатации 795
8.5.5.7. Цементные печи 795
8.5.5.7.1. Изготовление цемента 795
8.5.5.7.2. Процессы изготовления 795
8.5.5.7.2.1. Влажный способ 795
8.5.5.7.2.2. Полусухой способ 795
8.5.5.7.2.3. Сухой способ 796
8.5.5.7.3. Характеристики цементных печей 796
8.5.5.7.4. Оборудование обогрева 798
8.5.5.7.5. Цемент во Франции 799
8.5.5.8. Известковые печи 799
8.5.5.8.1. Производство извести 799
8.5.5.8.2. Вертикальные печи 799
8.5.5.8.3. Вращающиеся печи 802
8.5.5.8.4. Известь во Франции 802
8.5.5.9. Комбинированное производство механической энергии тепла и холода 803
8.5.5.9.1. Определение 803
8.5.5.9.2. Различные способы использования 803
8.5.5.9.3. Приводные машины 803
8.5.5.9.3.1. Двигатели внутреннего сгорания 803
8.5.5.9.3.2. Газовая турбина 803
8.5.5.9.3.3. Тепловой насос с газовым двигателем 803
8.5.5.10. Топливные элементы 806
8.5.5.10.1. Список литературы 806

8.5.6. Тепловые газовые насосы 806

8.5.6.1. Определение 806
8.5.6.2. Концепция 806
8.5.6.3. Графическое представление цикла теплового насоса 808
8.5.6.4. Основные соотношения 808
8.5.6.5. Производство энергии сжатия 808
8.5.6.6. Компрессионные тепловые насосы 808
8.5.6.6.1. Флюиды 808
8.5.6.6.2. Состав компрессионного теплового насоса 809
8.5.6.7. Абсорбционные тепловые насосы 810
8.5.6.7.1. Принцип "химического компрессора" 810
8.5.6.7.2. Совершенствование и эволюция абсорбционных тепловых насосов 810
8.5.6.8. Использование тепловых насосов 810
8.5.6.8.1. В области индивидуального жилья 810
8.5.6.8.2. В области коллективного жилья и ремесла (мелкого производства) 810

ОГЛАВЛЕНИЕ

8.5.6.8.3. В промышленной области . . . 812
8.5.6.9. Другие тепловые насосы . . . 812

8.5.7. Газ – горючее . . . 812

8.5.7.1. Общая часть . . . 812
8.5.7.2. Адаптация бензиновых автомобилей к G.P.L./C . . . 813
8.5.7.3. Производство и использование G.N.A. . . . 814
8.5.7.3.1. Станции распределения . . . 814
8.5.7.3.2. Адаптация автомобилей . . . 814
8.5.7.3.2.1. Баки горючего . . . 814
8.5.7.3.2.2. Система снабжения . . . 814
8.5.7.3.2.3. Прочее оборудование . . . 814

8.5.8. Использование газа в химической промышленности . . . 814

8.5.8.1. Общая часть . . . 814
8.5.8.2. Производство газа синтеза . . . 816
8.5.8.2.1. Реакции и анализ производимых газов . . . 816
8.5.8.2.2. Водород . . . 816
8.5.8.3. Использование газа синтеза в химии . . . 816
8.5.8.3.1. Синтез аммиака . . . 816
8.5.8.3.2. Синтез метанола . . . 816
8.5.8.3.3. Синтез "ОХО" (оксосинтез) . . . 817
8.5.8.3.4. Уксусная кислота . . . 817
8.5.8.4. Химическое использование метана . . . 817
8.5.8.4.1. Производство ацетилена . . . 817
8.5.8.4.2. Сероуглерод . . . 817
8.5.8.4.3. Хлористые производные от метана . . . 818

8.6. НОРМАЛИЗАЦИЯ И КВАЛИФИКАЦИЯ АППАРАТОВ И ОБОРУДОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ГАЗ . . . 819

8.6.1. Цель нормализации . . . 819

8.6.1.1. Прочность, долговечность . . . 819
8.6.1.2. Функционирование, КПД . . . 819
8.6.1.3. Безопасность . . . 819
8.6.1.4. Эффективность вспомогательного оборудования . . . 820
8.6.1.5. Адаптация к разным газам . . . 820
8.6.1.6. Пригодность к использованию . . . 820
8.6.1.7. Техника испытаний . . . 821

8.6.2. Выработка норм . . . 821

8.6.3. Организация нормализации во Франции . . . 821

8.6.4. Международная нормализация . . . 822

8.6.5. Сертификация материалов . . . 822

8.7. РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ГАЗОВЫХ УСТАНОВОК . . . 824

8.7.1. Общие сведения . . . 824

8.7.2. Уставный текст . . . 824

8.7.2.1. Газовые установки . . . 824
8.7.2.2. Окружающая среда газовых установок . . . 824

8.7.3. Искусство регламентирования . . . 824