Библиотека СОК

В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц
В. М. Тымчак

СОЖИГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

СПРАВОЧНИК

В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц, В. М. Тымчак

СОЖИГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

СПРАВОЧНИК

Москва «МЕТАЛЛУРГИЯ» 1981

УДК 662.9(083)

Рецензент В. И. МИТКАЛИННЫЙ

УДК 662.9(083)

Сожигательные устройства нагревательных и термических печей. Справочник. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е., Тымчак В. М. М.: Металлургия, 1981 272 с.

Даны основные положения разработки систем отопления нагревательных и термических печей, классификация и общие требования к сожигательным устройствам. Приведены различные типы горелок и форсунок, рекомендуемые к применению, газовые радиационные трубы, системы зажигания и контроля пламени, огнеупорные горелочные блоки. Изложены принципы испытания и изготовления сожигательных устройств.

Рассчитан на инженерно-технических работников проектных, исследовательских и наладочных организаций, металлургических и машиностроительных заводов, где применяют сожигательные устройства. Может быть полезен преподавателям и студентам вузов и техникумов соответствующей специализации. Ил. 173. Табл. 55. Библиогр. список: 40 назв.

ИБ № 1719

Виктор Львович ГУСОВСКИЙ,
Адольф Ефимович ЛИФШИЦ,
Вячеслав Михайлович ТЫМЧАК

СОЖИГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

(Справочник)

Редактор издательства И. А. Соколовская
Художественный редактор А. И. Гофштейн
Технический редактор В. В. Михайлова
Корректоры Л. М. Зинченко, М. Д. Носова
Переплет художника В. З. Казакевича

Сдано в набор 29.10.80 Подписано в печать 05.02.81 Т-03344 Формат бумаги 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Гарнитура литературная Печать высокая Усл. печ. л. 14,28 Уч.-изд. л. 18,03 Тираж 5700 экз. Заказ 552 Цена 1 р. 20 к. Изд. № 0090

Издательство «Металлургия», 119034, Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., д. 14

Владимирская типография «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

Г $\frac{31001-073}{040(01)-81}$ 80—81 2601000000

© Издательство «Металлургия», 198

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

ведение 6

Глава 1

Общие принципы разработки систем отопления нагревательных и термических печей 9

1.1. Основные положения. 9
1.2. Нагревательные колодцы 12
1.3. Высокотемпературные нагревательные проходные печи 13
1.4. Проходные и протяжные печи для термической обработки 16
1.5. Садочные печи для термической обработки . . . 19

Глава 2

Классификация сожигательных устройств и общие требования к их конструкции 20

Глава 3

Горелки без предварительного смешения 23

3.1. Расчет основных размеров горелок без предварительного смешения 24
3.2. Горелки типа «труба в трубе» 28
3.3. Выбор горелок типа «труба в трубе» 32
3.4. Горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ 39

Глава 4

Горелки с улучшенным смешением 42

4.1. Горелки нагревательных колодцев 43
4.2. Горелки для природного газа низкого давления типа ГНП 47
4.3. Турбулентные горелки для газов с низкой теплотой сгорания типа ГТН 52
4.4. Горелки с постоянной длиной факела 56
4.5. Радиационные горелки типа ГР 58
4.6. Плоскопламенные горелки типа ГПП 63
4.7. Горелки с излучающей чашей типа ГВИЧ . . . 66

Глава 5

Горелки с предварительным смешением 68

5.1. Расчет инжекционных горелок 71
5.2. Выбор и пересчет нормализованных горелок . . 83
5.3. Инжекционные горелки типа Н 85
5.4. Инжекционные горелки типа П 92
5.5. Инжекционные горелки типа В и ВП 98
5.6. Беспламенные панельные горелки типа ГБПш . . 104
5.7. Инжекционно-атмосферные горелки типа ИА . . 106
5.8. Двухпроводные инжекционные смесители . . . 109
5.9. Скоростные горелки типа ГВ 113
5.10. Горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева 115

Стр.

5.11. Струйно-стабилизаторные горелки типа СГ . . . 116
5.12. Горелки с переменным избытком воздуха типа ПИВ 118

Глава 6

Форсунки для сжигания жидкого топлива 120

6.1. Расчет форсунок высокого давления 122
6.2. Форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД 128
6.3. Короткофакельные форсунки системы Карабина типа ФК 131
6.4. Форсунки низкого давления конструкции Стальпроекта 135

Глава 7

Газомазутные горелки 138

7.1. Газо-мазутные горелки нагревательных печей завода «Серп и молот» 139
7.2. Газо-мазутные горелки типа ГКВГ 140
7.3. Газо-мазутные горелки типа КГМГ-А 144

Глава 8

Радиационные трубы 147

8.1. Тупиковые радиационные трубы типа ТРТ . . . 147
8.2. Тупиковые радиационные трубы типа ТРР . . . 153
8.3. U-образные радиационные трубы с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект 161
8.4. U-образные радиационные трубы типа ТРУ . . . 163
8.5. W-образная радиационная труба 167

Глава 9

Системы зажигания и контроля пламени горелок 169

9.1. Переносные запальники конструкции Ленгипроинжпроекта 172
9.2. Переносные инжекционные запальники типа ИПЗ конструкции Мосгазпроекта 172
9.3. Пилотно-запальное устройство типа ПЗУ-1 . . . 174
9.4. Пилотно-защитное устройство типа ПЗУ 174
9.5. Запально-защитные устройства типа ЗЗУ завода «Ильмарине» 176
9.6. Комплект приборов завода «Старорусспрнбор» . . 181
9.7. Требования безопасности 184

Глава 10

Огнеупорные горелочные туннели 186

10.1. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВБ и ДНБ 187
10.2. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВС и ДНС 190
10.3. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГНП 193
10.4. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГР 194

Стр.

10.5. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГПП 195
10.6. Горелочный туннель для инжекционных горелок . 196
10.7. Огнеупорные горелочные блоки для инжекционных горелок с диаметром носика до 100 мм 197
10.8. Огнеупорные горелочные блоки для крупных инжекционных горелок нагревательных печей . . . 198
10.9. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ИА 199

Глава 11

Принципы испытания сожигательных устройств 200

11.1. Контрольные испытания газовых горелок . . . 200
11.2. Особенности контрольных испытаний радиационных труб 217
11.3. Особенности контрольных испытаний газо-мазутных горелок 220

Глава 12

Принципы изготовления сожигательных устройств . . . 223

Приложение I 230

Приложение II 268

Библиографический список 269

ВВЕДЕНИЕ

В связи с задачами, поставленными Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года перед черной металлургией, повысились требования к качеству прокатной продукции, что в свою очередь приводит к усложнению и совершенствованию режимов термической обработки, а также к росту единичной мощности нагревательных и термических печей.

Для удовлетворения этих требований разрабатываются и внедряются принципиально новые или коренным образом усовершенствуются существующие печные агрегаты.

Одной из основных систем печного агрегата является система отопления, правильность выбора которой в значительной мере определяет соблюдение технологии, удобство эксплуатации, экономичность работы печи и чистоту воздушного бассейна. Одним из основных элементов системы отопления печи следует считать сожигательные устройства и нагреватели.

Еще 10—15 лет назад при проектировании печей прокатного производства применяли 2—3 типа сожигательных устройств. В настоящее же время в связи с усложнением конструкций печей и проводимых в них режимов оказалось необходимым располагать значительно бо́льшим числом типов сожигательных устройств с различными характеристиками. Такие устройства разрабатывались и внедрялись в промышленность. Их разработкой занимались многие организации и предприятия, вследствие чего появилось большое число однотипных сожигательных устройств, часто различающихся лишь конструктивным исполнением. В связи с этим проводятся государственные испытания с целью отбора сожигательных устройств для серийного изготовления.

В настоящем справочнике представлены данные об отечественных сожигательных устройствах и нагревателях, применяемых в современных нагревательных и термических печах, главным образом прокатного производства металлургических предприятий. Разумеется, что эти устройства могут применяться на аналогичных печах других отраслей промышленности. В справочнике рассмотрены горелочные устройства и нагреватели, прошедшие государственные испытания или хорошо зарекомендовавшие себя при многолетней эксплуатации.

Однако, несмотря на то, что сожигательное устройство является одним из основных элементов системы отопления, нельзя отождествлять выбор сожигательного устройства и разработку системы отопления. При разработке системы отопления необходимо решить целый комплекс вопросов, касающихся практически всех сторон работы печи. В зависимости от путей решения этого комплекса может оказаться, что для агрегатов аналогичного назначения будет оптимальным применение различных сожигательных устройств, а для существенно различных агрегатов — одинаковых сожигательных устройств.

По этой причине в главе 1 справочника даны общие принципы разработки систем отопления, иллюстрированные схемами систем отопления печей прокатного производства. Этот материал необходим для ориентации при выборе сожигательных устройств и нагревателей. Более подробное рассмотрение систем отопления нагревательных и термических печей выходит за рамки настоящего справочника.

В настоящее время существует ряд классификаций сожигательных устройств, основанный на различных показаниях. Однако для облегчения выбора типа сожигательного устройства, наиболее полно соответствующего требованиям технологии, следует предпочесть классификацию, в основу которой положена степень развития в устройстве процесса смешения топлива и воздуха для горения. Такая классификация дана в главе 2. Там же изложены общие требования к конструкциям сожигательных устройств.

Данные о конструкции, основных размерах, характеристиках, методике расчета или выбора и области применения газовых и газо-мазутных горелок, форсунок и радиационных труб приведены в главах 3—8. Методики расчетов сожигательных устройств иллюстрированы примерами, охватывающими все наиболее часто встречающиеся в практике случаи.

Дополнительным элементам сожигательных устройств (системы зажигания, контроля пламени и горелочные туннели) посвящены главы 9—10.

В главах 11 и 12 изложены принципы испытания и изготовления сожигательных устройств.

В приложении даны основные характеристики и графики расчетов сгорания газообразного и жидкого топлива. Эти материалы существенно сокращают трудоемкость расчетов сожигательных устройств. Там же приведены необходимые при выборе сожигательных устройств данные, характеризующие горение газообразного топлива.

Справочник написан на основании более чем пятидесятилетнего опыта проектирования печей в институте «Стальпроект», а также конструирования, расчета, испытания и нормализации сожигательных устройств и радиационных труб в институте и совместно с ВНИИМТом, Институтом газа АН СССР, ВНИИпромгазом и др., литературных данных и личного опыта авторов.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

c — теплоемкость, Дж/(м³·К) [Дж/(кг·К)];
d — диаметр, мм;
$E(i)$ — энергия (теплосодержание), Дж/кг;
F — площадь, мм²;
L_0 — стехиометрическое количество воздуха, м³/м³ (м³/кг);
$L = \alpha L$ — действительное количество воздуха, м³/м³ (м³/кг);
P — абсолютное давление, Па;
p — избыточное давление, Па;
$Q_н^р$ — низшая теплота сгорания, Дж/м³ (Дж/кг);
t — температура, °С;
T — » , К;
$V(G)$ — количество (пропускная способность, м³/с (кг/с);
w — скорость, м/с;
α — коэффициент расхода воздуха;
ξ — коэффициент сопротивления;
$\varphi(\mu)$ — коэффициент истечения;
ρ — плотность, кг/м³;
m — объемная кратность инжекции;
n — массовая кратность инжекции.

Индексы

в — воздух;
г — газ;
см(с) — смесь;
0 — при температуре 0° С и давлении 103,3 кПа.

Глава 1

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

1.1. Основные положения

Системой отопления печи является совокупность сожигательных устройств или нагревателей, устройств для подачи топлива и воздуха для горения, эвакуации продуктов сгорания и утилизации их тепла.

При разработке системы отопления печи необходимо выбрать и рассчитать:

тип, характеристику, число и расположение в печи сожигательных устройств или нагревателей;

характер движения продуктов сгорания или атмосфер контролируемого состава в рабочем пространстве печи и в случае необходимости устройства для организации циркуляции этих газовых сред;

способ подачи воздуха для горения и уборки продуктов сгорания, схемы разводки топлива и воздуха для горения;

температуры подогрева топлива и воздуха для горения; тип, размеры и характеристику рекуператоров.

Решения всех этих вопросов тесно взаимосвязаны. Например, при применении инжекционных горелок с инжекцией воздуха газом необходима установка блочного керамического рекуператора для подогрева воздуха для горения. Это диктуется тем, что такой рекуператор имеет самое низкое сопротивление по воздушному пути, и поэтому чрезмерного повышения давления газа перед горелкой не потребуется.

В связи с этим система отопления печи может быть правильно сконструирована только при комплексном подходе к ее разработке.

Цель разработки системы отопления печи — обеспечить осуществление теплового, температурного и аэродинамического режимов, необходимых для оптимального проведения технологического процесса, для которого предназначена печь, а также максимальную экономичность работы агрегата и удобства его эксплуатации.

При разработке системы отопления печи необходимо опираться на целый ряд исходных положений и удовлетворять специальные требования, предъявляемые к системе отопления.

Тип и конструкция печи в значительной мере определяют схему системы отопления. Садочные печи, устанавливаемые в отделении в количестве нескольких десятков (например, нагревательные колодцы), предпочтительно отапливать одной мощной горелкой со сравнительно широкими пределами регулирования. Это позволит ограничиться установкой небольшого числа горелок, что облегчит эксплуатацию отделения. Горелка с широкими пределами регулирования необходима для проведения садочного режима нагрева со значительным сокращением подачи топлива к концу цикла. В печах проходного и протяжного типа необходим распределенный под-

вод тепла по длине печи многочисленными горелками сравнительно небольшой мощности. Ввиду постоянства во времени теплового режима этих печей на них можно применять горелки со сравнительно узкими пределами регулирования. При большом числе горелок на печи, при конструировании разводки топлива и воздуха необходимо принимать меры для равномерного распределения компонентов горения между всеми горелками зоны регулирования.

В зависимости от вида и характеристики нагреваемых изделий или заготовок даже для одного типа печей могут потребоваться разные системы отопления. Например, в колпаковой печи для отжига рулонов в отличие от такой же печи для отжига стоп листов необходима искусственная циркуляция атмосферы контролируемого состава под муфелем.

Одним из наиболее значительных факторов, определяющих выбор системы отопления печи, является проводимый в ней технологический процесс. При нагреве в атмосфере контролируемого состава необходимо применять радиационные трубы или электрические нагреватели сопротивления. Если технологией предусмотрена выдержка нагреваемого изделия при заданных температурах, то в непрерывных печах предусматриваются камеры выдержки. Система отопления этих камер должна компенсировать потери тепла и обеспечивать высокую равномерность нагрева. Необходимость работы при повышенных скоростях нагрева заставляет применять печи с высокой температурой рабочего пространства даже при умеренных температурах нагрева металла. Для обеспечения повышающихся требований к равномерности нагрева заготовок перед прокаткой в проходных нагревательных печах отказываются от торцового отопления и переходят к отоплению многочисленными сводовыми горелками.

Температурный режим работы печи чрезвычайно сильно влияет на выбор системы отопления. Высоко- или среднетемпературный нагрев можно организовать, используя в основном теплопередачу излучением. В этом случае применяют нагрев открытым пламенем или с помощью радиационных труб. Сложнее организовать нагрев до 400—500° С и ниже. В таких печах применяют выносные топки или сжигание с высокими коэффициентами расхода воздуха.

Организация струйного нагрева или интенсивной принудительной циркуляции газов в рабочем пространстве обеспечивает конвективный нагрев заготовок или изделий. При низкотемпературном нагреве необходимо принимать специальные меры для надежного зажигания топлива и контроля горения.

Особенно сложно выбрать систему отопления если в печи должны проводиться операции при различных температурах (например, нормализация и отпуск). В отдельных случаях при разных режимах нагреваемые изделия проходят через печь в противоположных направлениях. Система отопления таких печей должна строиться с применением групп горелок, отключающихся автоматически, или горелок с широким диапазоном регулирования расхода воздуха.

Пропускную способность системы отопления печи по топливу, воздуху и продуктам сгорания принимают соответствующей тепловой мощности печи. Тепловую мощность рассчитывают, исходя из максимальной производительности при наиболее высокотемпературном режиме. Однако при разработке системы отопления следует иметь в виду, что значительную часть времени печь работает с меньшим расходом топлива. Это имеет место при работе станов

на трудоемких профилях, переходе на нагрев изделий иных размеров и иного качества, изменении технологического режима и т. п. Для обеспечения нормальной работы печи при пониженных расходах топлива необходимо выбирать горелки с соответствующими пределами регулирования и предусматривать автоматическое отключение части горелок. Система автоматического регулирования теплового режима должна быть работоспособна и при низких расходах. При выборе мер защиты рекуператоров и решении задачи вторичного использования тепла отходящих продуктов сгорания следует учитывать возможность длительной работы печи при пониженном расходе топлива.

Одной из задач, которую нужно решать при разработке системы отопления, является организация аэродинамического режима рабочего пространства. Сожигательные устройства должны быть расположены так, чтобы по длине печи не было значительного изменения давления. Давление в рабочем пространстве должно быть таким, чтобы подсосы воздуха в печь и выбивание продуктов сгорания из печи были минимальными. Соответствующее расположение горелок позволит создать циркуляцию или рециркуляцию продуктов сгорания в рабочем пространстве, что повысит равномерность и сократит длительность нагрева заготовок или изделий. В печах с атмосферой контролируемого состава для этой же цели разрабатываются системы отопления с применением циркуляционных вентиляторов, благодаря которым удается наиболее радикально интенсифицировать теплообмен в рабочем пространстве печи.

Существенным фактором, определяющим выбор системы отопления печи, являются вид и характеристика топлива. Если заготовки приходится нагревать до высокой температуры газом с низкой теплотой сгорания, то необходим либо высокотемпературный нагрев компонентов горения, либо сочетание горелок предварительного смешения и умеренного подогрева компонентов горения. Не все сожигательные устройства настолько универсальны, чтобы успешно работать на разных газах. Поэтому вид топлива часто определяет выбор сожигательного устройства. Особенно сложны случаи комбинированного отопления двумя газами или, что еще сложнее, газом и мазутом. Основная трудность состоит в том, что сжигание жидкого и газообразного топлива следует организовывать по-разному. Различие во времени, необходимом для сгорания, влияет на характеристику факела. Это затрудняет создание сожигательного устройства, равно удовлетворяющего требованиям технологии при сжигании как газа, так и мазута. В ряде случаев приходится одновременно устанавливать на печи два комплекта сожигательных устройств раздельно для каждого вида топлива. Естественно, что при комбинированном отоплении существенно усложняются разводки топлива и воздуха для горения, а также система автоматического регулирования теплового режима печи.

Обязательным условием успешного решения системы отопления печи является комплексная ее разработка совместно со схемой автоматического регулирования теплового режима печи. Применение двухпозиционного, ступенчатого или пропорционального регулирования подачи топлива, автоматического отключения групп горелок, автоматическое изменение коэффициента расхода воздуха и другие возможности автоматики позволяют достаточно просто решать системы отопления даже в чрезвычайно сложных случаях.

Системы отопления печей, безусловно, должны разрабатывать-

ся с соблюдением всех правил техники безопасности. Кроме того, они должны быть удобны в эксплуатации и обслуживании. Следует стремиться полностью исключить надобность ручного вмешательства в работу системы отопления в процессе эксплуатации. Все элементы системы должны быть легко доступны для наблюдения за их работой, обслуживания и ремонта.

При разработке системы отопления необходимо предусматривать меры по сокращению вредных выбросов в воздушный бассейн. Подавляющее большинство металлургических печей отапливается газом, основной вредной составляющей продуктов сгорания которого являются окислы азота. Для снижения содержания окислов азота следует стремиться к рассредоточению подвода тепла в рабочее пространство печи, рециркуляции продуктов сгорания, уменьшению времени пребывания газов в области высоких температур, а также по возможности осуществлять двустадийное сжигание топлива и подачу вторичного воздуха в зону горения.

Системы отопления печей должны разрабатываться с учетом экономических факторов, в первую очередь с целью сокращения расходов топлива. Обязательным элементом системы отопления должны быть рекуператоры для подогрева компонентов горения. На основании экономического анализа в ряде случаев может оказаться эффективным энерготехнологический агрегат, в котором нагревательная печь объединяется с паропроизводящей установкой и рекуператором для подогрева воздуха. Следует стремиться к минимально необходимому коэффициенту расхода воздуха, сокращению подсосов в печь воздуха и выбивания из нее продуктов сгорания, а также устранению разбавления воздухом продуктов сгорания по тракту к котлам-утилизаторам или другим теплоутилизационным устройствам.

Практическое применение перечисленных принципов разработки систем отопления иллюстрируют схемы систем отопления основных типов нагревательных и термических печей прокатного производства черной металлургии.

1.2. Нагревательные колодцы

Нагревательные колодцы — это высокотемпературные камерные печи для нагрева слитков большой массы. Конструкция всех элементов колодцев должна отличаться простотой и надежностью работы в условиях воздействия высоких температур и значительных механических усилий.

Современными типами колодцев являются колодцы с отоплением из центра подины (КЦП) и наиболее совершенные — с отоплением одной верхней горелкой (КВГ) (рис. 1). Тепловая мощность КЦП не менее 5,8 МВт, КВГ 11,6 МВт.

При подаче топлива через одну горелку ограничивается длина факела: в КЦП из условия стойкости крышки она должна быть не более 3 м. В КВГ длина факела ограничивается расстоянием до торцовой стены, т. е. должна быть не более 7—9 м. В противном случае будет высока неравномерность нагрева слитков, стоящих на разных расстояниях от горелок. Поэтому в колодцах применяют простейшую горелку с улучшенным смешением: газ подается несколькими струями.

Вследствие высокой температуры продуктов сгорания в нагревательных колодцах применяют керамические рекуператоры, конструктивно объединенные с рабочим пространством. В КЦП воздух к горелке через рекуператор подают вентилятором. В результате этого между воздушной и дымовой сторонами рекуператора возникает перепад давления, приводящий к попаданию воздуха в продукты сгорания. В КВГ воздух просасывается через рекуператор

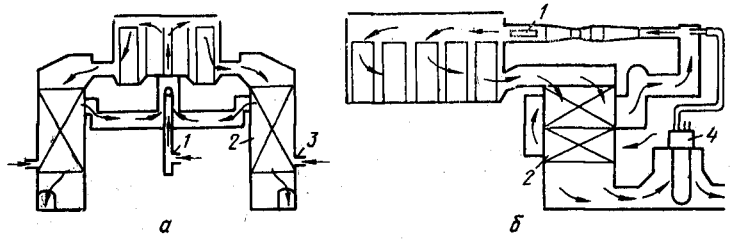


Рис. 1. Схемы нагревательных колодцев:
а — с отоплением у центра подины (КЦП); *б* — с отоплением одной верхней горелкой (КВГ); *1* — подвод газа; *2* — керамический рекуператор; *3* — подвод воздуха; *4*—металлический рекуператор для нагрева инжектирующего воздуха

и подается в горелку с помощью инжектора, работающего на компрессорном воздухе.

За керамическими рекуператорами возможна установка металлических рекуператоров для подогрева газа.

Топливом для колодцев является газ с теплотой сгорания 5,45—5,85 МДж/м³ и выше.

1.3. Высокотемпературные нагревательные проходные печи

Толкательные методические печи (МП), печи с шагающим подом (ПШП) и с шагающими балками (ПШБ), кольцевые (КП) печи работают при противоточном движении металла и продуктов сгорания в рабочем пространстве. Тепловая мощность крупных печей составляет 30 МВт и выше.

Существующие МП отапливают с помощью торцовых горелок (рис. 2), расположенных на одном, трех, четырех или пяти горелочных торцах верхнего и нижнего обогревов.

В нижнем подогреве ПШБ (рис. 3) в большинстве случаев установке торцовых горелок препятствует наличие большого числа стоек стационарных и подвижных подовых балок. Поэтому здесь применяют горелки, установленные на продольных стенах. Эти горелки первоначально делали с постоянной длиной факела, чтобы обеспечить равномерность температур по ширине печи при изменении расхода топлива. Однако практика показала, что это излишне усложняет конструкцию, так как удовлетворительная равномерность достигается и при обычной конструкции горелок.

В зонах верхнего обогрева могут быть установлены торцовые горелки, как и на МП. Однако более целесообразна установка

сводовых плоскопламенных горелок (см. рис. 3, *б*) по всей длине печи. В этом случае достигается высокая равномерность нагрева и гибкость управления работой печи. Отсутствие участков пониженных температур под пережимами, имеющихся при торцовом отоплении, позволяет увеличить длину пода, на которой происходит интенсивный нагрев заготовок. Это приводит к повышению производи-

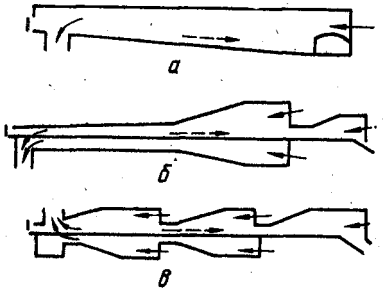


Рис. 2. Схема толкательных методических печей (МП):
а — однозонная; *б* — трехзонная; *в* — пятизонная

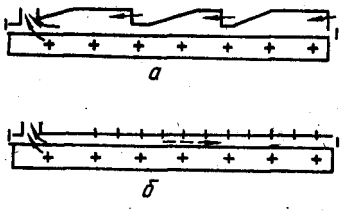


Рис. 3. Схема печей с шагающими балками (ПШБ):
а — с торцовым отоплением верхнего обогрева; *б* — со сводовым отоплением верхнего обогрева

тельности печи приблизительно на 10% (при одинаковой длине). Кроме того, упрощается профиль печи, сокращается объем кладки и уменьшается масса каркаса печи.

Такой же эффект дает применение сводовых горелок и на МП.

Расположение горелок на ПШП аналогично их расположению в верхнем обогреве ПШБ.

В КП при ширине пода до 3,5 м горелки устанавливают только на наружной стене. Горелки располагают тангенциально, так, чтобы факелы были направлены навстречу движению металла. При ширине пода 4,5 м и более горелки устанавливают на наружной и внутренней стенах радиально. На КП возможно также применение сводовых радиационных горелок.

Высокотемпературные нагревательные проходные печи отапливают газом с различной теплотой сгорания, мазутом или комбинированно — газом и (или) мазутом.

В связи с тем что в этих печах необходима высокая калориметрическая температура сгорания (~2000° С), схемы их отопления сильно зависят от вида и характеристики топлива или, наоборот, для определенного типа или конструкции печи требуется определенное топливо.

Если для отопления печи должен быть применен доменный газ или смесь коксового и доменного газов с $Q_н^р \leq 5{,}85$ МДж/м³, система отопления может быть решена на основе применения инжекционных горелок полного предварительного смешения в сочетании с высокотемпературным подогревом компонентов сгорания. Воздух следует подогревать в керамическом блочном рекуператоре до 500—600° С, газ — в металлическом трубчатом рекуператоре до 250—300° С. При работе инжекционных горелок с $\alpha = 1{,}00 \div 1{,}05$ при

этих условиях удается достичь высоких температур вблизи горелок и обеспечить нагрев металла до температуры прокатки.

Для работы на смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 6{,}25 \div 7{,}55$ МДж/м³ при установке инжекционных горелок достаточно подогревать только воздух в керамическом рекуператоре до 500—550° С. Для экономии топлива можно подогревать газ до 250—350° С или установить за печью котел-утилизатор.

Следует отметить, что МП с инжекционными горелками и керамическим рекуператором получаются весьма громоздкими и дорогими. Такую конструкцию следует применять только при отсутствии более богатого топлива. С ПШБ, ПШП и КП керамические блочные рекуператоры скомпоновать очень трудно, а поэтому для указанных печей такая схема отопления практически неприемлема.

Отопление высокотемпературных проходных печей смесью коксового и доменного газов с $Q_н^р = 7{,}55 \div 10{,}00$ МДж/м³ или смесью природного и доменного газов с $Q_н^р < 18{,}75$ МДж/м³ нежелательно. При применении таких смесей резко возрастает опасность проскока (смесь коксового и доменного газов) и уменьшается теплопроизводительность инжекционных горелок. Горелки без предварительного смешения типа «труба в трубе» могут обеспечить необходимую температуру в печи только при достаточно высокой степени подогрева воздуха.

Оптимальным топливом для рассматриваемых печей являются природный газ и смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р > 10{,}00$ МДж/м³ и природного и доменного с $Q_н^р > 18{,}75$ МДж/м³. При отоплении этими газами можно применять горелки типа «труба в трубе» (для торцового отопления) или сводовые плоскопламенные горелки. Для сокращения расхода топлива воздух следует подогревать в металлическом рекуператоре до 400° С. В данном случае конструкция печи получается наиболее простой, компактной, а стоимость сооружения печи — наименьшей.

В черной металлургии мазут для отопления нагревательных печей используют весьма редко. Гораздо чаще применяют комбинированное газо-мазутное отопление с раздельным или совместным сжиганием газа с высокой теплотой сгорания и мазута.

Осуществление совместного сжигания газа и мазута наиболее сложно. В этом случае значительно усложняется система автоматического регулирования теплового режима печи. Кроме того, газ, сгорая быстрее, потребляет кислород воздуха для горения в первую очередь. В результате горение мазута затягивается и образуются продукты химического и механического недожога, в том числе сажистый углерод. Поэтому, как правило, газ и мазут сжигают раздельно, причем мазут является резервным топливом.

При газо-мазутном отоплении чаще всего применяют сожигательные устройства, представляющие собой горелку без предварительного смешения типа «труба в трубе» со встраиваемой в газовое сопло форсункой высокого давления или специальные газо-мазутные горелки. Воздух для горения подогревают в металлическом рекуператоре до 400° С.

В случае отопления рассматриваемых печей мазутом на них устанавливают форсунки высокого давления с двойным распыливанием. Воздух также подогревают до 400° С.

1.4. Проходные и протяжные печи для термической обработки

При термической обработке подвод тепла должен быть рассредоточен по длине рабочего пространства.

В печах этого типа нагреваемые изделия транспортируют с помощью печных рольгангов, шагающих балок и пода, печных конвейеров различных типов или проталкивают по направляющим, а полосу протягивают через печь по приводным роликам.

Длина печей этого типа может достигать 100 м и более, а тепловая мощность до 100 МВт.,

При нагреве изделий до 700° С и выше камеры нагрева этих печей оснащают многочисленными горелками, обычно расположенными с обеих сторон нагреваемого изделия (сверху и снизу), а если это невозможно, — только сверху. При термической обработке в атмосфере контролируемого состава таким же образом располагают радиационные трубы. В вертикальных протяжных печах сожигательные устройства или радиационные трубы располагают с обеих сторон ветви полосы.

В большинстве случаев для проходных и протяжных печей наиболее целесообразно применять инжекционные горелки с инжекцией воздуха газом. При постоянном во времени тепловом режиме ограниченные пределы регулирования инжекционных горелок приемлемы. При большом, а часто огромном числе горелок весьма желательно избежать системы трубопроводов для разводки воздуха, которые чрезмерно осложняют конструкцию печи и затрудняют ее обслуживание.

Горелки работают обычно на холодном газе, так как разводка подогретого газа — сложная задача. Кроме того, сеть газопроводов подобных печей чрезвычайно разветвлена и при прохождении через нее подогретый газ сильно остывает. В связи с тем что обычно устанавливают горелки малых размеров, внутренняя изоляция газопроводов к ним невозможна. Внешняя же изоляция недопустима по правилам техники безопасности.

Радиационные трубы обычно конструируют со встроенным рекуператором для подогрева воздуха. Если требуется высокая равномерность и интенсивность нагрева изделий, то прибегают к циркуляции среды в рабочем пространстве.

На рис. 4 показана схема поперечного сечения печи с шагающими балкам для нагрева изделий на поддонах до 900—950° С. Двухпроводные горелки расположены попеременно выше и ниже уровня пода. Нижняя горелка соединена каналом, расположенным в кладке продольных стен, с верхней частью рабочего пространства, а верхняя горелка — с нижей частью рабочего пространства. Через эти каналы к корню факелов подсасываются продукты сгорания из рабочего пространства. В результате в печи создана система интенсивной рециркуляции продуктов сгорания. Это обеспечивает высокую равномерность распределения температур в поперечном сечении печи.

В печи с роликовым подом для светлого отжига тяжелых бунтов проволоки (нагрев до 770—840° С) для интенсификации и повышения равномерности нагрева применены циркуляционные вентиляторы (рис. 5).

Циркуляционный вентилятор *1*, установленный на поду печи, отсасывает атмосферу контролируемого состава из рабочего пространства. Поток атмосферы из направляющего аппарата *2* омывает тупиковые радиационные трубы *3*, расположенные вертикально у продольных стен печи. Нагретая атмосфера омывает бунты *4*, транспортируемые на роликах *5* печного рольганга.

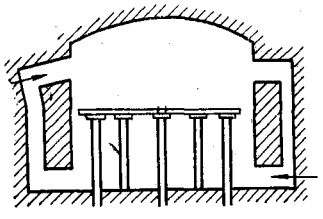


Рис. 4. Схема печи с шагающими балками и с рециркуляцией продуктов сгорания

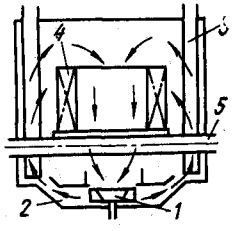


Рис. 5. Схема печи с роликовым подом для отжига тяжелых бунтов проволоки

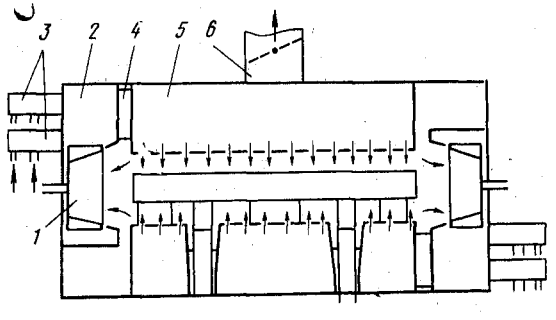


Рис. 6. Схема печи струйного нагрева алюминиевых слябов

При нагреве до низких температур (200—600° С) наиболее предпочтительна система отопления с интенсивным теплообменом конвекцией.

На рис. 6 показана схема поперечного разреза печи с шагающими балками для нагрева до 400—630° С тяжелых алюминиевых слябов. Циркуляционный вентилятор *1*, расположенный на боковой стене печи, подсасывает газовую среду из рабочего пространства и подает ее в продольный канал *2*. В этом канале установлены горелки *3*, позволяющие получить низкотемпературные продукты сгорания. Затем смесь газов через канал *4* поступает в короб *5*. Из коробов через большое число сопел горячий газ направляется с большой скоростью на верхнюю и нижнюю поверхности слябов. Избыточное количество продуктов сгорания сбрасывают через дымопровод *6*. При организованном таким образом струйном нагреве удается достичь высокой равномерности и скорости нагрева.

Иной способ решения системы отопления печи для низкотемпературного нагрева представлен на рис. 7. Здесь схематически пока-

зан поперечный разрез печи с шагающими балками для нагрева до 250—350° С (отпуск) пакетов прутков. Продукты сгорания, смешанные с воздухом, с помощью дымососов отсасываются из рабочего пространства печи. От дымососов смесь поступает в коллектор *1*, а из него в патрубки *2*. В патрубках встроены горелки, где газ сгорает в рециркуляте; образуются низкотемпературные продукты сгорания, которые подаются в продольный короб *3*, а из него в ряд труб *4*. Продукты сгорания из труб выходят в рабочее пространство через многочисленные отверстия и нагревают пакеты

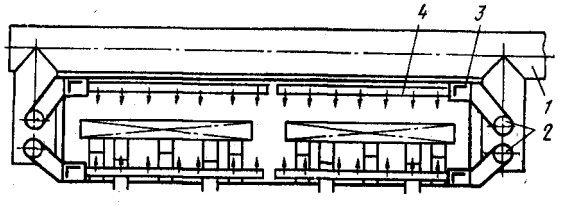


Рис. 7. Схема конвективной печи для нагрева пакетов прутков

прутков. Эта печь предназначена для работы садками, но такая система отопления вполне применима и для непрерывных проходных печей.

В обоих случаях (см. рис. 6 и 7) рециркуляционные контуры разбиты по длине печи на несколько одинаковых секций.

При проектировании низкотемпературных печей совершенно необходимо предусматривать специальные меры по обеспечению взрывобезопасности при эксплуатации: запальные горелки, устройства контроля пламени и т. п.

Если в печи должны проводиться две операции с существенно разными температурами нагрева (например, отпуск и нормализация), то систему ее отопления предпочтительно решать с применением горелок с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха. Благодаря возможности работы этих горелок с большими пределами регулирования расходов топлива и высокими коэффициентами расхода воздуха переход от одного режима к другому может проводиться без отключения части горелок. Если же заданные режимы окажутся неосуществимыми по характеристике этих горелок, то необходима система отопления, предусматривающая отключение части горелок.

Неудобством этой системы является то, что отключать и включать горелки приходится вручную. Для обеспечения безопасности эксплуатации печи при 500—600° С и менее необходимо конструктивно выделить группы горелок, работающих при этом режиме. Эти группы горелок должны быть оснащены устройствами контроля пламени, автоматической отсечкой зоны при погасании горелки и другими устройствами, обеспечивающими взрывобезопасность низкотемпературных печей.

При значительной ширине печи равномерность нагрева изделий может быть обеспечена путем применения отопления сводовыми горелками. Тип горелок должен выбираться в зависимости от технологического режима работы печей.

В современных агрегатах непрерывного горячего цинкования в камере скоростного нагрева необходимо проведение безокислительного нагрева открытым пламенем. С этой целью камеру скоростного нагрева отапливают с помощью горелок, которые обеспечивают сжигание газа с коэффициентом расхода воздуха несколько меньше единицы и практически с полным выгоранием кислорода воздуха.

Для проходных и протяжных печей часто применяют горелки, снабженные запальными горелками. При разработке системы отопления в этих случаях необходимо предусматривать питание запальных горелок газом и воздухом таким образом, чтобы при изменении расхода компонентов сжигания на основные горелки их расходы на запальные горелки оставались постоянными.

1.5. Садочные печи для термической обработки

Садочные печи характеризуются переменным во времени температурым режимом и необходимостью достижения возможно большей равномерности распределения температур по объему рабочего пространства в каждый период цикла. В связи с этим количества тепла, подаваемого в различные периоды цикла, различаются в 10—15 раз.

Простейшие типы садочных печей (камерные со стационарным или выдвижным подом с внешней механизацией) в настоящее время в прокатных цехах металлургических предприятий применяются крайне редко. Получают распространение садочные печи, в которых загружают, разгружают и передают изделия из камеры в камеру с помощью печного рольганга или шагающих балок. Для таких печей системы отопления решаются аналогично системам отопления проходных и протяжных печей (примером может служить печь, схема которой показана на рис. 7). Разумеется, для садочных печей специально должна быть проработана возможность широких пределов изменения подачи тепла. Для обеспечения высокой равномерности температур по объему рабочего пространства целесообразно организовать рециркуляцию среды за счет энергии факелов горелок или с помощью циркуляционных вентиляторов.

Своеобразна система отопления колпаковых печей для отжига рулонов полосы — одного из самых распространенных типов садочных печей. В этих печах стопу рулонов накрывают металлическим муфелем, а затем нагревательным колпаком, в котором расположены горелочные устройства. Продукты сгорания из-под нагревательного колпака удаляют с помощью воздушного эжектора. Подача тепла в течение цикла нагрева должна колебаться в пределах 1 : 12—1 : 15.

В колпаковых печах, построенных по первоначальным проектам, на нагревательном колпаке установлены радиально инжекционные горелки в специальных топках, экранированных от муфеля корундовыми плитками. Однако необходимые высокие пределы регулирования недостижимы при инжекционных горелках. Поэтому применено позиционное регулирование. В начале цикла нагрева подачу топлива регулируют двухпозиционно: тепловая мощность колпака или 10—15% тепловой мощности. При достижении заданной температуры в месте установки стендовой термопары закрываются дроссели на газопроводе и воздухопроводе. В результате максимальное количество тепла, которое можно подать в печь, сокраща-

ется до 50% тепловой мощности. С этого момента регулирование ведется двухпозиционно: 50% или 10—15% тепловой мощности. Минимальное количество газа поступает через байпас вокруг регулирующего дросселя. Подача эжектирующего воздуха в эжектор отстроена так, чтобы при минимальном расходе газа разрежение под колпаком повышалось. В результате горелки работают с повышенным коэффициентом расхода воздуха, что исключает опасность проскока пламени в горелку.

Такая система успешно работает на смеси коксового и доменного газов. При работе же на природном газе возникли трудности. Топка разогревалась до 1500—1600° С, а при минимальном расходе газа быстро охлаждалась воздухом, подсасываемым через горелку. В результате наблюдались местные перегревы садки против топок, топки быстро разрушались. При больших расходах газа в холодные топки происходили хлопки. Это положение было исправлено переделкой горелок на работу с $\alpha=1{,}3$ и подачу минимального количества газа не через горелку, а через специальную трубку в нижней части топки. Топки стали меньше перегреваться, а при минимальных расходах меньше остывать, так как подаваемый через трубку газ сгорал с воздухом, подсасываемым через горелку.

Эти осложнения привели к решению применить для колпаковых печей инжекционно-атмосферные горелки частичного предварительного смешения, установленные в два ряда по высоте тангенциально. Нагрев стал мягче, а стойкость кладки повысилась. Однако подсос вторичного воздуха под действием разрежения в колпаке приводит к значительному и трудноуправляемому повышению коэффициента расхода воздуха. Это, естественно, вызывает некоторое повышение удельного расхода топлива.

Перспективным решением системы отопления колпаковых печей является применение горелок с широким диапазоном регулирования коэффициента расхода воздуха. В этом случае представится возможным добиться повышения качества нагрева, стойкости печи и снижения расхода топлива.

Этот пример иллюстрирует процесс разработки системы отопления, необходимость комплексного решения при выборе сожигательных устройств и схемы регулирования тепловой работы печи, важность учета технологических, эксплуатационных и экономических факторов.

Глава 2

КЛАССИФИКАЦИЯ СОЖИГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИХ КОНСТРУКЦИИ

Для обогрева современных нагревательных и термических печей используют газовое топливо, мазут и электрический ток. Устройства, с помощью которых химическую энергию топлива и электрическую энергию превращают в тепловую, можно разделить на две группы: сожигательные устройства и нагреватели.

Сожигательные устройства (горелки и форсунки) применяют для сжигания газообразного или жидкого топлива. Характерная

особенность этих устройств — перенос тепла в рабочее пространство главным образом продуктами сгорания или с их помощью. Сожигательные устройства применяют тогда, когда допустимо соприкосновение продуктов сгорания топлива с нагреваемыми заготовками или изделиями, а также в печах с муфелями. В печах без муфелей при необходимости исключить соприкосновение продуктов сгорания с нагреваемыми изделиями применяют нагреватели, в которых либо сжигают топливо (радиационные трубы), либо используют электроэнергию.

В этом случае тепло в рабочее пространство печи передается главным образом излучением от поверхности нагревателя.

Для подготовки и осуществления сжигания топлива сожигательное устройство выполняет следующие функции:

подготавливает топливо и воздух для горения, придавая им требуемые направления и скорости движения (в некоторых случаях в горелке происходит предварительный подогрев газа или воздуха);

подготавливает горючую смесь (смешивает газовое топливо и воздух или распыляет жидкое топливо и смешивает его с воздухом; в ряде случаев подогревает топливо-воздушную смесь до температуры воспламенения и сжигает ее;

стабилизирует горение;

осуществляет подачу подготовленной горючей смеси или продуктов сгорания в рабочее пространство или топку.

В зависимости от типа сожигательного устройства оно может предназначаться для выполнения только части перечисленных функций.

Процесс сжигания топлива можно разделить на три основные стадии: смешение топлива с воздухом для горения, подогрев топливо-воздушной смеси до температуры воспламенения и собственно процесс сжигания. Процесс сжигания, т. е. реакция окисления компонентов топлива кислородом воздуха, протекает практически мгновенно. Первые же две стадии требуют значительно большего времени. По этой причине организация смешения определяет весь процесс сжигания, характеристику факела, а следовательно, распределение температур в рабочем пространстве печи и соответствие его технологическим требованиям к агрегату.

При разработке систем отопления печей следует отдавать предпочтение требованиям технологии, а поэтому в основу классификации сожигательных устройств положена степень развития в них процесса смешения топлива с воздухом для горения независимо от путей, которыми она достигается.

Сожигательные устройства в зависимости от степени развития процесса смешения топлива с воздухом для горения можно разделить на три типа: устройства без предварительного смешения, с улучшенным смешением и с предварительным смешением.

В пределах сожигательного устройства без предварительного смешения топлива с воздухом для горения (горелки типа «труба в трубе», форсунки и др.) только создаются условия для последующего смешения топлива с воздухом: газовым и воздушным потокам придают необходимые скорости и направления (в газовых горелках) или еще предварительно организуют распыливание мазута (в мазутных форсунках).

Топливо смешивается с воздухом для горения вне пределов сожигательного устройства, в рабочем пространстве печи или в специальной топке.

Сожигательные устройства с улучшенным смешением позволяют почти полностью провести смешение в пределах устройства. В результате этого горение начинает развиваться уже в горелочном туннеле, а в рабочем пространстве или топке оно лишь завершается (например, при использовании турбулентных горелок).

В сожигательных устройствах с предварительным смешением топливо смешивается с воздухом для горения внутри устройства; полное же сгорание происходит в пределах горелочного туннеля (например, в инжекционных горелках) или в специальной камере сгорания, а в рабочее пространство поступают только продукты сгорания.

Исходя из этих характеристик, можно определить область применения трех основных типов сожигательных устройств.

Сожигательные устройства без предварительного смешения рекомендуется применять в тех случаях, когда необходимо:

обеспечить концентрированный подвод тепла с помощью небольшого числа крупных горелок, особенно при сжигании газа с высокой теплотой сгорания;

получить широкие пределы регулирования;

работать попеременно на газовом топливе различных видов или на газе и мазуте попеременно или одновременно;

подогревать компоненты сгорания до высокой температуры.

Сожигательные устройства с улучшенным смешением следует применять в тех случаях, когда допустимая длина факела ограниченна и требуется концентрированный подвод значительного количества тепла при сравнительно небольших размерах сожигательных устройств, либо требуется создать факел специальной формы.

Сожигательные устройства с предварительным смешением целесообразны для осуществления высокотемпературного нагрева при сжигании газов с низкой теплотой сгорания, а также при рассредоточенной подаче тепла большим числом горелок с целью достижения высокой равномерности нагрева.

Тип и характеристику сожигательного устройства следует выбирать в зависимости от типа и конструкции печи, требований к технологии нагрева, вида и характеристики топлива. Поэтому ошибочны высказываемые иногда мнения об универсальности какого-либо одного типа горелок и абсолютном превосходстве этого типа над остальными. Не существует «хороших» или «плохих» типов горелок, а есть только подходящие или неподходящие для данных конкретных условий.

На основании опыта эксплуатации и анализа конструкции сожигательных устройств можно сформулировать основные требования к их конструкции.

Конструкция горелки должна быть возможно более простой: без подвижных частей, без устройств, изменяющих сечение для прохода газа и воздуха и без деталей сложной формы, расположенных вблизи носика горелки. Сложные устройства при эксплуатации себя не оправдывают и быстро выходят из строя под действием высоких температур в рабочем пространстве печи.

Сечения для выхода газа, воздуха и газо-воздушной смеси следует отрабатывать в процессе создания горелки. В процессе эксплуатации все эти сечения должны быть неизменными. Количество подаваемых через горелку газа и воздуха следует изменять только дроссельными устройствами, установленными на подводящих трубопроводах.

Сечения для прохода газа и воздуха в горелке и конфигурацию внутренних полостей следует выбирать таким образом, чтобы сопротивление на пути движения газа и воздуха внутри горелки было бы минимальным. Давление газа и воздуха в основном должно быть использовано для создания требуемых скоростей в выходных сечениях горелки.

Желательно, чтобы подача воздуха в горелку была одноступенчатой. Неорганизованная подача воздуха в результате разрежения в рабочем пространстве или путем частичного инжектирования воздуха газом может допускаться только в особых случаях.

При необходимости разделения газового потока на несколько струй применяют массивную насадку с соответствующим числом отверстий. При осуществлении частичного предварительного смешения газа и воздуха следует использовать какой-либо один способ, а не усложнять горелку большим числом элементов одного и того же назначения — для улучшения смешения.

Для стабилизации горения следует предпочитать аэродинамические методы, т. е. создание зон циркуляции продуктов сгорания, которые поджигают газо-воздушную смесь.

Кроме того, конструкция горелки, как и всякого другого изделия, должна быть технологичной, обеспечивающей простоту и точность изготовления, а также возможно менее чувствительной к ошибкам изготовления.

От изготовителей следует требовать контроля качества горелок на основании аэродинамического испытания каждой из них с последующей отбраковкой или исправлением экземпляров с неудовлетворительной характеристикой.

Глава 3

ГОРЕЛКИ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ

В горелках без предварительного смешения газ и воздух смешиваются вне пределов горелки и сгорают в растянутом диффузионном факеле.

Основные достоинства их следующие.

— Весьма высокие пределы регулирования, так как исключена возможность проскока пламени внутрь горелки.

— Достаточно высокая температура подогрева газа и воздуха, подаваемых через горелку, так как она ограничена лишь стойкостью подводящих трубопроводов и опасностью термического разложения газа.

— Удаление области высоких температур от кладки и примыкающих к рабочему пространству печи металлических частей горелки повышает стойкость последней и горелочного камня, особенно при сжигании газа с высокой теплотой сгорания.

— Отсутствие внутреннего смешения позволяет значительно уменьшить габариты и создать горелки весьма высокой теплопроизводительности.

— Быстрый и простой переход от работы на газе с одной теплотой сгорания к работе на газе с другой теплотой сгорания или от газового к жидкому топливу, а также обеспечение устойчивой работы при колебаниях теплоты сгорания газа и температуры подогрева компонентов сгорания.

Горелки без предварительного смешения имеют и ряд недостатков:

необходимо подавать воздух с помощью вентиляторов через систему воздухопроводов, затрачивая на это соответствующие капиталовложения и электроэнергию;

необходимо регулировать соотношение газа и воздуха;

несовершенство смешения газа и воздуха приводит к необходимости работать с повышенным коэффициентом расхода воздуха, что связано с некоторым снижением калориметрической температуры и повышением расхода топлива.

Однако эти недостатки компенсируются простотой, надежностью горелок и возможностью работы на подогретом воздухе, т. е. возможностью рекуперации тепла уходящих газов. Поэтому горелки без предварительного смешения широко используют для сжигания газов в различных печных агрегатах и в первую очередь в тех случаях, когда необходимо обеспечить концентрированный подвод тепла с помощью небольшого числа крупных горелок, особенно при сжигании газа с высокой теплотой сгорания; получить широкие пределы регулирования, а также работать попеременно на газовом топливе различных видов или на газе и мазуте.

Следует только иметь в виду, что горелкам без предварительного смешения необходим достаточный объем рабочего пространства для развития факела.

Наибольшее распространение получила самая простая и надежная горелка без предварительного смешения, так называемая горелка типа «труба в трубе». Кроме того, при необходимости работы с повышенными и переменными коэффициентами расхода воздуха в черной металлургии применяют горелки с широким диапазоном регулирования коэффициента расхода воздуха типа ДШ.

3.1. Расчет основных размеров горелок без предварительного смешения

Расчет горелок без предварительного смешения заключается в определении проходных сечений для газа, воздуха и газо-воздушной смеси или в определении пропускной способности горелки с известными геометрическими размерами.

Расчетная схема горелки без предварительного смешения показана на рис. 8.

Обычно при расчете бывают заданы параметры газа ($Q_н^р$, $\rho_{0г}$, $T_г$, $p_г$), воздуха ($T_в$, $p_в$) и пропускная способность горелки по газу $V_{0г}$.

Количество воздуха $V_{0в}$ (м³/с), которое должно быть подано для сжигания газа, можно определить по формуле

$$V_{0в} = \alpha L_0 V_{0г}, \qquad (1)$$

где α — коэффициент расхода воздуха, который для обеспечения полного сжигания в горелках без предварительного смешения принимают не менее 1,1—1,15 (за исключением особых случаев нагрева в продуктах неполного сгорания); L_0 — стехиометрическое (при α=1,0) количество воздуха на единицу объема газа (определяется для данного вида газа по приложению I).

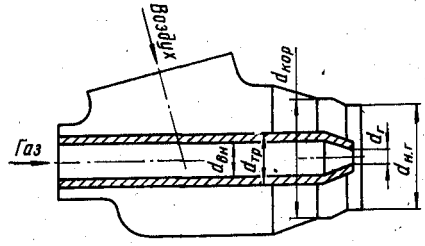


Рис. 8. Расчетная схема горелки без предварительного смешения

Расчет горелок без предварительного смешения основан на законах истечения. Так как в горелки поступает газ и воздух низкого давления, то при расчетах их можно принять несжимаемыми. Тогда скорость газа или воздуха w_0 (м/с) в выходном сечении можно определить по формуле

$$w_0 = \sqrt{2T_0 p/(\xi \rho_0 T)}, \qquad (2)$$

где ξ — коэффициент сопротивления горелки, отнесенный к скорости в самом узком сечении; для горелки с конфигурацией, изображенной на рис. 8, $\xi_в$=1,0, $\xi_г$=1,5.

Площадь выходного сечения, мм²:

$$F = V \cdot 10^6 / w_0. \qquad (3)$$

Зная F, можно определить диаметр газового сопла $d_г$ и размеры щели для воздуха $d_{кор}$ (мм):

$$d_г = \sqrt{F_г/0{,}785}; \qquad (4)$$

$$d_{кор} = \sqrt{F_в/0{,}785 + d_{тр}^2}. \qquad (5)$$

Действительная скорость газа или воздуха в выходном сечении w (м/с) равна

$$w = w_0 T/T_0. \qquad (6)$$

Действительные скорости газа и воздуха в выходных сечениях горелки могут быть весьма различными. Опыт работы и результаты исследований горелок показывают, что скорость истечения газа не должна быть выше 80—100 м/с. Для холодного природного газа такая скорость соответствует давлению перед горелкой не более 6 кПа. Давление коксового и доменного газов по условиям газового баланса металлургических заводов обычно не превышает этой величины.

Действительная скорость воздуха для сокращения длины факела должна отличаться от скорости газа примерно в 2 раза и во

всяком случае не более чем в 3—4 раза. Для получения очень длинного факела действительные скорости газа и воздуха можно принимать равными или мало отличающимися друг от друга. Обычно скорость воздуха принимают ниже скорости газа и равной примерно 40—60 м/с, что соответствует давлению холодного воздуха 1—2,5 кПа, а воздуха, подогретого до 400° С перед горелкой, 0,5—1,0 кПа. Такое давление отвечает возможностям современных дутьевых средств.

Скорость смеси в носике горелки при максимальном количестве подаваемых в горелку газа и воздуха может составлять 25—30 м/с.

Скорости газа и воздуха в трубопроводах, присоединенных к горелке и во входных сечениях самой горелки, выбирают равными 8—10 м/с для воздуха и 10—15 м/с для газа. При значительном давлении газа или воздуха их скорости в трубопроводе могут быть увеличены до 18—20 м/с с тем, чтобы использовать избыток давления и сократить диаметры трубопроводов. Если же давление газа и воздуха недостаточно, то для уменьшения потерь их давления скорости в трубопроводах следует принимать равными 5—7 м/с.

Скорость газа внутри горелки на подводе к соплу может быть принята примерно в два раза больше, чем в подводящем трубопроводе, т. е. 20—25 м/с.

Рекомендуемые значения скоростей приведены в табл. 1.

Таблица 1

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ГАЗА, ВОЗДУХА И СМЕСИ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Характерное место	Рекомендуемая скорость, м/с		
	воздуха	газа	смеси
Трубопровод перед горелкой .	8—10	10—15	
Входные сечения горелки:			
при избытке давления . .	18—20	18—20	
при недостатке давления .	5—7	5—7	
Газовое сопло до выходного сечения	—	20—25	—
То же, в выходном сечении .	—	80—100	—
Носик горелки:			
максимальная	—	—	25—30
минимальная	—	—	4—5

Выбирать размеры трубопроводов и частей горелки с круглым поперечным сечением или определять скорости при заданном диаметре участков газового и воздушного трубопроводов удобно по номограмме (приложение II).

Последовательность расчета геометрических размеров горелки по заданной пропускной способности горелки по газу и давлению газа и воздуха — следующая:

расчет $V_{0в}$ по формуле (1);
расчет $w_{0г}$ и $w_{0в}$ по формуле (2);
расчет $F_г$ и $F_в$ по формуле (3);

расчет $d_г$ по формуле (4);
расчет диаметра газовой трубы в горелке;
расчет воздушной щели (диаметра корпуса горелки $d_{кор}$) по формуле (5);
расчет действительных скоростей газа и воздуха по формуле (6) и проверка их соотношения;
расчет $d_{н.г}$;
расчет диаметров подводящих трубопроводов газа и воздуха.

Если известны геометрические размеры горелки и необходимо определить ее пропускную способность при заданных давлениях газа и воздуха, то, рассчитав скорости по формуле (2), определяют пропускную способность при известных проходных площадях по формуле (3).

Если давления газа и воздуха не заданы, то можно задаться скоростями газа и воздуха на выходе из горелки с учетом высказанных выше соображений (см. табл. 1).

Пример расчета горелки без предварительного смешения. Рассчитать горелку типа «труба в трубе» для сжигания $V_{0г}=0{,}0085$ м³/с природного газа с $Q^р_н=34{,}00$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой 5,3 кПа, воздуха 0,5 кПа. Температура газа 20° С, воздух подогрет до 400° С; $\alpha=1{,}1$.

По рис. I-20 приложения I находим $\rho_{0г}=0{,}82$ кг/м³ и $L_0=9{,}01$ м³/м³ газа.

По формуле (1)

$$V_{0в}=1{,}1\cdot 9{,}01\cdot 0{,}0085=0{,}0842 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По формуле (2)

$$w_{0г}=\sqrt{\frac{2\cdot 273\cdot 5300}{1{,}5\cdot 0{,}82\cdot 293}}=89{,}8 \text{ м/с};$$

$$w_{0в}=\sqrt{\frac{2\cdot 273\cdot 500}{1{,}29\cdot 673}}=17{,}7 \text{ м/с}.$$

По формуле (3)

$$F_г=\frac{0{,}0085\cdot 10^6}{89{,}8}=94{,}7 \text{ мм}^2.$$

По формуле (4)

$$d_г=\sqrt{\frac{94{,}7}{0{,}785}}=10{,}98\approx 11 \text{ мм}.$$

По формуле (3)

$$F_в=\frac{0{,}0842\cdot 10^6}{17{,}7}=4760 \text{ мм}^2.$$

Принимаем скорость газа в газовой трубе 25 м/с, тогда (по приложению II) $d_{вн}=21$ мм.

Принимаем наружный диаметр газовой трубы $d_{тр}=35$ мм. Тогда по формуле (5)

$$d_{кор}=\sqrt{\frac{4760}{0{,}785}+35^2}=85 \text{ мм}.$$

По формуле (6)

$$w_г = 89{,}8\frac{293}{273} = 96{,}4 \text{ м/с};$$

$$w_в = 17{,}7\frac{673}{273} = 43{,}6 \text{ м/с}.$$

$$w_г : w_в = 96{,}4/43{,}6 = 2{,}2.$$

Количество газо-воздушной смеси

$$V_{0см} = V_{0г} + V_{0в} = 0{,}0085 + 0{,}0842 = 0{,}0927 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем скорости на подводе газа 12,5 м/с, на подводе воздуха 8 м/с и на выходе газо-воздушной смеси из носика горелки 25 м/с. Тогда по приложению II диаметры на подводе газа 30 мм, на подводе воздуха 115 мм, носика горелки 70 мм.

3.2. Горелки типа «труба в трубе»

Стальпроектом разработаны горелки типа «труба в трубе» двух серий: средней тепловой мощности — серия С и большой тепловой мощности — серия Б. Каждая серия имеет два исполнения: для газов с высокой $Q_н^р = 10 \div 35$ МДж/м³ — исполнение В; для газов с низкой $Q_н^р = 3{,}5 \div 10$ МДж/м³ — исполнение Н.

Конструкция горелок позволяет применять газ и (или) воздух, подогретые 400° С.

Рекомендуемое максимальное давление газа перед горелкой 6 кПа, минимальное, определяемое возможностью работы приборов автоматического регулирования, 0,1 кПа.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ГОРЕЛОК ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Обозначение горелки	Исполнение	$d_г$	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
ДВС 60/$d_г$	I	10—80	60	130	160	80	160	195	76	180	35
ДНС 60/$d_г$	I	10—80	60	130	160	80	160	195	65	180	35
ДВС 70/$d_г$	I	10—80	70	150	185	100	180	215	85	180	35
ДНС 70/$d_г$	I	10—80	70	170	205	100	180	215	103	240	70
ДВС 90/$d_г$	I	10—80	90	170	205	125	210	245	98	180	35
ДНС 90/$d_г$	I	10—80	90	170	205	125	210	245	110	240	70
ДВС 110/$d_г$	I	10—80	110	225	260	150	240	280	136	240	70
ДНС 110/$d_г$	II	10—80	110	225	260	150	240	280	142	240	100
ДВС 130/$d_г$	I	10—80	130	225	260	200	295	335	150	240	70
ДНС 130/$d_г$	II	10—80	130	225	260	200	295	335	150	240	100
ДВС 150/$d_г$	I	10—80	150	255	290	200	295	335	170	240	70
ДНС 150/$d_г$	II	10—80	150	225	260	200	295	335	160	240	100

* Кроме указанных особо.

Горелки типа «труба в трубе» средней и большой тепловой мощности различаются размерами и конструктивным исполнением, а горелки для газов с высокой и низкой теплотой сгорания — соотношением проходных сечений для воздуха и газа. Однако номинальное их деление является условным, поскольку при определенных соотношениях давлений и температур подогрева газа и воздуха, теплот сгорания газа и коэффициентов расхода воздуха теплопроизводительность горелки серии С может оказаться выше, чем горелки серии Б, и наоборот, или для сжигания газа с низкой теплотой сгорания может потребоваться горелка исполнения В, и наоборот.

получим следующие разрешенные комбинации: 000, 011 101 и 110

Горелки типа «труба в трубе» средней тепловой мощности разработаны в двух исполнениях (ДВС и ДНС) шести типоразмеров с диаметром носиков горелок от 60 до 150 мм. Горелки средней тепловой мощности показаны на рис. 9, а их конструктивные размеры приведены в табл. 2.

При диаметре газопровода до $2^1/_2''$ его присоединяют к горелке на резьбе; при большем диаметре — при помощи колена, снабженного гляделкой. Это определяет тип (I или II) конструктивного исполнения горелки.

Горелки большой тепловой мощности разработаны в двух исполнениях (ДВБ и ДНБ) десяти типоразмеров с диаметром носиков горелок от 200 до 425 мм. Горелки большой тепловой мощности показаны на рис. 10, а их конструктивные размеры приведены в табл. 3.

Газ ко всем горелкам большой тепловой мощности подводят с помощью колена, снабженного гляделкой. Горелка с диаметром носика 300 мм выполнена в двух вариантах, различающихся диаметрами подводов воздуха и газа. В связи с тем что горелки большой тепловой мощности предназначены в основном для установки на

Таблица 2

СРЕДНЕЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ТИПА ДВС И ДНС (РИС. 9)

$D_к$	D_0	d	d_1	H	h	h_1	L	L_1	l	Количество отверстий n	Количество отверстий n_1	Масса горелки, кг
50	$1\ ^1/_2''$	14	18	150	16	16	370	200	40	4	4	23,8
50	$1\ ^1/_2''$	14	18	150	16	22	370	200	40	4	4	23,3
50	$1\ ^1/_2''$	18	18	150	18	22	370	200	40	8	8	24,8
90	$2\ ^1/_2''$	18	18	200	18	22	473	260	59	8	8	47,3
50	$1\ ^1/_2''$	18	18	150	18	24	370	200	40	8	8	27,3
90	$2\ ^1/_2''$	18	18	200	18	24	473	260	50	8	8	49,3
90	$2\ ^1/_2''$	18	22	200	20	24	473	260	50	8	8	54,3
120	—	18	22	200	20	23	853	260	50	8	8	80,0
90	$2\ ^1/_2''$	18	22	200	20	26	473	260	50	8	8	55,3
120	—	18	22	200	20	26	853	260	50	8	8	83,0
90	$2\ ^1/_2''$	18	22	200	22	26	473	260	50	8	8	57,3
120	—	18	22	200	22	26	853	260	50	8	8	82,0

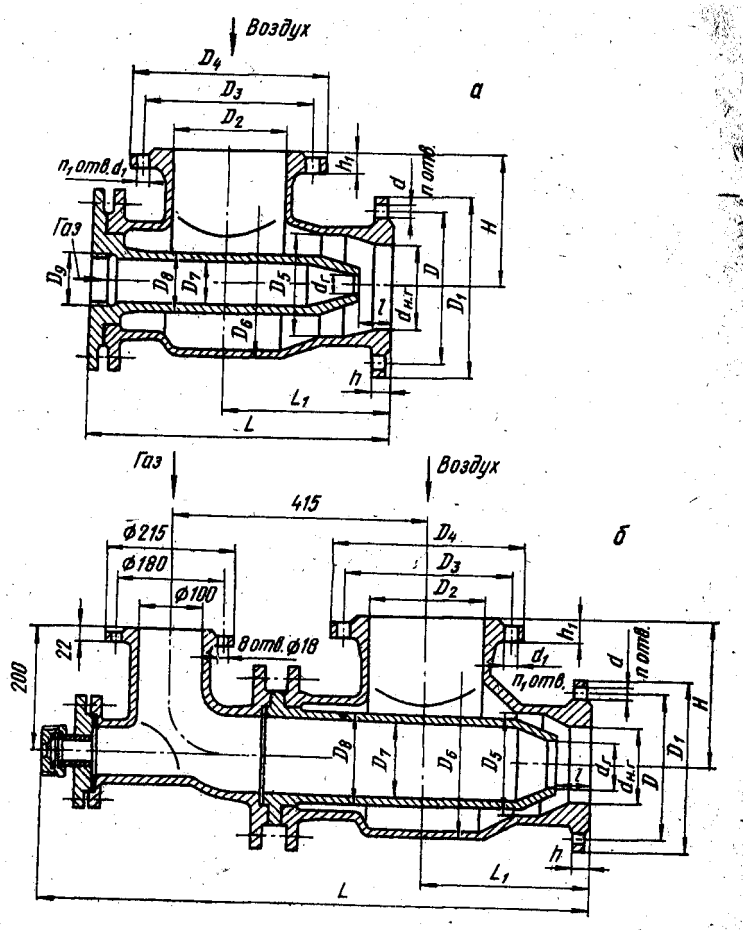


Рис. 9. Горелки типа «труба в трубе» средней тепловой мощности:

а — с присоединением газопровода на резьбе, исполнение I; *б* — с присоединением газопровода при помощи колена, исполнение II

торцах методических печей, оси подводов воздуха и газа отклонены от вертикали на 15° для удобства их монтажа на печи.

Все горелки типа «труба в трубе» выполнены из литых деталей. С помощью фланца, расположенного в передней части корпуса, горелки крепятся к специальной горелочной плите или к металлоконструкциям каркаса печи.

Обозначение горелок состоит из букв и цифр: первая буква Д — горелка дутьевая, вторая (В или Н) — исполнение горелки,

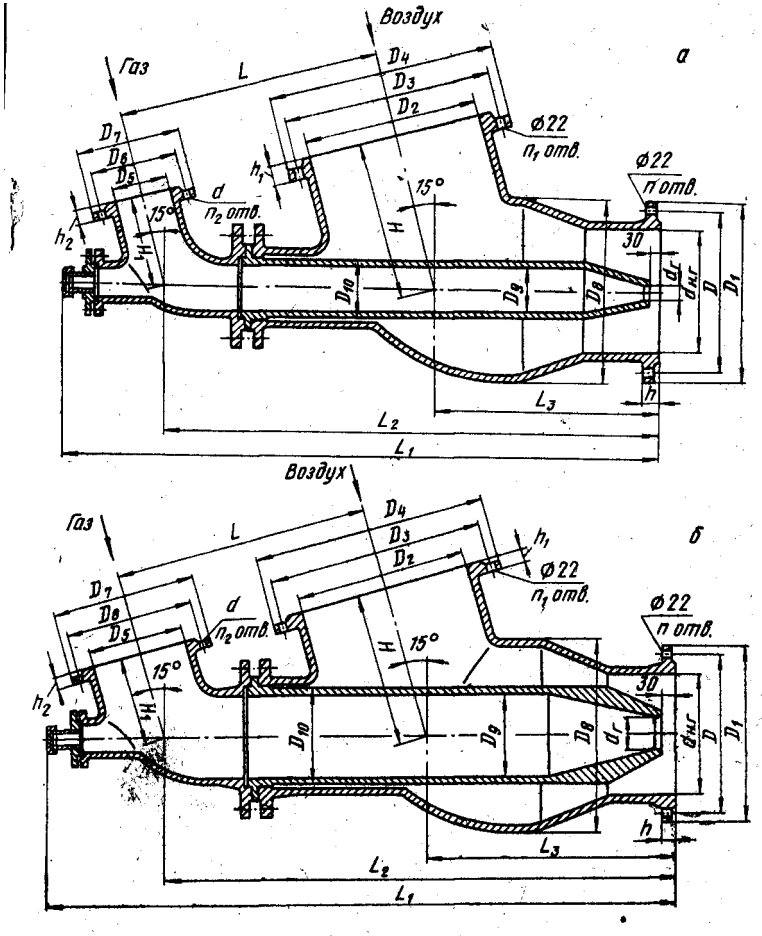


Рис. 10. Горелки типа «труба в трубе» большой тепловой мощности:

а — для газов с высокой теплотой сгорания; *б* — для газов с низкой теплотой сгорания

третья (С или Б) — серия горелки; первая цифра — диаметр носика горелки (мм), вторая (через косую) — диаметр газового сопла (мм). Например, обозначение горелки ДНС 110/60 означает: дутьевая горелка типа «труба в трубе» средней тепловой мощности для газа с низкой теплотой сгорания, имеющая диаметр носика 110 мм и диаметр газового сопла 60 мм.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ ГОРЕЛОК ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Обозначение горелки	$d_г$	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9
ДВБ 200/$d_г$	30—200	200	295	335	300	400	440	100	180	215	340	100
ДНБ 200/$d_г$	30—200	200	295	335	300	400	440	150	240	280	340	125
ДВБ 225/$d_г$	30—200	225	325	365	300	400	440	100	180	215	340	100
ДНБ 225/$d_г$	30—200	225	325	365	300	400	440	150	240	280	340	125
ДВБ 250/$d_г$	30—200	250	350	390	350	460	500	100	180	215	390	100
ДНБ 250/$d_г$	30—200	250	350	390	350	460	500	150	240	280	390	125
ДВБ 275/$d_г$	30—200	275	395	435	350	460	500	100	180	215	390	100
ДНБ 275/$d_г$	30—200	275	395	435	350	460	500	150	240	280	390	125
ДВБ 300/$d_г$	30—200	300	400	440	400	495	535	100	180	215	440	100
ДНБ 300/$d_г$	30—200	300	400	440	400	495	535	150	240	280	440	125
ДВБ 300-II/$d_г$	30—200	300	400	440	450	550	590	150	240	280	490	125
ДНБ 300-II/$d_г$	30—200	300	400	440	450	550	590	250	350	390	490	225
ДВБ 325/$d_г$	30—200	325	430	485	450	550	590	150	240	280	490	125
ДНБ 325/$d_г$	30—200	325	430	485	450	550	590	250	350	390	490	225
ДВБ 350/$d_г$	30—200	350	460	500	500	600	640	150	240	280	540	125
ДНБ 350/$d_г$	30—200	350	460	500	500	600	640	250	350	390	540	225
ДВБ 375/$d_г$	30—200	375	480	530	500	600	640	150	240	280	540	125
ДНБ 375/$d_г$	30—200	375	480	530	500	600	640	250	350	390	540	225
ДВБ 400/$d_г$	30—200	400	515	565	500	600	640	150	240	280	540	125
ДНБ 400/$d_г$	30—200	400	515	565	500	600	640	250	350	390	540	225
ДВБ 425/$d_г$	30—200	425	530	580	500	600	640	150	240	280	540	125
ДНБ 425/$d_г$	30—200	425	530	580	500	600	640	250	350	390	540	225

* В зависимости от диаметра сопла.

3.3. Выбор горелок типа «труба в трубе»

Обычно бывают заданы параметры газа ($Q^р_н$, $\rho_{0г}$, $t_г$, $p_г$), воздуха ($t_в$, $p_в$, α) и пропускная способность горелки по газу $V_{0г}$.

Выбор горелки состоит в определении ее размера, диаметра газового сопла и проверке получаемых скоростей воздуха и газа на выходе из горелки и в подводящих трубопроводах, а также скорости газо-воздушной смеси на выходе из горелки.

Сначала определяют необходимое количество воздуха по формуле (1), пользуясь данными для газа из приложения I.

Типоразмер горелки выбирают по графикам на рис. 11—14 в зависимости от количества воздуха и его давления перед горелкой.

Таблица 3

БОЛЬШОЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ТИПА ДВБ И ДНБ (РИС. 10)

D_{10}	d	H	H_1	h	h_1	h_2	L	L_1	L_2	L_3	Количество отверстий n	n_1	n_2	Масса горелки, кг
130	18	350	200	26	28	22	555	1333	1075	500	8	12	8	223
155	22	350	200	26	28	24	555	1333	1075	500	8	12	8	237
130	18	350	200	26	28	22	555	1333	1075	500	8	12	8	237
155	22	350	200	26	28	24	555	1333	1075	500	8	12	8	241
130	18	350	200	28	30	22	555	1333	1075	500	12	16	8	250
155	22	350	200	28	30	24	555	1333	1075	500	12	16	8	264
130	18	350	200	24	30	22	555	1333	1075	500	12	16	8	258
155	22	350	200	24	30	24	555	1333	1075	500	12	16	8	272
130	18	350	200	28	28	22	555	1333	1075	500	12	16	8	280
155	22	350	200	28	28	24	555	1333	1075	500	12	16	8	293
155	22	400	220	28	28	24	670	1553	1295	600	12	16	8	331
255	22	400	220	28	28	28	670	1593	1295	600	12	16	12	410—431*
155	22	400	220	26	28	24	670	1553	1295	600	12	16	8	335
255	22	400	220	26	30	28	670	1593	1295	600	12	16	12	414—432*
155	22	400	220	30	30	24	670	1553	1295	600	12	16	8	377
255	22	400	220	30	30	28	670	1593	1295	600	12	16	12	456—474*
155	22	400	220	30	30	24	670	1553	1295	600	12	16	8	381
255	22	400	220	30	30	28	670	1593	1295	600	12	16	12	460—477*
155	22	400	220	32	30	24	670	1553	1295	600	16	16	8	390
255	22	400	220	32	30	28	670	1593	1295	600	16	16	12	469—484*
155	22	400	220	30	30	24	670	1553	1295	600	16	16	8	392
255	22	400	220	30	30	28	670	1593	1295	600	16	16	12	471—485*

Графики на рис. 11—14 построены для холодного воздуха (20° С). При температуре воздуха t горелку следует выбирать по расчетному количеству воздуха $V_в$ (м³/с):

$$V_в = V_{0в}\, k_t, \qquad (7)$$

где k_t — поправка на температуру, равная $\sqrt{T/293}$.

Значение k_t можно найти по графику (рис. 15).

Диаметр газового сопла для газа с температурой 20° С также определяют по графикам (рис. 16) в зависимости от необходимой пропускной способности горелки по газу и его давления перед горелкой.

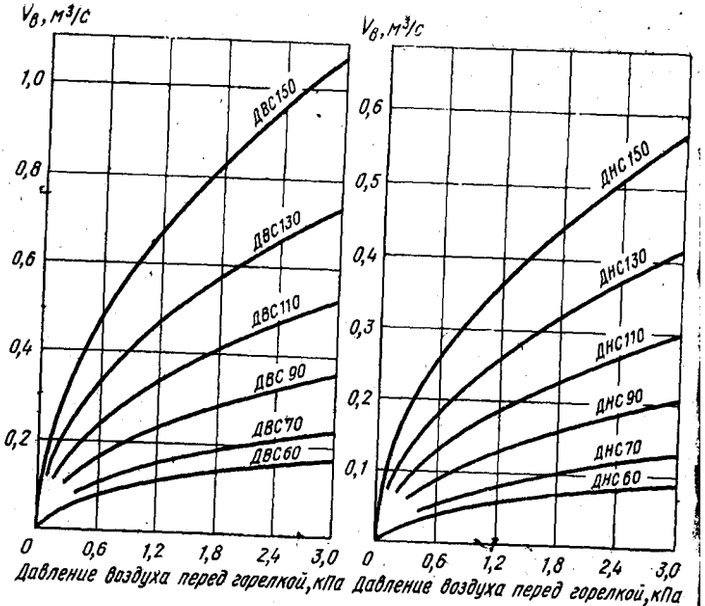


Рис. 11. Пропускная способность по воздуху горелок типа ДВС (температура воздуха 20 °С)

Рис. 12. Пропускная способность по воздуху горелок типа ДНС (температура воздуха 20 °С)

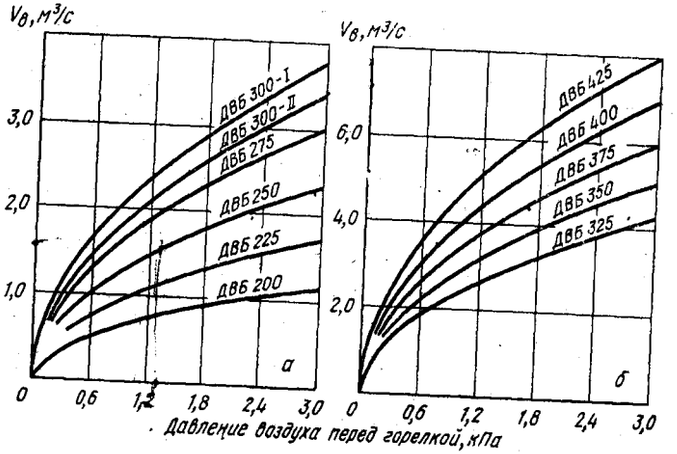


Рис. 13. Пропускная способность по воздуху горелок:
а — типов ДВБ 200—ДВБ 300; *б* — типов ДВБ 325—ДВБ 425 (температура воздуха 20 °С)

Для газа с температурой t и плотностью $\rho_{0г}$ горелку следует выбирать по расчетному количеству газа $V_г$ (м³/с):

$$V_г = V_{0г}\, k_t\, k_\rho, \qquad (8)$$

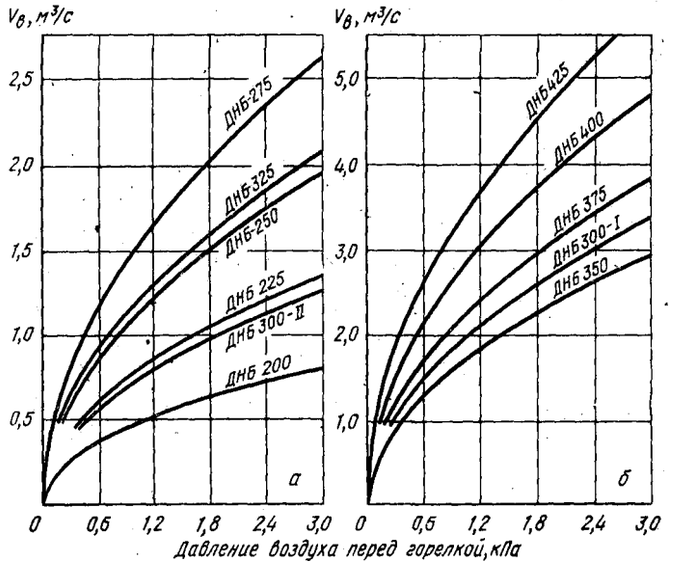


Рис. 14. Пропускная способность по воздуху горелок типа ДНБ:
а — ДНБ 200—ДНБ 300; *б* — ДНБ 300—ДНБ 425 (температура воздуха 20 °С)

где k_ρ — поправка на плотность газа, равная $\sqrt{\rho_{0г}/\rho_{расч}}$. Значение поправки на плотность можно найти по графику на рис. 17.

После выбора горелки проверяют скорости газа и воздуха на подводе к горелке и на выходе из нее.

Скорость газа и воздуха на подводе к горелке и газо-воздушной смеси на выходе из горелки удобно определять, исходя из количества среды и диаметра подвода или носика горелки по номограмме (приложение II).

Соотношение действительных скоростей газа и воздуха на выходе из горелки можно определить по формуле

$$\vartheta = w_г\, k_{tг}/(w_в\, k_{tв}), \qquad (9)$$

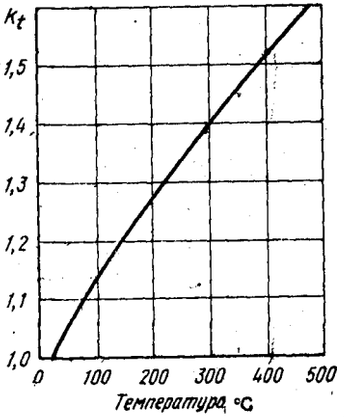


Рис. 15. Поправка на температуру k

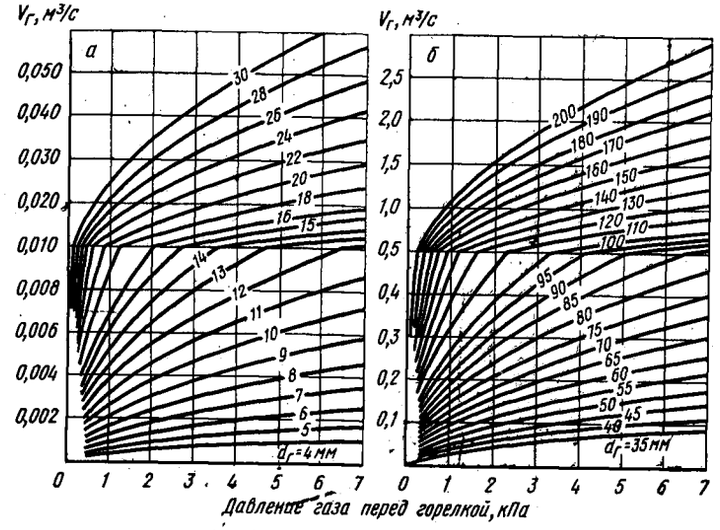


Рис. 16. Пропускная способность по газу горелок типа «труба в трубе» с диаметром газового сопла:
а — 4—30 мм; *б* — 35—200 мм (температура газа 20 °С, ρ=1 кг/м³)

где $w_г$ и $w_в$ — скорости газа и воздуха (м/с), определяемые по графику (рис. 18) в зависимости от давления перед горелкой и плотности газа; $k_{tг}$ и $k_{tв}$ — поправки на температуру соответственно для газа и воздуха, определяемые по приведенной выше формуле или по графику (рис. 15).

Рекомендуемые значения скоростей приведены в табл. 1.

На примерах можно показать ход выбора нормализованных горелок типа «труба в трубе» конструкции Стальпроекта.

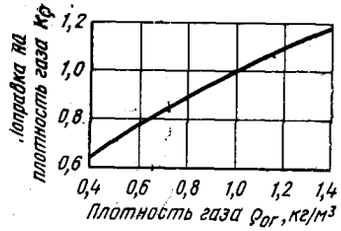


Рис. 17. Поправка на плотность газа $k_ρ$

Пример 1. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г}$=0,25 м³/с смеси коксового и доменного газов с $Q^р_н$=8,4 МДж/м³. Давление газа перед горелкой 4 кПа, воздуха 1,3 кПа. Газ и воздух холодные (20° С), α=1,15.

По рис. I-9 приложения I находим плотность газа $ρ_{0г}$=1,01 кг/м³ и L_0=1,88 м³/м³ газа.

Количество воздуха

$$V_{0в} = 1{,}15 \cdot 1{,}88 \cdot 0{,}25 = 0{,}54 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Поправки на температуру и плотность равны единице, поэтому расчетные расходы газа и воздуха равны заданным.

По графику (рис. 14, *а*) находим, что заданным давлению и количеству воздуха соответствует горелка ДНБ 200.

По графику (рис. 16, *б*) выбираем сопло $d_г$=70 мм.

По графику (рис. 18) находим $w_г$=71 м/с и $w_в$=43 м/с. Отношение скоростей $w_г$:$w_в$=1,65.

По номограмме (приложение II) определяем скорость газа в подводящем газопроводе D=150 мм при количестве газа 0,25 м³/с 14,5 м/с;

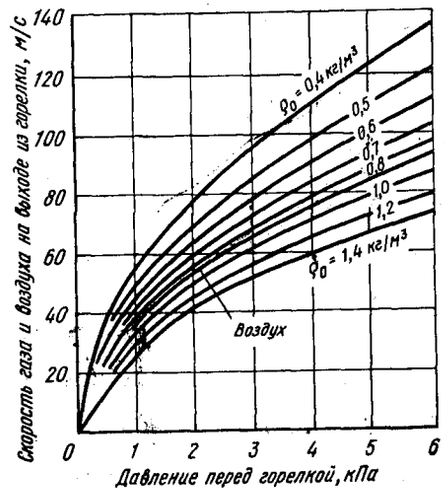


Рис. 18. Скорость истечения газа и воздуха из горелки

скорость воздуха в подводящем воздухопроводе D=300 мм при $V_{0в}$=0,54 м³/с равна 7,7 м/с;

скорость газо-воздушной смеси на выходе из горелки при $d_{н.г}$=200 мм и количестве газо-воздушной смеси 0,25+0,54=0,79 м³/с составляет 25 м/с.

Все скорости находятся в приемлемых пределах.

Пример 2. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г}$=0,02 м³/с природного газа с $Q^р_н$=34,95 МДж/м³.

Давление газа перед горелкой 5 кПа, давление воздуха 1 кПа. Газ холодный (20° С), воздух подогрет до 350° С; α=1,1.

По рис. I-21 приложения I находим $ρ_{0г}$=0,77 кг/м³ и L_0=9,25 м³/м³ газа.

Необходимое количество воздуха

$$V_{0в} = 1{,}1 \cdot 9{,}25 \cdot 0{,}02 = 0{,}204 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (рис. 15) k_t=1,46.

Расчетное количество воздуха

$$V^{расч}_в = 0{,}204 \cdot 1{,}46 = 0{,}298 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (рис. 11) по расчетному количеству воздуха и заданному его давлению подбираем горелку ДВС 110.

Для газа k_t=1, $k_ρ$=0,88 (см. рис. 17).

Тогда

$$V_г = 0{,}02 \cdot 0{,}88 = 0{,}0176 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (рис. 16, *а*) по расчетному количеству газа и заданному его давлению выбираем сопло $d_г = 17$ мм.

По графику (рис. 18) находим $w_{0г} = 90$ м/с и $w_{0в} = 38$ м/с. Отношение скоростей по формуле (9)

$$\vartheta = 90:38:1{,}46 = 1{,}62.$$

По номограмме (приложение II) определяем скорости: в подводящем газопроводе ($D_у = 2^1/_2''$) 6 м/с, в воздухопроводе ($D_2 = 150$ мм) 11 м/с и на выходе газо-воздушной смеси из горелки ($d_{н.г} = 110$ мм) 25 м/с. Скорость газа в газопроводе занижена, поэтому подводящие трубопроводы можно сделать меньшего диаметра с переходом на $2^1/_2''$ у горелки.

Пример 3. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г} = 1{,}0$ м³/с смеси коксового и доменного газов с $Q^р_н = 8{,}4$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой 6 кПа, воздуха 0,5 кПа. Газ холодный (20° С), воздух подогрет до 400° С; $\alpha = 1{,}2$; $\rho_{0г} = 1{,}01$; $L_0 = 1{,}88$ м³/м³ газа.

$$V_{0в} = 1{,}2 \cdot 1{,}88 \cdot 1{,}0 = 2{,}26 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для воздуха по графику (рис. 15) $k_t = 1{,}52$.

Тогда

$$V^{расч}_в = 2{,}26 \cdot 1{,}52 = 3{,}44 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Из графика рис. 14, *б* видно, что при заданном количестве и давлении воздуха подобрать горелку ДНБ для газа с низкой теплотой сгорания нельзя. Поэтому по графику (рис. 13, *б*) выбираем горелку ДВБ 425.

Для газа k_t и k_ρ равны единице, поэтому расчетное количество газа равно заданному.

По графику на рис. 16, *б* выбираем газовое сопло ($d_г = 120$ мм).

По графику на рис. 18 находим $w_г = 86$ м/с и $w_в = 27$ м/с. Отношение скоростей по формуле (9)

$$\nu = 86:27:1{,}52 = 2{,}1.$$

По номограмме (приложение II) определяем скорости, м/с: в подводящем газопроводе ($D_б = 150$ мм) 55, в воздухопроводе ($D_2 = 500$ мм) 11 и на выходе газо-воздушной смеси из горелки ($d_{н.г} = 425$ мм) 22. Из этих данных видно, что завышена скорость в подводящем газопроводе, поэтому диаметр его должен быть увеличен с переходом на $D = 150$ мм вблизи горелки.

Пример 4. Определить пропускную способность горелки ДВС 150/40 при подаче через нее коксового газа с $Q^р_н = 17{,}1$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой 3,5 кПа, воздуха 1,1 кПа. Газ холодный (20° С), воздух подогрет до 300° С; $\alpha = 1{,}15$.

По рис. I-17 приложения I определяем $\rho_{0г} = 0{,}48$ кг/м³ и $L = 4{,}06$ м³/м³ газа.

По графику (рис. 11) определяем для горелки ДВС 150 при заданном давлении воздуха $V^{расч}_в = 0{,}65$ м³/с. Для воздуха $k_t = 1{,}4$ (см. рис. 15).

Пропускная способность горелки по воздуху

$$V_{0в} = V^{расч}_в / k_t = 0{,}65:1{,}4 = 0{,}47 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (10)$$

Пропускная способность горелки по газу

$$V_{0г} = \frac{V_{0в}}{\alpha L_0} = \frac{0{,}47}{1{,}15 \cdot 4{,}06} = 0{,}1 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (11)$$

Для газа $k_t = 1$ и по графику (рис. 17) $k_\rho = 0{,}69$.

Тогда

$$V^{расч}_г = 0{,}1 \cdot 0{,}69 = 0{,}069 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (рис. 16, *б*) определяем, что для газового сопла $d_г = 40$ мм необходимое по расчету количество газа будет обеспечено при давлении газа перед горелкой 3 кПа.

По графику (рис. 18) определяем $w_г = 91$ м/с и $w_в = 41$ м/с. По формуле (9)

$$\vartheta = 91:41:1{,}4 = 1{,}6.$$

По номограмме (приложение II) определяем скорости, м/с: в подводящем газопроводе ($D_у = 2^1/_2''$) 27, в воздухопроводе ($D_2 = 200$ мм) 15 и в газо-воздушной смеси на выходе из горелки ($d_{н.г} = 150$ мм) 33.

Все скорости находятся в приемлемых пределах.

3.4. Горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ

Горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ, разработанные Стальпроектом, имеют повышенную устойчивость факела благодаря выполнению газового сопла в виде плохообтекаемого тела, за которым создается зона стабилизации факела. В результате горелки могут работать как с обычным, так и с повышенным коэффициентом расхода воздуха. Область применения таких горелок — печи с высокотемпературными и низкотемпературными режимами, технологические режимы, требующие повышенных и переменных коэффициентов расхода воздуха.

Нормализованные горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ разработаны шести типоразмеров, с номинальной теплопроизводительностью от 30 до 300 кВт.

Номинальная теплопроизводительность определяется при давлении газа перед горелкой 5 кПа, воздуха 3 кПа и $\alpha = 1{,}3$. Горелки предназначены для сжигания холодного природного газа с холодным воздухом. Рекомендуемое максимальное давление газа перед горелкой 6 кПа, минимальное, определяемое возможностью работы автоматики регулирования, 0,1 кПа.

Нормализованные горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ конструкции Стальпроекта показаны на рис. 19, а их конструктивные размеры приведены в табл. 4.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ГОРЕЛОК С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ

Обозначение горелки	Номинальная теплопроизводительность, кВт	D	D_1	D_2	$d_г$	d	H
ДШ 25	30	2″	1/2″	40	3	14	70
ДШ 40	45	2″	1/2″	40	4	14	70
ДШ 63	75	3″	3/4″	55	5	18	90
ДШ 100	115	3″	3/4″	55	6	18	90
ДШ 160	185	4″	1″	70	8	22	120
ДШ 250	300	4″	1″	70	10	22	120

* Кроме указанных особо.

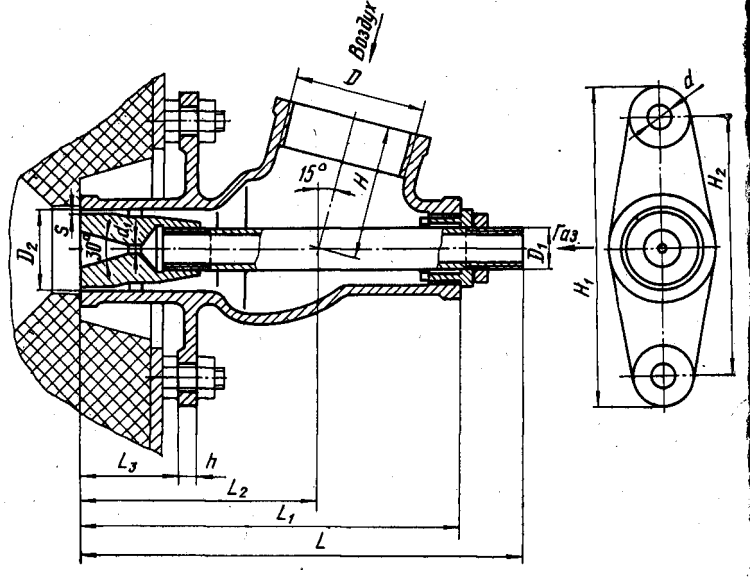


Рис. 19. Горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ

Горелка типа ДШ состоит из литого корпуса и газовой трубы с соплом. С помощью фланца горелка крепится к облицовке печи. Газо- и воздухопровод крепится к горелке на резьбе. Для удобства монтажа горелки на печи воздухопровод отклонен от вертикали на 15°. Зазор между носиком горелки и горелочным камнем уплотняется огнеупорной массой.

Обозначение горелки состоит из букв и цифры. Буквы обозначают: Д — горелка дутьевая, Ш — с широким диапазоном изменения

Таблица 4

ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ВОЗДУХА ТИПА ДШ (РИС. 19)

H_1	H_2	h	L	L_1	L_2	L_3	S	Масса горелки, кг
210	150	10	250	200	130	54	1,5	2,60
210	150	10	250	200	130	54	2,5	2,60
240	170	12	300	255	160	67	3	5,50
240	170	12	300	255	160	67	5	5,50
315	225	15	390	330	210	90	6,5	9,60
315	225	15	390	330	210	90	10,5	9,60

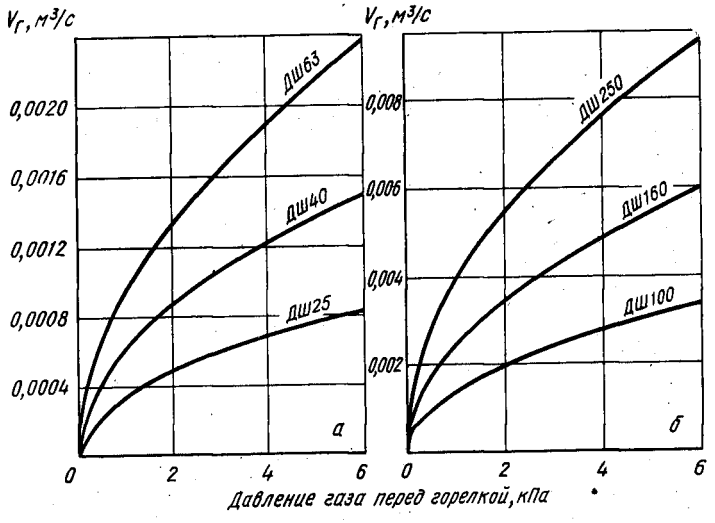


Рис. 20. Пропускная способность по газу горелок типа ДШ: *а* — ДШ 25—ДШ 63; *б* — ДШ 100—ДШ 250

коэффициента расхода воздуха; цифра характеризует типоразмер горелки. Например, обозначение «Горелка ДШ 63» следует понимать: «Горелка дутьевая с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха номинальной теплопроизводительностью 75 кВт».

Выбор горелок типа ДШ производят следующим образом. Сначала по графикам (рис. 20) в зависимости от заданной пропускной способности по газу и его давления перед горелкой определяют типоразмер горелки. Затем по графикам (рис. 21) для

выбранного типоразмера горелки в зависимости от необходимого количества воздуха определяют его давление перед горелкой. Графики построены для холодных газа и воздуха (20° С).

Пример. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г}$=0,0015 м³/с природного газа с $Q_н^р$=34,95 МДж/м³; давление газа перед горелкой 2,5 кПа, α=1,50.

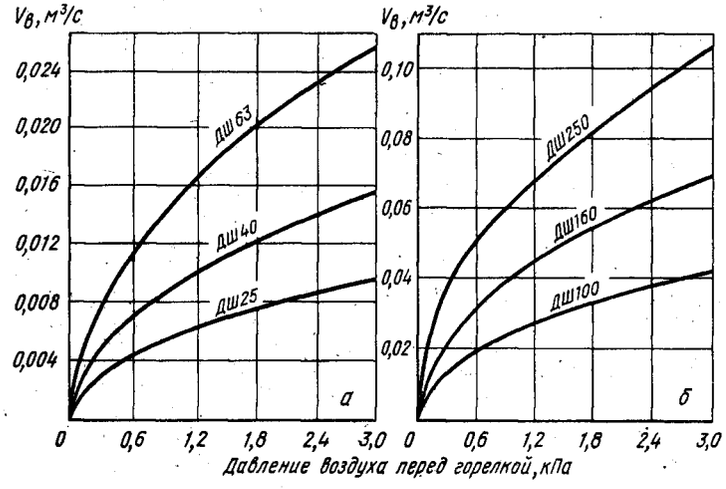


Рис. 21. Пропускная способность по воздуху горелок типа ДШ: *а* — ДШ 25—ДШ 63; *б* — ДШ 100—ДШ 250 (температура газа и воздуха 20 °С)

По рис. I-21 приложения I определяем L_0=9,25 м³/м³ газа.

$$V_{ов} = 1,5 \cdot 9,25 \cdot 0,0015 = 0,0208 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По рис. 20, *а* при пропускной способности горелки по газу 0,0015 м³/с и его давлении перед горелкой 2,5 кПа выбираем горелку ДШ 63.

По рис. 21, *а* для горелки ДШ 63 при количестве воздуха 0,0208 м³/с определяем, что его давление должно быть 1,9 кПа.

Глава 4

ГОРЕЛКИ С УЛУЧШЕННЫМ СМЕШЕНИЕМ

Улучшения смешения газа и воздуха в этих горелках достигают следующим образом:

увеличением пути перемешивания и продолжительности контакта газа и воздуха внутри горелки;

разделением потока газа и (или) воздуха на мелкие струи;

направлением потоков газа и воздуха под углом друг к другу;

закручиванием потоков газа и (или) воздуха.

В результате улучшения смешения в этих горелках удается получить более короткий и высокотемпературный факел, чем в горелках без предварительного смешения, и снизить потребный коэффициент расхода воздуха. Кроме того, в горелках с улучшенным смешением при соответствующем конструктивном устройстве можно получить факел заданной формы и с необходимыми характеристиками.

Горелки с улучшенным смешением в основном имеют те же достоинства и недостатки, что и горелки без предварительного смешения. Однако по сравнению с последними горелки с улучшенным смешением имеют более сложную конструкцию и меньшие пределы регулирования, так как в них уже возникает некоторая опасность проскока пламени внутрь горелки. Кроме того, при сжигании газов с высокой теплотой сгорания зона высоких температур располагается ближе к горелке, что снижает ее стойкость и стойкость горелочного камня. Поэтому применение горелок с улучшенным смешением оправдано только тогда, когда используются особые свойства получаемого в них факела.

В основном в печах прокатного производства черной металлургии используют следующие виды факела: укороченный, постоянной длины и плоский. Укороченный факел используют при ограниченном объеме камеры сгорания или при сжигании газов с низкой теплотой сгорания для достижения более высоких температур в факеле. Для получения укороченного факела при сжигании газов с высокой теплотой сгорания применяют дутьевые горелки для природного газа низкого давления типа ГНП, при сжигании газа с низкой теплотой сгорания — турбулентные горелки типа ГТН.

Факел постоянной длины применяют при боковом отоплении широких проходных печей, когда для обеспечения равномерности нагрева металла необходимо сохранить длину факела и равномерную теплоотдачу при изменении количества газа, проходящего через горелку.

Плоский факел образуется при сжигании газа в тонком слое, стелющемся по поверхности огнеупорного кирпича, в результате чего обеспечивается интенсивный и равномерный нагрев металла излучением от разогретой кладки печи. Применяется преимущественно при сводовом отоплении печей. Для создания плоского факела применяют радиационные горелки типа ГР, плоскопламенные типа ГПП и горелки с излучающей чашей типа ГВИЧ.

В связи со сложностью процессов смешения и сгорания, зависящих от способа и степени улучшения смешения, горелки с улучшенным смешением не поддаются расчету и отрабатываются экспериментально. Существуют полуэмпирические методики расчета лишь для некоторых наиболее простых случаев смешения газа и воздуха: многоструйная подача газа перпендикулярно потоку воздуха (Ю. В. Иванова), аэродинамический расчет закручивания среды (Д. Н. Ляховского, Р. Б. Ахмедова) и другие.

4.1. Горелки нагревательных колодцев

Для улучшения смешения в горелках нагревательных колодцев газ подают несколькими струями под углом к потоку воздуха.

На рис. 22 показаны горелки нагревательных колодцев с отоп-

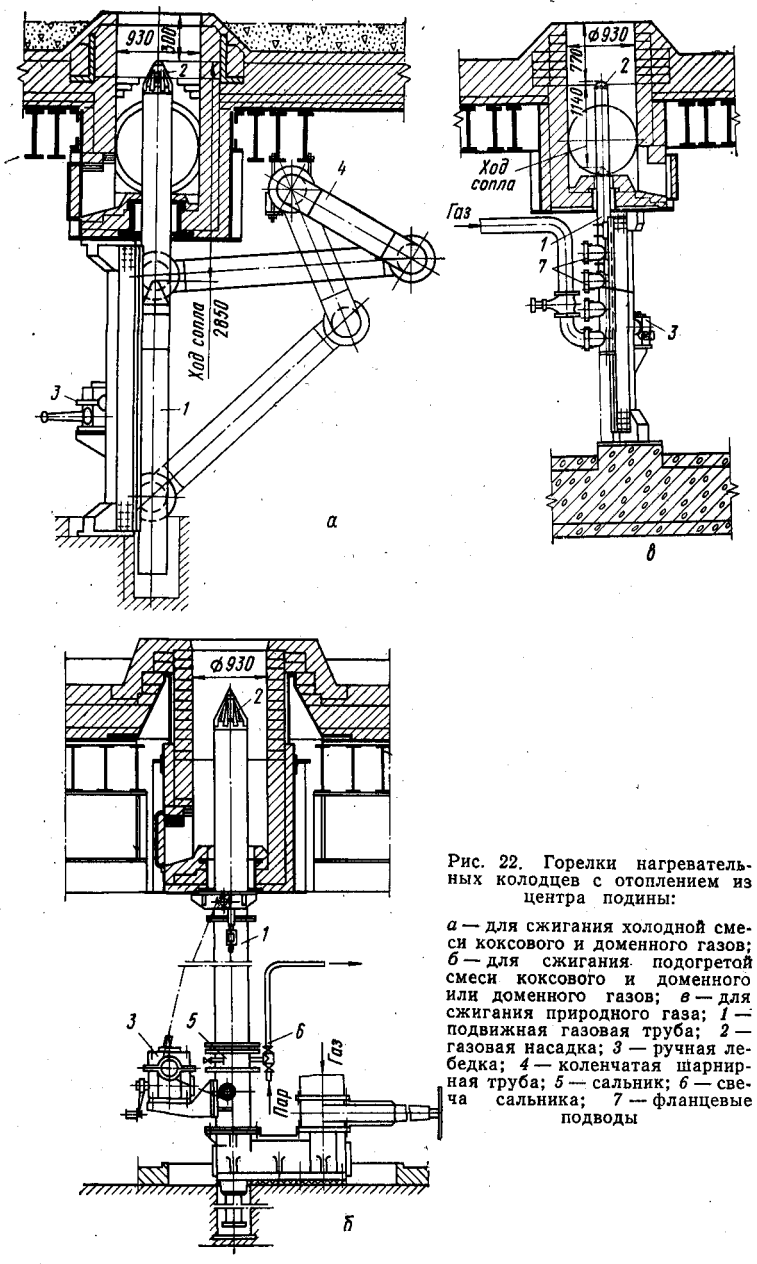


Рис. 22. Горелки нагревательных колодцев с отоплением из центра подины:

а — для сжигания холодной смеси коксового и доменного газов; *б* — для сжигания подогретой смеси коксового и доменного или доменного газов; *в* — для сжигания природного газа; *1* — подвижная газовая труба; *2* — газовая насадка; *3* — ручная лебедка; *4* — коленчатая шарнирная труба; *5* — сальник; *6* — свеча сальника; *7* — фланцевые подводы

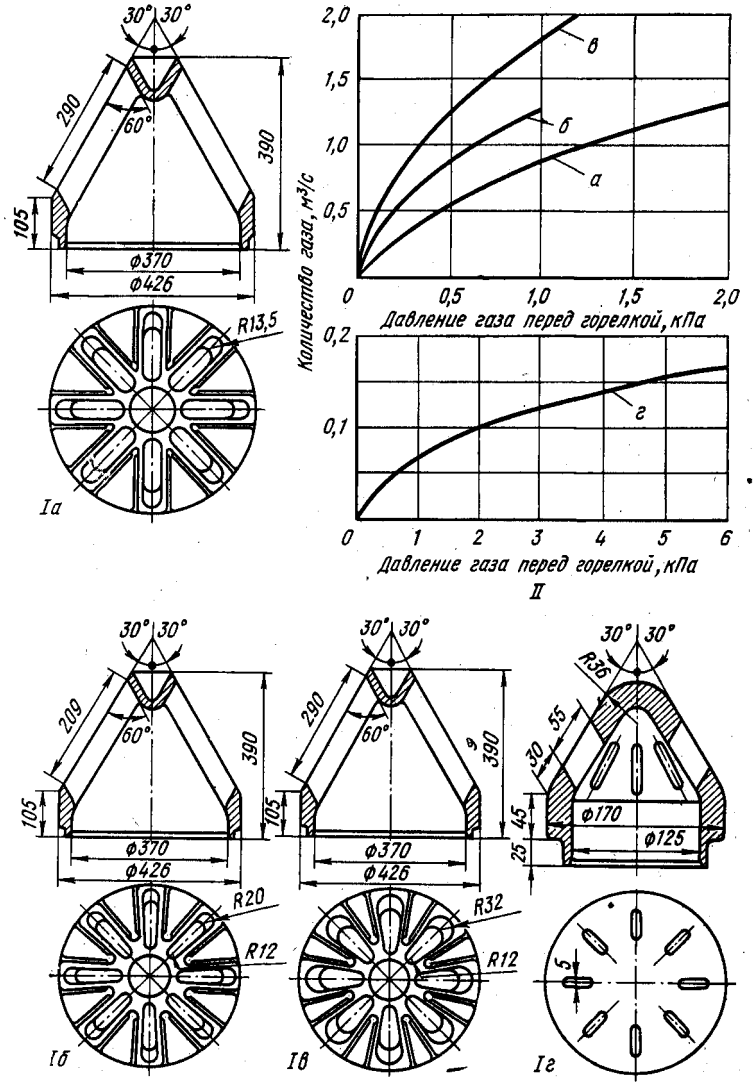


Рис. 23. Насадки *I* и пропускная способность по газу *II* горелок нагревательных колодцев с отоплением из центра подины:

а — для сжигания холодной смеси коксового и доменного газов (проходное сечение 600 см²); *б* — для сжигания подогретой (400 °С) смеси коксового и доменного газов (проходное сечение 700 см²); *в* — для сжигания подогретого (400 °С) доменного газа (проходное сечение 1000 см²); *г* — для сжигания природного газа (проходное сечение 22,8 см²)

лением из центра подины. Газовое сопло, состоящее из подвижной газовой трубы и насадки, расположено в круглом керамическом канале, через который подается воздух. Предусмотрена возможность опускания газового сопла для регулирования длины факела и смены насадки. С этой целью газ в горелки для сжигания холодной смеси коксового и доменного газов (см. рис. 22, *а*) подается через шарнирные соединения. Горелки, предназначенные для сжигания подогретого газа (см. рис. 22, *б*), отличаются тем, что подвижная газовая труба перемещается в сальнике. Для уплотнения сальника предусмотрен кольцевой канал, соединенный со свечой. Горелки для природного газа, который подается под давлением 5—7 кПа, имеют фланцевое соединение с газопроводом. Подвижную газовую трубу и насадку изготавливают из жаропрочной хромоникелевой стали.

На рис. 23 показаны различные насадки газовых сопел и их пропускная способность по газу. Насадки газовых сопел выполняют массивными, так как они подвергаются действию высоких температур и могут испытывать значительные ударные нагрузки при падении слитков. Насадки выполняют конической формы, что предотвращает закупоривание щелей для выхода газа окалиной, падающей со слитков. Иногда торцовую поверхность насадки защищают набивной огнеупорной массой, укладываемой в специальное углубление (см. рис. 23, *а—в*).

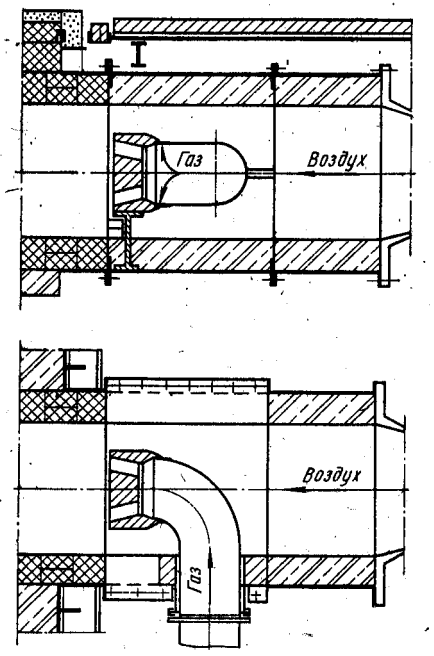


Рис. 24. Горелка нагревательного колодца с отоплением одной верхней горелкой

Горелка нагревательного колодца с одной верхней горелкой показана на рис. 24. Воздух к горелке подают с помощью инжектора. В качестве инжектирующей среды используют компрессорный воздух, давление которого перед горелкой 0,5—0,6 кПа. Газовое сопло горелки снабжают массивной литой металлической или керамической насадкой, в которой предусмотрено несколько отверстий, направленных под углом к потоку воздуха. При расчете проходных сечений в газовой насадке исходят из того, что при максимальной подаче газа скорость его вылета должна быть для смеси коксового и доменного газов 10—12, для природного газа 25 м/с.

4.2. Горелки для природного газа низкого давления типа гнп

В горелках для природного газа низкого давления типа ГНП, разработанных Теплопроектом, улучшения смешения добиваются путем установки завихрителя на воздушном пути. Кроме обычного одноструйного газового сопла типа Б, для дальнейшего сокращения факела применяют многоструйный наконечник типа А, в котором по-

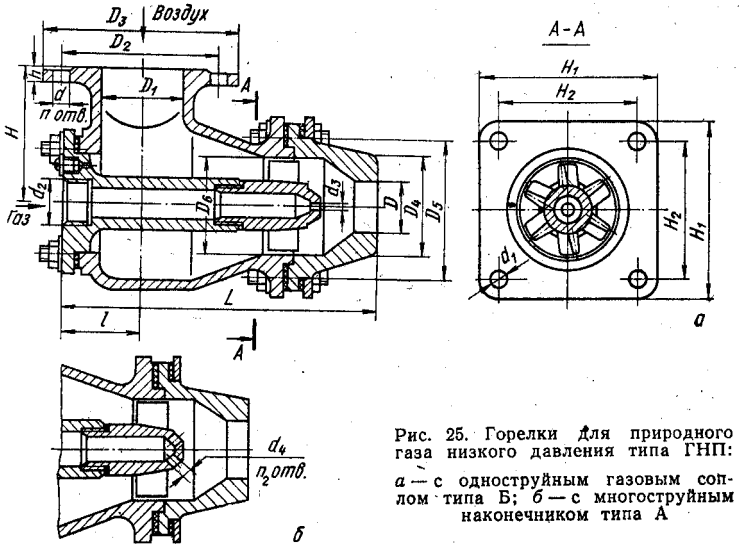


Рис. 25. Горелки для природного газа низкого давления типа ГНП:
а — с одноструйным газовым соплом типа Б; *б* — с многоструйным наконечником типа А

ток газа разбивается на мелкие струи и подается под углом к потоку воздуха.

Горелки типа ГНП рассчитаны на сжигание природного и сжиженного газа, при этом меняют только газовое сопло. Горелки могут работать с воздухом, подогретым до 500° С. Разработано 9 типоразмеров горелок, каждый из которых может иметь сопла типов А и Б для природного и сжиженного газа.

Горелки для природного газа низкого давления типа ГНП показаны на рис. 25, а их конструктивные размеры приведены в табл. 5.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* И ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРЕЛОК

Обозначение горелки	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	d	d_1	H	H_1	H_2	h
ГНП-1	25	36	90	120	45	70	45	14	14	80	110	80	10
ГНП-2	33	41	100	130	60	90	58	14	14	90	120	90	10
ГНП-3	45	68	130	160	80	115	82	14	14	110	150	115	12
ГНП-4	55	80	150	185	90	135	98	18	14	120	170	130	12
ГНП-5	73	106	170	205	130	185	132	18	18	140	225	175	14
ГНП-6	92	131	200	235	130	185	132	18	18	160	225	175	15
ГНП-7	110	151	225	260	150	220	158	18	18	170	260	210	16
ГНП-8	128	175	255	290	170	250	182	18	23	200	290	240	16
ГНП-9	142	188	255	290	180	270	200	18	23	200	320	260	16

* Кроме указанных особо.
** Длина факела природного газа при давлении газа перед горелкой 4 кПа.

Здесь же указана примерная длина факела при сжигании природного газа. Горелки выполнены из литых деталей и крепятся на печи с помощью горелочной плиты.

Обозначение горелок включает индекс типа горелок, номер типоразмера и тип газового сопла (А или Б) для природного (П) или сжиженного (С) газа. Например, обозначение горелки ГНП-5АС расшифровывается так: горелка для природного газа низкого давления типоразмер 5 с многоструйным газовым соплом типа А для сжиженного газа.

Выбор горелок осуществляют следующим образом: сначала в зависимости от необходимой пропускной способности горелки по газу, вида применяемого газа, его давления перед горелкой и типа выбранного сопла по графикам (рис. 26—28) определяют типоразмер горелки, а затем для выбранного типоразмера горелки в зависимости от пропускной способности горелки по газу и вида применяемого газа по графикам (рис. 29 или 30) находят необходимое давление воздуха перед горелкой.

Графики (см. рис. 26, 27 и 29) построены для холодного (0° С) природного газа с $Q_н^р = 35{,}6$ МДж/м³ и $\rho = 0{,}73$ кг/м³, сжигаемого с холодным (0° С) воздухом при расходе воздуха $L = \alpha L_0 = 10{,}2$ м³/м³

Таблица 5

ДЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ТИПА ГНП (РИС. 25)

L	l	n	Для природного газа d_2	Для природного газа d_3	Для природного газа d_4	Для природного газа n_1	Для сжиженного газа d_2	Для сжиженного газа d_3	Для сжиженного газа d_4	Для сжиженного газа число отверстий n_1	Масса горелки, кг	Тип сопла	Длина факела**, мм
180	45	4	3/4″	5,5	3,2	4	1/2″	4,5	2	4	6,6	А	230
												Б	340
205	50	4	3/4″	7,0	4,2	4	1/2″	5,8	2,8	6	7,8	А	264
												Б	330
260	55	4	1″	10,0	4,8	6	3/4″	8,0	3,4	8	14,4	А	420
												Б	480
30	75	4	1″	13,5	6,6	6	3/4″	9,5	3,7	10	22,0	А	550
												Б	Нет св.
362	90	4	1 1/4″	16,0	7,8	6	1″	13,0	6,4	6	37,0	А	1740
												Б	2060
397	105	8	1 1/2″	20,0	9,6	6	1 1/4″	16,0	8,0	6	43,0	А	1680
												Б	1990
453	120	8	2″	24,0	11,8	6	2″	20,0	9,0	6	58,0	А	1300
												Б	Нет св.
515	135	8	2 1/2″	28,0	13,5	6	2 1/2″	23,0	10,6	6	81,0	А	1140
												Б	1660
568	145	8	2 1/2″	31,0	15,5	6	2 1/2″	25,0	12,0	6	96,0	А	2270
												Б	2700

газа, что соответствует $\alpha = 1{,}05$. Графики на рис. 28 и 30 построены для холодного (0° С) сжиженного газа (пропана) $Q_н^р = 88{,}84$ МДж/м³ и $\rho_г = 2{,}03$ кг/м³, сжигаемого с холодным (0° С) воздухом при $L = 26{,}1$ м³/м³ газа, что соответствует $\alpha = 1{,}05$. Для всех графиков принято противодавление в камере сгорания от 5 до 10 Па.

При подогреве воздуха до температуры T необходимое его давление определяют умножением величины, полученной по графикам рис. 29 и 30, на поправочный коэффициент, равный отношению $T/273$.

Верхняя граница регулируемой работы горелок по давлению газа перед горелкой 8 кПа, нижняя граница, определяемая возможностью работы автоматики регулирования, 0,1 кПа. Для низкотемпературных печей ($t < 600$° С) давление газа перед горелками с соплом типа Б не должно быть выше 4 кПа.

Пример. Подобрать горелку для сжигания 0,03 м³/с природного газа $Q_н^р = 35{,}6$ МДж/м³ в горелке с многоструйным соплом типа А. Давление газа перед горелкой 2 кПа, температура подогрева воздуха 400° С.

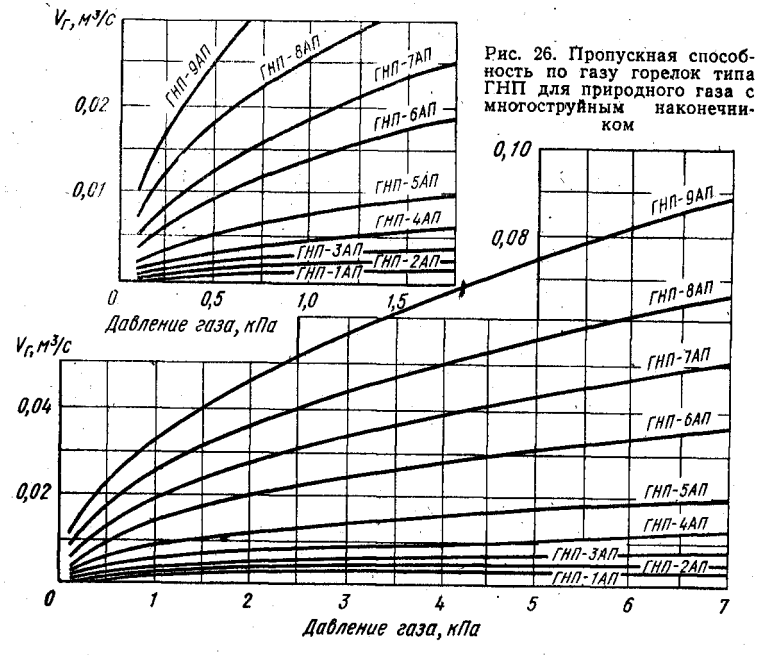


Рис. 26. Пропускная способность по газу горелок типа ГНП для природного газа с многоструйным наконечником

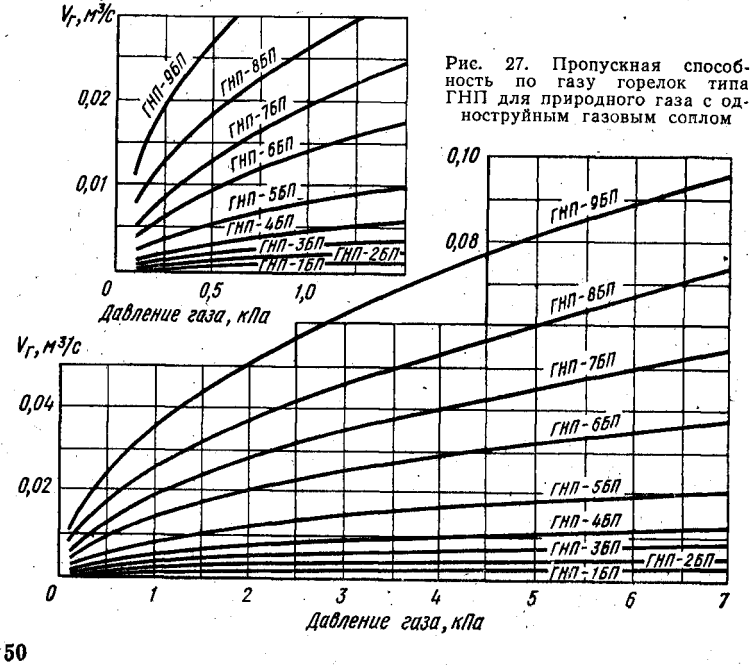


Рис. 27. Пропускная способность по газу горелок типа ГНП для природного газа с одноструйным газовым соплом

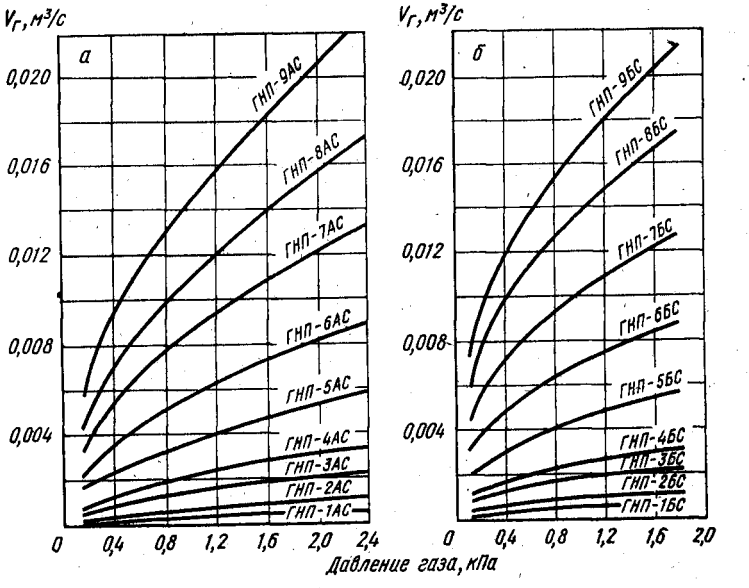


Рис. 28. Пропускная способность по газу горелок типа ГНП для сжиженного газа:

а — с многоструйным наконечником; *б* — с одноструйным газовым соплом

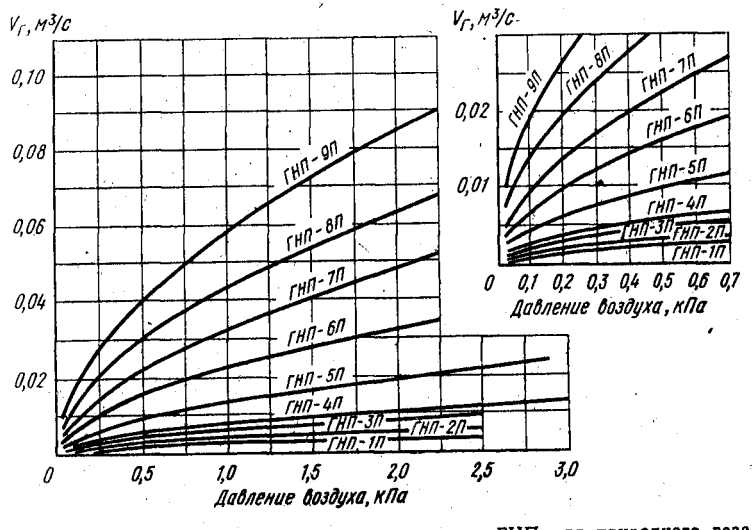


Рис. 29. Давление воздуха перед горелками типа ГНП для природного газа

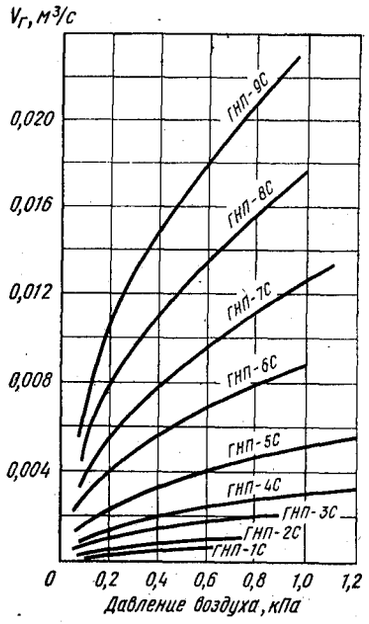


Рис. 30. Давление воздуха перед горелками типа ГНП для сжиженного газа

По графику (см. рис. 26) для заданной пропускной способности горелки по газу 0,03 м³/с и его давления выбираем горелку ГНП-7АП.

По графику (см. рис. 29) для этого типоразмера горелки при пропускной способности по газу 0,03 м³/с находим давление холодного воздуха 0,8 кПа. Необходимое давление воздуха перед горелкой с учетом его температуры 0,8·673 : 273≈1,9 кПа.

4.3. Турбулентные горелки для газов с низкой теплотой сгорания типа ГТН

В турбулентных горелках типа ГТН, разработанных Стальпроектом, улучшения смешения газа и воздуха достигают путем закручивания потока воздуха при тангенциальной его подаче в корпус горелки. Турбулентные горелки разработаны двух типов: для сжигания газов с $Q_н^р$ = 3,75÷5,85 МДж/м³ (тип I) и $Q_н^р$ =5,85÷9,2 МДж/м³ (тип II). Разработано 7 типоразмеров горелок с диаметром носика горелки от 50 до 200 мм.

Турбулентные горелки типа ГТН показаны на рис. 31, а их конструктивные размеры приведены в табл. 6.

Обозначение горелок состоит из индекса типа горелок, размера носика горелки (мм) и типа горелки. Например, ГТН-100-I означает: горелка турбулентная для газа низкого давления с диаметром носика горелки 100 мм, тип I (для газов с $Q_н^р$= 3,75÷5,85 МДж/м³).

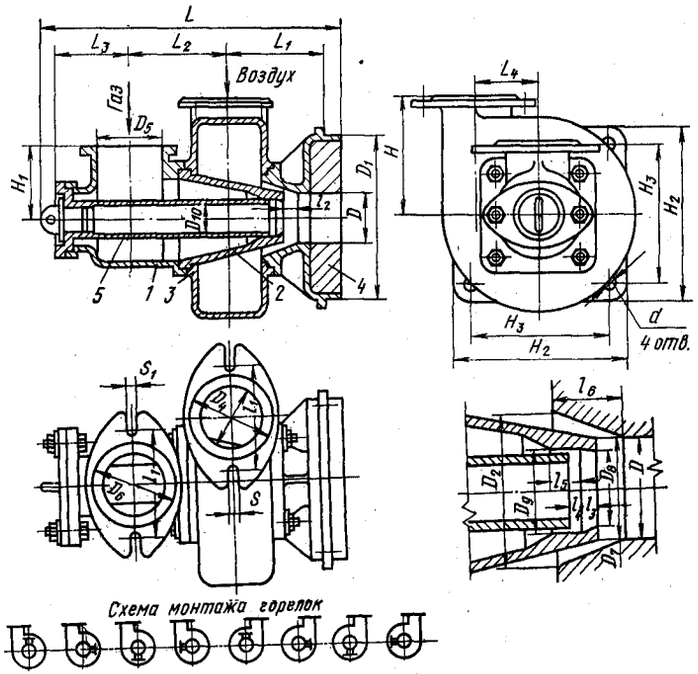


Рис. 31. Турбулентные горелки для газов низкой теплоты сгорания типа ГТН: *1* — газовый корпус; *2* — газовое сопло; *3* — воздушный корпус; *4* — горелочный камень; *5* — гляделка

На рис. 32 показана зависимость пропускной способности горелки по газу от его давления перед горелкой для холодного (20° С) газа с $Q_н^р$ = 5,85 МДж/м³, ρ = 1,17 кг/м³, α = 1,05. На рис. 33 дана зависимость пропускной способности горелки по воздуху от его давления перед горелкой для холодного (20° С) воздуха. При применении газа другой плотности и при подогреве газа или воздуха на графиках (см. рис. 32 и 33) откладывают расчетные величины, которые определяют так же, как для горелок типа «труба в трубе», по формулам (7) и (8) с учетом приведенных выше поправочных коэффициентов на плотность и температуру.

Для газов с теплотой сгорания, не равной 5,85 МДж/м³, и при других значениях коэффициента расхода воздуха полученные по графикам на рис. 32 и 33 величины следует умножить на поправочный коэффициент, определяемый по графику на рис. 34 в зависимости от отношения количеств воздуха и газа $L = \alpha L_0$.

Выбор турбулентных горелок иллюстрирован следующими примерами.

Пример 1. Подобрать турбулентную горелку для сжигания $V_{0г}$ = 0,1 м³/с смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р$ = 5,05 МДж/м³. Газ холодный ($t_г$ = 20° С), воздух подогрет до 300° С. Давление газа перед горелкой 1,2 кПа, α = 1,1.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ТУРБУЛЕНТНЫХ ГОРЕЛОК ДЛЯ ГАЗОВ

Обозначение	Тип	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	d	H
ГТН-50	I	50	220	75	65	110	65	110	50	38	40	34	18	135
	II	50	220	75	65	110	50	90	48	38	40	35	18	135
ГТН-60	I	60	220	90	75	128	75	128	60	45	48	40	18	150
	II	60	220	90	75	128	65	110	57	45	48	42	18	150
ГТН-75	I	75	220	112	100	148	100	148	75	56	60	50	18	190
	II	75	220	112	100	148	75	128	71	56	60	53	18	190
ГТН-100	I	100	280	150	125	178	125	178	100	75	80	68	22	230
	II	100	280	150	125	178	100	148	95	75	80	70	22	230
ГТН-125	I	125	320	188	150	202	150	202	125	94	100	85	22	270
	II	125	320	188	150	202	125	178	119	94	100	88	22	270
ГТН-150	I	150	420	225	200	258	200	258	150	113	120	100	22	350
	II	150	420	225	200	258	150	202	142	113	120	105	22	350
ГТН-200	I	200	540	300	250	312	250	312	200	150	160	135	26	420
	II	200	540	300	250	312	200	258	190	150	160	140	26	420

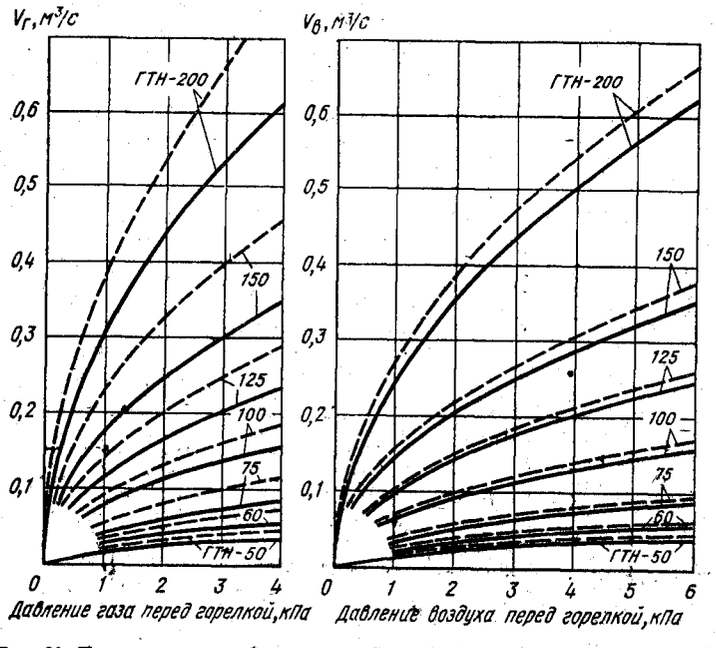


Рис. 32. Пропускная способность по газу горелок типа ГТН для газов с теплотой сгорания, МДж/м³:
— — — — 3,75—5,85;
——— 5,85—9,20

Рис. 33. Пропускная способность по воздуху горелок типа ГТН для газов с теплотой сгорания, МДж/м³:
— — — — 3,75—5,85;
——— 5,85—9,20

Таблица 6

НИЗКОЙ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ТИПА ГТН (РИС. 31)

H_1	H_2	H_3	L	L_1	L_2	L_3	L_4	l	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	S	S_1
100	250	190	375	120,5	115	95,5	60	130	130	13	8	5	15	33	15	15
100	250	190	365	120,5	110,5	90	60	130	110	13	8	5	15	33	15	15
110	250	190	405	132,5	125	100,5	70	150	150	15	10	6	18	40	15	15
110	250	190	395	132,5	120	95,5	70	150	130	15	10	6	18	40	15	15
125	250	190	490	155	155	125	95	170	170	19	12	8	23	50	18	18
125	250	190	450	155	140,5	99,5	95	170	150	19	12	8	23	50	18	15
140	310	250	570	183,5	185	140,5	120	200	200	25	16	10	30	66	18	18
140	310	250	540	183,5	170	125	120	200	170	25	16	10	30	66	18	18
170	350	290	645	213	210	160	140	225	225	31	20	13	38	83	22	22
170	350	290	615	213	200,5	139,5	140	225	200	31	20	13	38	83	22	18
190	460	400	770	255	260	190	190	280	280	38	24	15	45	100	22	22
190	460	400	715	255	235	160	190	280	225	38	24	15	45	100	22	22
235	580	520	910	312	310	220	240	235	335	50	32	20	60	132	22	22
235	580	520	835	312	185	190	240	235	280	50	32	20	60	132	22	22

По рис. I-5 приложения I находим $\rho_{0г}=1{,}22$ кг/м³ и $L_0=1{,}05$ м³/м³ газа. Количество воздуха, м³/м³ газа, при $\alpha=1{,}1$

$$L = 1{,}1 \cdot 1{,}05 = 1{,}16.$$

Расчетное количество газа

$$V_г^{расч} = V_{0г}\, k_г \sqrt{\frac{\rho_{0г}}{\rho_{расч}}} =$$

$$= 0{,}1 \cdot 1{,}004 \sqrt{\frac{1{,}22}{1{,}17}} = 0{,}102 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $k_г$ — поправочный коэффициент для газа; определен по графику (см. рис. 34) при $L=1{,}16$.

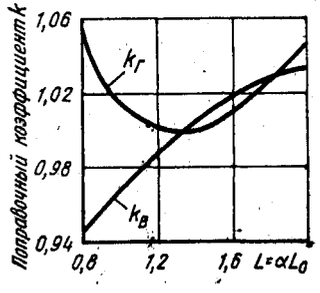


Рис. 34. Поправочные коэффициенты для газа $k_г$ и воздуха $k_в$

По расчетному количеству газа и его давлению перед горелкой по графику (см. рис. 32) выбираем горелку ГТН-100-I.

Расчетное количество воздуха

$$V_в^{расч} = V_{0г} L k_в k_t = 0{,}1 \cdot 1{,}16 \cdot 0{,}98 \cdot 1{,}4 = 0{,}16 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $k_в$ — поправочный коэффициент для воздуха; определен по графику (см. рис. 34) при $L=1{,}16$; k_t — поправочный коэффициент на температуру воздуха; определен по графику (см. рис. 15) при заданной температуре воздуха.

По расчетному количеству воздуха для горелки ГТН-100-I по графику (см. рис. 33) определяем необходимое давление воздуха перед горелкой (5 кПа).

Пример 2. **Определить пропускную способность горелки ГТН-**

150-II при подаче через нее смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 6{,}3$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой 0,8 кПа. Газ и воздух холодные (20° С); $\alpha = 1{,}05$.

По рис. I—6 и I—7 приложения I интерполяцией находим $\rho_{0г} = 1{,}14$ кг/м³ и $L_0 = 1{,}36$ м³/м³ газа. При $\alpha = 1{,}05$ $L = 1{,}05 \cdot 1{,}36 = 1{,}43$ м³/м³ газа.

По графику (см. рис. 32) находим, что при заданном давлении газа для горелки ГТН-150-II $V_г^{расч} = 0{,}16$ м³/с. Пропускная способность горелки по газу

$$V_{0г} = \frac{V_г^{расч}}{k_г \sqrt{\rho_{0г}/\rho_{расч}}} = \frac{0{,}16}{1{,}0\sqrt{1{,}14:1{,}17}} = 0{,}161 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $k_г$ — поправочный коэффициент для газа; определен по графику на рис. 34 при $L = 1{,}43$ м³/м³.

$$V_{0в} = LV_{0г} = 1{,}43 \cdot 0{,}161 = 0{,}23 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$V_в^{расч} = V_{0в} k_в = 0{,}23 \cdot 1{,}01 = 0{,}232 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику на рис. 33 находим, что при заданном расчетном количестве воздуха его давление перед горелкой ГТН-150-II должно составлять 2,5 кПа.

4.4. Горелки с постоянной длиной факела

В горелках с постоянной длиной факела, разработанных Стальпроектом, изменением степени предварительного смешения осуществляется регулирование длины факела с тем, чтобы сохранить ее неизменной при изменении подачи газа.

Разработаны два типоразмера горелок 375 и 420 для сжигания природного и смеси природного и доменного газов с $Q_н^р = 20{,}9$ МДж/м³ в нагретом до 400° С воздуха.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) И ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРЕЛОК

$Q_н^р$, МДж/м³	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	d	d_1	d_2	H
													Горел
20,95	375	480	530	400	495	535	150	240	280	75	200	30	400
35,60	375	480	530	400	495	535	150	240	280	45	315	20	400
													Горел
20,95	420	530	580	500	600	640	200	295	335	90	330	40	500
35,60	420	530	580	500	600	640	150	240	280	55	330	25	500

Горелки с постоянной длиной факела показаны на рис. 35, а их конструктивные размеры и основные характеристики приведены в табл. 7.

Регулирование степени смешения в этих горелках происходит благодаря подаче газа через два канала: внутренний, направленный параллельно воздушному потоку, и наружный, из которого газ выходит через ряд отверстий под углом к воздушному потоку. При подаче газа только через внутренний канал горелка работает как горелка без предварительного смешения «труба в трубе». Перераспределяя газ между внутренним и наружным каналами, можно регулировать степень смешения таким образом, чтобы сохранить длину факела неизменной. Описанные выше горелки, разработанные Стальпроектом для бокового отопления нижних зон печей с шагающими балками, позволяют сохранить факел длиной ~8 м при изменении подачи газа через горелку в пределах регулирования 1 : 5.

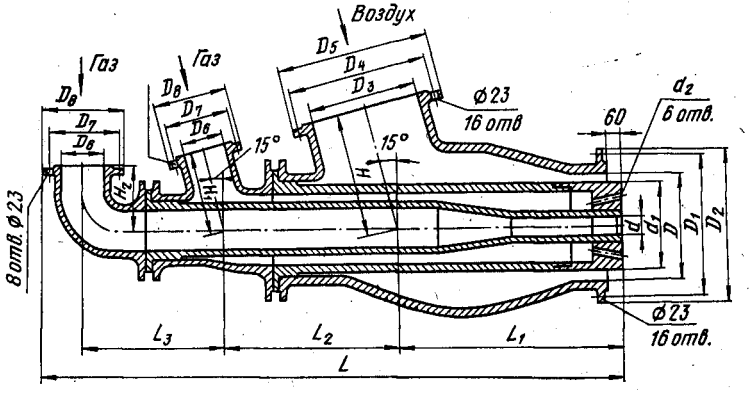


Рис. 35. Горелки с постоянной длиной факела

Таблица 7

С ПОСТОЯННОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА (РИС. 35)

H_1	H_2	L	L_1	L_2	L_3	Масса горелки, кг	Пропускная способность по газу, м³/с	Давление перед горелкой, кПа: газа	Давление перед горелкой, кПа: воздуха	Температура подогрева воздуха, °С
ка 375										
250	220	2035	800	600	495	780	0,175	1,5	1,1	300
250	220	2122	780	620	495	900	0,110	3,0	2,0	400
ка 420										
300	260	2268	850	675	575	990	0,278	1,2	1,5	300
250	220	2238	850	675	495	1020	0,167	3,0	2,0	400

4.5. Радиационные горелки типа ГР

В радиационных плоскопламенных горелках типа ГР, разработанных ВНИИМТом и Стальпроектом, плоский разомкнутый факел создается благодаря закручиванию газа и воздуха. Закручивание воздуха происходит вследствие тангенциальной его подачи в корпус горелки через прямоугольный патрубок, а закручивание газа — выдачей его через сопло с косыми прорезями. Для создания плоского факела применяют также горелочный камень специальной формы с горелочным туннелем в виде криволинейного диффузора. Благодаря этому плоский факел равномерно обогревает горелочный камень и прилегающие к нему участки кладки, что обеспечивает равномерный и интенсивный нагрев металла. Горелка предназначена преимущественно для установки в подвесном своде, что определяет систему крепления горелки и горелочного камня.

Радиационные плоскопламенные горелки типа ГР предназначены для сжигания холодных природного, коксового и смешанных газов. Воздух может быть нагрет до 400° С. Разработано 10 типоразмеров горелок номинальной теплопроизводительностью от 70 до 1750 кВт. Номинальная теплопроизводительность определена при $\alpha = 1{,}05$, давление холодного воздуха перед горелкой 2,5 кПа, $p = 2{,}5$ Па, давление газа перед горелкой 3 кПа для газов с $Q_н^р \leqslant 19$ МДж/м³ и 5 кПа для природного газа.

Пределы регулирования горелок с сохранением плоского пламени 1 : 4 от номинала. Горелки могут работать с $\alpha = 0{,}8 \div 2{,}0$.

Радиационные плоскопламенные горелки типа ГР показаны на рис. 36, а их конструктивные размеры приведены в табл. 8.

Горелка состоит из литых деталей. С помощью верхнего фланца она опирается на металлоконструкции на своде печи, а горелочный камень подвешивается к горелке.

В обозначении горелки буквы означают ее индекс, цифры — соответственно характеристику типоразмера, ширину, и через косую—

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) РАДИАЦИОННЫХ

Обозначение горелки	Номинальная теплопроизводительность, кВт	B	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	d	d_1	H	H_1
ГР-60-B/H	70	3; 5; 7	39	18	65	90	110	140	14	12	3—6	340
ГР-85-B/H	100	3; 5; 7	46	22	65	90	130	160	14	12	3—8,5	375
ГР-125-B/H	145	3; 5	54	26	75	100	130	160	14	12	4,5—11	440
ГР-175-B/H	200	3; 5	63	29	90	120	150	185	18	14	4—15,5	495
ГР-250-B/H	290	3; 5	79	44	100	130	170	205	18	14	6—21	540
ГР-350-B/H	400	3; 5	93	50	110	140	200	235	18	14	6—22	575
ГР-500-B/H	580	3; 5; 7	108	65	130	160	225	260	18	14	8—25	660
ГР-750-B/H	850	3; 5; 7	130	76	150	185	280	315	18	18	12—36	745
ГР-1050-B/H	1200	3; 5; 7	155	94	170	205	280	315	18	18	11—32	880
ГР-1500-B/H	1750	5; 7	195	128	200	235	395	435	23	18	10—45	980

длину прорези для газа в газовом сопле. Например, ГР-500-5/15 означает: горелка радиационная номинальной теплопроизводительностью 580 кВт с прорезями в газовом сопле шириной 5 и длиной 15 мм.

Выбор горелки состоит в определении типоразмера горелки и размера прорезей для газа в газовом сопле.

Типоразмер горелки выбирают по графикам (рис. 37) в зависимости от количества воздуха и его давления перед горелкой. График построен для холодного (20° С) воздуха. Для подогретого воздуха типоразмер горелки следует выбирать по расчетному количеству воздуха, определяемому, как и для горелок типа «труба в трубе», по формуле (7).

Затем по графикам (рис. 38) для выбранной горелки в зависимости от характеристики сжигаемого газа и его давления перед горелкой определяют действительное проходное сечение газовых прорезей $F_{пр}$.

Длина прорезей (мм) для газа определяется по формуле

$$H = F_{пр}/(mB) + h, \qquad (12)$$

где m — количество прорезей в газовом сопле, указанное для каждого типоразмера горелки в табл. 8; B — ширина прорезей, мм; B следует брать из ряда значений, указанного для каждого типоразмера горелки в табл. 8; h — высота зубцов резьбы, равная 1,1 мм для горелок ГР-60, ГР-85 и 1,65 мм для остальных типоразмеров горелок.

Для газов, $Q_н^р$ или $\rho_{0г}$ которых отличаются от принятых на рис. 38, расчет следует вести по величине $Q_н^р/\sqrt{\rho_{0г}}$.

Если принятая теплопроизводительность горелки отличается от номинальной, найденную по графикам (см. рис. 38) величину дей-

Таблица 8

ГОРЕЛОК ТИПА ГР (РИС. 36)

H_2	H_3	h	h_1	h_2	L	L_1	L_2	L_3	l	l_1	Число отверстий m	n	n_1	Масса горелки, кг
147	95	20	15	14	440	150	150	29	380	110	4	4	4	39,4
150	95	20	15	14	440	160	175	35	380	110	4	4	4	44,7
170	110	20	15	15	440	190	175	40	380	150	6	4	4	55,0
175	111	21	17	15	440	210	200	49	380	150	6	4	4	66,6
184	113	23	17	15	550	240	225	59	490	200	6	4	4	88,6
193	113	23	19	15	580	290	250	70,5	520	240	8	8	4	110,0
209	119	24	19	15	600	330	325	85	540	250	8	8	4	125,0
240	139	24	22	17	620	328	400	100	560	250	8	8	4	153,0
265	151	26	22	17	620	330	450	120	560	250	12	8	4	207,0
300	153	28	22	19	750	350	500	147	690	250	12	12	8	276,0

ствительного проходного сечения газовых прорезей надо умножить на отношение принятой и номинальной теплопроизводительностей.

Пример. Подобрать горелку для сжигания $V_{0г}=0{,}1$ м³/с смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р=9{,}2$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой 3 кПа, воздуха 2 кПа. Воздух подогрет до 200° С; $\alpha=1{,}05$.

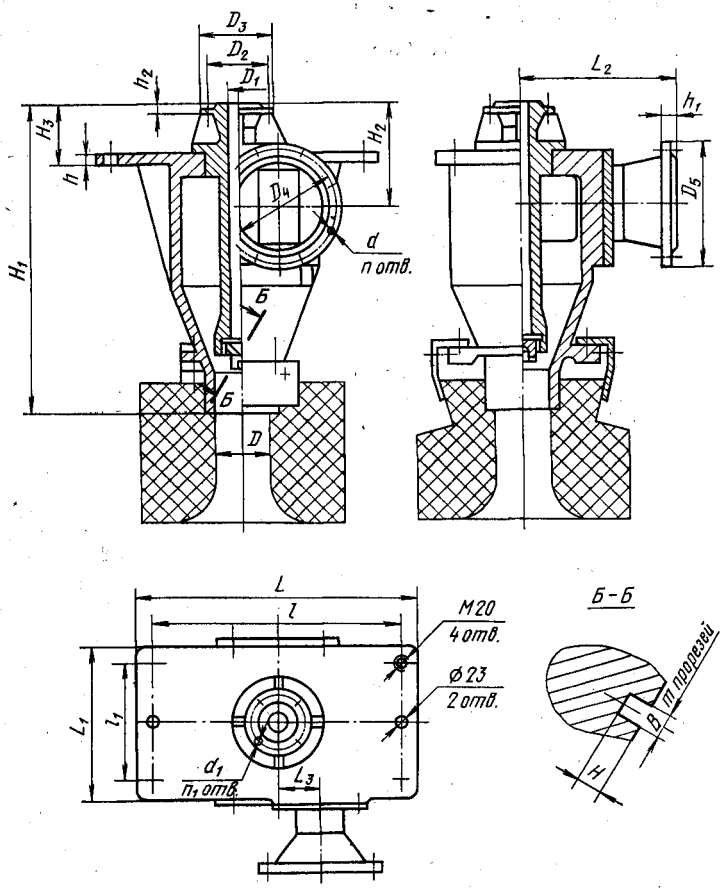


Рис. 36. Радиационные горелки типа ГР

По рис. I-10 приложения I находим $L_0=2{,}09$ м³/м³ газа. Тогда

$$V_{0в}=1{,}05\cdot 2{,}09\cdot 0{,}1=0{,}22 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$V_в^{расч}=V_{0в}k_t=0{,}22\cdot 1{,}27=0{,}28 \text{ м}^3/\text{с}$$

(поправку на температуру воздуха находим по графику на рис. 15 при температуре подогрева воздуха 200° С).

По графику (см. рис. 37) при расчетном количестве воздуха и располагаемом его давлении перед горелкой выбираем горелку ГР-1050 с номинальной теплопроизводительностью 1200 кВт.

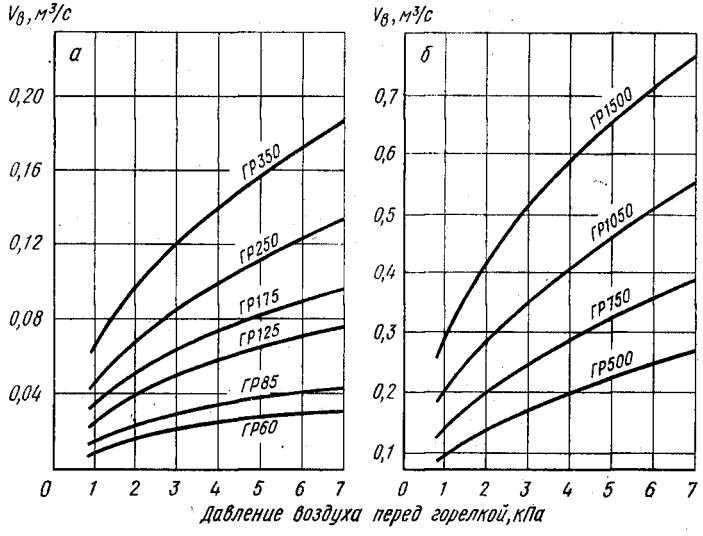


Рис. 37. Пропускная способность по воздуху горелок типа ГР:
а — ГР-60—ГР-350; *б* — ГР-500—ГР-1500

По графику (см. рис. 38) для данной горелки при сжигании газа с теплотой сгорания 9,2 МДж/м³ под давлением 3 кПа находим $F'_{пр}=3100$ мм².

Заданная теплопроизводительность горелки

$$Q=V_{0г}Q_н^р=0{,}1\cdot 9{,}2=0{,}92 \text{ МВт}=920 \text{ кВт}.$$

При такой теплопроизводительности

$$F_{пр}=3100\cdot 920:1200=2380 \text{ мм}^2.$$

По табл. 8 принимаем ширину прорезей $B=7$ мм; количество резей для горелки ГР-1050 $m=12$.

Тогда длина прорезей по формуле (12)

$$H=2380:12:7+1{,}65=30 \text{ мм}.$$

Таким образом, выбираем горелку ГР-1050-7/30.

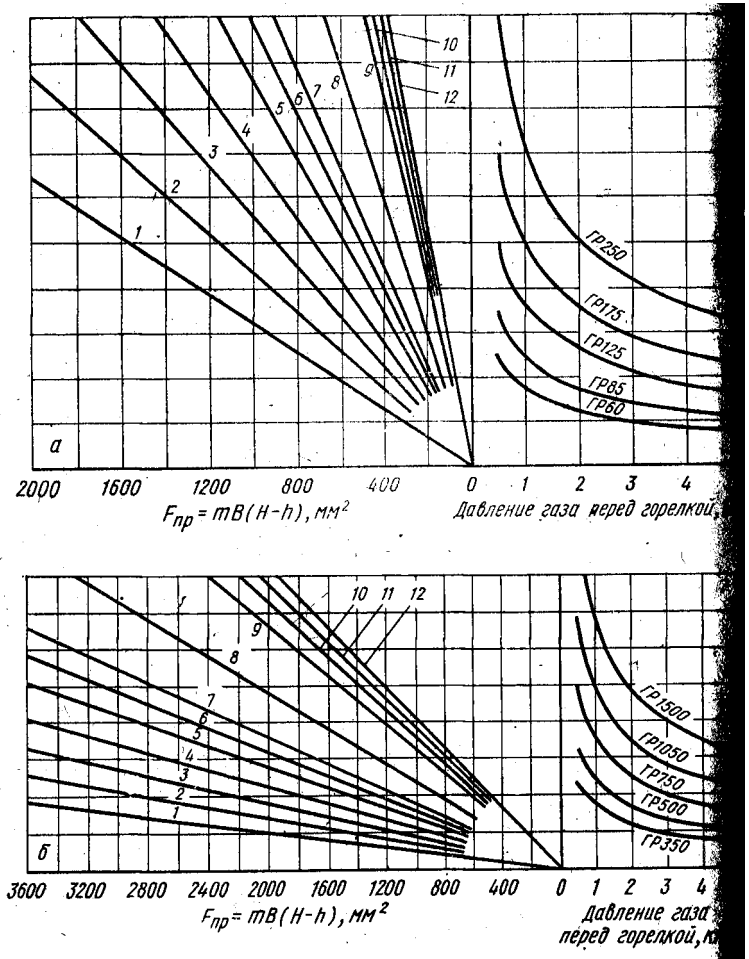


Рис. 38. Действительное проходное сечение $F_{пр}$ газовых прорезей для го
лок типа ГР:
а — ГР-60—ГР-250; *б* — ГР-350—ГР-1500

Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	$\rho_{0г}$, кг/м³	$\frac{Q_н^в}{\sqrt{\rho_{0г}}}$	Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	$\rho_{0г}$, кг/м³	$\frac{Q_н^р}{\sqrt{\rho}}$
1	5,85	1,17	5,41	7	14,65	0,63	18,
2	7,55	1,07	7,30	8	17,10	0,48	24,
3	9,20	0,96	9,39	9	26,85	0,61	34,
4	10,90	0,86	11,76	10	34,00	0,82	37,
5	12,55	0,76	14,39	11	34,95	0,77	39,
6	17,10	1,07	16,54	12	37,20	0,78	42,

4.6. Плоскопламенные горелки типа ГПП

В плоскопламенных горелках для природного газа типа ГПП, разработанных Институтом газа АН УССР и Теплопроектом, плоский разомкнутый факел создается закручиванием воздуха с помощью направляющего винта с переменным шагом. Горелочный туннель для этих горелок имеет такую же форму, как у горелок ГР.

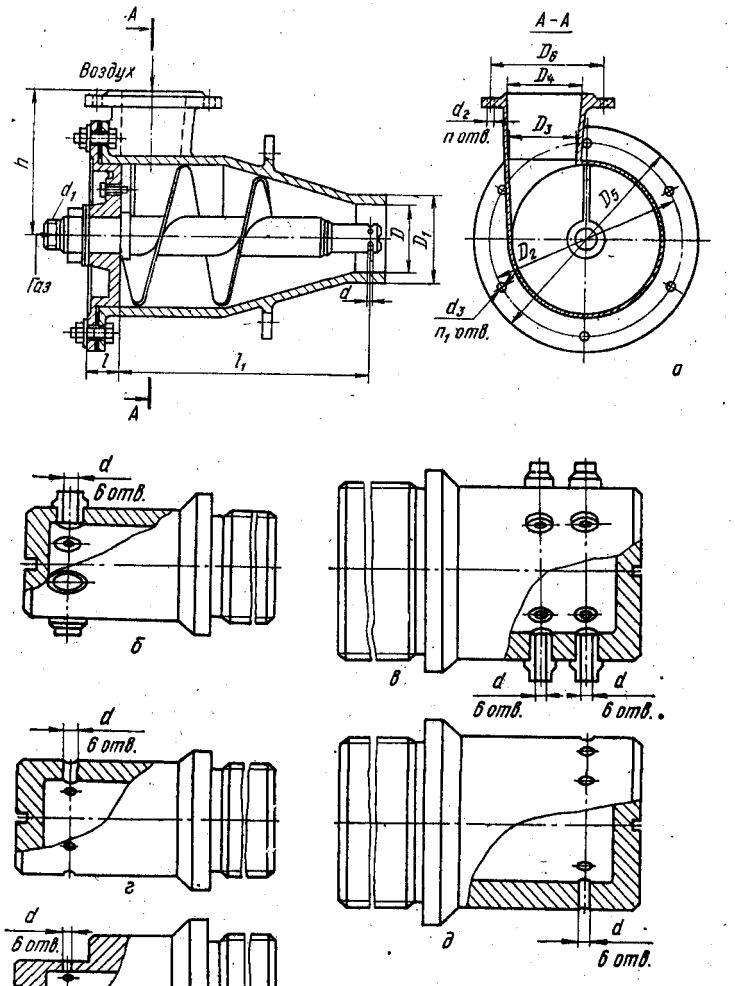


Рис. 39. Плоскопламенные горелки типа ГПП:
а — общий вид горелки; *б*—*е* — газовые сопла

Таблица 9

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ПЛОСКОПЛАМЕННЫХ ГОРЕЛОК ТИПА ГПП (РИС. 39)

Обозначение горелки	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	d	d_1	d_2	d_3	h	L	l	l_1	Число отверстий		Масса горелки, кг
																n	n_1	
ГППН-1	25	40	130	34	34	160	$1\frac{1}{2}''$	2,3	$\frac{3}{8}''$	—	12	105	259	24	180	—	4	9,2
ГППС-1	25	40	130	34	34	160	$1\frac{1}{2}''$	1,5	$\frac{3}{8}''$	—	12	105	259	24	180	—	4	9,2
ГППВ-1	25	40	130	34	34	160	$1\frac{1}{2}''$	Нет св.	$\frac{3}{8}''$	—	12	105	259	24	180	—	4	9,2
ГППН-2	35	51	170	48	48	200	2″	3,3	$\frac{1}{2}''$	—	14	125	321	25	220	—	4	13,6
ГППС-2	35	51	170	48	48	200	2″	2	$\frac{1}{2}''$	—	14	125	321	25	220	—	4	13,6
ГППВ-2	35	51	170	48	48	200	2″	Нет св.	$\frac{1}{2}''$	—	14	125	321	25	220	—	4	13,6
ГППН-3	50	74	240	68	68	280	130	4,6	$\frac{3}{4}''$	14	14	175	457	40	310	4	4	31,2
ГППС-3	50	74	240	68	68	280	130	2,8	$\frac{3}{4}''$	14	14	175	457	40	310	4	4	31,2
ГППВ-3	50	74	240	68	68	280	130	1,85	$\frac{3}{4}''$	14	14	175	457	40	310	4	4	31,2
ГППН-4	75	105	260	92	105	310	170	6,6	$1\frac{1}{4}''$	18	18	220	517	50	380	4	4	61,5
ГППС-4	75	105	260	92	105	310	170	4,2	$1\frac{1}{4}''$	18	18	220	517	50	380	4	4	61,5
ГППВ-4	75	105	260	92	105	310	170	2,6	$1\frac{1}{4}''$	18	18	220	517	50	380	4	4	61,5
ГППН-5	105	145	350	112	125	400	200	9,3	2″	18	18	240	623	60	470	8	6	112,4
ГППС-5	105	145	350	112	125	400	200	5,9	2″	18	18	240	623	60	470	8	6	112,4
ГППВ-5	105	145	350	112	125	400	200	3,7	2″	28	18	240	623	60	470	8	6	112,4
ГППН-6	140	190	395	146	150	895	225	8,2	2″	18	22	300	722	70	570	8	8	196
ГППС-6	140	190	395	146	150	895	225	5,2	2″	18	22	300	722	70	570	8	8	196
ГППВ-6	140	190	395	146	150	895	225	4,6	2″	18	22	300	722	70	570	8	8	196
ГППН-7	165	210	395	166	175	545	255	9,3	$2\frac{1}{2}''$	18	22	320	818	70	645	8	8	225
ГППС-7	165	210	395	166	175	545	255	5,9	$2\frac{1}{2}''$	18	22	320	818	70	645	8	8	225
ГППВ-7	165	210	395	166	175	545	255	Нет св.	$2\frac{1}{2}''$	18	22	320	818	70	645	8	8	225

* Кроме указанных особо.

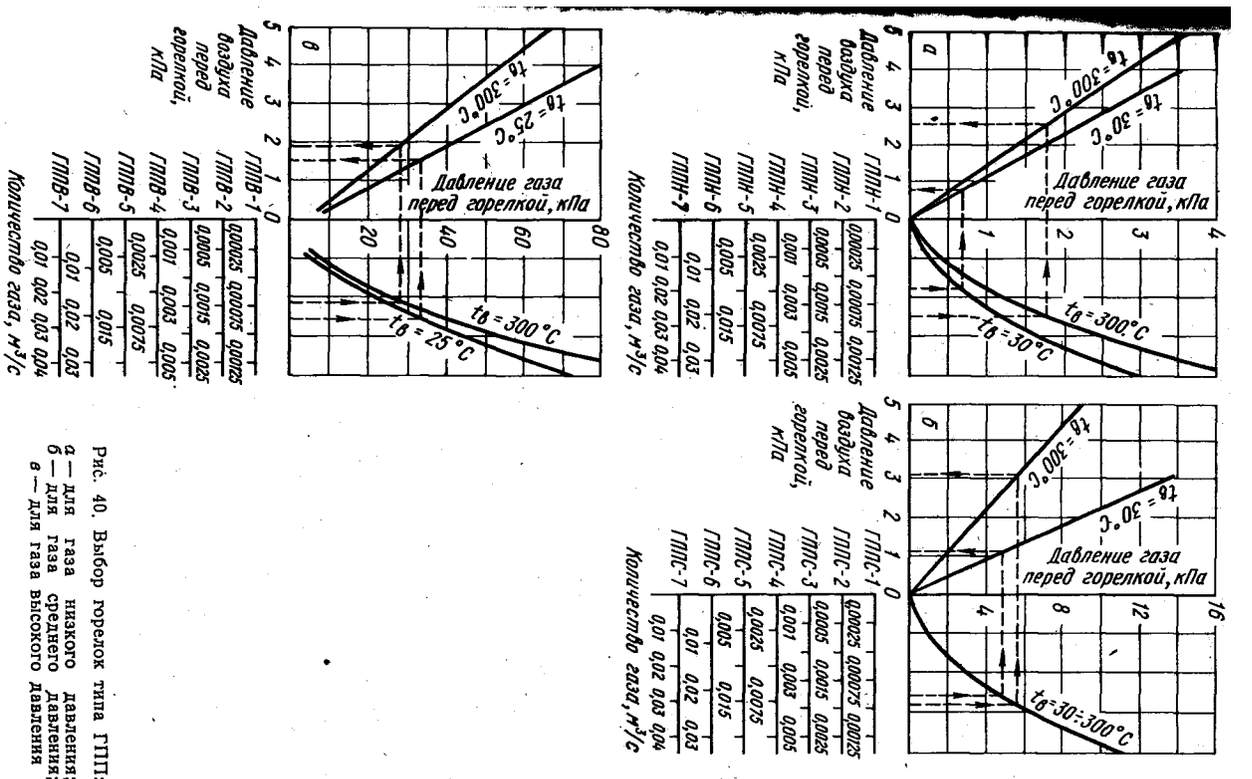


Рис. 40. Выбор горелок типа ГПП:
а — для газа низкого давления;
б — для газа среднего давления;
в — для газа высокого давления

Горелка типа ГПП предназначена преимущественно для установ в арочном своде или в боковых стенах печи, что определяет сист му крепления горелки и горелочного камня.

Плоскопламенные горелки типа ГПП предназначены для сжи гания холодного природного газа. Воздух может быть подогрет д 500° С.

Разработаны три серии горелок: серия Н — для газа низкого давления (номинальное давление газа 3 кПа), серия С — для газа среднего давления (номинальное давление газа 12 кПа) и серия В — для газа высокого давления (номинальное давление 70 кПа). Между собой горелки разных серий отличаются только конструк цией газового сопла. Каждая серия включает 7 типоразмеров го релок с номинальной пропускной способностью по газу от 0,001 до 0,044 м³/с. Номинальная пропускная способность по газу опре делена при номинальном давлении газа и давлении холодного (30° С) воздуха перед горелкой 3 кПа.

Пределы регулирования горелок с сохранением плоского пла мени 1 : 4 от номинальной пропускной способности по газу. Го релки могут работать с $\alpha = 0{,}8 \div 2{,}0$.

Плоскопламенные горелки для природного газа типа ГПП сопла для них показаны на рис. 39, а их конструктивные размер приведены в табл. 9.

Горелка состоит из литых деталей и крепится с помощью фла ца к горелочной плите.

Обозначение горелки состоит из букв, означающих тип горело и серию по давлению газа, и цифры, соответствующей номеру типо размера. Например, ГППС-5 означает: горелка плоскопламенная для природного газа среднего давления (номинальное давление га за 12 кПа), типоразмер 5 (номинальная пропускная способност по газу 0,022 м³/с).

Выбор горелки осуществляют по графикам (рис. 40) в зави симости от ее серии, заданной пропускной способности по газу температуры подогрева воздуха. Сначала по правой части график определяют необходимое давление газа перед горелкой, а затем п левой части — необходимое давление воздуха. Графики построен для холодного природного газа с $Q_н^р = 35{,}6$ МДж/м³, $\rho_г = 0{,}73$ кг/м $\alpha = 1{,}05$, противодавление 5—10 Па.

Пример. Подобрать горелку для сжигания 0,03 м³/с природно го газа низкого давления с $Q_н^р = 35{,}6$ МДж/м³. Температура подо грева воздуха 300° С.

По графику на рис. 40, *а* находим, что заданный расход ближе всего к номинальному для горелки ГППН-6. По правой части гра фика находим необходимое давление природного газа при подогре ве воздуха до 300° С 3,6 кПа, по левой — необходимое давлени подогретого воздуха перед горелкой 5 кПа.

4.7. Горелки с излучающей чашей типа ГВИЧ

В горелках с излучающей чашей типа ГВИЧ, разработанных ВНИИпромгазом и Стальпроектом, плоский факел создается бла годаря закручиванию газа и воздуха, проходящих в смеситель че рез тангенциальные отверстия. Горелочный туннель в этих горелках имеет полусферическую, чашеобразную форму. Сгорание газа про

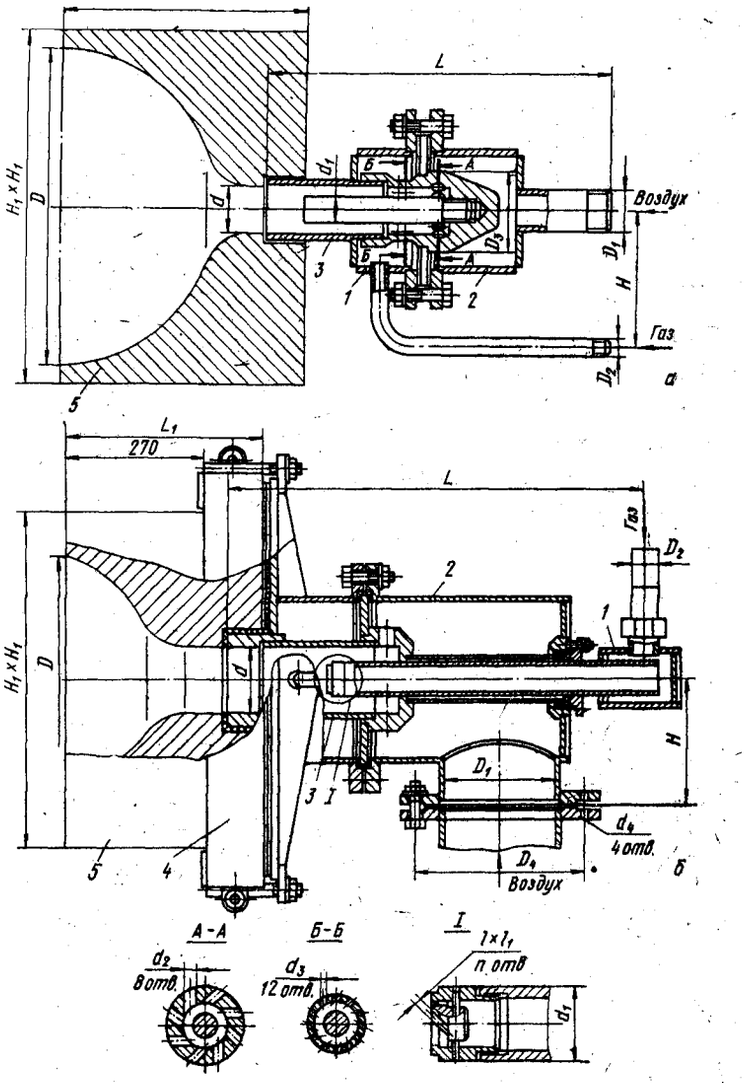


Рис. 41. Горелки с излучающей чашей типа ГВИЧ:
а — с периферийным подводом газа; *б* — с центральным подводом газа; *1* — корпус газовый; *2* — корпус воздушный; *3* — смеситель; *4* — фронтовая плита; *5* — горелочный камень

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* И ХАРАКТЕРИСТИКА

Обозначение горелки**	D	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_1	d_2	d_3	d_4	H	H_1
ГВИЧ-3	200	1 1/2″	1/2″	53	—	32	16	7,5	2,3	—	110	260
ГВИЧ-4А	300	70	27	76	130	48	28	12	—	14	120	400
ГВИЧ-4А-02	300	70	27	76	130	48	28	12	—	14	120	400
ГВИЧ-4А-04	300	70	27	76	130	48	28	12	—	14	120	400
ГВИЧ-5	400	3″	1″	100	—	64	32	15	4,6	—	180	460
ГВИЧ-6	400	150	34	140	225	86	48	22	—	18	180	500
ГВИЧ-6-01	400	150	34	140	225	86	48	22	—	18	180	500
ГВИЧ-6-02	400	150	34	140	225	86	48	22	—	18	180	500
ГВИЧ-6-03	400	150	34	140	225	86	48	22	—	18	180	500

* Кроме указанных особо.
** Горелки ГВИЧ-3 и ГВИЧ-5 см. рис. 41, *а*, остальные — рис. 41, *б*.

исходит внутри горелочного камня, являющегося источником интенсивного излучения. Горелки применяют для сводового, бокового и местного нагрева. Преимуществом горелок является то, что их можно располагать близко друг к другу, компонуя из них излучающие панели с чрезвычайно высокими тепловыми потоками. Кроме того, окружающие горелочный камень огнеупоры не подвергаются прямому воздействию факела.

Однако нагрев горелками с излучающей чашей менее равномерен, чем плоскопламенными горелками типа ГР или ГПП.

Горелки с излучающей чашей (рис. 41) предназначены для сжигания холодного природного газа с холодным воздухом. Разработаны 4 типоразмера горелок номинальной теплопроизводительностью от 80 до 440 кВт. Горелки типоразмера 4 выполнены в трех вариантах, а горелки типоразмера 6 — в четырех вариантах, различающихся номинальным давлением газа перед горелкой (табл. 10).

Горелки типоразмеров 3 и 5 выполнены с периферийным подводом газа, а типоразмеров 4 и 6 — с центральным подводом газа.

Глава 5

ГОРЕЛКИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СМЕШЕНИЕМ

Горелки с предварительным смешением обеспечивают образование внутри горелки полностью перемешанной газо-воздушной смеси, которая сгорает при выходе из горелки или внутри горелки в коротком и высокотемпературном факеле.

Таблица 10

ГОРЕЛОК С ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ЧАШЕЙ ТИПА ГВИЧ (РИС. 41)

L	L_1	l	l_1	Число отверстий n	Масса горелки, кг	Номинальная теплопроизводительность, кВт	Пропускная способность по газу, м³/с·10³	Давление перед горелкой (кПа) при номинальной теплопроизводительности: газа	Давление перед горелкой (кПа) при номинальной теплопроизводительности: воздуха	Диапазон рабочего регулирования по газу, м³/с·10³
261	230	—	—	—	22	80	2,2	5,58	7,21	0,4—2,2
334	340	3,0	3,7	4	120	116	3,3	3,6	2,0	1,9—3,3
334	340	2,0	3,1	4	120	116	3,3	12,4	2,2	2,0—3,3
334	340	2,0	2,4	3	120	116	3,3	28,6	2,2	1,9—3,3
466	320	—	—	—	90	320	8,9	4,1	6,2	1,8—8,9
592	350	6,0	5,0	8	248	440	13,0	3,2	3,75	2,8—13,0
592	350	4,7	4,0	8	248	440	13,0	6,6	3,5	2,8—13,0
592	350	4,6	3,0	6	248	440	13,0	21,0	3,4	3,1—13,0
592	350	3,2	2,5	6	248	440	13,0	66,0	3,1	2,6—13,0

Наиболее распространенными горелками с полным предварительным смешением являются инжекционные, в которых газ высокого давления подсасывает воздух, причем соотношение газ — воздух сохраняется при изменении давления газа, т. е. при изменении количества газа, проходящего через горелку. Основным достоинством инжекционных горелок является то, что они обеспечивают полное сгорание при коэффициенте расхода воздуха, близком к единице, и не требуют специальных устройств для подачи и регулирования количества воздуха, что существенно упрощает систему отопления печи.

При отоплении высокотемпературных печей газом с низкой теплотой сгорания только применение горелок с полным предварительным смешением обеспечивает сжигание газа в коротком факеле с коэффициентом расхода воздуха, близким к единице, что дает возможность получить вблизи горелки зону достаточно высоких температур. Например, при сжигании доменного газа и смеси коксового и доменного газов с низкой теплотой сгорания только в горелках полного предварительного смешения можно получить температуры горения, обеспечивающие нагрев металла под прокатку. В этих случаях применяют инжекционные горелки типа Н, работающие на холодном или подогретом газе с низкой теплотой сгорания, а иногда и горелки типа П, использующие подогретый воздух.

Для обеспечения равномерного нагрева в проходных и садочных печах часто бывает необходимо рассредоточить подачу тепла. В этом случае установка большого числа горелок не приводит к чрезмерному усложнению и громоздкости конструкции печи, так как для инжекционных горелок не нужна система разводки воздуха и регулирования соотношения газ — воздух. Здесь инжекционные горелки используют и при отоплении печей газами с высокой

теплотой сгорания. Для уменьшения габарита горелок в плане применяют инжекционные горелки с поворотом смесителя. При сжигании газов с высокой теплотой сгорания чаще всего используют инжекционные горелки типов В и ВП.

Однако инжекционные горелки имеют ряд существенных недостатков:

сравнительно низкие пределы регулирования вследствие опасности проникновения пламени внутрь горелки;

тяжелые условия работы горелочного туннеля и прилегающих к нему частей горелки из-за концентрированного высокотемпературного сгорания;

сравнительно большие габариты горелок из-за необходимости организовать хорошее смешение газа и воздуха внутри горелки.

Эти недостатки усугубляются с повышением теплопроизводительности горелки. Поэтому на крупных инжекционных горелках приходится прибегать к водяному охлаждению носиков, чтобы облегчить условия их работы и снизить опасность проникновения пламени в горелку.

При сжигании газов с высокой теплотой сгорания указанные недостатки приобретают решающее значение, так как в туннелях инжекционных горелок развиваются весьма высокие температуры, что приводит к повышению опасности проскока пламени в горелку и снижению стойкости туннеля и горелки. Кроме того, чем выше теплота сгорания газа, тем больше габариты горелки при той же теплопроизводительности.

Недостатками инжекционных горелок являются также: необходимость высокого давления газа; невозможность работы при высоком и переменном давлении в камере сгорания; трудность перехода с одного вида топлива на другое; сложность конструкции и изготовления горелок.

Поэтому инжекционные горелки в черной металлургии находят ограниченное применение.

В некоторых особых случаях нагрева используют разновидности инжекционных горелок, в какой-то мере избавленных от перечисленных выше недостатков.

Для обеспечения высокой равномерности нагрева применяют беспламенные панельные горелки типа ГВПш, в которых газо-воздушную смесь, подготовленную в инжекционном смесителе, сжигают в мелких керамических туннелях, объединенных в панели. Излучающие поверхности горелок этого типа имеют весьма равномерное распределение температур. Кроме того, раздача газо-воздушной смеси через малые сечения снижает опасность проникновения пламени в горелку и повышает пределы регулирования. Однако горелки сложны по конструкции, температура применения их ограничена; они требуют весьма высокого давления газа и значительной площади стен в камере сгорания.

Если в рабочем пространстве печи имеется разрежение (например, в колпаковых печах), то можно использовать инжекционно-атмосферные горелки. В этих горелках инжектируется газом только часть необходимого воздуха, а остальной поступает за счет разрежения в рабочем пространстве. Благодаря неполной инжекции инжекционно-атмосферные горелки имеют меньшие габариты и более высокие пределы регулирования по сравнению с инжекционными горелками. В черной металлургии чаще всего применяются инжекционно-атмосферные горелки типа ИА.

При высоком давлении в рабочем пространстве, например в камерах сгорания установок для приготовления атмосфер контролируемого состава, находят применение инжекционные горелки с инжектированием газа воздухом, так называемые двухпроводные инжекционные смесители. Инжекционная система смешения в этих горелках позволяет очень точно поддерживать соотношение газ — воздух, однако горелки требуют разводки воздуха и вентилятора высокого давления.

Особую группу горелок с предварительным смешением составляют горелки, в которых происходит полное сгорание газа и образуются струи продуктов сгорания с заданными характеристиками. В печах черной металлургии используют высокотемпературные высокоскоростные струи продуктов сгорания для скоростного нагрева и низкотемпературные продукты сгорания в низкотемпературных циркуляционных печах.

Высокотемпературные высокоскоростные струи продуктов сгорания получают, приготавливая в горелке полностью перемешанную газо-воздушную смесь ($\alpha \approx 1{,}0$) и сжигая ее в керамическом или охлаждаемом металлическом туннеле. Для получения высокотемпературных струй продуктов сгорания применяют скоростные горелки типа ГВ и горелку полного предварительного смешения для безокислительного нагрева.

Низкотемпературные продукты сгорания получают путем сжигания в горелке газа с повышенным коэффициентом расхода воздуха.

Для получения низкотемпературных продуктов сгорания применяют струйно-стабилизаторные горелки типа СГ и горелки с переменным избытком воздуха типа ПИВ.

Во всех горелках, предназначенных для получения высоко- и низкотемпературных продуктов сгорания, используют неинжекционный принцип смешения: газ и воздух подают принудительно, а для хорошего смешения используют те же методы, что и в горелках с улучшенным смешением.

Расчет горелок с предварительным смешением хорошо разработан только для инжекционных горелок. Горелки, использующие неинжекционный принцип смешения, так же как горелки с улучшенным смешением, как правило, не рассчитывают, а отрабатывают экспериментально.

5.1. Расчет инжекционных горелок

При расчете горелок обычно известна характеристика сжигаемого газа [$Q_н^р$, $p_г$, ($P_г$), $T_г$, $\rho_{0г}$], характеристика воздуха, поступающего на горение ($P_в$, $T_в$, $\rho_{0в}$) и α, $V_{0г}$, противодавление, равное сумме давления в печи $p_{печ}$ и сопротивления на пути подсасываемого воздуха $\Delta p_в$.

Расчет инжекционных горелок (рис. 42) основан на уравнении количества движения и основных уравнениях истечения газа, в соответствии с которыми различают методы расчета для газа низкого давления, когда его можно считать несжимаемым (<20 кПа), докритического давления (<90 кПа) и сверхкритического давления (>90 кПа). Давление инжектируемого воздуха $P_в$ считают равным атмосферному P_0.

Порядок расчета инжекционных горелок следующий. Скорость истечения газа из сопла (м/с) определяют при давлении газа <20 кПа:

$$w_{0г} = \varphi \sqrt{\frac{2T_0 P_г}{\rho_{0г} T_г P_0} p_г}; \qquad (13)$$

при докритическом давлении газа

$$w_{0г} = 2{,}944 \varphi P_г \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{0г} T_г P_0}\left[\left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{1{,}54} - \left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{1{,}77}\right]}; \qquad (14)$$

при сверхкритическом давлении газа

$$w_{0г} = 0{,}667 \varphi P_г \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{0г} T_г P_0}}. \qquad (15)$$

Здесь φ — коэффициент истечения из сопла; для сходящихся сопел можно принимать $\varphi = 0{,}85$.

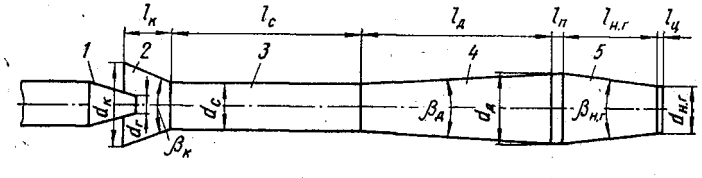


Рис. 42. Расчетная схема инжекционной горелки:
1 — газовое сопло; *2* — входной конфузор; *3* — смеситель; *4* — диффузор; *5* — носик горелки

По формулам (13) и (14) построены графики (рис. 43), по которым можно определить скорость истечения газа из сопла в зависимости от $p_г(P_г)$, $\rho_{0г}$ и $T_г$. Сначала по графику (рис. 43, *а*) определяют скорость истечения газа при $\rho_{0г} = 1{,}29$ кг/м³ и $t_г = 0°$ С, а затем полученную величину умножают на поправки на плотность и температуру газа, определяемые по графикам (рис. 43, *б* и *в*); φ принят равным 0,85.

Диаметр газового сопла (мм) определяют по формуле

$$d_г = \sqrt{\frac{V_{0г} \cdot 10^6}{0{,}785 w_{0г}}}. \qquad (16)$$

Оптимальное отношение площадей смесителя $f_с$ и газового сопла $f_г$ можно найти из соотношения

$$F_1 = f_с / f_г = A\,[Bmn - C(m-1)(n-1)], \qquad (17)$$

где

$$A = \frac{0{,}277}{\sqrt{\left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{1{,}54} - \left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{1{,}77}}}. \qquad (18)$$

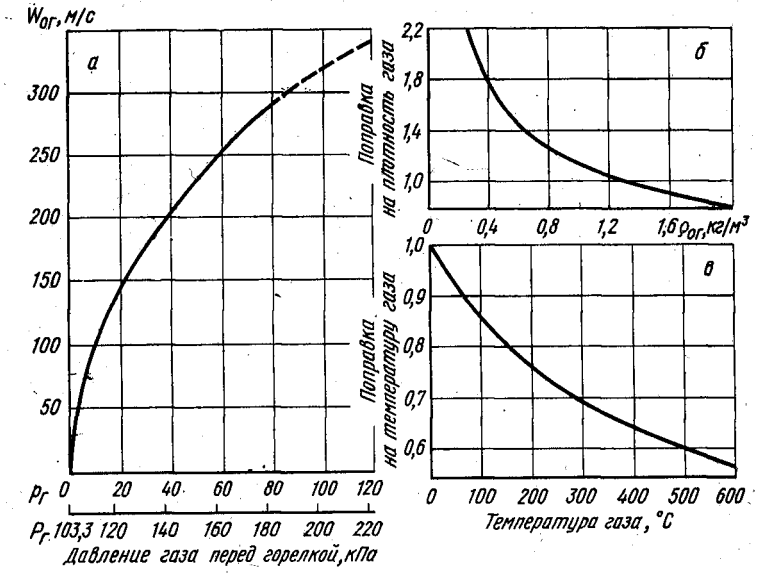


Рис. 43. Скорость истечения газа из сопла:
а — при $\rho_{0г} = 1{,}29$ кг/м³, $t_г = 0$ °С; *б* — поправка на плотность газа; *в* — поправка на температуру газа

Значение A можно найти по графику (рис. 44) в зависимости от давления газа $p_г$ ($P_г$) или по табл. 11 в зависимости от значения отношения $P_0/P_г$. Для докритического давления газа $A = 1$.

Объемную кратность инжекции m (отношение объема смеси к объему газа после истечения) определяют по формуле

$$m = 1 + \alpha L_0 \frac{T_в}{T_г}\left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{-0{,}23} = 1 + \alpha L_0 \frac{T_в}{T_г} П. \qquad (19)$$

Значение $П$ можно найти по графику (см. рис. 44) в зависимости от давления газа $p_г$ ($P_г$) или по табл. 11 в зависимости от значения отношения $P_0/P_г$. При давлении газа <20 кПа можно принимать $П = 1$.

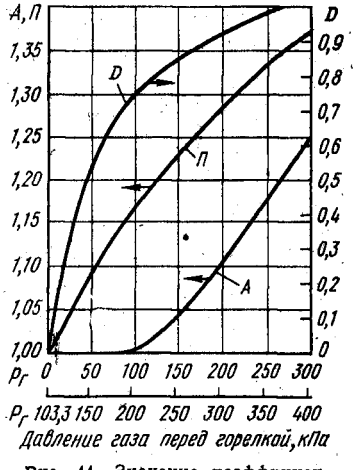


Рис. 44. Значение коэффициентов A, $П$ и D

Массовая кратность инжекции n (отношение массы смеси к массе газа) равна

$$n = 1 + \alpha L_0 \frac{\rho_{0в}}{\rho_{0г}}. \qquad (20)$$

Таблица 11

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ *A*, *П* и *D*

$P_в/P_г$	Горючие газы, перегретый пар			Воздух		Сухой насыщенный пар	
	A	*П*	*D*	*A*	*П*	*A*	*П*
0,01	9,6747	2,896	1,5896	8,1161	3,737	13,990	1,699
0,02	5,9574	2,467	1,5149	5,1600	3,057	8,0733	1,568
0,03	4,5148	2,246	1,4634	3,9817	2,723	5,8935	1,497
0,04	3,7224	2,102	1,4225	3,3272	2,509	4,7282	1,448
0,05	3,2131	1,997	1,3880	2,8995	2,353	4,0008	1,411
0,06	2,8558	1,915	1,3578	2,5976	2,234	3,5950	1,382
0,07	2,5874	1,847	1,3306	2,3699	2,138	3,1238	1,358
0,08	2,3793	1,791	1,3059	2,1931	2,058	2,8387	1,337
0,09	2,2122	1,743	1,2829	2,0485	1,990	2,6092	1,319
0,10	2,0749	1,702	1,2615	1,9311	1,931	2,4242	1,303
0,11	1,9595	1,664	1,2413	1,8311	1,879	2,2706	1,289
0,12	1,8618	1,631	1,2220	1,7455	1,833	2,1392	1,276
0,13	1,7762	1,602	1,2041	1,6716	1,791	2,0271	1,265
0,14	1,7023	1,575	1,1866	1,6076	1,753	1,9310	1,254
0,15	1,6376	1,549	1,1699	1,5513	1,719	1,8457	1,244
0,16	1,5800	1,527	1,1538	1,5006	1,688	1,7699	1,235
0,17	1,5278	1,506	1,1387	1,4557	1,659	1,7022	1,224
0,18	1,4829	1,486	1,1231	1,4157	1,632	1,6438	1,218
0,19	1,4411	1,467	1,1085	1,3792	1,607	1,5893	1,211
0,20	1,4034	1,449	1,0943	1,3458	1,584	1,5403	1,203
0,21	1,3693	1,434	1,0804	1,3156	1,561	1,4969	1,197
0,22	1,3372	1,418	1,0699	1,2879	1,541	1,4564	1,190
0,23	1,3090	1,403	1,0536	1,2623	1,522	1,4191	1,184
0,24	1,2829	1,390	1,0405	1,2393	1,504	1,3846	1,178
0,25	1,2576	1,377	1,0283	1,2184	1,486	1,3544	1,173
0,26	1,2359	1,364	1,0155	1,1989	1,470	1,3243	1,167
0,27	1,2150	1,353	1,0033	1,1805	1,453	1,2983	1,163
0,28	1,1958	1,341	0,9913	1,1640	1,439	1,2738	1,158
0,29	1,1783	1,331	0,9793	1,1480	1,425	1,2517	1,152
0,30	1,1614	1,320	0,9678	1,1335	1,410	1,2305	1,148
0,31	1,1468	1,311	0,9560	1,1206	1,398	1,2101	1,144
0,32	1,1325	1,301	0,9446	1,1078	1,385	1,1969	1,140
0,33	1,1197	1,292	0,9332	1,0963	1,373	1,1741	1,136
0,34	1,1070	1,283	0,9222	1,0856	1,361	1,1589	1,133
0,35	1,0956	1,275	0,9114	1,0759	1,350	1,1443	1,129
0,36	1,0854	1,266	0,9004	1,0666	1,339	1,1308	1,125
0,37	1,0751	1,258	0,8898	1,0583	1,329	1,1175	1,121
0,38	1,0662	1,251	0,8789	1,0508	1,318	1,1065	1,118
0,39	1,0578	1,243	0,8686	1,0444	1,309	1,0946	1,114
0,40	1,0508	1,235	0,8576	1,0374	1,299	1,0840	1,111
0,41	1,0430	1,229	0,8475	1,0321	1,290	1,0748	1,108
0,42	1,0368	1,221	0,8369	1,0256	1,282	1,0659	1,105

Продолжение табл. 11

$P_0/P_г$	Горючие газы, перегретый пар			Воздух		Сухой насыщенный пар	
	A	*П*	*D*	*A*	*П*	*A*	*П*
0,43	1,0313	1,215	0,8265	1,0216	1,273	1,0581	1,102
0,44	1,0256	1,209	0,8163	1,0172	1,265	1,0497	1,099
0,45	1,0207	1,202	0,8063	1,0136	1,256	1,0425	1,096
0,46	1,0172	1,196	0,7956	1,0104	1,248	1,0361	1,093
0,47	1,0133	1,190	0,7854	1,0075	1,241	1,0307	1,091
0,48	1,0096	1,185	0,7756	1,0052	1,234	1,0244	1,088
0,49	1,0071	1,179	0,7654	1,0030	1,226	1,0207	1,86
0,50	1,0043	1,174	0,7556	1,0020	1,219	1,0167	1,083
0,51	1,0028	1,168	0,7454	1,0008	1,212	1,0133	1,080
0,52	1,0017	1,163	0,7352	1,0003	1,205	1,0087	1,078
0,53	1,0009	1,158	0,7251	1,0000	1,199	1,0075	1,075
0,54	1,0004	1,152	0,7153	1,0000	1,192	1,0045	1,073
0,55	1,0000	1,148	0,7048	1,0000	1,187	1,0029	1,071
0,56	1,0000	1,143	0,6945	1,0000	1,180	1,0014	1,069
0,57	1,0000	1,138	0,6839	1,0000	1,174	1,0007	1,067
0,58	1,0000	1,134	0,6738	1,0000	1,169	1,0000	1,065
0,59	1,0000	1,130	0,6625	1,0000	1,163	1,0000	1,063
0,60	1,0000	1,125	0,6506	1,0000	1,157	1,0000	1,060
0,61	1,0000	1,121	0,6394	1,0000	1,151	1,0000	1,058
0,62	1,0000	1,116	0,6264	1,0000	1,146	1,0000	1,057
0,63	1,0000	1,113	0,6140	1,0000	1,141	1,0000	1,055
0,64	1,0000	1,109	0,6013	1,0000	1,136	1,0000	1,053
0,65	1,0000	1,105	0,5893	1,0000	1,131	1,0000	1,051
0,66	1,0000	1,100	0,5767	1,0000	1,126	1,0000	1,049
0,67	1,0000	1,097	0,5617	1,0000	1,121	1,0000	1,047
0,68	1,0000	1,093	0,5495	1,0000	1,116	1,0000	1,045
0,69	1,0000	1,090	0,5348	1,0000	1,112	1,0000	1,044
0,70	1,0000	1,086	0,5218	1,0000	1,107	1,0000	1,042
0,71	1,0000	1,082	0,5055	1,0000	1,103	1,0000	1,041
0,72	1,0000	1,079	0,4913	1,0000	1,099	1,0000	1,039
0,73	1,0000	1,075	0,4776	1,0000	1,094	1,0000	1,037
0,74	1,0000	1,072	0,4620	1,0000	1,090	1,0000	1,035
0,75	1,0000	1,069	0,4460	1,0000	1,086	1,0000	1,034
0,76	1,0000	1,065	0,4302	1,0000	1,081	1,0000	1,032
0,77	1,0000	1,063	0,4154	1,0000	1,078	1,0000	1,031
0,78	1,0000	1,059	0,3987	1,0000	1,073	1,0000	1,029
0,79	1,0000	1,056	0,3824	1,0000	1,070	1,0000	1,028
0,80	1,0000	1,053	0,3672	1,0000	1,066	1,0000	1,026
0,81	1,0000	1,049	0,3493	1,0000	1,062	1,0000	1,025
0,82	1,0000	1,047	0,3333	1,0000	1,058	1,0000	1,024
0,83	1,0000	1,044	0,3162	1,0000	1,055	1,0000	1,022
0,84	1,0000	1,041	0,2994	1,0000	1,051	1,0000	1,020
0,85	1,0000	1,038	0,2814	1,0000	1,047	1,0000	1,018

Продолжение табл. 11

$P_0/P_г$	Горючие газы, перегретый пар			Воздух		Сухой насыщенный пар	
	А	*П*	*D*	*А*	*П*	*А*	*П*
0,86	1,0000	1,035	0,2639	1,0000	1,044	1,0000	0,017
0,87	1,0000	1,033	0,2468	1,0000	1,041	1,0000	0,016
0,88	1,0000	1,030	0,2286	1,0000	1,037	1,0000	0,015
0,89	1,0000	1,028	0,2108	1,0000	1,034	1,0000	0,013
0,90	1,0000	1,025	0,1926	1,0000	1,031	1,0000	1,012
0,91	1,0000	1,022	0,1749	1,0000	1,028	1,0000	1,011
0,92	1,0000	1,019	0,1553	1,0000	1,024	1,0000	1,010
0,93	1,0000	1,017	0,1369	1,0000	1,020	1,0000	1,008
0,94	1,0000	1,014	0,1173	1,0000	1,018	1,0000	1,007
0,95	1,0000	1,012	0,0975	1,0000	1,015	1,0000	1,006
0,96	1,0000	1,009	0,0790	1,0000	1,012	1,0000	1,005
0,97	1,0000	1,007	0,0584	1,0000	1,009	1,0000	1,004
0,98	1,0000	1,005	0,0392	1,0000	1,006	1,0000	1,002
0,99	1,0000	1,002	0,0198	1,0000	1,003	1,0000	1,001
1,00	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Коэффициент B характеризует сопротивление на пути движения газо-воздушной смеси в горелке, а коэффициент C — на пути движения воздуха:

$$B = 1 + \Sigma\xi_с; \quad C = 1 - \Sigma\xi_в, \tag{21}$$

где $\Sigma\xi_с$ — сумма коэффициентов сопротивления на пути движения газо-воздушной смеси в горелке, а $\Sigma\xi_в$ — то же, на пути движения воздуха.

Коэффициенты B и C зависят от конструктивного исполнения и качества изготовления горелки. Для инжекционных горелок с оптимальной конфигурацией можно принимать $B=1{,}15$; $C=0{,}425$.

По уравнению (17) построен график (рис. 45), по которому можно найти значение оптимального отношения площадей смесителя и газового сопла F_1 при известных значениях объемной m и массовой n кратности инжекции. При построении графика принято: $A=1$; $B=1{,}15$; $C=0{,}425$.

Диаметр смесителя (мм) определяют по формуле

$$d_с = d_г\sqrt{F_1}\,. \tag{22}$$

Оптимальное отношение площадей носика горелки $f_{н.г}$ и смесителя $f_с$ можно найти по уравнению

$$F_2 = \frac{f_{н.г}}{f_с} = \sqrt{\frac{mn\,(1+\xi_{н.г})\,\Delta p_с}{F_1\,(\Delta p_с - \Delta p_в - p_{печ})}}, \tag{23}$$

где $\xi_{н.г}$ — коэффициент сопротивления носика горелки; для горелки с носиком оптимальной конфигурации $\xi_{н.г}=0{,}2$; $\Delta p_с$ — повышение давления в горелке, Па:

$$\Delta p_с = \varphi^2\,\frac{D}{2}\cdot\frac{P_г}{F_1}\,; \tag{24}$$

при докритическом давлении газа

$$D = 8{,}67\left[\left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{0{,}77} - \left(\frac{P_0}{P_г}\right)\right]; \tag{25}$$

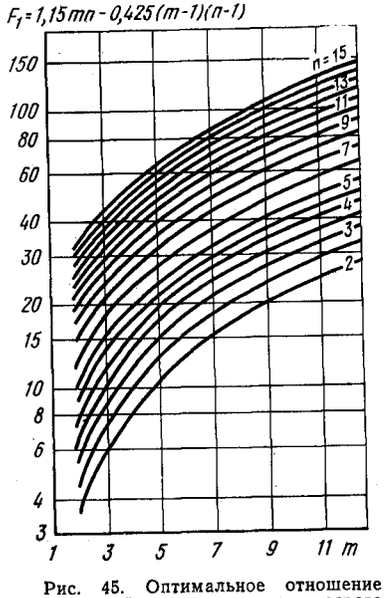


Рис. 45. Оптимальное отношение площадей смесителя и газового сопла

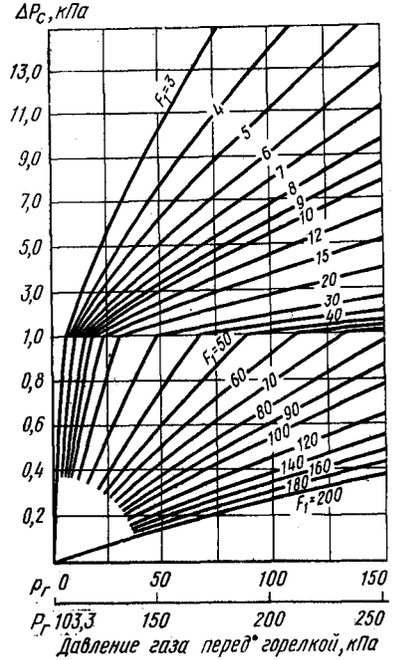


Рис. 46. График для определения повышения давления в горелке

при сверхкритическом давлении газа

$$D = 1{,}98\sqrt{1 - \left(\frac{P_0}{P_г}\right)^{0{,}23}}\,. \tag{26}$$

Значение D можно найти по графику (см. рис. 44) в зависимости от давления газа $p_г$ ($P_г$) или по табл. 11 в зависимости от отношения $P_0/P_г$.

При давлении газа <20 кПа можно принимать

$$\Delta p_с = \varphi^2\,\frac{P_г}{F_1}\,. \tag{27}$$

Значение Δp_c можно найти по графику (рис. 46) в зависимости от $p_г$ ($P_г$) и отношения площадей смесителя и газового сопла F_1; φ принят равным 0,85.

При отсутствии противодавления ($\Delta p_в + p_{печ} = 0$) формула (23) упрощается:

$$F_2 = \sqrt{\frac{mn\,(1+\xi_{н.г})}{F_1}}. \qquad (28)$$

Диаметр носика горелки (мм) определяют по формуле

$$d_{н.г} = d_c\sqrt{F_2}. \qquad (29)$$

Остальные конструктивные размеры инжекционных горелок, близкие к оптимальным, определяются из экспериментально найденных соотношений:

длина смесителя и диффузора, мм

$$l_c = l_д = (4 \div 6)\,d_c; \qquad (30)$$

угол сужения входного конфузора $\beta_к = 30 \div 45°$;

длина входного конфузора, а также расстояние от среза газового сопла до начала смесителя, мм

$$l_н = (0{,}5 \div 1{,}5)\,d_c; \qquad (31)$$

угол раскрытия диффузора $\beta_д = 6 \div 9°$;

угол сужения носика горелки $\beta_{н.г} = 12 \div 15°$.

После определения геометрических размеров горелки находят скорость смеси (м/с) в носике горелки:

$$w_{н.г} = \frac{V_{0г}\,(1+\alpha L_0)\,T_{см}\cdot 10^6}{0{,}785 d_{н.г}^2\,T_0}. \qquad (32)$$

Температуру смеси (К) можно найти по формуле

$$T_{см} = \frac{T_г + T_в\,(m-1)}{m}. \qquad (33)$$

При использовании холодных газа и воздуха следует иметь в виду, что за счет излучения из камеры сгорания и разогрева корпуса горелки смесь может нагреваться в горелке до 100° С.

Затем определяют пределы регулирования горелки:

$$\vartheta = w_{н.г}/w_{пр}, \qquad (34)$$

где $w_{пр}$ — скорость проскока; определяется в зависимости от вида применяемого газа, диаметра носика горелки $d_{н.г}$ и температуры смеси $t_{см}$. По графику (рис. 47, *а*) определяют скорость проскока для холодной смеси, а затем полученную величину умножают на поправку на температуру смеси, которую находят по кривой на рис. 47, *б*.

Для горелки с известными размерами можно определить величину α при заданных условиях:

$$\alpha = \frac{-M + \sqrt{M^2 + 4\,\frac{\rho_{0г}}{\rho_{0в}}\cdot\frac{T_г}{T_в}\,П\left(1-\frac{C}{B'}\right)\left(\frac{\theta}{B'}-1\right)}}{2ПL_0\,(1-C/B')}. \qquad (35)$$

Здесь

$$M = \frac{\rho_{0г}}{\rho_{0в}}\,П + \frac{T_г}{T_в}; \qquad (36)$$

$$B' = B + \frac{1+\xi_{н.г}}{F_2^2}; \qquad (37)$$

$$\theta = \frac{2F_1}{A}\left(1 - F_1\,\frac{\Delta p_в + p_{печ}}{\varphi^2 DP_г}\right). \qquad (38)$$

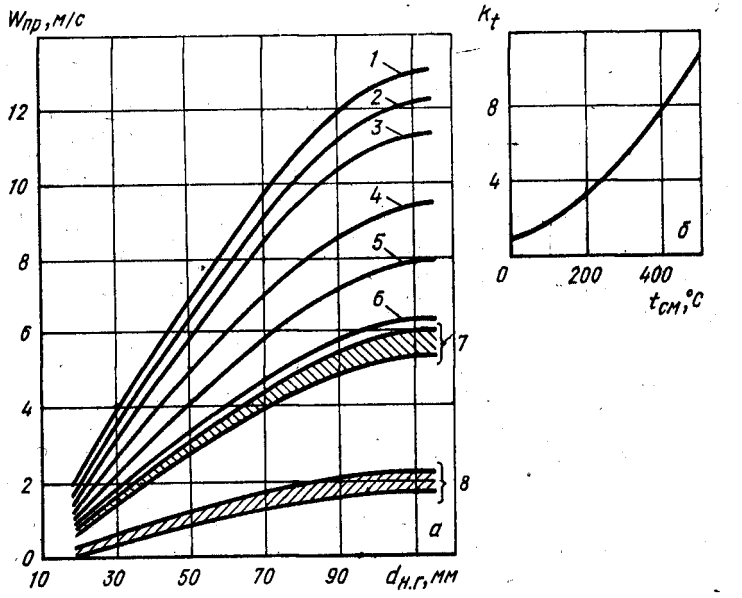


Рис. 47. Скорость проскока для холодной смеси (*а*):
1 — коксовый газ, $Q_н^р$=17,10 МДж/м³; *2* — смесь коксового и доменного газов, $Q_н^р$=8,40 МДж/м³; *3* — то же, $Q_н^р$=7,55 МДж/м³; *4* — то же, $Q_н^р$=6,65 МДж/м³; *5* — то же, $Q_н^р$=5,85 МДж/м³; *6* — то же, $Q_н^р$=5,05 МДж/м³; *7* — природные и попутные газы; *8* — доменные газы; *б* — поправка на температуру смеси

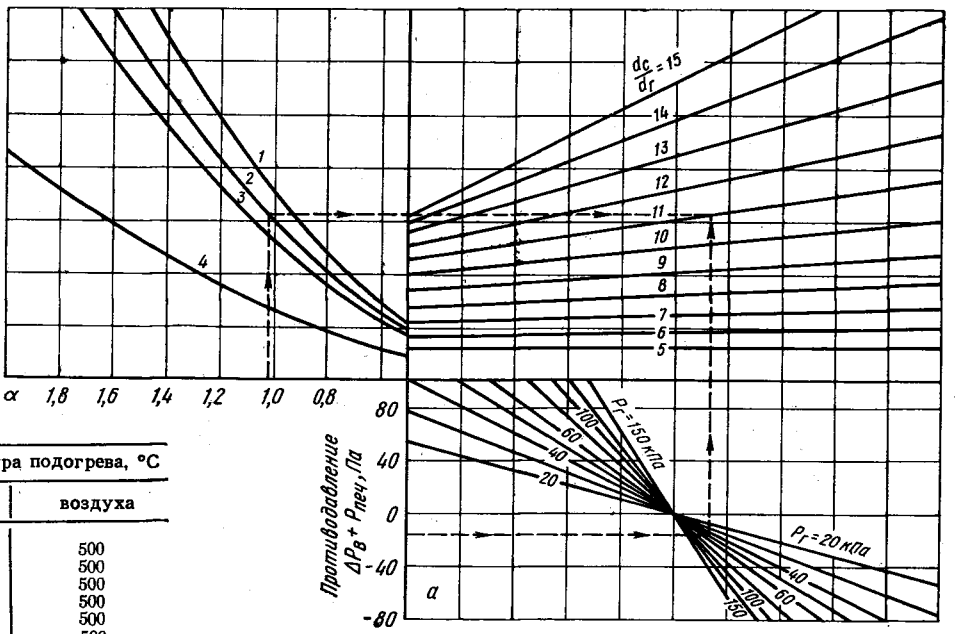
При давлении газа <20 кПа можно принять

$$\theta = 2F_1 - F_1^2\,\frac{\Delta p_в + p_{печ}}{\varphi^2 p_г}. \qquad (39)$$

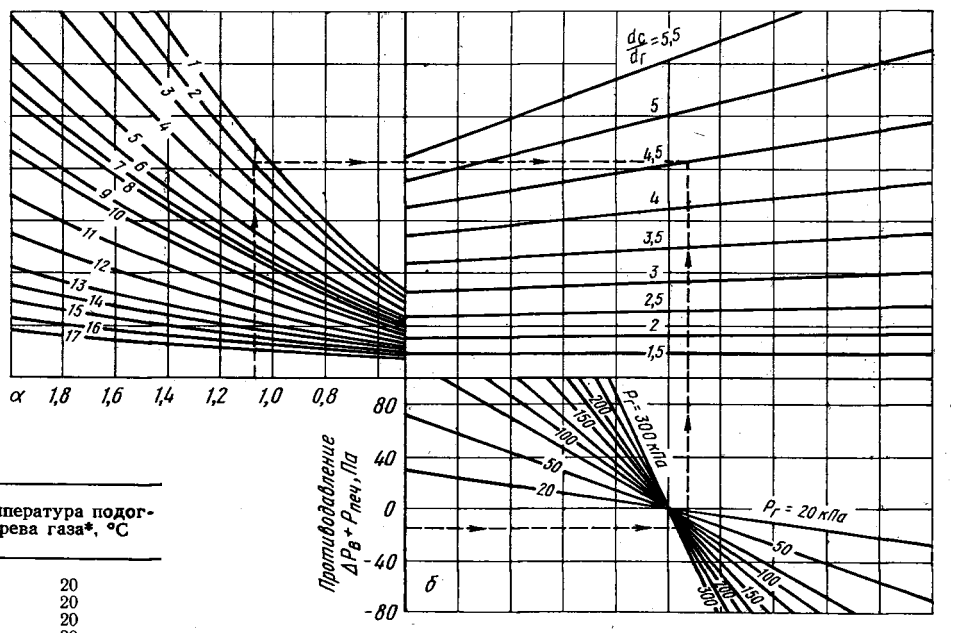
При отсутствии противодавления ($\Delta p_в + p_{печ} = 0$)

$$\theta = 2F_1. \qquad (40)$$

Для инжекционных горелок с оптимальными размерами значение коэффициента расхода воздуха можно определить по графикам (рис. 48) в зависимости от характеристики применяемого газа и



Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	Температура подогрева, °С	
		газа	воздуха
1	8,40	20	500
2	7,95	20	500
3	7,55	20	500
4	7,10	20	500
5	6,65	20	500
6	6,25	20	500
8	5,85	20	500
10	6,65	200	500
11	5,85	200	500
15	3,75	300	600



Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	Температура подогрева газа*, °С
5	9,20	20
7	8,40	20
9	7,55	20
11	6,65	20
12	5,85	20
13	5,05	20
14	5,85	300
15	5,05	300
16	3,75	20
17	3,75	300

Рис. 48. Характеристика инжекционных горелок с оптимальными размерами:

а — для газов с высокой теплотой сгорания ($Q_н^р$, МДж/м³); *1* — природный газ (34,95); *2* — смесь природного и коксового газов (30, 20); *3* — то же (26,85); *4* — коксовый газ (17, 10); *б* — для газов с низкой теплотой сгорания:

воздуха, величины противодавления $\Delta p_в + p_{печ}$ и отношения диаметров смесителя и газового сопла $d_с/d_г$. При построении графика принято $П=1$, что справедливо для низкого давления газа. Однако и при высоком давлении газа расчет по графикам на рис. 48 дает достаточную точность.

Пример. Рассчитать инжекционную горелку для сжигания $V_{0г}=0{,}005$ м³/с природного газа с $Q^р_н=34{,}95$ МДж/м³; $p_г=50$ кПа ($P_г=153{,}3$ кПа). Газ и воздух холодные (20° С), $\alpha=1{,}05$; давление в печи $p_{печ}=30$ Па.

По рис. I-21, приложения I находим $\rho_{0г}=0{,}77$ кг/м³, $L_0=9{,}25$ м³/м³ газа.

По графику на рис. 43, *а* находим скорость истечения газа при его давлении 50 кПа 226 м/с; при $t_г=20°$ С поправка на температуру равна 0,965 (см. рис. 43, *б*), поправка на плотность (см. рис. 43, *в*) при $\rho_{0г}=0{,}77$ кг/м³ равна 1,29:

$$w_{0г} = 226 \cdot 0{,}965 \cdot 1{,}29 = 282 \text{ м/с}.$$

Диаметр газового сопла по формуле (16)

$$d_г = \sqrt{\frac{0{,}005 \cdot 10^6}{0{,}785 \cdot 282}} = 4{,}8 \text{ мм}.$$

Объемная кратность инжекции по формуле (19)

$$m = 1 + 1{,}05 \cdot 9{,}25 \frac{293}{293} 1{,}093 = 11{,}6,$$

где значение $П=1{,}093$ взято по графику (см. рис. 44) при $p_г=50$ кПа.

Массовая кратность инжекции по формуле (20)

$$n = 1 + 1{,}05 \cdot 9{,}25 \cdot 1{,}29 : 0{,}77 = 17{,}3.$$

Оптимальное отношение площадей смесителя и газового сопла по формуле (17) при $A=1$

$$F_1 = 1{,}15 \cdot 11{,}6 \cdot 17{,}3 - 0{,}425 \cdot 10{,}6 \cdot 16{,}3 = 157.$$

Значение F_1 можно найти также по графику (см. рис. 45).

Диаметр смесителя по формуле (22)

$$d_с = 4{,}8 \sqrt{157} = 60 \text{ мм}.$$

Повышение давления в горелке по формуле (24)

$$\Delta p_с = 0{,}85^2 \frac{0{,}55}{2} \cdot \frac{153\,300}{157} = 197 \text{ Па},$$

где значение $D=0{,}55$ взято по графику (см. рис. 44) при $p_г=50$ кПа.

Значение $\Delta p_с$ можно найти также по графику (см. рис. 46).

Оптимальное отношение площадей носика горелки и смесителя по формуле (23)

$$F_2 = \sqrt{\frac{11{,}6 \cdot 17{,}3\,(1+0{,}2)}{157} \cdot \frac{197}{197-30}} = 1{,}345.$$

По формуле (29)

$$d_{н.г} = 60 \sqrt{1{,}345} = 70 \text{ мм}.$$

По формуле (30)

$$l_с = l_д = 4 d_с = 4 \cdot 60 = 240 \text{ мм}.$$

По формуле (31)

$$l_к = 1{,}25 d_с = 1{,}25 \cdot 60 = 75 \text{ мм}.$$

На этом же расстоянии размещаем срез газового сопла. Угол сужения входного конфузора принимаем $\beta_к=42°$. Начальный диаметр входного конфузора

$$d_к = dc + 2 l_к \operatorname{tg} \frac{\beta_к}{2} = 60 + 2 \cdot 75 \operatorname{tg} \frac{42}{2} = 118 \text{ мм}.$$

Принимаем $\beta_д=7°$.
Конечный диаметр диффузора

$$d_д = d_с + 2 l_д \operatorname{tg} \frac{\beta_д}{2} = 60 + 2 \cdot 240 \operatorname{tg} \frac{7}{2} = 90 \text{ мм}.$$

Принимаем $\beta_{н.г}=14°$.
Тогда

$$l_{н.г} = \frac{d_д - d_{н.г}}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta_{н.г}}{2}} = \frac{90 - 75}{2 \operatorname{tg} \frac{14}{2}} = 60 \text{ мм}.$$

Скорость смеси в носике горелки (принимаем подогрев смеси до $t_{см}=100°$ С) по формуле (32)

$$w_{н.г} = \frac{0{,}005\,(1 + 1{,}05 \cdot 9{,}25)\,373 \cdot 10^6}{0{,}785 \cdot 70^2 \cdot 273} = 19 \text{ м/с}.$$

Пределы регулирования горелки по формуле (34)

$$\nu = 19 : 4{,}2 : 2{,}0 = 2{,}3,$$

где скорость проскока холодной смеси взята по графику для природного газа при $d_{н.г}=70$ мм (см. рис. 47, *а*), а поправка на температуру — по графику при температуре смеси 100° С (см. рис. 47, *б*).

5.2. Выбор и перерасчет нормализованных горелок

Все нормализованные горелки имеют оптимальные размеры и рассчитаны для работы на оптимальном режиме.

В табл. 12 приведены внутренние размеры нормализованных инжекционных горелок типов Н, П и В, которые были рассчитаны по приведенной выше методике. Линейные размеры выражены через диаметр смесителя $d_с$.

Для выбора нормализованных горелок и диаметров сопел к ним построены графики пропускной способности горелок по газу и составлены таблицы диаметров газовых сопел (см. следующие раз-

Таблица 12

ВНУТРЕННИЕ РАЗМЕРЫ* НОРМАЛИЗОВАННЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК КОНСТРУКЦИИ СТАЛЬПРОЕКТА

Тип горелки	$d_к$	$d_д$	$d_{н.г}$	$l_к$	$l_с$	$l_д$	$l_п$	$l_{н.г}$	$l_ц$	Угол, град		
										$\beta_к$	$\beta_д$	$\beta_{н.г}$
Н	1,77	1,24	1	1	4	2	0,4	1	0,08—0,2	42	7	14
П	1,77	1,49	1	1	4	4	—	2	0,02—0,1	42	7	14
В	1,96	1,55	1,25	1,25	4,15	4,45	0,5	1	0,1—0,25	42	7	14

* Все линейные размеры выражены в долях диаметра смесителя $d_с$.

делы). Однако по этим графикам и таблицам можно выбрать горелку и диаметр газового сопла к ней только при тех параметрах газа и воздуха, коэффициентах расхода воздуха и противодавлениях, которые указаны на соответствующих графиках и таблицах.

Если условия работы инжекционной горелки отличаются от принятых для нормализованных горелок, то необходимо выполнить расчет по указанной выше методике расчета инжекционных горелок. При этом следует иметь в виду, что у нормализованных горелок можно менять только диаметр газового сопла $d_с$, а соотношение размеров смесителя и носика горелки, характеризуемое величиной F_2, уже выбрано. Поэтому отношение $f_с/f_г$ здесь следует определять по формуле

$$F_1=\frac{f_с}{f_г}=\frac{A\,[B'\,mn-C\,(m-1)(n-1)]}{1+\sqrt{1-2A\,\dfrac{\Delta p_в+p_{печ}}{\varphi^2 DP_г}\,[B'\,mn-C\,(m-1)\,(n-1)]}} \tag{41}$$

где B' определяют по формуле (34).

При давлении газа <20 кПа можно принимать

$$F_1=\frac{B'\,mn-C\,(m-1)\,(n-1)}{1+\sqrt{1-\dfrac{\Delta p_в+p_{печ}}{\varphi^2 p_г}\,[B'\,mn-C\,(m-1)(n-1)]}}\,. \tag{42}$$

При отсутствии противодавления ($\Delta p_в+p_{печ}=0$) формула упрощается:

$$F_1=\frac{B'\,mn-C\,(m-1)(n-1)}{2}\,. \tag{43}$$

Как видно из табл. 12, нормализованные горелки для газов с низкой теплотой сгорания (типа Н и П) имеют $d_{н.г}=d_с$, откуда $F_2=1{,}0$ и $B'=2{,}35$, а в нормализованных горелках для газов высокой теплоты сгорания (тип $В$) $d_{н.г}=1{,}25d_с$, откуда $F_2=1{,}56$ и $B'=1{,}65$.

Определив диаметр смесителя горелки по формуле (22), подбирают ближайший подходящий диаметр смесителя нормализованной горелки, предназначенной для работы с такой же примерно теплотой сгорания газа и такими же параметрами воздуха. После этого уточняют диаметр газового сопла, мм:

$$d_г=d_с/\sqrt{F_1}, \tag{44}$$

где $d_с$ — диаметр смесителя выбранной нормализованной горелки.

Затем уточняют пропускную способность горелки по газу, м/с:

$$V_{0г}=0{,}785\cdot 10^{-6}\,w_{0г}\,d_г^2. \tag{45}$$

Если нужно перевести нормализованную горелку на работу в условиях, отличающихся от тех, на которые она была рассчитана, то следует изменить диаметр газового сопла. Определив по формулам (41)—(43) отношение F_1 для новых условий работы, находят по формуле (44) необходимый диаметр газового сопла, а затем по формуле (45) — пропускную способность горелки по газу. Если расчетная пропускная способность горелки по газу не удовлетворяет заданной, то, задаваясь различными значениями давления газа перед горелкой, пересчет ведут до совпадения расчетной пропускной способности горелки по газу с заданной.

Примеры подбора и пересчета нормализованных горелок приведены при описании конкретных типов горелок в последующих разделах.

5.3. Инжекционные горелки типа Н

Инжекционные горелки типа Н, разработанные Стальпроектом, предназначены для сжигания доменного и смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р=3{,}75\div 9{,}20$ МДж/м³. Горелки этого типа работают на холодном воздухе и холодном или подогретом (для газов с $Q_н^р\leqslant 5{,}85$ МДж/м³) газе до 300° С.

Разработано 20 типоразмеров горелок с диаметром носика от 15 до 235 мм.

Инжекционные горелки типа Н, выполняемые из литых деталей, показаны на рис. 49; их конструктивные размеры приведены в табл. 13.

Горелки с $d_{н.г}\leqslant 75$ мм (рис. 49, *а*, *в*) выполняют с неводоохлаждаемыми носиками. Их крепят на фланце к облицовке печи. Горелки с $d_{н.г}>75$ мм (рис. 49, *г*) выполняют с разъемным корпусом, водоохлаждаемым носиком и специальным кронштейном для крепления к каркасу печи. При $d_{н.г}\leqslant 37$ мм (рис. 49, *а*) газовое сопло присоединяют на резьбе, в остальных горелках — на фланце. Газопровод к горелкам с $d_{н.г}\leqslant 56$ мм крепят на резьбе (рис. 49, *а*, *б*), к остальным горелкам — на фланце.

Для присоединения газопровода к горелкам с $d_{н.г}>56$ мм (рис. 49, *в*, *г*) разработана серия колен. Установка горелки типа Н с коленом показана на рис. 50. Колена для инжекционных горелок показаны на рис. 51, а их конструктивные размеры приведены в табл. 14.

Обозначение горелки состоит из индекса типа горелки, цифры, обозначающей диаметр носика горелки (мм), и через косую — цифры, обозначающей диаметр газового сопла $d_г$ (мм). Например, обозначение инжекционной горелки Н-75/31 означает: инжекцион-

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ИНЖЕК

Обозначение горелки	$d_{н.г}$	$d_г$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	d	d_1
Н15/$d_г$	15	4,0—9,2	60	15	30	71	—	—	3/4″	М12
Н18/$d_г$	18	4,8—11,0	60	18	30	71	—	—	3/4″	М12
Н21/$d_г$	21	5,5—13,0	60	21	35	86	—	—	1″	М12
Н24/$d_г$	24	6,5—14,5	80	24	40	86	—	—	1″	М16
Н28/$d_г$	28	7,5—17,0	80	28	40	111	—	—	1 1/4″	М16
Н32/$d_г$	32	8,5—19,5	80	32	45	111	—	—	1 1/4″	М16
Н37/$d_г$	37	10,0—22,5	100	37	50	111	—	—	1 1/4″	М16
Н42/$d_г$	42	11—26	100	42	55	147	—	—	2″	М16
Н48/$d_г$	48	13—29	120	48	65	147	—	—	2″	М16
Н56/$d_г$	56	15—34	120	56	70	147	—	—	2″	М16
Н65/$d_г$	65	17—40	140	65	85	175	160	200	75	М16
Н75/$d_г$	75	20—46	140	75	95	175	160	200	75	М16
Н86/$d_г$	86	23—52	220	86	105	210	180	220	100	1/2″
Н100/$d_г$	100	27—61	260	100	120	210	180	220	100	1/2″
Н116/$d_г$	116	31—71	300	116	135	235	210	250	125	1/2″
Н134/$d_г$	134	36—82	350	134	155	300	240	285	150	3/4″
Н154/$d_г$	154	41—94	410	154	175	300	240	285	150	3/4″
Н178/$d_г$	178	48—109	470	178	200	335	295	340	200	1″
Н205/$d_г$	205	55—126	490	205	230	435	350	395	250	1″
Н235/$d_г$	235	64—144	510	235	260	435	350	395	250	1″

* Кроме указанных особо.

Таблица 1

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) КОЛЕН ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК (РИС. 51)

$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	d	h	L	L_1	L_2	l	Число отверстий, n	Масса колена, кг
65; 75	75	160	200	18	20	310	150	470	180	4	20
86; 100	100	180	220	18	22	360	180	520	190	8	25
116	125	210	250	18	22	390	200	550	200	8	31
134; 154	250	240	285	23	24	420	210	580	210	8	54
178	200	295	340	23	26	500	240	660	300	8	73
205; 235	250	350	395	23	28	600	325	760	325	12	101
270	300	395	435	23	28	620	325	780	325	12	142

Примечание. Каждое колено выполнено в двух вариантах: $\beta=12°$ и $\beta=20°$.

Таблица 13

ИОННЫХ ГОРЕЛОК ТИПА Н (РИС. 49)

d_2	H	h	h_1	K	L	L_1	L_2	L_3	L_4	l	l_1	Число отверстий n	Масса горелки, кг
—	120	80	—	110	220	195	25	101	44	—	—	—	5,1
—	120	80	—	110	245	220	25	101	44	—	—	—	5,7
—	120	80	—	130	275	250	25	110	44	—	—	—	6,3
—	140	100	—	130	305	265	40	110	48	—	—	—	9,5
—	140	100	—	160	340	300	40	114	48	—	—	—	10,6
—	140	100	—	160	375	335	40	114	48	—	—	—	11,1
—	160	120	—	160	420	365	55	114	52	—	—	—	14,0
—	160	120	—	195	480	425	55	142	52	—	—	—	17,0
—	180	140	—	195	530	460	70	142	56	—	—	—	23,6
—	180	140	—	195	600	530	70	142	56	—	—	—	27,4
17	210	170	20	260	760	660	100	275	56	—	—	4	44,6
17	210	170	20	260	845	745	100	265	56	—	—	4	44,7
17	145	40	22	305	990	185	200	190	130	90	55	8	81,3
17	150	40	22	305	1110	255	200	190	130	90	55	8	97,5
17	200	50	22	330	1250	290	240	220	160	110	65	8	128
22	200	50	24	420	1435	380	240	220	160	110	65	8	190
22	250	50	24	420	1595	435	280	260	200	150	65	8	258
22	250	55	26	470	1840	550	280	260	200	150	65	8	343
22	280	70	28	610	2120	640	300	280	220	170	65	12	500
22	280	70	28	610	2365	805	300	280	220	170	65	12	531

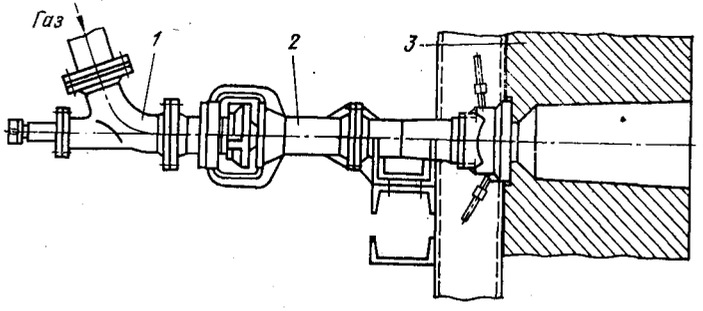


Рис. 50. Установка инжекционной горелки типа Н с коленом:
1 — колено; *2* — горелка типа Н; *3* — горелочный туннель

ная горелка типа Н для холодного воздуха и холодного или подогретого газа низкой теплоты сгорания, имеющая диаметр носика горелки 75 мм и диаметр газового сопла 31 мм.

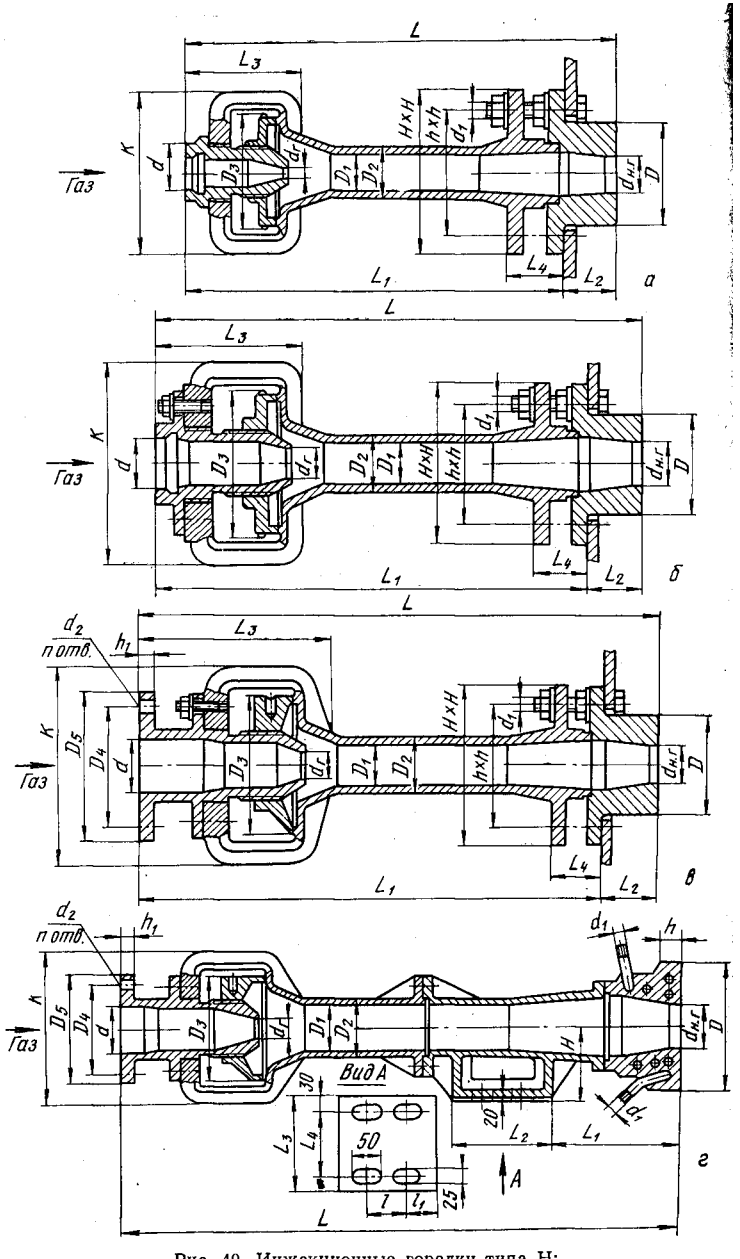


Рис. 49. Инжекционные горелки типа Н:
$а$ — $d_{н.г}$=15÷37 мм; $б$ — $d_{н.г}$=42÷56 мм; $в$ — $d_{н.г}$=65÷75 мм; $г$ — $d_{н.г}$=86÷235 мм

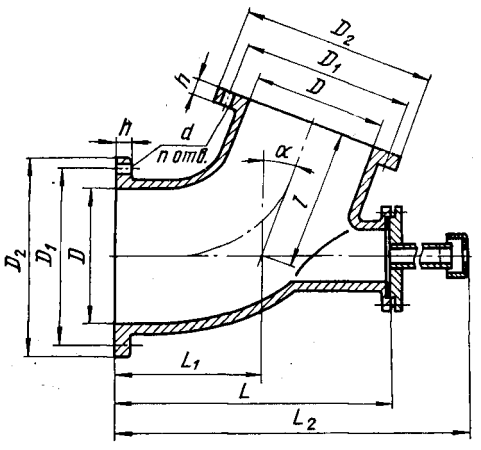


Рис. 51. Колено для инжекционных горелок

Выбор типоразмера инжекционной горелки типа Н осуществляется по графику (рис. 52). График построен для горелки с $d_{н.г}$ = 100 мм. Для горелок с другими значениями $d_{н.г}$ пропускную способность по газу вычисляют умножением величины, полученной по графику (см. рис. 52), на поправочный коэффициент (табл. 15).

Необходимый диаметр газового сопла в зависимости от выбранного типоразмера горелки и характеристики применяемого газа можно определить по табл. 16. Диаметры газовых сопел рассчитаны для сжигания газа с $\alpha = 1{,}05$ при давлении в камере сгорания не более ±20 Па.

Выбор и пересчет инжекционной горелки типа Н иллюстрированы следующими примерами.

Пример 1. Подобрать инжекционную горелку типа Н для сжигания 0,07 м³/с газа с $Q_н^р$=7,55 МДж/м³. Газ холодный; давление газа перед горелкой 20 кПа.

По графику (см. рис. 52)

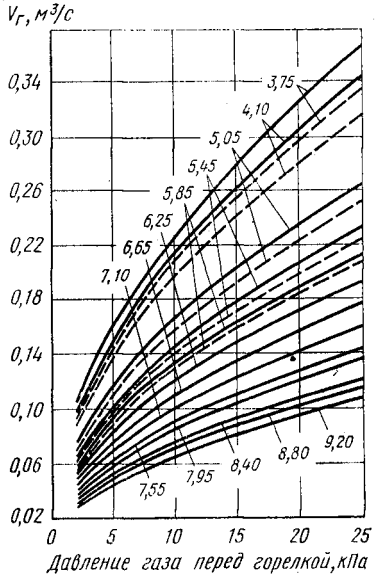


Рис. 52. Пропускная способность по газу инжекционной горелки типа Н с диаметром носика $d_{н.г}$=100 мм при α=1,05 (цифры на кривых $Q_н^р$, МДж/м³):

——— — холодный газ; — — — — газ, подогретый до 300° С

Таблица

ПОПРАВОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК

$d_{н.г}$, мм	Поправочный коэффициент	$d_{н.г}$, мм	Поправочный коэффициент	$d_{н.г}$, мм	Поправочный коэффициент
15	0,0225	42	0,176	116	1,35
18	0,0324	48	0,230	134	1,80
21	0,0441	56	0,314	154	2,37
24	0,0576	65	0,422	178	3,17
28	0,0784	75	0,562	205	4,20
32	0,102	86	0,740	235	5,52
37	0,137	100	1,0	270	7,29

определяем пропускную способность по газу горелки Н100 для применяемого газа при заданном давлении: она равна 0,16 м³/с. Отношение заданной пропускной способности к пропускной способности горелки Н-100 составит 0,07 : 0,16 = 0,43. По табл. 15 находим, что этому соотношению соответствует горелка Н-65. По табл. 16 нахо

ДИАМЕТРЫ ГАЗОВЫХ СОПЕЛ $d_г$ (мм) ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫ

$d_{н.г}$, мм	Холодный (20 °С) газ с теплотой сгорания, МДж/м³											
	3,75	4,10	5,05	5,45	5,85	6,25	6,65	7,10	7,55	7,95	8,40	8,80
15	8	7,7	6,8	6,4	6	5,8	5,5	5,2	4,8	4,6	4,4	4,2
18	9,8	9,2	8	7,7	7,2	6,8	6,4	6,2	5,8	5,5	5,2	5
21	11,5	11	9,5	9	8,5	8	7,5	7	7	6,5	6	6
24	13	12,5	10,5	10	9,5	9	8,5	8	8	7,5	7	7
28	15	14,5	12,5	11,5	11	10,5	10	9,5	9	8,5	8,5	8
32	17,5	16,5	14	13,5	13	12	11,5	11	10,5	10	9,5	9
37	20	19	16,5	15,5	15	14	13,5	12,5	12	11,5	11	10,5
42	23	22	19	18	17	16	15	14,5	13,5	13	12,5	12
48	26	25	21,5	20	19	18	17,5	16,5	15,5	15	14	13,5
56	30	29	25	24	22,5	21	20	19	18	17,5	16,5	15,5
65	35	34	29	28	27	25	24	22	21	20	19	18
75	41	39	33	31	30	29	27	25	24	23	22	21
86	47	45	38	36	34	32	31	29	28	27	25	24
100	54	52	45	42	40	38	36	34	32	31	29	28
116	63	60	52	49	46	44	42	40	38	36	34	32
134	73	69	60	56	53	50	48	45	43	41	39	37
154	84	80	69	66	62	59	56	53	50	48	45	43
178	97	92	79	75	71	67	64	61	58	55	52	50
205	111	105	91	86	82	78	74	70	67	64	61	58
235	128	121	105	100	94	89	85	80	76	73	70	67

дим диаметр газового сопла к горелке Н-65 для применяемого газа (24 мм). Таким образом, выбираем горелку Н-65/24.

Пример 2. Подобрать горелку для сжигания $V'_{0г} = 0{,}09$ м³/с водяного газа с $Q^р_н = 10{,}1$ МДж/м³; $\rho_{0г} = 0{,}71$ кг/м³; $L_0 = 2{,}12$ м³/м³ газа; $p_г = 20$ кПа ($P_г = 123{,}3$ кПа); $t_г = t_в = 20°$ С; $\alpha = 1{,}05$; противодавление $\Delta p_в + p_{печ} = 0$.

По формуле (13)

$$w_{0г} = 0{,}85\sqrt{\frac{2 \cdot 273 \cdot 123{,}3}{0{,}71 \cdot 293 \cdot 103{,}3}\,20\,000} = 213 \text{ м/с}.$$

По формуле (16)

$$d'_г = \sqrt{\frac{0{,}09 \cdot 10^6}{0{,}785 \cdot 213}} = 23 \text{ мм}.$$

По формуле (19)

$$m = 1 + 1{,}05 \cdot 2{,}12\,\frac{293}{293} = 3{,}23.$$

По формуле (20)

$$n = 1 + 1{,}05 \cdot 2{,}12\,\frac{1{,}29}{0{,}71} = 5{,}04.$$

Таблица 16

ГОРЕЛОК ТИПА Н

	Подогретый до 300 °С газ с теплотой сгорания, МДж/м³				
9,20	3,75	4,10	5,05	5,45	5,85
4	9,2	8,8	7,7	7,4	7
4,8	11	10,5	9,2	8,8	8,5
5,5	13	12,5	11	10,5	10
6,5	14,5	14	12,5	12	11,5
7,5	17	16,5	14,5	14	13
8,5	19,5	19	16,5	16	15
10	22,4	21,5	19	18	17,5
11	26	25	22	21	20
13	29	28	25	24	23
15	34	33	29	27	26
17	40	38	34	32	31
20	46	44	39	37	35
23	52	50	45	42	40
27	61	59	52	49	47
31	71	68	60	57	55
36	82	79	69	66	63
41	94	91	80	76	73
48	109	104	92	88	84
55	126	121	105	100	97
64	144	138	121	116	111

По формуле (43)

$$F_1 = \frac{2{,}35 \cdot 3{,}23 \cdot 5{,}0 - 40{,}425 \cdot 2{,}23 \cdot 4{,}04}{2} = 17{,}2.$$

По формуле (22)

$$d'_с = 23\sqrt{17{,}2} = 95{,}4 \text{ мм}.$$

Принимаем ближайшую горелку типа Н $d_{н.г} = 100$ мм ($d_с = 100$ мм) и производим уточненный расчет.

По формуле (44)

$$d_г = 100 : \sqrt{17{,}2} = 24 \text{ мм}.$$

По формуле (45)

$$V_{0г} = 0{,}785 \cdot 10^{-6} \cdot 213 \cdot 24^2 = 0{,}096 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Скорость смеси (м/с) в носике горелки (принимаем температуру смеси $t_{см} = 100°$С) по формуле (32):

$$w_{н.г}=\frac{0{,}096\,(1+1{,}05\cdot 2{,}12)\,373\cdot 10^6}{0{,}785\cdot 100^2\cdot 273}=53{,}9.$$

Принимаем, что скорость проскока для водяного газа такая же, как для смешанного газа с теплотой сгорания 8,4 МДж/м³. Тогда по графику на рис. 47, *а* для этого газа при $d_{н.г}=100$ мм скорость проскока 11,7 м/с, а по графику на рис. 47, *б* при температуре смеси 100° С поправка на температуру 2,0.

Пределы регулирования горелки по формуле (34)

$$\vartheta = 53{,}9:11{,}7:2{,}0 = 2{,}3.$$

5.4. Инжекционные горелки типа П

Инжекционные горелки типа П, разработанные Стальпроектом, предназначены для сжигания доменного и смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р=3{,}75\div 8{,}40$ МДж/м³. Горелки могут работать на подогретом воздухе и на холодном или подогретом газе.

Разработано 11 типоразмеров горелок с диаметром носика от 65 до 270 мм.

Инжекционные горелки типа П показаны на рис. 53, а их конструктивные размеры приведены в табл. 17.

Горелки выполнены из литых деталей.

Для крепления горелок типа П к металлоконструкциям каркаса печи применяют опорные стойки, для присоединения газопровода — колена, а для присоединения футерованного изнутри воздухопровода — дроссельные клапаны типа ДГ. Установка горелки типа П с опорной стойкой, коленом и дроссельным клапаном показана на рис. 54.

Опорные стойки для горелок типа П показаны на рис. 55, а их конструктивные размеры приведены в табл 18.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ИНЖЕК

Обозначение горелки	$d_{н.г}$	$d_г$	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	d_2
П65/$d_г$	65	14—37	170	125	360	400	3/8″	75	160
П75/$d_г$	75	16—45	190	125	360	400	3/8″	75	160
П86/$d_г$	86	18—50	220	200	445	490	1/2″	100	180
П100/$d_г$	100	22—57	260	200	445	490	1/2″	100	180
П116/$d_г$	116	25—67	300	250	495	540	1/2″	125	210
П134/$d_г$	134	29—77	350	300	655	705	3/4″	150	240
П154/$d_г$	154	33—89	410	300	655	705	3/4″	150	240
П178/$d_г$	178	39—100	470	350	705	755	1″	200	295
П205/$d_г$	205	44—115	490	350	705	755	1″	250	350
П235/$d_г$	235	50—132	510	350	705	755	1″	250	350
П270/$d_г$	270	57—152	510	450	550	590	1″	300	395

* Кроме указанных особо.

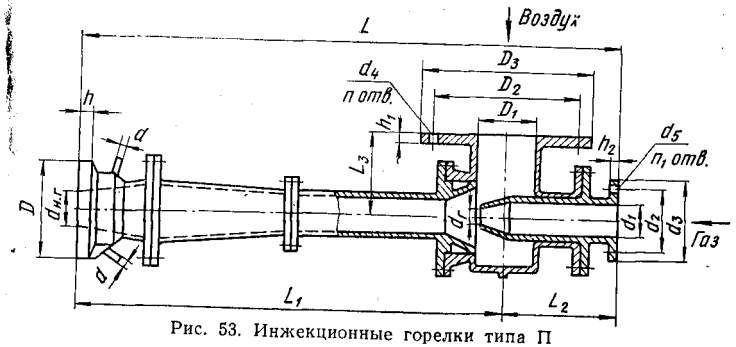


Рис. 53. Инжекционные горелки типа П

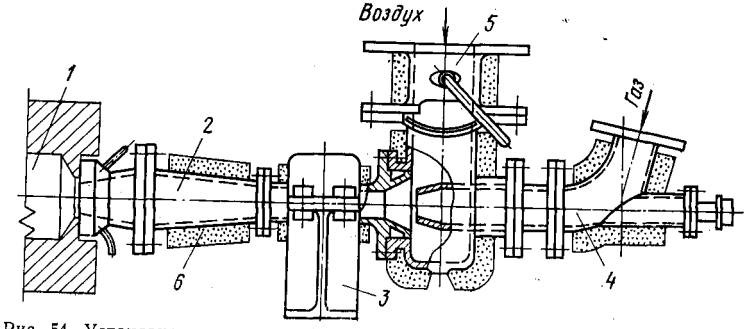


Рис. 54. Установка инжекционной горелки типа П с опорной стойкой, коленом и дроссельным клапаном:
1 — горелочный туннель; *2* — инжекционная горелка типа П; *3* — опорная стойка; *4* — колено; *5* — дроссельный клапан; *6* — изоляция

Таблица 17

ЦИОННЫХ ГОРЕЛОК ТИПА П (РИС. 53)

d_3	d_1	d_5	L	L_1	L_2	L_3	h	h_1	h_2	Число отверстий n	Число отверстий n_1*	Масса горелки, кг
200	18	18	1035	785	250	200	32	24	20	12	4	113,4
200	18	18	1145	895	250	200	32	24	20	12	4	122,0
220	23	18	1360	1035	325	230	40	26	22	12	8	206,0
220	23	18	1530	1205	325	230	40	26	22	12	8	227,0
250	23	18	1740	1395	345	250	50	28	22	16	8	282,0
285	25	23	2000	1615	385	280	50	30	24	20	8	429,0
285	25	23	2245	1860	385	280	50	30	24	20	8	489,0
340	25	23	2585	2145	440	350	55	32	26	20	8	697,0
395	25	23	2915	2475	440	350	65	32	28	20	12	920,0
395	25	23	3290	2850	440	350	70	32	28	20	12	925,0
435	23	23	3695	3230	465	460	70	36	28	16	12	1062,0

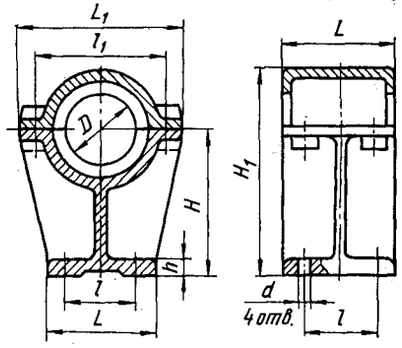


Рис. 55. Опорная стойка для инжекционных горелок типа П

Таблица 18

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ОПОРНЫХ СТОЕК ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК ТИПА П (РИС. 55)

$d_{н.г}$, мм	D	d	H	H_1	h	L	L_1	l	l_1	Масса стойки, кг
65	94	19	250	330	24	155	230	105	180	20,0
75	103	24	250	340	24	165	270	105	210	26,0
86	118	26	270	370	26	180	290	120	230	36,0
100	132	26	270	375	26	200	300	130	240	38,0
116	150	26	290	405	28	240	320	160	260	50,0
134	170	28	310	440	30	240	370	160	300	58,0
154	190	28	310	450	30	300	390	200	310	81,0
178	216	28	350	505	30	300	430	200	350	95,0
205	244	28	350	515	30	300	450	200	370	98,0
235	278	28	350	534	30	300	480	200	400	100,0
270	314	28	350	552	30	300	530	200	450	109,0

Колена для присоединения газопровода к горелкам типа П применяют те же, что и для горелок типа Н (см. рис. 51 и табл. 14).

Дроссельные клапаны для горелок типа П показаны на рис. 56, а их конструктивные размеры приведены в табл. 19.

Обозначение горелки состоит из индекса типа горелки, диаметра носика горелки (мм) и через косую — цифры, обозначающей диаметр газового сопла (мм), например, П134/55 означает: инжекционная горелка типа П для подогретого воздуха и холодного или подогретого газа низкой теплоты сгорания, имеющая диаметр носика горелки 134 мм и диаметр газового сопла 34 мм.

Выбор типоразмера инжекционной горелки типа П при $d_{н.г}=100$ мм производят по графику (рис. 57).

При $d_{н.г}\neq100$ мм пропускную способность по газу вычисляют умножением величины, полученной по графику (см. рис. 57), на поправочный коэффициент (см. табл. 15).

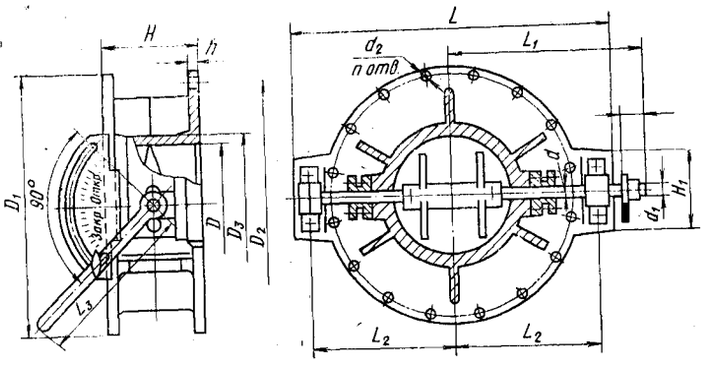


Рис. 56. Дроссельный клапан для инжекционных горелок типа П

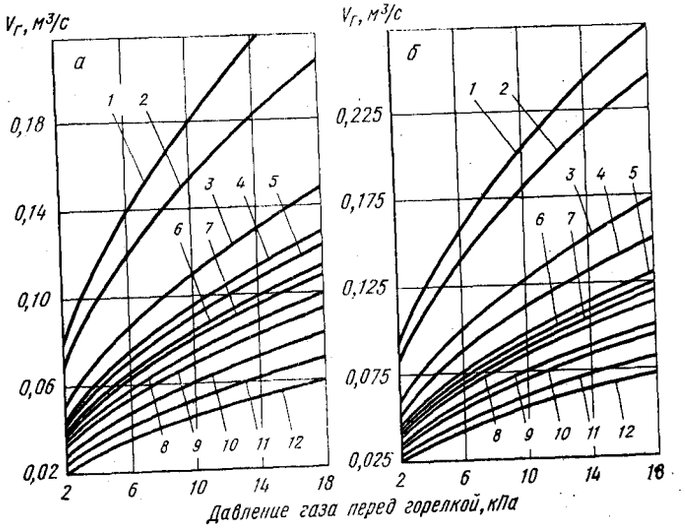


Рис. 57. Пропускная способность по газу инжекционной горелки типа П с диаметром носика $d_{н.г}=100$ мм:

а — при $\alpha=1{,}0$; *б* — при $\alpha=0{,}9$

Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	Температура подогрева, °С		Номер кривой	$Q_н^р$, МДж/м³	Температура подогрева, °С	
		газа	воздуха			газа	воздуха
1	3,75	300	600	*7*	6,65	200	500
2	4,10	300	600	*8*	6,25	20	500
3	5,45	200	500	*9*	6,65	20	500
4	5,85	200	500	*10*	7,10	20	500
5	6,25	200	500	*11*	7,55	20	500
6	5,85	20	500	*12*	8,40	20	500

Таблица 19

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ ДРОССЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ (ММ) ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК ТИПА П (РИС. 56)

$d_{н.г}$, мм	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	d_2	H	H_1	h	L	L_1	L_2	L_3	t	Число отверстий, n	Проходное сечение при открытом клапане, м²	Масса клапана, кг
65; 75	125	400	360	145	20	16	18	200	130	18	520	310	230	350	30	12	0,0077	49,1
86; 100	200	490	445	224	25	20	23	200	150	20	610	365	275	350	40	12	0,0223	77,2
116	250	540	495	274	25	20	23	200	150	20	660	390	300	350	40	16	0,0388	97,1
134; 154	300	705	655	332	30	25	25	250	—	20	—	410	280	370	50	20	0,0537	152,1
178; 205; 235	350	755	705	382	30	25	25	250	—	22	—	435	305	370	50	20	0,0791	166,1
270	450	590	550	482	30	25	23	250	150	24	800	470	370	370	50	16	0,0137	113,1

Необходимый диаметр газового сопла можно определить в зависимости от выбранного типоразмера горелки и характеристики применяемого газа и воздуха по табл. 20.

Диаметры газовых сопел рассчитаны для сжигания газа с $\alpha=0{,}9$ и 1,0 при давлении в камере сгорания не более ±20 Па и сопротивлении на пути подогретого воздуха, равном 2,5 скоростных напора во входном сечении коробки смесителя.

Выбор и пересчет инжекционной горелки типа П можно показать на следующих примерах.

Пример 1. Определить пропускную способность инжекционной горелки П86 при сжигании доменного газа с $Q_н^р=4{,}0$ МДж/м³; $t_г=300°$ С; $t_в=600°$ С.

Давление газа перед горелкой 10 кПа, $\alpha=1{,}0$.

По графику (см. рис. 57, *а*) определяем пропускную способность горелки П100 для заданных условий (0,17 м³/с). По табл. 15 для горелки с $d_{н.г}=86$ мм поправочный коэффициент равен 0,74. Таким образом, пропускная способность по газу горелки П86 0,17×$\times$0,74=0,126 м³/с.

По табл. 20 находим, что в данных условиях для горелки П86 необходимо газовое сопло диаметром 46 мм.

Пример 2. Пересчитать горелку типа П, $d_{н.г}=100$ мм (диаметр смесителя $d_с=100$ мм) для сжигания генераторного газа с $Q_н^р=5{,}45$ МДж/м³; $\rho_{0г}=1{,}11$ кг/м³; $L_0=1{,}13$ м³/м³ газа; $t_г=200°$ С; $t_в=500°$ С; $p_г=15$ кПа ($P_г=118{,}3$ кПа); $\alpha=1{,}05$; сопротивление на пути воздуха $\Delta p_в=150$ Па; давление в печи $p_{печ}=30$ Па.

По формуле (13)

$$w_{0г}=0{,}85\times$$

$$\times\sqrt{\frac{2\cdot273\cdot118{,}3}{1{,}11\cdot473\cdot103{,}3}\,15000}=$$

$$=141\text{ м/с}.$$

Таблица 20

ДИАМЕТРЫ ГАЗОВЫХ СОПЕЛ ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК ТИПА П, ММ

$d_{н.г}$, мм	Диаметры при температурах подогрева, °С, для газов с теплотой сгорания, МДж/м³												
	$t_в$=600, $t_г$=300		$t_в$=500, $t_г$=200				$t_в$=500, $t_г$=20						
	3,75	4,10	5,45	5,85	6,25	6,65	5,85	6,25	6,65	7,10	7,55	7,95	8,40
						$\alpha=1$							
65	35	32	26	24	23	21	19	18	17	16	15	14	14
75	40	37	30	28	26	24	23	21	21	19	18	17	16
86	46	43	34	32	31	29	26	24	24	22	20	20	18
100	54	50	40	37	36	34	31	29	28	26	24	22	22
116	63	59	47	44	41	38	36	34	32	30	28	27	25
134	73	67	55	51	48	45	42	39	37	35	33	31	29
154	84	77	62	58	55	51	48	45	42	40	37	35	33
178	95	90	71	67	63	59	55	52	49	47	44	42	39
205	109	98	82	76	71	67	63	60	56	53	50	47	44
235	125	115	92	87	82	76	71	67	63	60	56	53	50
270	144	132	106	100	94	87	82	77	73	69	64	61	57
						$\alpha=0{,}9$							
65	37	35	28	26	24	23	21	20	19	18	17	16	15
75	43	40	32	30	28	26	24	23	22	21	19	18	17
86	50	46	37	34	32	31	28	26	26	24	22	22	20
100	57	54	43	40	37	36	32	31	29	28	26	24	24
116	67	63	50	47	44	41	38	36	34	32	30	28	27
134	77	73	58	55	51	48	45	42	40	37	35	33	31
154	89	84	67	62	58	55	51	48	45	43	40	39	37
178	100	95	76	71	67	63	59	55	52	49	47	44	42
205	115	109	87	82	76	71	67	63	60	56	53	50	47
235	132	125	98	92	87	82	76	71	67	66	60	58	56
270	152	144	113	106	100	94	87	82	77	73	69	67	64

По формуле (19)

$$m=1+1{,}05\cdot1{,}13\cdot773:473=2{,}94.$$

По формуле (20)

$$n=1+1{,}05\cdot1{,}13\cdot1{,}29:1{,}11=2{,}38.$$

По формуле (42)

$$F_1=\frac{2{,}35\cdot2{,}94\cdot2{,}38-0{,}425\cdot1{,}94\cdot1{,}38}{1+\sqrt{1-\frac{150+30}{0{,}85^2\cdot15\,000}(2{,}35\cdot2{,}94\cdot2{,}38-0{,}425\cdot1{,}94\cdot1{,}38)}}=$$

$$=8{,}2.$$

По формуле (44)

$$d_г = 100 : \sqrt{8,2} = 35 \text{ мм}.$$

По формуле (45)

$$V_{0г} = 0,785 \cdot 10^{-6} \cdot 141 \cdot 35^2 = 0,136 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По формуле (33)

$$t_{см} = \frac{473 + 773\,(2,94 - 1)}{2,94} = 398^\circ \text{ С}.$$

По формуле (32)

$$w_{н.г} = \frac{0,136\,(1 + 1,05 \cdot 1,13)\,671 \cdot 10^6}{0,785 \cdot 100^2 \cdot 273} = 93,1 \text{ м/с}.$$

Принимаем, что скорость проскока для генераторного газа такая же, как для смеси коксового и доменного газов с теплотой сгорания 5,45 МДж/м³. По графику (рис. 47, *а*) для этого газа при $d_{н.г}=100$ мм скорость проскока 6,85 м/с, а по графику (рис. 47, *б*) при температуре смеси 398° С поправка на температуру 7,7.

Пределы регулирования горелки по формуле (34)

$$\vartheta = 93,1 : 6,85 : 7,7 = 1,77.$$

5.5. Инжекционные горелки типа В и ВП

Инжекционные горелки типа В и ВП предназначены для сжигания природного, коксового, смесей природного и коксового, а также других газов с высокой теплотой сгорания. Горелки работают на холодном воздухе и холодном газе. Горелки типа ВП отличаются от горелок типа В только поворотом смесителя.

Разработано 20 типоразмеров горелок с $d_{н.г}=15 \div 235$ мм.

Инжекционные горелки типа В и ВП показаны на рис. 58, а их конструктивные размеры приведены в табл. 21.

Горелки выполнены из литых деталей.

Горелки типов В и ВП с $d_{н.г} \leqslant 75$ мм (рис. 58, *а, б*) выполняют с неводоохлаждаемым носиком. Их крепят на фланце к облицовке печи. Газовое сопло присоединяют к горелке на резьбе.

Горелки типов В и ВП с $d_{н.г} > 75$ мм (рис. 58, *в, г*) выполняют с разъемным корпусом, водоохлаждаемым носиком и специальным кронштейном для крепления к каркасу печи. Газовое сопло присоединяют к горелке на фланце.

Газопровод ко всем горелкам присоединяют на резьбе.

Обозначение горелки включает индекс типа горелки, диаметр носика горелки (мм) и через косую диаметр газового сопла (мм). Например, горелка ВП 32/2,0 означает: инжекционная горелка типа ВП для газов с высокой теплотой сгорания с поворотом смесителя, имеющая диаметр носика 32 и диаметр газового сопла 2,0 мм.

Выбор типоразмера инжекционных горелок типа В и ВП осуществляют по графику (рис. 59), на котором дана зависимость пропускной способности по газу от его давления для горелки типа В (рис. 59, *а*) и типа ВП (рис. 59, *б*) с $d_{н.г}=100$ мм при $\alpha=1,05$. При другом диаметре носика пропускную способность по газу вычисля-

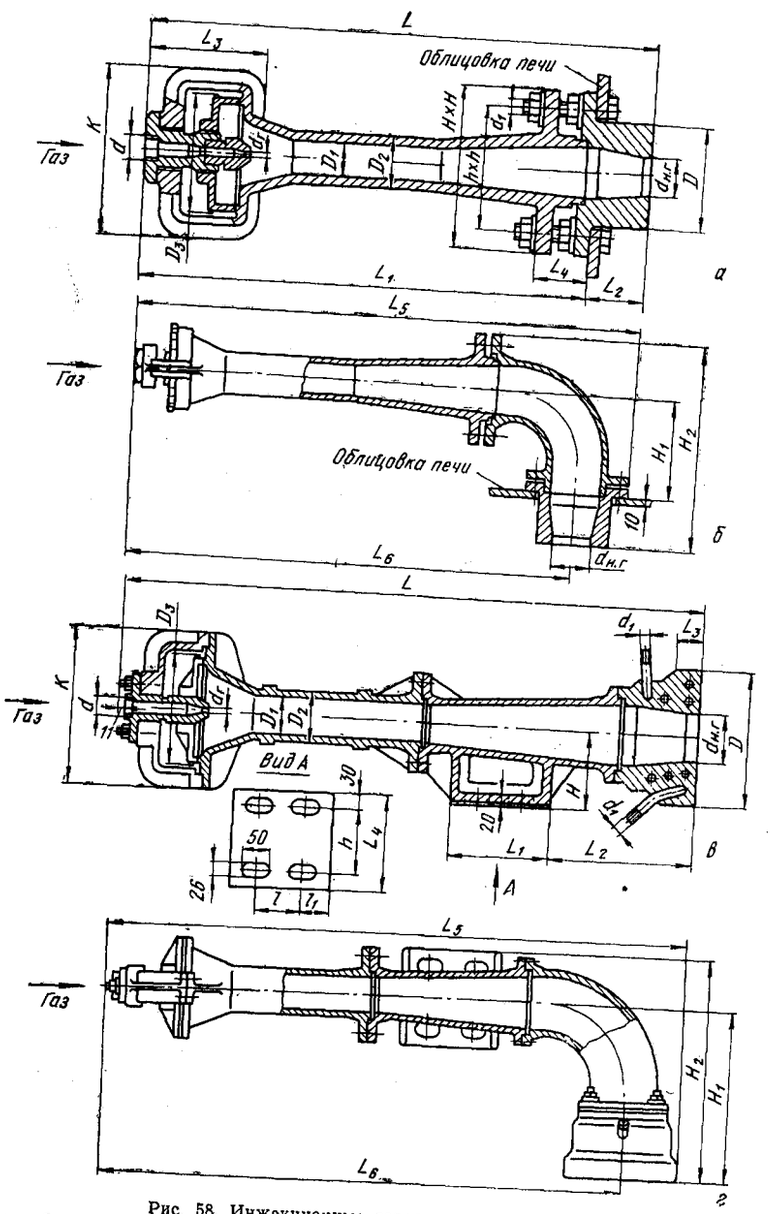


Рис. 58. Инжекционные горелки типа В и ВП:
а и *б* — соответственно типа В и ВП с $d_{н.г}$ от 15 до 75 мм; *в* и *г* — соответственно типа В и ВП с $d_{н.г}$ от 86 до 235 мм

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ИНЖЕКЦИОННЫХ

$d_{н.г}$	$d_г$	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	H	H_1	H_2
15	0,9—1,6	60	12	25	66	1/2″	M12	120	90	175
18	1,1—2,0	60	15	30	66	1/2″	M12	120	90	175
21	1,2—2,3	60	17	30	66	1/2″	M12	120	90	175
24	1,4—2,6	80	19	35	86	1/2″	M16	140	106	216
28	1,6—3,0	80	23	40	86	1/2″	M16	140	106	216
32	2,0—3,5	80	26	40	86	1/2″	M16	140	106	216
37	2,1—4,0	100	30	45	116	1/2″	M16	160	128	263
42	2,4—4,5	100	34	50	116	1/2″	M16	160	128	263
48	2,8—5,2	120	39	55	116	1/2″	M16	180	150	310
56	3,2—6,1	120	45	60	166	3/4″	M16	180	150	310
65	3,8—7,0	140	53	70	166	3/4″	M16	210	170	375
75	4,4—8,1	140	61	80	166	3/4″	M16	210	190	395
86	5,0—9,3	220	70	90	207	1″	1/2″	145	338	433
100	5,8—10,8	260	81	100	207	1″	1/2″	150	383	478
116	6,7—12,6	300	94	115	242	1 1/4″	1/2″	200	428	538
134	7,7—14,5	350	108	130	267	1 1/4″	3/4″	200	473	583
154	8,9—16,7	410	125	145	297	1 1/2″	1″	250	528	658
178	10,4—19,3	470	145	165	345	1 1/2″	1″	250	558	688
205	11,9—22,2	490	166	190	390	2″	1″	280	593	733
235	13,6—25,4	510	190	215	440	2″	1″	280	633	773

* Кроме указанных особо.

ют умножением величины, полученной по графику (см. рис. 58), на поправочный коэффициент, который берут из табл. 15.

Диаметр газового сопла можно определить в зависимости от выбранного типоразмера горелки и характеристики применяемого газа по табл. 22. Диаметры газовых сопел рассчитаны на сжигание газа с $\alpha=1{,}05$ и при давлении в камере сгорания не более ± 20 Па. Во избежание засорения сопел с $d_с \leqslant 2$ мм газ должен быть сухим и чистым.

Выбор и пересчет инжекционных горелок типа В и ВП иллюстрированы следующими примерами.

Пример 1. Подобрать инжекционную горелку типа ВП для сжигания 0,05 м³/с природного газа с $Q_н^р=34{,}95$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой 70 кПа.

По графику (см. рис. 59, *б*) определяем пропускную способность по газу горелки ВП 100 для применяемого газа при заданном давлении (0,009 м³/с). Отношение заданной пропускной способности к пропускной способности горелки ВП 100 составит 0,05 : 0,009=5,56. По табл. 15 находим, что этому отношению соответствует горелка ВП 235. По табл. 22 находим диаметр газового сопла к горелке

ГОРЕЛОК ТИПА В И ВП (РИС. 58)

Таблица 21

h	K	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	l	l_1	Масса горелки, кг	
											В	ВП
80	110	220	195	25	94	44	323	263	—	—	5,0	8,4
80	110	250	225	25	94	44	353	293	—	—	5,3	8,5
80	110	275	250	25	94	44	378	318	—	—	5,6	9,0
100	135	300	260	40	96	48	416	346	—	—	9,0	13,5
100	135	335	295	40	96	48	451	381	—	—	9,5	14,0
100	135	375	335	40	96	48	491	421	—	—	9,8	14,8
120	165	440	385	55	113	52	569	489	—	—	14,3	21,8
120	165	490	435	55	113	52	619	539	—	—	14,8	22,8
140	165	545	475	70	113	56	687	597	—	—	21,0	31,0
140	215	625	555	70	113	56	767	677	—	—	26,0	37,0
170	215	700	600	100	113	56	857	752	—	—	33,5	49,0
170	215	800	700	100	113	56	967	862	—	—	35,2	51,2
130	285	960	200	185	40	190	1136	1026	90	55	64,0	78,0
130	285	1095	200	255	40	190	1296	1166	90	55	82,0	97,2
160	330	1240	240	290	50	220	1466	1316	110	65	111,0	133,0
160	360	1420	240	380	50	220	1666	1491	110	65	152,0	180,0
200	410	1615	280	435	50	260	1896	1691	150	65	218,0	251,0
200	475	1840	280	550	55	260	2121	1886	150	65	250,0	289,0
220	555	2130	300	640	70	280	2386	2141	170	65	359,0	410,0
220	605	2400	300	805	70	280	2626	2371	170	65	421,0	478,0

ВП 235 для применяемого газа (13,6 мм). Таким образом, выбираем горелку ВП 235/13,6.

Пример 2. Пересчитать горелку типа В с $d_{н.г}=100$ мм ($d_с=80$ мм), предназначенную для работы на смеси природного и коксового газов с $Q_н^р=26{,}85$ МДж/м³ при нулевом давлении в камере сгорания на работу при давлении в камере сгорания $p_{печ}=50$ Па; $p_г=40$ кПа ($P_г=143{,}3$ кПа); $t_г=t_в=20°$ С; $\alpha=1{,}05$.

По рис. I-18 приложения I находим $\rho_{0г}=0{,}605$ кг/м³ и $L_0=6{,}87$ м³/м³ газа.

По формуле (19)

$$m = 1 + 1{,}05 \cdot 6{,}87 \frac{293}{293} 1{,}078 = 8{,}78,$$

где значение П взято по графику (рис. 44) при $p_г=40$ кПа.

По формуле (20)

$$n = 1 + 1{,}05 \cdot 6{,}87 \frac{1{,}29}{0{,}605} = 16{,}38.$$

По формуле (43) при нулевом давлении в камере сгорания

$$F_1 = \frac{1{,}65 \cdot 8{,}78 \cdot 16{,}38 - 0{,}425 \cdot 7{,}78 \cdot 15{,}38}{2} = 93{,}2.$$

По формуле (44)

$$d_г = 80 : \sqrt{93{,}2} = 8{,}3 \text{ мм}.$$

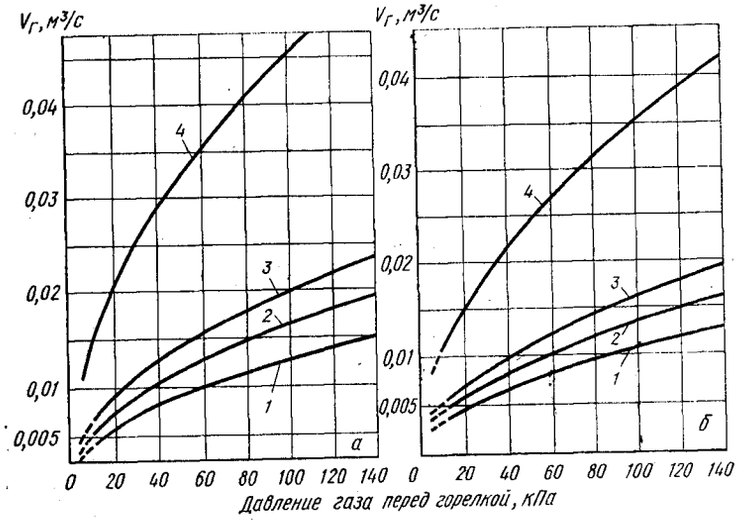


Рис. 59. Пропускная способность инжекционной горелки $d_{н.г}$ = 100 мм типа В (*а*) и типа ВП (*б*) при α=1,05 по газам ($Q^р_н$, МДж/м³):

1 — природный газ (34, 95); *2* — смесь природного и коксового газа (30, 20); *3* — то же (26, 85); *4* — коксовый газ (17, 10)

Отношение площадей смесителя и газового сопла при $p_{печ}$ = =50 Па по формуле (41)

$$F_1' = \frac{1{,}65 \cdot 8{,}78 \cdot 16{,}38 - \dots}{1 + \sqrt{1 - 2\dfrac{50}{0{,}85^2 \cdot 0{,}48 \cdot 143\,300}} \times \dots} \dots$$

$$\dots \frac{\dots - 0{,}425 \cdot 7{,}78 \cdot 15{,}38}{\dots \times (1{,}65 \cdot 8{,}78 \cdot 16{,}38 - 0{,}425 \cdot 7{,}78 \cdot 15{,}38)} = 102{,}4,$$

где значение D=0,48 взято по графику на рис. 44 при $p_г$=40 кПа.

Диаметр газового сопла в этом случае

$$d_г'' = 8{,}0 : \sqrt{102{,}4} = 7{,}9.$$

Снижение пропускной способности горелки по газу при давлении в камере сгорания составляет согласно формуле (45)

$$\frac{V_{0г}'}{V_{0г}} = \left(\frac{d_г'}{d_г}\right)^2 = \left(\frac{7{,}9}{8{,}3}\right)^2 = 0{,}91.$$

Таблица 22

ДИАМЕТРЫ ГАЗОВЫХ СОПЕЛ (ММ) ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК ТИПА В И ВП

$d_{н.г}$, мм	Природный газ, $Q^р_н$=34,95 МДж/м³		Смесь природного и коксового газов				Коксовый газ, $Q^р_н$=17,10 МДж/м³	
			$Q^р_н$=30,20 МДж/м³		$Q^р_н$=26,85 МДж/м³			
	В	ВП	В	ВП	В	ВП	В	ВП
15	1,0	0,9	1,1	0,9	1,1	1,0	1,6	1,4
18	1,2	1,1	1,3	1,2	1,4	1,2	2,0	1,7
21	1,4	1,2	1,5	1,3	1,6	1,4	2,3	2,0
24	1,6	1,4	1,7	1,5	1,8	1,6	2,6	2,2
28	1,8	1,6	2,0	1,8	2,1	1,9	3,0	2,7
32	2,1	2,0	2,3	2,2	2,4	2,3	3,5	3,2
37	2,4	2,1	2,6	2,3	2,8	2,5	4,0	3,5
42	2,7	2,4	3,0	2,6	3,2	2,8	4,5	3,9
48	3,1	2,8	3,4	3,0	3,6	3,2	5,2	4,5
56	3,6	3,2	4,0	3,5	4,2	3,7	6,1	5,2
65	4,2	3,8	4,6	4,1	4,9	4,4	7,0	6,1
75	4,8	4,4	5,3	4,7	5,7	5,0	8,1	7,0
86	5,5	5,0	6,1	5,5	6,5	5,8	9,3	8,1
100	6,4	5,8	7,1	6,3	7,6	6,7	10,8	9,3
116	7,5	6,7	8,2	7,3	8,8	7,8	12,6	10,8
134	8,6	7,7	9,5	8,4	10,2	8,9	14,5	12,5
154	9,9	8,9	10,9	9,8	11,7	10,3	16,7	14,4
178	11,4	10,4	12,6	11,2	13,5	12,0	19,3	16,7
205	13,2	11,9	14,5	13,0	15,6	13,7	22,2	19,1
235	15,1	13,6	16,6	14,8	17,8	15,7	25,4	21,9

Если необходимо сохранить пропускную способность горелки, то следует повысить давление газа перед горелкой, работающей при давлении в камере сгорания.

Согласно формулам (14) и (45) это повышение должно составлять $p_г' = p_г(V_{0г}/V_{0г}') = 1{,}09\, p_г$.

5.6. Беспламенные панельные горелки типа ГБПш

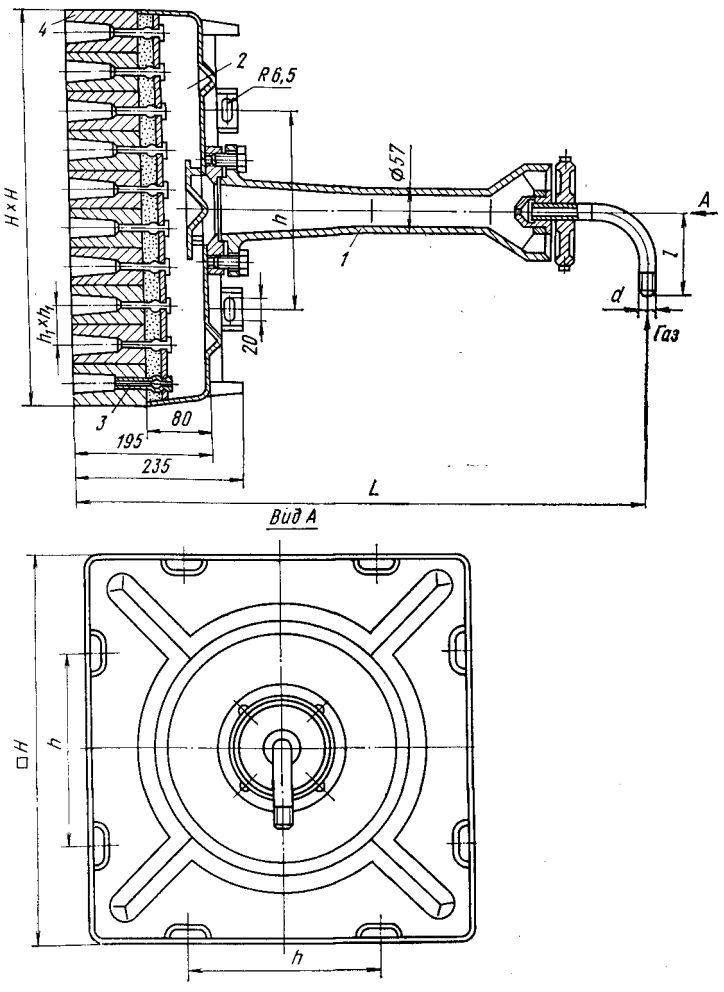


Рис. 60. Беспламенные панельные горелки типа ГБПш:

1 — инжекционный смеситель; *2* — распределительная камера; *3* — соединительные трубки; *4* — керамические призмы

Беспламенные панельные горелки типа ГБПш, разработанные ВНИИнефтемашем, предназначены для сжигания холодного природного газа с холодным воздухом. Предварительно смешение в этих горелках осуществляется в инжекционном смесителе. Из диффузора смесителя газо-воздушная смесь поступает в распределительную камеру, а оттуда через систему соединительных трубок в горелочные туннели, где и сгорает.

Таблица 23

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* БЕСПЛАМЕННЫХ ПАНЕЛЬНЫХ ГОРЕЛОК ТИПА ГБПш (РИС. 60)

Обозначение горелки	Номинальная теплопроизводительность, кВт	*d*	*H*	*h*	h_1	*L*	*l*	Число трубок	Масса горелки без керамики, кг
ГБПш-45	52,4	1/2″	500	250	50	740	110	100	27,5
ГБПш-85	98,9	1/2″	500	250	50	740	110	100	28,3
ГБПш-120	139,6	1/2″	605	300	50	740	110	144	35,5
ГБПш-140	162,8	1/2″	500	250	50	740	110	100	28,7
ГБПш-200	232,6	1/2″	605	300	50	740	110	144	36,3
ГБПш-280	325,7	1″	500	250	35,7	845	140	196	38,4

* Кроме указанных особо.

Разработано 6 типоразмеров горелок с номинальной теплопроизводительностью от 52,4 до 325,7 кВт. Номинальная теплопроизводительность определена при давлении природного газа перед горелкой 190 кПа для трех меньших типоразмеров горелок и 150 кПа для трех бо́льших типоразмеров. Каждый типоразмер горелки разработан в двух исполнениях в зависимости от материала соединительных трубок: исполнение I с трубками из стали 10 может работать при температуре продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания до 800° С; исполнение II с трубками из стали 10Х23Н18 или 15Х25Т — до 1200° С. Пределы регулирования горелок — не менее 1 : 2 от номинала.

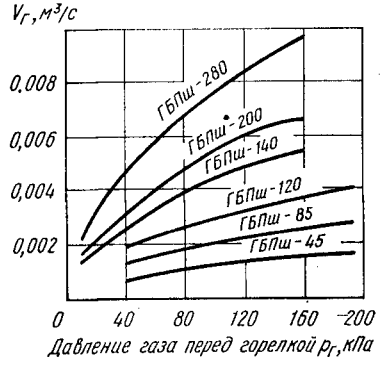


Рис. 61. Пропускная способность по газу беспламенных панельных горелок типа ГБПш

Беспламенные панельные горелки типа ГБПш показаны на рис. 60, а их конструктивные размеры приведены в табл. 23.

Горелки имеют штампованный корпус.

Горелочные камни выполнены в виде керамических призм, которые свободно надеваются на соединительные трубки; поэтому горел-

ки могут устанавливаться только на поду или боковых стенах камер сгорания.

Обозначение горелок состоит из индекса типа горелок, римской цифры, указывающей исполнение горелки, и цифры, характеризующей ее типоразмер. Например, обозначение горелки ГБПш-I-85 означает: горелка беспламенная панельная со штампованным корпусом, исполнение I (для работы при температуре продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания не выше 800° С) с номинальной теплопроизводительностью 98,9 кВт.

Выбирают горелки типа ГБПш по графику (рис. 61), на котором дана зависимость пропускной способности горелок по газу от давления газа перед горелкой. График построен для холодного природного газа с $Q^{р}_{н}$=33,5 МДж/м³ и $\rho_{0г}$=0,7 кг/м³.

5.7. Инжекционно-атмосферные горелки типа ИА

Разработанные Стальпроектом инжекционно-атмосферные горелки типа ИА, предназначены для сжигания холодных природного газа с $Q^{р}_{н}$=34,95 МДж/м³ и смеси доменного и коксового газов с $Q^{р}_{н}$=7,55 МДж/м³ в камерах сгорания, находящихся под давлением.

Инжекционно-атмосферные горелки относятся к горелкам частичного предварительного смешения. Смешение части необходимого для горения воздуха с газом происходит в инжекционной горелке с поворотом смесителя. Остальной воздух, обеспечивающий полное

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ*) ИНЖЕКЦИОННО-АТМО

Обозначение горелки	Сжигаемый газ	$D_{см}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
ИА-30/2,5	Природный	30	70	90	37	45	63,5	20
ИА-30/9,0	Смешанный**	30	70	90	37	45	63,5	20
ИА-34/2,8	Природный	34	80	100	43	50	63,5	24
ИА-34/10	Смешанный	34	80	100	43	50	63,5	24
ИА-38/3,3	Природный	38	90	110	43	50	63,5	29
ИА-38/11,5	Смешанный	38	90	110	43	50	63,5	29
ИА-44/3,8	Природный	44	105	125	56	60	72	35
ИА-44/14	Смешанный	44	105	125	56	60	72	35

* Кроме указанных особо.
** Смесь коксового и доменного газов.

сжигание газа, поступает в зазор между носиком горелки и горелочным туннелем.

В конце диффузора горелки установлена решетка, которая предупреждает проникновение пламени внутрь горелки.

Разработано 4 типоразмера горелок к смесителям диаметром от 30 до 44 мм. Каждый типоразмер выполнен с двумя соплами: для природного и смешанного газов.

Кроме того, в зависимости от вида применяемого газа меняется диаметр отверстий в решетке.

Инжекционно-атмосферные горелки типа ИА показаны на рис. 62, а их конструктивные размеры приведены в табл. 24.

Горелки выполнены из литых деталей. Решетка может быть съемной или отлитой как одно целое с носиком.

Обозначение горелки включает индекс типа горелки, диаметр смесителя в миллиметрах и через косую диаметр газового сопла в миллиметрах. Например. горелка ИА-30/2,5 означает: горелка инжекционно-атмосферная с диаметром смесителя 30 и диаметром газового сопла 2,5 мм. При применении решетки, отлитой как одно целое с носиком, в обозначении горелки добавляются слова «с литой решеткой».

Выбор горелки осуществляется в зависимости от необходимой пропускной способности горелки по газу и располагаемого давления газа перед горелкой по графику (рис. 63).

Максимальное давление перед горелкой природного газа 75, смешанного газа 12 кПа.

Таблица 24

СФЕРНЫХ ГОРЕЛОК ТИПА ИА (РИС. 62)

D_3	D_7	$d_г$	d	d_1	H	L	L_1	l	Число отверстий n	Масса горелки, кг
1 1/4″	105	2,5	5; 6,3	18	195	445	250	200	37	10,0
1 1/4″	105	9,0	4; 4,3	18	195	445	250	200	57	10,0
1 1/2″	110	2,8	6; 6,8	20	210	455	270	220	37	11,5
1 1/2″	110	10	4,4; 5,1	20	210	455	270	220	57	11,5
1 1/2″	120	3,3	7; 7,6	24	250	455	270	220	37	13,5
1 1/2″	120	11,5	5,1; 5,7	24	250	455	270	220	57	13,5
2″	135	3,8	7,8; 9,2	28	278	465	290	240	37	16,5
2″	135	14	6; 6,4	28	278	465	290	240	57	16,5

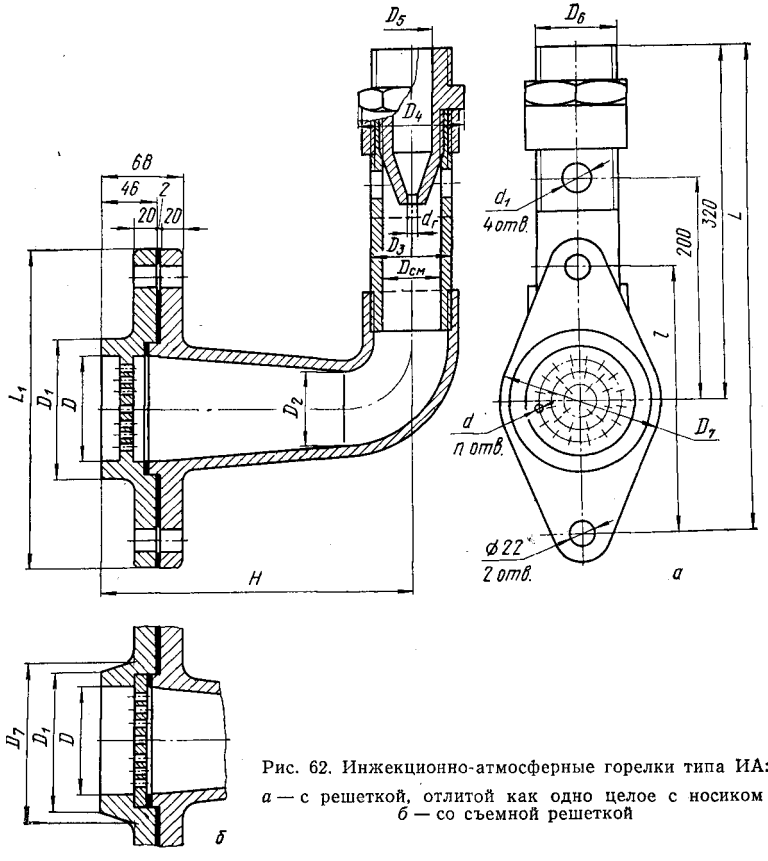


Рис. 62. Инжекционно-атмосферные горелки типа ИА:
а — с решеткой, отлитой как одно целое с носиком
б — со съемной решеткой

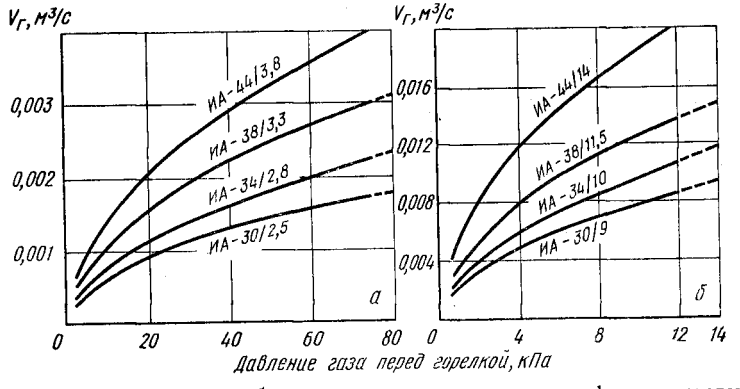


Рис. 63. Пропускная способность по газу инжекционно-атмосферных горелок
а — для природного газа $Q^р_н$=34,95 МДж/м³; *б* — для смешанного газа $Q^р_н$=7,55 МДж/м³

5.8. Двухпроводные инжекционные смесители

Двухпроводные инжекционные смесители, разработанные Стальпроектом, предназначены для работы на холодном природном газе с $Q^р_н$=34,95 МДж/м³ и холодном воздухе в камерах, находящихся под давлением. Смешение газа и воздуха в этих смесителях происходит в трубе Вентури, по которой подают под давлением воздух.

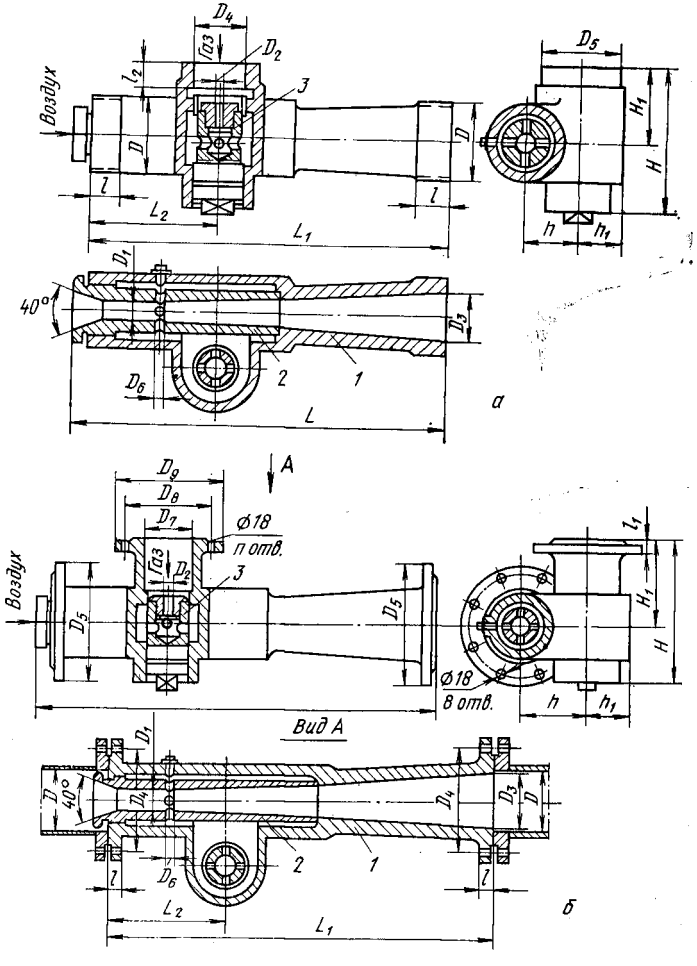


Рис. 64. Двухпроводные инжекционные смесители:
а — D=1÷3″; *б* — D=4÷5″; *1* — корпус смесителя; *2* — диффузор; *3* — газовая насадка

Воздушный поток подсасывает газ, поступающий через отверстия в узком сечении трубы Вентури. Перед смесителем газ проходит через регулятор, поддерживающий его давление равным давлению в камере сгорания, а затем через специально подобранное сопротивление, служащее для настройки и регулировки смешения.

Разработано семь типоразмеров двухпроводных инжекционных смесителей с диаметром подводящей воздушной трубы от 1 до 5″. Каждый типоразмер выполнен в 2—4 вариантах, отличающихся диаметрами проходных сечений на пути газа и воздуха, а следовательно, и пропускной способностью по газу. К одному смесителю можно подсоединить от 1 до 4 горелок.

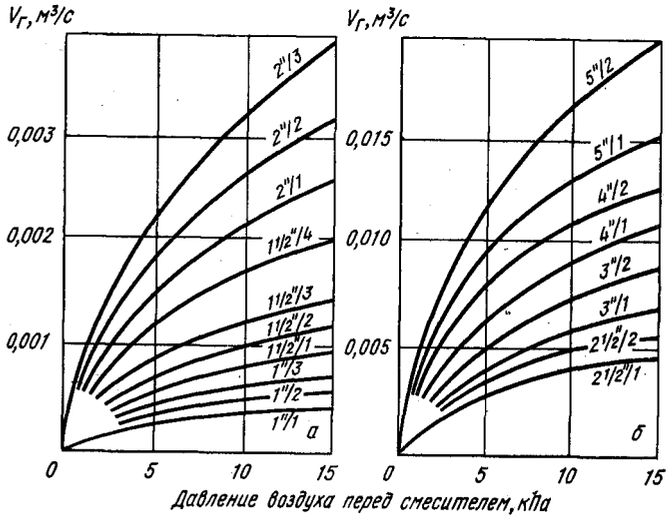


Рис. 65. Пропускная способность по газу двухпроводных инжекционных смесителей: *а* — $D=1\div2$″; *б* — $D=2\frac{1}{2}\div5$″

Двухпроводные инжекционные смесители показаны на рис. 64, а их конструктивные размеры приведены в табл. 25. В табл. 26 для всех типоразмеров и вариантов смесителей приведены диаметр подвода $d_{подв}$ и отвода $d_{отв}$ регулятора нулевого давления газа, а также диаметр подвода к горелке $D_{подв}$ и диаметр носика горелки $d_{н.г}$ в зависимости от количества горелок на один смеситель.

Обозначение двухпроводных инжекционных смесителей состоит из цифры, обозначающей диаметр подводящей воздушной трубы в дюймах, и через косую — цифры, обозначающей номер варианта. Например, обозначение двухпроводного инжекционного смесителя 2″/2 означает: двухпроводный инжекционный смеситель с диаметром подводящей воздушной трубы 2″, второй вариант.

Выбор двухпроводных инжекционных смесителей осуществляется по графику (рис. 65), на котором дана зависимость пропускной способности смесителя по газу от давления воздуха. На графике следует откладывать значение давления воздуха, равное разности между давлением воздуха перед смесителем и в камере сгорания.

Таблица 25

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ДВУХПРОВОДНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ (РИС. 64)

Обозначение смесителя	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	H	H_1	h	h_1	L	L_1	L_2	l	l_1	l_2	Число отверстий n	Масса смесителя, кг
1″/1	1″	6,0	2,0	22	3/4″	38	3	—	—	—	72	40	35	21	192	180	50	20	23	16	—	3,0
1″/2	1″	7,1	2,3	23	3/4″	38	3	—	—	—	72	40	35	21	192	180	50	20	23	16	—	3,0
1″/3	1″	8,0	2,6	24	3/4″	38	3	—	—	—	72	40	35	21	192	180	50	20	23	16	—	3,0
1½″/1	1½″	9,3	3,0	30	1¼″	54	4,5	—	—	—	100	56	40	28	252	240	90	22	25	22	—	4,0
1½″/2	1½″	10,4	3,4	31	1¼″	54	45	—	—	—	100	56	40	28	252	240	90	22	25	22	—	4,0
1½″/3	1½″	11,5	3,8	32	1¼″	54	45	—	—	—	100	56	40	28	252	240	90	22	25	22	—	4,0
1½″/4	1½″	13,2	4,3	34	1¼″	54	45	—	—	—	100	56	40	28	252	240	90	22	25	22	—	4,0
2″/1	2″	14,8	4,8	43	1½″	65	6	—	—	—	119	64	45	35	355	340	145	29	35	27	—	5,6
2″/2	2″	16,5	5,4	45	1½″	65	6	—	—	—	119	64	45	35	355	340	145	29	35	27	—	5,6
2″/3	2″	18,1	5,9	47	1½″	65	6	—	—	—	119	64	45	35	365	340	145	29	35	27	—	5,6
2½″/1	2½″	20,3	6,6	52	2″	82	7,5	—	—	—	143	75	55	45	395	380	135	30	35	25	—	10,6
2½″/2	2½″	22,5	7,3	54	2″	82	7,5	—	—	—	143	75	55	45	395	380	135	30	**35**	25	—	10,6
3″/1	3″	24,7	8,0	62	2½″	95	9	—	—	—	163	85	65	50	468	450	130	35	35	27	—	16,5
3″/2	3″	27,5	8,9	65	2½″	95	9	—	—	—	163	85	65	50	468	450	130	35	35	27	—	16,5
4″/1	4″	30,0	9,8	87	180	220	11	114	160	200	246	146	95	73	678	660	185	21	19	—	4	57,0
4″/1	4″	33,5	10,8	90	180	220	11	114	160	200	246	146	95	73	678	660	185	21	19	—	4	57,0
5″/1	5″	37,0	11,9	108	210	250	14	140	180	220	292	172	135	85	841	820	250	24	22	—	8	73,0
5″/2	5″	41,0	13,3	112	210	250	14	140	180	220	292	172	135	85	841	820	250	24	22	—	8	73,0

* Кроме указанных особо.

Таблица 26

РАЗМЕРЫ РЕГУЛЯТОРА НУЛЕВОГО ДАВЛЕНИЯ И ГОРЕЛОК ДЛЯ ДВУХПРОВОДНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ

Обозначение смесителя	$d_{подв}$	$d_{отв}$	Размеры (мм)* при количестве горелок на один смеситель									
			1		2		3		4			
			$d_{н.г}$	$D_{подв}$	$d_{н.г}$	$D_{подв}$	$d_{н.г}$	$D_{подв}$	$d_{н.г}$	$D_{подв}$	$d_{н.г}$	$D_{подв}$
1″/1	1 1/4″	1″	11	1 1/2″	—	—	—	—	—	—	—	—
1″/2	1 1/4″	1″	13	1 1/2″	—	—	—	—	—	—	—	—
1″/3	1 1/4″	1″	14,5	1 1/2″	—	—	—	—	—	—	—	—
1 1/2″/1	1 1/4″	1″	17	2″	11	1 1/2″	—	—	—	—	—	—
1 1/2″/2	1 1/4″	1″	19	2″	13	1 1/2″	11	1 1/2″	—	—	—	—
1 1/2″/3	1 1/4″	1″	21	2″	14,5	1 1/2″	13	1 1/2″	11	1 1/2″	11	1 1/2″
2 1/2″/4	1 1/4″	1″	24	2″	17	1 1/2″	14,5	1 1/2″	11	1 1/2″	11	1 1/2″
2″/1	1 1/4″	1″	27	2 1/2″	19	1 1/2″	16	1 1/2″	13	1 1/2″	13	1 1/2″
2″/2	1 1/4″	1″	30	2 1/2″	21	2″	17	1 1/2″	14,5	1 1/2″	14,5	1 1/2″
2″/3	1 1/4″	1″	33	80	23	2″	19	1 1/2″	16	1 1/2″	16	1 1/2″
2 1/2″/1	1 1/4″—2″	1″—1 1/2″	37	80	26	2 1/2″	21	2″	18	1 1/2″	18	1 1/2″
2 1/2″/2	1 1/4″—2″	1″—1 1/2″	41	100	30	2 1/2″	23	2″	20	1 1/2″	20	1 1/2″
3″/1	1 1/4″—2″	1″—1 1/2″	45	100	33	80	26	2 1/2″	22	2″	22	2″
3″/2	1 1/4″—2″	1″—1 1/2″	50	100	37	80	30	2 1/2″	24	2″	24	2″
4″/1	2″—3″	1 1/2″—2 1/2″	55	125	39	100	33	80	27	2 1/2″	27	2 1/2″
4″/2	2″—3″	1 1/2″—2 1/2″	61	125	43	100	37	80	30	2 1/2″	30	2 1/2″
5″/1	2″—3″	1 1/2″—2 1/2″	67	150	45	100	39	100	33	80	33	80
5″/2	2″—3″	1 1/2″—2 1/2″	75	150	55	125	43	100	37	80	37	80

* Кроме указанных особо.

График построен для смесителей, приготавливающих газо-воздушную смесь с $\alpha=1{,}05$.

Если требуется двухпроводный инжекционный смеситель, приготавливающий газо-воздушную смесь с $\alpha\neq1{,}05$, то на графике рис. 65 откладывают расчетное значение пропускной способности смесителя по газу (м³/с):

$$V_г = 0{,}935\, V_{0г}\, \alpha^{1,5}, \qquad (46)$$

где $V_{0г}$ — заданная пропускная способность смесителя по газу, м³/с.

При этом в выбранном двухпроводном инжекционном смесителе следует изменить диаметр отверстий в газовой насадке до значения

$$D_2' = 0{,}97 D_2\, \alpha^{0,75}, \qquad (47)$$

где D_2 — диаметр отверстий в газовой насадке, полученный из табл. 25 для выбранного смесителя, мм.

Пример. Подобрать двухпроводный инжекционный смеситель для сжигания $V_{0г}=0{,}008$ м³/с природного газа с $Q_н^р=34{,}95$ МДж/м³ при $\alpha=0{,}9$. Давление воздуха перед смесителем 25 кПа, в камере сгорания 20 кПа.

Давление воздуха $p_в=25-20=5$ кПа.

По формуле (46)

$$V_г^{расч} = 0{,}935 \cdot 0{,}008 \cdot 0{,}9^{1,5} = 0{,}0064 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По графику (см. рис. 65) в соответствии с расчетной пропускной способностью горелки по газу и давлению воздуха, равной 5 кПа, выбираем двухпроводный инжекционный смеситель 4″/1. Необходимый диаметр отверстий в газовой насадке по формуле (47).

$$D_2' = 0{,}97 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}9^{0,75} = 8{,}8 \text{ мм},$$

где $D_2=9{,}8$ мм взято из табл. 25 для двухпроводного инжекционного смесителя 4″/1.

5.9. Скоростные горелки типа ГВ

Для создания высокотемпературной высокоскоростной струи продуктов сгорания применяют скоростные горелки типа ГВ с воздухоохлаждаемой камерой сгорания, разработанные ВНИИпромгазом. Горелки работают на холодном природном газе и подогретом воздухе. Воздух нагревается, охлаждая металлическую камеру сгорания с зауженным выходом. Для хорошего предварительного смешения газ подается мелкими струями в поток подогретого воздуха. Стабильное горение обеспечивается высокой скоростью газо-воздушной смеси. Зажигание горелок осуществляется от электрозапальной свечи.

Разработано 5 типоразмеров горелок с номинальной теплопроизводительностью от 33,7 до 133,7 кВт. Номинальная теплопроизводительность определена при давлении газа перед горелкой 7,5, а воздуха 11 кПа.

Скоростные горелки типа ГВ показаны на рис. 66, а их конст-

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* И ХАРАКТЕРИСТИКА

Обозначение горелки	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	d_2	d_3	H	H_1	H_2	L	L_1	L_2	L_3
ГВ-30	22	57	89	17	12	1,4	$1\frac{1}{4}''$	$\frac{1}{2}''$	135	250	110	460	170	40	160
ГВ-40	25	64	102	21	12	1,7	$1\frac{1}{2}''$	$\frac{1}{2}''$	135	260	110	480	170	45	135
ГВ-60А	30	72	114	25	14	2,0	$2''$	$\frac{1}{2}''$	170	280	140	525	240	55	155
ГВ-85А	36	81	133	30	14	2,4	$2\frac{1}{2}''$	$\frac{3}{4}''$	190	325	160	625	260	85	205
ГВ-120А	42	90	146	35	14	2,9	$2\frac{1}{2}''$	$1''$	190	325	160	670	270	90	230

* Кроме указанных особо.

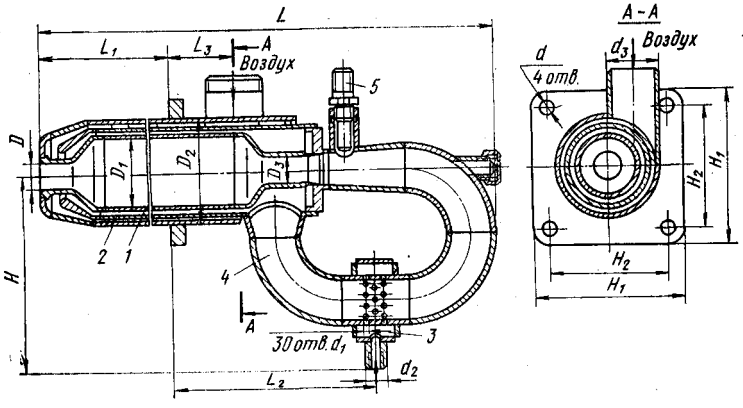


Рис. 66. Скоростная горелка типа ГВ:
1 — камера сгорания; *2* — двухходовой контур охлаждения камеры сгорания; *3* — газовый коллектор; *4* — смеситель; *5* — электрозапальная свеча

руктивные размеры и основные характеристики приведены в табл. 27.

Камера сгорания горелок типа ГВ изготавливается из жаропрочной хромоникелевой стали.

Обозначение горелки состоит из индекса типа горелок и цифры, характеризующей типоразмер горелки. Например, обозначение скоростной горелки ГВ-40 означает: скоростная горелка с водоохлаждаемой камерой сгорания номинальной теплопроизводительностью 47,7 кВт. Выбор скоростных горелок типа ГВ осуществляют, исходя из основных характеристик горелок, приведенных в табл. 27.

Таблица 27

СКОРОСТНЫХ ГОРЕЛОК типа ГВ (РИС. 66)

Масса горелки, кг	Давление перед горелкой, кПа: газа	Давление перед горелкой, кПа: воздуха	Теплопроизводительность, кВт	Пропускная способность по газу, м³/с·10³	Скорость вылета продуктов сгорания из горелки, м/с	Диапазон рабочего регулирования по газу, м³/с·10³
8,0	7	11	33,7	0,97	200	0,14—0,97
	2	3,5	16,7	0,48	100	0,14—0,48
10,5	7	11	47,7	1,39	200	0,19—1,39
	2	3,5	23,3	0,69	100	0,19—0,69
14,0	7	11	66,3	1,94	200	0,28—1,94
	2	3,5	33,7	0,97	100	0,28—0,97
16,0	7	11	95,4	2,78	200	0,40—2,78
	2	3,5	47,7	1,39	100	0,40—1,39
25,0	7	11	133,7	3,89	200	0,56—3,89
	2	3,5	66,3	1,94	100	0,56—19,4

5.10. Горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева

Горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева, разработанная ВНИИМТом и Стальпроектом, предназначена для камер скоростного безокислительного нагрева протяжных печей агрегатов непрерывного горячего цинкования. Горелка работает на холодном природном газе и холодном воздухе. Согласно требованиям технологии горелка работает при $\alpha=0{,}85\div0{,}95$ и обеспечивает содержание свободного кислорода в продуктах сгорания $<0{,}003\%$.

Горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева показана на рис. 67.

Для хорошего предварительного смешения на пути воздуха установлены закручивающие лопатки, которые образуют профилированный смеситель. Газ подается мелкими струями в закрученный поток воздуха. Для стабилизации горения в носике горелки установлены пластины, на которых укреплен стабилизатор горения из колец. Пластины с кольцами разбивают поток газо-воздушной смеси на мелкие струи, в результате чего выравниваются скорости, затрудняется проникновение пламени в горелку, увеличиваются пределы регулирования, а за пластинами и кольцами создаются зоны устойчивого воспламенения. Горелка работает в комплекте с дежурной электрозапальной горелкой.

Номинальная пропускная способность горелки по газу 0,0083 м³/с при давлении перед горелкой газа 13, воздуха 11,5 кПа. Пределы регулирования горелки по газу 0,0055—0,01 м³/ч. Масса 27 кг.

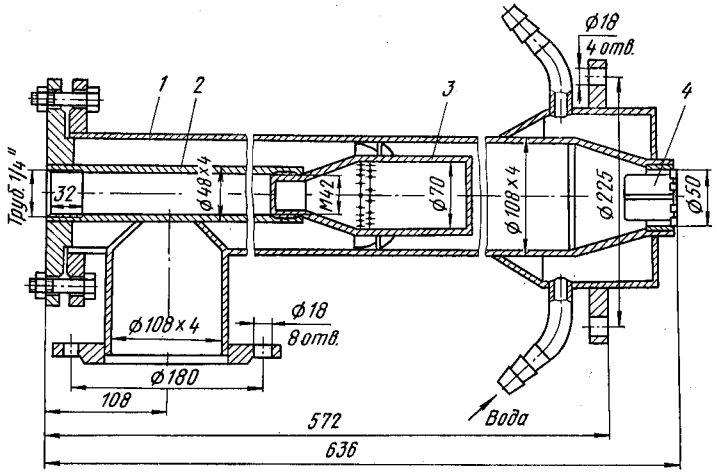


Рис. 67. Горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева:

1 — корпус; *2* — газовая труба; *3* — наконечник газового сопла (завихритель); *4* — стабилизатор горения

5.11. Струйно-стабилизаторные горелки типа СГ

Горелки этого типа, разработанные Киевским политехническим институтом, предназначены для получения низкотемпературных продуктов сгорания при сжигании холодного природного газа и холодного воздуха с повышенным коэффициентом расхода воздуха.

Струйно-стабилизаторные горелки используют главным образом в циркуляционных системах низкотемпературных печей и устанавливают в воздухопроводе после вентилятора.

Горение в них стабилизируют подачей воздуха мелкими струями через перфорированный конус, а газа — радиально в затененные зоны между рядами перфорации. В результате в затененных зонах образуется большое количество мелких факелов, устойчиво горящих при большом избытке воздуха.

К перфорированному конусу приварен цилиндрический стабилизатор, ограничивающий камеру сгорания. Часть воздуха проходит в кольцевую щель между стабилизатором и воздухопроводом, охлаждая стенки камеры сгорания, а затем смешиваясь с продуктами сгорания. В горелку встроены электроды для розжига горелки и контроля горения.

В черной металлургии в основном используют струйно-стабилизаторные горелки крупных типоразмеров СГ-10-4, СГ-16-5 и СГ-90-3,5 рис. 68), конструктивные размеры которых и основные характеристики приведены в табл. 28.

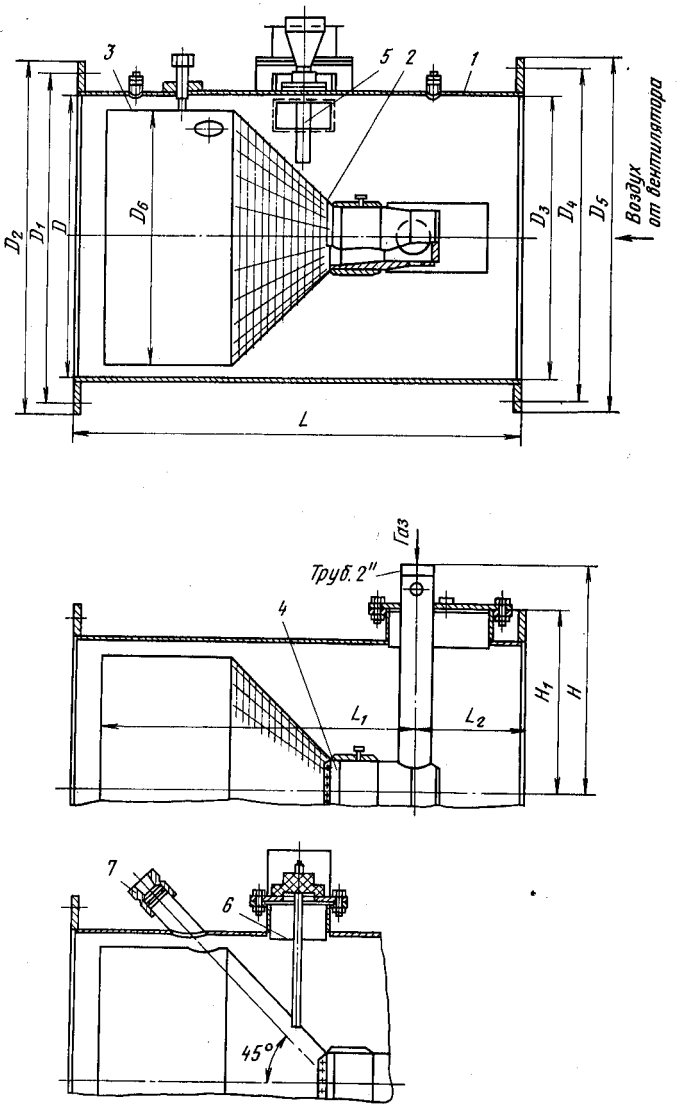


Рис. 68. Струйно-стабилизаторные горелки типа СГ:

1 — воздухопровод; *2* — перфорированный конус струйно-стабилизаторного устройства; *3* — цилиндрический стабилизатор; *4* — газовое сопло; *5* — электрод контроля горения; *6* — электрод для розжига; *7* — гляделка

Таблица 28

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* И ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУЙНО-СТАБИЛИЗАТОРНЫХ ГОРЕЛОК (РИС. 68)

Обозначение горелки	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	d	d_1	d_2	H
СГ-10-4	203	280	315	203	280	315	146	3/4″	18	18	172
СГ-16-5	309	395	435	203	280	315	240	1″	23	18	250
СГ-90-3,5	514	600	640	514	600	640	460	2″	22	22	400

Продолжение

Обозначение горелки	H_1	L	L_1	L_2	Число отверстий n	Число отверстий n_1	Масса горелки, кг	Максимальная пропускная способность по газу, м³/с	α_{max}	Давление перед горелкой, кПа: газа	Давление перед горелкой, кПа: воздуха
СГ-10-4	145	400	192	80	8	8	24,3	0,0028	4,0	6	3
СГ-16-5	160	500	300	150	12	8	35	0,0045	5,0	11	5
СГ-90-3,5	320	800	555	195	16	16	105	0,025	3,5	15	2

* Кроме указанных особо.

5.12. Горелки с переменным избытком воздуха типа ПИВ

Разработанные ВНИИпромгазом горелки типа ПИВ предназначены для получения низкотемпературных продуктов сгорания при сжигании холодного природного газа и холодного воздуха с повышенным коэффициентом расхода воздуха.

В горелках типа ПИВ применен тот же принцип стабилизации, что и в струйно-стабилизаторных горелках типа СГ. Отличие горелок типа ПИВ состоит в том, что для повышения устойчивости горения в них предусмотрены:

камера предварительного смешения части воздуха с газом;

подача на горение подогретого воздуха после охлаждения стенки камеры сгорания;

полностью закрытая камера сгорания, из которой низкотемпературные продукты сгорания выходят через систему отверстий.

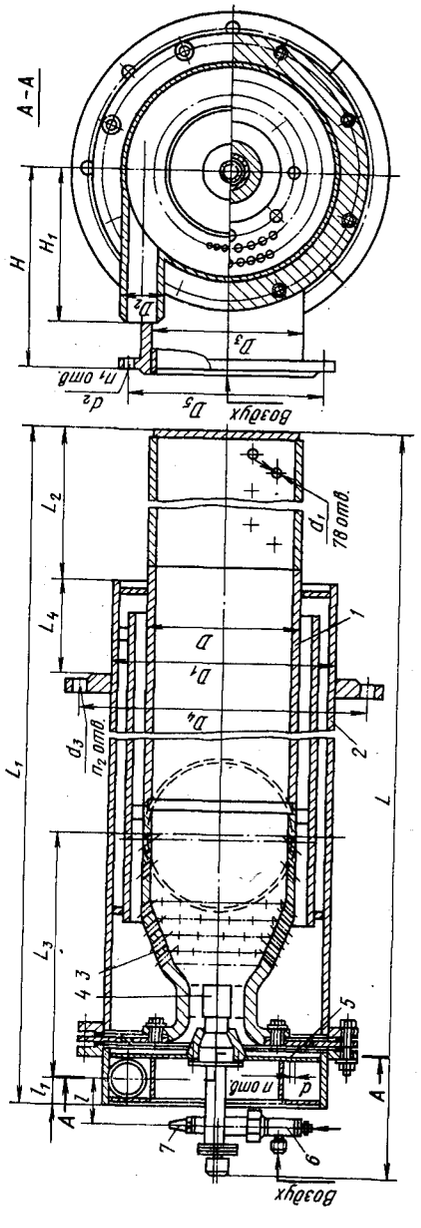


Рис. 69. Горелки с переменным избытком воздуха типа ПИВ:
1 — камера сгорания; *2* — двухходовой контур охлаждения камеры сгорания; *3* — перфорированный конус струйно-стабилизаторного устройства; *4* — газовое сопло; *5* — камера предварительного смешения; *6* — пилотно-защитное устройство; *7* — свеча электрозажигания

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* И ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРЕЛОК

Обозначение горелки	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	d	d_1	d_2	d_3	H	H_1	L
ПИВ-60	121	160	1/2″	75	190	130	2,0	7,0	14	14	160	150	1230
ПИВ-85	133	170	1/2″	102	220	155	2,0	8,5	18	14	170	150	1405
ПИВ-120	146	194	3/4″	108	245	170	2,0	10	18	14	190	150	1525
ПИВ-170	168	220	1″	127	260	185	2,4	12	18	14	200	170	1740
ПИВ-250	180	245	1 1/4″	146	305	210	1,6	13,5	18	18	250	190	1835
ПИВ-340	200	290	1 1/4″	180	360	245	1,9	17	18	18	320	210	1985
ПИВ-450	219	325	1 1/2″	219	420	280	2,1	18,5	18	22	350	220	2180
ПИВ-700	245	365	2″	245	425	310	2,8	23	18	22	400	260	2420

* Кроме указанных особо.

Розжиг горелки и контроль горения осуществляют с помощью пилотно-защитного устройства.

Разработано 8 типоразмеров горелок с номинальной теплопроизводительностью от 69,8 до 814,1 кВт. Номинальная теплопроизводительность определяется при давлении газа перед горелкой 3, воздуха 4 кПа и $\alpha=2,0$. При $\alpha=2,0$ диапазон рабочего регулирования 1 : 8. Можно повысить α до 4,0 путем снижения расхода газа от номинала.

Горелки с переменным избытком воздуха типа ПИВ показаны на рис. 69, а их конструктивные размеры приведены в табл. 29.

Камера сгорания горелок типа ПИВ изготавливается из жаростойкой стали.

Обозначение горелки состоит из индекса типа горелки и цифры, характеризующей типоразмер горелки, например горелка ПИВ-250 означает: горелка с переменным избытком воздуха теплопроизводительностью 290,8 кВт.

Глава 6

ФОРСУНКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

В качестве жидкого топлива для отопления печей в черной металлургии используют, как правило, высоковязкие топочные мазуты. Для транспортирования мазута к форсункам и его распыливания перед сжиганием вязкость мазута снижают путем подогрева до 90—105° С. В черной металлургии для сжигания мазута применяют

Таблица 29

С ПЕРЕМЕННЫМ ИЗБЫТКОМ ВОЗДУХА ТИПА ПИВ (РИС. 69)

L_1	L_2	L_3	l	l_1	Число отверстий			Масса горелки, кг	Теплопроизводительность, кВт	Номинальная пропускная способность по газу, $м^3/с \cdot 10^3$	Диапазон рабочего регулирования по газу, $м^3/с \cdot 10^3$
					n	n_1	n_2				
1105	560	135	80	22	12	4	4	40	69,8	1,94	0,25—1,94
1285	650	165	75	22	18	4	8	55	98,8	2,78	0,36—2,78
1415	800	170	70	25	24	4	8	78	139,6	3,89	0,49—3,89
1640	840	185	70	27	24	8	8	102	197,7	5,56	0,69—5,56
1725	900	220	70	30	72	8	12	126	290,8	7,78	0,97—7,78
1895	1000	250	65	32	72	8	12	175	395,4	11,11	1,39—11,11
2085	1130	350	64	37	72	8	8	235	523,4	15,28	1,94—15,28
2335	1250	465	60	40	72	8	12	320	814,1	22,22	2,78—22,22

форсунки высокого и низкого давления с паровым и пневматическим распыливанием.

В форсунках высокого давления в качестве распылителя используют компрессорный воздух или пар высокого давления. Необходимое давление воздуха $P=400\div600$ кПа, удельный расход 1,0—1,5 кг/кг мазута; пар может быть сухой насыщенный или перегретый под давлением $P=700\div900$ кПа; удельный расход пара 0,8—1,0 кг/кг мазута. Применение высоконапорного распылителя в форсунках высокого давления позволяет получить высокое качество распыливания мазута и обеспечить эффективное его сжигание при достаточно высоких пределах регулирования. Кроме того, можно создать форсунки высокой единичной пропускной способности по мазуту. Поэтому форсунки высокого давления используют в крупных металлургических печах. Для получения длинного и жесткого факела применяют форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД, при необходимости иметь более короткий и широкий факел используют короткофакельные форсунки системы Карабина типа ФК.

В форсунках низкого давления распылителем является идущий на сгорание воздух низкого давления. Поэтому качество распыливания и сжигания здесь хуже, а пределы регулирования ниже, чем в форсунках высокого давления. Кроме того, форсунки низкого давления имеют меньшую пропускную способность по мазуту.

Достоинство форсунок низкого давления заключается в том, что они не нуждаются в подводе высоконапорного распылителя; их применяют в основном на небольших металлургических печах. Наибольшее распространение получили форсунки низкого давления конструкции Стальпроекта.

Расчет форсунок основан на формулах истечения и имеет целью определить проходные сечения для мазута, распылителя и воздуха, идущего на сгорание. Расчет проходных сечений для воздуха, иду-

щего на сгорание, аналогичен расчету проходных сечений для воздуха в горелках без предварительного смешения и поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Особенность представляет расчет проходных сечений для распылителя в форсунках высокого давления, так как в этих форсунках с целью лучшего использования сверхкритического давления распылителя и получения более высокой скорости его выхода используются сечения типа сопла Лаваля. Кроме того, в форсунках высокого давления возникает необходимость дополнительно рассчитывать камеру смешения.

Учитывая, что расчет мазутного сопла для форсунок высокого и низкого давления аналогичен, в разделе 6.1 приведена как наиболее общий случай методика расчета форсунок высокого давления.

6.1. Расчет форсунок высокого давления

При расчете форсунок высокого давления обычно бывают заданы параметры мазута $p_м$, $T_м$, $\rho_м$ и распылителя $P_р$, $T_р$, $\rho_{ор}$, пропускная способность форсунки по мазуту $B_м$ и удельный расход распылителя q.

Схема расчета форсунки высокого давления с двойным распыливанием показана на рис. 70. Обычный порядок расчета форсунок высокого давления следующий.

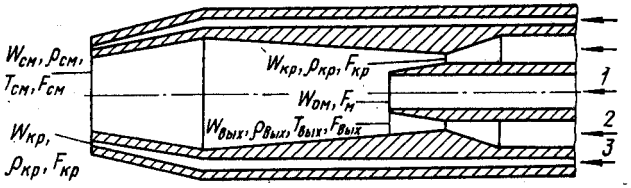


Рис. 70. Расчетная схема форсунки высокого давления:
1 — мазут; *2* — распылитель первичный; *3* — то же, вторичный

Скорость истечения мазута и сопла (м/с) определяют по формуле

$$w_м = \mu \sqrt{\frac{2p_м}{\rho_м}}, \qquad (48)$$

Коэффициент истечения мазута из сопла μ можно принять равным 0,2, а плотность мазута $\rho_м = 960$ кг/м³.

Диаметр мазутного сопла, мм

$$d_м = \sqrt{\frac{B_м \cdot 10^6}{0{,}785 w_м \rho_м}}. \qquad (49)$$

По формулам (48) и (49) построен график (рис. 71), по которому можно определить диаметр мазутного сопла в зависимости от заданной пропускной способности форсунки по мазуту и давления мазута перед форсункой.

Во избежание засорения и закоксовывания мазутного сопла его диаметр должен быть не менее 3 мм.

Расчет проходных сечений для распылителя производится по формулам для сверхкритического давления газа.

Скорость распылителя (м/с) в критическом (узком) сечении сопла Лаваля определяют по формуле

$$w_{0кр} = \varphi M P_р \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{ор} T_р P_р}}, \qquad (50)$$

где для воздуха $M = 0{,}685$; $\rho_{ор} = 1{,}29$ кг/м³;

для сухого насыщенного пара $M = 0{,}635$; $\rho_{ор} = 0{,}804$ кг/м³;

для перегретого пара $M = 0{,}667$; $\rho_{ор} = 0{,}804$ кг/м³.

Коэффициент истечения φ для сопла Лаваля можно принять равным 0,8.

Площадь критического сечения сопла Лаваля, мм²

$$F_{кр} = \frac{B_м q \cdot 10^6}{w_{0кр} \rho_{ор}}. \qquad (51)$$

При двойном распыливании значение q следует брать в соответствии с удельным расходом распылителя в рассчитываемой ступени.

Площадь выходного (конечного) сечения (мм²) сопла Лаваля определяют по формуле

$$F_{вых} = F_{кр} A \qquad (52)$$

(значение A берут по табл. 11 соответственно для воздуха или пара в зависимости от их давления перед форсункой).

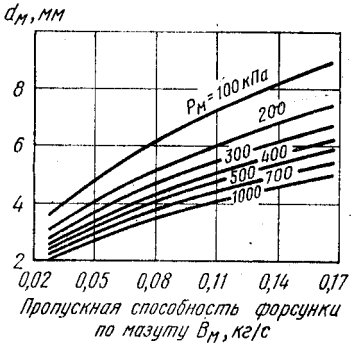


Рис. 71. Определение диаметра мазутного сопла

Далее рассчитывают смеситель, в который поступают весь мазут и весь (в форсунках одноступенчатого распыливания) или первичный (в форсунках двойного распыливания) распылитель через выходное сечение сопла Лаваля.

Плотность распылителя (кг/м³), поступающего в смеситель, определяют по формуле

$$\rho_{вых} = \rho_{ор} \frac{T_0}{T_р} П. \qquad (53)$$

(значение $П$ для воздуха или пара берут по табл. 11 в зависимости от их давления перед форсункой).

Скорость распылителя (м/с), поступающего в смеситель, определяют по формуле

$$w_{вых} = \frac{B_м q \cdot 10^6}{F_{вых} \rho_{вых}} \qquad (54)$$

(значение q берут в соответствии с удельным расходом распылителя, поступающего в смеситель).

Суммарная кинетическая энергия (Дж/кг) в начальном сечении

смесителя, отнесенная к 1 кг мазута, складывается из кинетической энергии мазута и распылителя:

$$E_{\text{нач}} = \frac{w_{\text{м}}^2}{2} + \frac{w_{\text{вых}}^2}{2} q. \quad (55)$$

Расход энергии (Дж/кг) на смешение, отнесенный к 1 кг мазута, определяют по формуле

$$E_{\text{см}} = \frac{(w_{\text{вых}} - w_{\text{м}})^2}{2} \cdot \frac{q}{1+q}. \quad (56)$$

Радиус капли распыленного мазута, м

$$r = 0{,}275 / \left(w_{\text{вых}}^2 \rho_{\text{вых}}\right). \quad (57)$$

Расход энергии на распыливание 1 кг мазута (Дж/кг) определяют по формуле

$$E_{\text{расп}} = 3\sigma/(\rho_{\text{м}} r), \quad (58)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения мазута (в зависимости от сорта и температуры мазута изменяется в пределах 0,024—0,033 Н/м).

Кинетическую энергию в выходном (конечном) сечении смесителя, отнесенную к 1 кг мазута (Дж/кг), определяют по формуле

$$E_{\text{кон}} = \frac{E_{\text{нач}} \eta_{\text{см}} - E_{\text{см}} - E_{\text{расп}}}{\eta_{\text{см}}}, \quad (59)$$

где $\eta_{\text{см}}$ — коэффициент полезного действия смесителя, равный 0,8—0,9.

Скорость смеси (м/с) в выходном сечении смесителя

$$w_{\text{см}} = \sqrt{2E_{\text{кон}}/(1+q)}. \quad (60)$$

Температура распылителя (К), поступающего в смеситель,

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{р}}/П. \quad (61)$$

Энтальпию мазута и распылителя, поступающих в смеситель, отнесенную к 1 кг мазута (Дж/кг), определяют по формуле

$$i_{\text{нач}} = c_{\text{м}} T_{\text{м}} + c_{\text{р}} T_{\text{вых}} q, \quad (62)$$

где $c_{\text{м}}$ и $c_{\text{р}}$ — теплоемкость мазута и распылителя соответственно, Дж/(кг·град). В зависимости от сорта и температуры мазута $c_{\text{м}} = 1880 \div 2050$ Дж/(кг·град).

Тепло смешения и трения, отнесенное к 1 кг мазута (Дж/кг), определяют по формуле

$$i_{\text{п}} = E_{\text{нач}} - E_{\text{кон}} - E_{\text{расп}}. \quad (63)$$

Температура смеси в выходном сечении смесителя, К

$$T_{\text{см}} = \frac{i_{\text{нач}} + i_{\text{п}}}{c_{\text{м}} + c_{\text{р}} q}. \quad (64)$$

Плотность смеси в выходном сечении смесителя, кг/м³

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{0\text{р}} \frac{T_0}{T_{\text{см}}}. \quad (65)$$

Площадь выходного сечения смесителя, мм²

$$F_{\text{см}} = \frac{B_{\text{м}} q \cdot 10^6}{w_{\text{см}} \rho_{\text{см}}}. \quad (66)$$

Для расчета диаметров подводящих трубопроводов можно пользоваться номограммой приложения II, определив предварительно объемы сред. При этом рекомендуется принимать следующие скорости в подводящих трубопроводах: мазут 0,5—1,5 м/с, компрессорный воздух 15—20 м/с, сухой насыщенный пар 20—30 м/с, перегретый пар 30—60 м/с. Рекомендации о скоростях вентиляторного воздуха, идущего на сгорание, даны в табл. 1.

В корпусе форсунки допускается увеличение скоростей на 20—30%.

Пример. Рассчитать форсунку высокого давления с двойным распыливанием для сжигания $B_{\text{м}} = 0{,}028$ кг/с мазута. Давление мазута перед форсункой $p_{\text{м}} = 200$ кПа; температура 90° С. Распылитель — компрессорный воздух под давлением $P_{\text{р}} = 600$ кПа с температурой $t_{\text{р}} = 50$° С. Удельные расходы первичного и вторичного распылителя одинаковы и равны $q = 0{,}65$ кг/кг мазута.

По формуле (48)

$$w_{\text{м}} = 0{,}2 \sqrt{\frac{2 \cdot 200\,000}{960}} = 4{,}08 \text{ м/с}.$$

По формуле (49)

$$d_{\text{м}} = \sqrt{\frac{0{,}028 \cdot 10^6}{0{,}785 \cdot 4{,}08 \cdot 960}} = 3{,}0 \text{ мм}.$$

Можно также определить $d_{\text{м}}$ по графику на рис. 71 при заданной пропускной способности форсунки по мазуту $B_{\text{м}} = 0{,}028$ кг/с и давлении мазута перед форсункой $p_{\text{м}} = 200$ кПа.

По формуле (50)

$$w_{0\text{кр}} = 0{,}8 \cdot 0{,}685 \cdot 600\,000 \sqrt{\frac{273}{1{,}29 \cdot 323 \cdot 103\,300}} = 826{,}3 \text{ м/с}.$$

По формуле (51)

$$F_{\text{кр}} = \frac{0{,}028 \cdot 0{,}65 \cdot 10^6}{826{,}3 \cdot 1{,}29} = 17{,}2 \text{ мм}^2.$$

Если принять наружный диаметр мазутного сопла в критическом сечении сопла Лаваля $d_{\text{нар}}^{\text{кр}} = 10$ мм, то внутренний диаметр промежуточной трубы, образующей сопло Лаваля должен быть равен

$$d_{\text{вн}}^{\text{кр}} = \sqrt{\left(d_{\text{нар}}^{\text{кр}}\right)^2 + \frac{F_{\text{кр}}}{0{,}785}} = \sqrt{10^2 + \frac{17{,}2}{0{,}785}} = 11 \text{ мм}.$$

По формуле (52) $F_{\text{вых}} = 17{,}2 \cdot 1{,}45 = 24{,}9$ мм², где $A = 1{,}45$ (по табл. 11 для воздуха при $P_0/P_{\text{р}} = 103{,}3 : 600 = 0{,}172$).

Наружный диаметр мазутного сопла и внутренний диаметр промежуточной трубы в выходном сечении сопла Лаваля должны быть выбраны так, чтобы обеспечить необходимую площадь сечения

$F_{вых}=24{,}9$ мм². Из конструктивных соображений эта площадь может быть несколько увеличена, так как это не приведет к снижению скорости воздуха в выходном сечении сопла Лаваля.

По формуле (53)

$$\rho_{вых}=1{,}29\frac{273}{323}1{,}65=1{,}8\ \text{кг/м}^3,$$

где $\Pi=1{,}65$ (по табл. 11 для воздуха при $P_0/P_р=0{,}172$).

По формуле (54)

$$w_{вых}=\frac{0{,}028\cdot0{,}65\cdot10^6}{24{,}9\cdot1{,}8}=405{,}6\ \text{м/с}.$$

По формуле (55)

$$E_{нач}=\frac{4{,}0^2}{2}+\frac{405{,}6^2}{2}0{,}65=53\,474\ \text{Дж/кг}.$$

По формуле (56)

$$E_{см}=\frac{(405{,}6-4{,}0)^2}{2}\cdot\frac{0{,}65}{1+0{,}65}=31\,767\ \text{Дж/кг}.$$

По формуле (57)

$$r=\frac{0{,}275}{405{,}6^2\cdot1{,}8}=0{,}928\cdot10^{-6}\ \text{м}.$$

По формуле (58)

$$E_{расп}=\frac{3{,}0\cdot0{,}028}{960\cdot0{,}928\cdot10^{-6}}=94\ \text{Дж/кг}.$$

По формуле (59)

$$E_{кон}=\frac{53\,474\cdot0{,}8-31\,767-94}{0{,}8}=13\,647\ \text{Дж/кг}.$$

По формуле (60)

$$w_{см}=\sqrt{\frac{2\cdot13\,647}{1+0{,}65}}=128{,}6\ \text{м/с}.$$

По формуле (61)

$$T_{вых}=323:1{,}65=196\ \text{К}\ (-77^\circ\text{С}).$$

По формуле (62)

$$i_{нач}=1960\cdot363+1000\cdot196\cdot0{,}65=838\,880\ \text{Дж/кг},$$

где 1000 — теплоемкость воздуха, Дж/(кг·град.); 1960 — теплоемкость мазута. Дж/(кг·град).

По формуле (63)

$$i_п=53\,474-13\,647-94=39\,733\ \text{Дж/кг}.$$

По формуле (64)

$$T_{см}=\frac{838\,880+39\,733}{1960+1000\cdot0{,}65}=337\ \text{К}\ (64^\circ\text{С}).$$

По формуле (65)

$$\rho_{см}=1{,}29\frac{273}{337}=1{,}045\ \text{кг/м}^3.$$

По формуле (66)

$$F_{см}=\frac{0{,}028\cdot0{,}65\cdot10^6}{128{,}6\cdot1{,}045}=135{,}4\ \text{мм}^2.$$

Диаметр выходного сечения смесителя $d_{см}=\sqrt{F_{см}/0{,}785}=\sqrt{134{,}4:0{,}785}=13{,}1$ мм (принимаем $d_{см}=13$ мм).

Площадь выхода для вторичного распылителя должна быть равна площади критического сечения сопла Лаваля, так как расширяющаяся часть сопла для вторичного распылителя отсутствует. Если принять наружный диаметр выходного сечения промежуточной трубы равным $d_{нар}^{вых}=17$ мм, то внутренний диаметр выходного сечения внешней трубы, образующей сечение для выхода вторичного распылителя, должен быть равен

$$d_{вн}^{вых}=\sqrt{(d_{нар}^{вых})^2+\frac{F_{кр}}{0{,}785}}=\sqrt{17^2+\frac{17{,}2}{0{,}785}}=17{,}6\ \text{мм}.$$

Принимаем $d_{вн}^{вых}=18$ мм.

Объемный расход мазута

$$V_м=\frac{B_м}{\rho_м}=\frac{0{,}028}{960}=0{,}000029\ \text{м}^3/\text{с},$$

Принимаем скорость в подводящем мазутопроводе $w_м^{вх}=0{,}5$ м/с. Тогда проходное сечение мазутопровода должно быть равно

$$F_м=\frac{V_м\cdot10^6}{w_м^{вх}}=\frac{0{,}000029\cdot10^6}{0{,}5}=58\ \text{мм}^2,$$

а проходной диаметр мазутопровода

$$d_м^{вх}=\sqrt{\frac{F_м}{0{,}785}}=\sqrt{\frac{58}{0{,}785}}=8{,}5\ \text{мм}.$$

Плотность компрессорного воздуха в подводящем воздухопроводе

$$\rho_р=\rho_{0р}\frac{T_0}{T_р}\cdot\frac{P_р}{P_0}=1{,}29\frac{273}{323}\cdot\frac{600}{103{,}3}=6{,}33\ \text{кг/м}^3.$$

Объемный расход первичного или вторичного распылителя

$$V_р=\frac{B_м q}{\rho_р}=\frac{0{,}028\cdot0{,}65}{6{,}33}=0{,}00288\ \text{м}^3/\text{с}.$$

Принимаем скорость компрессорного воздуха в подводящем воздухопроводе $w_р=20$ м/с. По номограмме приложения II находим, что при необходимом расходе распылителя и принятой его скорости проходной диаметр для первичного и вторичного распылителя $d_р$ должен быть равен 13,5 мм.

6.2. Форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД

Разработанные Стальпроектом форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД предназначены для сжигания мазута с холодным или подогретым воздухом. В качестве распылителя применен компрессорный воздух под давлением $P_в$=600 кПа с удельным расходом 1,3 кг/кг мазута или сухой насыщенный пар под давлением $P_п$=700÷750 кПа с удельным расходом 1,0 кг/кг мазута.

Форсунки высокого давления устанавливаются в форсуночных коробках, через которые подается воздух для горения. Схема установки форсунки высокого давления типа ФВД в форсуночной коробке показана на рис. 72.

Разработано 7 типоразмеров форсунок номинальной пропускной способностью по мазуту от 0,028 до 0,167 кг/с (для давления мазута перед форсункой $p_м$=200 кПа).

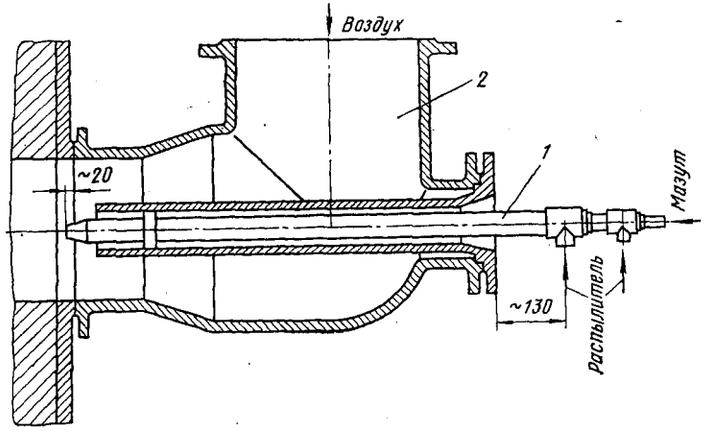


Рис. 72. Установка форсунки высокого давления с двойным распыливанием в форсуночной коробке:
1 — форсунка; *2* — форсуночная коробка

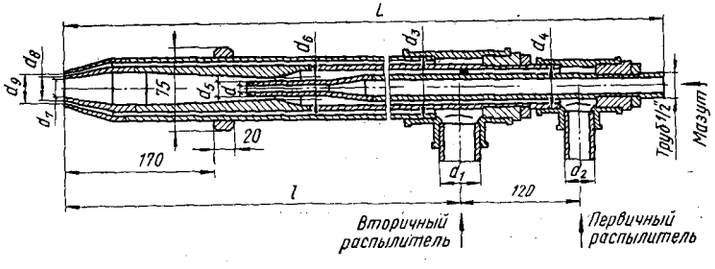


Рис. 73. Форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД

Форсунки высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД показаны на рис. 73, а их конструктивные размеры приведены в табл. 30.

Форсунки с номинальной пропускной способностью по мазуту 0,083 и 0,111 кг/с выполнены в двух вариантах, различающихся только длиной. Выбор той или иной длины форсунки зависит от размеров примененной форсуночной коробки.

Обозначение форсунки состоит из индекса типа форсунки и цифры, характеризующей номинальную пропускную способность форсунки по мазуту, например форсунка ФВД-200 обозначает: форсунка высокого давления с двойным распыливанием, имеющая номинальную пропускную способность по мазуту 0,056 кг/с.

Форсунку типа ФВД выбирают по графику (рис. 74) в зависимости от не-

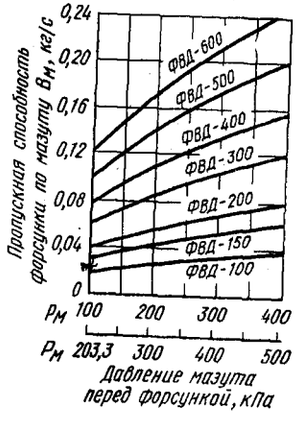


Рис. 74. Пропускная способность по мазуту форсунок высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД

Таблица 30

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ФОРСУНОК ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С ДВОЙНЫМ РАСПЫЛИВАНИЕМ ТИПА ФВД (РИС. 73)

Обозначение форсунки	Номинальная пропускная способность по мазуту, кг/с	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	L	l	Масса форсунки, кг
ФВД-100	0,028	3,0	1/2"	1/2"	1 1/2"	1"	10	10,8	12	16	17	1270	1050	10,2
ФВД-150	0,042	3,8	3/4"	1/2"	1 1/2"	1"	10	11,3	15	19	20	1270	1050	10,2
ФВД-200	0,056	4,3	3/4"	1/2"	1 1/2"	1"	10	11,7	17	21	22	1270	1050	10,2
ФВД-300-I	0,083	5,3	1"	3/4"	2"	1 1/4"	10	12,5	21	25	26	1270	1050	12,9
ФВД-300-II	0,083	5,3	1"	3/4"	2"	1 1/4"	10	12,5	21	25	26	1470	1250	14,8
ФВД-400-I	0,111	6,0	1"	3/4"	2"	1 1/4"	10	13,0	24	28	29	1270	1050	12,9
ФВД-400-II	0,111	6,0	1"	3/4"	2"	1 1/4"	10	13,0	24	28	29	1470	1250	14,8
ФВД-500	0,139	6,8	1 1/4"	1"	2"	1 1/4"	13	16,0	27	31	32	1470	1250	14,9
ФВД-600	0,167	7,5	1 1/4"	1"	2"	1 1/4"	13	16,5	29	33	34	1470	1250	14,9

* Кроме указанных особо.

обходимой пропускной способности по мазуту и давления мазута перед ней.

Форсуночные коробки (рис. 75, табл. 31) для установки форсунок высокого давления могут использоваться для подачи воздуха,

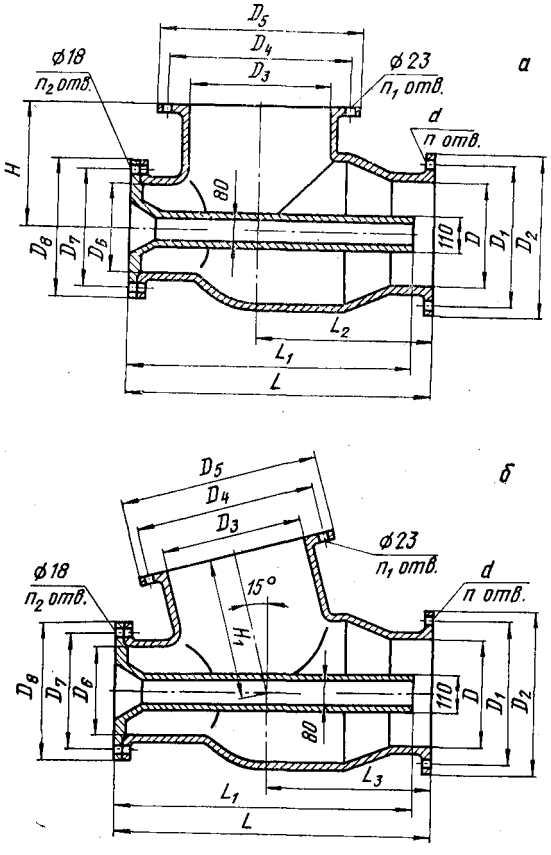


Рис. 75. Форсуночные коробки: *а* — с вертикальным подводом воздуха; *б* — с подводом, отклоненным на 15° от вертикали

подогретого до 400° С. Разработаны коробки двух типов: А — с патрубком для подвода воздуха, расположенным под углом 90° к оси коробки, и Б — с патрубком, расположенным под углом 75° к оси коробки. Каждый из этих типов включает коробки 12-ти типоразмеров.

Обозначение форсуночных коробок состоит из буквы, соответствующей типу коробки, и цифры, соответствующей типоразмеру коробки, например, форсуночная коробка А8 означает: форсуночная коробка типа А; типоразмер 8.

Выбор форсуночной коробки производится по графику (рис. 76) в зависимости от необходимой пропускной способности форсуночной коробки по воздуху и его давления перед форсуночной коробкой. График построен для холодного (20° С) воздуха. При подогреве воздуха выбор форсуночной коробки производится по расчетному количеству воздуха, которое определяется так же, как для горелок типа «труба в трубе».

Пример. Подобрать форсунку и форсуночную коробку для сжигания, $B_м = 0{,}125$ кг/с мазута; $p_м = 250$ кПа; $p_в = 0{,}6$ кПа; $t_в = 400$°С; $\alpha = 1{,}1$.

По графику (см. рис. 74) находим, что заданной пропускной способности по мазуту и давлению мазута перед форсункой отвечает форсунка ФВД-400.

По рис. I—1 приложения I находим $L_0 = 10{,}44$ м³/кг мазута.

$$V_{0в} = \alpha L_0 B_м = 1{,}1 \cdot 10{,}44 \cdot 0{,}125 = 1{,}44 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$V_в^{расч} = V_{0в} k_t = 1{,}44 \cdot 1{,}52 = 2{,}18 \text{ м}^3/\text{с},$$

где k_t определяется по формуле (7) или по графику на рис. 15 при $t_в = 400$° С.

По графику (см. рис. 76) находим, что расчетному количеству воздуха и заданному его давлению соответствует форсуночная коробка № 10.

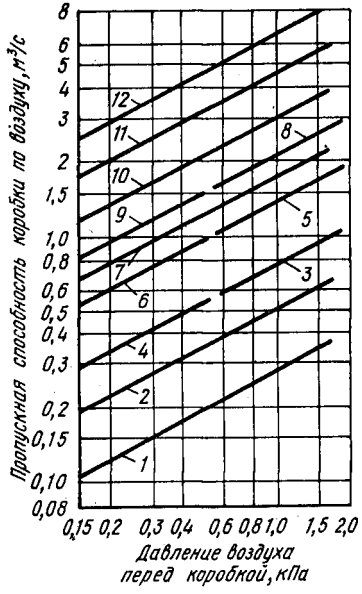


Рис. 76. Пропускная способность по воздуху форсуночных коробок (цифры на кривых соответствуют номерам типоразмеров коробок)

Выбираем форсуночную коробку А10. По табл. 31 длина этой коробки 1100 мм, поэтому выбираем форсунку ФВД-400-II, размер которой по табл. 30 $L_1 = 1250$ мм, что позволяет правильно установить форсунку в форсуночной коробке (см. рис. 72).

Выбранная форсунка требует для распыления $0{,}125 \cdot 1{,}3 = 0{,}163$ кг/с компрессорного воздуха, или $0{,}125 \cdot 1{,}0 = 0{,}125$ кг/с пара.

6.3. Короткофакельные форсунки системы карабина типа ФК

Такие форсунки (рис. 77, табл. 32) предназначены для сжигания мазута с холодным или подогретым воздухом. Короткий факел в этих форсунках образуется в результате подачи распылителя под углом к струе мазута, вытекающего из сопла.

Для центрирования форсунок предусмотрены ребра, а для крепления — подвижной фланец, который приваривается к форсунке после установки.

Таблица 31

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ФОРСУНОЧНЫХ КОРОБОК (РИС. 75)

Номер типоразмера	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	d	H	H_1	L	L_1	L_2	L_3	Число отверстий n	Число отверстий n_1	Число отверстий n_2	Масса коробки, кг
1	150	225	260	250	350	390	150	240	280	18	250	300	900	850	525	500	8	12	8	184
2	175	255	290	250	350	390	150	240	280	18	250	300	900	850	525	500	8	12	8	188
3	200	280	315	250	350	390	150	240	280	18	250	300	900	850	525	500	8	12	8	192
4	200	280	315	300	400	440	150	240	280	18	300	300	900	850	550	500	8	12	8	204
5	250	335	370	300	400	440	150	240	280	18	300	300	900	950	550	500	12	12	8	209
6	250	335	370	350	460	510	150	240	280	18	300	300	900	950	550	500	12	16	8	219
7	275	365	400	300	400	440	150	240	280	18	300	300	900	850	550	500	12	12	8	214
8	300	395	435	400	495	535	150	240	280	23	400	400	900	850	550	475	12	16	8	254
9	300	395	435	450	550	590	250	335	370	23	400	400	1100	1050	600	600	12	16	12	347
10	350	445	485	500	600	640	250	335	370	23	400	400	1100	1050	650	600	12	16	12	363
11	425	520	560	500	600	640	250	335	370	23	400	400	1100	1050	650	600	12	16	12	374
12	500	600	640	570	885	945	250	335	370	23	450	500	1100	1050	650	575	12	20	12	432

Таблица 32

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* КОРОТКОФАКЕЛЬНЫХ ФОРСУНОК ТИПА ФК (РИС. 77)

Обозначение форсунки	Номинальная пропускная способность по мазуту, кг/с	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	H	h	L	Масса форсунки, кг
ФК-250	0,07	4	3/8"	14	40	48	25	85	115	14	62	14	1485	17
ФК-350	0,1	4,5	1/2"	16	43	53	31	100	135	18	60	16	1485	21
ФК-550	0,15	5,5	3/4"	20	50	60	38	110	145	18	70	18	1705	30

* Кроме указанных особо.

Форсунки типа ФК имеют одноступенчатое распыливание. В качестве распылителя применяют компрессорный воздух под давлением $P_в = 450 \div 600$ кПа с удельным расходом 1,3 кг/кг мазута или перегретый пар $P_п = 700 \div 900$ кПа, $T_п = 220 \div 250°$ С с удельным расходом 1,0 кг/кг мазута.

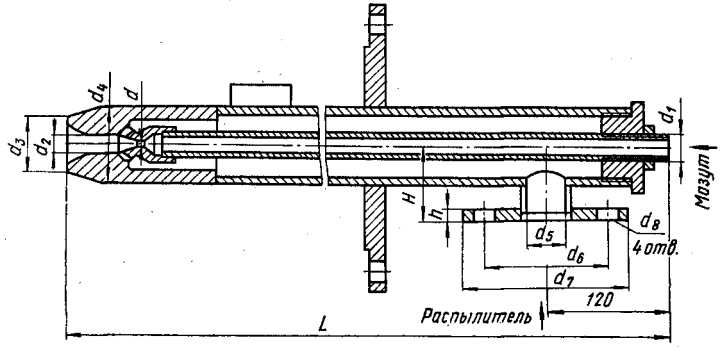


Рис. 77. Короткофакельные форсунки системы Карабина типа ФК

Форсунки типа ФК устанавливают в форсуночных коробках аналогично форсункам типа ФВД (см. рис. 72).

Разработаны форсунки трех типоразмеров: ФК-250, ФК-350 и ФК-550 с номинальной пропускной способностью по мазуту соответственно 0,07; 0,1 и 0,15 кг/с, определенной при давлении мазута перед форсункой $p_м = 200$ кПа.

Выбор короткофакельных форсунок типа ФК производится по графику (рис. 78) в зависимости от необходимой пропускной способности форсунки по мазуту и располагаемого давления мазута перед форсункой.

Выбор форсуночной коробки для форсунки типа ФК производится так же, как и для форсунки типа ФВД по графику на рис. 76.

Пример. Подобрать форсунку и форсуночную коробку для сжигания $B_м = 0{,}09$ кг/с мазута. Давление мазута перед форсункой $p_м = 300$ кПа. Давление воздуха перед форсуночной коробкой $P_в = 1{,}2$ кПа, температура подогрева воздуха $t_в = 300°$ С; $\alpha = 1{,}15$.

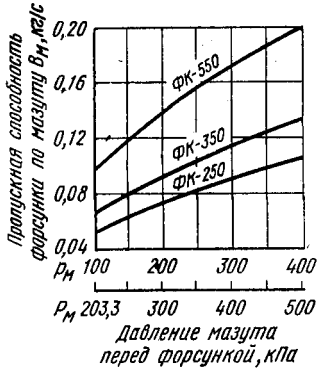


Рис. 78. Пропускная способность по мазуту короткофакельных форсунок типа ФК

По графику (см. рис. 78) находим, что заданной пропускной способности по мазуту и давлению мазута перед форсункой соответствует форсунка ФК-250.

Из предыдущего примера $L_0 = 10{,}44$ м³/кг мазута.

$$V_{0в} = \alpha L_0 B_м = 1{,}15 \cdot 10{,}44 \cdot 0{,}09 = 1{,}08 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$V_в^{расч} = V_{0в} k_t = 1{,}08 \cdot 1{,}4 = 1{,}51 \text{ м}^3/\text{с},$$

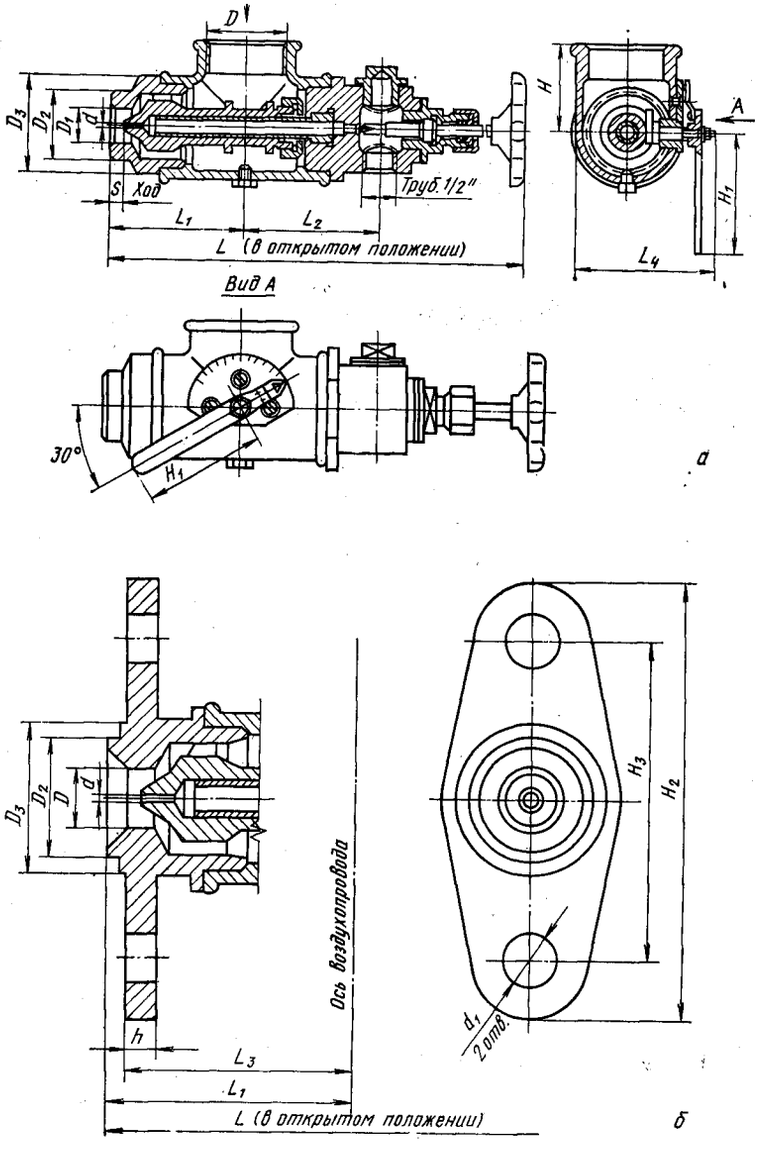


Рис. 79. Форсунки низкого давления:
а — с бесфланцевой головкой; *б* — с фланцевой головкой

где k_t определяют по приведенной выше формуле (см. с. 33) или по графику (см. рис. 15) при $T_в = 400°$ С.

По графику (см. рис. 76) находим, что расчетному количеству воздуха и заданному его давлению соответствует форсуночная коробка № 5.

Необходимое для распыливания количество компрессорного воздуха 0,09·1,3=0,117 кг/с или пара 0,09·1,0=0,09 кг/с.

6.4. Форсунки низкого давления конструкции стальпроекта

Разработанные Стальпроектом форсунки низкого давления (рис. 79, табл. 33) предназначены для сжигания мазута в смеси с холодным воздухом.

Распыливание мазута в этих форсунках производится воздухом, подаваемым вентилятором. Оптимальное давление воздуха перед форсункой не менее 5 кПа, минимально допустимое для работы форсунки 3 кПа.

Оптимальное давление мазута перед форсункой 100—150 кПа, минимальное 50 кПа. Оптимальные условия работы форсунки соответствуют пределам регулирования 1 : 2. При уменьшении количества подаваемого мазута до $^1/_3$ от максимального резко ухудшаются условия его распыливания.

Разработано 6 типоразмеров форсунок низкого давления с подводом воздуха от $D_у$=40 мм ($1^1/_2''$) до $D_у$=200 мм (8″).

Форсунки с подводом воздуха $D_у$=70 мм ($2^1/_2''$) и 100 мм (4″) выполнены в двух вариантах, отличающихся диаметрами носика.

Каждый типоразмер форсунки выполнен с двумя типами головки: без фланца (рис. 79, *а*) и с фланцем (рис. 79, *б*), кроме типоразмеров с подводом воздуха $D_у$=150 мм (6″) и 200 мм (8″), головки которых не имеют фланца.

Для регулирования подачи воздуха мазутное сопло форсунки выполнено перемещающимся вдоль оси форсунки, что позволяет изменять сечение для выхода воздуха. Перемещение производится

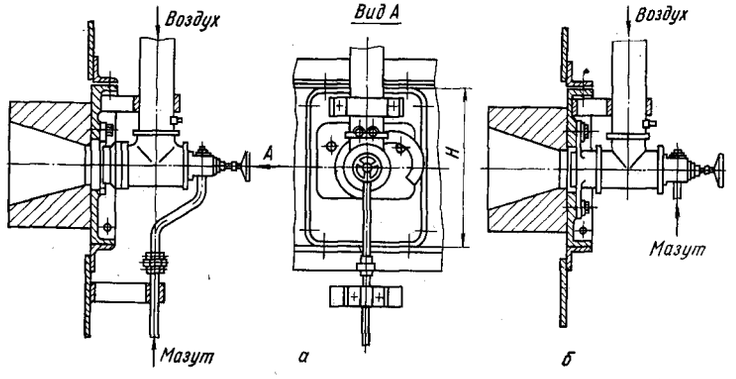


Рис. 80. Установка форсунок низкого давления:
а — с бесфланцевой головкой; *б* — с фланцевой головкой

Таблица 33

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ФОРСУНОК НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ (РИС. 79)

Обозначение форсунки	Тип головки	Исполнение** форсунки: левое	Исполнение** форсунки: правое	D	D_1	D_2	D_3	d	d_1	H	H_1	H_2	H_3	h	L	L_1	L_2	L_3	L_4	s	Масса форсунки, кг
D_y40 (1 1/2″)	Без фланца	I	II	1 1/2″	21	40	55	2	—	50	70	—	—	—	253	78	79	—	79	6	3,0
	С фланцем	III	IV	1 1/2″	21	40	50	2	18	50	70	150	110	10	259	84	79	77	79	6	3,4
D_y70 (2 1/2″)	Без фланца	I	III	2 1/2″	30	75	95	3	—	69	135	—	—	—	327	117	104	—	123	13	6,8
	С фланцем	V	VII	2 1/2″	30	75	95	3	18	69	135	250	200	12	335	125	104	115	123	13	7,9
	Без фланца	II	IV	2 1/2″	40	75	95	3	—	69	135	—	—	—	327	117	104	—	123	13	6,7
	С фланцем	VI	VIII	2 1/2″	40	75	95	3	18	69	135	250	200	12	335	125	104	115	123	13	7,9
D_y100 (4″)	Без фланца	I	III	4″	52	110	135	4	—	96	135	—	—	—	399	161	132	—	160	16	14,6
	С фланцем	V	VII	4″	52	110	135	4	22	96	135	280	220	15	407	169	132	159	160	16	15,7
	Без фланца	II	IV	4″	60	110	135	4	—	96	135	—	—	—	399	161	132	—	160	16	14,7
	С фланцем	VI	VIII	4″	60	110	135	4	22	96	135	280	220	15	407	169	132	159	160	16	15,8
D_y125 (5″)	Без фланца	I	II	5″	75	110	155	5	—	125	135	—	—	—	487	205	187	—	194	35	24,1
	С фланцем	III	IV	5″	75	110	140	5	22	125	135	280	220	15	495	213	187	203	194	35	25,6
D_y150 (6″)	Без фланца	I	II	6″	95	160	215	5	—	125	150	—	—	—	499	205	176	—	245	32	39,0
D_y200 (8″)	«	I	II	8″	125	180	240	4	—	160	230	—	—	—	565	240	206	—	275	42	56,0

* Кроме указанных особо.
** Имеется в виду расположение рукоятки воздушного клапана.

вручную с помощью воздушного клапана, управляющая рукоятка которого выведена на боковую стенку форсунку. В зависимости от того, на какую боковую стенку выведена рукоятка воздушного клапана, различают ее левое и правое расположение (на рис. 79 показано левое расположение рукоятки воздушного клапана).

Установка форсунок низкого давления показана на рис. 80. Форсунки с бесфланцевой головкой крепят к воздухоподводящей трубе (рис. 80, *а*) а с фланцем — к форсуночной плите (рис. 80, *б*). Форсунку следует устанавливать так, чтобы подвод воздуха был расположен над форсункой, так как при подводе снизу в нем возможно скопление мазута, вытекающего при неполном закрытии мазутного кра-

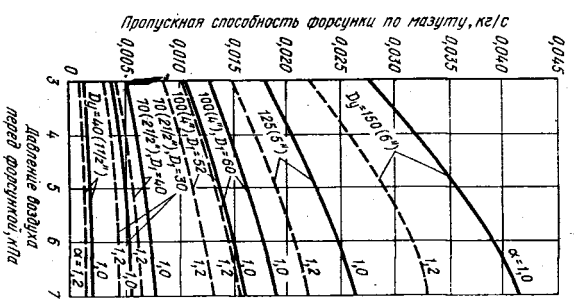


Рис. 81. Пропускная способность по мазуту форсунок низкого давления

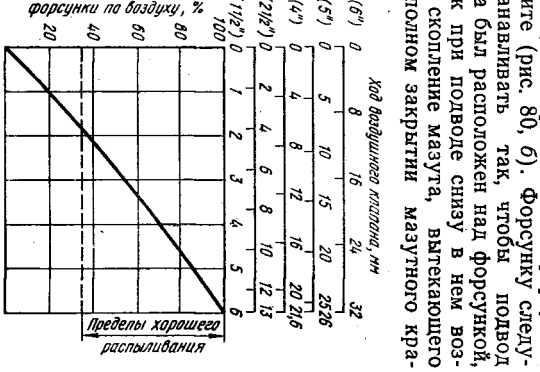


Рис. 82. Пропускная способность по воздуху форсунок низкого давления при различном положении рукоятки воздушного клапана

ка во время отключения форсунки. Ось трубки для мазута должна совпадать с осью воздухопровода, что дает возможность поворачивать форсунку для прочистки сопла.

В обозначение форсунок низкого давления конструкции Стальпроекта входит условный диаметр подвода воздуха, выраженный в миллиметрах или в дюймах, номер исполнения форсунки (см. табл. 33) в зависимости от типа головки и направления вывода рукоятки воздушного клапана, а для форсунок с D_y=70 мм (2½″) и D_y=100 мм (4″) и от диаметра носика. Например, «Форсунка низкого давления D_y 70 (2½″), исполнение V» означает: Форсунка низкого давления с условным диаметром подвода воздуха D_y 70 мм (2½″), диаметром носика D_1=30 мм, имеющая головку с фланцем и левое расположение рукоятки воздушного клапана.

Выбор форсунок низкого давления осуществляют по графику (рис. 81) в зависимости от заданной пропускной способности форсунки по мазуту, давления воздуха перед форсункой и коэффициента

расхода воздуха. График построен для полностью открытого воздушного клапана.

При снижении нагрузки на форсунку регулирование производится вручную с помощью воздушного клапана. Для удобства регулирования рукоятка воздушного клапана снабжена стрелкой-указателем, которая перемещается по циферблату, фиксируя воздушный клапан в шести положениях. На рис. 82 показаны пропускная способность форсунки по воздуху в процентах от максимальной и линейный ход воздушного клапана для различных типоразмеров форсунок в зависимости от показания стрелки воздушного клапана на циферблате.

Возможно также подрегулирование и перекрытие подачи мазута путем перемещения вдоль оси форсунки мазутной иглы, управляющий маховик которой выведен на торец форсунки.

Пример. Подобрать форсунку низкого давления для сжигания $B_м$=0,015 кг/с мазута. Давление воздуха перед форсункой 6 кПа, коэффициент расхода воздуха 1,2.

По графику (см. рис. 81) находим, что этим условиям отвечает форсунка низкого давления $D_у$ 100 (4″) с диаметром носика D_1= =60 мм. Если требуется форсунка с бесфланцевой головкой и правым расположением рукоятки воздушного клапана, то по табл. 33 выбираем форсунку низкого давления $D_у$ 100 (4″), исполнение IV.

Глава 7

ГАЗО-МАЗУТНЫЕ ГОРЕЛКИ

В печных агрегатах металлургии газо-мазутные горелки применяют в тех случаях, когда при газовом отоплении необходимо иметь мазутный резерв. Одновременное сжигание газа и мазута не практикуется. Поэтому для отопления применяют, как правило, сочетание газовой горелки типа «труба в трубе» и вставленной в нее форсунки высокого давления типа ФВД или ФК.

Наиболее простым конструктивным решением является размещение форсунки в газовом сопле горелки типа «труба в трубе». Такая конструкция позволяет быстро перевести отопление с газа на мазут и наоборот. Обычно в качестве газовой горелки используют горелки типа ДВБ, ДНБ, ДВС или ДНС; диаметр газового сопла горелки увеличивают с тем, чтобы сохранить расчетное сечение, а конструкцию колена меняют для крепления на нем фланца форсунки. Примеры размещения форсунок высокого давления в горелках типа «труба в трубе» показаны на рис. 83.

При такой конструкции газо-мазутной горелки форсунку нельзя вынимать из газового сопла, так как при этом изменится проходное сечение для газа. Постоянное нахождение форсунки в горелке при работе на газе требует регулярного ухода за форсункой для поддержания ее в работоспособном состоянии.

Форсунку необходимо систематически продувать распылителем для удаления мазута, протекающего через неплотную запорную арматуру. После работы на мазуте из форсунки необходимо удалить остатки мазута, иначе при работе на газе носик форсунки закоксуется и ее дальнейшая эксплуатация будет невозможной без чистки.

Для того чтобы устранить этот недостаток, форсунку высокого давления размещают в специальной трубе, проходящей по центру газового сопла. В этом случае газовый и мазутный узлы горелки независимы и при работе на газе форсунку можно вынимать из горелки, а при переходе на мазут вставлять ее обратно. Недостатком такого размещения форсунки является значительное увеличение по-

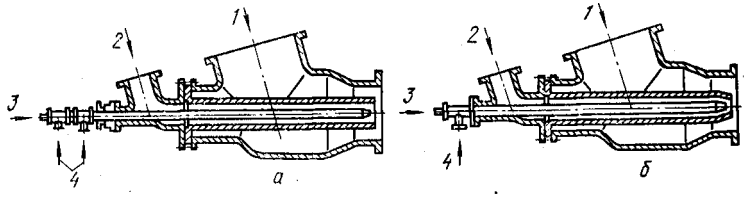


Рис. 83. Размещение форсунок высокого давления в газовых горелках типа «труба в трубе»:
а — форсунка типа ФВД; *б* — форсунка типа ФК; *1* — воздух; *2* — газ; *3* — мазут; *4* — распылитель

перечных размеров горелки. Примером газо-мазутной горелки с размещением форсунки высокого давления в специальной трубе является конструкция газо-мазутных горелок для нагревательных печей московского металлургического завода «Серп и молот».

В последнее время для отопления печей газом и мазутом применяют специальные газо-мазутные горелки, среди которых наибольшее распространение получили горелки типа ГКВГ и КГМГ-А, разработанные Волгоградским ВНИИТмашем и ГМР ВНИИПромгаза.

В горелках типа ГКВГ распыление мазута производится вентиляторным воздухом, как в форсунках низкого давления. Эти горелки имеют сравнительно небольшую пропускную способность и узкие пределы регулирования по мазуту.

В горелках типа КГМГ-А распыление мазута производится компрессорным воздухом с использованием акустического излучателя. Это улучшает качество распыления, повышает пределы регулирования по мазуту и позволяет повысить пропускную способность горелки по мазуту. Однако для горелки в этом случае необходим подвод компрессорного воздуха.

7.1. Газо-мазутные горелки нагревательных печей завода «Серп и молот»

Газо-мазутные горелки, разработанные Стальпроектом для нагревательных печей завода «Серп и молот», показаны на рис. 84, а их конструктивные размеры приведены в табл. 34.

Горелки предназначены для сжигания холодной смеси природного и коксового газов с теплотой сгорания 28,0 МДж/м³. Разработано 3 типоразмера горелок с номинальной пропускной способностью по газу 0,11; 0,17 и 0,28 м³/с.

Номинальная пропускная способность определена при давлении газа перед горелкой 5 кПа. В эти горелки вставляют форсунки высокого давления соответственно ФВД-300, ФВД-400 и ФВД-600.

Каждая горелка выполнена в двух вариантах с различным вы-

ходным сечением для воздуха. Выходное сечение для воздуха изменяют с помощью насадок.

На графиках рис. 85 показана пропускная способность газо-мазутных горелок по газу и воздуху в зависимости от их давления перед горелкой. Графики построены для холодного (20° С) газа с

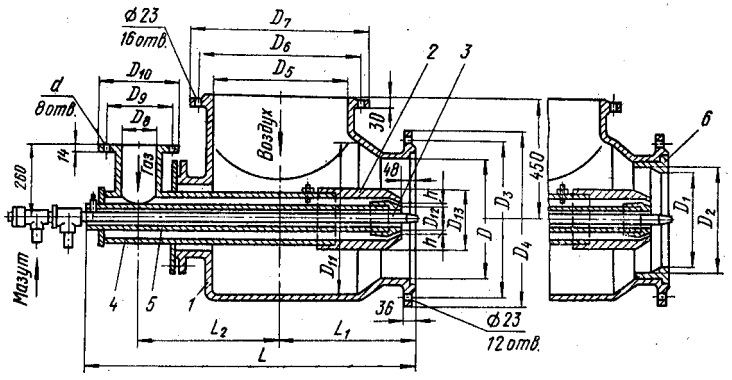


Рис. 84. Газо-мазутные горелки для нагревательных печей завода «Серп и молот»:

1 — корпус горелки; *2* — газовое сопло; *3* — форсунка высокого давления; *4* — газопроводящая труба; *5* — центральная труба; *6* — воздушная насадка

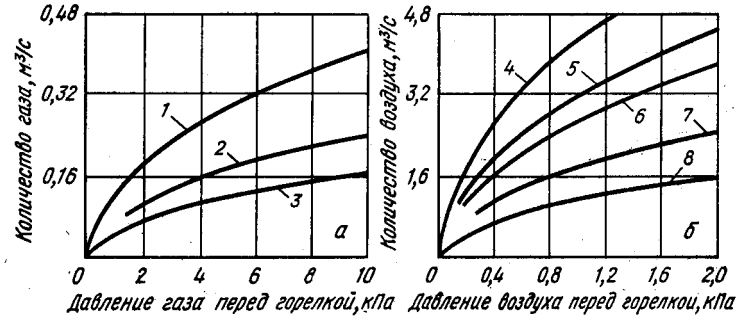


Рис. 85. Пропускная способность газо-мазутных горелок для нагревательных печей завода «Серп и молот» по газу (*а*) и по воздуху (*б*) для горелок с номинальной пропускной способностью, м³/с:

1 — 0,28; *2* — 0,17; *3* — 0,11; *4* — 0,28, вариант I; *5* — 0,28, вариант II; *6* — 0,17, вариант I; *7* — 0,17, вариант II и 0,11, вариант I; *8* — 0,11, вариант II

теплотой сгорания 28,0 МДж/м³ и плотностью 0,65 кг/м³ и для холодного (20° С) воздуха. При других условиях выбор горелок следует производить по расчетному количеству газа и воздуха, как при выборе горелок типа «труба в трубе».

7.2. Газо-мазутные горелки типа ГКВГ

Газо-мазутные комбинированные горелки высокоинтенсивного горения типа ГКВГ (рис. 86, табл. 35), разработанные Волгоград-

Таблица 34

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ГАЗО-МАЗУТНЫХ ГОРЕЛОК ДЛЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ЗАВОДА «СЕРП И МОЛОТ» (РИС. 84)

Номинальная пропускная способность горелки по газу, м³/с	Вариант	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}	D_{13}	d	h	L	L_1	L_2	Масса горелки, кг
0,11	I	—	260	320	490	550	400	495	535	120	210	245	460	104	190	18	4	1088	480	440	400
	II	—	260	280	490	550	400	495	535	120	210	245	460	104	190	18	4	1088	480	440	400
0,17	I	370	—	—	490	550	400	495	535	120	210	245	460	100	190	18	6	1088	480	440	350
	II	—	260	320	490	550	400	495	535	120	210	245	460	100	190	18	6	1088	480	440	350
0,28	I	450	—	—	570	630	500	600	640	139	240	280	560	100	200	22	10	1198	500	510	430
	II	—	370	400	570	630	500	600	640	139	240	280	560	100	200	22	10	1198	500	510	430

Таблица 35

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ГАЗО-МАЗУТНЫХ ГОРЕЛОК ТИПА ГКВГ (РИС. 86)

Обозначение горелки	Номинальная пропускная способность по газу, м³/с	D	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_1	d_2	d_3	d_4	H	L	L_1	L_2	L_3	Масса, кг: горелки	Масса, кг: горелочной плиты	Масса, кг: горелочного камня
ГКВГ-15	0,0042	70	130	160	45	75	2,0	23	30	40	14	110	324	282	112	225	11,0	26,3	37,7
ГКВГ-25	0,0069	80	150	185	70	85	2,0	32	38	50	18	110	334	292	117	235	16,0	26,1	37,5
ГКВГ-50	0,0139	100	150	185	75	100	2,5	44	52	68	18	140	386	344	149	277	19,5	25,7	37,0
ГКВГ-75	0,0208	120	170	205	85	115	3,0	54	62	80	18	150	418	376	169	309	33,0	25,3	33,0
ГКВГ-100	0,0278	140	200	235	100	130	3,2	62	72	95	18	170	440	398	181	331	36,6	24,9	33,0

ским ВНИИТмашем, предназначены для сжигания природного газа и мазута с холодным воздухом. Горелки дают короткий и широкий факел.

Давление воздуха перед горелкой должно быть не менее 3 кПа, мазута — не менее 150 кПа, температура мазута не ниже 80° С. Пределы регулирования горелки по газу 1 : 5, по мазуту 1 : 2.

Разработано 5 типоразмеров горелок с номинальной пропускной способностью по природному газу от 0,0042 до 0,0278 м³/с. Номи-

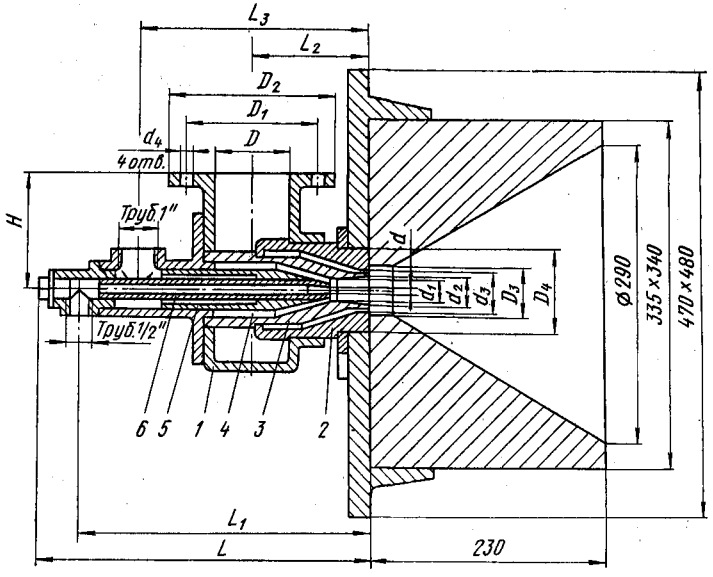


Рис. 86. Газо-мазутные горелки типа ГКВГ:

1 — корпус; *2* — насадка; *3* — большая вихревая камера; *4* — малая вихревая камера с эжектором; *5* — газовая трубка; *6* — мазутная труба

нальная пропускная способность определена при давлении газа перед горелкой 30 кПа.

Воздух, поступающий в горелку, разделяется на два потока и вводится тангенциально через несколько отверстий в малую и большую вихревые камеры, образуя в них вихревые потоки.

Во время работы горелки на природном газе газ через тангенциальные отверстия в газовой трубе поступает в малую вихревую камеру, где встречается и интенсивно перемешивается с вихревым потоком воздуха. Дальнейшее перемешивание происходит в эжекторе. На выходе из горелки газо-воздушная смесь подхватывается закрученным потоком вторичного воздуха, выходящим из большой вихревой камеры. Образуется широкий короткий закрученный факел.

Во время работы горелки на мазуте последний на выходе из сопла попадает в эжектор малой вихревой камеры, где встречается с закрученным воздушным потоком.

Из-за большой разницы скоростей этих потоков происходит дробление мазутной струи на капли и интенсивное смесеобразование. На выходе из горелки мазуто-воздушная смесь перемешивается с потоком вторичного воздуха и сгорает в коротком широком факеле.

При работе горелки в центре вихревого факела создается разрежение, которое препятствует закоксовыванию мазутного сопла, а после окончания работы на мазуте очищает мазутное сопло от остатков топлива.

Обозначение горелок состоит из индекса типа горелок и через дефис цифры, характеризующей номинальную пропускную способность горелки по газу; например, ГКВГ-50:

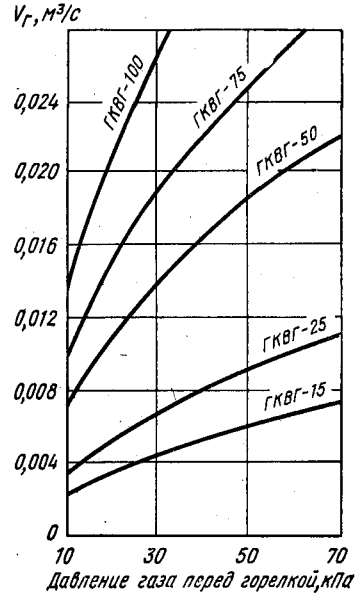


Рис. 87. Пропускная способность по газу газо-мазутных горелок типа ГКВГ

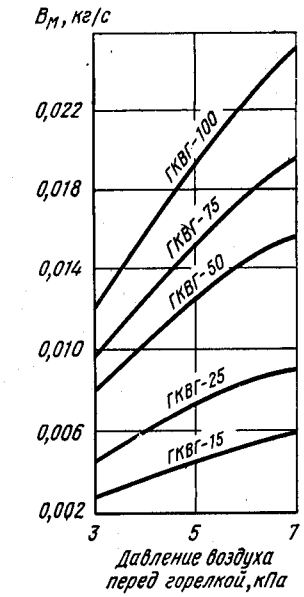


Рис. 88. Пропускная способность по мазуту газо-мазутных горелок типа ГКВГ

горелка комбинированная высокоинтенсивного горения с номинальной пропускной способностью по газу 0,0139 м³/с.

Выбор газо-мазутных горелок типа ГКВГ производится по графикам (рис. 87 и 88). Кривые на рис. 87 построены для природного газа с $Q^р_н$=33,5 МДж/м³, $\rho_{0г}$=0,742 кг/м³ при α=1,02. Кривые на рис. 88 построены для мазута марки 100 с $Q^р_н$=39,8÷40,4 МДж/кг, подогретого до 80° С (ВУ-15,5), α=1,1.

При выборе горелок сначала по графику на рис. 87 определяют необходимый типоразмер горелки. Затем для выбранного типоразмера по графику на рис. 88 находят давление воздуха перед горелкой.

Пример. Подобрать газо-мазутную горелку типа ГКВГ для сжигания $V_{0г}=0{,}02$ м³/с природного газа с теплотой сгорания $Q_н^р=33{,}5$ МДж/м³. Давление газа перед горелкой $p_г=35$ кПа. Горелка должна сохранять теплопроизводительность при работе на мазуте $Q_н^р=40{,}0$ МДж/кг.

По графику (см. рис. 87) находим, что заданной пропускной способности по газу и располагаемому давлению газа отвечает газо-мазутная горелка ГКВГ-75.

Необходимая пропускная способность горелки по мазуту

$$B_м = V_{0г}\frac{(Q_н^р)_г}{(Q_н^р)_м} = 0{,}02\frac{33{,}5}{40{,}0} = 0{,}0168 \text{ кг/с}.$$

По графику на рис. 88 находим, что для обеспечения необходимой пропускной способности горелки ГКВГ-75 по мазуту давление вентиляторного воздуха перед горелкой должно быть 5,6 кПа.

7.3. Газо-мазутные горелки типа КГМГ-А

Газо-мазутные комбинированные горелки с акустическим излучателем типа КГМГ-А, разработанные Волгоградским ВНИИТмашем (рис. 89, табл. 36), предназначены для сжигания природного газа и мазута с холодным или подогретым до 400° С воздухом.

Давление вентиляторного воздуха перед горелкой должно быть не менее 3 кПа, мазута от 50 до 300 кПа, компрессорного воздуха не менее 100 кПа, температура мазута не ниже 80° С. Пределы регулирования горелки по газу и мазуту примерно 1 : 5; количество компрессорного воздуха 0,8 м³/кг мазута. При работе на газе компрессорный воздух не подают.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ)* ГАЗО-МАЗУТНЫХ

Обозначение горелки	Номинальная пропускная способность по газу, м³/с	D	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_1	H	L	L_1
КГМГ-А1	0,0042	65	130	160	40	75	1″	13	100	320	280
КГМГ-А2	0,0069	80	150	185	48	90	1″	17	100	390	350
КГМГ-А3	0,0139	90	170	205	60	120	1″	17	120	403	372
КГМГ-А4	0,0208	120	200	235	70	130	1″	17	140	437	397
КГМГ-А5	0,0278	130	200	235	80	140	1″	17	150	476	436
КГМГ-А6	0,0347	140	225	260	90	150	1″	17	160	491	451
КГМГ-А7	0,0417	160	225	260	100	160	1″	17	190	511	471
КГМГ-А8	0,0556	180	255	290	115	180	1 1/4″	17	220	555	515

* Кроме указанных особо.

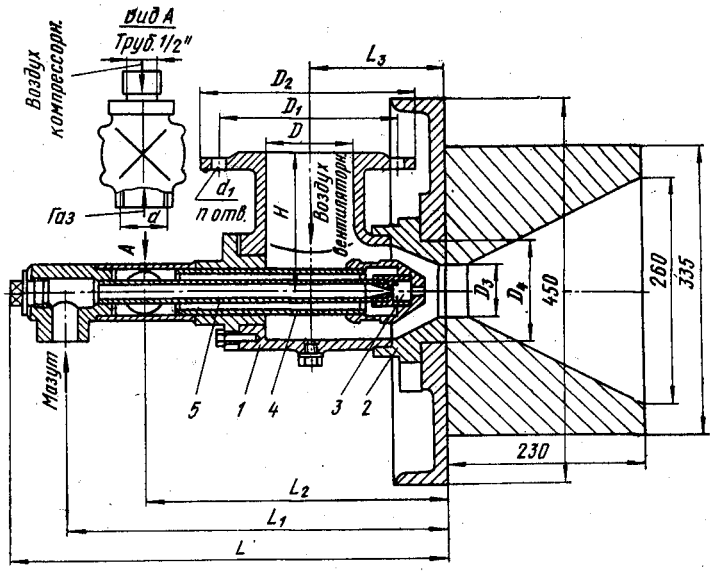


Рис. 89. Газо-мазутные горелки типа КГМГ-А:
1 — корпус; *2* — насадка; *3* — акустический излучатель; *4* — газовая труба; *5* — мазутная труба

Разработано 8 типоразмеров горелок КГМГ-А1 — КГМГ-А8 с номинальной пропускной способностью по газу от 0,0042 до 0,0556 м³/с. Номинальная пропускная способность определена при давлении газа перед горелкой 60 кПа.

Таблица 36

ГОРЕЛОК ТИПА КГМГ-А (РИС. 89)

L_2	L_3	Число отверстий n	Масса, кг: горелки	горелочной плиты	горелочного камня
218	100	4	7,5	26,5	37,5
278	136	4	13,6	26,0	37,5
300	155	4	24,0	25,4	37,5
325	165	4	23,3	25,0	37,0
359	190	8	25,0	27,2	37,0
374	200	8	28,4	26,9	37,0
394	210	8	36,0	30,5	40,0
432	230	8	42,0	30,0	40,0

При работе горелки на мазуте компрессорный воздух подается в горелку по газовой трубе и через тангенциальные отверстия попадает в акустический излучатель, где создает вихревые потоки. Выходя из сопла акустического излучателя вихревые потоки создают акустическое поле, которое улучшает распыление мазута, интенсифицирует процессы перемешивания топлива с воздухом и горения.

Кроме того, акустический излучатель защищает мазутное сопло от воздействия высоких температур, а создающиеся в нем вихревые потоки имеют разрежение по оси, что препятствует закоксовыванию мазутного сопла.

При работе на газе, проходя через акустический излучатель,

вихревые потоки газа также создают акустическое поле, которое улучшает перемешивание газа с воздухом.

Выбор горелок КГМГ-А производят по графикам (рис. 90 и 91), на которых приведена зависимость пропускной способности горелок соответственно по газу и воздуху от их давления перед горелкой. Кривые построены для тех же условий, что и на рис. 87 и 88.

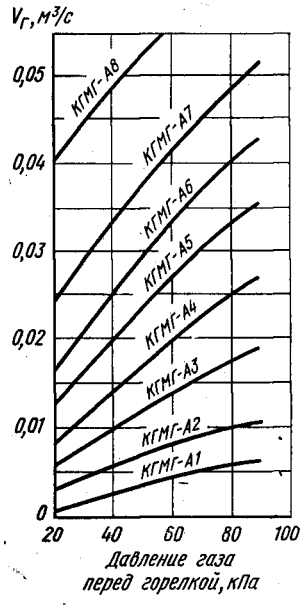


Рис. 90. Пропускная способность по газу газо-мазутных горелок типа КГМГ-А

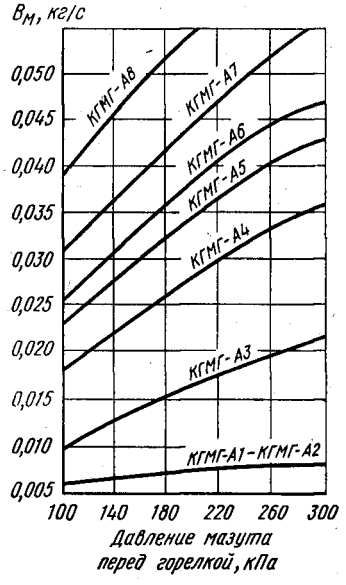


Рис. 91. Пропускная способность по мазуту газо-мазутных горелок типа КГМГ-А

При подогреве воздуха на графиках следует откладывать расчетное количество газа и мазута, которое определяют так же, как для горелок типа «труба в трубе».

Пример. Для условий предыдущего примера выбрать газо-мазутную горелку типа КГМГ-А. Давление газа перед горелкой 55 кПа. Воздух нагрет до $t_в = 200°$ С.

Расчетное количество газа

$$V_г^{расч} = V_{0г} k_t = 0{,}02 \cdot 1{,}27 = 0{,}0254 \text{ м}^3/\text{с},$$

где поправка на температуру k_t определяется по формуле, приведенной выше, или по графику на рис. 15 при температуре воздуха $t_в = 200°$ С.

По графику (см. рис. 90) находим, что расчетному количеству газа и давлению газа перед горелкой соответствует газо-мазутная горелка КГМГ-А5.

Расчетное количество мазута

$$B_м^{расч} = B_м k_t = 0{,}0168 \cdot 1{,}27 = 0{,}0213 \text{ кг/с}.$$

По графику (см. рис. 91) находим, что для обеспечения такой пропускной способности горелки по мазуту его давление перед горелкой должно быть равно 90 кПа.

Для распыления мазута в горелку необходимо подать $V_{комп} = 0{,}8 B_м = 0{,}8 \cdot 0{,}0168 = 0{,}0134$ м³/с компрессорного воздуха.

Глава 8

РАДИАЦИОННЫЕ ТРУБЫ

Для отопления термических печей, работающих с контролируемой атмосферой, применяют радиационные трубы, назначение которых заключается в муфелировании пламени в печах и обеспечении равномерного теплообмена в рабочем пространстве печей.

Прошли экспериментальную проверку и применялись в печах радиационные трубы различной конструкции. Однако специфика их эксплуатации и различие предъявляемых к ним требований позволяют дать надежные рекомендации по применяемым конструкциям только на основе длительной работы в промышленных условиях.

В настоящее время для широкого применения в термических печах прокатного производства заводов черной металлургии можно уверенно рекомендовать ограниченную номенклатуру радиационных труб, прошедших длительную промышленную проверку. К этим трубам относятся следующие:

тупиковые радиационные трубы типа ТРТ, предназначенные для горизонтальной установки в печах с рабочей температурой до 900° С;

тупиковые радиационные трубы типа ТРР с рециркуляцией продуктов сгорания, предназначенные для горизонтальной или вертикальной установки в печах с рабочей температурой до 950° С;

U-образные радиационные трубы с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект.

Из других конструкций радиационных труб, которые после дополнительной доработки конструкции можно применять в термических печах заводов черной металлургии, следует отметить U-образные радиационные трубы типа ТРУ с периферийным сжиганием газа на внутренней стенке излучающей трубы и W-образные радиационные трубы, работающие под разрежением.

8.1. Тупиковые радиационные трубы типа ТРТ

Разработанные Стальпроектом и впервые освоенные на печах Череповецкого сталепрокатного завода тупиковые радиационные трубы типа ТРТ имеют диффузионную горелку улучшенного смешения и предназначены для работы на природном газе при положительном давлении внутри трубы.

Труба представляет собой корпус, выполненный из жаропрочной стали (излучающая труба), внутри которой размещены горелка, рекуператор и камера сгорания (жаровая труба).

Конструкция трубы позволяет стабилизировать коэффициент расхода первичного воздуха и другие параметры на уровне, исключающем образование сажи и местные перегревы излучающей трубы и

Таблица 37

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ТУПИКОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ТРУБ ТИПА ТРТ (РИС. 92)

Обозначение трубы	B	L	L_1	L_2	L_3	l	Масса трубы, кг
ТРТ-П-А$d_г$-190/2080	1508	2080	2950	1390	1458	50	330
ТРТ-П-А$d_г$-190/2315	1740	2315	3185	1625	1690	50	350
ТРТ-П-А$d_г$-190/2535	1972	2535	3405	1845	1912	60	380
ТРТ-П-А$d_г$-190/2870	2320	2870	3740	2180	2250	70	430

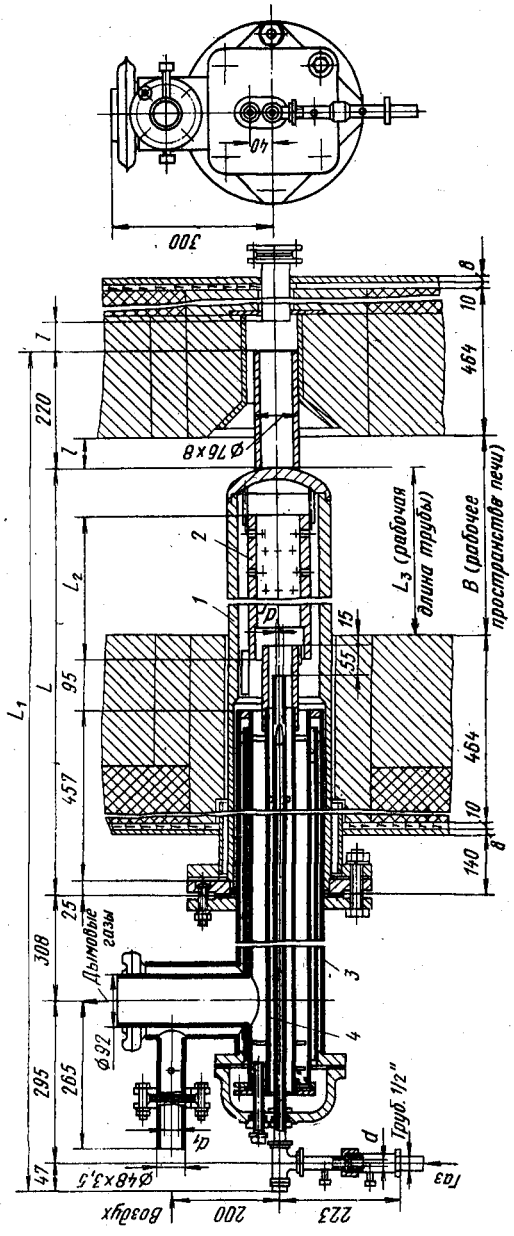


Рис. 92. Тупиковая радиационная труба типа ТРТ: *1* — излучающая труба; *2* — жаровая труба; *3* — рекуператор; *4* — горелка

обеспечивающем надежность автоматического регулирования во всем диапазоне расхода газа при групповой работе труб.

Разработано 4 типоразмера труб для внутренней ширины рабочего пространства 1508, 1740, 1972 и 2320 мм. Каждый типоразмер может иметь газовое сопло диаметром 4 или 5 мм, что определяет диапазон пропускной способности трубы по газу.

Тупиковые радиационные трубы типа ТРТ показаны на рис. 92, а их конструктивные размеры приведены в табл. 37.

Труба работает следующим образом. Воздух, подводимый к радиационной трубе, нагревается в трехоборотном рекуператоре, встроенном в излучающую трубу. Приводный газ подают через центральную трубу, оканчивающуюся горелкой. Часть горячего воздуха подсасывается к газовому соплу через отверстия в горелочном патрубке, а остальной воздух подается к выходному сечению горелки. Газовоздушная смесь сгорает внутри жаровой трубы и поступает к излучающей трубе частично через цилиндрические отверстия в боковой стенке жаровой трубы, а частично через торцовое отверстие в этой трубе. В пространстве между жаровой и излучающей трубами происходит дожигание газов и осуществляется передача тепла к излучающей трубе.

Отходящие дымовые газы разделяются на два потока; один направляется непосредственно в рекуператор, а другой, смешиваясь со свежей порцией сгоревших газов, поступает обратно в жаровую трубу. Такая рециркуляция обеспечивает равномерное распределение температуры по длине жаровой трубы, снижая ее у корня факела и повышая вследствие увеличения объема продуктов сгорания к торцу радиационной трубы. Подсос части воздуха к месту истечения газа из сопла и рециркуляция дымовых газов обеспечивают отсутствие сажевыделения внутри трубы практически при любых пределах регулирования и минимальном избытке воздуха.

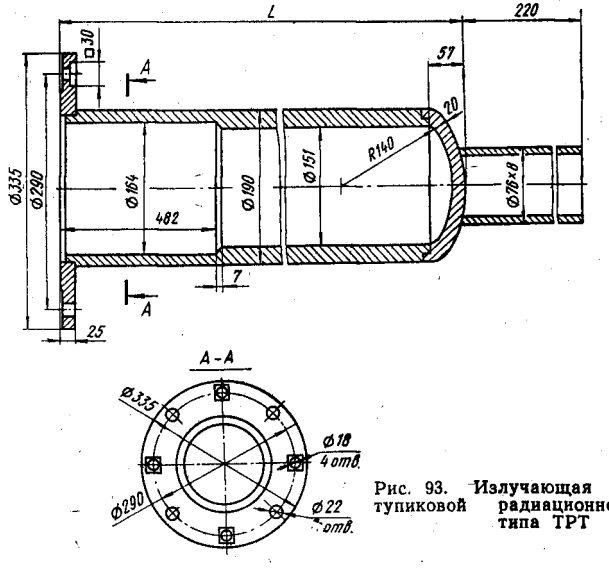


Рис. 93. Излучающая труба для тупиковой радиационной трубы типа ТРТ

Конструкция радиационной трубы и техническая документация на нее выполнены так, что труба, состоящая из заменяемых узлов, может быть заказана как в полном комплекте, так по всем основным узлам в отдельности.

Основными заменяемыми узлами тупиковой радиационной трубы ТРТ являются излучающая и жаровая трубы, рекуператор и горелка. Все нормализованные Стальпроектом трубы типа ТРТ имеют наружный диаметр излучающей трубы (рис. 93), выполненной из стали Х23Н18, равный 190 мм. В зависимости от ширины рабочего про-

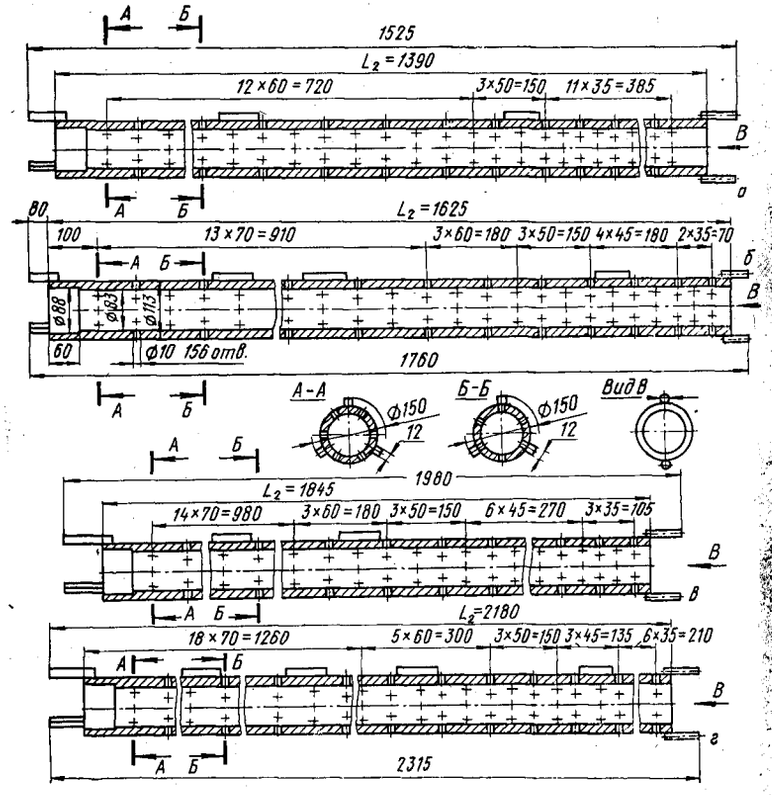


Рис. 94. Жаровая труба для тупиковой радиационной трубы типа ТРТ длиной, мм:

а — 2080; *б* — 2315; *в* — 2535; *г* — 2870

странства печи трубу заказывают четырех различных длин, указанных в табл. 37. Излучающая труба включает излучающую часть, фланец для крепления к каркасу печи и опорную часть. К излучающей трубе крепятся все остальные узлы радиационной трубы.

Жаровая труба (рис. 94) расположена внутри излучающей трубы соосно с ней и предназначена для формирования факела и распределения продуктов сгорания по длине излучающей трубы. Жаровая труба выполнена из стали Х23Н18 и в зависимости от длины излучающей трубы заказывается четырех различных длин с различным количеством отверстий по ее образующей.

Рекуператор типа «труба в трубе» (рис. 95) противоточный, гладкостенный; снабжен чечевичным компенсатором. Для всех длин тупиковой радиационной трубы рекуператор имеет одинаковые размеры и располагается внутри излучающей трубы.

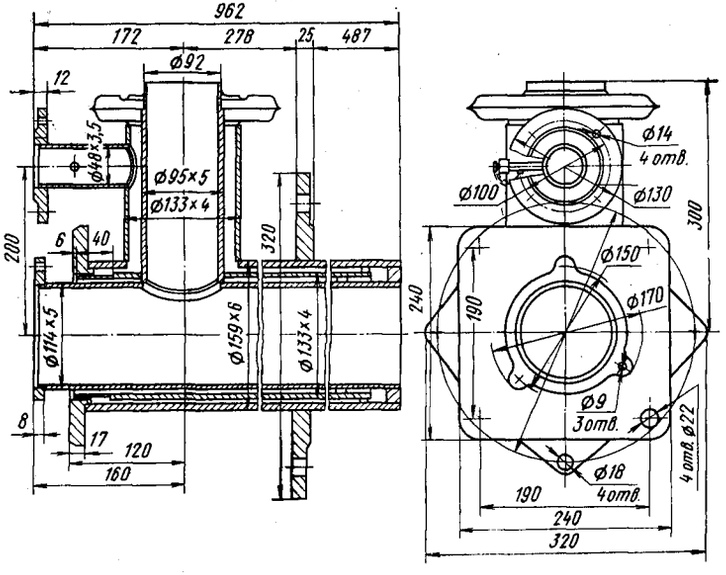


Рис. 95. Рекуператор тупиковой радиационной трубы типа ТРТ

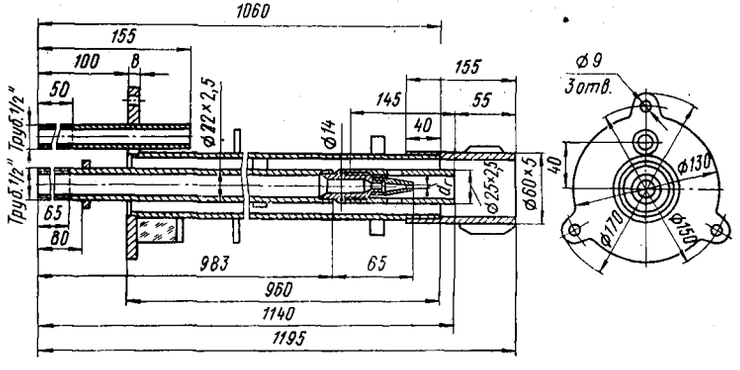


Рис. 96. Горелка тупиковой радиационной трубы типа ТРТ

Горелка тупиковой трубы показана на рис. 96. Назначение всех ее узлов ясно из приведенного выше описания работы трубы. Трубка, проходящая через заднюю крышку горелки, является отверстием для гляделки и прохода запальника. После пуска газа и розжига радиационной трубы запальник вынимается и трубка закрывается колпачком со смотровым стеклом. Горелка располагается внутри рекуператора соосно с ним. В зависимости от заданной теплопроизводительности радиационной трубы горелка имеет газовое сопло диаметром 4 или 5 мм (соответственно максимальная пропускная способность по природному газу 0,00083 и 0,00138 м³/с). Минимальный расход природного газа принимается равным 0,00028 м³/с.

Перед радиационной трубой на подводах газа и воздуха предусмотрены дросселирующие шайбы со штуцерами до и после них (см. рис. 92). Шайбы предназначены для уравнивания гидравлического сопротивления труб между собой и замера расхода газа и воздуха на каждую радиационную трубу.

Правильный подбор диаметров шайб при наладке позволяет обеспечить при зональном регулировании одинаковые расходы газа и воздуха по всем трубам данной зоны.

Условное обозначение тупиковой радиационной трубы типа ТРТ состоит из букв и цифр, которые расшифровываются так: Т — труба, Р — радиационная, Т — тупиковая, П — положительное давление внутри трубы, А — обозначение горелки, $d_г$ — диаметр газового сопла, L — длина излучающей трубы, 190 — ее наружный диаметр.

В общем виде обозначение трубы имеет вид ТРТ-П-А $d_г$-190/L.

При заказе радиационной трубы и отдельных узлов вместо букв $d_г$ и L проставляют их численные значения. Например, условное обозначение радиационной трубы ТРТ-П-А5-190/2315 означает: труба радиационная, тупиковая; положительное давление внутри трубы; горелка типа А с газовым соплом диаметром 5 мм; излучающая труба наружным диаметром 190 и длиной 2315 мм.

Пропускная способность по газу и воздуху тупиковой радиационной трубы типа ТРТ в зависимости от их давления перед трубой (без учета дросселирующих шайб) показана на рис. 97.

При выборе радиационной трубы типа ТРТ необходимо учитывать, что размеры элементов радиационной трубы соответствуют толщине кладки 464 мм и установочным размерам каркаса печи, показанным на рис. 92.

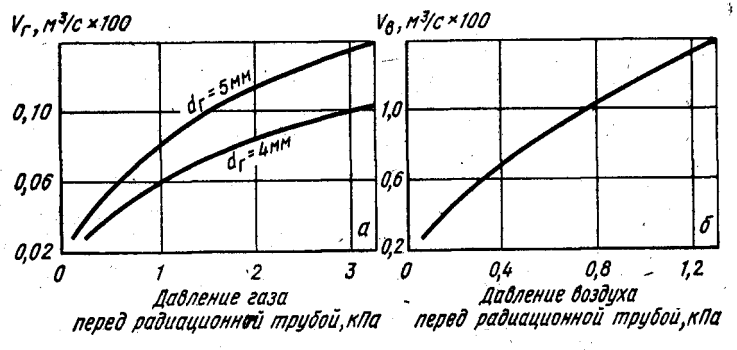


Рис. 97. Пропускная способность тупиковой радиационной трубы ТРТ-П-А$d_г$-190/L:

а — по газу; *б* — по воздуху

При расчете тупиковой радиационной трубы типа ТРТ следует принимать $\alpha = 1{,}1 \div 1{,}2$.

Пример. Подобрать радиационную трубу для печи с рабочим пространством шириной 1740 мм. $V_г = 0{,}00028 \div 0{,}00083$ м³/с; $\alpha = 1{,}2$.

По табл. 37 определяем, что заданной ширине рабочего пространства $B = 1740$ мм соответствует длина излучающей трубы $L = 2315$ мм. По графику рис. 97, *а* находим, что заданная пропускная способность радиационной трубы по газу обеспечивается газовым соплом диаметром $d_г = 4$ мм. Таким образом, выбираем тупиковую радиационную трубу ТРТ-П-А4-190/2315. При этом давление газа перед трубой (без учета дросселирующей шайбы) должно быть от 0,25 до 2 кПа.

По рис. 21 приложения I находим $L_0 = 9{,}25$ м³/м³ газа.

$$V_в = \alpha L_0 V_г = 1{,}2 \cdot 9{,}25\,(0{,}00028 \div 0{,}00083) = 0{,}0031 \div 0{,}0092 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По рис. 97, *б* находим, что давление воздуха перед радиационной трубой (без учета дросселирующих шайб) должно быть в пределах 0,08—0,8 кПа.

8.2. Тупиковые радиационные трубы типа ТРР

Тупиковые радиационные трубы типа ТРР разработаны институтом «ВНИИпромгаз» и предназначены для сжигания природного газа. В отличие от других радиационных труб с рециркуляцией продуктов сгорания в этой радиационной трубе рециркуляция продуктов сгорания осуществляется на холодной стороне радиационной трубы.

Разработано 18 типоразмеров труб с наружным диаметром 102, 121, 152, 168 и 190 мм, длиной рабочей части трубы от 1050 до 2000 мм и номинальной теплопроизводительностью от 11 до 30 кВт. Предпочтительно применение этих радиационных труб при удельном теплосъеме с их рабочей поверхности до 30 кВт/м².

Каждой радиационной трубе присваивается смешанный буквенно-цифровой индекс, включающий: название радиационной трубы (Т — труба, Р — радиационная); номинальную теплопроизводительность радиационной трубы в кВт; размеры радиационной трубы в виде дроби, числитель которой соответствует диаметру излучающей трубы D (мм), а знаменатель — длине рабочей части трубы L_1 (мм).

Пример условного обозначения радиационной трубы ТРР номинальной тепловой мощностью 23,3 кВт, диаметром излучающей трубы $D = 168$ мм и длиной рабочей части $L_1 = 2000$ мм: ТРР-23,3-168/2000.

Общий вид тупиковой радиационной трубы ТРР показан на рис. 98, схема ее установки — на рис. 99. Конструктивные размеры радиационных труб ТРР приведены в табл. 38, а их характеристики — в табл. 39.

Пропускная способность тупиковых радиационных труб ТРР по газу и вторичному воздуху дана на рис. 100. Радиационная труба ТРР состоит из наружной излучающей трубы *1* (см. рис. 98) с патрубком для отвода продуктов сгорания, внутренней жаровой трубы *2* с рекуператором *3*, газовой трубки *4* и воздушного коллектора *8*.

Работа этих радиационных труб осуществляется следующим образом. Идущий на горение природный газ смешивается у входа в

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ ТУПИКОВЫХ

Обозначение радиационной трубы	Длина рабочей части L_1	Общая длина радиационной трубы L_2	Диаметр и толщина стенки излучающей трубы $D \times \delta$	Диаметр отверстий воздушного сопла	
				большого	малого
ТРР-11,0-102/1100	1110	2570	102×5	4,0	2,5
ТРР-11,6-121/1050	1050	2575	121×6	4,2	2,5
ТРР-12,5-121/1230	1230	2755	121×6	4,4	2,5
ТРР-14,6-121/1450	1450	2975	121×6	4,8	2,5
ТРР-17,3-121/1650	1650	3175	121×6	5,4	2,5
ТРР-12,8-152/910	910	2185	152×10	4,4	2,5
ТРР-14,0-152/1050	1050	2325	152×10	4,7	2,5
ТРР-15,4-152/1150	1150	2425	152×10	5,0	2,5
ТРР-16,7-152/1240	1240	2515	152×10	5,2	2,5
ТРР-17,3-152/1360	1360	2635	152×10	5,4	2,5
ТРР-18,7-152/1450	1450	2725	152×10	5,6	2,5
ТРР-22,2-152/1650	1650	2925	152×10	6,2	2,8
ТРР-24,9-152/2000	2000	3275	152×10	6,8	2,8
ТРР-15,4-168/1050	1050	2390	168×8	5,0	2,5
ТРР-23,3-168/1650	1650	2990	168×8	6,4	2,8
ТРР-27,6-168/2000	2000	3340	168×8	7,2	2,8
ТРР-25,6-190/1650	1650	2990	190×20	6,8	2,8
ТРР-30,2-190/2000	2000	3340	190×20	7,4	2,8

Обозначение радиационной трубы	l_6	l_7	l_8	l_9	d
ТРР-11,0-102/1100	300	170	120	120	18
ТРР-11,6-121/1050	300	160	120	120	18
ТРР-12,5-121/1230	300	160	120	120	18
ТРР-14,6-121/1450	300	160	120	120	18
ТРР-17,3-121/1650	300	160	120	120	18
ТРР-12,8-152/910	300	176	120	120	18
ТРР-14,0-152/1050	300	176	120	120	18
ТРР-15,4-152/1150	300	176	120	120	18
ТРР-16,7-152/1240	300	176	120	120	18
ТРР-17,3-152/1360	300	176	120	120	18
ТРР-18,7-152/1450	300	176	120	120	18
ТРР-22,2-152/1650	300	176	120	120	18
ТРР-24,9-152/2000	300	176	120	120	18
ТРР-15,4-168/1050	320	240	120	120	18
ТРР-23,3-168/1650	320	240	120	120	18
ТРР-27,6-168/2000	320	240	120	120	18
ТРР-25,6-190/1650	320	330	120	120	18
ТРР-30,2-190/2000	320	330	120	120	18

Таблица 38

РАДИАЦИОННЫХ ТРУБ ТИПА ТРР (РИС. 98)

Газовая трубка		D_1	D_2	D_3	D_4	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
диаметр центрального отверстия	диаметр боковых отверстий и их количество, шт									
4,0	2,8×6	170	170	102×5	70×4	772	365	131	200	270
4,0	2,5×8	170	170	83×4	83×4	1000	193	104	200	270
4,0	2,5×8	170	170	83×4	83×4	1000	193	104	200	270
4,0	3,0×8	170	170	83×4	83×4	1000	193	104	200	270
4,0	3,0×8	170	170	83×4	83×4	1000	193	104	200	270
4,0	2,5×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
4,0	2,5×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
4,0	2,5×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
4,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
4,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
4,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
5,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
5,0	3,0×8	225	225	102×5	102×5	740	200	120	200	270
5,0	3,0×8	225	225	121×6	121×6	745	243	152	200	280
6,0	3,0×10	225	225	121×6	121×6	745	243	152	200	280
6,0	3,0×10	225	225	121×6	121×6	745	243	152	200	280
6,0	3,0×10	280	280	121×6	121×6	745	243	152	200	280
6,0	3,0×10	280	280	121×6	121×6	745	243	152	200	280

Продолжение табл. 38

d_1	d_2	Число отверстий n	Масса трубы, кг, не более
1 1/4″	1/2″	4	75
1 1/4″	1/2″	4	85
1 1/4″	1/2″	4	90
1 1/4″	1/2″	4	95
1 1/4″	1/2″	4	100
1 1/4″	1/2″	8	130
1 1/4″	1/2″	8	135
1 1/4″	1/2″	8	140
1 1/4″	1/2″	8	150
1 1/4″	1/2″	8	160
1 1/4″	1/2″	8	165
1 1/4″	1/2″	8	175
1 1 1/4″	1/2″	8	185
2″	3/4″	8	160
2″	3/4″	8	200
2″	3/4″	8	240
2″	3/4″	8	330
2″	3/4″	8	350

ХАРАКТЕРИСТИКА ТУПИКОВЫХ

Обозначение радиационной трубы	Удельный теплосъем с рабочей поверхности, кВт/м²		Полезная тепловая мощность, кВт		Количество природного газа, м³/С	
	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло
ТРР-11,0-102/1100	30,6 / 6,4	13,5	11,0 / 2,3	4,9	0,00039 / 0,000078	0,00017
ТРР-11,6-121/1050	28,3 / 6,3	12,0	11,6 / 2,6	4,9	0,00042 / 0,000083	0,00017
ТРР-12,5-121/1230	26 / 5,7	10,2	12,5 / 2,7	4,9	0,00044 / 0,000089	0,00017
ТРР-14,6-121/1450	26,1 / 5,5	8,7	14,6 / 3,1	4,9	0,00053 / 0,00010	0,00017
ТРР-17,3-121/1650	27,0 / 5,3	7,8	17,3 / 3,4	5,0	0,00064 / 0,00011	0,00017
ТРР-12,8-152/910	28,4 / 6,3	11,1	12,8 / 2,8	5,0	0,00044 / 0,000089	0,00017
ТРР-14,0-152/1050	26,9 / 5,3	9,6	14,0 / 2,8	5,0	0,0005 / 0,000089	0,00017
ТРР-15,4-152/1150	27,0 / 6,0	8,7	15,4 / 3,4	5,0	0,00056 / 0,00011	0,00017
ТРР-16,7-152/1240	27,4 / 5,6	8,2	16,7 / 3,4	5,0	0,00061 / 0,00011	0,00017
ТРР-17,3-152/1360	25,8 / 5,1	7,5	17,3 / 3,4	5,0	0,00064 / 0,00011	0,00017
ТРР-18,7-152/1450	26,4 / 6,0	7,0	18,7 / 4,2	5,0	0,00070 / 0,00014	0,00017
ТРР-22,2-152/1650	27,4 / 6,3	8,1	22,2 / 5,1	6,6	0,00083 / 0,00017	0,00022
ТРР-24,9-152/2000	25,7 / 5,3	6,8	24,9 / 5,1	6,6	0,00097 / 0,00017	0,00022
ТРР-15,4-168/1050	27,0 / 6,0	8,8	15,4 / 3,4	5,0	0,00056 / 0,00011	0,00017

РАДИАЦИОННЫХ ТРУБ ТИПА ТРР

Таблица 39

Количество первичного воздуха, м³/с		Давление первичной газо-воздушной смеси после шайбы, кПа		Количество вторичного воздуха, м³/с		Давление вторичного воздуха после шайбы, кПа	
большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло
0,00058 / 0,00011	0,00025	1,65 / 0,1	0,36	0,0036 / 0,00072	0,0015	3,15 / 0,32	2,95
0,00061 / 0,00011	0,00025	1,20 / 0,04	0,26	0,00375 / 0,00078	0,0015	3,00 / 0,20	2,95
0,00066 / 0,00011	0,00025	1,60 / 0,06	0,26	0,00405 / 0,00083	0,0015	3,05 / 0,18	2,95
0,00078 / 0,00011	0,00025	0,80 / 0,04	0,12	0,00485 / 0,00092	0,0015	2,80 / 0,14	2,95
0,00095 / 0,00017	0,00027	1,05 / 0,08	0,12	0,00575 / 0,0010	0,0015	2,90 / 0,12	2,95
0,00067 / 0,00011	0,00025	1,45 / 0,10	0,28	0,0040 / 0,00083	0,0015	3,00 / 0,14	2,95
0,00075 / 0,00011	0,00025	1,80 / 0,10	0,28	0,0046 / 0,00083	0,0015	3,10 / 0,12	2,95
0,00083 / 0,00017	0,00025	2,2 / 0,14	0,28	0,0050 / 0,001	0,0015	3,05 / 0,16	2,95
0,00092 / 0,00017	0,00025	0,86 / 0,06	0,12	0,0056 / 0,001	0,0015	3,20 / 0,24	2,95
0,00095 / 0,00017	0,00025	0,90 / 0,06	0,12	0,0058 / 0,001	0,0015	3,10 / 0,18	2,95
0,00103 / 0,00017	0,00025	1,05 / 0,10	0,12	0,0063 / 0,0012	0,0015	3,20 / 0,25	2,95
0,00125 / 0,00025	0,00033	1,50 / 0,12	0,16	0,0074 / 0,0015	0,0021	3,20 / 0,20	3,05
0,0014 / 0,00025	0,00033	2,90 / 0,12	0,16	0,0089 / 0,0015	0,0021	3,20 / 0,16	3,05
0,00083 / 0,00017	0,00025	0,70 / 0,06	0,10	0,0050 / 0,0010	0,0015	3,1 / 0,22	2,95

Обозначение радиационной трубы	Удельный теплосъем с рабочей поверхности, кВт/м²		Полезная тепловая мощность, кВт		Количество природного газа, м³/с	
	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло
ТРР-23,3-168/1650	26,2 / 5,6	7,3	23,3 / 5,0	6,5	0,00089 / 0,00017	0,00022
ТРР-27,6-168/2000	25,6 / 5,3	6,0	27,6 / 5,7	6,4	0,0011 / 0,00020	0,00022
ТРР-25,6-190/1650	25,3 / 5,6	6,3	25,6 / 5,7	6,4	0,0010 / 0,00020	0,00022
ТРР-30,2-190/2000	24,7 / 4,7	5,3	30,2 / 5,7	6,4	0,00125 / 0,00020	0,00022

Примечание. Для большого сопла: в числителе — номинальный режим,

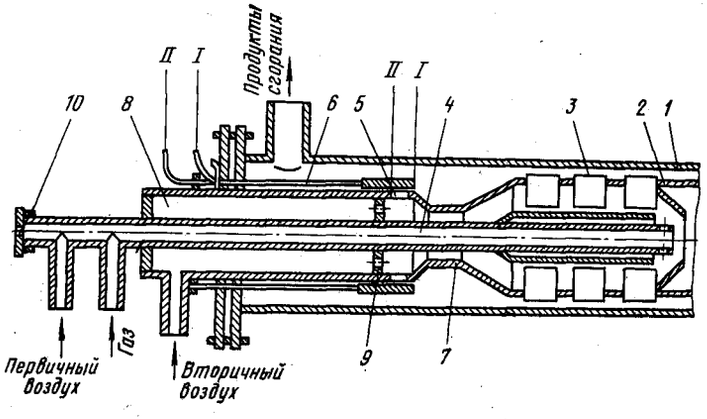


Рис. 98. Тупиковая радиационная труба ТРР:
1 — излучающая труба; *2* — жаровая труба; *3* — рекуператор; *4* — газовая трубка; *5* — рабочие окна; *6* — передвижной стакан; *7* — смеситель; *8* — воздушный коллектор; *9* — сопло; *10* — гляделка

радиационную трубу с первичным воздухом из расчета коэффициента расхода воздуха 0,1—0,2 (соотношения количества газа к первичному воздуху от 1 : 1 до 1 : 2). Истечение первичной газо-воз-

Продолжение табл. 39

Количество первичного воздуха, м³/с		Давление первичной газовоздушной смеси после шайбы, кПа		Количество вторичного воздуха, м/³с		Давление вторичного воздуха после шайбы, кПа	
большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло	большое сопло	малое сопло
0,0013 / 0,00025	0,00033	1,65 / 0,10	0,14	0,0083 / 0,0015	0,0021	2,9 / 0,20	3,05
0,0017 / 0,00028	0,00033	2,40 / 0,12	0,14	0,010 / 0,0018	0,0021	3,0 / 0,12	3,05
0,0015 / 0,00028	0,00033	1,2 / 0,12	0,08	0,0092 / 0,0018	0,0021	3,1 / 0,20	3,05
0,0019 / 0,00028	0,00033	1,8 / 0,12	0,08	0,011 / 0,0018	0,0021	3,25 / 0,12	3,05

в знаменателе — минимальный.

душной смеси происходит в сужающейся части горелки на расстоянии 30 мм от выходного сечения. Вторичный воздух в количестве, необходимом для полного сжигания газа (с учетом первичного воздуха), подается к воздушному коллектору оканчивающемуся воздушным соплом. Каждая радиационная труба ТРР снабжена двумя воздушными (инжекционными) соплами с четырьмя отверстиями. Одно сопло с большими отверстиями («большое сопло») предназначено для работы с повышенными теплосъемами с рабочей поверхности в зонах нагрева печи. Второе — с меньшими отверстиями («малое сопло») — предназначено для работы с малыми теплосъемами с рабочей поверхности радиационной трубы в зонах выдержки печи. Инжекционное устройство доступно для осмотра и изготавливается из обычных сталей. Воздух, истекающий из отверстий сопла, инжектирует часть продуктов сгорания, нагревается в рекуператоре до 500—600° С и постепенно смешивается с центральной струей газовоздушной смеси, образуя растянутый факел внутри жаровой трубы. Продукты сгорания поступают в кольцевой канал между жаровой и излучающей трубами. Пройдя рекуператор, продукты сгорания имеют температуру 300—500° С; часть из них возвращается с воздухом в камеру горения, а основная часть удаляется через дымоход.

Давление воздуха после дросселирующей шайбы (перед соплом) 3,0—3,5 кПа. С увеличением давления коэффициент инжекции увеличивается, а перегрев жаровой трубы относительно излучающей трубы уменьшается.

Диаметры отверстий в соплах рассчитаны из условия давления перед ними около 3,0 кПа. При изменении давления перед соплом

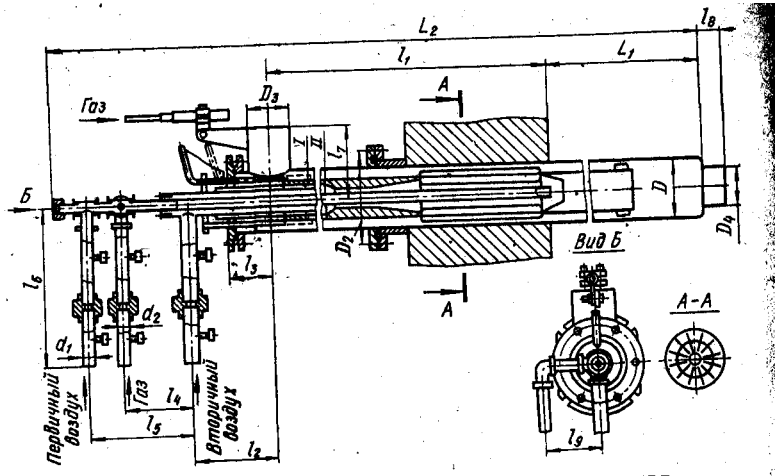


Рис. 99. Схема установки тупиковой радиационной трубы ТРР

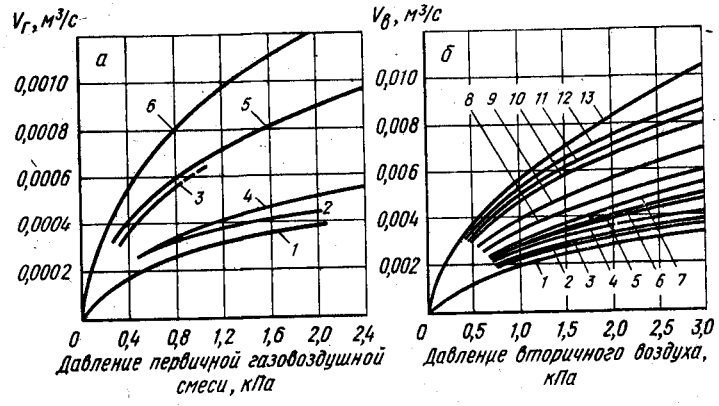


Рис. 100. Пропускная способность тупиковых радиационных труб типа ТРР: *а* — количество газа для труб: *1* — ТРР-11-102/1100; *2* — ТРР-11,6-121/1050 и ТРР-12,5-121/1230; *3* — ТРР-14,6-121/1450 и ТРР-17,3-121/1650; *4* — ТРР-12,8-152/910; ТРР-14,0-152/1050 и ТРР-15,4-152/1150; *5* — ТРР-16,7-152/1240; ТРР-17,3-152/1360; ТРР-18,7-152/1450; ТРР-22,2-152/1650; ТРР-24,9-152/2000; ТРР-15,4-168/1050; ТРР-23,3-168/1650 и ТРР-27,6-168/2000; *6* — ТРР-25,6-190/1650 и ТРР-30,2-190/2000; *б* — количество вторичного воздуха для труб: *1* — ТРР-11,0-102/110; *2* — ТРР-11,6-121/1050; *3* — ТРР-12,5-121/1230 и ТРР-12,8-152/910; *4* — ТРР-14,0-152/1050; *5* — ТРР-14,6-121/1450; ТРР-15,4-152/1150 и ТРР-15,4-168/1050; *6* — ТРР-16,7-152/1240; *7* — ТРР-17,3-121/1650 и ТРР-17,3-152/1360; *8* — ТРР-18,7-152/1450; *9* — ТРР-22,2-152/1650; *10* — ТРР-24,9-152/2000 и ТРР-23,3-168/1650; *11* — ТРР-25,6-190/1650; *12* — ТРР-27,6-168/2000; *13* — ТРР-30,2-190/200

(в зависимости от типа применяемого вентилятора) диаметры отверстий пересчитываются по соотношению $d_2 = d_1 \sqrt[4]{P_1/P_2}$ и уточняются при пуске печи.

В случае, когда требуемый расход газа меньше номинального, диаметры отверстий сопла должны быть пересчитаны по соотношению

$$d_2 = d_1 \sqrt{B_2/B_1},$$

где B_1 и d_1 — соответственно номинальный расход газа и диаметр отверстий сопла; B_2 и d_2 — соответственно требуемый расход газа и диаметр отверстий сопла.

Каждая радиационная труба снабжена тремя дросселирующими шайбами: на подводе газа и подводах первичного и вторичного воздуха. Диаметры шайб, служащих для выравнивания гидравлических сопротивлений труб, уточняются при пуске и наладке радиационных труб отдельной зоны или всей печи. Для надежности розжига радиационной трубы ТРР она снабжена специальным устройством — передвижным стаканом *б* (см. рис. 98), с помощью которого перекрываются окна для инжекции.

Розжиг радиационной трубы осуществляется при закрытых рабочих окнах *5* (положение *I*). Рабочее положение стакана *II*. В случае необходимости эксплуатации радиационных труб при температуре 500—750° С система рециркуляции должна быть отключена: передвижной стакан устанавливается в положение *I*, а отверстия сопла *9* рассверливаются.

8.3. U-образные радиационные трубы с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект

U-образные радиационные трубы с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект нормализованы Стальпроектом и предназначены для сжигания природного газа.

При разработке U-образных радиационных труб Стальпроектом принята поузловая нормализация отдельных элементов трубы: корпуса, горелки, воздушного рекуператора. В этом случае к одному и тому же корпусу в зависимости от потребности технологии нагрева могут быть присоединены горелки различной конструкции, производительности и пределов регулирования.

Разработаны радиационные трубы четырех диаметров: 121, 152, 180 и 219 мм для пяти ширин рабочего пространства: 1508, 1740, 1972, 2320 и 2900 мм и двух значений толщин футеровок 348 и 464 мм.

U-образные радиационные трубы с горелкой конструкции ВНИИМТ — Стальпроект показаны на рис. 101, а их основные конструктивные размеры приведены в табл. 40.

Работа U-образной радиационной трубы, оборудованной горелкой ВНИИМТ — Стальпроект с частичным предварительным смешением газа и воздуха, осуществляется следующим образом. Газ поступает в трубу через газовое сопло, расположенное по оси корпуса внутри смесительной трубы. В смесительной трубе на участке, близком к выходному сечению сопла, выполнены отверстия, через которые истекающий из сопла газ инжектирует воздух в количестве, соответствующем $\alpha = 0{,}4 \div 0{,}5$. Смесь газа и первичного воздуха, пройдя смесительную трубу, поступает в горелочную ветвь радиационной трубы. Сгорание газа начинается по выходе из смесительной трубы. Вторичный воздух проходит в зазоре между корпусом и смесительной трубой и входит в рабочее пространство

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ U-ОБРАЗНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ТРУБ

Обозначения радиационной трубы	a	a_1	B	B_1	D	D_1	D_2	D_3	D_4	$d_г$	d	d_1	d_2	d_3	d_4
ТРУ-121-1964	120	130	1508	348	121	130	100	121	76	5	41	1/2″	36	30	20
ТРУ-121-2080	120	130	1508	464	121	130	100	121	76	5	41	1/2″	36	30	20
ТРУ-121-2196	120	130	1740	348	121	130	100	121	76	5	41	1/2″	36	30	20
ТРУ-121-2312	120	130	1740	464	121	130	100	121	76	5	41	1/2″	36	30	20
ТРУ-152-1964	120	130	1508	348	152	140	110	121	120	6	47	3/4″	41	36	22
ТРУ-152-2080	120	130	1508	464	152	140	110	121	120	6	47	3/4″	41	36	22
ТРУ-152-2196	120	130	1740	348	152	140	110	121	120	6	47	3/4″	41	36	22
ТРУ-152-2312	120	130	1740	464	152	140	110	121	120	6	47	3/4″	41	36	22
ТРУ-152-2428	120	130	1972	348	152	140	110	121	120	6	47	3/4″	41	36	22
ТРУ-152-2544	120	130	1972	464	152	140	110	121	120	6	47	3/4″	41	36	22
ТРУ-180-1964	150	160	1508	348	180	150	120	152	150	7	57	1″	45	40	24
ТРУ-180-2196	150	160	1740	348	180	150	120	152	150	7	57	1″	45	40	24
ТРУ-180-2428	150	160	1972	348	180	150	120	152	150	7	57	1″	45	40	24
ТРУ-180-2544	150	160	1972	464	180	150	120	152	150	7	57	1″	45	40	24
ТРУ-180-2892	150	160	2320	464	180	150	120	152	150	7	57	1″	45	40	24
ТРУ-180-3472	150	160	2900	464	180	150	120	152	150	7	57	1″	45	40	24
ТРУ-219-2776	150	160	2320	348	219	160	130	152	170	8	70	1″	50	45	26
ТРУ-219-2892	150	160	2320	464	219	160	130	152	170	8	70	1″	50	45	26
ТРУ-219-3356	150	160	2900	348	219	160	130	152	170	8	70	1″	50	45	26
ТРУ-219-3472	150	160	2900	464	219	160	130	152	170	8	70	1″	50	45	26

трубы через полуциркульные отверстия по наружной поверхности наконечника — стабилизатора. Кроме того, часть воздуха поступает через кольцевую щель между наружной образующей стабилизатора и внутренней поверхностью корпуса. Двухступенчатая подача воздуха обеспечивает устойчивое горение газа с суммарным $\alpha=1{,}05\div1{,}1$ без выделения сажи во всем диапазоне изменения расхода газа, т. е. 1 : 6. Диаметры отверстий для истечения смеси газа и первичного воздуха, а также вторичного воздуха подбирают, исходя из скоростей при номинальных расходах 10—15 м/с при нормальных условиях. В этой трубе выгорание горючих в факеле растянуто на всю длину трубы. Максимум температуры газов на оси трубы наблюдается перед поворотным коленом. Воздух, идущий на сгорание газа, подогревается в рекуператоре, вставленном в отводящую ветвь радиационной трубы. Конструкция рекуператора является типичной для U-образных радиационных труб. Дымовые газы проходят в зазор между воздушной трубой рекуператора и корпусом радиационной трубы, а воздух подается по центральной трубе, доходит до торцовой стенки рекуператора и поступает в зазор между его внутренней и наружной трубками.

При температуре поверхности трубы 800—850° С температура дымовых газов перед рекуператором 1070—1100° С; воздух нагревается в рекуператоре до 320° С. Температура дымовых газов после рекуператора 650° С. Дымовые газы отсасывают в печной дымопровод, а воздух поступает к горелке.

Рекуператор выполняется или из гладкостенных стальных труб (для радиационной трубы диаметром 121 мм), или из жаростойкого чугуна литым.

Таблица 40

С ГОРЕЛКОЙ ВНИИМТ—СТАЛЬПРОЕКТ (РИС 101)

$d_б$	d_0	H	H_1	H_2	H_3	H_4	L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	Число отверстий n	n_1	n_2	Масса трубы, кг
28	13	280	430	720	248	528	1403	500	580	166	490	1964	2740	3	5	4	250
28	13	280	430	720	248	528	1403	500	580	166	490	2080	2856	3	5	4	250
28	13	280	430	720	248	528	1635	500	580	166	490	2196	2972	3	5	4	260
28	13	280	430	720	248	528	1635	500	580	166	490	2312	3088	3	5	4	260
29	13	280	430	720	248	528	1403	540	620	166	530	1964	2825	3	5	4	340
29	13	280	430	720	248	528	1403	540	620	166	530	2080	2940	3	5	4	350
29	13	280	430	720	248	528	1635	540	620	166	530	2196	3056	3	5	4	350
29	13	280	430	720	248	528	1635	540	620	166	530	2312	3172	3	5	4	360
29	13	280	430	720	248	528	1867	540	620	166	530	2428	3288	3	5	4	360
29	13	280	430	720	248	528	1867	540	620	166	530	2544	3405	3	5	4	370
30	13	450	525	900	320	760	1403	560	640	200	545	1964	2845	3	5	4	470
30	13	450	525	900	320	760	1635	560	640	200	545	2196	3076	3	5	4	480
30	13	450	525	900	320	760	1867	560	640	200	545	2428	3308	3	5	4	490
30	13	450	525	900	320	760	1867	560	640	200	545	2544	3425	3	5	4	490
30	13	450	525	900	320	760	2215	560	640	200	545	2892	3772	3	5	4	500
30	13	450	525	900	320	760	2795	560	640	200	545	3472	4352	3	5	4	520
32	13	450	525	900	320	760	2215	570	650	200	555	2776	3666	3	5	4	670
32	13	450	525	900	320	760	2215	570	650	200	555	2892	3782	3	5	4	680
32	13	450	525	900	320	760	2795	570	650	200	555	3356	4246	3	5	4	710
32	13	450	525	900	320	760	2795	570	650	200	555	3472	4362	3	5	4	720

Как и для тупиковой радиационной трубы, создана унифицированная конструкция, т. е. можно заказывать изготовителю отдельно корпус трубы, горелку и рекуператор с возможностью замены горелки одной конструкции на другую. Схематически горелка ВНИИМТ — Стальпроект для U-образной радиационной трубы показана на рис. 102, а рекуператор этой трубы — на рис. 103.

Пропускная способность U-образных радиационных труб с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект показана на рис. 104. Требуемые для эксплуатации давления газа и воздуха перед радиационной трубой подбираются изменением размеров дросселирующих шайб на подводах газа и воздуха. Для определения истинного давления перед радиационной трубой величина давления, найденная на рис. 104, суммируется с перепадом давления на шайбах, рассчитанного для данных расходов газа и воздуха.

Зажигание U-образной радиационной трубы производится с помощью переносного газового запальника, вставляемого в трубку, проходящую через горелку.

8.4. U-образные радиационные трубы типа ТРУ

U-образные радиационные трубы типа ТРУ, разработанные институтом «ВНИИпромгаз», отличаются тем, что смесь газа с первичным воздухом подается в зазор между воздушной трубой и корпусом радиационной трубы, а основное количество воздуха подается по центральной воздушной трубе. Постепенное горение газа на поверхности разогретой трубы обеспечивает его устойчивое

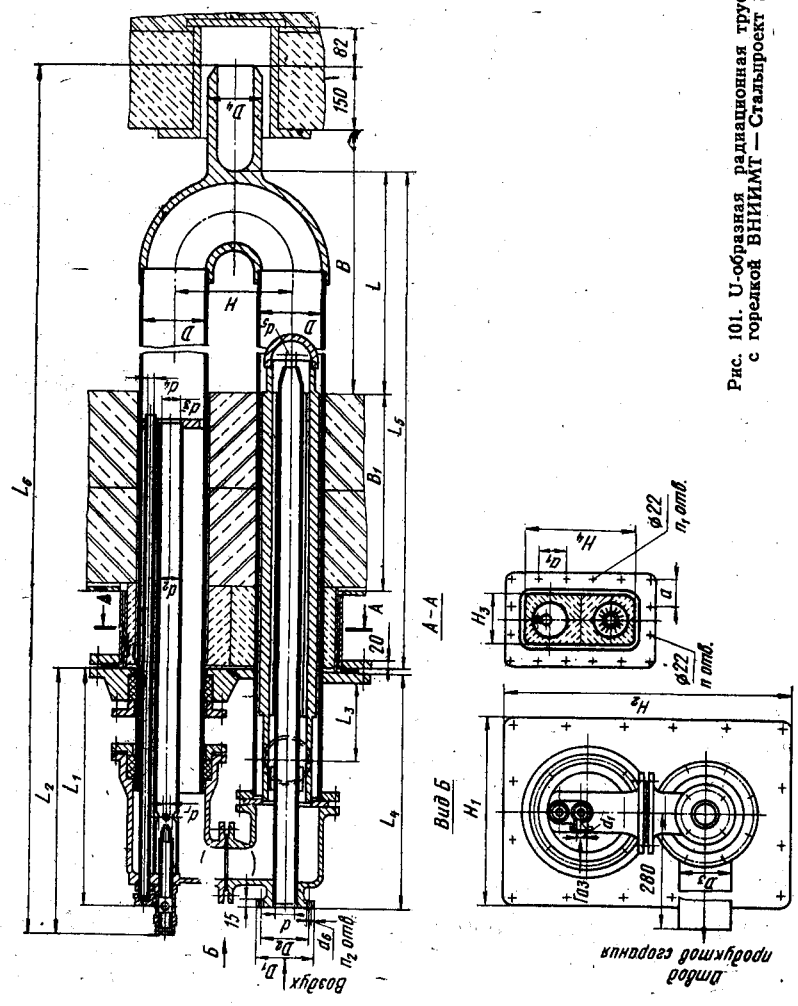


Рис. 101. U-образная радиационная труба с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект

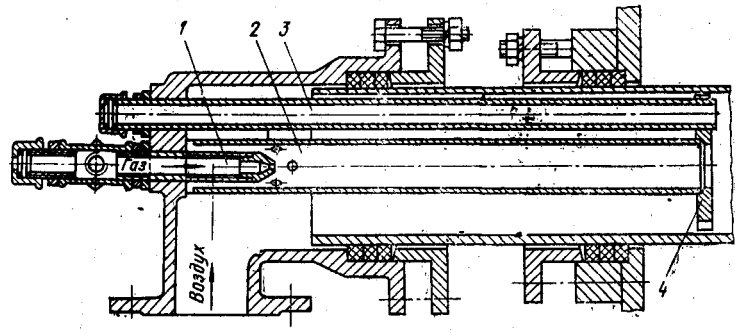


Рис. 102. Горелка ВНИИМТ — Стальпроект частичного предварительного смешения для U-образной радиационной трубы:

1 — газовое сопло; *2* — смесительная труба; *3* — труба запальника; *4* — наконечник — стабилизатор

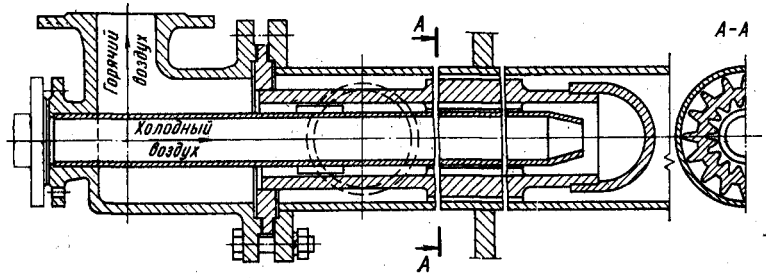


Рис. 103. Рекуператор U-образной радиационной трубы с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект

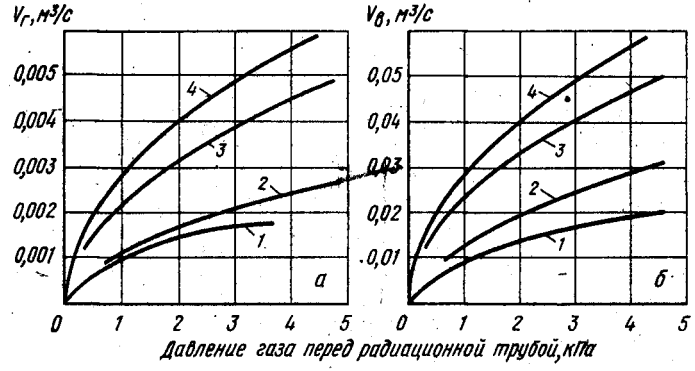


Рис. 104. Пропускная способность U-образных радиационных труб с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект:

а — по газу; *б* — по воздуху; диаметры труб: *1* — 121 мм; *2* — 152 мм; *3* — 180 мм; *4* — 219 мм

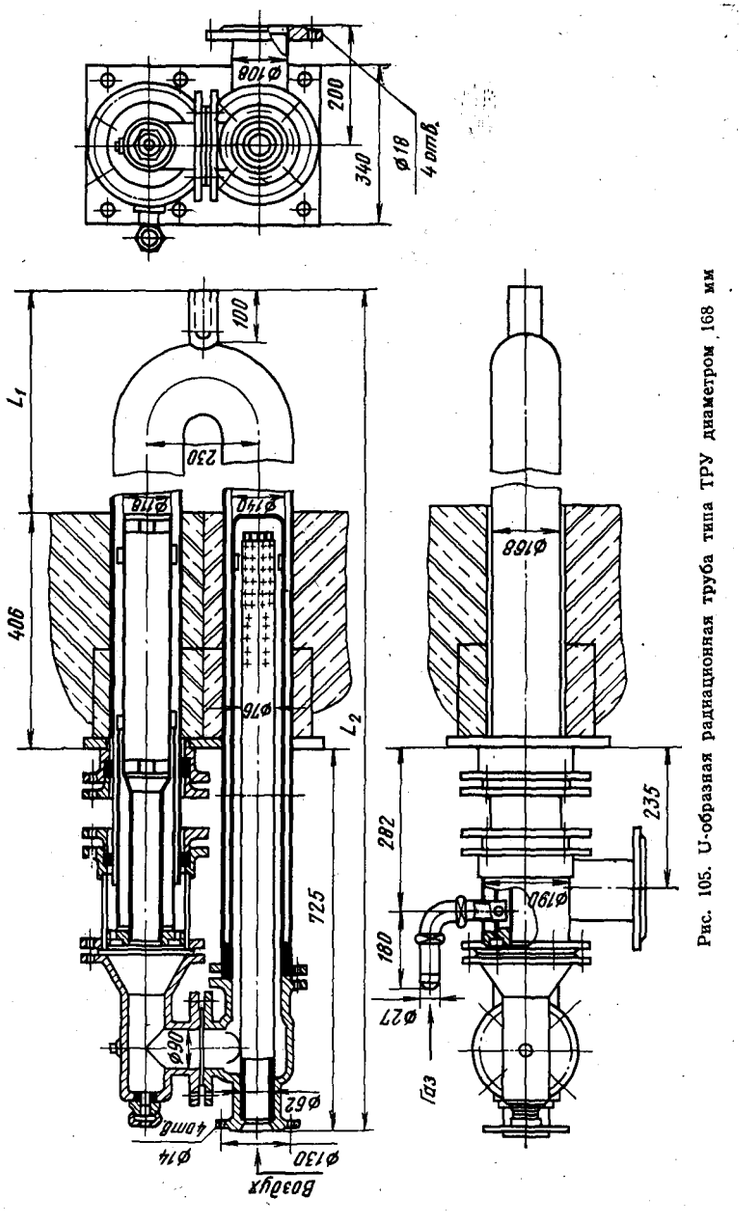


Рис. 105. U-образная радиационная труба типа ТРУ диаметром 168 мм

горение и равномерный теплообмен. Трубы предназначены для сжигания природного газа в печах с рабочей температурой до 1000° С. Разработано несколько типоразмеров этой трубы диаметром 121, 152, 168 и 190 мм, однако для широкого применения рекомендуется радиационная труба диаметром 168 мм (рис. 105), модификации которой различаются длиной рабочей части.

В радиационных трубах типа ТРУ применен рекуператор новой конструкции, в котором истечение воздуха из внутренней трубы происходит через большое количество отверстий, а струйный теплообмен при поперечном обтекании воздухом стенки дымового канала увеличивает коэффициент теплоотдачи и повышает температуру подогрева воздуха.

В табл. 41 приведены конструктивные размеры и основные характеристики U-образных радиационных труб типа ТРУ диаметром 168 мм, а на рис. 106 — пропускная способность этих радиационных труб по газу и воздуху. Зажигание газа в радиационной трубе осуществляется переносным газовым запальником, вставляемым по центру трубы через отверстие для гляделки.

8.5. W-образная радиационная труба

На рис. 107 показана W-образная радиационная труба, разработанная Стальпроектом и устанавливаемая в вертикальных протяжных печах. Труба работает с разрежением и за счет разрежения, создаваемого дымососом, осуществляется поступление воздуха, идущего на сжигание газа. Особенностью радиационной трубы являются наличие рекуператора, вынесенного из пределов

Таблица 41

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ U-ОБРАЗНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ТРУБ ТИПА ТРУ ДИАМЕТРОМ 168 мм

Обозначение трубы	L	L_1	L_2	L_3	L_4	Излучающая поверхность, м²	Масса трубы, кг	Номинальная пропускная способность по природному газу, м³/с	К. п. д. при номинальной пропускной способности, %	Номинальная теплопроизводительность, кВт	Температура дымовых газов после рекуператора, °С
ТРУ 5. 000-01	975	2105	406	150	0	0,87	253	0,00139	75	36	503
ТРУ 5. 000-02	1420	2550	406	150	0	1,34	277	0,00222	72	56	570
ТРУ 5. 000	1670	2720	326	120	50	1,62	285	0,00278	70	68	640
ТРУ 5. 000-03	2100	3230	406	150	0	2,06	314	0,00333	67	78	670

Примечание. Пределы регулирования 1 : 10.

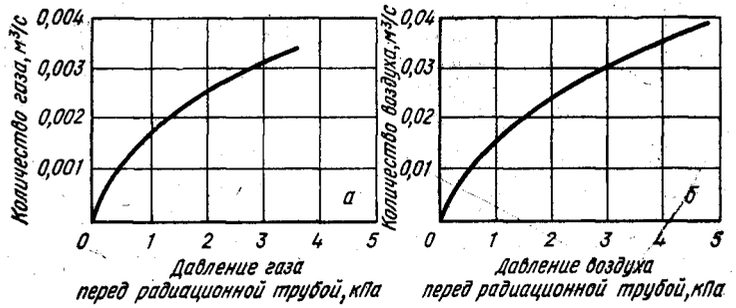


Рис. 106. Пропускная способность U-образных радиационных труб типа ТРУ диаметром 168 мм:
а — по газу; *б* — по воздуху

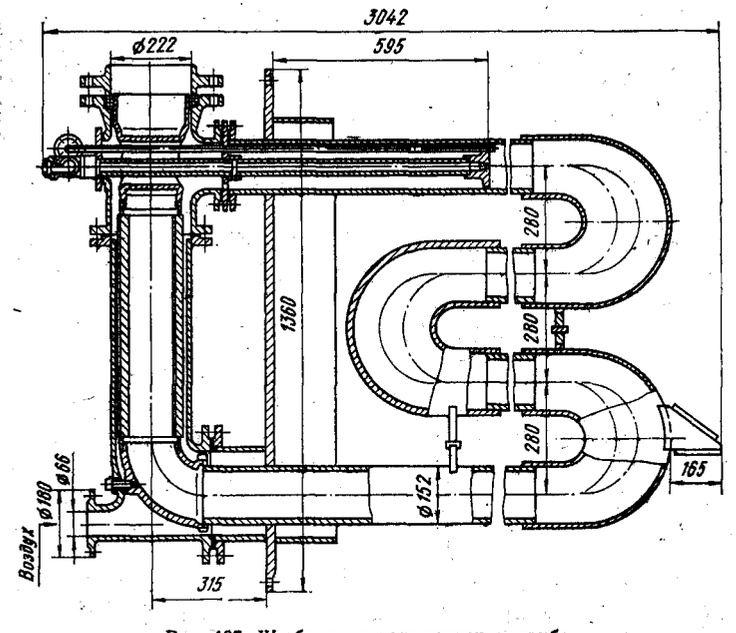


Рис. 107. W-образная радиационная труба

футеровки рабочего пространства, и постоянно установленная дежурная горелка. Труба предназначена для сжигания природного или смешанного газа.

В зависимости от теплоты сгорания газа и требуемой теплопроизводительности меняется диаметр газового сопла.

Глава 9

СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ ГОРЕЛОК

В соответствии с ГОСТ 21204—75 «Горелки газовые. Общие технические требования» и принятой терминологией установлены следующие термины и определения, относящиеся к системам зажигания горелок.

Запальное устройство — устройство, обеспечивающее подвод энергии для воспламенения топлива при розжиге.

Запальная горелка — вспомогательная горелка, служащая для розжига основной горелки.

Устройство контроля пламени — устройство, реагирующее на пламя контролируемой горелки.

Запально-защитное устройство — устройство для зажигания, включающее запальную горелку, запальное устройство и устройство контроля пламени.

В технической литературе и в номенклатуре заводов-изготовителей встречаются и другие наименования, являющиеся по существу синонимами принятых терминов:

Термин	Синонимы
Запальное устройство	Запальник, электрозапальники, запальная свеча
Запальная горелка	Дежурная горелка, пилотная горелка, запально-дежурная горелка, пилотно-запальное устройство, запальник
Устройство контроля пламени	Датчик, фотодатчик, ионизационный датчик, контрольный электрод, датчик пламени, автомат контроля пламени
Запально-защитное устройство	Пилотно-защитное устройство, запально-защитно-дежурное устройство

В дальнейшем при описании конкретных конструкций сохранены заводские и отраслевые наименования.

Запальные устройства и запальные горелки применяют в печах периодического действия при большом количестве горелок на агрегате, а также в том случае, если основные горелки эксплуатируются при таких режимах, когда они работают неустойчиво. Запальные горелки могут быть переносными и стационарными.

Запально-защитные устройства должны устанавливаться на горелках, работающих в печах с температурой ниже температуры воспламенения, или же при двухпозиционном регулировании в случае полного прекращения подачи газа в горелки.

Из переносных запальных горелок наибольшее распространение получили газовые запальники конструкции Ленгипроинжпроекта и Мосгазпроекта, из стационарных запальных горелок — пилотно-запальное устройство типа ПЗУ-1 конструкции Теплопроекта и дежурная электрозапальная горелка конструкции ВНИИМТа, из за-

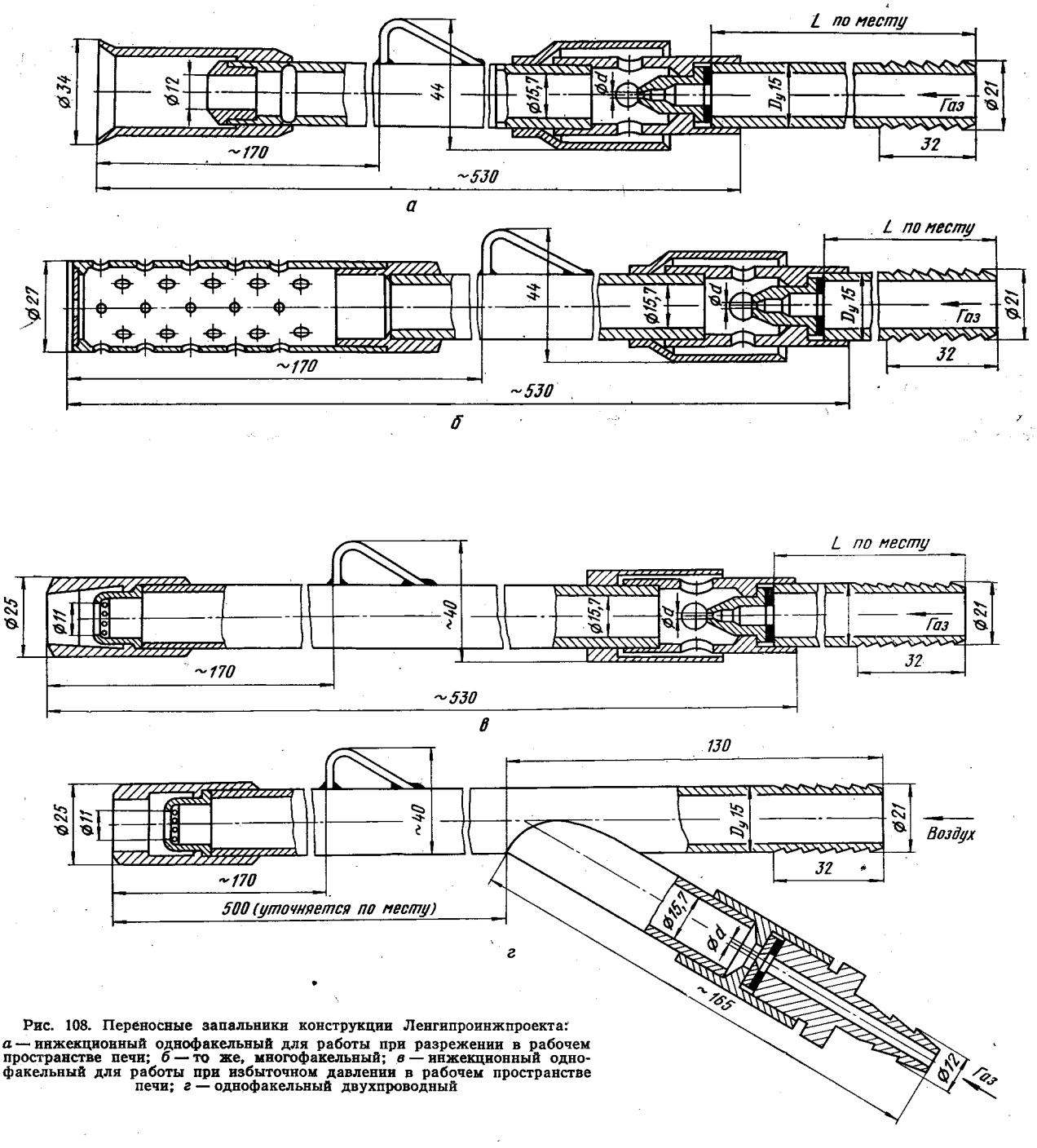


Рис. 108. Переносные запальники конструкции Ленгипроинжпроекта:
а — инжекционный однофакельный для работы при разрежении в рабочем пространстве печи; *б* — то же, многофакельный; *в* — инжекционный однофакельный для работы при избыточном давлении в рабочем пространстве печи; *г* — однофакельный двухпроводный

пально-защитных устройств — пилотно-защитное устройство типа ПЗУ конструкции Теплопроекта, запально-защитное устройство типа ЗЗУ завода «Ильмарине», комплект приборов завода «Старорусприбор».

9.1. Переносные запальники конструкции Ленгипроинжпроекта

Институтом «Ленгипроинжпроект» разработаны переносные газовые запальники: инжекционные однофакельные (рис. 108, *а*) и многофакельные (рис. 108, *б*) для работы при разрежении в рабочем пространстве печного агрегата, инжекционные однофакельные (рис. 108, *в*) для работы при давлении в рабочем пространстве, а также однофакельный двухпроводный запальник с принудительной подачей газа и воздуха (рис. 108, *г*), который может работать как при разрежении, так и при давлении в рабочем пространстве печного агрегата.

Запальники предназначены для работы на природном газе с $Q_н^р$=35,6 МДж/м³ или сжиженном газе с $Q_н^р$=92,1 МДж/м³. Основные характеристики переносных запальников конструкции Ленгипроинжпроекта приведены в табл. 42.

9.2. Переносные инжекционные запальники типа ИПЗ конструкции Мосгазпроекта

Переносные инжекционные запальники типа ИПЗ, разработанные Мосгазпроектом, предназначены для работы на природном газе ($d_г$=1,5 мм) и пропан-бутановом газе ($d_г$=10 мм). Номинальная пропускная способность по природному газу 0,000078 м³/с при давлении газа перед горелкой 1,3 кПа, по пропан-бутановому газу 0,000031 м³/с при давлении газа перед горелкой 3 кПа. Пределы регулирования запальника по газу 1 : 4.

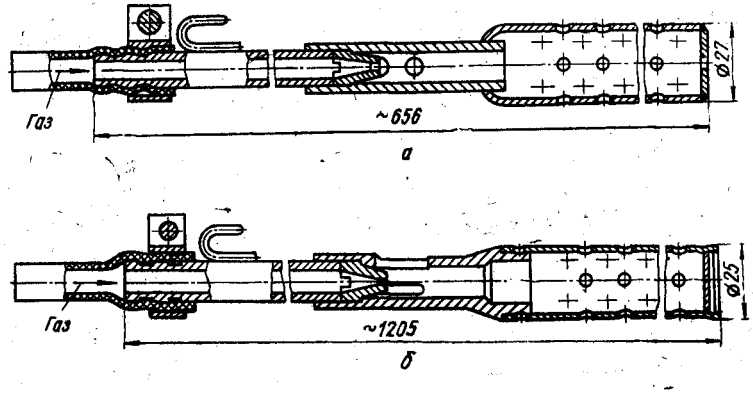


Рис. 109. Переносные инжекционные запальники конструкции Мосгазпроекта типа ИПЗ-1 (*а*) и ИПЗ-2 (*б*)

Таблица 42

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНОСНЫХ ЗАПАЛЬНИКОВ КОНСТРУКЦИИ ЛЕНГИПРОИНЖПРОЕКТА

Наименование запальника	Условия в рабочем пространстве	Теплота сгорания топлива $Q_н^р$, МДж/м³	Давление газа, кПа: максимальное	Давление газа, кПа: минимальное	Количество газа ($м^3/с \cdot 10^3$) при давлении: максимальном	Количество газа ($м^3/с \cdot 10^3$) при давлении: минимальном	Длина факела, мм	Диаметр сопла $d_г$, мм	Масса горелки, кг
Инжекционный однофакельный (рис. 108, *а*)	Разрежение	35,6	5	0,250	0,361	0,078	200—350	2,2	0,8
		35,6	90	5	0,389	0,114	200—350	1,25	
		92,1	5	1	0,089	0,031	250—400	1,25	
		92,1	80	10	0,106	0,044	250—400	0,85	
Инжекционный многофакельный (рис. 108, *б*)	»	35,6	5	0,25	0,444	0,103	80—107	2,50	0,9
		35,6	90	5	0,389	0,114	60—150	1,25	
		92,1	5	1	0,228	0,078	60—110	2,00	
		92,1	80	10	0,106	0,044	80—180	1,00	
Инжекционный однофакельный (рис. 108, *в*)	Давление	35,6	90	20	0,075	0,042	100	0,55	1,1
		92,1	80	20	0,031	0,017	100	0,45	
Двухпроводный однофакельный (рис. 108, *г*)	Любые	35,6	5*	1*	0,131**	0,058**	100	1,4	1,2
			0,8	0,2	1,389	0,611			
		92,1	5*	1,5*	0,039	0,017**	120	0,8	
			0,8	0,2	1,111	0,444			

* В числителе — давление газа, в знаменателе — давление воздуха, кПа.
** В числителе — количество газа, в знаменателе — количество воздуха, $м^3/с \cdot 10^3$.

Переносные инжекционные газовые запальники типа ИПЗ разработаны двух типоразмеров: ИПЗ-1 и ИПЗ-2, различающихся главным образом длиной. Конструктивные размеры переносных инжекционных запальников типа ИПЗ показаны на рис. 109.

9.3. Пилотно-запальное устройство типа ПЗУ-1

Электрогазовое пилотно-запальное устройство ПЗУ-1, разработанное Теплопроектом, является стационарным двухпроводным запальным устройством, которое герметически крепится к корпусу основной горелки или к горелочной плите и имеет дистанционное электроискровое зажигание.

Пропускная способность пилотно-запального устройства по природному газу составляет от 0,00014 до 0,00028 м³/с. Работа пилотно-запального устройства (рис. 110) осуществляется следующим образом.

Газ смешивается с воздухом в смесителе. Газо-воздушная смесь разветвляется в корпусе на два потока, один из которых через четыре отверстия диаметром 1,5 мм поступает в камеру зажигания. После поджигания от электрической искры горящая газо-воздушная смесь вытекает по центральной трубе пламепровода, выполненной из стали Х18Н10Т. Остальная газо-воздушная смесь через основное отверстие диаметром 15 мм проходит по наружному кольцевому зазору пламепровода, загораясь до выходе из насадка. Канал в огнеупорном блоке основной горелки, предназначенный для установки ПЗУ-1, одновременно является его горелочным туннелем. Наблюдения за горением осуществляются через кварцевое стекло гляделки.

Дежурная электрозапальная горелка, разработанная ВНИИМТом (рис. 111), представляет собой видоизмененную конструкцию ПЗУ-1. Для стабилизации факела в выходном сечении горелки предусмотрена диффузорная корундовая труба, примыкающая к горелочному туннелю основной горелки. Электрозапальная горелка предназначена для работы в качестве постоянно действующей дежурной горелки.

Номинальная пропускная способность горелки по газу 0,00028 м³/с при давлении перед горелкой газа 0,5, воздуха 0,45 кПа; $\alpha=0{,}9$. Пределы регулирования по газу 0,00014—0,00042 м³/с. Масса горелки 4 кг.

Розжиг дежурной горелки производится встроенной в нее электрической свечой, подключенной к стандартной индукционной катушке, питание которой осуществляется постоянным током напряжением 24 В.

9.4. Пилотно-защитное устройство типа ПЗУ

Разработанное Теплопроектом пилотно-защитное устройство типа ПЗУ (рис. 112) отличается от пилотно-запального устройства ПЗУ-1 наличием контрольного электрода, служащего для контроля факела пилотной горелки. Электрод представляет собой стержень диам. 6 мм, выполненный из дисилицида молибдена. Электрод крепится в держателе, к которому подсоединяется провод внешней сети. Схема установки ПЗУ с горелкой типа ГНП показана на рис. 113.

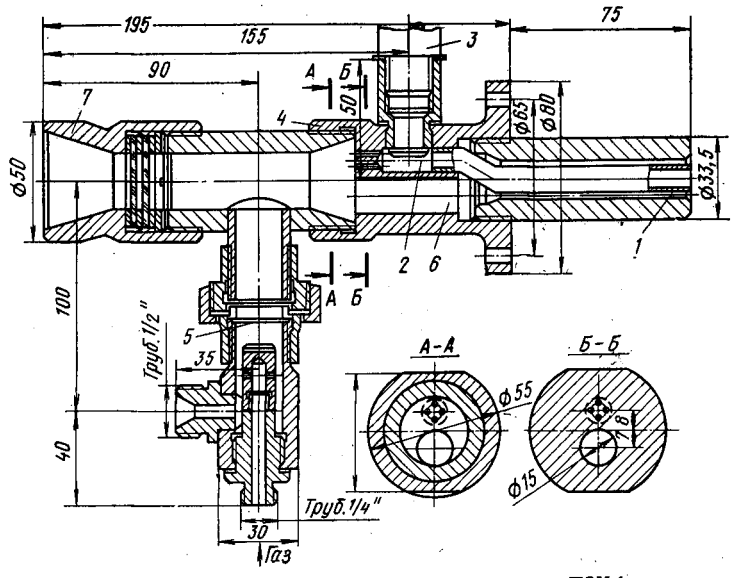


Рис. 110. Пилотно-запальное устройство типа ПЗУ-1:
1 — пламепровод; *2* — камера зажигания; *3* — автомобильная свеча; *4* — корпус запальника; *5* — смеситель; *6* — основное отверстие; *7* — гляделка

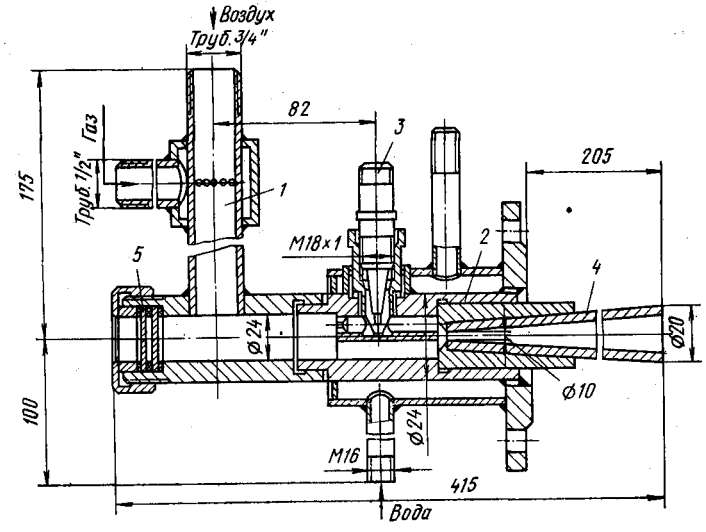


Рис. 111. Дежурная электрозапальная горелка конструкции ВНИИМТа:
1 — газо-воздушный смеситель; *2* — корпус; *3* — электрическая свеча; *4* — диффузорная корундовая труба; *5* — гляделка

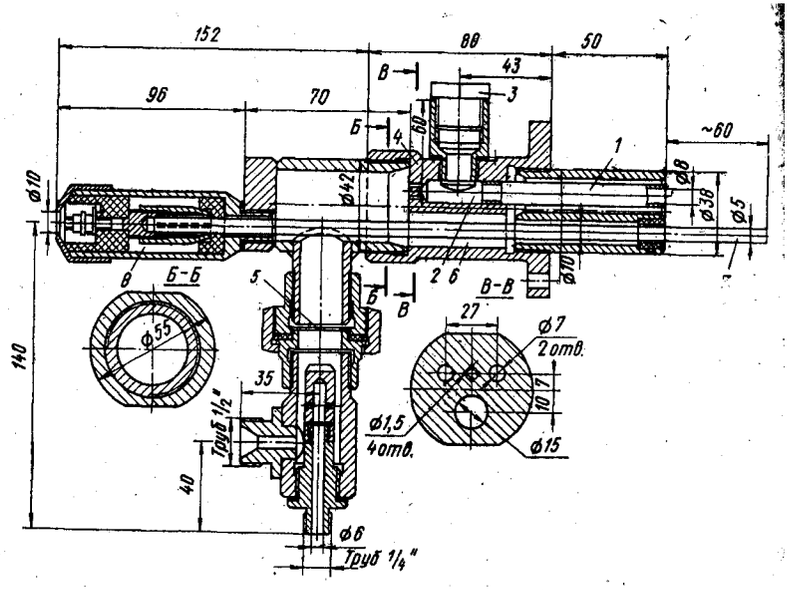


Рис. 112. Пилотно-защитное устройство типа ПЗУ:
1 — пламепровод; *2* — камера зажигания; *3* — автомобильная свеча; *4* — корпус запальника; *5* — смеситель; *6* — основное отверстие; *7* — контрольный электрод; *8* — держатель электрода

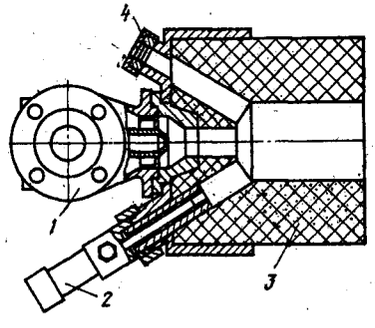


Рис. 113. Схема установки ПЗУ с горелкой типа ГНП:
1 — горелка типа ГНП; *2* — ПЗУ; *3* — горелочный камень; *4* — гляделка

9.5. Запально-защитные устройства типа ЗЗУ завода «Ильмарине» (г. Таллин)

Запально-защитные устройства типа ЗЗУ завода «Ильмарине» предназначены для дистанционного розжига горелок, работающих на жидком или газообразном топливе. Входящий в комплект управляющий прибор с датчиком пламени осуществляет контроль за наличием пламени в топке. Запально-защитное устройство включается в общую схему автоматики или работает самостоятельно.

Таблица 43

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАПАЛЬНО-ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ТИПА ЗЗУ ЗАВОДА «ИЛЬМАРИНЕ»

Тип запально-защитного устройства	Назначение			Способ контроля
	розжиг	контроль факелов		
		основного	запального	
ЗЗУ-1	Дистанционный	Совместный		Фотодатчиком
ЗЗУ-6	»			
ЗЗУ-3	»	Нет	Есть	Ионизационный
ЗЗУ-4	»	Есть	»	Ионизационный с фотодатчиком
ЗЗУ-7	Дистанционный розжиг горелок ГМГ на котлах ДКВр	Наличие пламени в топке		Управляющим прибором с фотодатчиком

Примечание. Для ЗЗУ-7 поочередный розжиг горелок с соответствующим переключением фотодатчиков к прибору.

Разработаны устройства ЗЗУ-1, ЗЗУ-3, ЗЗУ-4, ЗЗУ-6 и ЗЗУ-7, которые отличаются принципом получения сигнала и комплектностью.

Основные характеристики запально-защитных устройств типа ЗЗУ приведены в табл. 43. Принципиальная функциональная схема запально-защитного устройства ЗЗУ-4 показана на рис. 114.

Управляющий импульс одновременно открывает электромагнитный вентиль на газовой линии запальника и подает напряжение на источник высокого напряжения (бобину или высоковольтный трансформатор). Образовавшееся высокое напряжение поступает на центральный электрод запальника, между электродом и корпусом появляется искра, которая зажигает газ. Импульс от появления факела передается от датчика на управляющий прибор, где сигнал усиливается, и в результате срабатывает выходное реле управляющего прибора. Сигнал используется как разрешение для подачи газа в основную горелку. В процессе работы фотодатчик осуществляет контроль за факелом основной горелки.

По сравнению со схемой для ЗЗУ-4 (см. рис. 114) устройства ЗЗУ-1, ЗЗУ-6 и ЗЗУ-7 отличаются отсутствием ионизационного датчика с управляющим прибором к запальнику, а устройство ЗЗУ-3 — отсутствием фотодатчика с управляющим прибором к основной горелке.

Запальник к ЗЗУ показан на рис. 115. Запальники изготовляют со стволом длиной L=350; 500; 700; 1000; 1500; 2000; 2500; 3000; 3500; 4000; 4500 и 5000 мм. Запальник в комплекте ЗЗУ-7 изготовляют длиной ствола L=350 мм.

Запальник может работать на любом горючем газе с теплотой сгорания от 14,65 до 121,4 МДж/м³.

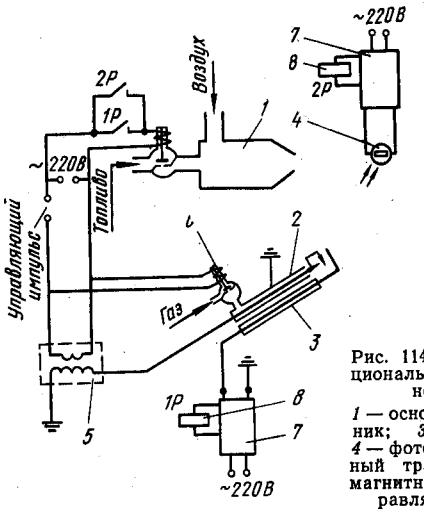


Рис. 114. Принципиальная функциональная схема запально-защитного устройства ЗЗУ-4:
1 — основная горелка; *2* — запальник; *3* — ионизационный датчик; *4* — фотодатчик; *5* — высоковольтный трансформатор; *6* — электромагнитный вентиль СВФ-10; *7* — управляющий прибор; *8* — реле

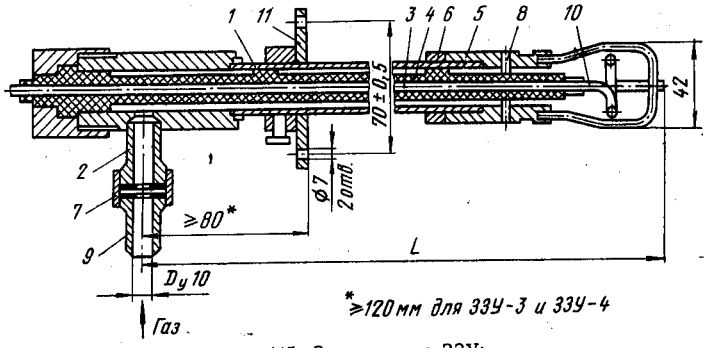


Рис. 115. Запальник к ЗЗУ:
1 — ствол; *2* — штуцер; *3* — центральный электрод; *4* — керамическая изоляция; *5* — наконечник; *6* — контргайка; *7* — дроссельная шайба; *8* — регулировочный винт; *9* — штуцер; *10* — хвостовик центрального электрода; *11* — фланец

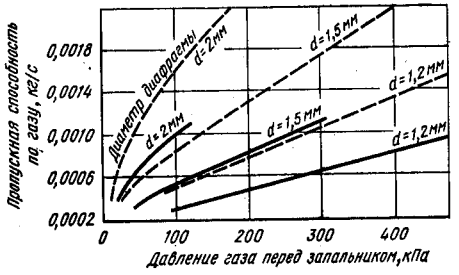


Рис. 116. Пропускная способность по газу запальника к ЗЗУ:
——— — природный газ, $\rho_{ог}$ =0,72 кг/м³; — — — — пропан-бутановый газ, $\rho_{ог}$=1,86 кг/м³

На рис. 116 показана пропускная способность запальника при работе на природном и пропан-бутановом газе в зависимости от давления газа перед горелкой и диаметра дроссельной шайбы, установленной на подводе газа. В комплект поставки входят три дроссельные шайбы диаметром 1,2; 1,5 и 2 мм. Оптимальная пропускная способность запальника по газу от 0,00042 до 0,0011 кг/с. Длина факела запальника примерно 800 мм.

Центральный электрод запальника заключен в керамическую изоляцию и помещен в ствол запальника, заканчивающийся наконечником. В наконечнике имеются три винта для центровки и регулировки положения центрального электрода и искрового промежутка. Центральный электрод выводится наружу через торцовую часть запальника для присоединения провода высокого напряжения.

Газ проходит через ствол запальника и воспламеняется на выходе из наконечника от электрической искры, возникающей в искровом промежутке между хвостовиком центрального электрода и кольцевым электродом наконечника.

Для обеспечения устойчивого горения запальника он должен располагаться внутри специального канала в потоке воздуха, направленного параллельно оси запальника. Возможна установка запальника в общей трубе с мазутной форсункой, но при этом существует опасность загрязнения и заливания его мазутом. Поток воздуха обеспечивается путем подачи вентиляторного или компрессорного воздуха, а также может создаваться за счет разрежения в рабочем пространстве печи.

Установочная труба для запальника может располагаться параллельно оси горелки на возможно более близком расстоянии к ней. Возможно и направление установочной трубы под углом относительно оси горелки. При этом ось установочной трубы должна пересекать ось горелки вблизи корня факела. Для сохранения запальника от излучения топки наконечник его должен быть утоплен на 250—400 мм от торца установочной трубы. Скорость воздуха в установочной трубе рекомендуется выбирать в пределах 0,5—12 м/с, при бо́льших скоростях воздуха существует опасность разрыва факела запальника. В таких случаях факел можно поддерживать при помощи включенной искры, что требует постоянной работы высоковольтного трансформатора. При нормальных воздушных режимах в этом нет необходимости. Высоковольтный трансформатор после появления факела запальника целесообразно выключать.

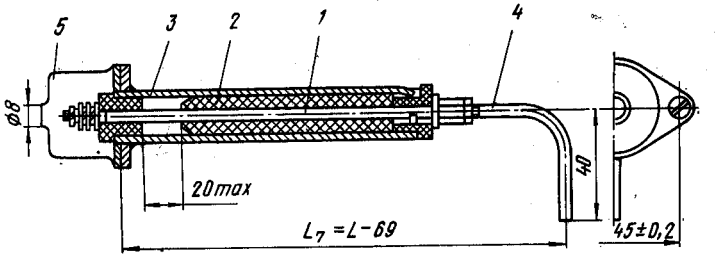


Рис. 117. Ионизационный датчик к ЗЗУ-4:
1 — стержень; *2* — керамическая изоляция; *3* — экранная труба; *4* — электрод; *5* — колпачок

Длительность работы запальника определяется условиями прогрева рабочего пространства печи и достижения устойчивого горения газа основных горелок.

В устройствах ЗЗУ-3 и ЗЗУ-4 в общей установочной трубе с запальником располагается ионизационный датчик (рис. 117), передающий изменение проводимости запального факела к управляющему прибору. Ионизационный датчик крепится к стволу запальника при помощи фланца и хомутов. Электрод датчика должен омываться пламенем запальника. Расстояние от электрода до наконечника запальника должно быть 10—20 мм. Минимальный внутренний диаметр установочной трубы с ионизационным датчиком 70 мм.

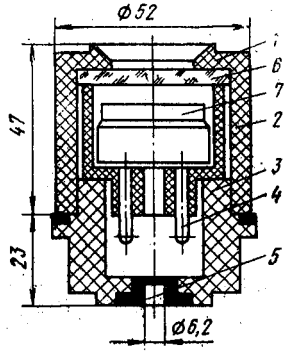


Рис. 118. Фотодатчик к ЗЗУ:

1 — крышка; *2* — панель; *3* — корпус; *4* — лепесток; *5* — уплотнение; *6* — стекло; *7* — фоторезистор

В зависимости от воздушного режима факел запальника может иметь разный характер. Надежный сигнал от ионизационного датчика можно получить от желтого пламени.

При применении ЗЗУ с ионизационным датчиком (ЗЗУ-3 и ЗЗУ-4) следует учесть, что максимально допустимая температура в зоне установки электрода не должна превышать 600° С.

Электромагнитный вентиль СВФ-10 устойчиво работает при давлении газа перед ним от 100 до 1300 кПа. При меньших давлениях ухудшается уплотняющая способность вентиля. Контроль факела в ЗЗУ-1, ЗЗУ-6, ЗЗУ-7, а также в ЗЗУ-4 осуществляется с помощью фотодатчика (рис. 118).

Место установки фотодатчика выбирают в зависимости от типа ЗЗУ. Фотодатчики ЗЗУ-1 и ЗЗУ-6 устанавливают обычно на фланце установочной трубы, что обеспечивает попадание в его поле зрения запального и основного факелов. Фотодатчик должен устанавливаться на специальном кронштейне в зоне допустимых температур. Максимальная температура для фотодатчика 50° С. Необходимо предусмотреть условия, исключающие попадание копоти, влаги и топлива на защитное стекло.

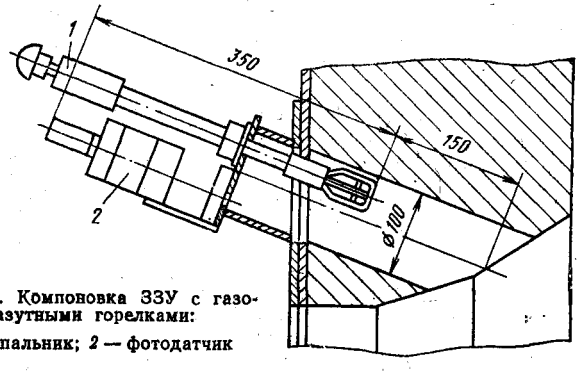


Рис. 119. Компоновка ЗЗУ с газомазутными горелками:

1 — запальник; *2* — фотодатчик

Место установки фотодатчика на горелках, где применяется ЗЗУ-4, нужно выбирать так, чтобы в поле зрения фотодатчика не мог попасть факел запальника. Пример компоновки ЗЗУ с газо-мазутными горелками показан на рис. 119.

При заказе ЗЗУ необходимо указать тип запально-защитного устройства и длину ствола запальника в мм. Например, «ЗЗУ-6/500» означает «запально-защитное устройство ЗЗУ-6 с длиной ствола запальника 500 мм». Если ЗЗУ-3 предназначено для работы на печном агрегате с давлением в рабочем пространстве на уровне установки ЗЗИ, то при заказе это необходимо специально оговорить.

9.6. Комплект приборов завода «Староруссприбор»

Старорусский приборостроительный завод «Староруссприбор» разработал и серийно выпускает систему автоматизации отопительных котельных типа АМКО, входящие в которую газовый электрозапальник типа ЭЗ и прибор контроля факела «Пламя» (контрольный электрод типа КЭ для газового пламени и фотодатчик типа ФД

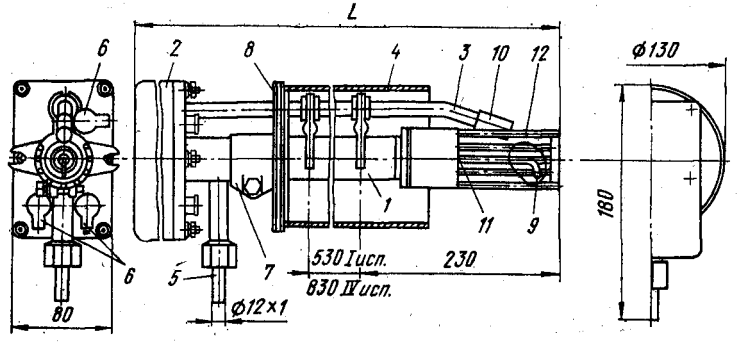


Рис. 120. Газовый электрозапальник типа ЭЗ завода «Староруссприбор»:

1 — труба запальника; *2* — коробка; *3* — контрольный электрод; *4* — ограждающий корпус; *5* — штуцер для подвода газа; *6* — клеммы; *7* — хомут; *8* — фланец ограждающего корпуса; *9* — стабилизатор пламени; *10* — жиклер контрольного электрода; *11* — сопло трубы запальника; *12* — наконечник.

для мазутного пламени) могут применяться на нагревательных и термических печах.

Газовый электрозапальник типа ЭЗ (рис. 120) имеет следующие основные технические характеристики:

диапазон давления газа, подводимого к электрозапальнику, 1—50 кПа; максимальная температура газа, поступающего в запальник, +50° С; пропускная способность по природному газу при давлении 40 кПа 0,0014 кг/с; допустимые колебания напряжения, подводимого к электрозапальнику для воспламенения газа, 6—12 кВ; температура окружающего воздуха при относительной влажности до 80% от 5 до 50° С.

Электрозапальник выпускается в четырех исполнениях, различающихся длиной L (рис. 120):

Исполнение	L, мм	Масса, кг
I	500	6,2
II	800	9,5
III	1400	10,0
IV	2000	12,5

При открывании электромагнитного газового клапана КГ-10, установленного на газопроводе к запальнику, газ, поступающий к запальнику, через штуцер попадает в коробку, откуда поступает в трубу запальника и в трубку контрольного электрода. Истечение газа происходит через жиклер контрольного электрода и сопло трубы запальника. Возникающая между наконечником и стабилизатором пламени искра воспламеняет газ. Напряжение подается от трансформатора зажигания ТЗ-2.

Контроль наличия собственного факела запальника осуществляется на принципе детектирующего свойства пламени, возникающего в цепи контрольный электрод — пламя — стабилизатор пламени. Сигнал наличия факела поступает на блок управления розжига и сигнализации. Воздух для сжигания газа запальника подается через воздухопровод основной горелки или же за счет разрежения в рабочем пространстве печного агрегата.

Примерные варианты взаимного расположения газового электрозапальника типа ЭЗ с основной горелкой показаны для дутьевой горелки на рис. 121, *а*, а для инжекционной горелки — на рис. 121, *б*. Электрозапальник должен быть расположен относительно горелочного устройства таким образом, чтобы обеспечивался его надежный розжиг. Благодаря наличию скользящего фланца электрозапальник может перемещаться в ограждающем корпусе (закладной детали).

Для контроля факела основной горелки предусмотрено применение контрольного электрода или фотодатчика.

Контрольный электрод типа КЭ (рис. 122) предназначен для работы в качестве чувствительного элемента в схемах защиты и сигнализации при погасании газового факела основных горелок печного агрегата. Заводом «Старорусприбор» контрольные электроды КЭ выпускаются в четырех исполнениях, отличающихся длиной.

Исполнение	Размеры, мм L	l	Масса, кг
I	490	258	0,9
II	690	458	1,2
III	950	718	1,6
IV	1200	968	2,0

Контрольный электрод устанавливается под углом 45—60° к оси основной горелки, причем расстояние от выходного сечения горелки до конца электрода должно быть не более 80 мм.

Фотоэлектрический датчик типа ФД (рис. 123) предназначен для работы в качестве чувствительного элемента в комплекте с автоматом контроля пламени, который применяют в схемах защиты и сигнализации при погасании мазутного факела в печном агрегате.

Фотодатчик типа ФД устанавливают таким образом, чтобы он был ориентирован на светлую (периферийную) часть факела

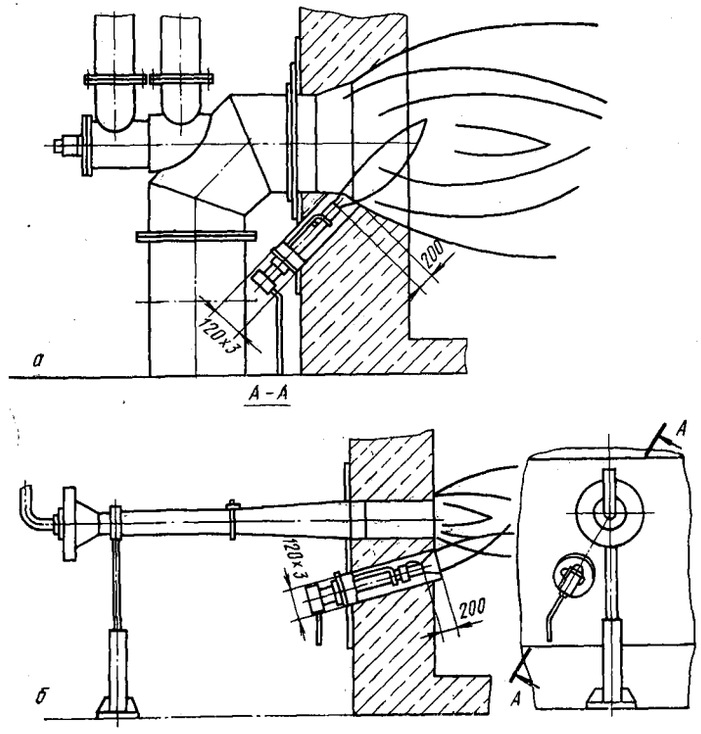


Рис. 121. Установка газового электрозапальника типа ЭЗ:
а — на дутьевой горелке; *б* — на инжекционной горелке

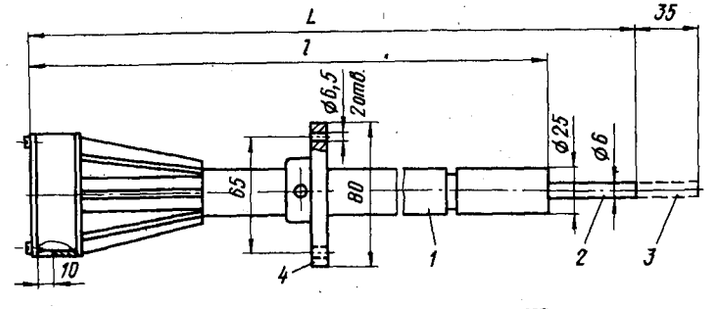


Рис. 122. Контрольный электрод типа КЭ:
1 — труба; *2* — держатель; *3* — чувствительный элемент; *4* — подвижной фланец

(рис. 124). Фотодатчик можно крепить на специальном тубусе, установленном либо в огнеупорной футеровке агрегата, либо на самой горелке, но не далее, чем в 1,0—1,2 м от ее выходного сечения.

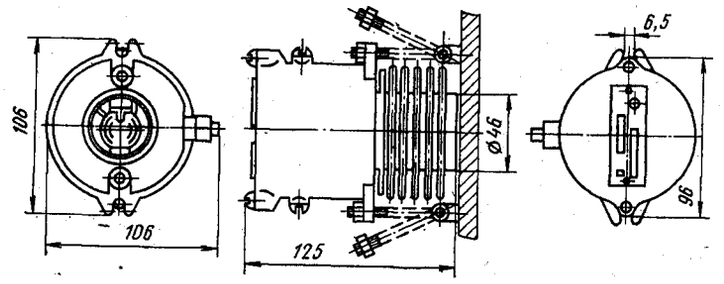


Рис. 123. Фотодатчик типа ФД

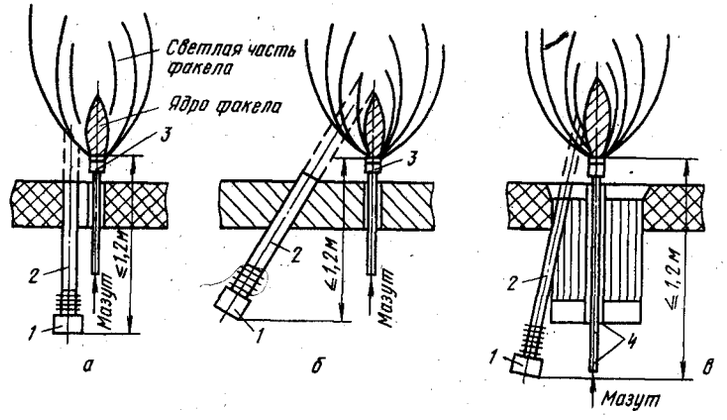


Рис. 124. Варианты установки фотодатчиков типа ФД:
а — параллельно оси форсунки; *б* — под углом к оси форсунки; *в* — в газо-мазутной горелке; *1* — фотоэлектрический датчик типа ФД; *2* — тубус; *3* — мазутная форсунка; *4* — газо-мазутная горелка

При необходимости снижения чувствительности фотодатчика (во избежание реакции на излучение огнеупорной футеровки) он может быть задиафрагмирован шайбами необходимого диаметра, которые поставляются с фотодатчиком.

9.7. Требования безопасности

Требованиями к автоматизации горелок предусматриваются обеспечение безопасного и надежного пуска горелки, перевод ее в рабочее состояние, управление работой и выключение. Автоматическое устройство должно обеспечивать пуск горелки по программе, зависящей от мощности и степени автоматизации.

При погасании контролируемого пламени полуавтоматических горелок в условиях эксплуатации должно обеспечиваться защитное их отключение. Защитное отключение автоматических горелок в условиях эксплуатации должно происходить как минимум в следующих случаях:

при погасании контролируемого пламени;
при нарушениях подачи воздуха для сжигания, отвода или рециркуляции продуктов сгорания во время эксплуатации;
при аварийных отклонениях параметров тепловой установки.

Не допускается пуск автоматических горелок:

при отключении электропитания;
при недостаточном давлении топлива;
при аварийных отклонениях параметров тепловой установки;
при недостатке воздуха для сжигания;
при неполадках проветривающего устройства, устройств отвода или рециркуляции продуктов сгорания;
для горелок, оснащенных топливозапорными клапанами с автоматическим контролем плотности, — при неплотности клапанов.

В автоматических и полуавтоматических горелках не допускается подача топлива до включения запального устройства.

Устройство контроля пламени в условиях эксплуатации должно реагировать только на пламя контролируемой им горелки и не должно реагировать на посторонние источники тепла и света (раскаленная футеровка, освещение и т. д.). Устройство контроля пламени не должно допускать пуск горелки или должно обеспечивать выключение горелки в течение защитного времени, если из-за повреждения или недопустимых эксплуатационных условий перед пуском создается состояние «кажущегося» пламени. При замыкании или нарушении чувствительных элементов устройства контроля пламени или на их подводящих линиях не должен иметь место пуск горелок. При замыкании или нарушении чувствительных элементов устройства контроля пламени или их подводящих линий в условиях эксплуатации должно произойти защитное отключение горелки.

Группа горелок может быть оснащена устройством контроля пламени, реагирующим на факел одной из горелок, в том случае, если этот факел надежно обеспечивает зажигание факелов других горелок группы.

Система контроля пламени должна обеспечивать прекращение подачи топлива и защитное выключение горелки в случае, если при пуске не произойдет зажигания пламени в течение защитного времени, которое может составлять максимально 5 с. Фактически установленное время безопасности при розжиге должно исключать возможность взрыва смеси при появлении пламени к концу этого времени. Система контроля пламени должна обеспечивать прекращение подачи топлива и последующее защитное выключение горелки в течение 2 с, если при эксплуатации произойдет срыв или погасание пламени. Показатели надежности устройства контроля пламени (датчик и усилительный блок): вероятность безотказной работы за 2000 ч не менее 0,92.

К розжигу горелок предъявляют следующие основные требования:

горелка номинальной мощностью более 0,510 МВт должна оснащаться запальной горелкой и разжигаться при пониженной пус-

ковой мощности, равной 40—10% от номинальной. Мощность запальной горелки должна быть равна 5—1% от номинальной мощности основной горелки, но не более 0,135 МВт;

горелка номинальной мощностью менее 0,510 МВт должна разжигаться с помощью запального устройства; при этом пусковая мощность горелки должна быть в пределах 40—20% от номинальной мощности, но не более 0,135 МВт.

Время защитного отключения при розжиге горелки должно составлять от 2 до 5 с (в зависимости от пусковой мощности горелки).

Глава 10

ОГНЕУПОРНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ ТУННЕЛИ

Огнеупорный горелочный туннель играет существенную роль в организации сжигания топлива; он является дополнительным смесителем, источником зажигания и стабилизатором горения газо-воздушной смеси. В ряде случаев при организации факела специальной формы (например, плоского факела) горелочный туннель играет важнейшую роль в создании формы факела и является неотъемлемой частью горелки.

Горелочный туннель образуется в огнеупорном горелочном камне или блоке. Крупные блоки по условиям изготовления, транспортировки и монтажа делают составными из нескольких фасонных огнеупорных кирпичей.

Материал огнеупорных горелочных блоков выбирают в зависимости от условий работы горелочного туннеля. Горелочные блоки, работающие в относительно легких условиях, изготавливают из шамота класса А (28 % Al_2O_3), имеющего плотность 1,9 кг/дм³, огнеупорность 1730° С, предельную температуру службы 1300° С. Для более тяжелых условий работы применяют высокоглиноземистый кирпич, обычно МЛО-62 (62 % Al_2O_3), имеющий плотность, 2,4 кг/дм³, огнеупорность 1800° С, предельную температуру службы 1500° С. Крупные неразъемные горелочные блоки изготавливают из жароупорного высокоглиноземистого бетона.

Для горелок без предварительного смешения огнеупорный туннель играет роль стабилизатора горения и находится в сравнительно легких условиях, так как зона высоких температур в факеле этих горелок находится на значительном расстоянии от горелки, за пределами туннеля. Горелочный туннель для этих горелок имеет форму факела, т. е. расширяющегося диффузора. Длину и поперечные размеры туннеля выбирают таким образом, чтобы факел касался стенок туннеля в самом его конце, перед выходом в печь. Это улучшает условия работы туннеля, обеспечивая в то же время надежное поджигание газо-воздушной смеси. Нормализованы огнеупорные горелочные блоки для горелок типа «труба в трубе».

Для горелок с улучшенным смешением огнеупорный туннель не только стабилизирует горение, но и помогает создать необходимую форму факела. Горелочный туннель для этих горелок работает в более тяжелых условиях, так как в нем в значительной степени

происходит сгорание газа. В особенно тяжелых условиях работают горелочные туннели у горелок, образующих плоский факел, так как в этом случае сгорание газа происходит на огнеупорной поверхности туннеля. Нормализованы огнеупорные горелочные блоки для дутьевых горелок типа ГНП и плоскокаменных горелок типов ГР и ГПП.

У горелок с полным предварительным смешением практически все сгорание происходит в туннеле. Огнеупорный туннель в данном случае является не только стабилизатором горения, но и высокотемпературным излучателем. Туннель работает в весьма тяжелых условиях, испытывая воздействие высоких температур и высокоскоростных потоков. Для надежной стабилизации горения требуется специальная форма туннеля с резким расширением и созданием у корня факела зон циркуляции продуктов сгорания, которые и служат источниками поджигания газо-воздушной смеси. Нормализованы горелочные блоки для инжекционных горелок и инжекционно-атмосферных горелок типа ИА.

В некоторых горелках используются охлаждаемые металлические туннели, например у скоростных горелок типа ГВ, струйно-стабилизаторных горелок типа СГ и горелок с переменным избытком воздуха типа ПИВ. Есть случаи, когда в высокотемпературных печах горелки вообще не нуждаются в горелочных туннелях. Таковы горелки нагревательных колодцев.

В данной главе описываются только нормализованные огнеупорные горелочные блоки.

Для горелок, у которых конфигурация туннеля строго определена (горелки с излучающей чашей типа ГВИЧ, беспламенные панельные горелки типа ГБПШ, горелка полного предварительного смешения для безокислительного нагрева), форма и размеры огнеупорного горелочного туннеля приведены при описании горелок.

Для остальных горелок, а также для мазутных форсунок и газо-мазутных горелок конфигурация туннеля имеет меньшее значение. В этих случаях пользуются нормализованными горелочными блоками для горелок типа «труба в трубе», для дутьевых горелок типа ГНП или для инжекционных горелок, подбирая их по выходным размерам горелки.

10.1. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВБ и ДНБ

Для установки горелок «труба в трубе» типа ДВБ и ДНБ разработано 25 типоразмеров огнеупорных горелочных блоков. Каждый блок может изготавливаться в двух исполнениях: цельном и разъемном. Цельные блоки имеют обозначения от С1 до С25; разъемные обозначаются так же, как и цельные, но в скобках указывается количество кирпичей, из которых состоит блок.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВБ и ДНБ показаны на рис. 125; их конструктивные размеры приведены в табл. 44.

Для горелок типа ДВБ и ДНБ с диаметром носика от 200 до 425 мм, устанавливаемых под углом от 12 до 18° к горизонтальной оси, применяют цельные блоки С1—С10 (рис. 125, *а*) и разъемные С1(4)—С4(4) (рис. 125, *б*) и С5(8)—С10(8) (рис. 125, *в*); для горелок с диаметром носика от 200 до 300 мм, устанавливаемых под

Таблица 44

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ОГНЕУПОРНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ДВБ И ДНБ (РИС. 125)

Тип горелки	Обозначение блока: цельного	Обозначение блока: разъемного	β, град	D	d	H	H_1	h	h_1	h_2	h_3	h_4	L	l	Число кирпичей в разъемном блоке	Объем блока, дм³: цельного	Объем блока, дм³: разъемного
ДВБ-200	С16	С16 (4)	—	360	200	—	—	—	—	—	—	—	599	297,5	4	92,7	92,7
ДНБ-200	С1	С1 (4)	16,5	352	200	599	—	377	218	—	—	168	576	286	4	97,0	97,0
	С11	С11 (8)	28	416	204	733	599	422	307	215	380	171	576	286	8	114,8	101,6
ДВБ-225	С17	С17 (4)	—	360	226	—	—	—	—	—	—	—	599	297,5	4	90,6	90,6
ДНБ-225	С2	С2 (4)	16,5	354	224	599	—	362	233	—	—	181	576	286	4	95,2	95,2
	С12	С12 (8)	28,5	418	218	733	599	410	319	225	370	180	576	286	8	113,5	100,2
ДВБ-250	С18	С18 (4)	—	360	250	—	—	—	—	—	—	—	599	297,5	4	88,6	88,6
ДНБ-250	С3	С3 (4)	17,5	356	244	599	—	347	248	—	—	194	576	286	4	93,2	93,2
	С13	С13 (8)	29	422	244	733	599	393	336	240	355	194	576	286	8	110,5	97,2
ДВБ-275	С19	С19 (4)	—	360	276	—	—	—	—	—	—	—	599	297,5	4	86,5	86,5
ДНБ-275	С4	С4 (4)	17,5	360	274	599	—	332	263	—	—	209	576	286	4	90,2	90,2
	С14	С14 (8)	30	430	292	800	666	441	355	254	408	206	576	286	8	120,8	107,6
ДВБ-300	С20	С20 (8)	—	480	300	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	109,3	109,3
ДНБ-300	С5	С5 (8)	17,5	458	296	666	599	365	297	241	354	215	692	344	8	118,0	110,0
	С15	С15 (8)	28	530	316	867	733	500	363	270	459	226	692	344	8	151,0	135,0
ДВБ-325	С21	С21 (8)	—	460	326	—	—	—	—	—	—	—	662	331	8	106,4	106,4
ДНБ-325	С6	С6 (8)	17,5	462	322	666	599	350	312	256	339	229	692	344	8	115,0	107,0
ДВБ-350	С22	С22 (8)	—	460	350	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	103,5	103,5
ДНБ-350	С7	С7 (8)	18	462	346	733	599	402	327	271	324	244	692	344	8	128,2	112,2
ДВБ-375	С23	С23 (8)	—	460	376	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	100,6	100,6
ДНБ-375	С8	С8 (8)	18	464	370	733	666	387	342	286	376	259	692	344	8	125,3	117,4
ДВБ-400	С24	С24 (8)	—	460	400	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	97,6	97,6
ДНБ-400	С9	С9 (8)	18	466	400	733	666	372	357	300	362	274	692	344	8	121,5	113,6
ДВБ-425	С25	С25 (8)	—	460	426	—	—	—	—	—	—	—	666	331	8	94,2	94,2
ДНБ-425	С10	С10 (8)	18	474	420	733	666	357	372	314	348	286	692	344	8	118,0	110,0

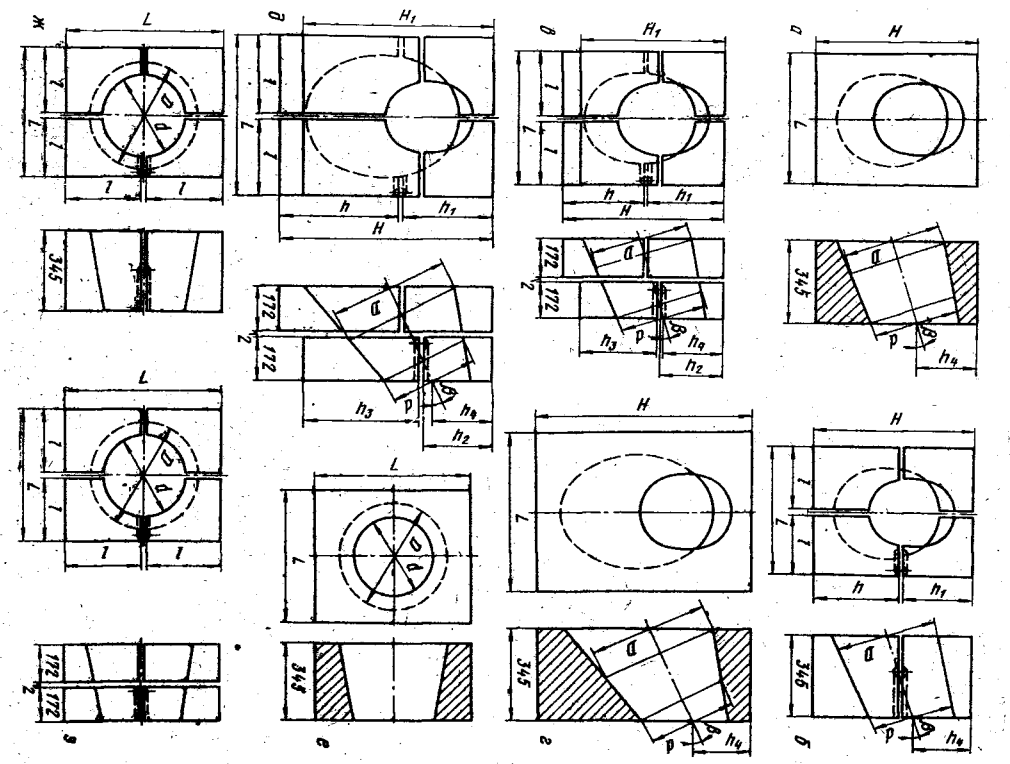


Рис. 125. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВБ и ДНБ:

а — цельные блоки С1—С10; *б* — разъемные блоки С1(4)—С4(4); *в* — разъемные блоки С5(8)—С10(8); *г* — цельные блоки С11—С15; *д* — разъемные блоки С11(8)—С15(8); *е* — цельные блоки С16—С25; *ж* — разъемные блоки С16(4)—С19(4); *з* — разъемные блоки С20(8)—С25(8)

углом от 20 до 30°, — цельные блоки С11—С15 (рис. 125, *г*) и разъемные блоки С11(8)—С15(8) (рис. 125, *д*); для горелок с диаметром носика от 200 до 425 мм, устанавливаемых под углом от 0 до ±5°, — цельные блоки С16—С25 (рис. 125, *е*) и разъемные блоки С16(4)—С19(4) (рис. 125, *ж*) и С20(8)—С25(8) (рис. 125, *з*).

Принцип нумерации кирпичей в разъемных блоках показан на рис. 126. Установка горелок под нужным углом производится с помощью горелочных плит.

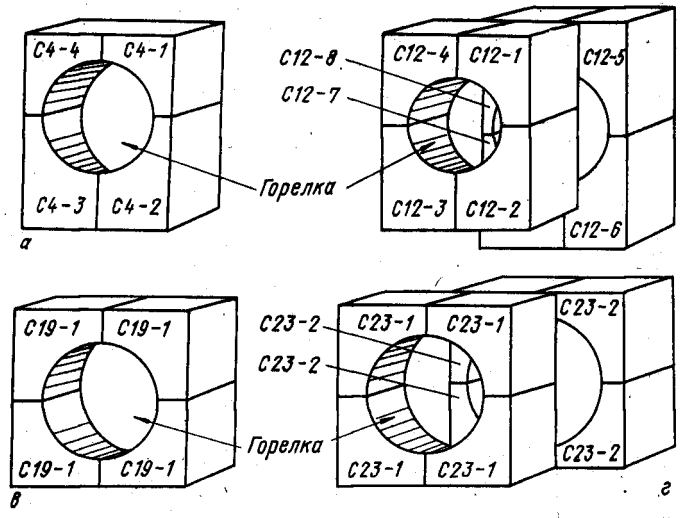


Рис. 126. Нумерация кирпичей в разъемных блоках:
а — для блоков С1(4)—С4(4); *б* — для блоков С5(8)—С15(8); *в* — для блоков С16(4)—С19(4); *г* — для блоков С20(8)—С25(8)

10.2. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВС и ДНС

Для установки горелок «труба в трубе» типа ДВС и ДНС разработано 18 типоразмеров огнеупорных горелочных блоков, каждый из которых может быть цельным и разъемным. Цельные блоки имеют обозначения с С26 до С43, а разъемные обозначаются так же, как и цельные, но в скобках указывается количество кирпичей, из которых состоит блок.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВС и ДНС показаны на рис. 127, а их конструктивные размеры приведены в табл. 45.

Для горелок типа ДВС и ДНС, устанавливаемых под углом от 0 до ±7° к горизонтальной оси, применяют цельные блоки С26—С31 (рис. 127, *а*) или разъемные блоки С26(2)—С31(2) (рис. 127, *б*); для горелок, устанавливаемых под углом от 10 до 20°, — цельные блоки С32—С37 (рис. 127, *в*) или разъемные блоки С32(8)—С37(8) (рис. 127, *г*); для горелок, устанавливаемых под углом от 22 до 30°, — цельные блоки С38—С43 (рис. 127, *в*) или разъемные блоки С38(8)—С43(8) (рис. 127, *г*). Принцип нумерации кирпичей в разъемных балках для горелок типа ДВС и ДНС тот же, что и в блоках для горелок типа ДВБ и ДНБ (см. рис. 126).

Установка горелок под нужными углами производится с помощью горелочных плит.

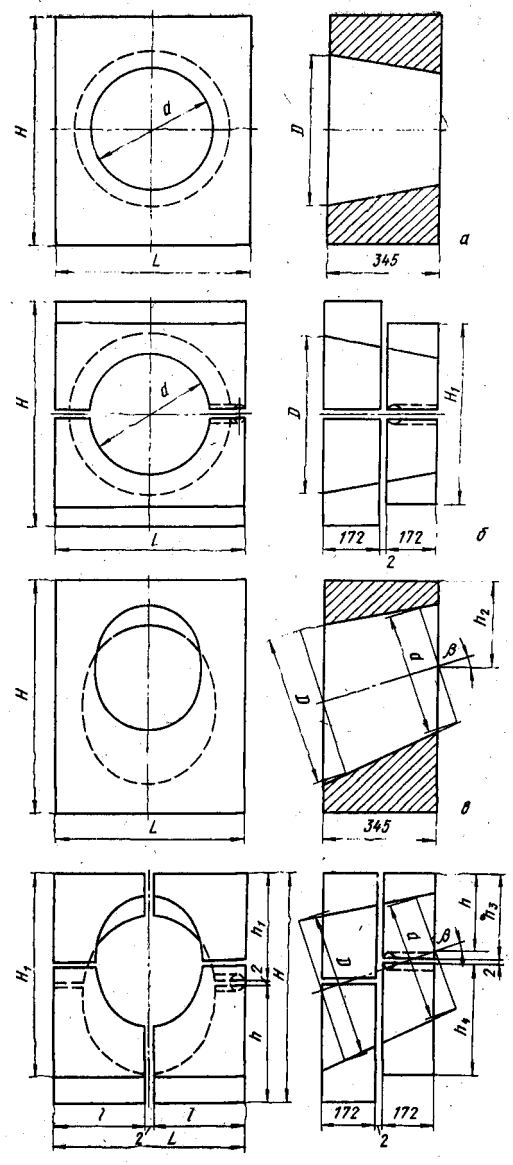


Рис. 127. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ДВС и ДНС:
а — цельные блоки С26—С31; *б* — разъемные блоки С26(2)—С31(2); *в* — цельные блоки С32—С43; *г* — разъемные блоки С32(8)—С43(8)

Таблица 45

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ОГНЕУПОРНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ДВС И ДНС

Тип горелки	Обозначение блока: цельного	Обозначение блока: разъемного	β, град	D	d	H	H_1	h	h_1	h_2	h_3	h_4	L	l	Число кирпичей в разъемном блоке	Объем блока, дм³: цельного	Объем блока, дм³: разъемного
ДВС-60, ДНС-60	С26	С26 (2)	0	314	60	467	333	—	—	—	—	—	462	230	2	62,8	51,6
	С32	С32 (8)	15	300	81	467	333	285	180	104	126	205	462	230	8	63,6	52,0
	С38	С38 (8)	26	303	82	534	400	312	220	91	133	265	462	230	8	74,0	61,2
ДВС-70, ДНС-70	С27	С27 (2)	0	324	70	467	333	—	—	—	—	—	462	230	2	61,7	50,8
	С33	С33 (8)	15	310	91	467	333	280	185	109	131	200	462	230	8	62,5	51,0
	С39	С39 (8)	26	314	96	534	400	306	226	97	138	260	462	230	8	72,7	59,8
ДВС-90, ДНС-90	С28	С28 (2)	0	344	90	467	333	—	—	—	—	—	462	230	2	59,4	48,2
	С34	С34 (8)	15	332	112	467	400	270	195	119	141	257	462	230	8	60,0	53,6
	С40	С40 (8)	26	335	117	601	400	362	237	107	149	249	462	230	8	80,9	62,4
ДВС-110, ДНС-110	С29	С29 (2)	0	364	110	467	333	—	—	—	—	—	462	230	2	56,8	45,8
	С35	С35 (8)	15	354	133	534	400	326	206	129	151	247	462	230	8	67,3	56,4
	С41	С41 (8)	26	357	139	601	467	351	248	118	161	305	462	230	8	78,1	64,6
ДВС-130, ДНС-130	С30	С30 (2)	0	384	130	534	400	—	—	—	—	—	578	288	2	86,1	72,0
	С36	С36 (8)	15	376	154	534	400	315	217	139	161	237	578	288	8	64,3	70,8
	С42	С42 (8)	26	379	163	601	467	339	260	130	171	294	578	288	8	99,0	82,0
ДВС-150, ДНС-150	С31	С31 (8)	0	404	150	534	400	—	—	—	—	—	578	288	2	83,1	69,0
	С37	С37 (8)	15	398	175	534	467	305	227	149	171	294	578	288	8	61,1	75,2
	С43	С43 (8)	26	401	184	668	467	395	271	141	182	283	578	288	8	95,7	84,8

10.3. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГНП

Разработано 9 огнеупорных горелочных блоков для горизонтальной установки горелок типа ГНП. Блоки для горелок ГНП-1—ГНП-4 разъемные из двух кирпичей, для горелок ГНП-5 и ГНП-6—

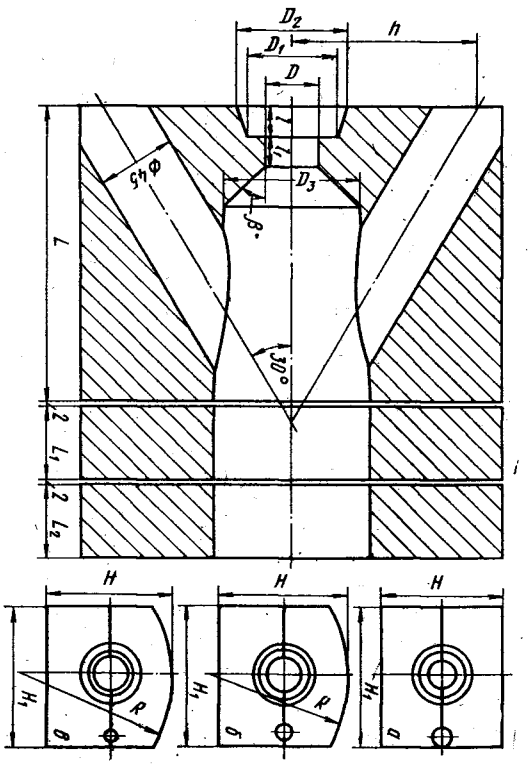


Рис. 128. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГНП:
а — ГНП-1—ГНП-4; *б* — ГНП-5—ГНП-8; *в* — ГНП-9

Таблица 46

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ОГНЕУПОРНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ГНП

Тип горелки	D	D_1	D_2	D_3	H	H_1	h	L	L_1	L_2	l	l_1	R	β, град	Число кирпичей в блоке	Объем блока, дм³
ГНП-1	28	49	58	70	200	228	100	160	—	—	16	15	—	45	2	6,2
ГНП-2	36	64	78	90	200	228	100	205	—	—	25	15	—	45	2	7,6
ГНП-3	48	84	104	120	200	228	107	250	—	—	38	20	—	45	2	8,5
ГНП-4	58	94	120	145	200	228	120	300	—	—	49	20	—	45	2	9,0
ГНП-5	76	134	170	190	352	344	153	146	242	—	69	20	346	45	3	30,8
ГНП-6	94	134	170	235	352	344	153	159	229	—	69	20	346	45	3	26,7
ГНП-7	112	164	200	280	434	460	185	190	100	100	85	20	460	45	4	47,5
ГНП-8	130	174	230	320	434	460	206	177	140	140	102	20	460	60	4	48,0
ГНП-9	144	184	246	360	518	576	236	196	130	130	115	20	577	60	8	78,7

из трех, для ГНП-7 и ГНП-8 — из четырех, для ГНП-9 — из восьми кирпичей. Все блоки имеют отверстия диаметром 45 мм для установки запальной горелки и устройства контроля пламени.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГНП показаны на рис. 128, а их конструктивные размеры приведены в табл. 46.

10.4. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГР

Огнеупорные горелочные блоки выполнены для условий установки горелок типа ГР в подвесном своде печей. Разработано 10 типоразмеров огнеупорных горелочных блоков, каждый из которых предназначен для установки с соответствующей горелкой ГР. Для

Таблица 47

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ОГНЕУПОРНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ГР

Тип горелки	Обозначение блока	D	D_1	H	H_1	L	L_1	R	Объем блока, дм³
ГР-60	ВГ-1*	82	39	290	45	304	290	100	24,4
	ВГ-11	82	39	290	45	458	325	100	52,7
ГР-85	ВГ-2*	88	46	290	45	304	290	100	24,2
	ВГ-12	88	46	290	45	458	325	100	52,4
ГР-125	ВГ-3*	96	54	290	60	304	290	100	23,8
	ВГ-13	96	54	290	60	458	325	100	52,0
ГР-175	ВГ-4	105	63	290	60	458	325	100	51,6
ГР-250	ВГ-5	122	79	290	75	458	325	100	50,3
ГР-350	ВГ-6	136	93	290	75	458	325	110	49,2
ГР-500	ВГ-7	152	108	290	75	458	325	110	48,2
ГР-750	ВГ-8	174	130	350	75	458	325	140	57,5
ГР-1050	ВГ-9	199	155	350	75	458	325	140	55,1
ГР-1500	ВГ-10	240	195	350	75	458	325	140	54,8

* Применяют в тех случаях, когда воздушный патрубок горелки расположен параллельно оси печи.

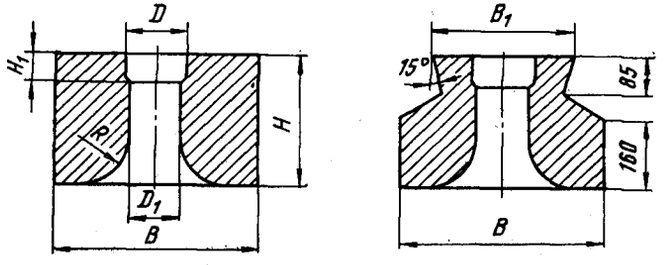


Рис. 129. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГР

горелок ГР-60, ГР-85 и ГР-125 огнеупорные горелочные блоки разработаны в двух вариантах, применение которых зависит от того, как направлен воздушный патрубок горелки: параллельно или перпендикулярно оси печи.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГР показаны на рис. 129, а их конструктивные размеры приведены в табл. 47.

10.5. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГПП

Огнеупорные горелочные блоки выполнены для условий установки горелок типа ГПП в подвесном и арочном своде печей. Разработано 3 типоразмера огнеупорных горелочных блоков, каждый из которых предназначен для установки с соответствующей горелкой ГПП. Блоки разработаны в двух вариантах: для установки в подвесном и арочном сводах. Блоки, предназначенные для установки в подвесном своде, имеют прямоугольную форму и обозначаются так же, как и соответствующая горелка. Блоки, предназначенные для арочного свода, имеют клиновидную форму и обозначаются так же, как и соответствующая горелка с добавлением индекса «с».

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГПП показаны на рис. 130, а их конструктивные размеры приведены в табл. 48.

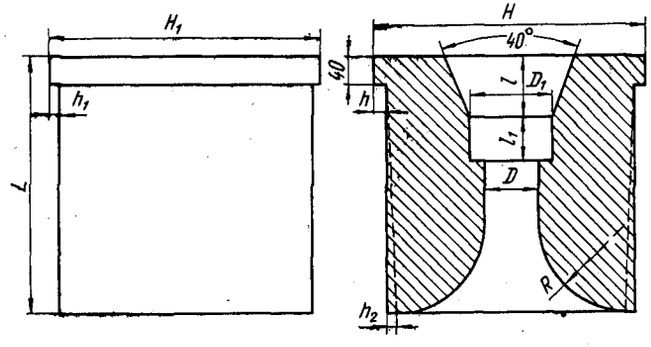


Рис. 130. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ГПП

Таблица 48

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ГОРЕЛОЧНЫХ ТУННЕЛЕЙ ДЛЯ ГОРЕЛОК ТИПА ГПП (РИС. 130)

Обозначение блока	D	D_1	H	H_1	h	h_1	h_2	L	l	l_1	R	Число кирпичей в блоке	Объем блока, дм³
Тип горелки ГПП-2													
ГПП-2	35	56	290	250	11	11	—	290	109	47	80	1	19,6
ГПП-2с	35	56	290	250	11	11	9	290	109	47	80	1	19,1

Продолжение табл.

Обозначение блока	D	D_1	H	H_1	h	h_1	h_2	L	l	l_1	R	Число кирпичей в блоке	Объем блока, м³
Тип горелки ГПП-3													
ГПП-3	50	78	368	368	16	12	—	348	150	65	105	2	40,0
ГПП-3с	50	78	368	368	16	12	10	348	150	65	105	2	39,1
Тип горелки ГПП-4													
ГПП-4	75	109	368	368	16	12	—	348	84	61	120	2	31,9
ГПП-4с	75	109	368	368	16	12	10	348	84	61	120	2	31,1

10.6. Горелочный туннель для инжекционных горелок

Для инжекционных горелок по опытным данным приняты следующие соотношения размеров горелочного туннеля:

$$D/d_{н.г} = 2{,}4 \div 3; \quad L/D = 2{,}4 \div 2{,}7,$$

где D и L — соответственно диаметр и длина туннеля, $d_{н.г}$ — диаметр носика горелки.

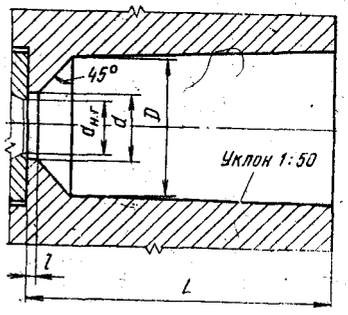


Рис. 131. Рекомендуемая конфигурация горелочных туннелей для инжекционных горелок

Такие соотношения размеров, как показали эксперименты, обеспечивают устойчивую работу горелки и практически полное сгорание газа в туннеле.

Рекомендуется конфигурация горелочного туннеля для инжекционных горелок показана на рис. 131, а их конструктивные размеры приведены в табл. 49.

При проектировании в зависимости от местных условий могут быть приняты размеры, отличающиеся от оптимальных:

длина туннеля для горелок с $d_{н.г} = 15 \div 56$ мм не должна быть меньше оптимальной, указанной в табл. 49. Однако значительное увеличение длины туннеля приводит к снижению его стойкости;

длина туннеля для горелок с $d_{н.г} = 86 \div 134$ мм должна быть не менее $1{,}5D$;

длина туннеля для горелок с $d_{н.г} = 154 \div 270$ мм в большинстве случаев не может быть выполнена равной оптимальной и практически принимается 500—700 мм, т. е. равной толщине кладки;

диаметр туннеля не должен быть меньше рекомендуемого в таблице.

Для крупных горелок туннель может выполняться цилиндрическим.

Таблица 49

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ГОРЕЛОЧНЫХ ТУННЕЛЕЙ ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК (РИС. 131)

$d_{н.г}$	d	D	l	L оптимальная	L минимальная	$l_{н.г}$	d	D	l	L оптимальная	L минимальная
15	20	45	10	120	120	75	95	180	15	450	450
18	25	50	10	130	130	86	110	210	20	500	320
21	30	55	10	140	140	100	130	240	20	600	360
24	35	60	10	150	150	116	150	280	20	700	420
28	40	70	10	170	170	134	175	320	20	800	480
32	45	80	10	200	200	154	200	370	25	900	500—700
37	50	90	15	230	230	178	230	430	25	1050	500—700
42	55	100	15	260	260	205	260	500	25	1200	500—700
48	60	115	15	300	300	235	300	570	25	1400	500—700
56	70	135	15	350	350	270	340	650	25	1600	500—700
65	80	155	15	400	400						

10.7. Огнеупорные горелочные блоки для инжекционных горелок с диаметром носика до 100 мм

Для инжекционных горелок с диаметром носика $d_{н.г}$ от 15 до 100 мм разработано 14 огнеупорных горелочных блоков, каждый из которых предназначен для горизонтальной установки с соответствующей инжекционной горелкой. Все блоки имеют отверстия диаметром 45 мм для установки запальной горелки и устройства контроля пламени.

Блоки изготавливают в двух исполнениях: цельные и разъемные. Разъемные блоки для горелок с $d_{н.г} = 15 \div 42$ мм состоят из двух кирпичей, для горелок с $d_{н.г} = 48 \div 100$ мм — из четырех кирпичей.

Огнеупорные горелочные блоки для инжекционных горелок с диаметром носика до 100 мм показаны на рис. 132, а их конструктивные размеры приведены в табл. 50.

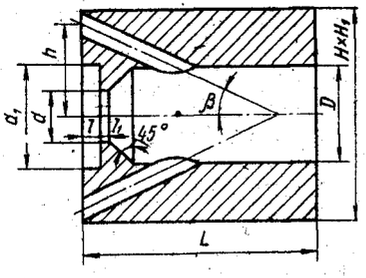


Рис. 132. Огнеупорные горелочные блоки для инжекционных горелок с диаметром носика до 100 мм

Таблица 50

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ОГНЕУПОРНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК С ДИАМЕТРОМ НОСИКА ДО 100 мм (РИС. 132)

Диаметр носика горелки $d_{н.г}$, мм	Обозначение блока: цельного	Обозначение блока: разъемного	D	d	d_1	H	H_1	h	L	l	l_1	β, град	Число кирпичей в разъемном блоке	Объем блока, дм³
15	С44	С44(2)	45	15	65	345	200	94	345	7	10	35	2	22,99
18	С45	С45(2)	50	18	65	345	200	94	345	7	10	35	2	22,89
21	С46	С46(2)	55	21	65	345	200	94	345	7	10	35	2	22,78
24	С47	С47(2)	60	24	85	345	200	122	345	22	10	35	2	22,42
28	С48	С48(2)	70	28	85	345	200	122	345	22	10	35	2	22,14
32	С49	С49(2)	80	32	85	345	200	122	345	22	10	35	2	21,82
37	С50	С50(2)	90	37	105	345	266	130	345	37	15	35	2	29,23
42	С51	С51(2)	100	42	105	345	266	130	345	37	15	35	2	28,84
48	С52	С52(4)	115	48	125	345	266	138	345	52	15	25	4	27,81
56	С53	С53(4)	135	56	125	345	266	138	462	52	15	25	4	26,50
65	С54	С54(4)	155	65	145	462	334	188	462	82	15	25	4	62,58
75	С55	С55(4)	180	75	145	462	334	188	462	82	15	25	4	61,44
86	С56	С56(4)	210	86	225	462	334	200	462	102	20	25	4	56,44
100	С58	С58(4)	240	100	225	578	334	230	462	102	20	30	4	69,35

10.8. Огнеупорные горелочные блоки для крупных инжекционных горелок нагревательных печей

Крупные инжекционные горелки с $d_{н.г}=154\div270$ мм применяются для торцового отопления нагревательных печей. При этом

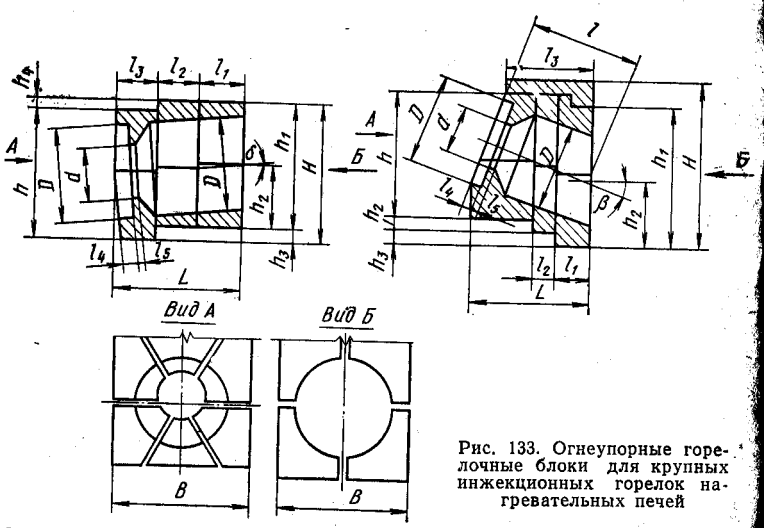


Рис. 133. Огнеупорные горелочные блоки для крупных инжекционных горелок нагревательных печей

горелки верхних зон отопления устанавливаются под углами 15, 18, 20 и 22°, а нижних — под углом 5° к горизонтальной оси. Исходя из этих условий, разработано 15 огнеупорных горелочных блоков для крупных инжекционных горелок.

Огнеупорные горелочные блоки для крупных инжекционных горелок нагревательных печей показаны на рис. 133, а их конструктивные размеры приведены в табл. 51.

Таблица 51

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ММ) ОГНЕУПОРНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ КРУПНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ (РИС. 133)

β, град	γ, град	D	d	H	H_1	h	h_1	h_2	h_3	h_4	L	l	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
$d_{н.г}$=154 мм																	
—	5	420	220	630	580	560	630	325	—	70	696	—	232	232	232	90	25
15	—	420	220	840	580	630	700	340	70	70	696	664	174	174	464	100	20
18	—	420	220	770	580	630	630	275	—	70	625	590	174	116	464	80	25
20	—	420	220	840	580	700	700	301	70	—	650	616	174	116	464	60	20
20	—	420	220	840	580	700	700	290	—	70	655	621	260	—	—	100	20
22	—	420	220	840	580	700	700	292	70	—	650	615	174	116	464	60	20
$d_{н.г}$=178 мм																	
—	5	480	260	700	696	630	—	340	—	70	696	—	232	232	232	100	25
15	—	480	260	910	696	700	770	375	70	70	696	656	174	174	464	100	25
18	—	480	260	840	696	700	700	310	—	70	625	580	174	116	464	80	25
20	—	480	260	910	696	770	700	371	70	70	650	605	174	116	464	70	20
20	—	480	260	910	696	770	700	320	—	70	655	610	260	—	—	100	25
22	—	480	260	910	696	700	770	362	—	70	650	603	174	116	464	60	20
$d_{н.г}$=235 мм и $d_{н.г}$=270 мм																	
—	5	520	300	770	718	770	700	340	70	—	696	—	232	232	232	97	25
15	—	520	300	910	696	700	800	375	70	70	696	650	174	174	348	110	25
18	—	520	300	840	696	700	700	322	—	70	625	573	174	116	464	80	25
20	—	520	300	980	696	770	770	406	70	70	650	598	174	116	464	80	25
20	—	520	300	910	704	770	770	350	—	70	655	603	260	—	—	120	25
22	—	520	300	980	696	770	840	397	70	70	650	595	174	116	464	70	25

10.9. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ИА

Для установки горелок типа ИА в горелочном поясе колпаковых печей разработано два типоразмера горелочных блоков. Каждый блок состоит из двух кирпичей. Блок рассчитан на тангенциальную установку горелок в горелочном поясе. Для розжига горелки предусмотрено отверстие в блоке диаметром 50 мм.

Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ИА показаны на рис. 134; их конструктивные размеры (мм) приведены ниже:

	ИА-1	ИА-2		ИА-1	ИА-2
A	540	555	H	320	240
B	275	290	F	115	120
C	130	160	D	200	230
G	395	430	Объем, дм³	12,2	13,4

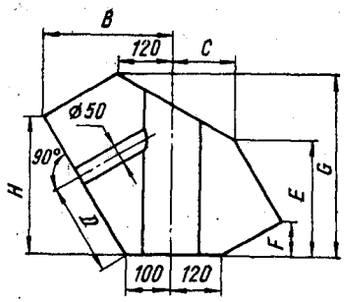
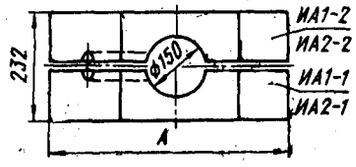


Рис. 134. Огнеупорные горелочные блоки для горелок типа ИА



Глава 11

ПРИНЦИПЫ ИСПЫТАНИЯ СОЖИГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

11.1. Контрольные испытания газовых горелок

Горелки общего назначения тепловой мощностью до 10 МВт с ручным, полуавтоматическим и автоматическим управлением, работающие на топливных газах, сжигаемых в смеси с воздухом, а также газовая часть комбинированных горелок, предназначенных для работы и на жидком топливе, должны проходить контрольные испытания с целью установления паспортных характеристик горелок и выявления соответствия их общим техническим требованиям и технической документации разработчика и изготовителя.

Методы контрольных испытаний не распространяются на специальные горелки на горелки, являющиеся составной частью газоиспользующего оборудования для быта и предприятий общественного питания, а также на специальные испытания отдельных элементов горелок (электродвигатели, дутьевые вентиляторы, элементы автоматики), по которым должны быть самостоятельные гарантии качества завода-изготовителя.

При проведении и обработке результатов контрольных испытаний употребляют наименования и обозначения, приведенные в табл. 52.

Объемы газов, указанные в табл. 52, приведены к состоянию при 273,15 К и давлении 101,325 кПа.

При проведении и оформлении контрольных испытаний применяют следующие термины, понятия и определения.

Таблица 52

НАИМЕНОВАНИЯ, ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН, РАССМАТРИВАЕМЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Наименование и единица измерения величины	Условное обозначение
Тепловая мощность горелки, Вт	P
Коэффициент предельного регулирования горелки по тепловой мощности	$K_{пр.р}$
Коэффициент рабочего регулирования горелки по тепловой мощности	$K_{р.р}$
Масса горелки, кг	m
Ответственные размеры, мм	l_1, l_2, l_3
Объемная концентрация компонентов газообразного топлива, %	C_nH_m; H_2; CO H_2S; N_2; O_2; CO_2
Плотность газа, кг/м³	$\rho_г$
Плотность воздуха, кг/м³	$\rho_в$
Теплота сгорания газа низшая, кДж/м³	$Q^р_н$
Число Воббе низшее, кДж/м³	$W_{он}$
Расход газа, поступающего в горелку, м³/с	$V_г$
Расход воздуха, поступающего в горелку, м³/с	$V_в$
Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 м³ газа, м³	L_0
Давление, Па:	
барометрическое	B_0
газа перед горелкой	$p_г$
воздуха перед горелкой	$p_в$
в камере горения	$p_т$
Температура, °С:	
атмосферного воздуха	t_0
газа перед горелкой	$t_{г.г}$
воздуха перед горелкой	$t_{в.г}$
наружных поверхностей горелки	$t_{н.г}$
наиболее нагретых металлических внутренних деталей	$t_{в.д}$
воздуха перед вентилятором	$t_{в.в}$
уходящих газов из камеры горения стенда или агрегата	$t_{ух}$
Длина факела, мм	$l_ф$
Объемная концентрация компонентов в продуктах сгорания, %	O_2'
	CO_2'
	CO'
	CH_4'
	H_2'
	SO_2'
	NO_x*

Продолжение

Наименование и единица измерения величины	Условное обозначение
Потери тепла от химической неполноты сгорания, %	$q_в$
Коэффициент расхода воздуха	α
Уровень звука, дБ	L_{xA}
Уровень звукового давления, дБ	L_x
Потребляемая мощность электродвигателя вентилятора горелки, Вт	$P_{вт}$
Время защитного отключения подачи топлива при розжиге горелки, с	$\tau_р$
Время защитного отключения подачи топлива при погасании пламени горелки, с	$\tau_п$
Время защитного отключения подачи топлива при отклонении давления газа или воздуха, с	$\tau_д$
Объемная доля компонента в газе	r_i
Плотность компонента в газе, кг/м³	ρ_i
Газовая постоянная компонента, Дж/(кг·К)	R_i
Молекулярная масса компонента, кг/моль	μ_i
Объем сухих продуктов сгорания при определенном α, м³/м³ газа	$V_{с.г}$
Объем сухих продуктов сгорания при $\alpha=1{,}0$	$V^0_{с.г}$
Объемная концентрация метана в газо-воздушной смеси, % (объема)	$CH_4^{см}$
Объем CO_2 в сухих продуктах сгорания при $\alpha=1{,}0$ м³/м³ газа	$V^0_{CO_2}$
Объем азота в сухих продуктах сгорания при $\alpha=1{,}0$, м³/м³ газа	$V^0_{N_2}$
Сумма объемов горючих компонентов в продуктах сгорания, %	$\Sigma V_{г.к}$
Сумма объемов горючих компонентов в продуктах сгорания, приведенная к $\alpha=1{,}0$, %	$\Sigma V^{\alpha=1}_{г.к}$
Коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания	h
Расстояние от выходного сечения горелки до точки измерения, мм	l
Диаметр (гидравлический) выходного сечения горелки, мм	d
Ресурс работы горелки, ч	$\tau_г$

Примечания:

1. Длина факела, уровень звука и звукового давления, а также потребляемая мощность электродвигателя вентилятора горелки определяются только на режиме номинальной тепловой мощности.

2. Определение длины факела при испытаниях на промышленных тепловых агрегатах в условиях эксплуатации не обязательно.

* мг/м³.

Автоматическая газовая горелка — горелка, оборудованная следующими автоматически действующими устройствами: дистанционным запальным (запальной горелкой), контроля пламени, контроля давления газа и воздуха, запорными клапанами, средствами управления, регулирования и сигнализации.

Блочная газовая горелка — горелка, скомпонованная с автономным вентилятором в единый блок, оборудованная средствами автоматического управления и регулирования.

Воббе число низшее — отношение низшей объемной теплоты сгорания к корню квадратному из относительной плотности газа.

Время защитного отключения подачи топлива при погасании пламени горелки — интервал времени от момента погасания пламени до прекращения подачи топлива.

Время защитного отключения подачи топлива при розжиге горелки — интервал времени от момента начала подачи топлива в горелку до прекращения подачи топлива при отсутствии воспламенения.

Газовая горелка — устройство, обеспечивающее устойчивое сжигание газообразного топлива и регулирование процесса горения.

Газовая горелка общего назначения — горелка, выдающая нерегулируемый факел и обеспечивающая согласно действующим нормативам полное сжигание газа при минимальном коэффициенте расхода воздуха.

Газовая горелка с ручным управлением — горелка, розжиг которой, изменение режима работы и наблюдение за работой выполняются оператором.

Коэффициент предельного регулирования газовой горелки по тепловой мощности — отношение максимальной тепловой мощности к минимальной тепловой мощности.

Коэффициент рабочего регулирования газовой горелки по тепловой мощности — отношение номинальной тепловой мощности к минимальной тепловой мощности.

Номинальное давление воздуха перед газовой горелкой — статическое давление воздуха непосредственно перед горелкой, соответствующее номинальной тепловой мощности при атмосферном давлении в камере горения.

Номинальное давление газа перед газовой горелкой — статическое давление газа непосредственно перед горелкой, соответствующее номинальной тепловой мощности при атмосферном давлении в камере горения.

Номинальная тепловая мощность — максимально достигнутая мощность при длительной работе горелки, химической неполноте сгорания, не превосходящей установленной нормы, и при принятом минимальном коэффициенте расхода воздуха.

Максимальная тепловая мощность — мощность, составляющая 0,9 от мощности, соответствующей верхнему пределу устойчивой работы горелки.

Минимальная тепловая мощность — мощность, составляющая 1,1 от мощности, соответствующей нижнему пределу устойчивой работы горелки.

Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха — наименьший коэффициент расхода воздуха, установленный при химической неполноте сгорания на выходе из топки агрегата или из камеры горения стенда, не превышающей норму.

Таблица 53

ГЛАВНЫЕ ПРИЗНАКИ КЛАССИФИКАЦИИ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК

Обозначения главных признаков	Способ подачи воздуха на горение	Номинальное давление газа и воздуха, кПа	Теплота сгорания газа, МДж/м³	Номинальная тепловая мощность, кВт	Номинальная относительная длина факела, калибр	Локализация пламени
1	За счет разрежения или конвекцией	Низкое для газа до 5,0 Низкое для воздуха до 1,0	Низкая: от 3,3 до 16,7	До 200	Беспламенная	Свободные факелы
2	Инжекция газа воздухом	Среднее для газа от 5 до 100 Низкое для воздуха до 1,0	Средняя: от 16,7 до 29,2	От 200 до 400	До 10	В огнеупорном туннеле и камере
3	Инжекция воздухом газа	Высокое для газа свыше 100 Низкое для воздуха до 1,0	Высокая, 1-я группа: от 29,2 до 62,7	От 400 до 800	От 10 до 16	На огнеупорной поверхности
4	Принудительный без предварительного смешения	Низкое для газа до 5,0 Среднее для воздуха от 1,0 до 3,0	Высокая, 2-я группа: от 62,7 до 117	От 800 до 1600	От 16 до 25	На металлической сетке
5	То же, с предварительным смешением	Среднее для газа от 5 до 100 Среднее для воздуха от 1,0 до 3,0	—	От 1600 до 3200	От 25 до 40	В пористой перфорированной или зернистой огнеупорной массе
6	То же, вентилятором за счет давления газа	Высокое для газа свыше 100 Среднее для воздуха от 1,0 до 3,0	—	От 3200 до 32000	От 40 до 63	—
7	—	Низкое для газа до 5,0 Высокое для воздуха свыше 3,0	—	Свыше 32000	От 63 до 100	—
8	—	Среднее для газа от 5,0 до 100 Высокое для воздуха свыше 3,0	—	—	Свыше 100	—
9	—	Высокое для газа свыше 100 Высокое для воздуха свыше 3,0	—	—	—	—

Полуавтоматическая газовая горелка — горелка, обеспечивающая дистанционный розжиг и оборудованная устройством контроля пламени, запорным топливным клапаном и средствами сигнализации.

Степень стеснения — отношение площади выходного сечения горелки к площади поперечного сечения камеры горения.

Степень экранирования — отношение охлаждаемой площади тепловоспринимающей поверхности ко всей площади тепловоспринимающей поверхности топочной камеры.

Перед проведением контрольных испытаний сожигательных устройств на основании технической документации и представленного образца определяют:

классификационные признаки;

конструктивность (степень стандартизации и унификации);

технологичность конструкции (количество нормо-часов на изготовление, обслуживание и ремонт);

наличие автоматики (систем дистанционного розжига, пропорционирования, обеспечения безопасности, регулирования производительности);

основные размеры (влияющие на рабочий процесс, габаритные и присоединительные);

энергозатраты на привод вентилятора и питание устройств автоматики;

массу горелки;

новизну конструкции;

эстетичность конструкции;

удельную материалоемкость.

В соответствии с ГОСТ 17357—71 газовые горелки классифицируют по способу подачи воздуха на горение, по номинальному давлению газа и воздуха, по теплоте сгорания газа, по номинальной тепловой мощности, по номинальной относительной длине факела и по локализации пламени. Главные признаки и их условные обозначения рекомендуется принимать по обозначениям, приведенным в табл. 53. Таким образом, цифровое обозначение горелки состоит из шестизначного числа, последовательность цифр которого указывает главные признаки горелок в порядке расположения заголовков граф таблицы. Например, инжекционная горелка В-37 имеет обозначение 323 122, цифры которого означают: 3 — инжекция воздуха газом, 2 — среднее давление газа, 3 — теплота сгорания газа высокая 1-й группы (для случая сжигания природного газа), 1 — номинальная тепловая мощность до 200 кВт, 2 — номинальная относительная длина факела до 10 калибров, 2 — локализация пламени в огнеупорном туннеле.

Горелка ДВБ $350/d_г$ имеет обозначение по ГОСТ 17357—71 в виде числа 453 622, где цифра 4 означает принудительную подачу воздуха без предварительного смешения, 5 — среднее давление для газа (от 5,0 до 100 кПа) и среднее давление для воздуха (от 1,0 до 3,0 кПа), 3 — теплота сгорания высокая 1-й группы (для случая сжигания природного газа), 6 — номинальная тепловая мощность между 3,2 и 32,0 МВт, 2 — номинальная относительная длина факела 10 калибров, 2 — локализация пламени в огнеупорном туннеле и камере сгорания.

Конструктивность сожигательных устройств определяется по отношению количества применяемых стандартизованных и унифицированных узлов и деталей к общему количеству узлов и деталей этого сожигательного устройства.

Технологичность конструкции определяется следующими основными показателями:

технологичностью изготовления отдельных деталей;

технологичностью сборки горелки;

технологичностью монтажа и ремонта.

Объем автоматизации сожигательного устройства определяется наличными элементами автоматики. Энергозатраты на привод вентилятора и питание средств автоматики определяют по паспортным данным комплектующего оборудования или прямыми замерами. Массу горелки определяют взвешиванием. Новизна конструкции оценивается по патентному формуляру и наличию авторского свидетельства. Эстетичность сожигательного устройства характеризуется современностью форм, целесообразностью компоновки конструктивных элементов и удобством обслуживания. Удельную материалоемкость определяют как отношение массы сожигательного устройства в килограммах к номинальной теплопроизводительности горелки в ваттах, причем удельную материалоемкость определяют отдельно для керамики (огнеупорного материала), черных металлов и жаропрочных сплавов.

В ряде случаев, кроме огневых испытаний горелок, желательно проведение на заводе — изготовителе сожигательных устройств холодных испытаний с целью определения условных эталонных расходных характеристик сожигательных устройств и коэффициентов гидравлических сопротивлений газового и воздушного трактов.

Условные эталонные расходные характеристики сожигательных устройств и коэффициенты гидравлических сопротивлений определяются:

для дутьевых горелок — при раздельной продувке газового и воздушного трактов;

для инжекционных горелок и радиационных труб с инжекционным смесителем — при продувке только газового тракта;

для радиационных труб с принудительной подачей воздуха — при совместном течении потоков по газовому и воздушному трактам;

для газо-мазутных горелок — при продувке газового и воздушного трактов и тракта для распыливающего агента.

При определении условных расходных характеристик продувкой воздухом газ заменяется воздухом в соотношении: 1 м³ газа равен 1 м³ воздуха. Соотношение между расходом воздуха и расходом воздуха, имитирующего газ, принято равным стехиометрическому для данного вида газа.

Коэффициенты гидравлического сопротивления соответственно газового $\xi_г$ и воздушного $\xi_в$ трактов определяют по формулам

$$\xi_г = \frac{2P_{в.г} \cdot 10^3}{\rho_{в.г} W_{вг}^2}; \quad \xi_в = \frac{2P_в \cdot 10^3}{\rho_в W_в^2}, \tag{67}$$

где $P_{в.г}$ — избыточное давление воздуха, имитирующего газ, на входе в горелку, кПа; $P_в$ — избыточное давление воздуха перед горелкой, кПа; $W_{в.г}$ и $W_в$ — среднерасходная скорость в характерных сечениях газового и воздушного трактов, м/с.

Для дутьевых горелок

$$W_{в.г} = \frac{V_{в.г}}{F_г} \cdot \frac{T_в}{273} \cdot \frac{101{,}3}{P_{в.г} + B_0}; \tag{68а}$$

$$W_{\text{в}} = \frac{V_{\text{в}}}{F_{\text{в}}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{273} \cdot \frac{101{,}3}{P_{\text{в}} + B_0}, \quad (68)$$

где $V_{\text{в.г}}$ — расход воздуха, имитирующего газ, м³/с; $V_{\text{в}}$ — расход воздуха, м³/с.

Для инжекционных горелок с сужающимся соплом при $P_{\text{в.г}} < 90$ кПа.

$$W_{\text{в.г}} = \frac{V_{\text{в.г}}}{F_{\text{г}}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{273} \cdot \frac{101{,}3}{P_{\text{в.г}} + B_0} \left(\frac{P_{\text{в.г}} + B_0}{B_0}\right)^{1/k}; \quad (69)$$

при $P_{\text{в.г}} \geqslant 90$ кПа

$$W_{\text{в.г}} = \frac{V_{\text{в.г}}}{F_{\text{г}}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{273} \cdot \frac{101{,}3}{P_{\text{в.г}} + B_0} \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (70)$$

где $T_{\text{в}}$ — температура воздуха, К; B_0 — атмосферное давление, кПа; $\rho_{\text{в.г}}$ и $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха соответственно в характерных сечениях газового и воздушного трактов, кг/м³.

Для дутьевых горелок

$$\rho_{\text{в}} = 1{,}29 \frac{273}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{P_{\text{в}} + B_0}{101{,}3}; \quad (71а)$$

$$\rho_{\text{в.г}} = 1{,}29 \frac{273}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{P_{\text{в.г}} + B_0}{101{,}3}. \quad (71б)$$

Для инжекционных горелок при $P_{\text{в.г}} < 90$ кПа

$$\rho_{\text{в.г}} = 1{,}29 \frac{273}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{P_{\text{в.г}} + B_0}{101{,}3} \left(\frac{B_0}{P_{\text{в.г}} + B_0}\right)^{1/k}; \quad (72)$$

при $P_{\text{в.г}} \geqslant 90$ кПа

$$\rho_{\text{в.г}} = 1{,}29 \frac{273}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{P_{\text{в.г}} + B_0}{101{,}3} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/k-1}, \quad (73)$$

где k — показатель адиабаты для воздуха; $F_{\text{г}}$ и $F_{\text{в}}$ — площади характерных сечений соответственно газового и воздушного трактов, м².

Для дутьевых горелок характерные сечения оговариваются организацией, проводящей контрольные испытания, или задаются организацией — разработчиком горелок. Для инжекционных горелок в качестве характерного сечения газового тракта принимается выходное сечение носика горелки.

Количество точек измерения должно быть не менее пяти. На основе результатов холодных испытаний строят зависимости расхода газа и воздуха от их давлений перед горелкой и зависимости коэффициентов гидравлических сопротивлений по газовому и воздушному пути от чисел Рейнольдса для газового и воздушного потоков в характерных сечениях.

На контрольные испытания представляют образец горелки и техническую документацию, включающую чертежи общих видов, узлов и деталей (непосредственно влияющих на рабочий процесс), технические характеристики, технические условия, инструкции по монтажу и эксплуатации и прочие документы по согласованию между предъявителем и испытательным центром.

Условия проведения испытаний горелки, влияющие на ее режим работы (тепловое напряжение поперечного сечения камеры, давление в камере, степень экранирования, степень стеснения факела), должны быть максимально приближены к эксплуатационным.

Горелку испытывают на всех видах газообразного топлива, для которых она предназначена. Колебания величины низшей теплоты сгорания не должны превышать ±3% от средней в процессе испытаний горелки.

Контрольные испытания проводят на специальных стендах. Допускается проведение испытаний горелок тепловой мощностью >3 МВт на промышленных тепловых агрегатах, для которых эти горелки предназначены.

Горелку монтируют на стенд или тепловой агрегат в рабочем состоянии со всеми необходимыми комплектующими приспособлениями согласно инструкции завода-изготовителя.

Методика контрольных испытаний горелок заключается в следующем.

Образец горелки подвергают визуальному осмотру, при котором выявляются внешние повреждения. Проверяют перемещение ходовых частей горелки, при котором выявляют пределы перемещений, а также неисправности, задерживающие перемещение. Определяют массу горелки.

Проводят проверку основных размеров горелки, влияющих на показатели ее работы, а также ответственных размеров, включая габаритные, установочные и присоединительные, на соответствие их указанным на чертежах. При необходимости производят разборку и сборку горелки.

Проверяют плотность рабочих полостей горелки с помощью мыльной пены или другим способом при заданном давлении.

В процессе испытаний определяют химический состав газообразного топлива, его плотность, низшую теплоту сгорания, низшее число Воббе.

Испытания проводят на стационарном режиме при плавном увеличении и уменьшении тепловой мощности. Момент наступления стационарного режима соответствует для металлических водоохлаждаемых камер горения изменению температуры уходящих газов не более чем на 5 К за 30 мин, для футерованных камер горения — не более чем на 10 К за 30 мин.

При испытаниях горелок определяются расходные и регулировочные характеристики согласно табл. 54 (для горелок с автоматическим регулированием характеристики определяют как с включенной, так и с выключенной автоматикой, если это допускает конструкция горелки).

Давление (разрежение) в камере горения измеряют на стенке у выходного сечения горелки вне потока, выходящего из нее.

Параметры, указанные в табл. 54, должны быть определены в диапазоне от минимальной до максимальной тепловой мощности по документации на горелку. Кроме того, следует определить возможные предельные режимы эксплуатации горелки.

Количество контрольных режимов для горелок с ручным управлением, а также для автоматических дутьевых горелок и блочных горелок с плавным регулированием мощности должно быть не менее 5.

Для автоматических инжекционных, дутьевых горелок и блочных горелок со ступенчатым регулированием мощности соответст-

Таблица 54

РАСХОДНЫЕ И РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕЛОК, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Тип горелки и характеристика	Условия испытаний
I. Инжекционные горелки	
1. Зависимость расхода газа и тепловой мощности горелок от давления газа $V_г = f(p_г);\ P = f(p_г)$	1. Давление (разрежение) в топочной камере — рабочее $p_{т\,раб}$, максимальное $p_{т\,max}$, минимальное $p_{т\,min}$
2. Зависимость коэффициента расхода воздуха от давления газа $\alpha = f(p_г)$	2. Степень открытия регуляторов расхода первичного воздуха инжекционных горелок устанавливается по технической документации
II. Дутьевые горелки автоматические	
1. Зависимость расхода газа и тепловой мощности от давления газа $V_г = f(p_г);\ P = f(p_г)$.	1. Устройство пропорционирования включено
2. Расходная характеристика по воздуху $V_в = f(p_в)$.	2. Давление в камере горения — рабочее $p_{т\,раб}$
3. Зависимость коэффициента расхода воздуха от тепловой мощности $\alpha = f(P)$.	3. Коэффициент расхода воздуха при номинальной мощности — минимально необходимый α_{min}
III. Блочные горелки	
1. Зависимость расхода газа и тепловой мощности от давления газа $V_г = f(p_г);\ P = f(p_г)$.	1. Устройство пропорционирования включено
2. Зависимость коэффициента расхода воздуха от тепловой мощности $\alpha = f(P)$.	2. Давление в камере горения рабочее $p_{т\,раб}$ 3. Коэффициент расхода воздуха при номинальной мощности — минимально необходимый α_{min}
IV. Дутьевые горелки с ручным управлением	
1. Зависимость расхода газа и тепловой мощности от давления газа $V_г = f(p_г);\ P = f(p_г)$.	1. Давление в камере горения рабочее $p_{т\,раб}$

Продолжение табл. 54

Тип горелки и характеристика	Условия испытаний
2. Расходная характеристика по воздуху $V_в = f(p_в)$ 3. Зависимость давления воздуха от давления газа $p_в = f(p_г)$	2. Коэффициент расхода воздуха минимально необходимый α_{min}
V. Дутьевые горелки с ручным управлением и подачей первичного и вторичного воздуха	
Дополнительно к характеристикам п. IV определяют зависимость давлений первичного и вторичного воздуха от давления газа, а также расход вторичного воздуха от расхода первичного	1. Давление в камере горения рабочее $p_{т\,раб}$ 2. Коэффициент расхода воздуха минимально необходимый α_{min}

вующие характеристики определяются при указанных в документации уровнях тепловой мощности.

Предельные режимы определяются как режимы, при которых имеет место нарушение устойчивой работы горелки (погасание пламени, изменение локализации пламени, перегрев деталей, отказ элементов горелки).

В процессе испытания достигаются только наименьший верхний и наибольший нижний предельные режимы при повышении или понижении мощности.

Для горелок, работающих с противодавлением (разрежением), производится проверка устойчивости при увеличении противодавления или разрежения в 1,5 раза при $P_т \leqslant \pm 50$ Па и в 1,2 раза при $P_т > \pm 50$ Па.

Для горелок, применяемых, например, в сушилах ($\alpha > 1$), проверка устойчивости работы производится при значениях коэффициента разбавления или расхода воздуха, устанавливаемых по согласованию между предъявителем и испытательным центром.

Предельные режимы работы горелок следует определять не менее пяти раз.

Коэффициент расхода воздуха определяют следующими методами:

для дутьевых горелок — по замерам расходов газа и воздуха или по составу продуктов сгорания;

для инжекционных горелок с полной инжекцией — по составу газо-воздушной смеси, отбираемой в конце смесителя, или по составу продуктов сгорания;

для инжекционных горелок атмосферного типа с неполной инжекцией — по составу газо-воздушной смеси, отбираемой в конце смесителя, или по составу продуктов сгорания.

Для горелок с раздельной подачей воздуха по зонам смесеобразования должны определяться раздельно коэффициенты расхода воздуха первичного, вторичного и т. д.

Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха для горелок всех типов определяется по составу продуктов сгорания при наличии химического недожога, не превышающего норм, и при устойчивом факеле. Отбор проб продуктов сгорания производится в выходном сечении камеры горения.

Длина факела $l_ф$ определяется по химическому анализу CO_2 в продуктах сгорания. Конец факела определяется наибольшей координатой вдоль стенда, где $CO_2/CO_{2m}=0{,}95$.

Состав уходящих продуктов сгорания, включая содержание в них окислов азота, определяется по пробам, отбираемым в выходном сечении камеры горения.

Потребляемая мощность электродвигателя вентилятора горелки определяется прямым замером.

Для полуавтоматических и автоматических горелок производится определение времени защитного отключения подачи топлива при розжиге горелки, погасании пламени, аварийном отклонении давлений газа и воздуха. Время определяется прямыми замерами при многократно повторяемых (не менее 15 раз) розжигах горелки и проверках работы устройств безопасности в режиме срабатывания с прекращением подачи газа. Время защитного отключения подачи топлива при розжиге горелки проверяется при закрытом ручном кране путем замера интервала времени с момента открытия отсечного клапана до его закрытия. Время защитного отключения подачи топлива при погасании пламени определяется в диапазоне рабочего регулирования путем прекращения подачи газа быстрым закрытием крана, с последующей фиксацией момента срабатывания отсечного клапана. Время защитного отключения подачи топлива при отклонениях давлений газа и воздуха определяется путем поочередного снижения или повышения контролируемых давлений при отключенном устройстве контроля пламени.

Абсолютная погрешность поддержания заданного коэффициента расхода воздуха $\pm\Delta\alpha$ для автоматических и блочных горелок определяется во всем диапазоне рабочего регулирования тепловой мощности как наибольшее положительное и отрицательное отклонение коэффициента расхода воздуха от установленного значения. После испытания горелки производятся ее повторный осмотр, измерение основных размеров, влияющих на показатели работы.

Для контрольных испытаний горелок применяют стенды с футерованными (полностью или частично) и металлическими водоохлаждаемыми камерами горения. Камеры горения стендов выполняются круглыми, прямоугольными, с арочным сводом и плоским подом.

Предпочтительные ряды диаметров металлических камер горения стендов: 400, 500, 800, 1000, 1500, 1800 мм; футерованных камер горения: 400, 500, 1000 мм.

Предпочтительные размеры стороны футерованных камер горения квадратного сечения: 1500 и 2000 мм. Предельное тепловое напряжение объема камер горения не должно превышать 1 МВт/м³.

Стенды должны быть снабжены окнами для визуального наблюдения за факелом и работой горелки, а также штуцерами для ввода измерительных зондов.

Камеры горения для контрольных испытаний горелок должны

быть плотными: изменение коэффициента расхода воздуха по длине стенда за счет присосов должно быть в пределах погрешности определения этого коэффициента.

При проведении контрольных испытаний предъявляют следующие требования к методам и средствам измерений. Приборы для контрольных испытаний должны проходить метрологическую проверку.

Использование при контрольных испытаниях нестандартных измерительных средств допускается при условии согласования между предъявителем и испытательным центром.

Типы приборов должны определяться в соответствии с конкретными условиями проведения испытаний. При этом измерения всех параметров следует производить с помощью регистрирующих приборов, приборов с математической машинной обработкой результатов испытаний, а в случае использования показывающих приборов необходимо фотографировать показания.

Показания приборов записываются на специальных бланках, которые вместе с диаграммами регистрирующих приборов должны составлять единый комплект, заверенный подписями ответственных лиц.

Основные размеры горелки измеряются микрометрическими и штанген-инструментами, шаблонами, пробками. Погрешность измерения основных размеров определяется допусками на изготовление и номинальными размерами. Масса горелки определяется взвешиванием. Приведенная погрешность измерительного прибора при определении массы горелки не должна превышать $\pm2\%$.

Химический состав газообразного топлива, представляющий собой смесь углеводородов и неуглеводородных компонентов (C_nH_m, H_2, CO, CO_2, N_2, O_2, H_2S), определяется газожидкостной и газоадсорбционной хроматографией.

Допускается выполнение анализа газовых проб в специальной химической лаборатории; при этом состав проб отобранного газа не должен изменяться и зависеть от метода отбора, хранения и транспортирования.

Расходы газа и воздуха определяются по перепаду давления на диафрагмах, расходомерных соплах или специальных сужающих устройствах. Для измерения расходов газа и воздуха допускается использование расходомеров объемного и турбинного типов, а также пневмометрических трубок. Погрешности измерительных приборов при этом выбираются такими, чтобы относительная погрешность измерения расхода газа или воздуха с использованием регистрирующего дифференциального манометра не превышала $\pm2{,}5\%$.

Давление окружающей среды измеряется барометром. Погрешность измерения не должна превышать ±35 Па.

Давление газа и воздуха перед сужающим устройством при измерении расходов газа и воздуха, перед испытуемой горелкой и в камере горения измеряют манометрами с упругими измерительными элементами (пружинными или мембранными) или жидкостными. Выбор средств измерения производится в зависимости от требуемых пределов измерения. Приведенная погрешность манометров с упругими измерительными элементами не должна превышать $\pm0{,}6\%$. Погрешность измерения давления жидкостными манометрами не должна превышать $\pm0{,}5$ мм высоты столба рабочей жидкости. При измерении давлений газа и воздуха у горелок низкого давления при определении минимальной мощности и в камере го-

рения при давлении ≤50 Па допускается использовать измерительный прибор с приведенной погрешностью измерительного прибора ±10% при давлении >50 Па±5%.

Температура газообразного топлива и воздуха, идущего на горение, измеряется термометром сопротивления или термопарой с автоматическим регистрирующим прибором. Допускается использование стеклянных технических термометров с ценой деления шкалы 1° С. Приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±1%.

Температура уходящих газов измеряется термопарой с автоматическим регистрирующим прибором с приведенной погрешностью не более ±1%.

Температура наружных поверхностей горелки и наиболее нагретых внутренних деталей горелки измеряется поверхностной термопарой. Допускается использование пирометров излучения и термоцветных красок. Приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±2,5%.

Температура окружающей среды измеряется стеклянным ртутным термометром с приведенной погрешностью не более ±1%.

Шумовые характеристики горелки определяются прибором, измеряющим уровни стационарных акустических шумов в определенных пределах. Приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±2,5%.

Измерение параметров времени (времени защитного отключения $\tau_р$, $\tau_и$, $\tau_п$) производится секундомером с ценой деления шкалы 0,01 с. Погрешность измерения не должна превышать ±0,03 с.

Определение состава продуктов сгорания (CO_2', O_2', CO', H_2', CH_4', NO_x' и SO_2') рекомендуется производить следующими методами:

CO_2' и O_2' — волюмометрическим методом путем избирательного поглощения компонентов поглотительными растворами; порог чувствительности метода 0,05%; погрешность анализа не должна превышать ±0,1%;

горючие компоненты (CO', H_2' CH_4') — хроматографическим методом с порогом чувствительности, % (объемн.), по CO $1\cdot10^{-3}$; по H_2 $5\cdot10^{-4}$; по CH_4' $1\cdot10^{-3}$; относительная погрешность измерения не должна превышать ±5%;

NO_x' — колориметрическим методом, основанным на измерении интенсивности окраски раствора красителя, зависящей от концентрации окислов азота; порог чувствительности метода $4\cdot10^{-6}$% (объемн.); приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±10%;

SO_2 — колориметрическим методом с индикаторными трубками, основанным на изменении интенсивности окраски красителя, зависящей от концентрации сернистого ангидрида; порог чувствительности метода $4\cdot10^{-6}$% (объемн.); приведенная погрешность измерительного прибора не должна превышать ±10%.

Состав продуктов сгорания желательно определять автоматическими регистрирующими приборами непрерывного действия для определения каждого компонента анализируемого газа.

При обработке результатов испытаний нормальными атмосферными условиями считают барометрическое давление воздуха B_0=

=101,325 кПа; температура воздуха t_0=273,15 К; плотность воздуха $\rho_в$=1,29 кг/м³.

Плотность газа ($\rho_г$) в кг/м³ определяют по таблицам или вычисляют по формуле

$$\rho_г = \sum_{i=1}^{n} \rho_i r_i, \tag{74}$$

где r_i — объемная доля компонента в газе;
ρ_i — плотность компонента в газе, кг/м³;

$$\rho_i = \frac{B_0}{R_i t_0}, \tag{75}$$

где R_i — газовая постоянная компонента, Дж/(кг·К)

$$R_i = \frac{8310}{\mu_i}, \tag{76}$$

где μ_i — молекулярная масса компонента, кг/кмоль.

Теплоту сгорания газа низшую ($Q_н$, кДж/м³) вычисляют по формуле

$$Q_н = 126{,}4\,CO + 108{,}0\,H_2 + 359{,}0\,CH_4 + 644{,}6C_2H_6 + 932{,}0C_3H_8 + 1228{,}0C_4H_{10} + 1460{,}8C_5H_{12} + 595{,}2C_2H_4 + 877{,}8C_3H_6 + 1135{,}1C_4H_8 + 1414C_5H_{10} + 1403{,}4C_6H_6 + 234{,}4H_2S. \tag{77}$$

Число Воббе низшее ($W_{0н}$ кДж/м³) вычисляют по формуле

$$W_{0н} = \frac{Q_н}{\sqrt{\frac{\rho_г}{\rho_н}}}. \tag{78}$$

Тепловую мощность горелки (P, кВт) вычисляют по формуле

$$P = V_г Q_н. \tag{79}$$

Коэффициент предельного регулирования горелки по тепловой мощности вычисляют по формуле

$$k_{пр.р} = \frac{P_{max}}{P_{min}}, \tag{80}$$

где P_{max} и P_{min} — максимальная и минимальная тепловая мощность горелки (кВт) соответственно.

Коэффициент рабочего регулирования горелки по тепловой мощности вычисляют по формуле

$$k_{р.р} = \frac{P_{ном}}{P_{min}}, \tag{81}$$

где $P_{ном}$ — номинальная тепловая мощность горелки, кВт.

Коэффициент расхода воздуха α вычисляют по одной из формул

$$\alpha = \frac{V_в}{V_г V_0}, \quad (82)$$

где

$$V_0 = \frac{1}{21}\left[0{,}5H_2 + 0{,}5CO + 1{,}5H_2S + \left(m + \frac{n}{4}\right)C_n H_m - O_2\right], \quad (83)$$

или

$$\alpha = \frac{N_2 - \dfrac{N_2}{V_{с.г}}}{N_2' - \dfrac{N_2}{V_{с.г}} - 3{,}76\left(O_2' - 0{,}5CO' - 0{,}5H_2' - 2CH_4'\right)}, \quad (84)$$

где

$$V_{с.г} = \frac{CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} +}{CO_2' + O_2' + CO' + CH_4'} + \ldots$$

$$\ldots + \frac{+ 2C_2H_4 + 3C_3H_6 + H_2S}{CO_2' + CO' + CH_4' + O_2'}, \quad (85)$$

или

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2' - 0{,}5CO' - 0{,}5H_2' - 2CH_4'}, \quad (86)$$

$$\alpha = \frac{CO_{2max}'}{CO_2' + CO' + CH_4'}. \quad (87)$$

Определение CO_{2max} — см. формулу (91) или

$$\alpha = \frac{1}{V_0}\left[\frac{CH_4'}{CH_{4(об)}} - 1\right], \quad (88)$$

где $CH_{4(об)}^{см}$ — объемная концентрация метана в газо-воздушной смеси, %.

Длина факела определяется из графика степени выгорания по длине факела как расстояние от выходного сечения туннеля горелки до точки, где CO_2 составляет 95% от максимального значения.

Изменение степени выгорания факела на оси дается графической зависимостью

$$\frac{CO_2'}{CO_{2(m)}'} = f\left(\frac{l}{d}\right), \quad (89)$$

где CO_2' и $CO_{2(m)}'$ — соответственно объемная концентрация CO_2 в заданной точке оси факела и расчетная объемная концентрация CO_2 в продуктах полного сгорания при заданном коэффициенте расхода воздуха, %; l — расстояние от выходного сечения горелки до точки измерения, мм; d — диаметр (гидравлический) выходного сечения, мм.

$$CO_{2(m)}' = CO_2' + CO' + CH_4'. \quad (90)$$

Сумму объемов горючих компонентов в продуктах сгорания, приведенную к $\alpha = 1{,}0 / \Sigma V_{г.к}/\alpha = 1{,}0$, вычисляют по формуле

$$|\Sigma V_{г.к}|_{\alpha = 1{,}0} = h\Sigma V_{г.к}, \quad (91)$$

где $\Sigma V_{г.к} = CO' + H_2' + CH_4'$; (92)

h — коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания:

$$h = \frac{CO_{2max}'' + H_2S}{CO_2' + CO'' + CH_4'' + SO_2'}, \quad (93)$$

$CO_{2\,max}$ — расчетная объемная концентрация CO_2 в сухих продуктах полного сгорания при $\alpha = 1{,}0$.

$$CO_{2max} = \frac{|V_{CO_2}|_{\alpha = 1{,}0}}{|V_{с.г}|_{\alpha = 1{,}0}} 100\ \%, \quad (94)$$

где $|V_{CO_2}|_{\alpha = 1{,}0}$ — объем CO_2 в сухих продуктах сгорания при $\alpha = 1{,}0$ в м³/м³ газа.

$$|V_{CO_2}|_{\alpha = 1{,}0} = 0{,}01\,(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} + 2C_2H_4 + 3C_3H_6), \quad (95)$$

где $|V_{с.г}|_{\alpha = 1{,}0}$ — объем сухих продуктов сгорания при $\alpha = 1{,}0$ м³/м³ газа.

$$|V_{с.г}|_{\alpha = 1{,}0} = |V_{CO_2}'|_{\alpha = 1{,}0} + 0{,}01H_2S + |V_{N_2}''|_{\alpha = 1{,}0}, \quad (96)$$

где $|V_{N_2}|_{\alpha = 1{,}0} = 0{,}79\,V_0 + 0{,}01N_2$. (97)

Потери тепла от химической неполноты сгорания вычисляют по формуле

$$q_3 = \frac{V_{с.г}\left(126{,}4CO' + 108H_2' + 358{,}2C\,H_4'\right)}{Q_н} 100\ \%. \quad (98)$$

11.2. Особенности контрольных испытаний радиационных труб

Контрольные испытания радиационных труб должны учитывать особенности конструкции и эксплуатации радиационных труб, характеризующие их совершенство и возможность работы на различных агрегатах.

Помимо величин, указанных в табл. 52, при контрольных испытаниях радиационных труб рассматриваются следующие вопросы:

равномерность распределения температуры наружной стенки трубы;

отсутствие перегрева элементов трубы;

отсутствие сажеобразования;
коэффициент полезного действия;
универсальность при переходе на газ другого состава;
характеристика объема автоматизации;
надежность и срок службы.

По сравнению с контрольными испытаниями газовых горелок при испытаниях радиационных труб дополнительно определяют следующие характеристики:

распределение температуры по длине внешней поверхности рабочей части трубы;
температуру внутренних элементов трубы;
распределение статического давления по длине трубы;
температуру уходящих газов на входе и выходе из рекуператора радиационной трубы;
сумму горючих компонентов в продуктах сгорания и потери тепла с химическим недожогом в последнем сечении трубы;
наличие сажи на внутренних элементах трубы;
специфические для радиационных труб параметры устройств розжига и контроля безопасности (время продувки, время безопасности при пуске, время отключения подачи топлива при погасании факела, время отключения подачи топлива при аварийном падении давления газа или воздуха);
оптимальный режим розжига;
характер воспламенения и погасания.

При проведении огневых испытаний радиационных труб, оборудованных газогорелочным устройством инжекционного типа, в том числе и автоматизированных, определяется зависимость коэффициента расхода воздуха от давления газа. Одновременно определяются расходы газа при рабочем давлении (разрежении) в топочном объеме трубы $h_{раб}$ и при заданных разработчиком средней температуре поверхности трубы $t_{ср}$ и удельном теплосъеме $q_т$.

Для радиационных труб с принудительной подачей воздуха и с ручным управлением, а также для автоматизированных труб с отключенной автоматикой определяется зависимость между давлениями воздуха и газа при значениях коэффициента расхода воздуха, минимально необходимых для полного сгорания без сажеобразования при рабочем давлении (разрежении) в топочном объеме трубы и заданном удельном теплосъеме; одновременно определяются расходы газа и воздуха и по опытным данным строятся соответствующие графические зависимости.

Для радиационных труб с принудительной подачей воздуха и плавным регулированием производительности при включенном устройстве пропорционирования определяются зависимости коэффициента расхода воздуха от нагрузки и расходные характеристики по газу и воздуху. Число режимов, на которых производятся измерения, должно быть не менее 5.

Для радиационных труб с позиционным регулированием производительности соответствующие характеристики определяются при заявленных разработчиком уровнях нагрузки.

Каждый режим, при котором проводятся замеры, должен быть установившимся по температуре поверхности трубы. Момент наступления установившегося режима соответствует изменению температуры поверхности трубы не более 10° С за 30 мин.

В каждом режиме определяют:

расход газа;

расход дутьевого воздуха;
давление и температуру продуктов сгорания на входе в рекуператор;
давление газа перед трубой и температуру дутьевого воздуха на входе и выходе из рекуператора;
барометрическое давление и температуру воздуха вблизи стенда и перед вентилятором (при принудительной подаче воздуха);
температуру и состав уходящих газов на выходе из рекуператора;
распределение температуры на внешней поверхности рабочей части трубы;
температуру внутренних элементов трубы;
распределение статического давления по длине трубы.

Для радиационных труб предельными режимами являются:

срыв пламени;
погасание пламени;
возникновение вибрационного горения;
перегрев металлических деталей;
проскок пламени (для радиационных труб с инжекционными горелками и горелками с принудительной подачей подготовленной газо-воздушной смеси);
проникновение пламени через носик и «посадка» пламени на металлические детали;
появление продуктов неполного сгорания в количествах, превышающих допустимые нормы;
выпадение сажи внутри радиационной трубы;
повышение коэффициента расхода воздуха выше допустимого.

В процессе проведения опыта необходимо достигать только ближайших предельных режимов при повышении или понижении нагрузки. Если предельных режимов не достигают, то производят проверку устойчивости работы при нагрузках 120 % от заявленной при минимально необходимом коэффициенте расхода воздуха, обеспечивающем полное сгорание. Коэффициент расхода воздуха определяется по составу продуктов сгорания, отбираемых в последнем сечении трубы. Минимально необходимый коэффициент расхода воздуха для радиационных труб всех типов определяется по составу продуктов сгорания, отбираемых в последнем сечении трубы на каждом режиме, при наличии химического недожога, не превышающего допустимых норм.

Наличие сажи на внутренних частях радиационной трубы определяется ресурсными испытаниями, проводимыми до контрольных при рабочей температуре радиационной трубы.

Коэффициент полезного действия радиационной трубы определяется по формуле

$$\eta = 100\left(1 - \frac{V_п^0}{V_г^0} t_{ух} \bar{c}_p - \frac{q_з}{100}\right)\%, \qquad (96)$$

где $t_{ух}$ — температура в последнем сечении трубы, °С; c_p — средняя теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении, Дж/(м³·град); $V_г^0$, $V_п^0$ — расходы соответственно газа и продуктов сгорания, м³/с; $q_з$ — химический недожог, %.

11.3. Особенности контрольных испытаний газо-мазутных горелок

Помимо общих требований и характеристик, относящихся к сжиганию газообразного топлива, при контрольных испытаниях газо-мазутных горелок должна быть учтена специфика сжигания мазута совместно с газом и самостоятельно.

За основные показатели, характеризующие работу газо-мазутной горелки при сжигании мазута, дополнительно к характеристикам сжигания газа принимают:

характеристику мазута (низшая теплота сгорания, элементарный состав, вязкость, влажность, механические примеси, коксуемость);

теплотехнические и аэродинамические характеристики факела как при сжигании смеси газа и мазута, так и при сжигании одного мазута, если это предусмотрено технологией работы газо-мазутной горелки;

качество распыливания мазута;

коксообразование, зольные отложения;

универсальность газо-мазутной горелки при переходе на газ или мазут другого состава.

При испытаниях газо-мазутных горелок дополнительно к характеристикам, перечисленным при испытаниях газовых горелок, определяют:

качество распыла мазута (дисперсный состав, равномерность распыливания по сечению, угол распыливания);

аэродинамические и теплотехнические характеристики факела, а именно распределение динамических и статических напоров по длине факела, степень выгорания по длине факела, воспринятый тепловой поток от факела, длина факела;

степень черноты мазутного факела;

наличие коксовых отложений в горелке, коксовых и зольных отложений в камере горения.

При холодных испытаниях газо-мазутных горелок дополнительно к данным, относящимся к работе на одном газе, определяют расходные характеристики и коэффициенты гидравлического сопротивления тракта для распыливающей среды (пар, компрессорный воздух) продувкой его паром или воздухом высокого давления.

Расходную характеристику мазута определяют продувкой форсунки мазутом или другой жидкостью, имеющей такую же вязкость, как мазут при рабочей температуре. Распределение мазута в сечении струи и угол распыливания определяют на специальном стенде при помощи моделирующей жидкости (например, парафина при 70°С); при этом измеряют дисперсный состав капель, равномерность распыливания по сечению, угол распыливания. В результате получают зависимости

$$\overline{G}_i = f(d_к); \quad \varepsilon = f(G_м) \text{ и } \alpha^0 = f(G_м),$$

где $\overline{G}_i = \dfrac{G_i'}{G}$ — отношение массы капель заданного диаметра $d_к$ к общей массе пробы; $G_м$ — расход мазута через форсунку, кг/с; α^0 — половина угла раскрытия топливной струи, град.

q_i — плотность топливного факела по радиусу:

$$q_i = \frac{G_i\left(r_{i+1}^2 - r_i^2\right)}{\sum_{i=1}^{n} G_i\left(r_{i+1}^2 - r_i^2\right)}, \tag{97}$$

где G_i — масса топлива в отборной емкости, кг; r — расстояние отборной емкости от оси форсунки;

ε — неравномерность распыливания:

$$\varepsilon = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{ср}}; \quad q_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i}{n} \tag{98}$$

(q_{max}, q_{min}, $q_{ср}$ — максимальное, минимальное и среднее значение плотности топливного факела).

Перед проведением огневых испытаний на мазуте и совместно на газе и на мазуте определяют химический состав и физические свойства мазута: вязкость, коксуемость, зольность, содержание серы, механических примесей, воды, водорастворимых кислот, щелочей, азотистых соединений (факультативно), асфальтенов, а также температуры вспышки, температуры застывания и плотности.

Для газо-мазутных горелок с ручным управлением, а также для автоматических горелок с выключенной автоматикой определяют зависимость между давлением дутьевого воздуха, распыливающей среды и мазута при коэффициентах расхода воздуха, минимально необходимых для полного сгорания топлива при рабочем давлении в топочной камере.

При огневых испытаниях газо-мазутных горелок измеряют:

расход мазута;

температуру и давление мазута перед форсункой;

расход распылителя (пара, компрессорного воздуха);

температуру распылителя непосредственно перед форсункой;

расход вентиляторного воздуха;

температуру и давление вентиляторного воздуха перед горелкой;

барометрическое давление и температуру воздуха вблизи стенда и перед вентилятором;

температуру и состав уходящих газов, отбираемых в последнем сечении камеры горения;

концентрацию сажистых частиц в последнем сечении камеры горения.

Предельные режимы работы горелки на жидком топливе те же, что и на газообразном топливе, с добавлением предельных режимов, при которых наблюдают:

появление сажистых частиц в конце камеры горения в количестве, превышающем установленную норму;

резкое ухудшение качества распыливания, выражающееся в появлении видимой капельной жидкости у выходного сечения горелки.

Потери тепла с механическим недожогом определяют по результатам химического анализа исходного топлива и газообразных продуктов сгорания в последнем сечении камеры горения стенда:

$$q_4 = Q_C C^p \left(1 - \frac{\beta_т}{\beta_г}\right), \tag{99}$$

где Q_c — теплота сгорания углерода, равная 32,8 МДж/кг; $C^р$ — содержание углерода в исходном топливе, %; $\beta_т$ и $\beta_г$ — характеристики исходного топлива и газообразных продуктов сгорания соответственно:

$$\beta_т = 3\,(1 - O_{ок})\,\frac{0{,}125O^р + 0{,}039N^р}{C^р - 0{,}375S^р}; \qquad (100)$$

$$\beta_г = \frac{21 - (CO_2 + 0{,}605CO + O_2)}{CO_2 + CO}$$

($O_{ок}$ — объемная доля кислорода в окислителе; $O^р$, $N^р$, $S^р$ — соответственно содержание кислорода, азота и серы в исходном топливе. %; CO_2, CO, O_2 — содержание компонентов в продуктах сгорания, %).

Потери тепла с механическим недожогом можно определить по концентрации сажистых частиц в последнем сечении камеры горения стенда:

$$q_4 = \frac{3{,}28\bar{C}V_{гор}}{Q^р_н}\ \%, \qquad (101)$$

где $\bar{C}$ — средняя по последнему сечению камеры горения концентрация сажистых частиц, г/м³; $V_{гор}$ — удельное количество продуктов сгорания, м³/кг топлива; $Q^р_н$ — низшая теплота сгорания топлива, МДж/м³.

Для стехиометрической смеси ($\alpha = 1{,}0$)

$$V_{гор} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}, \qquad (102)$$

$$V_{RO_2} = 0{,}0187K^р \text{ м}^3/\text{кг топлива}, \qquad (103)$$

$$V_{N_2} = 0{,}79V_в + 0{,}008N^р \text{ м}^3/\text{кг топлива}, \qquad (104)$$

$$V_{H_2O} = 0{,}11H^р + 0{,}012W_р + 0{,}016V^0_в \text{ м}^3/\text{кг топлива}. \qquad (105)$$

При сгорании топлива с $\alpha > 1$

$$V_{гор} = 1{,}87\,\frac{K^р}{RO_2'} + V_{H_2O}. \qquad (106)$$

При сгорании с $\alpha < 1$

$$V_{гор} = \frac{1{,}87K^р}{RO_2' + CO' + CH_4'} + V_{H_2O}, \qquad (107)$$

где $K^р = C^р + S^р$.

Степень черноты факела ε определяют с помощью оптического пирометра методом Шмидта:

$$\varepsilon = \frac{E_3 + E_1 - E_2}{E_3}, \qquad (108)$$

где E_1 — показание пирометра при излучении пламени на абсолютно черное тело; E_2 — то же, на нагретом неотражаемом фоне со степенью черноты, близкой к 1,0 (абсолютно черное горячее тело); E_3 — показатель пирометра при излучении только горячего фона.

При контрольных испытаниях газо-мазутных горелок при определении вредных примесей в продуктах сгорания дополнительно по сравнению с испытаниями газовых горелок определяют содержания двуокиси серы SO_2 и сероводорода H_2S.

Глава 12

ПРИНЦИПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОЖИГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

На все серийно выпускаемые сожигательные устройства разрабатывают технические условия, которые являются неотъемлемой частью комплекта технической документации на данный тип сожигательного устройства.

Технические условия содержат вводную часть и разделы, расположенные в следующей последовательности:

технические требования;
правила приемки;
методы контроля (испытания, анализа, измерений);
транспортирование и хранение;
указания по эксплуатации;
гарантии поставщика.

В вводной части указывается, на какие горелки распространяются данные технические условия, для чего предназначены горелки, на каких агрегатах и как они устанавливаются; приводятся теплоты сгорания топлива, температуры подогрева воздуха и газа, а также дается запись примера условного обозначения сожигательного устройства. Сведения о теплотах сгорания топлив и температурах подогрева могут быть перенесены в раздел «Технические требования».

В технических условиях должно быть указание, что они разработаны в соответствии с ГОСТ 21204—75 или СТ СЭВ 1051—78.

Эти стандарты регламентируют технические требования к горелкам (показатели и условия эксплуатации горелок, качество сжигания топлива, требования к конструкции и материалам, требования к автоматизации), требования безопасности, комплектность, маркировку и условия хранения.

Технические требования предусматривают допустимые отклонения от номинальной тепловой мощности в пределах от — 5 до +10%.

Коэффициент рабочего регулирования горелки по тепловой мощности должен соответствовать значениям, указанным в табл. 55. Там же указан минимально необходимый коэффициент расхода воздуха при номинальной тепловой мощности в условиях выполнения санитарно-гигиенических требований.

Допускаемое увеличение коэффициента расхода воздуха в диапазоне рабочего регулирования тепловой мощности не должно превышать 0,3 (за исключением пусковых режимов).

Потери тепла от химической неполноты сгорания при анализе газообразных продуктов сгорания на выходе из рабочего пространства печи не должны превышать 0,4% в диапазоне рабочего регули-

Таблица 55

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАБОЧЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГОРЕЛОК И МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РАСХОДА ВОЗДУХА α_{min}

Класс горелки по способу подачи воздуха и смесеобразования	Коэффициент рабочего регулирования $K_{р.р.}$, не менее	α_{min}
Дутьевые и инжекционные горелки с полным предварительным смешением	3	1,08
Дутьевые горелки с неполным предварительным смешением	4	1,10
Инжекционные горелки с частичным предварительным смешением (атмосферные)	5	—
Беспламенные панельные горелки типа ГБПш по ГОСТ 5.739—77	2	—
Дутьевые горелки или горелки с подачей воздуха за счет разрежения без предварительного смешения	—	1,15

рования. Данные о коэффициентах расхода воздуха и химической неполноты сгорания не распространяются на струйные и струйно-стабилизационные горелки с рассредоточенной раздачей воздуха.

Конструкция горелок должна предусматривать возможность демонтажа для осмотра и ремонта. Сопла, завихрители и другие детали, засоряющиеся за время работы, должны быть доступны для очистки и замены. Конструкция разъемных соединений должна исключать возможность их неправильной сборки и случайного соединения. Масса съемной детали не должна превышать 50 кг.

Детали, работающие в условиях высоких температур и подвергающиеся интенсивным механическим нагрузкам, в том числе абразивному износу, следует изготовлять из специальных материалов, имеющих повышенную термостойкость и прочность.

В комплект горелки должны входить все приспособления и детали, необходимые для ее работы. Конструкция горелок с ручным управлением должна предусматривать возможность их автоматизации.

Внешний вид горелок должен соответствовать современным требованиям промышленной эстетики.

Общие технические требования предусматривают соблюдение условий безопасности, а также удовлетворение санитарно-гигиенических и некоторых конструктивных требований.

Правила безопасности при эксплуатации горелок, установленных на тепловых агрегатах, должны соответствовать действующим «Правилам безопасности в газовом хозяйстве» и «Правилам безопасности в газовом хозяйстве заводов черной металлургии».

В соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями содержание окиси углерода в продуктах сгорания, выходящих из камеры горения с температурой до 1400° С, в пересчете на сухие продукты сгорания ($\alpha=1$) не должно превышать 0,05% по объему во всем диапазоне рабочего регулирования. Температура доступных для обслуживания поверхностей горелки при номинальной тепловой мощности не должна быть более 60° С, металлических ручек 40° С, неметаллических ручек 50° С. Если эти температуры могут быть превышены, то поверхность следует теплоизолировать или применить ограждение.

Горелки с принудительной подачей воздуха должны обеспечивать возможность вентиляции камеры сгорания перед розжигом с помощью обслуживающего ее вентилятора.

Уровень шума, создаваемый горелкой при работе на агрегате с номинальной мощностью, не должен превышать 85 дБ при измерении шумомером на расстоянии 1,0 м от горелки и на высоте 1,5 м от уровня пола.

Конструкция горелок должна исключать опасность для обслуживающего персонала, создаваемую движущимися или выступающими частями, и возможность самопроизвольного смещения деталей горелки.

Конструкция горелок должна предусматривать возможность визуального наблюдения за пламенем. По согласованию с заказчиком допускается только автоматический контроль пламени или визуальное наблюдение за пламенем через смотровые отверстия топки.

Горелка должна устойчиво работать без отрыва и проскока пламени в диапазоне регулирования мощности. Горелки, предназначенные для топок, работающих с разрежением, должны обеспечивать устойчивое горение при предельном разрежении до 60 Па и номинальном давлении газа. Перед горелками, в которые подается готовая газо-воздушная смесь, или горелками со смесепроводом для предотвращения проникновения пламени в трубопровод газо-воздушной смеси должны устанавливаться пламепреградители.

Горелки, предназначенные для работы при избыточном давлении, должны функционировать безопасно в интервале от 10 Па до 1,2 максимального давления в рабочем пространстве. Горелки должны быть оборудованы специальными уплотнителями.

Все электрические устройства, связанные с действием горелки, должны питаться от одного источника электрической энергии.

В разделе «Технические требования» должны быть предусмотрены требования к качеству сожигательного устройства, куда относятся показатели технологичности (ГОСТ 18831—73) и надежности (ГОСТ 13377—75).

Ресурс горелок до первого ремонта должен быть не менее 18 тыс. ч (за исключением деталей из огнеупорной керамики и отдельных быстроизнашивающихся сменных элементов), коэффициент технического использования $K_{т.и}=0,97$.

Помимо перечисленных требований, отраженных в ГОСТах, в разделе «Технические требования» излагаются подразделы:

основные параметры и размеры;
характеристика (свойства);
комплектность;
маркировка;
упаковка.

В подразделе «Основные параметры и размеры» помещают данные об основных параметрах и размерах горелок, ее изображение с габаритными, установочными и присоединительными размерами и их

отклонения или дают ссылку на конструкторские или другие техни ческие документы с указанием их обозначений.

В подразделе «Характеристики (свойства)» помещают требова ния к свойствам и параметрам горелок применительно к режимам и условиям их эксплуатации и испытаний.

Могут быть приведены основные характеристики работы горел ки: номинальное давление газа и воздуха, номинальный расход газ или номинальная тепловая мощность, а также указаны коэффици ент рабочего регулирования горелки по тепловой мощности и коэф фициент расхода воздуха при номинальной тепловой мощности.

В этом разделе должно быть указано, что качество применяемых материалов должно соответствовать требованиям действующих стан дартов, а в случае их отсутствия — требованиям технических усло вий; кроме того, все детали и изделия в целом должны также соот ветствовать техническим условиям на изготовление нестандартного оборудования, которые включены в комплект конструкторских до кументов каждой горелки.

Следует указать материалы, из которых изготавливают горел ки и отдельные ее детали, допускаемые отклонения размеров и массы, припуски на механическую обработку отливок с указанием соответствующих государственных стандартов.

Отливки деталей горелок должны быть обрублены и очищены, прибыли и литники удалены. Места удаления литников и прибылей, а также заливы и наросты должны быть зачищены в пределах до пусков на отливку. Особенно тщательно должны быть очищены внутренние полости.

Трещины, раковины, пузыри, утяжины, местная сыпь, посторон ние включения, снижающие прочность и ухудшающие товарный вид горелок, не допускаются.

Дефекты — единичные и групповые раковины на необрабаты ваемых поверхностях отливок — допускаются без исправлений, ес ли площадь поражения не превышает 3% от рассматриваемой по верхности, а глубина их не превышает 15% от толщины тела отли вок, но не более 4 мм. Дефекты — единичные и групповые раковины на необрабатываемых поверхностях отливок, снижающие прочность и ухудшающие их внешний вид, допускается исправлять заваркой или зачеканкой по технологии завода-изготовителя с предваритель ной разделкой места заварки до основного материала с зачисткой после заварки. Наплавленный металл должен быть монолитно свя зан с основной массой металла детали. На отливках допускаются отдельные раковины количеством не более двух на площади одного квадратного дециметра.

Обработанные поверхности не должны иметь забоин, задиров и других повреждений. Острые углы и ребра должны быть притуплены, за исключением мест, притупление которых не допускается по чертежу. При наличии водоохлаждаемых заливаемых труб (змеевиков) (например, в водоохлаждаемых головках инжекционных горелок) при отливке таких деталей необходимо перед заливкой металла в форму проверить правильность установки змеевика, а выход ные отверстия последнего закрыть во избежание их засорения.

Механическая обработка деталей должна выполняться по размерам, допускам и параметрам шероховатости, указанным на чертежах. При отсутствии на чертежах указаний о предельных отклонениях формы и расположения поверхностей эти отклонения ограничиваются полем допусков на размер в соответствии с СТ СЭВ 636—77.

Не указанные на чертежах предельные отклонения размеров оговариваются особо (например, отверстий — по H14, валов — по h14, остальных — $\pm \left(\frac{IT14}{2}\right)$.

Допускаемые отклонения по овальности и конусообразности цилиндрических поверхностей ограничиваются полем допуска на диаметр. Радиальное биение посадочных поверхностей сопрягаемых деталей горелки не должно превышать половины допуска на диаметр. Во всех деталях горелки обработку отверстий, нарезание резьбы, обработку цилиндрических и конических поверхностей, а также обточку торцов деталей производить с одного установа детали на станке. Неперпендикулярность отверстий под крепежные детали относительно опорных поверхностей не должна превышать предельного смещения осей этих отверстий от номинального расположения, указанного на чертежах.

В случае необходимости в технических условиях указываются конкретные цифры неперпендикулярности торцовых поверхностей, отклонения от соосности поверхностей и т. д. Например, для горелок типа ВП с $d_{н.г}=15\div75$ мм неперпендикулярность торцовых поверхностей колена, корпуса и носика горелки должна быть не более 0,25 мм, для горелок большего размера — не более 0,5 мм. Допускаемое отклонение от соосности центрирующего выступа корпуса инжекционной горелки и отверстия для сопла составляет при $d_{н.г}=15\div48$ мм не более 0,5 мм, при $d_{н.г}=56\div75$ мм — не более 1 мм. Допускаемое отклонение от соосности внутренних поверхностей деталей относительно центрирующих выступов или впадин для горелок с $d_{н.г}=86\div235$ мм должно быть не более 0,5 мм.

Суммарное радиальное смещение оси сопла горелок указано ниже.

Тип горелок	Суммарное радиальное смещение оси сопла
Дутьевые* (типа «труба в трубе»), диаметр выходного сечения, мм:	
<30	0,2
40—50	0,5
60—275	1,0
300—425	2,0
Инжекционные**, $d_{н.г}$, мм:	
15—48	1,0
56—75	2,0
86—178	2,0
205—235	3,0

* Смещение относительно оси выходного сечения корпуса горелки.
** Смещение относительно оси носика горелки.

Особенно жесткие условия по центровке деталей горелки предъявляются к плоскопламенным горелкам типов ГР, ГПП и др.

Резьбовые соединения должны быть выполнены согласно требованиям соответствующих стандартов и указаниям на чертежах. Сборка горелки должна обеспечить плотность всех ее фланцевых соединений. Для этого все болты соединений должны быть затянуты

равномерно, чтобы исключить возможность перекоса соединяемых деталей. Все детали и узлы горелки перед сборкой должны быть очищены от загрязнений, ржавчины, стружек, заусенцев и т. п. и приняты ОТК предприятия-изготовителя.

Наружные механически необработанные поверхности горелок должны быть окрашены черным лаком БТ-577 (ГОСТ 5631—70). Внешний вид поверхности покрытия должен соответствовать IV или V классу по ГОСТ 9032—74.

В комплект поставки горелки входят: сама горелка (объем поставки партии и номенклатура определяются договором или нарядзаказом); сменные детали в соответствии с технической документацией; комплект крепежных деталей (шпильки, болты, гайки и шайбы) для крепления горелки на печи. К комплекту прилагается эксплуатационная документация по ГОСТ 2.601—68: паспорт и акт приемки (сопроводительный документ). В акте приемки указывают: наименование организации, в систему которой входит предприятие-изготовитель; наименование и адрес предприятия-изготовителя; наименование и условное обозначение сожигательного устройства; номер партии; дату изготовления; дату контроля и испытаний. Акт приемки должен иметь подпись и штамп ОТК.

В соответствии с ГОСТом технические условия должны содержать указания о маркировке и упаковке горелок. Все горелки должны быть замаркированы. На каждой горелке должна быть прикреплена табличка, содержащая:

наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;

обозначение горелки;

порядковый номер горелки по нумерации предприятия-изготовителя;

год и месяц выпуска;

номинальные параметры (вид газа, номинальное давление газа и воздуха, номинальная тепловая мощность, требуемая электрическая мощность, напряжение);

обозначение стандарта и технических условий.

Табличка, содержащая маркировку, должна быть прикреплена способом, обеспечивающим ее сохранность в течение всего срока службы горелки.

В подразделе «Упаковка» должно быть указано, что каждая горелка подвергается консервации по ГОСТ 9.014—79 как изделие II группы. Горелки должны отгружаться заказчику в собранном виде без упаковки. При необходимости предприятие-изготовитель производит разбивку горелок на упаковочные узлы.

В разделе «Правила приемки» указывают порядок контроля горелок, порядок и условия предъявления и приемки горелок отделом технического контроля завода-изготовителя и потребителем. В этом разделе устанавливают также порядок предъявления на повторный контроль и приемки деталей после исправления дефектов, обнаруженных при первичном контроле или во время испытаний.

В разделе «Методы контроля» указывают методы контроля всех параметров, норм, требований и характеристик, установленных в разделе «Технические требования».

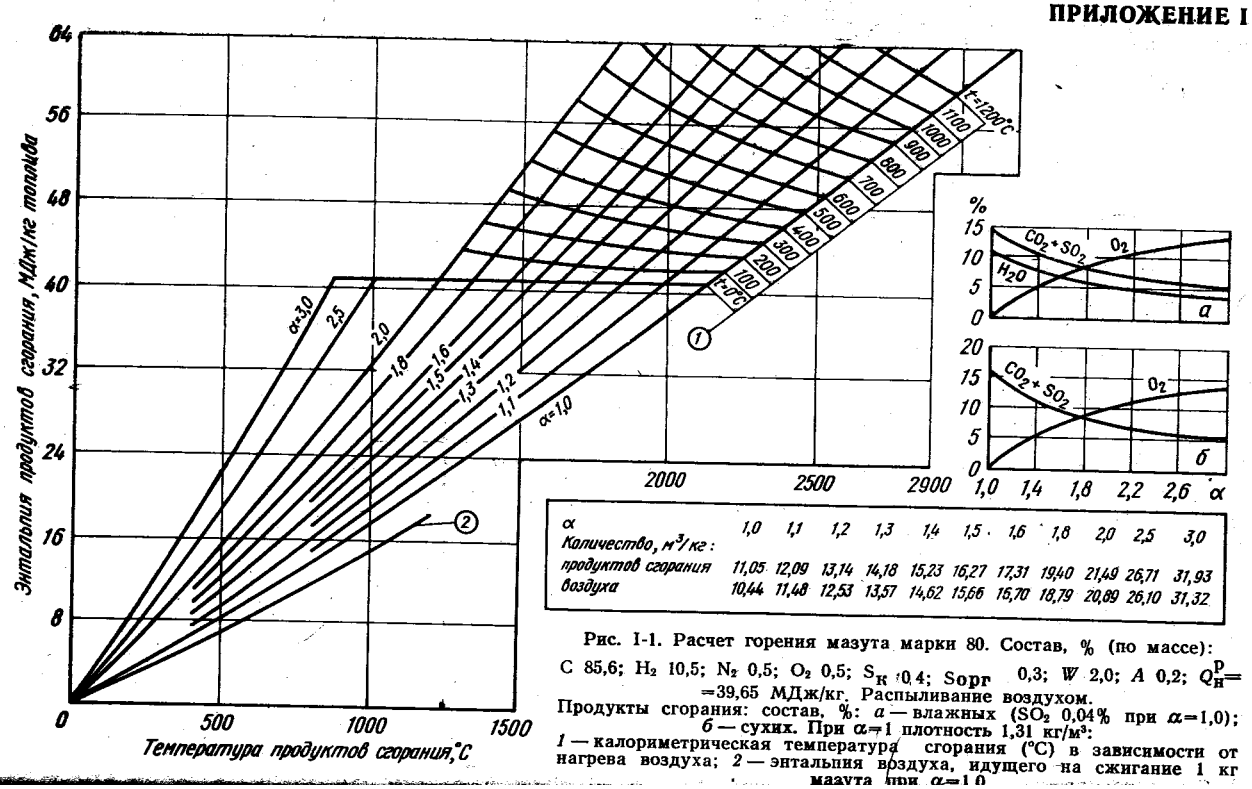
В следующем разделе излагают требования к транспортированию и хранению готовых горелок.

В технические условия входит раздел «Указания по эксплуатации», в соответствии с которым каждое предприятие, эксплуатирующее сожигательные устройства, должно иметь применительно к местным условиям инструкции по эксплуатации агрегатов, использующих указанные горелки, и паспорт горелки. Обязательным условием длительной и безотказной работы горелки является ее правильный и тщательный монтаж на месте эксплуатации.

Перед установкой горелки на место эксплуатации необходимо очистить ее полости от мусора и присоединить к трубопроводам. Установку прокладок производить с учетом протекающей среды. При установке горелки щель между кладкой печи и горелкой плотно заделать огнеупорным материалом.

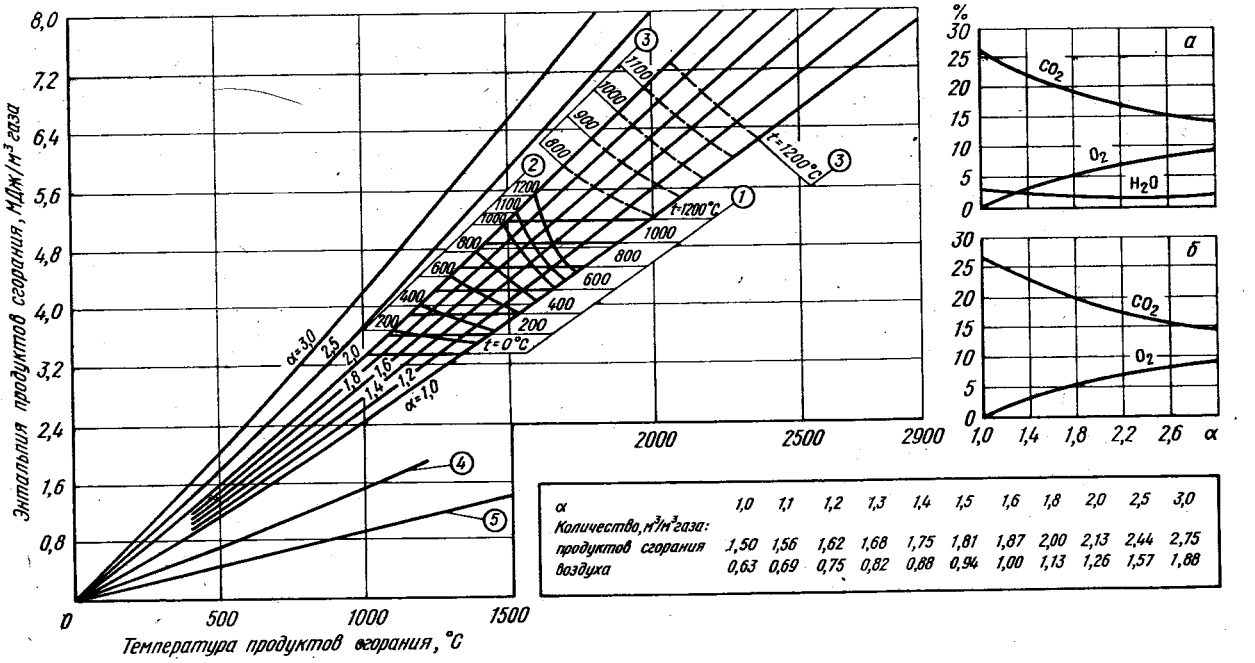
При эксплуатации горелок необходимо регулярно проверять надежность фланцевых соединений с учетом протекающей среды и надежность болтовых соединений. При плановых ремонтах тепловых агрегатов следует производить осмотр горелок и прочищать их от накапливающихся сажи, грязи и пыли.

В технических условиях отражаются гарантии поставщика. Поставщик (изготовитель) гарантирует работоспособность горелок. Срок гарантии устанавливается 18 мес со дня ввода в эксплуатацию, но не более 24 мес со дня отгрузки. Изготовитель в течение гарантийного срока своевременно и безвозмездно устраняет все скрытые неисправности, дефекты и несоответствия технических характеристик, которые не были выявлены в процессе изготовления, контроля и испытаний сожигательных устройств при условии соблюдения потребителем правил их эксплуатации.



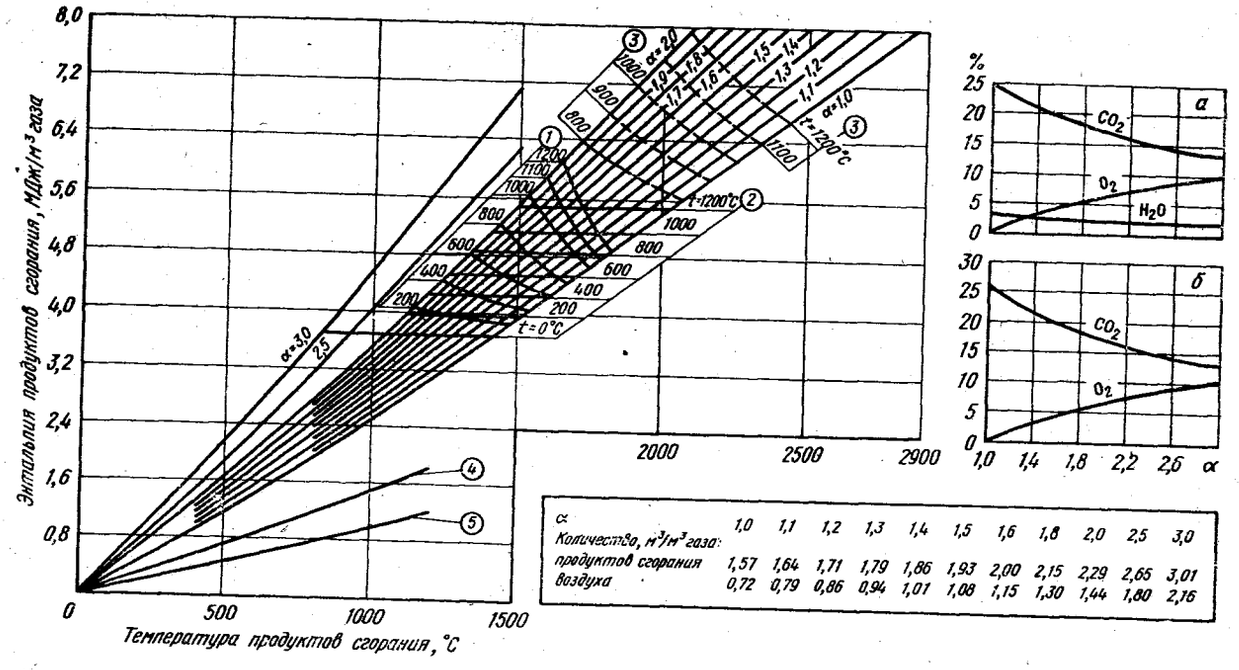
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/кг:											
продуктов сгорания	11,05	12,09	13,14	14,18	15,23	16,27	17,31	19,40	21,49	26,71	31,93
воздуха	10,44	11,48	12,53	13,57	14,62	15,66	16,70	18,79	20,89	26,10	31,32

Рис. I-1. Расчет горения мазута марки 80. Состав, % (по массе): C 85,6; H_2 10,5; N_2 0,5; O_2 0,5; $S_к$ 0,4; $S_{орг}$ 0,3; W 2,0; A 0,2; $Q_н^р$ = =39,65 МДж/кг. Распыливание воздухом. Продукты сгорания: состав, %: *а* — влажных (SO_2 0,04% при α=1,0); *б* — сухих. При α=1 плотность 1,31 кг/м³: *1* — калориметрическая температура сгорания (°С) в зависимости от нагрева воздуха; *2* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 кг мазута при α=1,0



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	1,50	1,56	1,62	1,68	1,75	1,81	1,87	2,00	2,13	2,44	2,75
воздуха	0,63	0,69	0,75	0,82	0,88	0,94	1,00	1,13	1,26	1,57	1,88

Рис. I-2. Расчет горения доменного газа состава, % (объемн.): CO_2 14,07; CO 25,33; H_2 0,9; CH_4 0,12; O_2 0,18; N_2 57,1; H_2O 2,3; плотность газа, кг/м³: влажного 1,34; сухого 1,34 $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 3,35, сухого 3,45. Продукты сгорания (при α=1,0): плотность 1,43 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура в зависимости от подогрева газа; *2* — то же, от подогрева воздуха *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

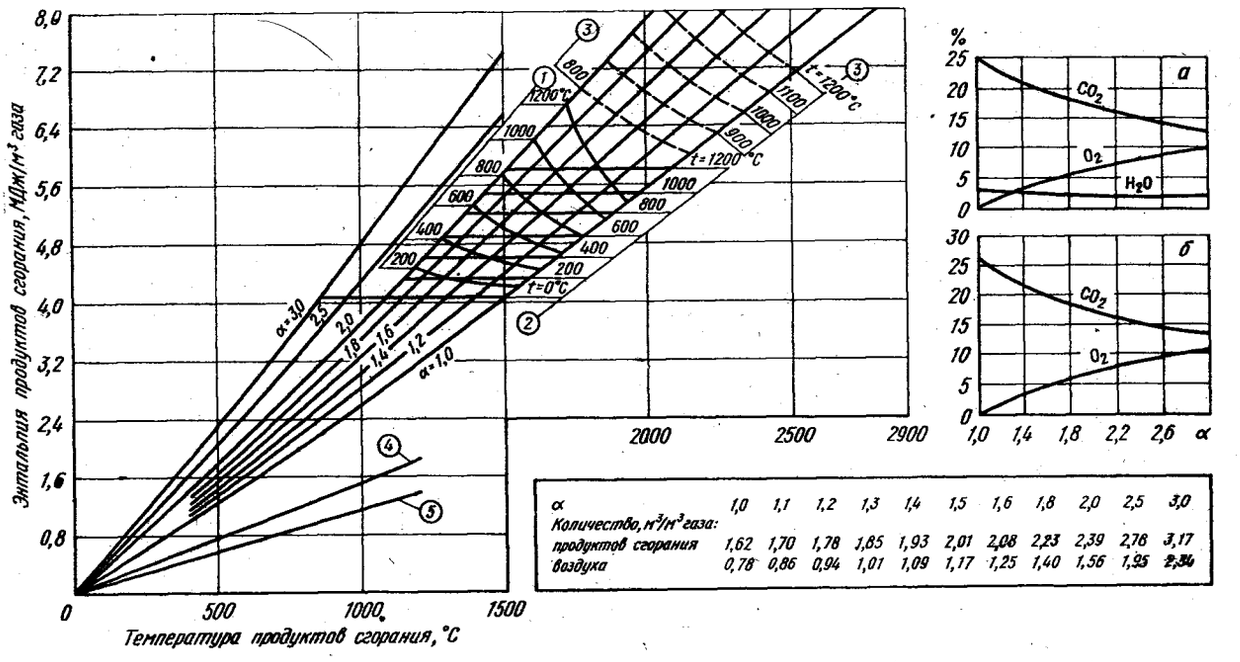


α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	1,57	1,64	1,71	1,79	1,86	1,93	2,00	2,15	2,29	2,65	3,01
воздуха	0,72	0,79	0,86	0,94	1,01	1,08	1,15	1,30	1,44	1,80	2,16

Рис. I-3. Расчет горения доменного газа состава, % (объемн.):

CO_2 12; CO 26,6; H_2 2,4; CH_4 0,3; N_2 56,4; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,30, сухого 1,31; $Q^р_н$, МДж/м³: влажного 3,73, сухого 3,81.

Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,42 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	1,62	1,70	1,78	1,85	1,93	2,01	2,08	2,23	2,39	2,76	3,17
воздуха	0,78	0,86	0,94	1,01	1,09	1,17	1,25	1,40	1,56	1,95	2,34

Рис. I-4. Расчет горения доменного газа состава, % (объемн.):

CO_2 10,2; CO 30,1; H_2 2,2; CH_4 0,1; N_2 55,1; H_2O 2,3. Плотность газа кг/м³: влажного 1,29; сухого 1,30. $Q^р_н$, МДж/м³: влажного 4,09, сухого 4,19.

Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,42 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

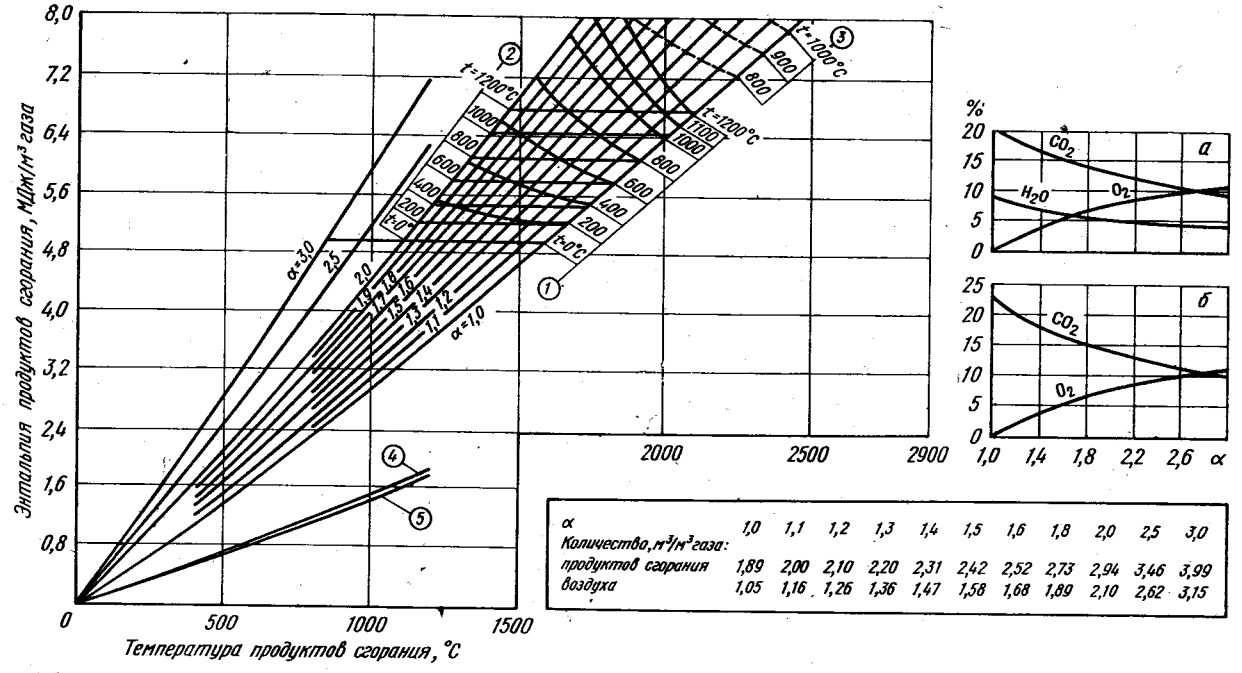


Рис. I-5. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 11; CO 24,6; H_2 7,6; CH_4 2,7; C_mH_n 0,2; O_2 0,1; N_2 51,5; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,22, сухого 1,23. $Q^p_н$ МДж/м³: влажного 5,05, сухого 5,17.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,36 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

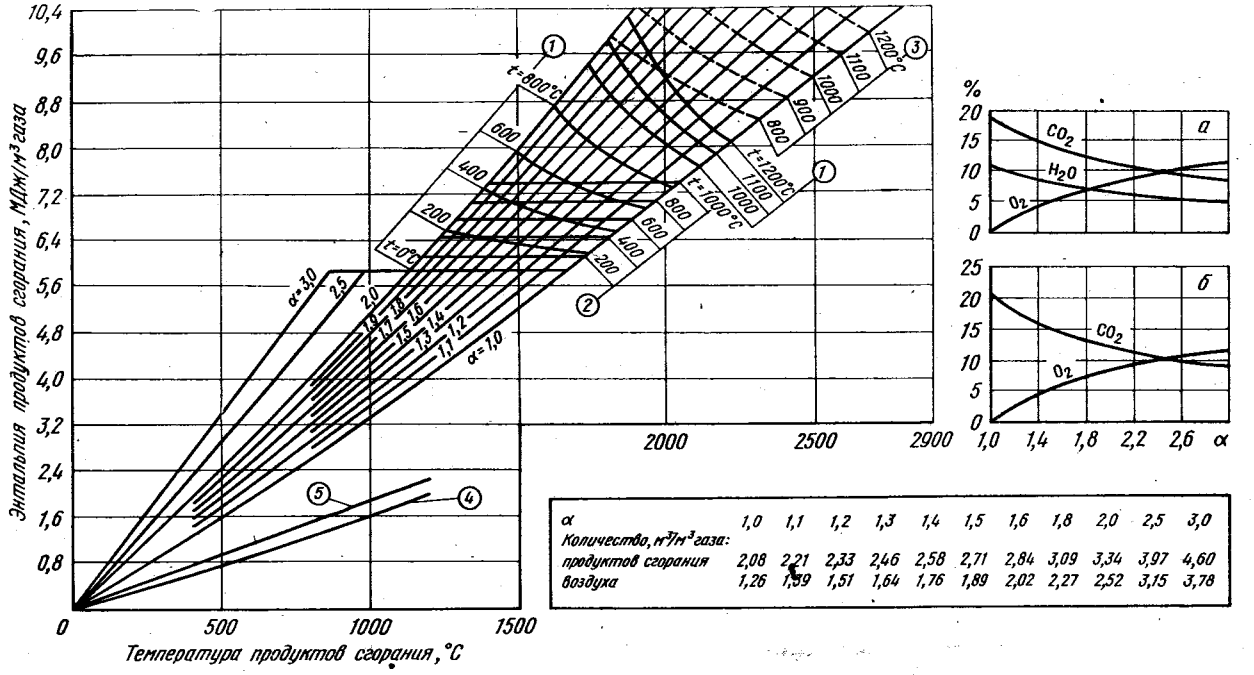
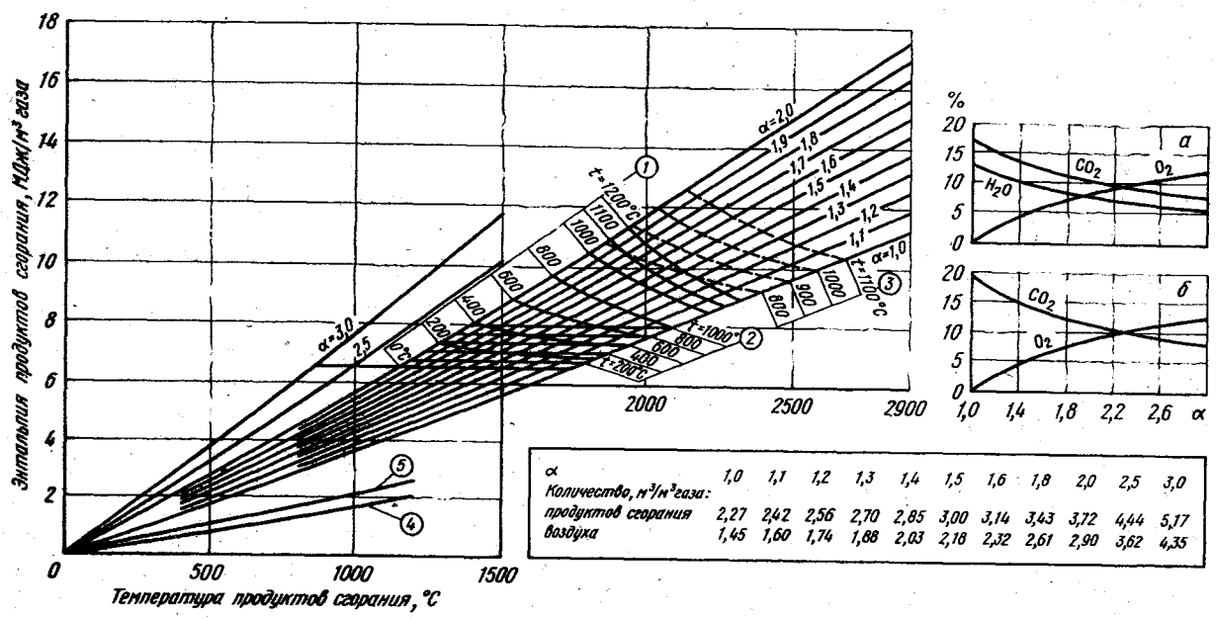


Рис. I-6. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, %: (объемн.): CO_2 10,4; CO 23,4; H_2 10,9; CH_4 4,2; C_mH_n 0,3; O_2 0,1; N_2 48,4; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,17, сухого 1,17, $Q^p_н$, МДж/м³: влажного 5,86, сухого 6,01.

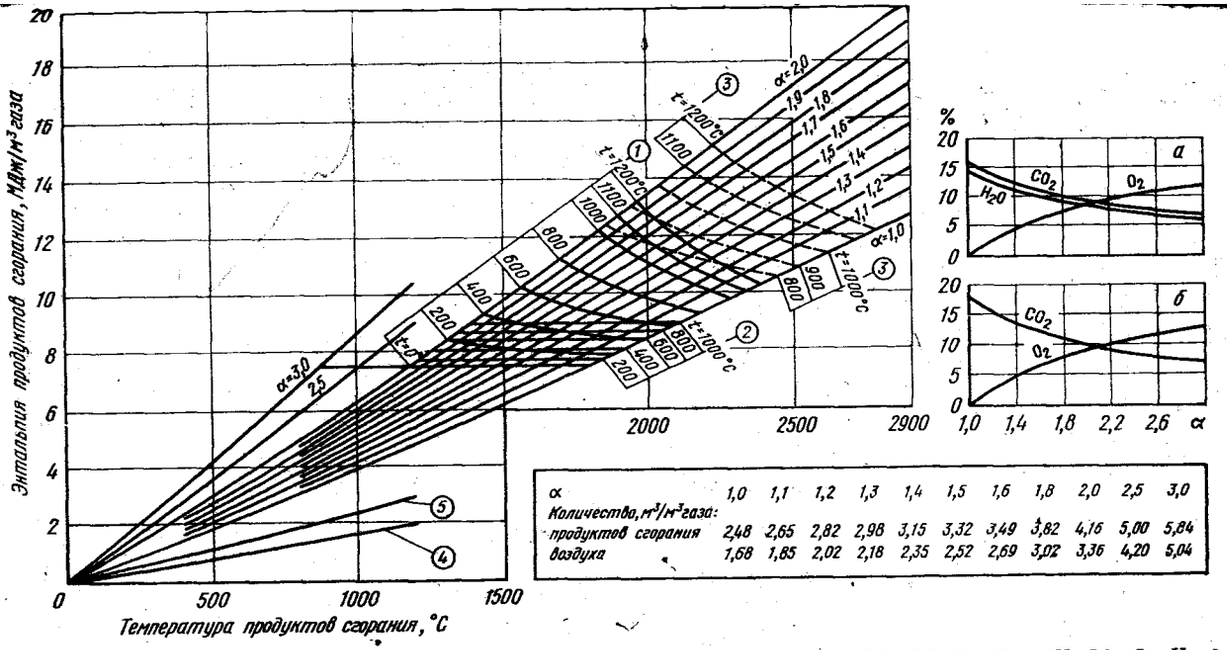
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,34 кг/м³. Состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	2,27	2,42	2,56	2,70	2,85	3,00	3,14	3,43	3,72	4,44	5,17
воздуха	1,45	1,60	1,74	1,88	2,03	2,18	2,32	2,61	2,90	3,62	4,35

Рис. I-7. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 9.8; CO 22,1; H_2 14,2; CH_4 5,7; $C_m H_n$ 0,4; O_2 0,2; N_2 45,3; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,12, сухого 1,12. $Q^p_н$, МДж/м³: влажного 6,66, сухого 6,82.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,32 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих;
1 — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	2,48	2,65	2,82	2,98	3,15	3,32	3,49	3,82	4,16	5,00	5,84
воздуха	1,68	1,85	2,02	2,18	2,35	2,52	2,69	3,02	3,36	4,20	5,04

Рис. I-8. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн): CO_2 9,2; CO 20,8; H_2 17,5; CH_4 7,2; $C_m H_n$ 0,6; O_2 0,2; N_2 42,2; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,07, сухого 1,07; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного 7,54, сухого 7,73.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,30 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих;
1 — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

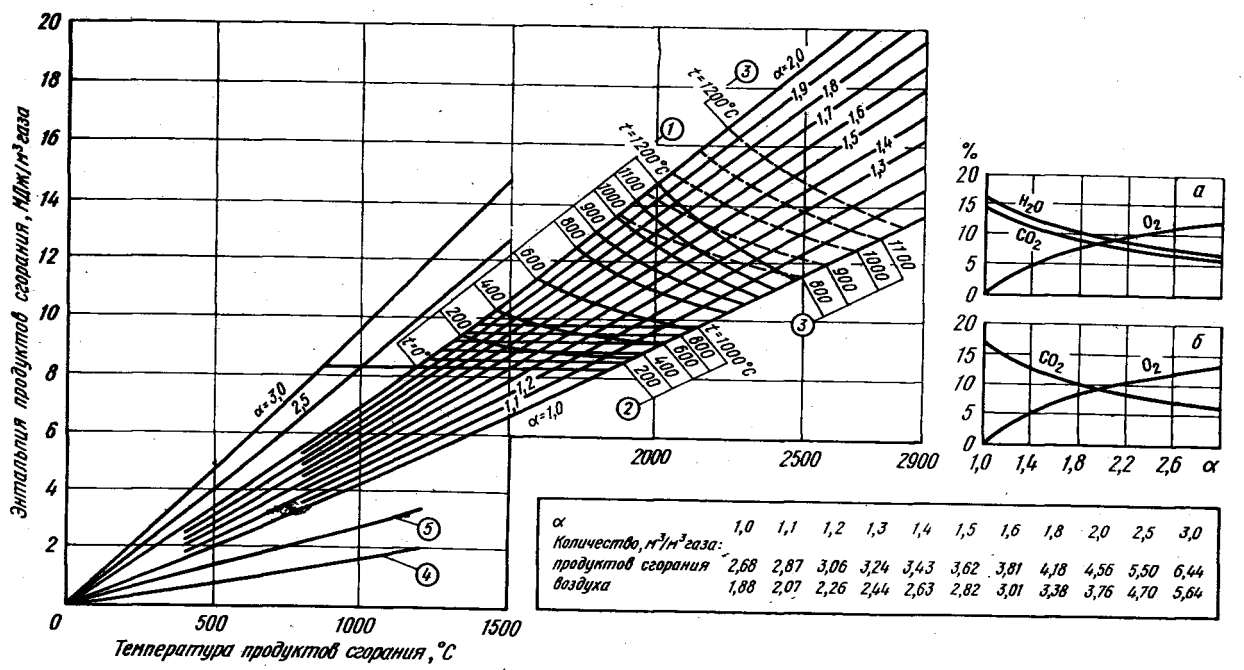


Рис. I-9. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 9,5; CO 19,6; H_2 20,9; CH_4 8,8; $C_m H_n$ 0,7; O_2 0,3; N_2 38,9; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,01; сухого 1,01: $Q^{р}_{н}$, МДж/м³: влажного 8,40; сухого 8,60.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,28 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих;
1 — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия

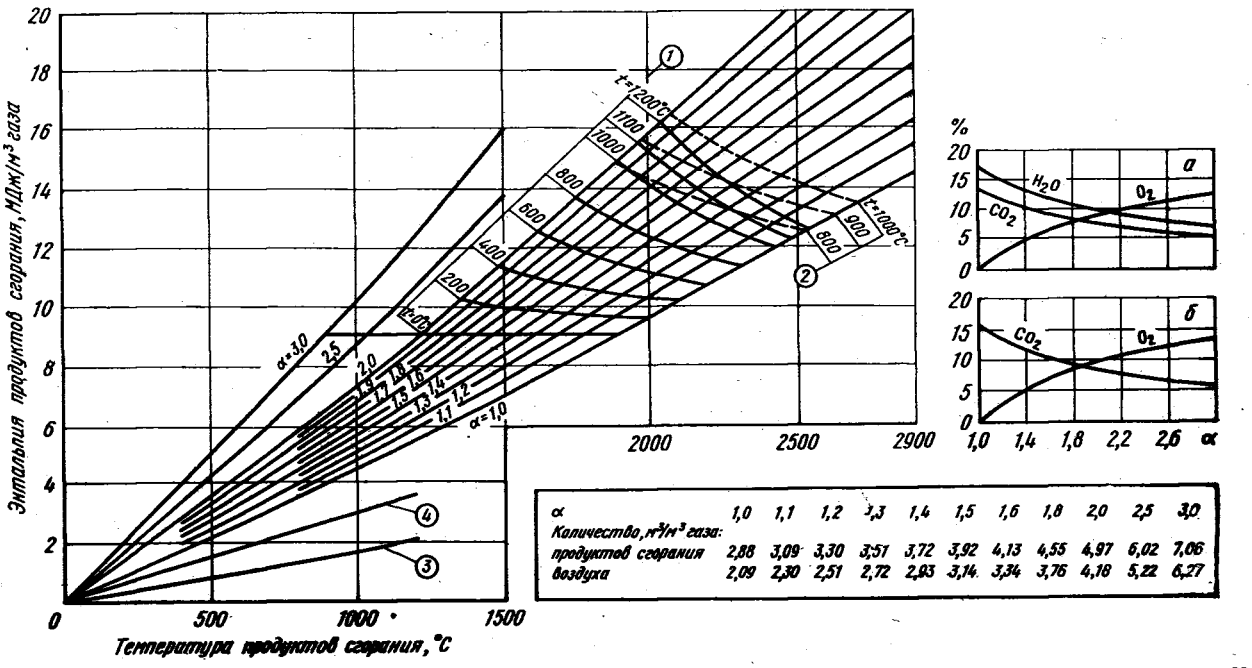


Рис. I-10. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 7,9; CO 18,3; H_2 24,2; CH_4 10,3; $C_m H_n$ 0,8; O_2 0,3; N_2 35,9; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,96, сухого 0,96; $Q^{р}_{н}$, МДж/м³: влажного газа 9,21, сухого 9,42.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,27 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих;
1 — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *3* — энтальпия 1 м³ газа; *4* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

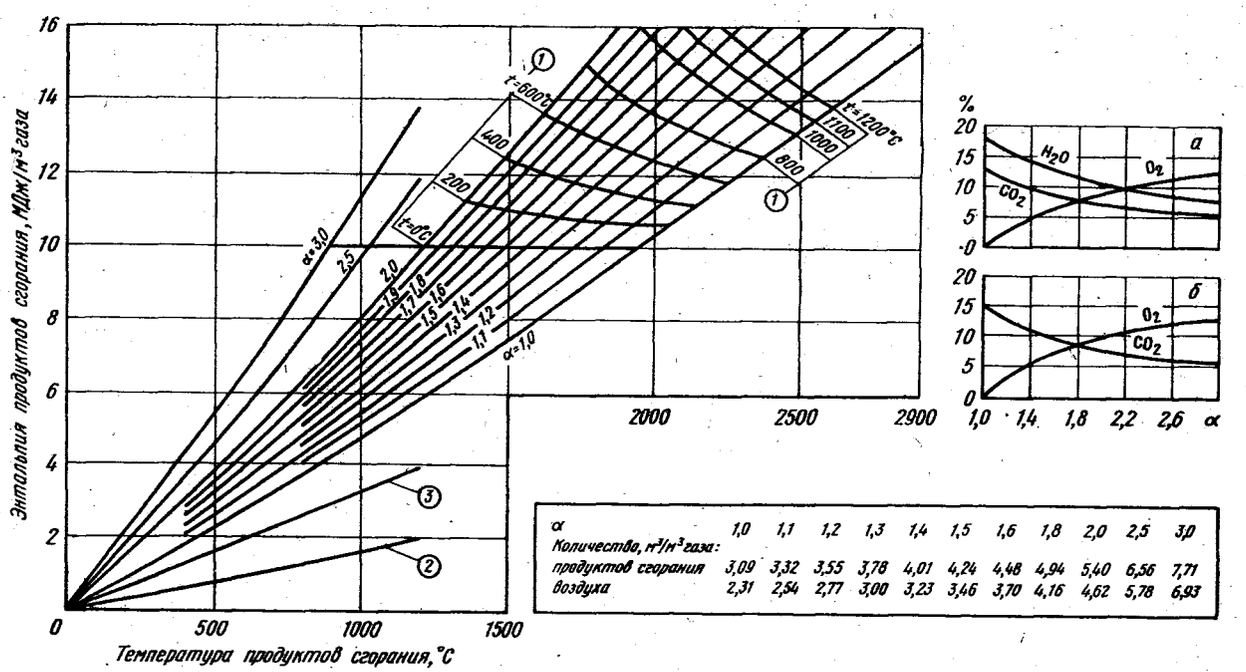


Рис. I-11. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 7,3; CO 17,0; H_2 27,5; CH_4 11,8; $C_m H_n$ 1,0; O_2 0,4; N_2 32,7; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,91, сухого 0,91; $Q^{р}_{н}$, МДж/м³: влажного газа 10,07, сухого 10,32. Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,26 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

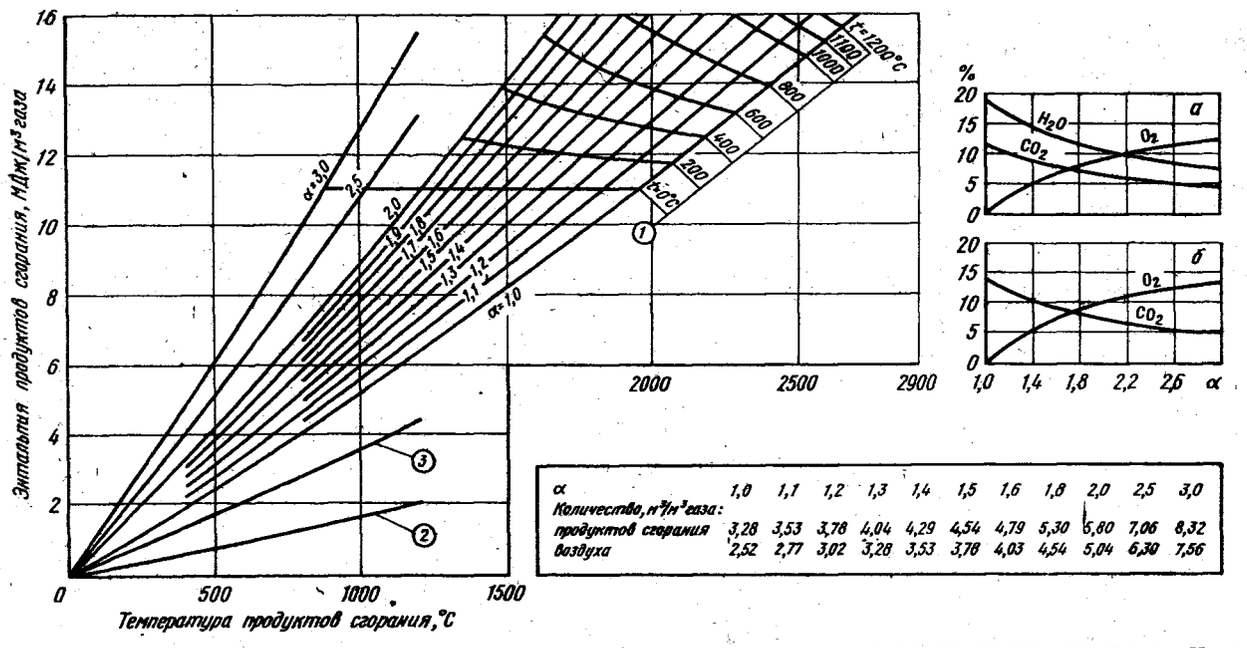
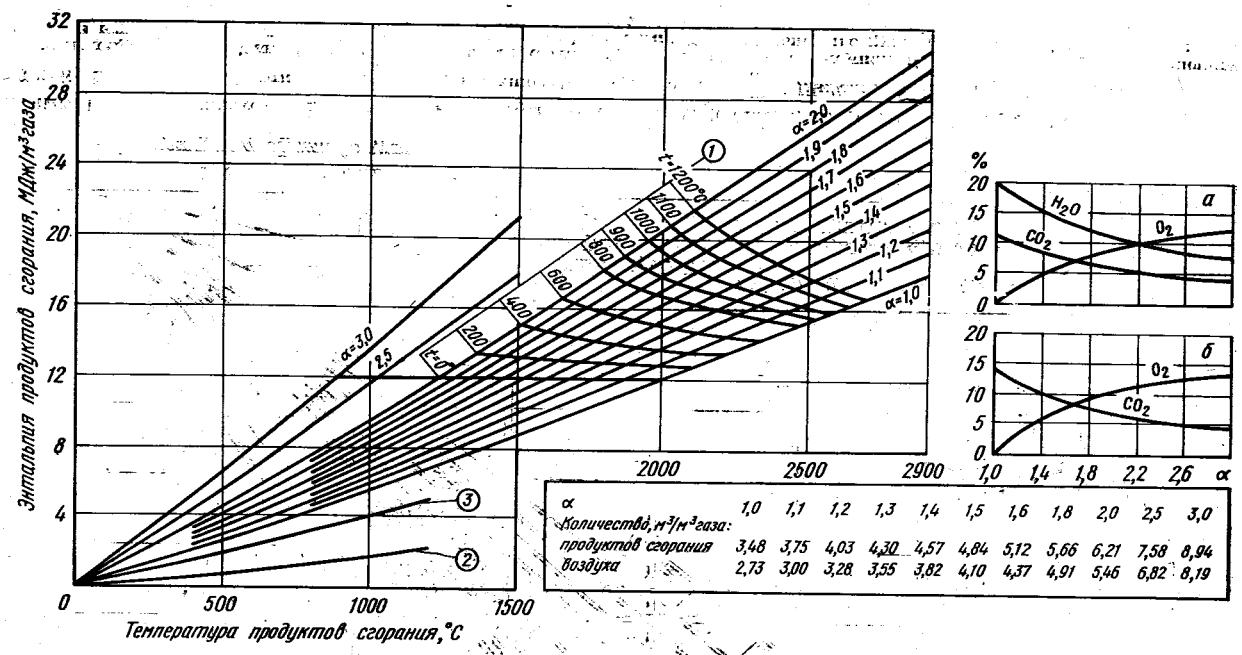
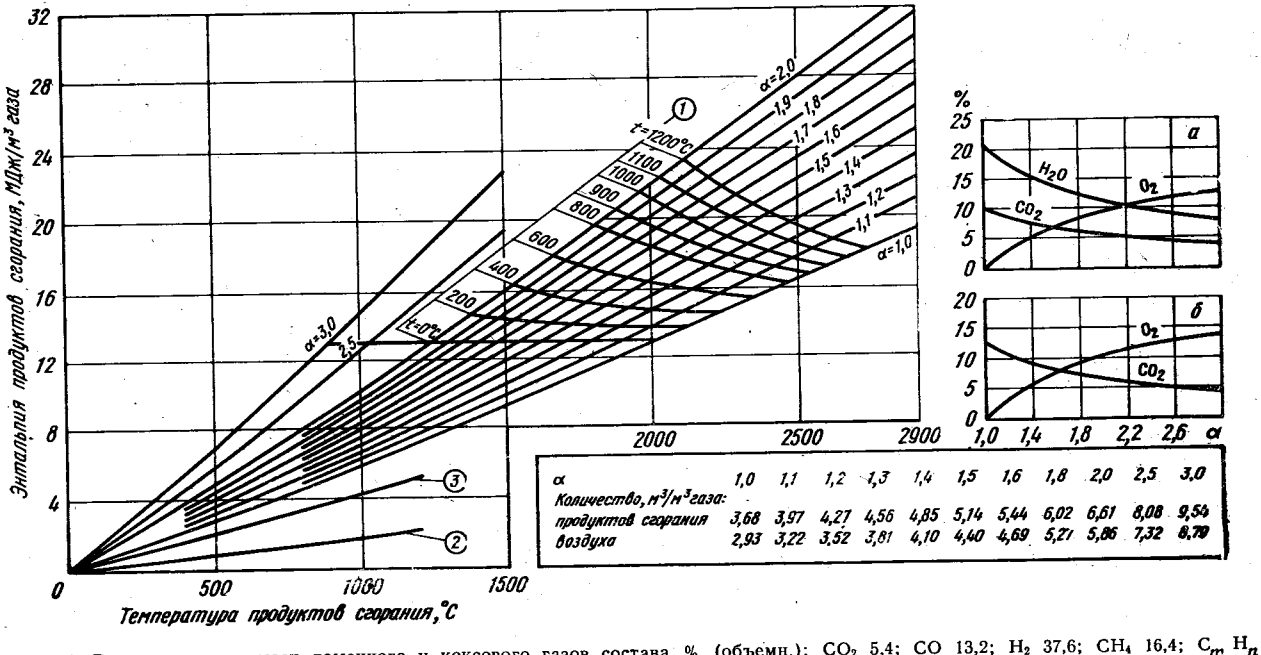


Рис. I-12. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 6,6; CO 15,8; H_2 30,9; CH_4 13,3; $C_m H_n$ 1,1; O_2 0,4; N_2 29,6; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,86, сухого 0,86. $Q^{р}_{н}$, МДж/м³: влажного газа 10,91, сухого 11,16. Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,25 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



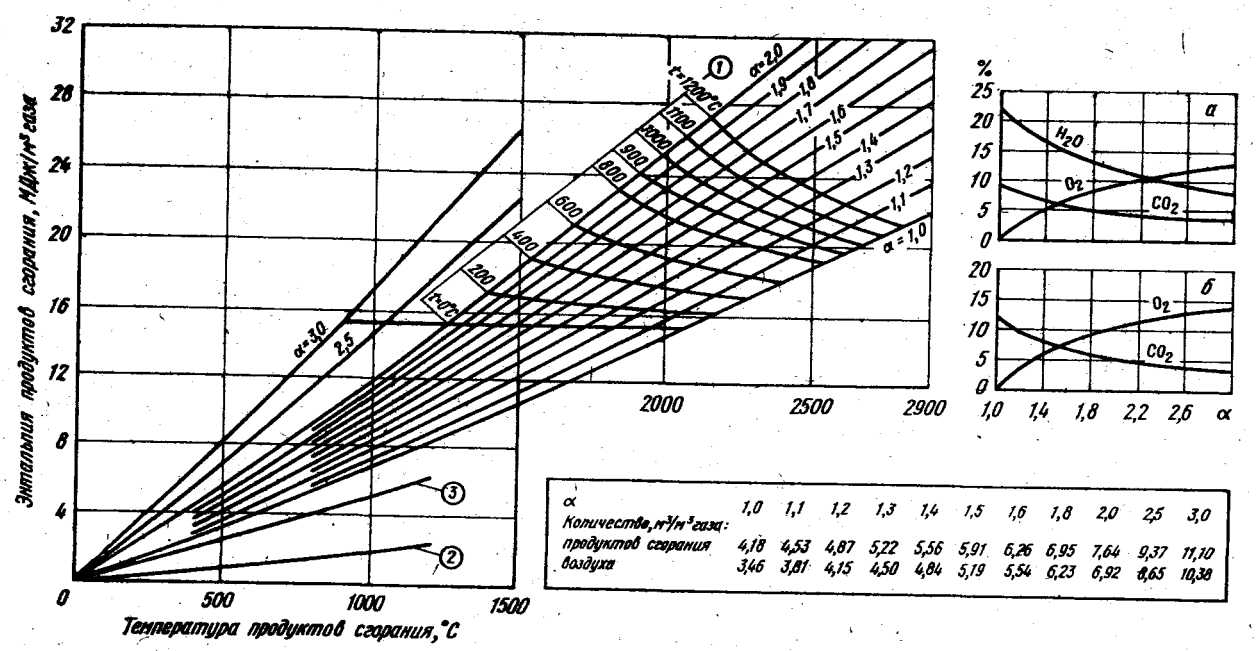
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³газа:											
продуктов сгорания	3,48	3,75	4,03	4,30	4,57	4,84	5,12	5,66	6,21	7,58	8,94
воздуха		2,73	3,00	3,28	3,55	3,82	4,10	4,37	4,91	5,46	6,82	8,19

Рис. I-13. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 6,0; CO 14,5; H_2 34,2; CH_4 14,9; $C_m H_n$ 1,2; O_2 0,5; N_2 26,4; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,81, сухого 0,78; $Q^р_н$, МДж/м³: влажного газа 11,74, сухого 12,02. Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,24 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



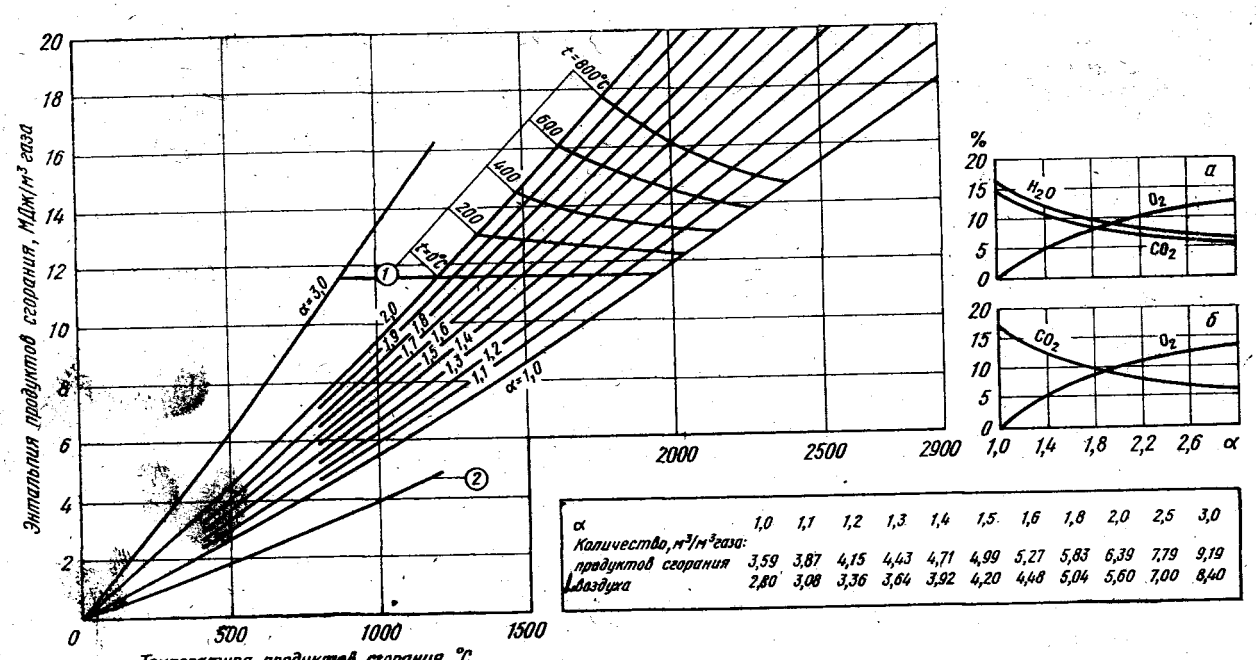
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³газа:											
продуктов сгорания	3,68	3,97	4,27	4,56	4,85	5,14	5,44	6,02	6,61	8,08	9,54
воздуха		2,93	3,22	3,52	3,81	4,10	4,40	4,69	5,27	5,86	7,32	8,79

Рис. I-14. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 5,4; CO 13,2; H_2 37,6; CH_4 16,4; $C_m H_n$ 1,3; O_2 0,5; N_2 23,3; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,76, сухого 0,76; $Q^р_н$, МДж/м³: влажного газа 12,56, сухого 12,85. Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,23 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	4,18	4,53	4,87	5,22	5,56	5,91	6,26	6,95	7,64	9,37	11,10
воздуха	3,46	3,81	4,15	4,50	4,84	5,19	5,54	6,23	6,92	8,65	10,38

Рис. I-15. Расчет горения смеси доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 3,8; CO 10,1; H_2 45,9; CH_4 20,2; $C_{m}H_{n}$ 1,6; O_2 0,6; N_2 15,5; H_2O 2,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,63, сухого 0,63. $Q^{р}_{н}$, МДж/м³: влажного газа 14,63, сухого 15,00. Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,22 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	3,59	3,87	4,15	4,43	4,71	4,99	5,27	5,83	6,39	7,79	9,19
воздуха	2,80	3,08	3,36	3,64	3,92	4,20	4,48	5,04	5,60	7,00	8,40

Рис. I-16. Расчет горения смеси природного, доменного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 10,9; CO 21,9; H_2 22,7; CH_4 14,0; C_2H_6 1,0; O_2 0,1; N_2 28,5. Плотность газа 1,0 кг/м³. $Q^{р}_{н}$ =11,80 МДж/м³. Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,28 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

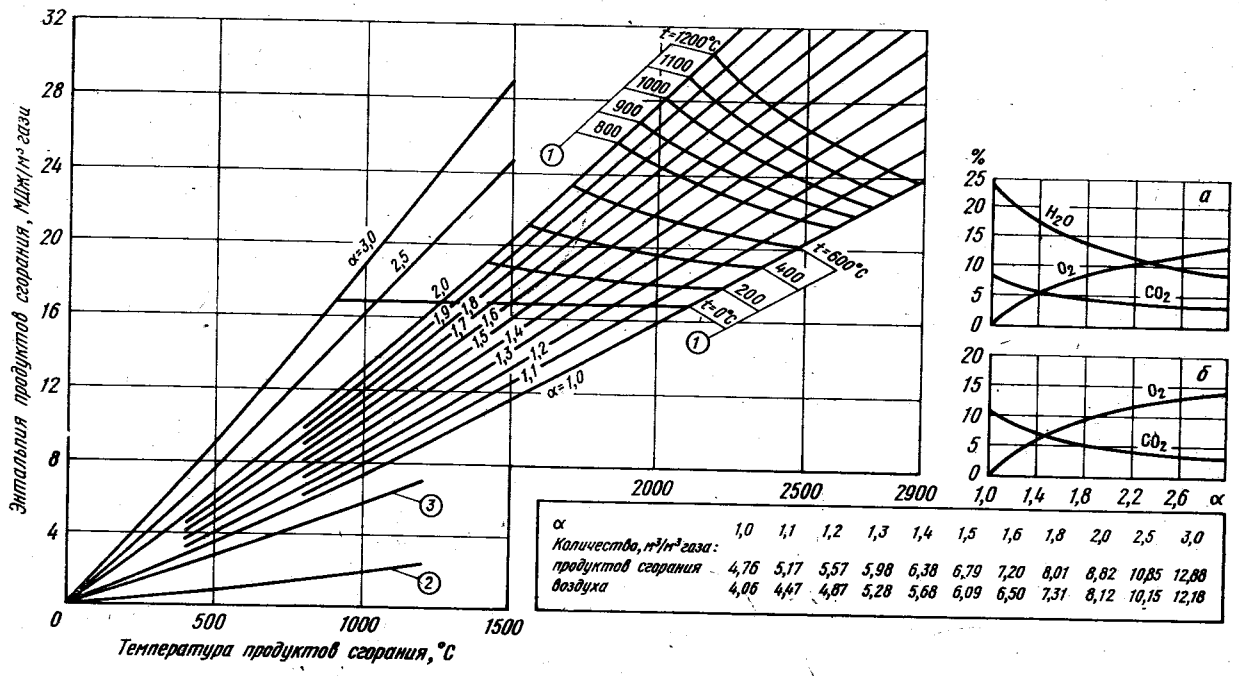


Рис. I-17. Расчет горения коксового газа состава, % (объемн.): CO_2 2,0; CO 6,4; H_2 55,5; CH_4 24,6; C_nH_m 2,0; O_2 0,8; H_2O 2,3; N 6,4. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,48, сухого 0,47. $Q^p_н$, МДж/м³: влажного 17,10, сухого 17,50.

Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,20 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

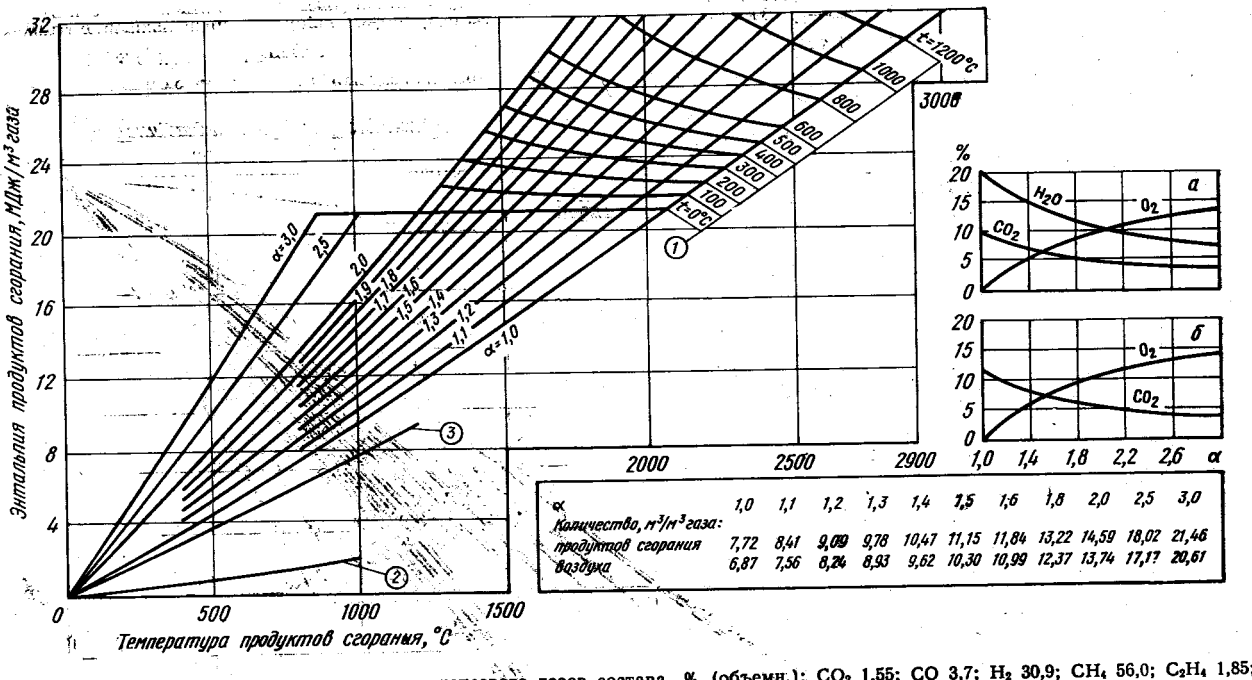
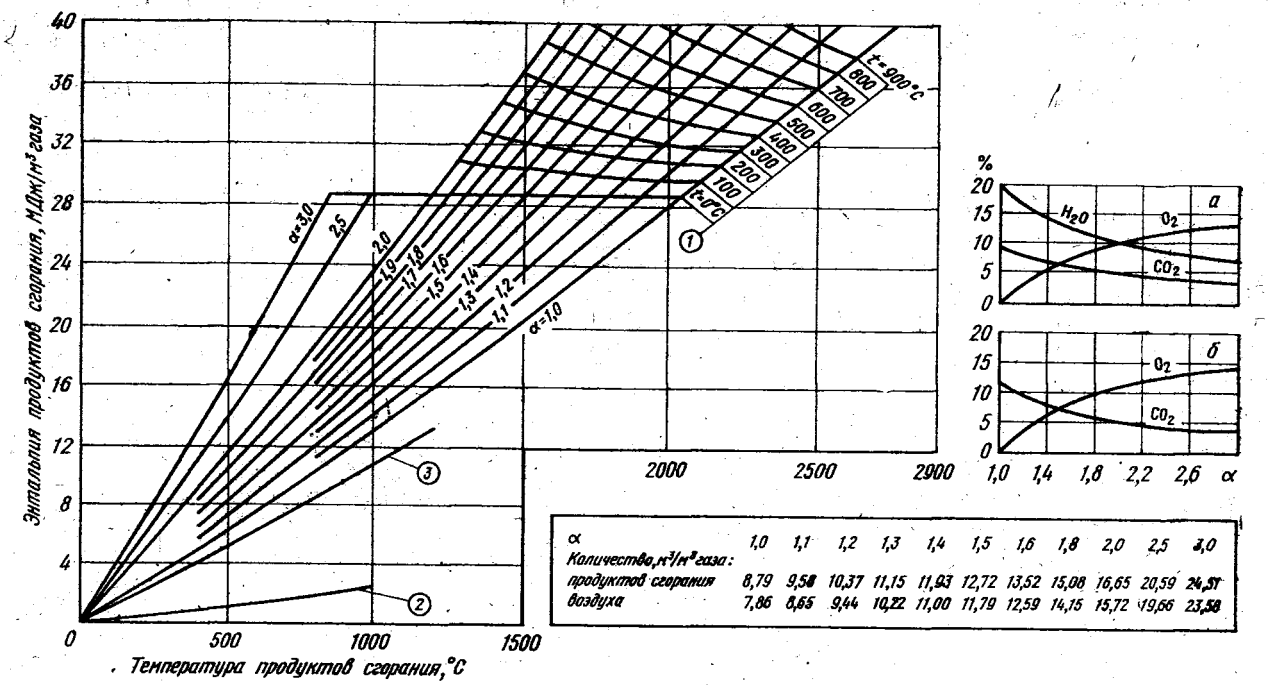


Рис. I-18. Расчет горения смеси природного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 1,55; CO 3,7; H_2 30,9; CH_4 56,0; C_2H_4 1,85; C_2H_6 1,55; C_3H_8 0,45; C_4H_{10} 0,35; O_2 0,45; N_2 1,7; H_2O 1,5. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,505, сухого 0,605. $Q^p_н$, МДж/м³: влажного газа 26,86, сухого 27,20.

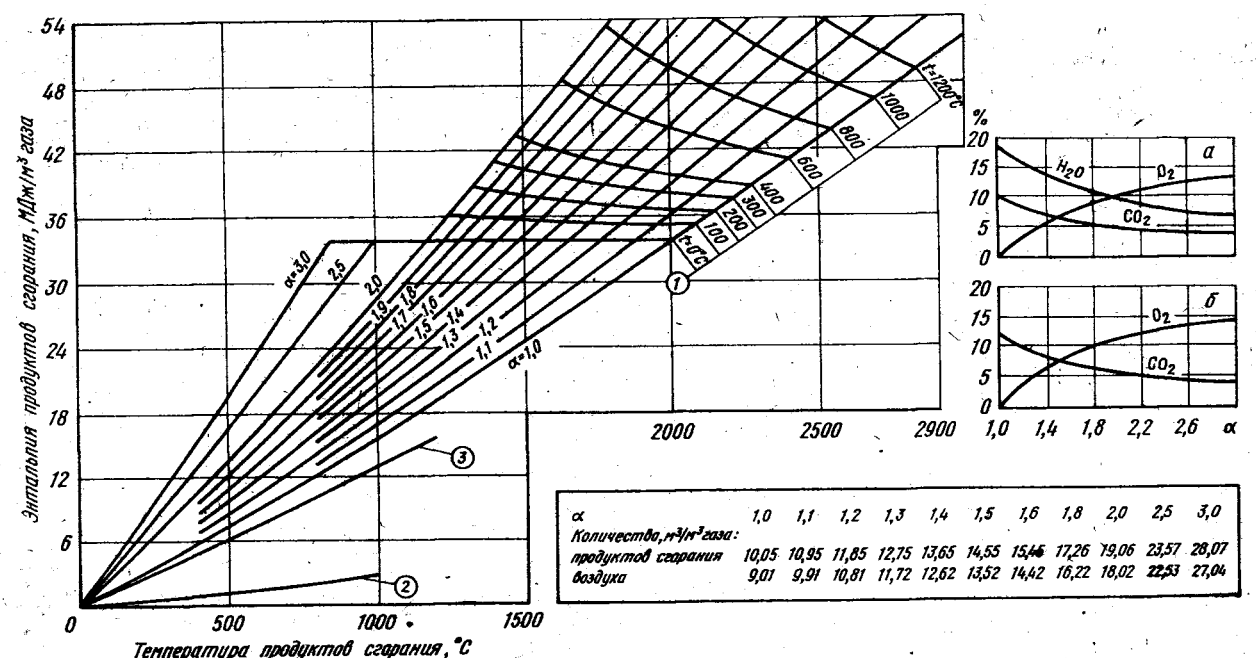
Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,23 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — теплосодержание 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	8,79	9,58	10,37	11,15	11,93	12,72	13,52	15,08	16,65	20,59	24,51
воздуха	7,86	8,65	9,44	10,22	11,00	11,79	12,59	14,15	15,72	19,66	23,58

Рис. I-19. Расчет горения смеси природного и коксового газов состава, % (объемн.): CO_2 0,7; CO 1,9; H_2 13,5; CH_4 78,3; C_mH_n 0,5; O_2 0,5; N_2 4,0; H_2O 0,5. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,68, сухого 0,68; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного газа 30,20, сухого 30,35.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,23 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	10,05	10,95	11,85	12,75	13,65	14,55	15,46	17,26	19,06	23,57	28,07
воздуха	9,01	9,91	10,81	11,72	12,62	13,52	14,42	16,22	18,02	22,53	27,04

Рис. I-20. Расчет горения природного газа состава, % (объемн.): CO_2 0,05; C_2H_6 3,57; C_3H_8 0,99; CH_4 84,12; C_4H_{10} 0,50; N_2 9,92; H_2O 0,80; C_5H_{12} 0,05. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,82, сухого 0,82; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного газа 34,0, сухого 34,25.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,24 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

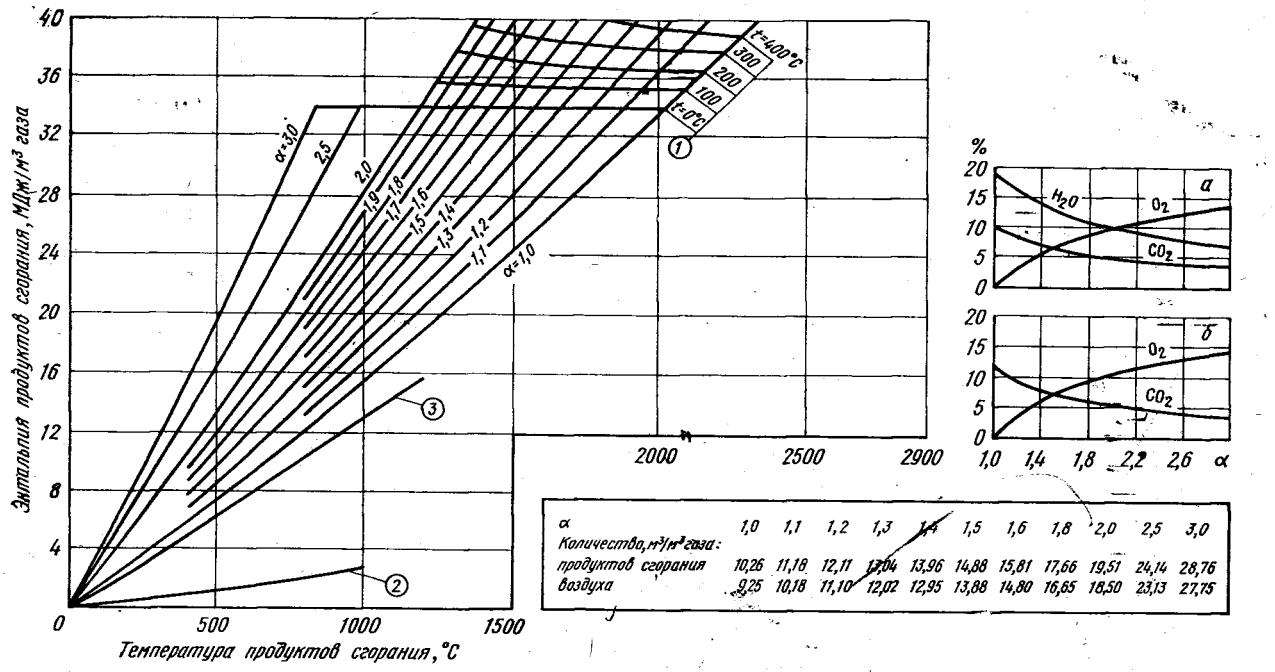


Рис. I-21. Расчет горения природного газа состава, % (объемн.): CH_4 92,3; C_2H_6 0,7; C_4H_{10} 0,5; H_2O 0,5; N_2 5,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,77, сухого 0,77; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного газа 34,96, сухого 36,15.

Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,23 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

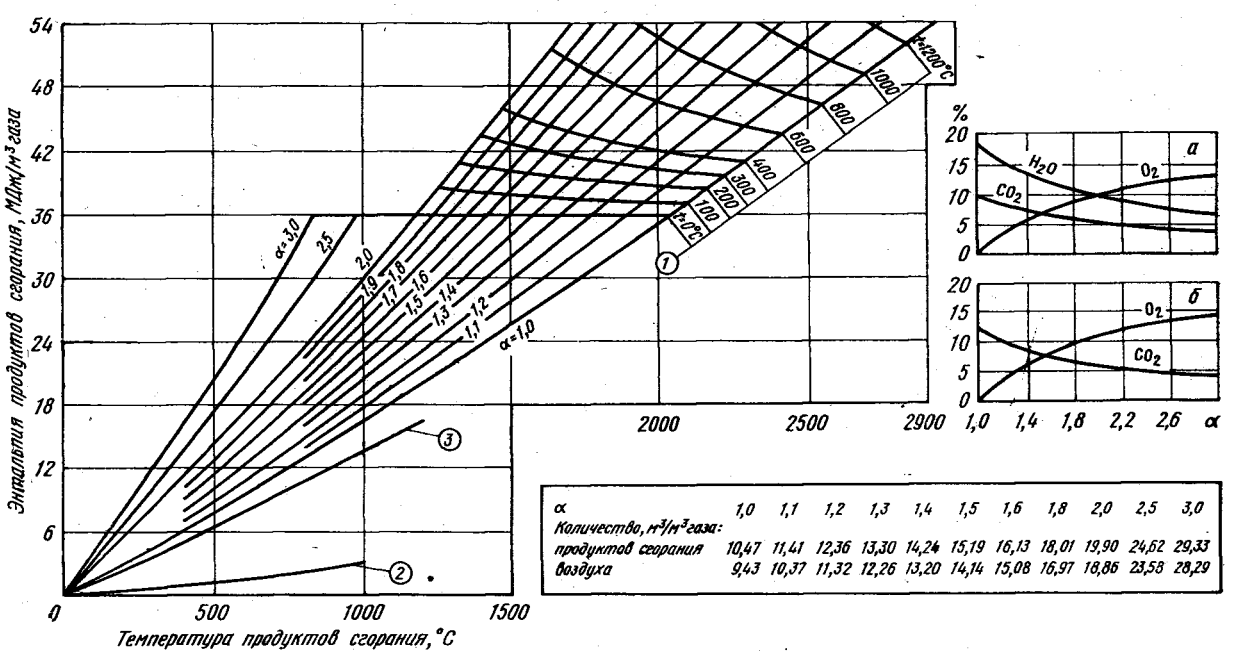


Рис. I-22. Расчет горения природного газа состава, % (объемн.): CO_2 4,39; CH_4 88,37; C_2H_6 2,72; C_3H_8 0,92; C_4H_{10} 0,74; O_5H_{12} 0,31; H_2O 0,50; N_2 2,05. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,83, сухого 0,83; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного 35,60, сухого 35,75.

Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,24 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

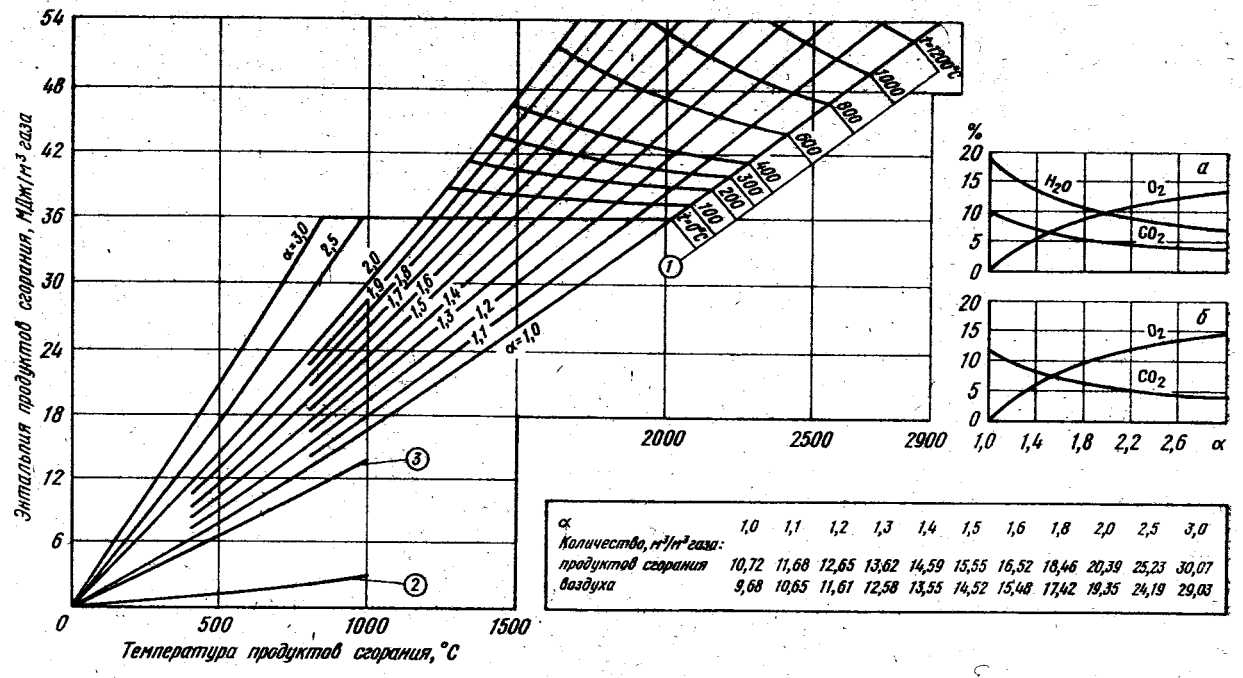


Рис. I-23. Расчет горения природного газа состава, % (объемн.): CO_2 0,07; CH_4 92,26; C_2H_6 2,98; C_3H_8 0,69; C_4H_{10} 0,47; C_5H_{12} 0,23; N_2 2,50; H_2O 0,80. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,78, сухого 0,78; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного 36,47, сухого 36,80.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,24 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

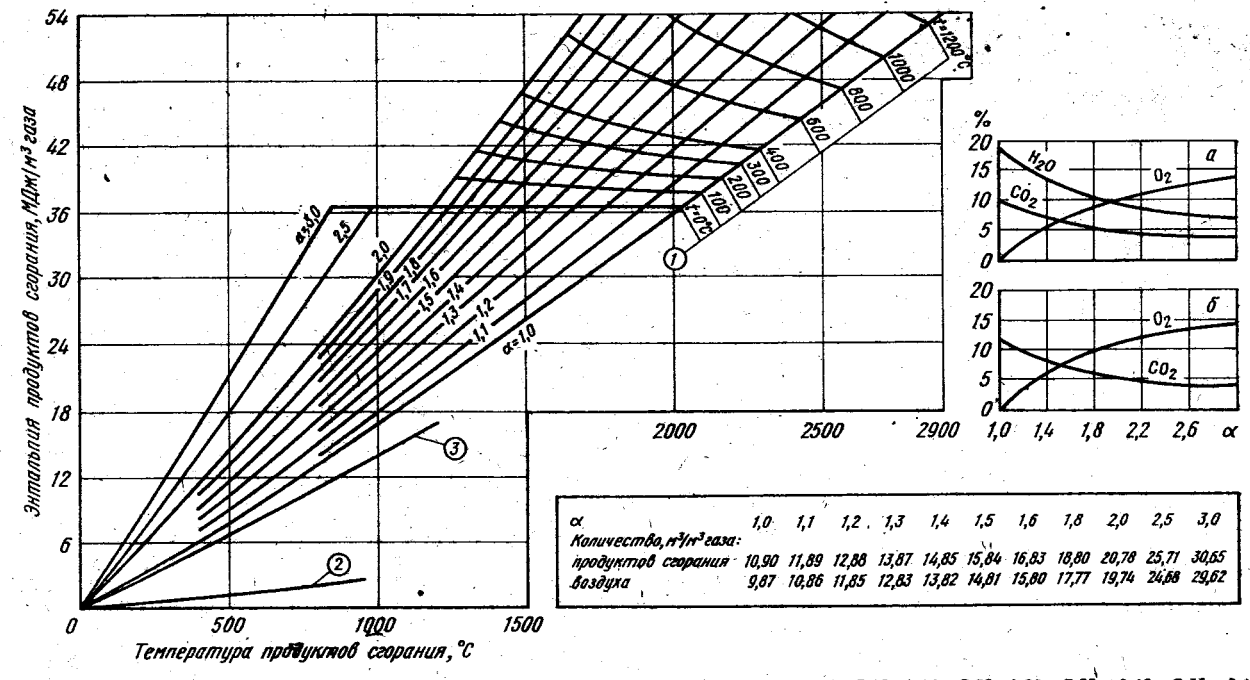
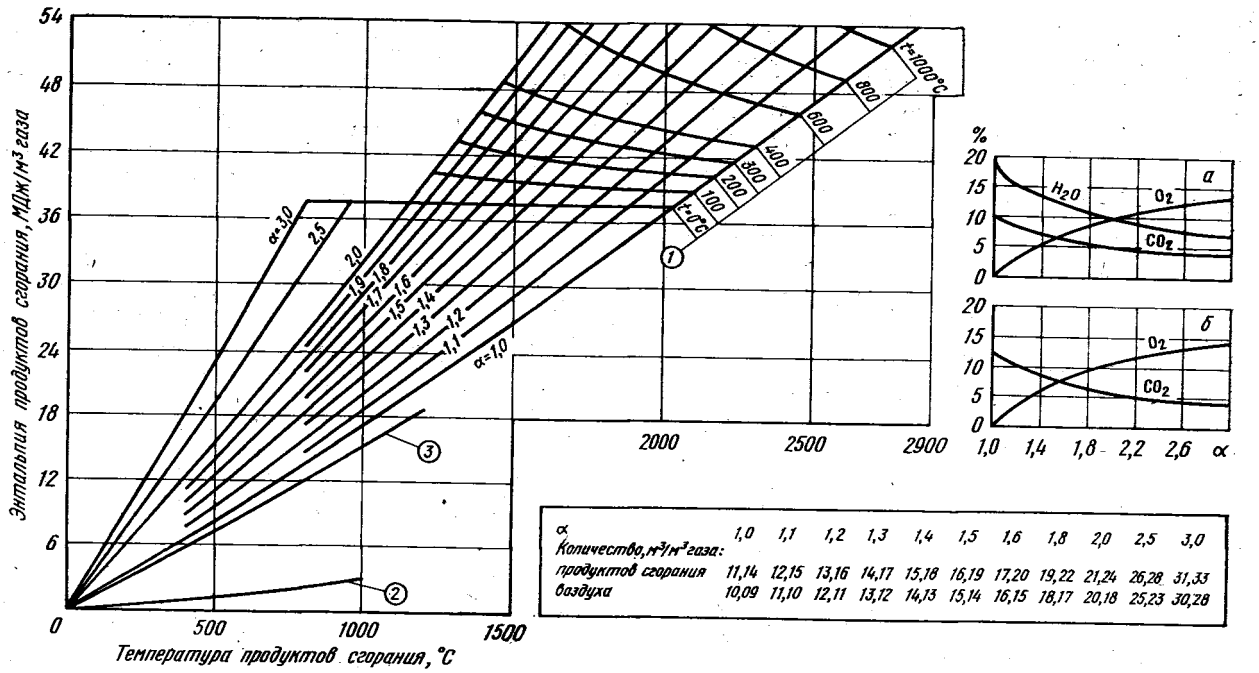


Рис. I-24. Расчет горения природного газа состава, % (объемн.): CO_2 0,12; CH_4 91,95; C_2H_6 3,87; C_3H_8 1,29; C_4H_{10} 0,40; C_5H_{12} 0,11; N_2 1,46; H_2O 0,80. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,78, сухого 0,78; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного газа 37,22, сухого 37,51.

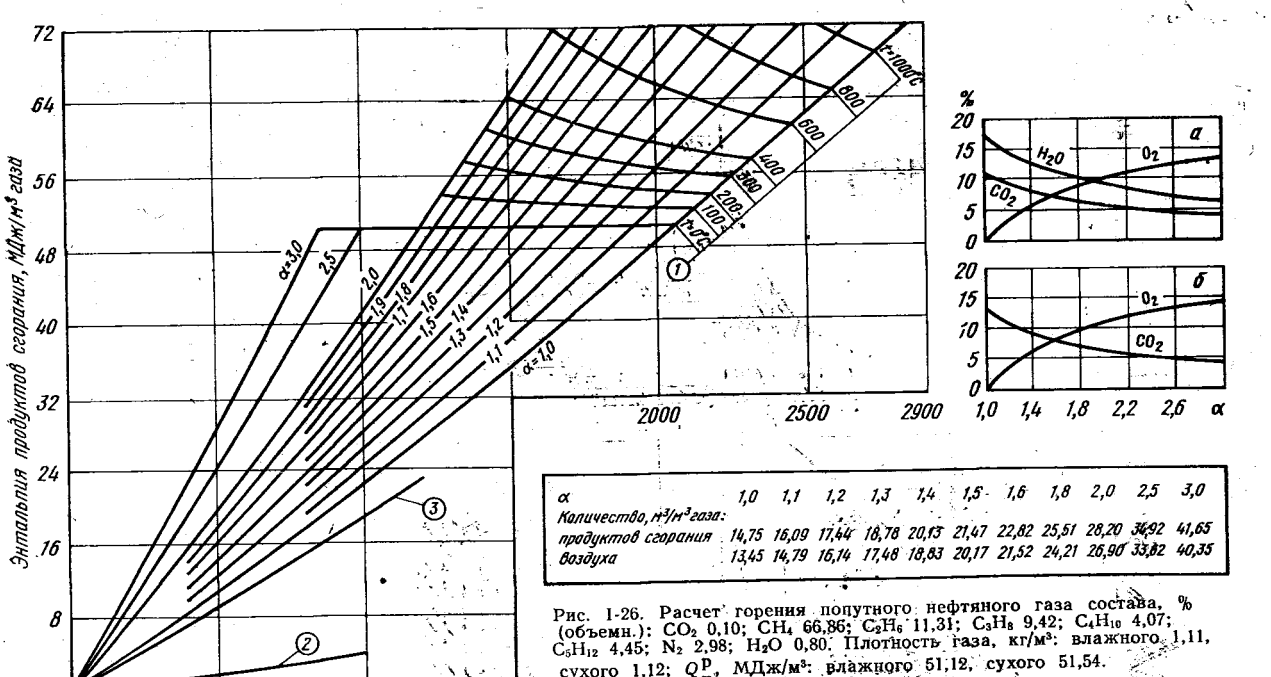
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,24 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	11,14	12,15	13,16	14,17	15,18	16,19	17,20	19,22	21,24	26,28	31,33
воздуха	10,09	11,10	12,11	13,12	14,13	15,14	16,15	18,17	20,18	25,23	30,28

Рис. I-25. Расчет горения природного газа состава, % (объемн.): CO_2 0,60; CH_4 90,90; C_2H_6 5,00; C_3H_8 1,50; C_4H_{10} 0,74; C_5H_{12} 0,05; N_2 1,21. Плотность сухого газа 0,80 кг/м³; $Q_н^р$ сухого газа 39,10 МДж/м³.

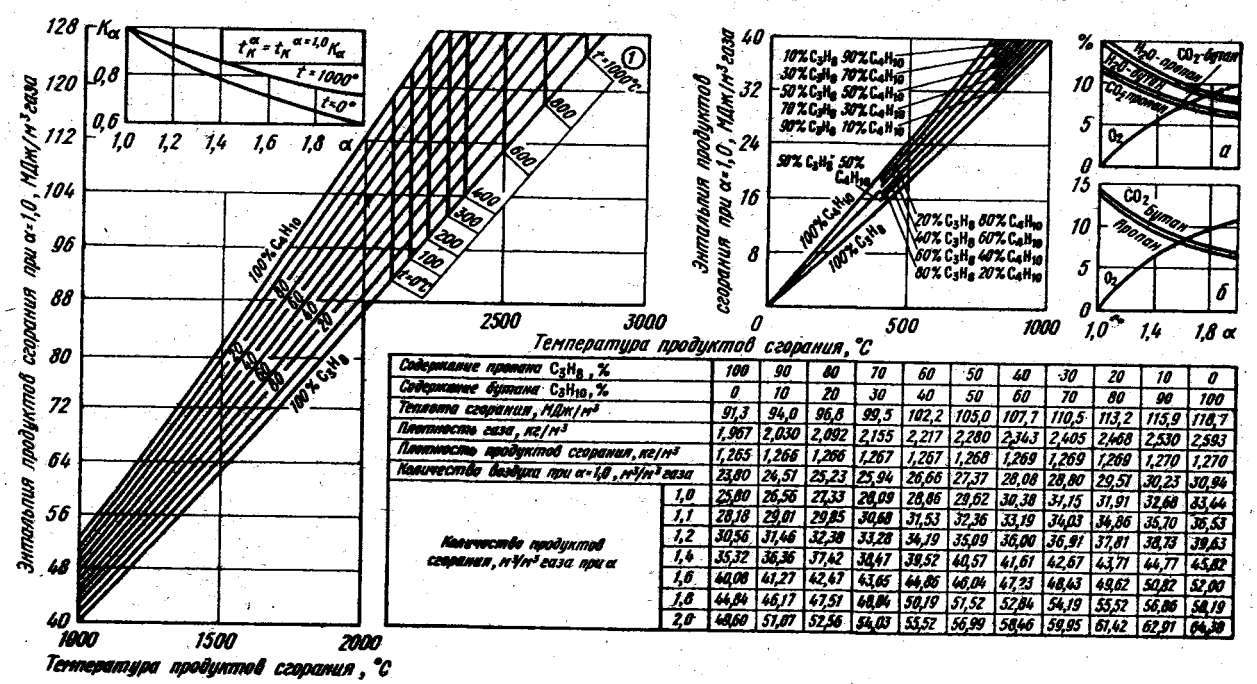
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,24 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	14,75	16,09	17,44	18,78	20,13	21,47	22,82	25,51	28,20	34,92	41,65
воздуха	13,45	14,79	16,14	17,48	18,83	20,17	21,52	24,21	26,90	33,62	40,35

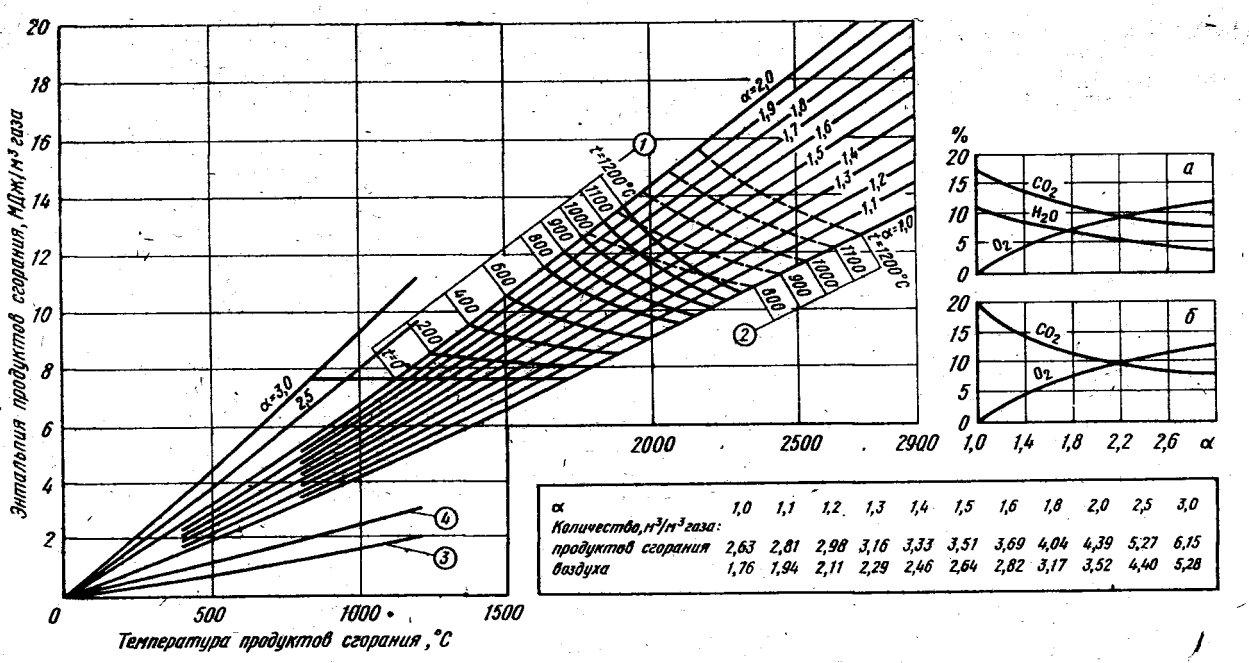
Рис. I-26. Расчет горения попутного нефтяного газа состава, % (объемн.): CO_2 0,10; CH_4 66,86; C_2H_6 11,31; C_3H_8 9,42; C_4H_{10} 4,07; C_5H_{12} 4,45; N_2 2,98; H_2O 0,80. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,11, сухого 1,12; $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 51,12, сухого 51,54.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,25 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



Содержание пропана C_3H_8, %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Содержание бутана C_4H_{10}, %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Теплота сгорания, МДж/м³	91,3	94,0	96,8	99,5	102,2	105,0	107,7	110,5	113,2	115,9	118,7
Плотность газа, кг/м³	1,967	2,030	2,092	2,155	2,217	2,280	2,343	2,405	2,468	2,530	2,593
Плотность продуктов сгорания, кг/м³	1,265	1,266	1,266	1,267	1,267	1,268	1,269	1,269	1,269	1,270	1,270
Количество воздуха при α=1,0, м³/м³ газа	23,80	24,51	25,23	25,94	26,66	27,37	28,08	28,80	29,51	30,23	30,94
Количество продуктов сгорания, м³/м³ газа при α: 1,0	25,80	26,56	27,33	28,09	28,86	29,62	30,38	31,15	31,91	32,68	33,44
1,1	28,18	29,01	29,85	30,68	31,53	32,36	33,19	34,03	34,86	35,70	36,53
1,2	30,56	31,46	32,38	33,28	34,19	35,09	36,00	36,91	37,81	38,73	39,63
1,4	35,32	36,36	37,42	38,47	39,52	40,57	41,61	42,67	43,71	44,77	45,82
1,6	40,08	41,27	42,67	43,65	44,86	46,04	47,23	48,43	49,62	50,82	52,00
1,8	44,84	46,17	47,51	48,84	50,19	51,52	52,84	54,19	55,52	56,86	58,19
2,0	48,60	51,07	52,56	54,03	55,52	56,99	58,46	59,95	61,42	62,91	64,39

Рис. I-27. Расчет горения смеси пропан — бутан: состав продуктов сгорания: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	2,63	2,81	2,98	3,16	3,33	3,51	3,69	4,04	4,39	5,27	6,15
воздуха	1,76	1,94	2,11	2,29	2,46	2,64	2,82	3,17	3,52	4,40	5,28

Рис. I-28. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 10,5; CO 23,3; CH_4 11,8; C_nH_m 0,2; N_2 50,0; H_2O 2,1. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,23, сухого 1,24; $Q_н^р$, МДж/м³: влажного 7,54, сухого 7,70.

Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,33 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *3* — энтальпия 1 м³ газа; *4* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0

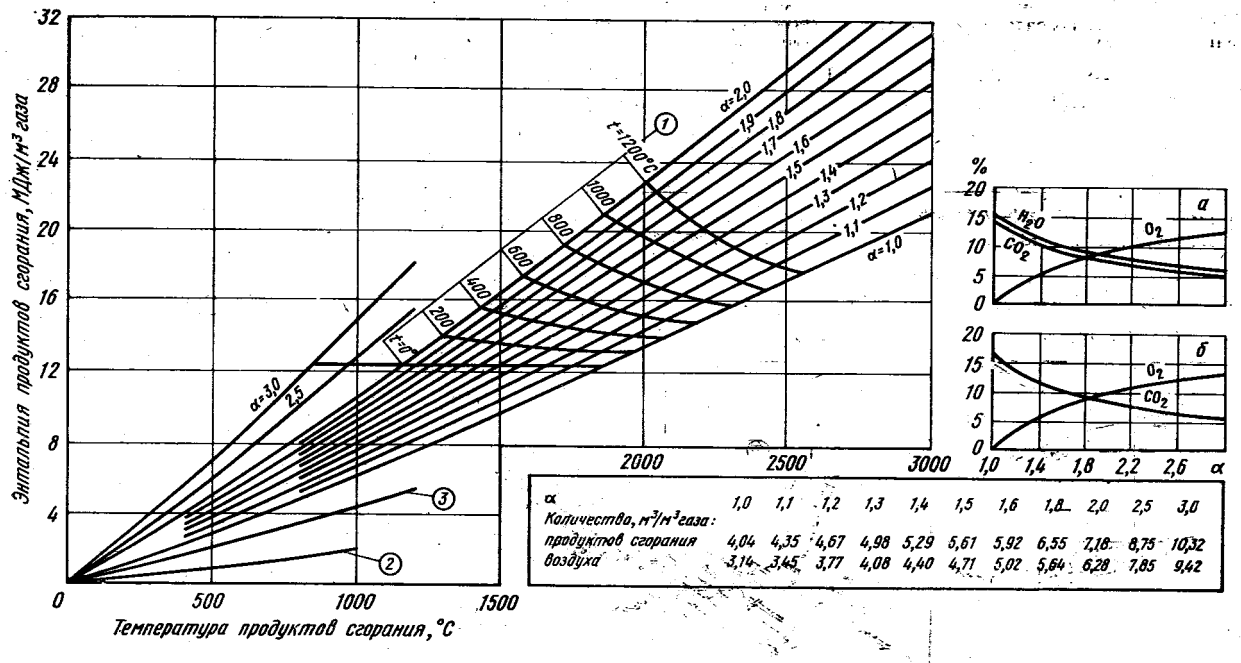


Рис. I-29. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 8,6; CO 9,1; H_2 1,7; CH_4 26,4; C_2H_6 0,2; C_3H_8 0,1; C_5H_{12} 0,1; N_2 41,9; H_2O 1,8. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,15, сухого 1,15; $Q^р_н$, МДж/м³: влажного 12,56, сухого 12,80.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,28 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания и зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³, при $\alpha=1,0$

17*

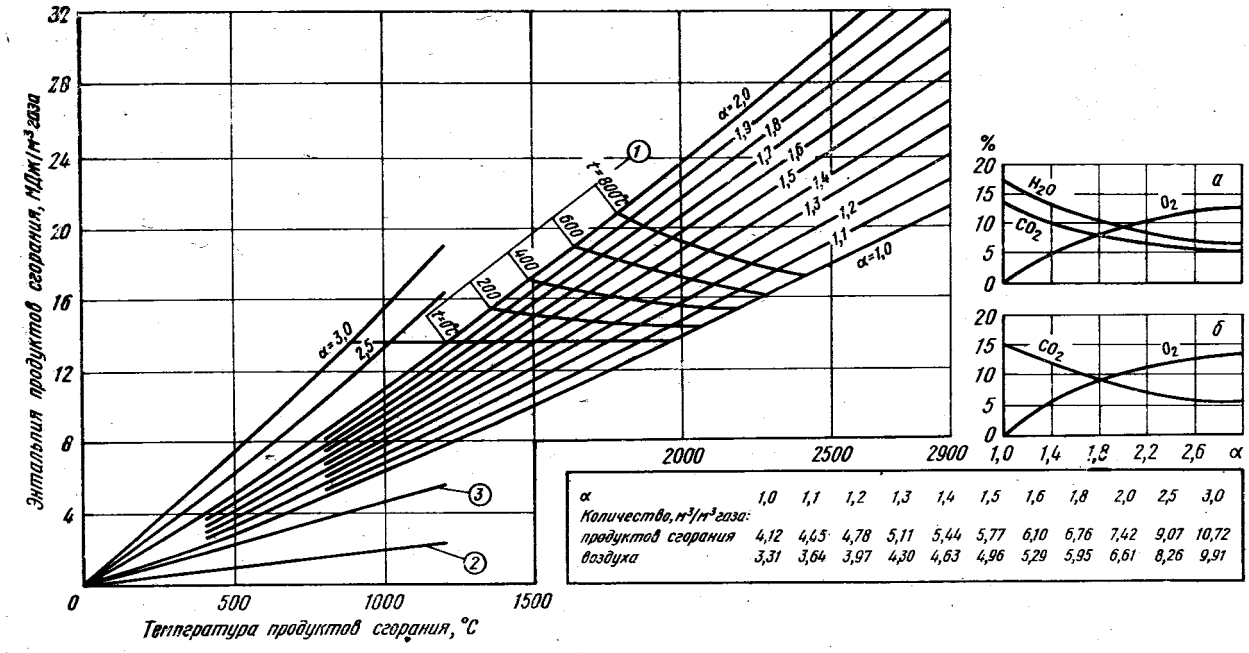


Рис. 1-30. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 10,0; CO 19,7; CH_4 18,5; C_2H_6 1,3; C_3H_8 1,2; C_4H_{10} 0,2; O_2 0,1; N_2 25,4; H_2S 0,1; H_2O 2,0. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,98, сухого 0,98; $Q^р_н$, МДж/м³: влажного газа 13,50, сухого 13,80.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,27 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа, при $\alpha=1,0$

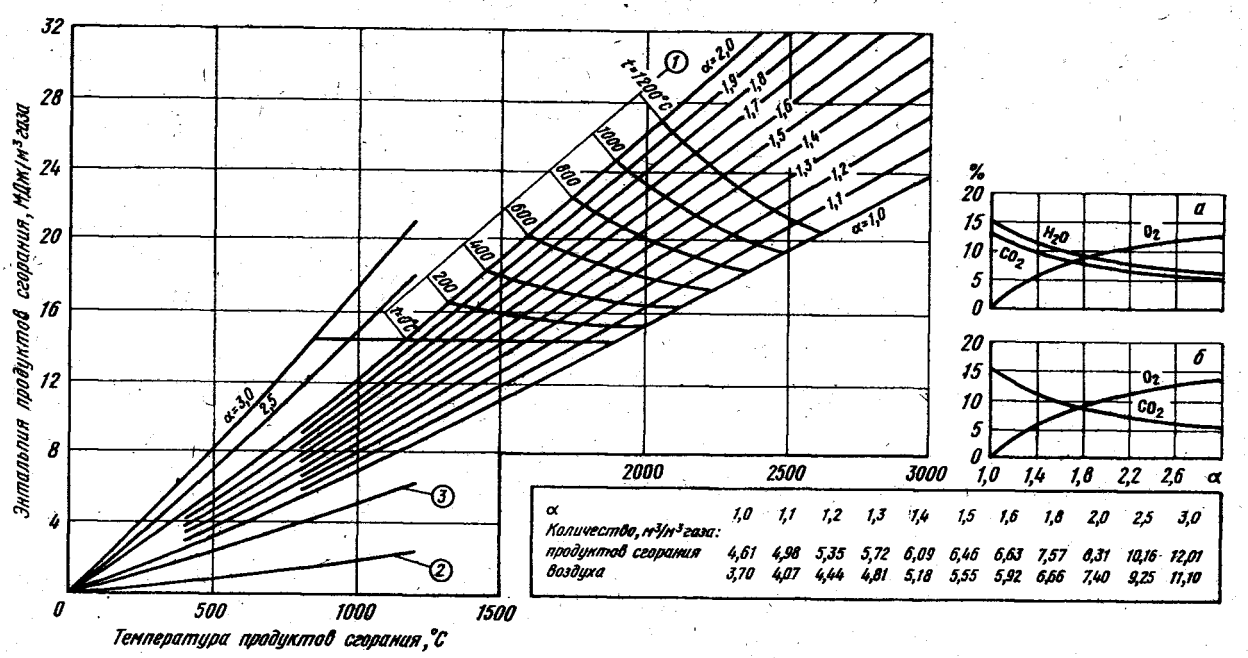


Рис. I-31. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 7,8; CO 17,3; CH_4 32,5; C_2H_6 0,2; C_3H_8 0,8; C_4H_{10} 0,2; C_5H_{12} 0,1; N_2 38,5; H_2O 1,7. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,11, сухого 1,12, $Q^р_н$, МДж/м³: влажного газа 14,65, сухого 15,00.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,27 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

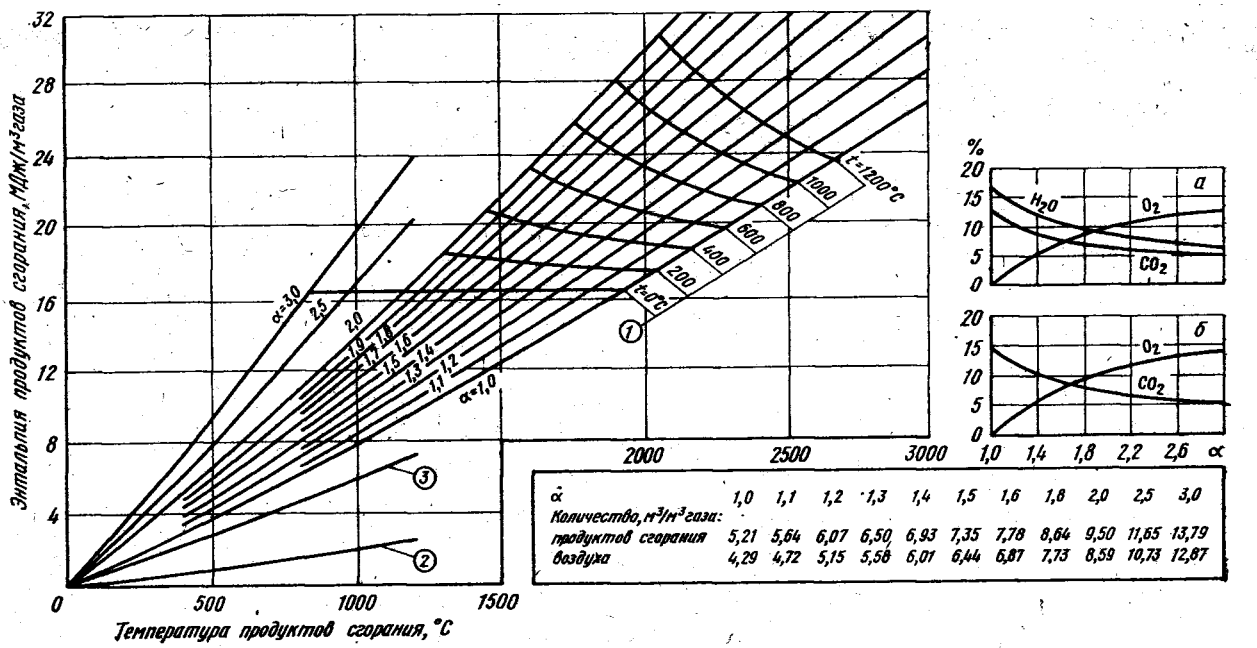


Рис. I-32. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 7,0; CO 15,5; H_2 1,4; CH 38,8; C_2H_5 0,3; C_3H_8 0,2; C_4H_{10} 0,2; N_2 35,0; H_2O 1,5. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,07, сухого 1,08; $Q^р_н$, МДж/м³: влажного газа 16,70, сухого 17,00.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,27 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

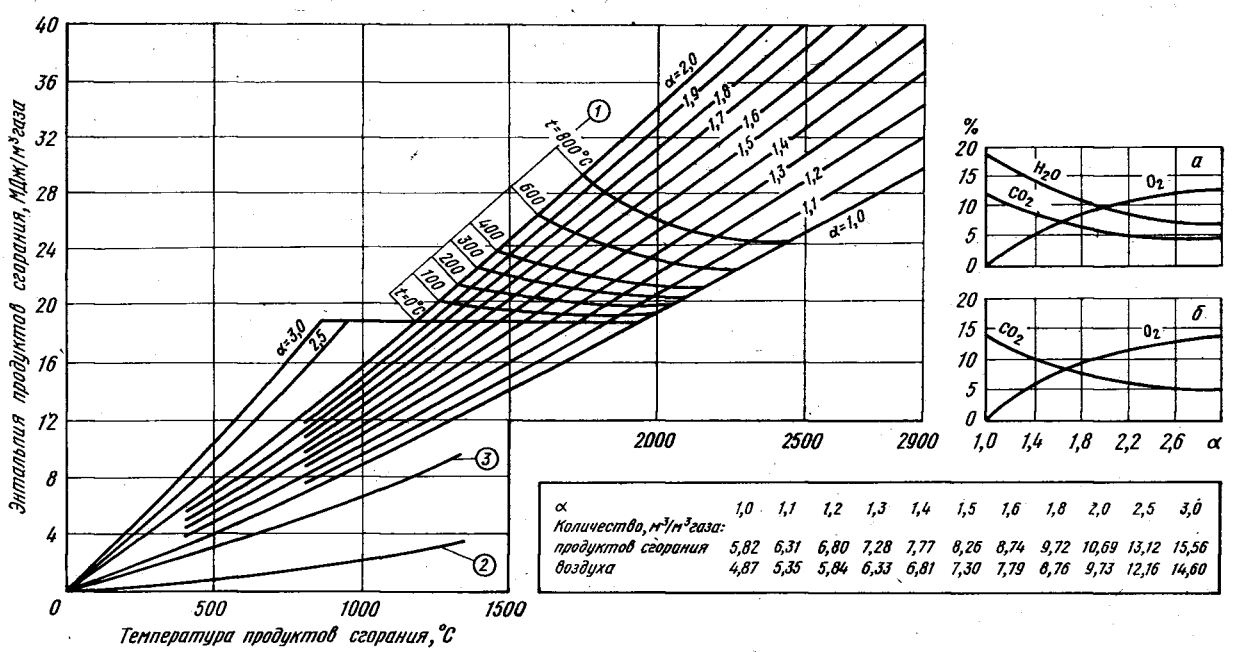


Рис. I-33. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 6,03; CO 13,30; H_2 1,2; CH_4 42,21; C_2H_6 1,78; C_3H_8 0,49; C_4H_{10} 0,25; C_5H_{12} 0,03; N_2 33,16; H_2O 1,55. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,06, сухого 1,06; $Q^р_н$, МДж/м³: влажного газа 18,80, сухого 19,20.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,26 кг/м³; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$

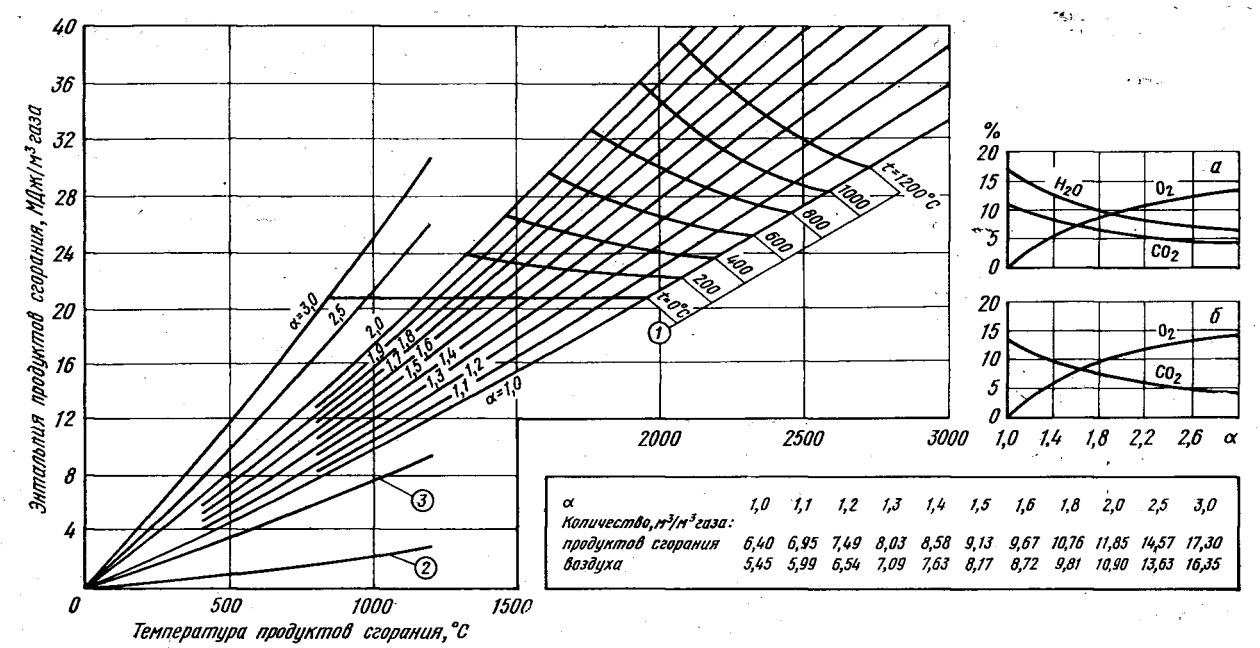
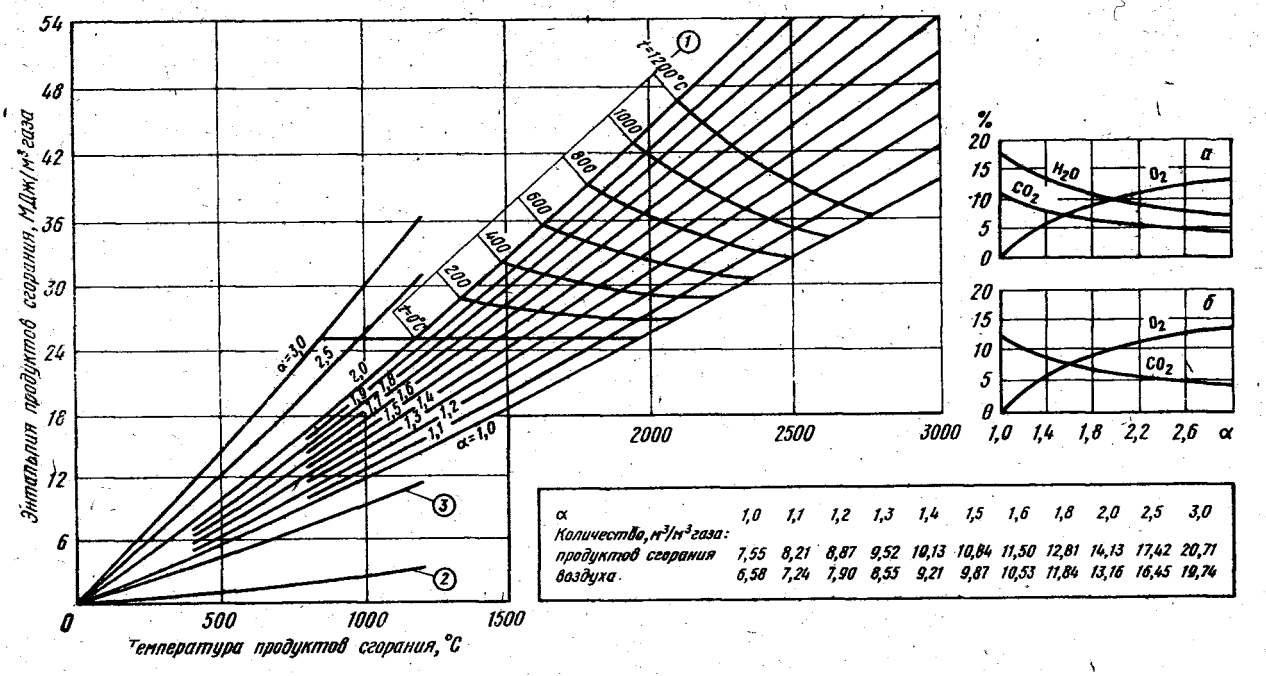


Рис. I-34. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 5,3; CO 11,9; H_2 1,1; CH_4 51,2; C_2H_6 0,4; C_3H_8 0,8; C_4H_{10} 0,3; C_5H_{12} 0,1; N_2 28,1; H_2O 1,3. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,00, сухого 1,01; $Q^р_н$, МДж/м³: влажного газа 21,00, сухого 21,30.

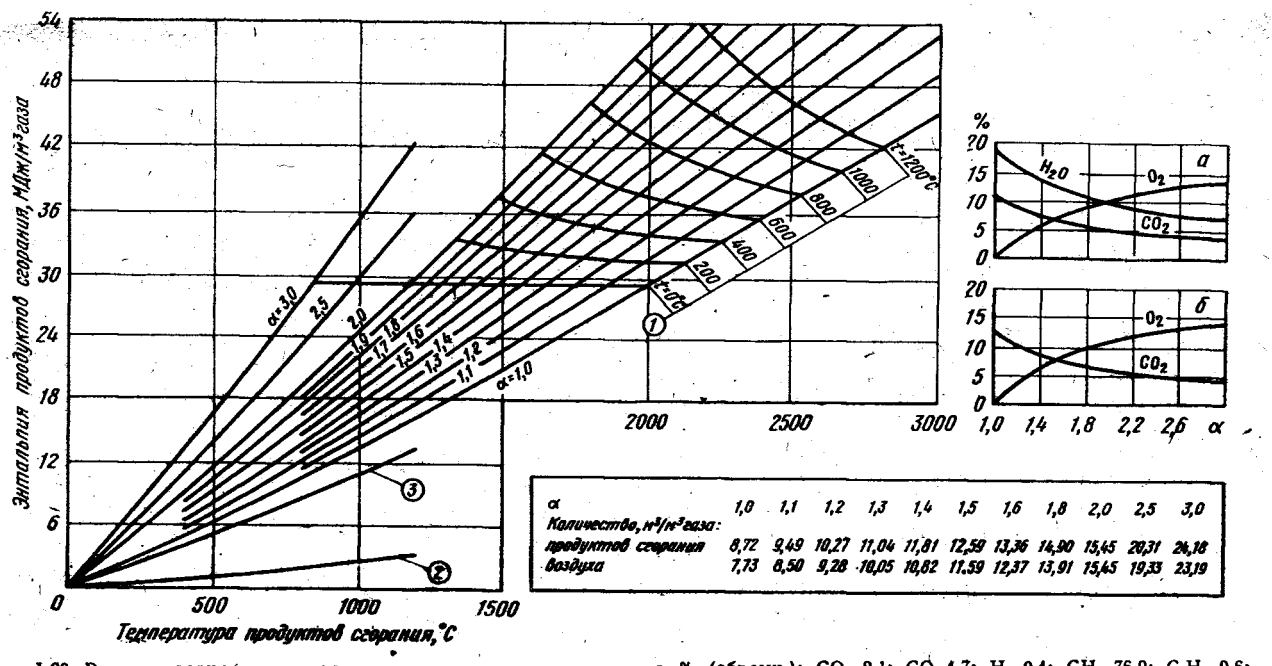
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,25 кг/м³ газа; состав, %: *а* — вдажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	7,55	8,21	8,87	9,52	10,13	10,84	11,50	12,81	14,13	17,42	20,71
воздуха	6,58	7,24	7,90	8,55	9,21	9,87	10,53	11,84	13,16	16,45	19,74

Рис. I-35. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 3,8; CO 8,3; H_2 0,8; CH_4 63,5; C_2H_6 0,5; C_3H_8 0,3; C_4H_{10} 0,3; C_5H_{12} 0,1; N_2 21,3; H_2O 1,1. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,93, сухого 0,94; $Q^P_н$, МДж/м³: влажного 25,12 сухого 25,25

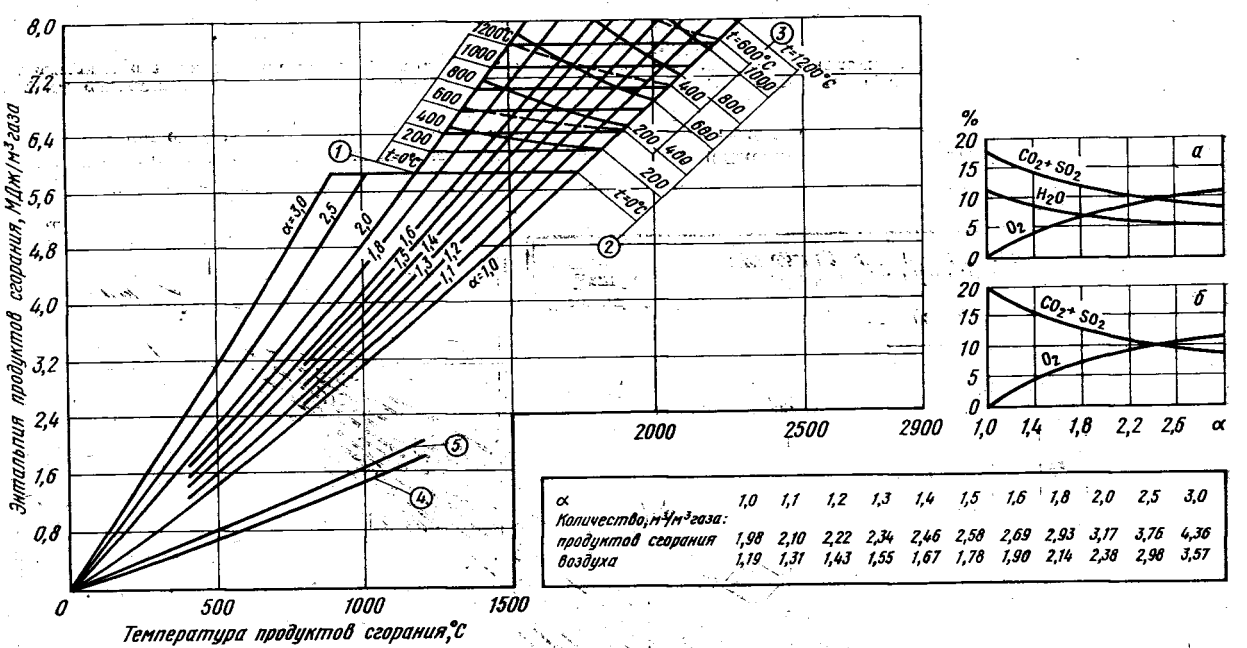
Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,24 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	8,72	9,49	10,27	11,04	11,81	12,59	13,36	14,90	15,45	20,31	26,18
воздуха	7,73	8,50	9,28	10,05	10,82	11,59	12,37	13,91	15,45	19,33	23,19

Рис. I-36. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 2,1; CO 4,7; H_2 0,4; CH_4 76,0; C_2H_6 0,6; C_3H_8 0,4; C_4H_{10} 0,4; C_5H_{12} 0,2; N_2 14,4; H_2O 0,8. Плотность газа, кг/м³: влажного 0,86, сухого 0,85; $Q^P_н$, МДж/м³: влажного газа 29,31, сухого 29,52

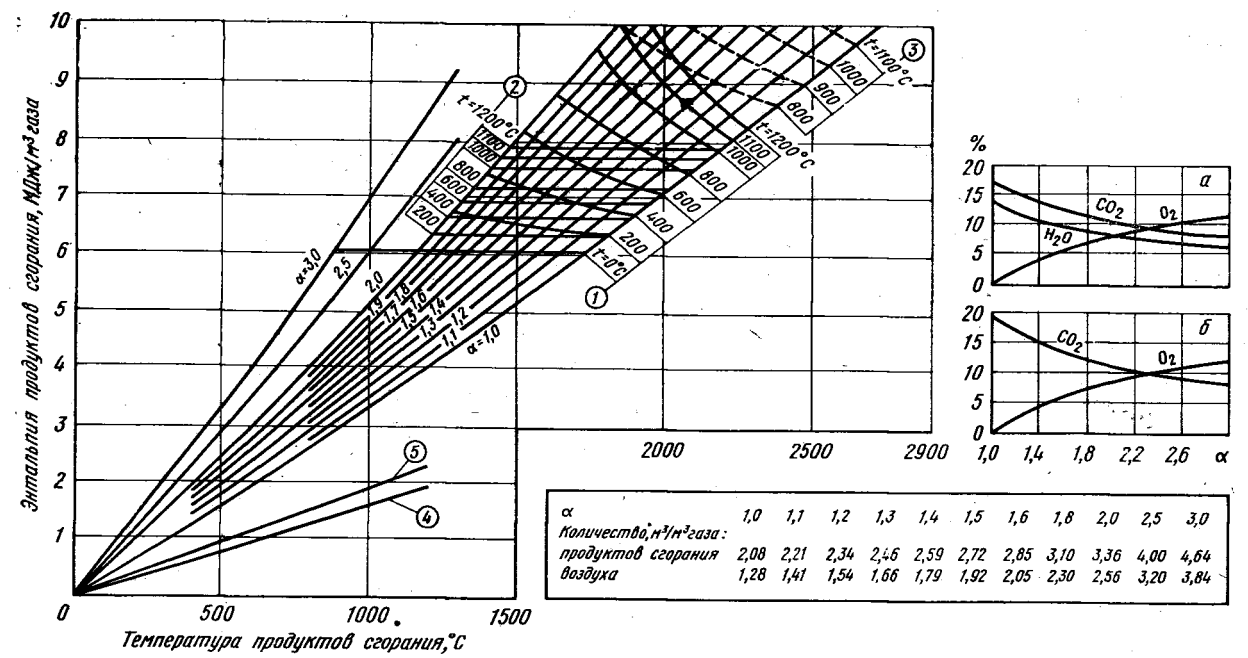
Продукты сгорания: плотность (при α=1,0) 1,24 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — энтальпия 1 м³ газа; *3* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при α=1,0



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	1,98	2,10	2,22	2,34	2,46	2,58	2,69	2,93	3,17	3,76	4,36
воздуха	1,19	1,31	1,43	1,55	1,67	1,78	1,90	2,14	2,38	2,98	3,57

Рис. I-37. Расчет горения генераторного газа состава, % (объемн.): CO_2 4,3; CO 28,3; H_2 12,9; CH_4 1,9; $C_m H_n$ 0,2; O_2 0,2; H_2S 0,1; N_2 47,9; H_2O 4,2. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,10, сухого 1,12; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного газа 5,82, сухого 6,07.

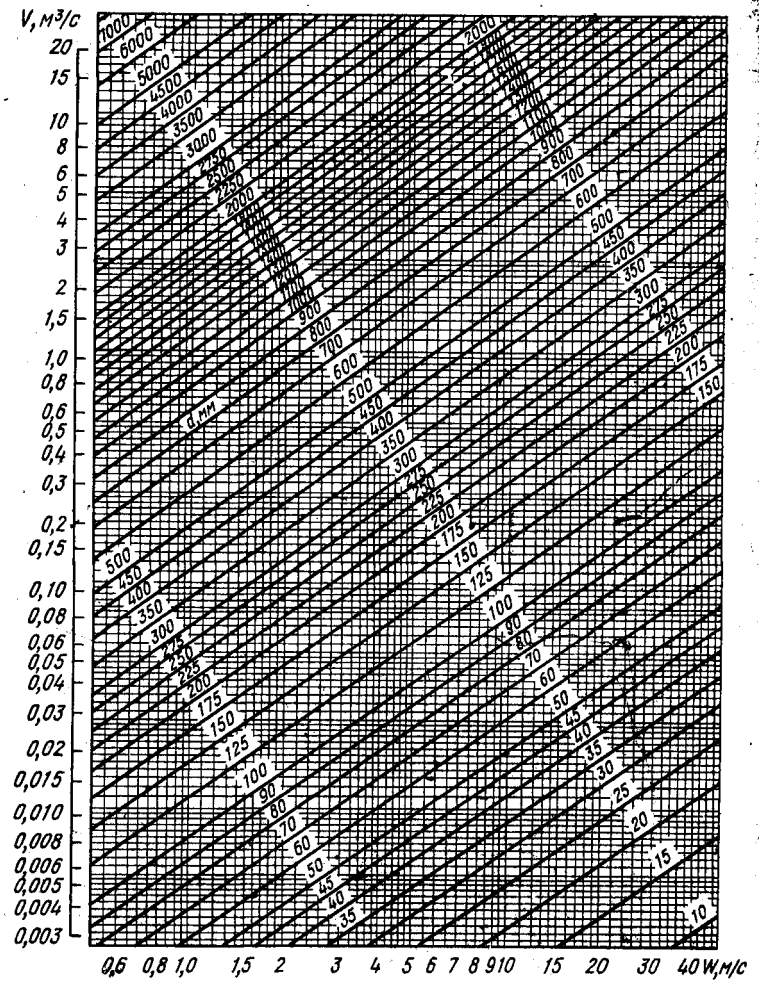
Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,33 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева газа; *2* — то же, от подогрева воздуха; *3* — то же, от подогрева газа и воздуха до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$ (содержание во влажных продуктах сгорания SO_2 0,02% при $\alpha=1,0$)



α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Количество, м³/м³ газа:											
продуктов сгорания	2,08	2,21	2,34	2,46	2,59	2,72	2,85	3,10	3,36	4,00	4,64
воздуха	1,28	1,41	1,54	1,66	1,79	1,92	2,05	2,30	2,56	3,20	3,84

Рис. I-38. Расчет горения смеси природного и доменного газов состава, % (объемн.): CO_2 8,5; CO 23,1; H_2 16,8; CH_4 2,9; $C_n H_m$ 0,4; O_2 0,2; N_2 43,8; H_2O 4,2. Плотность газа, кг/м³: влажного 1,03, сухого 1,10; $Q^p_н$, МДж/м³: влажного газа 6,07, сухого 6,32.

Продукты сгорания: плотность (при $\alpha=1,0$) 1,32 кг/м³ газа; состав, %: *а* — влажных; *б* — сухих; *1* — калориметрическая температура сгорания в зависимости от подогрева воздуха; *2* — то же, от подогрева газа; *3* — то же, от подогрева воздуха и газа до одинаковой температуры; *4* — энтальпия 1 м³ газа; *5* — энтальпия воздуха, идущего на сжигание 1 м³ газа при $\alpha=1,0$



Зависимость между количеством пропускаемого газа V, скоростью газа w и диаметром трубопровода d

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Аксельруд Л. Г., Сухов И. И., Тымчак В. М. Нагревательные колодцы. — М., Металлургиздат, 1962. 236 с.

Арсеев А. В. Сжигание природного газа. — М.: Металлургиздат, 1963. 407 с.

Белов И. В., Постников Ю. Д., Пестряев А. С. Высокоскоростная горелка полного сжигания топлива — В кн.: Теория и практика сжигания газа. Вып. VI. — Л.: Недра, 1975, с. 375—379.

Газовое оборудование, приборы и арматура (справочное руководство). 2-е изд./Под ред. Н. И. Рябцева. — М.: Недра, 1972. 520 с.

Гилод В, Я. Сжигание мазута в металлургических печах. — М.: Металлургия, 1973. 312 с.

Гончарова С. И., Гусовский В. Л., Спивак Э. И. Уточнение характеристик нормализованных дутьевых горелок конструкции Стальпроекта. — Проектирование металлургических печей. Тематич. отрасл. сб., № 7. М.: Металлургия, 1974, с. 43—46 с ил.

Гусовский В. Л., Звягина Е. В., Спивак Э. И., Тымчак В. М. Горелки с широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха. — Сб. трудов/Стальпроект, 1970. Вып. 8. М.: Металлургия, с. 7—85 с ил.

Гусовский В. Л., Иванова Н. И., Левин М. П. и др. Нормализованные дутьевые горелки Стальпроекта типа «труба в трубе» — Сб. трудов/Стальпроект. Вып. 7. М.: Металлургиздат, 1968, с. 55—63.

Гусовский В. Л., Иванова Н. И., Лифшиц А. Е. Типовые инжекционные горелки Стальпроекта. — Сб. трудов/Стальпроект, Вып. 2. М.: Металлургиздат, 1962, с. 78—87.

Гусовский В. А., Лифшиц А. Е., Тымчак В. М. Газогорелочные устройства нагревательных и термических печей. — Сб. трудов/Стальпроект, 1963. Вып. 3. М.: Металлургиздат, с. 65—75 с ил.

Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е., Тымчак В. М. Газогорелочные устройства и системы отопления нагревательных и термических печей. М.: Металлургия, 1967. 262 с.

Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е. Работа Стальпроекта по созданию и совершенствованию газогорелочных устройств и систем отопления печей — В кн.: Теория и практика сжигания газа. Вып. VI. — Л. Недра, 1975, с. 364—370.

Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е. Газогорелочные устройства и системы отопления нагревательных и термических печей черной металлургии — Реф. сб./ВНИИЭгазпром. Вып. I. Газовая промышленность. Серия: Использование газа в народном хозяйстве, М.: изд. ВНИИЭгазпром, 1979, с. I—II с ил.

Гусовский В. Л., Оркин Л. Г., Тымчак В. М. Методические печи. — М. Металлургия, 1970. 430 с.

Еринов А. Е., Семернин А. М. Промышленные печи с радиационными трубами. — М.: Металлургия, 1977. 280 с.

Еринов А. Е., Сороко Б. С. Рациональные методы сжигания газового топлива в нагревательных печах. — Киев: Техника, 1970. 252 с.

Именитов Б. Р. Инжекционные горелки для природного газа. — Сталь, 1947, № 9, с. 839—844.

Именитов Б. Р. Инжекционные горелки с подогревом газа и воздуха. — За экономию топлива, 1948, № 8, с. 12—18.

Именитов Б. Р. Применение низкокалорийного газа, сжигаемого в эжекционных горелках на подогретых воздухе и газе. — В кн.: Теория и практика сжигания газа. — Л.: Гостоптехиздат, 1958, с. 309.

Инжекционные горелки. Каталог-справочник/Стальпроект — М.: ГОСИНТИ, 1962. 27 с.
Карабин А. И., Раменская Е. С., Энно И. К. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. 2-е изд. — М.: Металлургия, 1966. 371 с.
Крейнин Е. В. Газовые радиационные трубы для металлургических печей. — Проектирование металлургических печей. Тематич. отраслевой сб. № 7. М.: Металлургия, 1979, с. 39—47 с ил.
Левин А. М. Принципы рационального сжигания газа. — Л., Недра, 1977. 246 с. с ил.
Михеев В. П., Медников Ю. П. Сжигание природного газа. — Л., Недра, 1975. 391 с. с ил.
Пестряев А. С., Белов И. В., Аптерман В. Н. и др. Газогорелочные блоки конструкции ВНИИМТ — Стальпроект. — Проектирование металлургических печей. Тематический отраслевой сборник № 7. М.: Металлургия, 1979, с. 47—52.
Петров Н. Ф. Газогорелочные устройства для нагревательных и термических печей. — Печи и сушила машиностроительной промышленности. Сб. трудов/Теплопроект. Вып. 31. М.: изд. Теплопроект, 1974, с. 21—34.
Петров Н. Ф. Пилотно-запальные устройства для горелок и форсунок — Сб. трудов/Теплопроект. Вып. 34. М.: изд. Теплопроект, 1974, с. 83—87.
Результаты государственных испытаний газогорелочных устройств.— Реф. сб./ВНИИЭгазпром. Использование газа в народном хозяйстве, 1973, вып. 12, с. 3—14; 1974, вып. 6, с. 3—15; 1976, вып. 10, с. 36—50; 1977, вып. 5, с. 16—32, вып. 6, с. 14—23; 1978, вып. 2, с. 26—38; вып. 5, с. 18—26, вып. 6, с. 22—43; вып. 10, с. 21—28; вып. 11, с. 20—34; вып. 12, с. 21—33; 1979, вып. 2, с. 24—35, вып. 4, с. 25—35; вып. 5, с. 27, вып. 6, с. 25—29, вып. 7, с. 29—34, вып. 9, с. 24.
Рогинский О. Г., Назаренко А. А. Государственные испытания горелочных устройств — действенное средство экономии газа. — Газовая промышленность, 1978, № 6, с. 41—46.
Спейшер В. А. Сжигание газа на электростанциях и в промышленности. 2-е изд. М.: Энергия, 1967. 251 с.
Справочник конструктора печей прокатного производства, т. 1 и 2. Под ред. В. М. Тымчака. — М.: Металлургия, 1970. 991 с.
Федоров Н. А. Техника и эффективность использования газа. — М.: Недра, 1975. 248 с.
Хесин М. Я., Кваша Н. В., Жирнов Ф. Г. — Автоматическое управление горелками мощных котлоагрегатов. М., Энергия, 1979. 112 с.
ГОСТ 17356—71. Газовые горелки. Термины и определения. — Введ. 01.07.72.
ГОСТ 17357—71. Горелки газовые. Классификация. — Введ. 01.07.72.
ГОСТ 5.739—77. Горелки беспламенные панельные типа ГБПш: Взамен ГОСТ 5.739—71. — Введ. 01.10.77. Срок действия до 01.10.80.
ГОСТ 21204—75. Горелки газовые. Общие технические требования. — Введ. 01.01.77; Срок действия до 01.01.82.
СТ СЭВ 1051—78. Горелки газовые промышленные общего назначения. Общие технические требования. — Срок начала применения в СССР 01.80.
СТ СЭВ 621—77. Горелки газовые промышленные общего назначения. Методы контрольных испытаний. — Срок начала применения в СССР 01.79.
ОСТ 51.59—79. Трубы радиационные тупиковые с рециркуляцией продуктов сгорания. Технические условия. Срок введения установлен с 01.01.1980 г. до 01.01.1985 г.

Воббе число низшее 203
Время защитного отключения подачи топлива:
при розжиге горелки 203
— погасании пламени горелки 203
Горелки:
без предварительного смешения 23, 24, 26
беспламенные панельные типа ГБПш 103
газо-мазутные 139
— типа ГКВГ 140
— типа ГКМГ—А 144
— типа ГМР ВНИИПромгаза 139
запальные 169
инжекционные (см. инжекционные горелки)
инжекционно-атмосферные типа ИА 106
классификация 21, 205
нагревательных колодцев 43, 44, 46
низкого давления типа ГНП для природного или сжиженного газа 47
общие требования к конструкции 22
— технические требования 225
плоскопламенные радиационные типа ГР 58
— типа ГПП 63
полного предварительного смешения для безокислительного нагрева 115
принципы изготовления 223
с излучающей чашей типа ГВИЧ 86
скоростные типа ГВ 113
с переменным избытком воздуха типа ПИВ 118
— постоянной длиной факела 56
— предварительным смешением 68
струйно-стабилизаторные типа СГ 116
с улучшенным смешением 42
— широким диапазоном изменения коэффициента расхода воздуха типа ДШ 39
термины, понятия и определения 203
типа «труба в трубе» 28—32
турбулентные для газов с низкой теплотой сгорания типа ГТН 52
электрозапальные 174
Давление номинальное перед газовой горелкой:
воздуха 203
газа 203
Зависимость между количеством пропускаемого газа, скоростью газа и диаметром трубопровода 268
Запальники переносные:
Ленгипроинжпроекта 169
— инжекционные однофакельные 170, 173
— — многофакельные 170, 173
— двухпроводные однофакельные 171, 173
инжекционные типа ИПЗ Мосгазпроекта 172
Инжекционные горелки 71, 83, 84
— — типа В и ВП выбор 98
— — типа Н 85, 89, 90
— — типа П 92, 94, 96, 97
— —, характеристика при оптимальных размерах 80
Инжекционные двухпроводные смесители 108
Испытания контрольные:
горелок 100, 220
радиационных труб 217
Коэффициент предельного регулирования газовой горелки 203
— рабочего регулирования газовой горелки 203, 224
— расхода воздуха минимально необходимый 203, 224
Мощность тепловая 203
Нагревательные колодцы с отоплением из центра подины 12
— — — — одной верхней горелкой 12
Огнеупорные горелочные блоки для горелок:
инжекционных с диаметром

носика до 100 мм 197
— крупных 198
типа ГНП 193
— ГПП 195
— ГР 194
— ДВС и ДНС 190
— ДВБ и ДНБ 187
Огнеупорные горелочные туннели 186
— — — для инжекционных горелок, рекомендуемые размеры 197
Печи высокотемпературные нагревательные:
проходные 13
с шагающими балками 14
— шагающим подом 14
толкательные методические 14
Печи для термической обработки:
камерные 19
колпаковые 19
конвективного нагрева 18
проходные и протяжные 16
садочные 19
с выдвижным подом 19
— рециркуляцией продуктов сгорания 17
— роликовым подом 17
струйного нагрева 17
с шагающими балками 17
Пилотно-запальное устройство ПЗУ-1 Теплопроекта 174
Пилотно-защитное устройство ПЗУ Теплопроекта 174
Радиационные трубы 147
— — тупиковые типа ТРР 153, 154, 156, 160
— — тупиковые типа ТРТ 147, 149, 150, 151
U-образные с горелкой ВНИИМТ — Стальпроект 161
— — — — — горелка 165
— — — — — рекуператор 165
— — — — — пропускная способность 168
— типа ТРУ 168
W-образные 168
Расчеты горения:
генераторного газа 266
доменного газа 231—233
коксового газа 246
мазута 230
попутного нефтяного газа 255
природного газа 249—254
смеси доменного и коксового газов 234—244
— природного и доменного газов 257—265, 267
— природного и коксового газов 247, 248
— пропан-бутан 256
Системы зажигания 169
— отопления печей 9
Сжигание газа 20
— мазута 120
Скорость проскока пламени 79
Степень стеснения 204
— экранирования 204
Требования безопасности 184
— технические 224
Условия технические 223
Устройства:
запально-защитные 169
— типа ЗЗУ завода «Ильмарине» 176
запальные 169
контроля пламени 169
Форсунки 120
— высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД 129
— — — короткофакельные системы Карабина типа ФК 131
— — — размещение в газовых горелках 139
— — — расчет
— низкого давления конструкции Стальпроекта 135
Форсуночные коробки 130
Электрозапальник ЭЗ газовый завода «Старорусприбор»:
контрольный электрод типа КЭ 183
устройство 181
фотодатчик типа ФД 184