Библиотека СОК



ББК 38.762.3
Л 61
УДК 697.91.93.97

Липа А.И.

Л 61 Кондиционирование воздуха. Основы теории.
Современные технологии обработки воздуха.
Изд. второе, перераб., доп., Одесса: ОГАХ,
Издательство: «Издательство ВМВ", 2010. – 607 с., ил.

ISBN 978-966-413-146-6

Изложены теоретические основы кондиционирования, базирующиеся на термодинамике влажного воздуха. Рассмотрены типичные процессы и аппараты термовлажностной обработки воздуха. Приведены схемные решения и проанализированы новые технологии осушения, увлажнения, испарительного охлаждения воздуха и теплоутилизации. Показано построение процессов в диаграммах влажного воздуха. Приведены сведения о приборах измерения влажности. Освещены вопросы истории. Обсуждены проблемы и тенденции развития кондиционеростроения, задачи и требования к специалистам.

Для студентов, аспирантов, научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области кондиционирования воздуха, а также для специалистов смежных профессий.

ББК 38.762.3

Рецензенты: *д.т.н., профессор Чепурненко В.П.*
д.т.н., профессор Морозюк Т. В.
Dr. (Ph.D.), professor E. Sikorski

ISBN 978-966-413-146-6

© А.И. Липа, 2010



Первое издание книги вышло в 2002 году
к 100-летию кондиционеростроения
и 80-летию Одесской государственной академии холода

по решению Ученого Совета
Одесской государственной академии холода
от 10 октября 2002 г.

моей семье за понимание и терпение...

Слова благодарности

Прежде всего, считаю своим долгом выразить глубокую признательность тем людям, которые помогали мне в получении необходимой информации по интересующим меня вопросам истории и развития кондиционирования воздуха, новым технологиям и технике:



г-же Susanne Mannerstam (Munters AB, Sollentuna, Sweden) и г-ну Серафимову В.К. – представителю компании Munters в России (Санкт-Петербург), г-же Elena Hjoberg (Swegon, Kvanum, Sweden), г-же Sofia Malmer (Seibu Giken DST AB, Spanga, Sweden), г-ну Rene L. Jones (Zeochem, Louisville, USA), г-ну Taro Tokuoka (H. Ikeuchi & Co., Ltd, Osaka, Japan), г-же Laura Galvani (Carel SpA, Brugine (Padova) Italy), г-ну Slawomir Bielak – представителю компании Klingenburg (Germany) в Польше (Swidnica), г-ну Jack Ylagan (CCI Thermal Technologies Inc., Edmonton, Canada), г-ну Hanam Silbermann (Pelmar Engineering Ltd, Scarborough, Canada), г-ну James Tattersall (S&P Coil Products Ltd, Leicester, Great Britain), г-ну Ron Wysk (Aspen Compressor, LLC, Marlborough, Great Britain), г-ну Frank Struijk и г-же Moira Booth (Michell Instruments Limited, Cambridgeshire, Great Britain), г-ну Kristian Melquiades (Asia Pacific Emerson Network Power, Hong Kong), г-ну Рубцову Д.Е. – коммерческому директору компании Трейлмакс-Украина (Киев), г-ну Чиликину А.И. – директору Тамбовского областного краеведческого музея (Россия); а также моему ученику г-ну Hani Safar (American Breeze Corp., Middle East Office L.L.C., Dubai, U.A.E.).

Особые слова благодарности Игорю Вячеславовичу Батырю – директору предприятия «Промавтоматика БС», Кременчуг, Анатолию Николаевичу Боцу – директору ООО «ПИК Энергоинвест», Одесса, Евгению Петровичу Демьяненко – директору ООО «Клондайк Инжиниринг», Киев, Александру Алексеевичу Дубчаку – директору ООО «Олвиа», Одесса: за многолетнюю дружбу и оказание спонсорской помощи в издании книги, без чей поддержки этот проект был бы несостоятельным.

автор

« I cannot live without books»
Thomas Jefferson, 1815

Авторское вступление ко второму изданию

Второе издание книги приурочено к 88-ой годовщине со дня основания Одесской государственной академии холода, с которой автора связывает 40 лет жизни, вместившие в себя учебу, научный и преподавательский опыт, любовь к специальности, а также желание поделиться с читателем приобретенными знаниями в области кондиционирования воздуха.

Само название книги «Кондиционирование воздуха. Основы теории. Современные технологии обработки воздуха» предполагает постоянное обновление материала в части технологий (процессов и аппаратов) кондиционирования воздуха.

Со времени выхода в свет первого издания прошло 7 лет. За это время создано немало нового. Все, что привлекло мое внимание в результате непрерывного просмотра периодической научно-технической литературы, поиска в сети "Internet", общения с коллегами на различных конференциях, переписки со специалистами ведущих компаний-производителей климатической техники, регулярных посещений лучших международных выставок, таких как MOSTRA CONVEGNO EXPOCOMFORT (Милан), TERMOIDRAULICA CLIMA (Падуя), SHK (Москва), ISK-SODEX (Стамбул), AQUATHERM (Прага, Киев) и др., использовано в новом издании.

Существенно переработана первая часть книги. Здесь нужно отметить, что обратная связь с читателями и студентами позволила взглянуть на привычный материал по-новому. После опубликования книги, а также в последующем ее тиражирования в журнале «М+Т» в 2003 г. (№№ 7, 8) и 2004 г. (№№ 1...9), я получил множество писем, которые помогли мне дополнить теоретическую часть, дать расширение иллюстративного материала. Появилась возможность представить оригинальный взгляд Рихарда Молье по процессам термовлажностной обработки воздуха в диаграмме влажного воздуха. Я не смог пройти мимо гения Леонардо да Винчи и его кодекса «Атлантикус», в котором собраны инженерные изобретения великого итальянца. Меня заинтересовали сведения о традиционных безмашинных способах Среднего Востока по созданию микроклимата, а именно действующие устройства в условиях сухого и жаркого климата г. Yazd и влажного и жаркого климата г. Abarghu в Иране. Очень познавательным оказалось отношение к воде и воздуху (системе «влажный воздух») древних цивилизаций, вследствие чего в книге проявилось обращение к древнеегипетской мифологии. Поучительны строки из Святых писаний мировых религий, в частности, упоминание в Коране об источнике воды (фонтане) «сельсебиль», – одном из первых устройств испарительного охлаждения, который применяется и в наши дни.

Не буду перечислять все то, что, на мой взгляд, удалось сделать. Надеюсь, что каждый, кто откроет эту книгу, ее прочитает и найдет для себя новый материал.

В свое время выдающийся американский ученый и государственный деятель Томас Джефферсон, один из авторов Декларации Независимости и Конституции США, сказал: «Я не могу жить без книг». Эти слова, на мой взгляд, могут служить девизом интеллигентного образованного человека.

Любая книга, если она написана специалистом, представляет собой ценность. поскольку несет в себе обширную информацию по заявленному предмету, а также рекомендации автора. При этом мы получаем пищу для ума, ответы на нерешенные вопросы. Книга заставляет нас думать, понимать и сомневаться, искать и находить верное решение, а это есть не что иное, как путь к самосовершенствованию. Иногда ценность книги определяется всего лишь одной строкой, одним словом...*

С пожеланием прочитать много книг, читать постоянно
и получать при этом радость познания

** ценность книги для конкретного индивидуума может быть очевидной либо сомнительной: все зависит от соотношения уровней знания автора и читателя*

Отзыв ко второму изданию

Новое (второе) издание книги А.И.Липы, являясь стереотипным, существенно переработано и дополнено.

Автор остался верен себе, следуя замечанию Петра Леонидовича Капицы (см. предисловие) о важности понимания не только изучаемого предмета, но и того, как «делается физика, как она создавалась». Большой интерес вызывают сведения о всех технологиях обработки воздуха, имеющих природное начало, в частности, принцип пассивного испарительного охлаждения PDEC-passive downdraught evaporative cooling, рассмотренный в исторической ретроспективе. Такое же отношение и к материалу новой главы «Гигрометрия»: о приборах измерения влажности воздуха и о тех, кто их создавал, с таким блестящим рядом имен, как Леонардо да Винчи, Гораций Бенедикт де Соссюр, Джон Фредерик Даниель и др.

Расширена информация об аппаратах термовлажностной обработки воздуха и теплоутилизации, в т.ч. приведены данные по новым рабочим поверхностям воздухоохладителей; подробно рассмотрена аппаратура увлажнения и осушения воздуха, отмечены области их применения; показаны современные типовые схемные решения. В списке литературных источников более 300 наименований книг, научных статей, материалов последних международных конференций.

Техническая книга, прежде всего, – носитель информации, ценность которой определяется степенью ее использования (после прочтения) в инженерной практике. При этом важно, когда книга (научно-техническое издание) по своему наполнению в состоянии стимулировать творческий процесс, способна стать для кого-то катализатором новых идей, изобретений и, возможно, открытий (пусть даже только собственных). Если же книга является еще и учебным пособием, то она должна быть интересна достаточно широкому кругу читателей с различным уровнем подготовки. Естественно, что требования к ней значительно возрастают, поскольку при этом должна быть решена довольно сложная задача: привить интерес к предмету и аккуратно передать знания. Настоящее издание обладает указанным сочетанием.

Книга содержит обширный общеобразовательный материал об атмосфере Земли, воде и воздухе, термических и калорических свойствах влажного воздуха и водяного пара, кинетике процессов тепло- и массопереноса, особенностях процессов сорбции, обратном пьезоэлектрическом эффекте, магнитострикции и др., прекрасно иллюстрирована. Без сомнения, она будет полезна всем, кто начинает изучать основы кондиционирования воздуха, а также тем, кто имеет специальное образование.

Вице-президент Украинского отделения Международной академии холода,
заслуженный деятель науки и техники Украины,
д.т.н., профессор *В.П. Чепурненко*

Профессор морской академии г. Щецин (ПНР),
д.т.н., профессор *Т.В. Морозюк*

Одесса – Щецин
2010

Отзыв ко второму изданию

Внимательно прочитала новую версию книги А.И.Липы, подготовленную ко второму изданию. Прочитала все, начиная от авторского вступления. Все интересно!

На ум приходят слова:

"We especially need imagination in science.
It is not all mathematics, nor all logic, but is somewhat beauty and poetry".

Maria Mitchell

«В науке мы особенно нуждаемся в воображении.
Это не только математика и логика, но и красота и поэзия».

Эти строки принадлежат крупнейшему американскому ученому-астроному XIX столетия Марии Митчелл. И они, на мой взгляд, вполне уместны в качестве эпиграфа к данной книге.

Автору удалось выстроить красивый и прочный мост от базовых знаний к современным технологиям кондиционирования воздуха. При этом значительный объем информации воспринимается легко. Многочисленные иллюстрации не являются чрезмерными, поскольку несут определенную смысловую нагрузку и, зачастую, заменяя текст, привлекают внимание читателя к тому либо иному явлению, процессу, устройству. Не каждая иллюстрация имеет подробное описание. Автор как бы предлагает остановиться и самостоятельно осмыслить новую информацию. Такая клиповая манера изложения – удачный прием в написании учебного пособия для широкого круга читателей.

Автор часто обращается за советом к великим людям, оставившим глубокий след в истории, науке, культуре. Это Джефферсон и Черчилль, Капица и Кэрриер, Гетте и Писарев и др.

Думаю, что эта книга может стать «настольной» для начинающих и, безусловно, вызовет интерес у специалистов.

Нельзя не согласиться с тем, что поставленная цель – анализ и описание современных технологий обработки воздуха, – требует постоянного обновления. А это очень не простая задача! Стремительный прогресс в области кондиционирования воздуха впечатляет. С добавлением к современным технологиям приставки «нано» нас ожидает в XXI веке очередная техническая революция.

Не могу отказать себе в удовольствии привести по этому поводу постулат знаменитого научного фантаста, английского физика, сэра Артура Чарльза Кларка:

"Any sufficiency advanced technology is indistinguishable from magic".

Sir Arthur Ch. Clarke

«Любая передовая технология неотличима от волшебства»

Пусть это волшебство состоится...,

профессор университета прикладных наук г. Оффенбург (ФРГ),
Hochshule Offenburg, University of Applied Sciences,
Federal Republic of Germany, Dr. (Ph.D.), Prof. *E. Sikorski*

Оффенбург (Баден)
2010

Air Conditioning

- the life-changing technology -

-Is one of the Greatest Engineering Achievements of the 20th Century

Кондиционирование Воздуха признано Американской национальной инженерной академией (NAE) одной из самых значительных технологий XX века:
10 место в общем списке 105 технологий, номинированных на звание «технология века».

В заявлении NAE сказано: «Кондиционирование воздуха и холодильные технологии сегодня являются совершенно обычными и широко применяемыми технологиями (commonplace technologies), но их появление в свое время привело к резкому (скачкообразному) повышению производительности труда рабочих и экономики городов»;
«...эти технологии позволили обеспечить комфортные условия жизни и труда, эффективную работу людей в странах и регионах со знойным и душным климатом, оказали глубокое влияние на распределение и хранение продуктов питания, обеспечили условия для стабильной работы чувствительных компонентов, составляющих основу информационных технологий».

ПРЕДИСЛОВИЕ

Приветствую всех, кто решил связать свое будущее с холодильной техникой, и особенно тех, кто будет специализироваться в области кондиционирования воздуха. Вы сделали правильный выбор!

Сегодня – это одна из наиболее перспективных профессий. Быстро развивающийся рынок кондиционеров гарантирует востребование специалистов на рынке труда.

Для сведения, мировой объем продаж кондиционеров неуклонно возрастает: от 41,9 млн. установок в 2000 году до 68,7 млн. ед. в 2008 году (по данным Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association). Европейский рынок оценивается 7-процентной долей глобального объема.



Предлагаемое вашему вниманию издание посвящено основам кондиционирования воздуха, и, я надеюсь, поможет заинтересованному читателю уверенно сделать первый шаг.

Как изучать предмет? Какое место занимают в этом процессе лекции, практические занятия, лабораторные работы? Ответы на поставленные вопросы можно найти в советах *Петра Леонидовича Капицы* – замечательного ученого, одного из основателей физики низких температур, лауреата Нобелевской премии, ученика и друга Эрнеста Резерфорда, инженера и педагога, – данных им студентам МГУ на вступительной лекции в 1947 году:

1. *«Самостоятельное изучение физики по книге вы должны рассматривать как свою основную работу. Лекции, упражнения, практикумы будут вам только помогать. Лектор излагает материал по-своему, излагает свою точку зрения: он читает вам лекции по небольшим запискам, может многое упустить. Он может дать общее представление, но большей частью он не может точно изложить предмет. Это может быть сделано только в учебнике. Поэтому из лекций вы можете вынести только общее впечатление о предмете, и очень трудно по лекциям изучать предмет, чтобы полностью его освоить. Упражнения и практикумы будут служить лучшим методом проверки полученных знаний, и на них вы должны смотреть как на способ*

проверки ваших знаний. Если вы умеете решать задачи, умеете вычислять, умеете проводить эксперимент и понимать его, значит, вы понимаете этот отдел физики».

2. *«...надо не только понимать физику и законы физики, а надо понять, как делается физика, как она создавалась, какова роль эксперимента, какова роль теории, какова роль математики. Все это вам надлежит понять, чтобы потом уметь самим работать в этой области».*

3. *«Как читать книгу, как в ней разбираться?...Надо сперва прочесть данную главу быстро, не останавливаясь на непонятных вещах, стремясь схватить общий смысл. Когда вы его схватили, тогда вы внимательно вчитываетесь во все детали вопроса. Не следует читать так: не понял и остановился. Это не страшно – не понял сейчас, дойдет потом. Читай дальше. Когда второй раз будешь читать, для тебя легче будут эти непонятные места, они обычно приобретают другой смысл и становятся более понятными. Даже если целые главы трудны, непонятны, их временно можно оставить, отложить, перейти к другой главе, а затем совершенно неожиданно из другого вопроса вы можете получить освещение предыдущего. Если отдельные вопросы непонятны в одной книге, поищите в другой книге, другое – по другой».*

4. *«...вам следует подбирать учебники по своему вкусу. Разные авторы пишут учебники, излагая предмет таким путем, каким он понятен им самим. Так, некоторые из них больше уделяют внимания экспериментам, некоторые – больше математике, другие больше уделяют внимания связи теории с опытом. Вам надлежит подобрать себе тот учебник, который вам больше всего по душе, который больше всего нравится. Таким образом, это будет тот учебник, автор которого мыслит примерно так же, как вы мыслите» [38].*

Я очень рассчитываю на то, что данное издание книги поможет вам найти «свой учебник».

В книге достаточно много исторических ссылок (это наши «корни»), уважительное отношение к экспериментальному материалу (это критерий истины). С привычными для нас терминами параллельно вводится их англоязычный вариант (это сделано в связи с насыщением рынка различной зарубежной техникой и неизбежностью интегрирования в европейское и мировое сообщество). Рассмотрены традиционные и современные технологии обработки воздуха, новые функциональные возможности оборудования.

В приложения помещены: справочные данные по свойствам влажного воздуха; информация об американской психрометрической диаграмме; сведения о климате стран мира; биографические очерки, посвященные выдающимся личностям (ученым и инженерам), внесшим существенный вклад в развитие теории и практики кондиционирования.

В книге Вы также найдете адреса веб-сайтов ведущих мировых компаний, научно-исследовательских институтов, национальных лабораторий в информационной сети “Internet”, к которым обязательно следует обращаться. Используйте также возможности различных информационных и образовательных сайтов для получения информационных бюллетеней и писем (newsletters), в т.ч. Global Spec. – The Engineering Search Engine (The Engineering Web) – крупнейшей информационной системе и базе данных в области инженерии, раздел Техника (устройства и технологии).

«Познание начинается с удивления»
Аристотель

1. ВВЕДЕНИЕ

Во введение помещены исторические сведения, обсуждены новые направления развития, сформулированы задачи, стоящие перед специалистами, показаны возможности трудоустройства, приведена информация о профессиональных объединениях, рассмотрены климатические условия, в которых могут находиться объекты кондиционирования.

1.1. ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Человек всегда приспосабливался к окружающему миру, и в доисторическое время, находясь в пещере, защищал себя не только от врагов (хищников и себе подобных), но и от ветра, дождя, снега, солнца и других климатических нагрузок. Выйдя из пещеры, человек строит себе жилище сообразно климату местности, создает простейшие защитные средства*: тенты, зонты, опахала, веера.





Скальные пещеры (Шотландия)

Подземные жилища (Тунис)



Тент бедуинов, пустыня (Марокко)

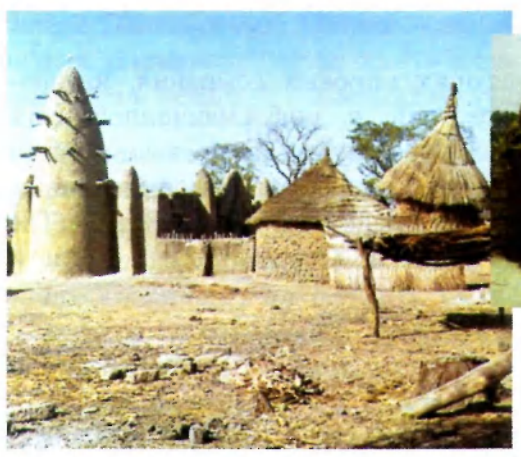
Во влажном тропическом климате жилища, как правило, строились из натуральных материалов (дерева, бамбука, травы) с наклонной крышей, открытым чердаком и приподнятым полом на столбах (pillar).





Дома, типичные для индонезийской и японской архитектуры

В тропической Африке жилые постройки были без окон, либо с окнами, обеспечивающими минимальное проникновение рассеянного света.





Африканские дома

(эти конструкции снижают теплопритоки от солнечной радиации)

*подобные устройства древнего Египта см. на с.11

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

"We should make things as simple as possible, but not simpler",
Albert Einstein

Устройства древнего Египта

Во времена фараонов использовались опахала, имевшие различную форму: цветка лотоса, пальмовой ветви, крыла птицы или раскрытого оперения павлина.





Опахала фараонов





Известный английский археолог Говард Картер, обнаруживший в 1922 г. захоронение фараона Тутанхамона (Tutankhamun), нашел там множество предметов, в т.ч. опахало и тент фараона.

Древко с полукруглым основанием опахала, напоминающим лист пальмы, из черного дерева (эбонита), покрытое листовым золотом прекрасно сохранилось. В обрамлении основания были видны остатки 30 перьев страуса белых и коричневых, чередующихся по цвету. Длина опахала без перьев около 4 футов (1,2 м). На поверхности основания четко прослеживался рисунок с сюжетом охоты фараона на страуса.

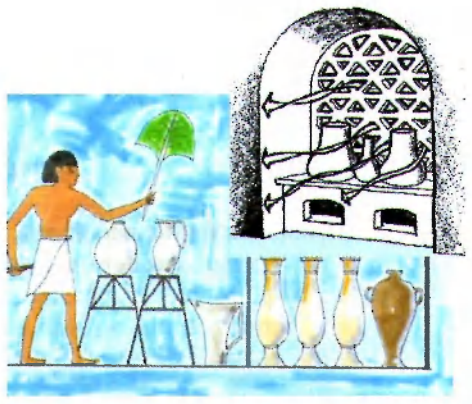
Тент Тутанхамона был выполнен очень искусно. Четыре позолоченных деревянных опоры высотой 201 см поддерживали механическое устройство в форме цветка лотоса, каркас которого был составлен из медных стержней на шарнирах, с помощью которых происходило натяжение ткани балдахина тента.

Ткань того времени также поражает: некоторые из предметов одежды, сохранившиеся в саркофаге Тутанхамона, обладали 220 пересечениями нитей на квадратный дюйм (современная льняная тентовая ткань – не более 100).



Тент Тутанхамона

В странах с сухим и жарким климатом для снятия тепловой нагрузки жилищ издревле использовались различные способы испарительного охлаждения. Фресковая живопись Египта, датируемая 2500 годом до н. э., изображает рабов, обмахивающих опахалами пористые кувшины с водой, дабы вода не нагревалась. Для охлаждения воздуха кувшины устанавливались у окна. Возникнув в Египте, пассивное испарительное охлаждение с естественной тягой воздуха (принцип PDEC-passive downdraught evaporative cooling, см. раздел 9) распространилось на все страны с таким климатом.

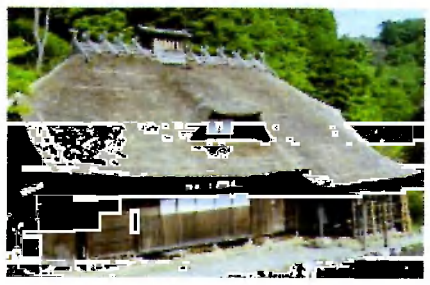


В качестве материалов наружных ограждений хижин использовались циновки либо чертополох, которые периодически орошались водой. В Персии (древнем Иране) существовал обычай накрывать шатры (shapar) мокрым войлоком.



Shapar

В Японии до сих пор можно встретить дома с соломенной крышей [204].



Дом с соломенной крышей

Одним из приемов PDEC является орошение слоя дерна на крыше зданий.





Дом с дерном на крыше

В индийских хижинах применялся каркас из бамбука, обвитый кокосовой пальмой – «татти» (трава, обладающая капиллярными свойствами). Сверху размещалась емкость, которая медленно заполнялась водой за счет ее подъема по капиллярам «татти». При достижении определенного уровня заполнения емкость опрокидывалась, орошая конструкцию, и возвращалась в исходное вертикальное положение. Цикл многократно повторялся.

В Японии зародился и продолжает использоваться в императорской столице Киото (жилые дома, рестораны) прием испарительного охлаждения "*uchimizu*": орошением водой тротуаров, проезжей части улиц, крыш и стен домов.





"Uchimizu is an old Japanese custom. It works not only on road surfaces, but all on roofs, verandahs, walls, both in sunny place and shade".



На Ближнем и Среднем Востоке постоянные жилища сооружались наполовину уходящими под землю, причем люди стремились к расположению их вблизи источников воды. Воду направляли по желобам (water chutes, salsabil) так, чтобы она падала прямо перед входом в небольшой водоем, над которым устанавливали вентиляционную колонну для отвода теплого воздуха. Воздух над водой охлаждался, отдавая часть своей теплоты на испарение воды, и увлажнялся, создавая прохладу.

Фонтаны Сельсебиль



Каир (Египет)



*Помпеи (Италия)**



*Алупка (Крым, Украина)**

сельсебиль – исламский (арабский) термин, означающий «фонтан в раю» (Коран, сура 76:18)

Этот способ применялся во дворцах Великих Моголов, со временем трансформировался в архитектурный вариант внутреннего дворика (courtyard house) – атриума (патио) с фонтанами (водоемами). "Even without modern, mechanical heating or cooling systems, *the courtyard house* provides a comfortable living environment through seasonal usage of sections of the structure" [277] – даже без современных систем охлаждения и отопления внутренний дворик, за счет своей структуры, обеспечивает комфортную окружающую среду.

"Courtyard house" особняков типичной архитектуры



Тегеран (Иран)





Гранада (Испания)



Гавана (Куба)

**фотографии автора*

В древнеиндийском городе Мохенджо-Даро* дома строились без окон, а на их крышах находились устройства для улавливания ветра wind-catchers (badgirs (Farsi), barjeels (Arabic), см. также раздел 9). Входные отверстия этих устройств снабжались клапанами, которые открывались либо закрывались, в зависимости от силы и направления ветра. Таким образом воздух поступал в низкий чердак, где находились плоские чаны с водой. Здесь горячий сухой воздух, контактируя с поверхностью воды, охлаждался за счет испарительного эффекта, а затем по каналам в толстых стенах опускался в помещения. Описанный прием PDEC, известный на Среднем Востоке как "bahadoori" (рис.1.1), применялся в течение многих столетий и сохранился до наших дней в Бахрейне, Иране (Yazd), Италии (Assisi) [111, 130, 138, 175, 176, 231, 255, 264, 274].

**Mohenjo-Daro, 2-3 тысячелетие до н.э., в настоящее время – территория Пакистана*

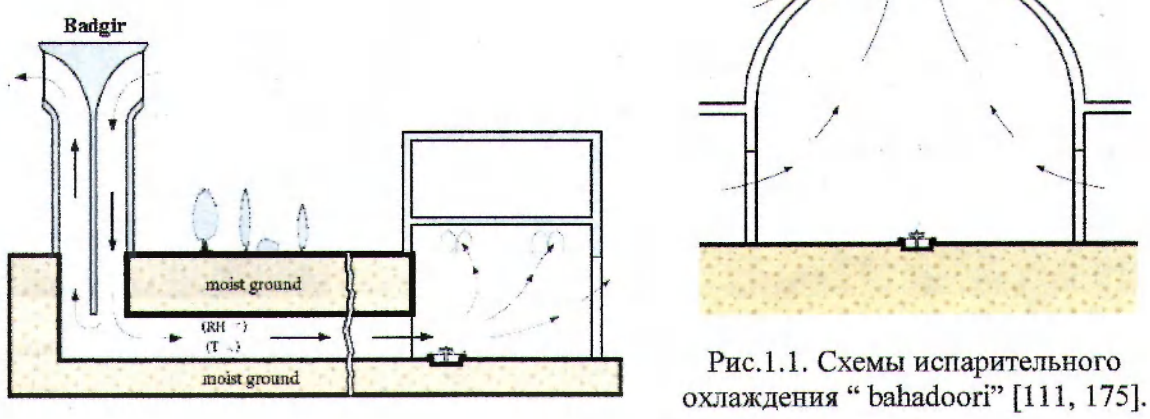
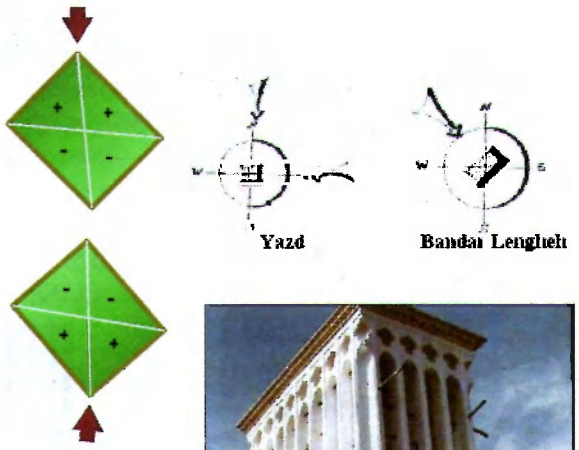


Рис.1.1. Схемы испарительного охлаждения " bahadoori" [111, 175].

Ветровые башни устанавливались в направлении преобладающих ветров, имели различную конфигурацию входных окон и разделение шахты на два или более каналов.



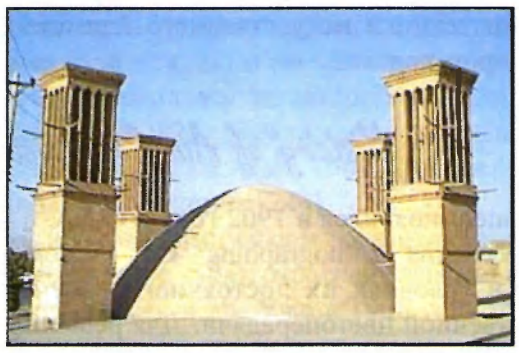
Ветровые башни (Badgir) в г.Yazd





В Индии, Персии, Багдадском Халифате (в наше время Ирак) испарение применялось для получения льда. В земле, в неглубоких ямках, заполненных соломой (для изоляции), устанавливали плоские емкости с водой. Ночью за счет испарения и радиационного теплообмена образовывался лед толщиной 3,5 см, даже при температуре 6 °С. Калиф (халиф) Багдада Аль-Махди (в 8-ом веке), в продолжение опыта древних египтян, для охлаждения воздуха в своем дворце использовал рабов, обмахивающих блоки со льдом.

В летней резиденции калифа ледяные блоки закладывались в пространство между двойными стенами. Ниже приведены фотографии сооружений, использующих “bahadoori”.



Водохранилище (Ab anbar)



Ледяной дом (хранилище снега и льда)

В условиях теплового и влажного климата применялась иная стратегия достижения комфорта с использованием ветровых башен [244]: улавливание прохладных морских бризов. Для этого использовали широкие окна башен, как правило, четырехсторонние “wind-catchers” (г. Abarghu, Иран).





Ветровые башни в г. Abarghu

Оставим древние века…

Одесский оперный театр, построенный в 1887 году, имел систему охлаждения воздуха с аккумулятором холода, выполненным в виде шахты, углубленной в землю на 11 метров, в которую летом сбрасывали лед вперемежку с соломой. Шахта соединялась с вентиляционным каналом, вымощенным базальтовыми камнями. Холодный воздух за счет естественной тяги поднимался в театральный зал, где он распределялся под каждое сидение. Таким образом, в данной системе использовался естественный холод в сочетании с прогрессивным методом вытесняющей вентиляции.

100 лет (с 1900 г. по 2000 г.) использовалось испарительное охлаждение зала заседаний Дворца Парламента в Будапеште.

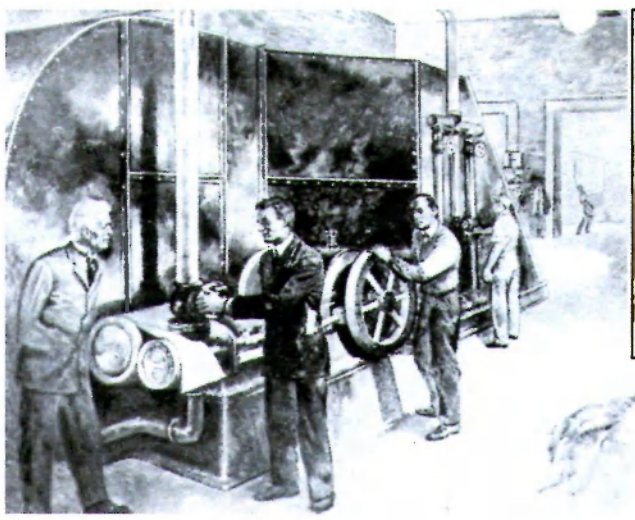
Эти примеры доказывают, что обеспечение комфортных условий всегда интересовало человека. И все же, основные успехи в создании техники искусственного климата были достигнуты в процессе развития промышленного производства.

History of Air Conditioning

По распространенной версии, первый кондиционер появился в 1902 году в США, в Нью-Йорке, в Бруклинской типографии Sackett-Wilhelms Lithographing Co. Летом, при повышенной температуре и влажности воздуха в условиях их постоянного изменения в процессе печатания, не удавалось добиться качественной цветопередачи. Для решения этой проблемы инженер компании Буффало Виллис Хэвилэнд Кэрриер (Willis Haviland Carrier) применил поверхностный спиральный водяной воздухоохладитель с вентилятором (фэнкойл), с помощью которого обеспечивалось охлаждение и осушение воздуха до уровня 26,5 °С и 55 % относительной влажности. Вода охлаждалась в аммиачной холодильной машине. Зимой необходимая относительная влажность воздуха (55 %) поддерживалась в процессе его увлажнения паром от бойлера при температуре в помещении 21 °С.



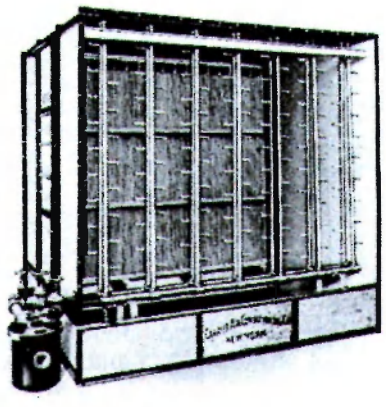
биографический очерк о В.Х. Кэрриере помещен в приложение IX





Типография Sackett-Wilhelms (Brooklyn, N.Y.)

В 1904 г. В.Х. Кэрриер разработал универсальный аппарат обработки воздуха – the Apparatus for Treating Air, U.S. Pat. № 808897, 1906 – прототип современной промывной форсуночной камеры орошения. Промывная камера компании Буффало была успешно использована в 1906 г. в г. Бельмонт на хлопкопрядильной фабрике для создания микроклимата высокого уровня влажности, необходимого по технологии текстильного производства. При этом Кэрриером был разработан способ поддержания относительной влажности по температуре точки росы приточного воздуха [242, 243].



Промывная камера Кэрриера



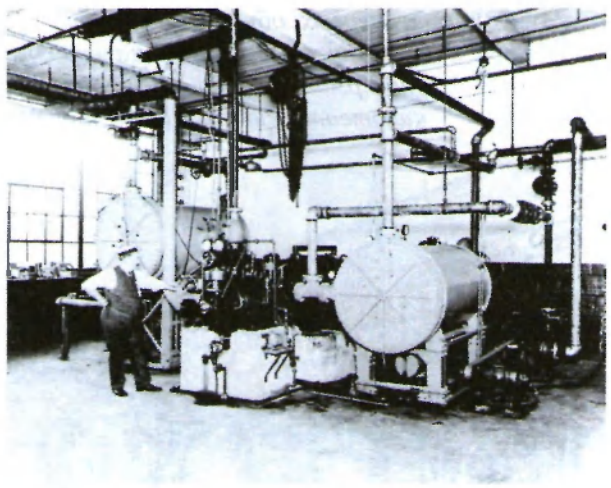
Термин *«кондиционирование воздуха»* был предложен в 1906 году Стюардом Уорреном Крамером (Stuart Warren Cramer), который, занимаясь текстильным производством, связал получение кондиционного товара с приведением параметров воздушной среды к определенной кондиции по температуре и относительной влажности. Крамер применил эту терминологию в описательной части патента U.S. Pat. № 852823, 1906, а также в докладе "Recent Developments in Air Conditioning" в мае 1906 г. для американской ассоциации производителей хлопка [243].

Дальнейшим импульсом развития техники кондиционирования воздуха послужило быстрое развитие таких отраслей промышленности, как машиностроение, радиотехническая промышленность и др. Уже в 1908 году потребовалась не только термо- и влагообработка воздуха, но и его очистка от пыли и других аэрозольных примесей. Возникло понятие системы кондиционирования воздуха (СКВ): последовательной технологической цепочки аппаратов обработки воздуха. При этом была дана современная трактовка круглогодичной СКВ как системы, предназначенной для создания и автоматического поддержания требуемых параметров воздуха (G.B.Wilson, [243, 306]):

"Air conditioning is a system which gives automatic control, within predetermined limits of the environmental conditions, by heating, cooling, humidification, dehumidification, cleaning and movement of air in buildings".

В 1923 был создан турбокомпрессор на дихлорэтилене "Dielene", что позволило осуществлять проекты СКВ большой производительности.





Водоохлаждающие холодильные машины (чиллеры) с турбокомпрессором

Развитие средних и малых (в том числе автономных) установок стало возможным только с 1930 года после открытия Томасом Мидгли (DUPONT) дихлордифторметана – R12 (фреона). Автономные кондиционеры прошли путь от моноблочных конструкций (подоконных, оконных, внутристенных) до сплит-систем, работающих по раздельной схеме (split – разделять, разобщать).



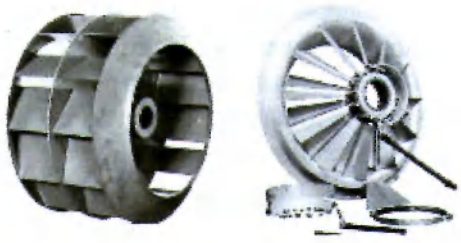
Воздухоохладители фирмы General Electric (30-е годы прошлого столетия) устанавливались в офисных либо жилых помещениях и декорировались деревянным корпусом «под радиоприемник». Поскольку эти кондиционеры работали на аммиаке, то, по соображениям безопасности, компрессорно-конденсаторный агрегат располагался с внешней стороны здания. По сути дела это была первая сплит-система.



БІБЛІОТЕКА
АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ
534657



Оконный кондиционер



Рабочее колесо и направляющий аппарат Sturtevant

В эти же годы развивается вентиляционная техника. В 1922 г. компания Sturtevant разработала рабочее колесо с лопатками загнутыми назад, что позволило увеличить к.п.д. вентилятора до 75 %, а в 1927 г. был создан направляющий аппарат для обеспечения плавного регулирования производительности.

В 1930…1940 г.г. в США, Японии и Германии появились стационарные круглогодичные СКВ комфортного назначения для кинотеатров, отелей, больниц и др. В эти же годы создаются первые автоматизированные установки кондиционирования на морском военном и торговом флоте, железнодорожном, автомобильном и авиационном транспорте.

Одними из первых объектов кондиционирования воздуха общественного назначения были: универмаг Хадсона в Детройте (1924 г.), кинотеатр Риволи в Нью-Йорке (1925 г.).





Универмаг Хадсона

Кинотеатр Риволи

К 1930 г. уже более 300 американских кинотеатров располагали кондиционерами. На фронтах зданий вывешивались баннеры с надписью: "Cooled by Refrigeration."

В 1928 г. было кондиционировано здание Конгресса США – Капитолий, а на следующий год кондиционеры были установлены в резиденции президента США.

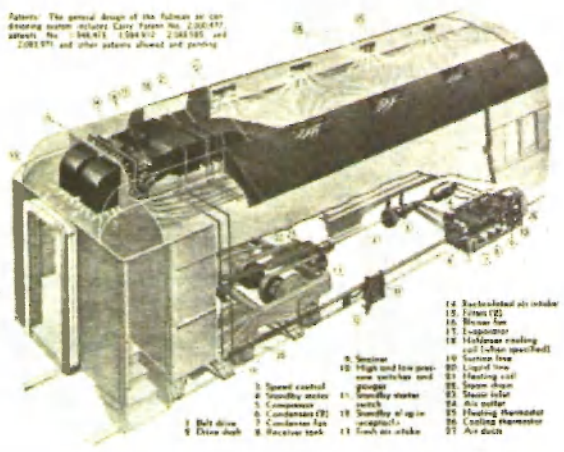
Действующий в эти годы 31-й президент США Герберт Кларк Гувер (1929–1933 г.г.) выражал удовлетворение от их работы. Любопытно, что следующий хозяин Белого Дома Франклин Делано Рузвельт весьма отрицательно относился к кондиционированию воздуха и неустанно, при каждом удобном случае, высказывал свое мнение.

В 1928 г. Кэрриер разработал систему кондиционирования воздуха для жилого дома, однако Великая Депрессия в США и II мировая война приостановили их массовое использование. Если в 1965 году только 10 % (около 3 млн.) домов в США были кондиционированы, то уже в 1985 г. – 70 %, а в 1999 г. – 80 % (92,5 млн.) (в Техасе и во Флориде – 95 %) были оснащены СКВ, преимущественно центральными системами.

Создание транспортных установок кондиционирования было сопряжено с решением узла привода нагнетателей: компрессора холодильной машины и вентиляторов, а также задачи надежности, возникшей из-за проблем, связанных с вибрацией, толчками, перегрузками (в случае авиации).

Первый транспортный кондиционер был разработан Кэрриером в 1925 г. для военно-морского судна Wyoming U.S.Navy

В 1929 году кондиционирование воздуха было применено в железнодорожных вагонах Pullman



...по прошествии времени, Пульман стал синонимом комфортабельных спальных вагонов





Спальный и обеденный вагоны Pullman

Boeing 247 и Douglas – DC1– первые самолеты, снабженные системой кондиционирования воздуха (1933 г.)



DC1 (14 пассажиров)



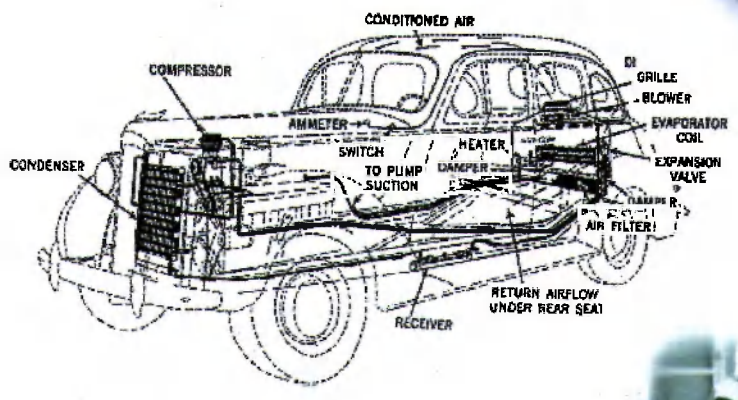
Boeing 247 (10 пассажиров)



Автомобильный кондиционер холодопроизводительностью 370 Вт был создан фирмой C & C Kelvinator Co в 1930 г. и установлен на Кадиллаке



В 1937 г. Кэрриер применил кондиционирование воздуха в автобусах сирийской транспортной компании "The Nairn Transportation Company of Damascus" для регулярной линии Дамаск-Багдад при температуре наружного воздуха 0...50 °С



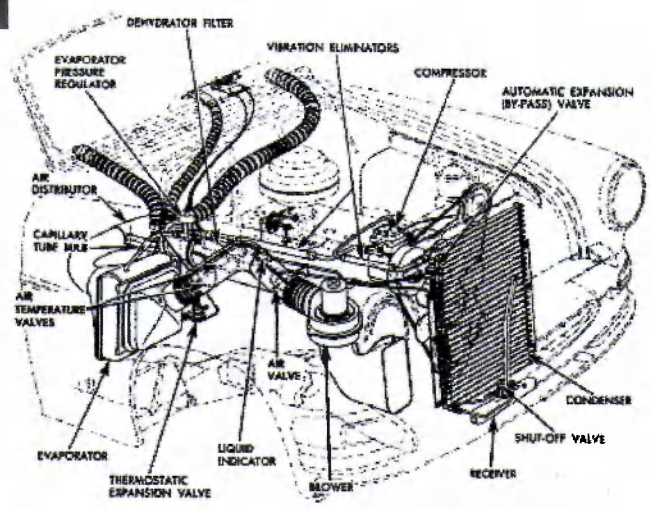
В 1939 г. компания Packard Motor Car оснащает свои автомобили системой круглогодичного (всепогодного) кондиционирования воздуха [136]



В 1940 г. братья Ringling заказывают Кэрриеру разработку системы кондиционирования для передвижного цирка (аттракциона с животными) – автомобильного вагона-прицепа длиной 8 м с толстыми стеклянными стенками, внутри которого поддерживалась температура 24,5 °С и относительная влажность воздуха 50 %.

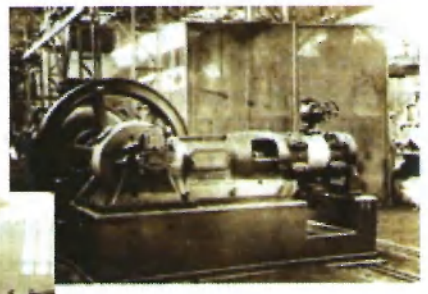


В 1946 г. были кондиционированы первые городские автобусы на 32 и 40 пассажиров (San Antonio, Houston (Texas))



Размещение компонентов автомобильного кондиционера, разработанное General Motors в 1953 году, до сих пор используется в автомобилестроении, являясь стандартом отрасли [136]

В 1950-е годы появились кондиционеры с абсорбционными холодильными машинами на газовом обогреве, герметичные фреоновые компрессоры, а также стали применяться теплонасосные схемы [26].



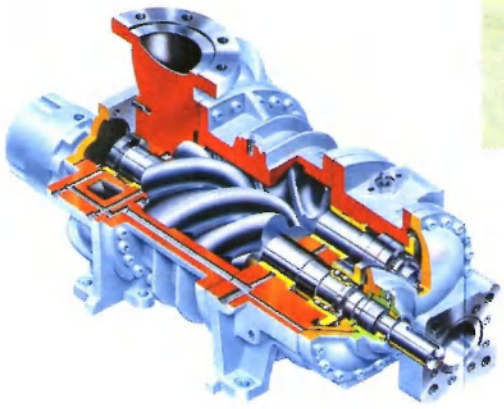


Аммиачный поршневой компрессор Grasso холодопроизводительностью 60 тыс. ккал/ч (1932 г.)

С 1980 г. поршневые компрессоры постепенно замещаются более эффективными, малошумными и надежными ротационными, винтовыми, спиральными компрессорами.





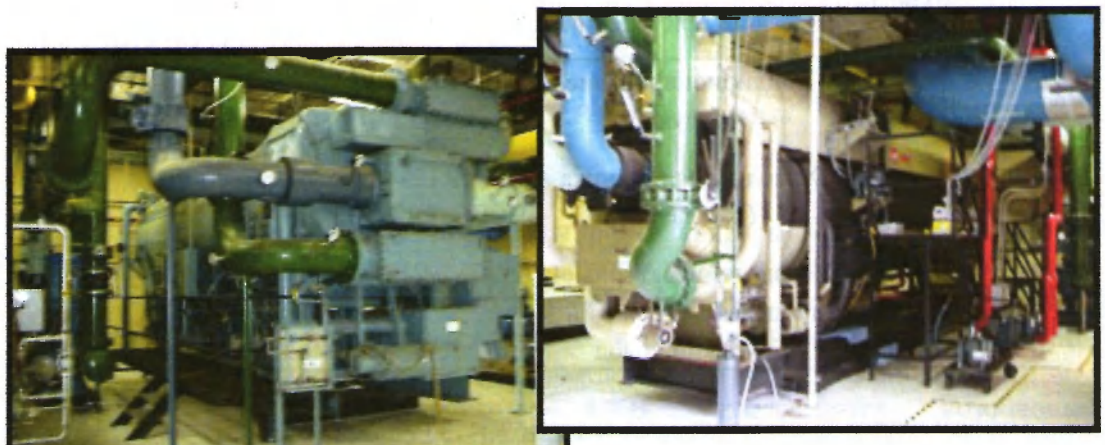


*Ротационный компрессор Aspen**

Винтовой (Screw) компрессор



Спиральный (Scroll) компрессор Copeland



Абсорбционные чиллеры Trane и York (справа)

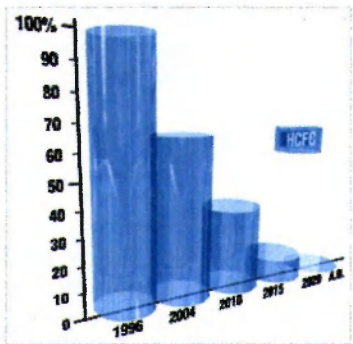
**самый миниатюрный холодильный компрессор (хладагент R134a), разработка Aspen Compressor, LLC, 2008 г.*

The Aspen hermetic rotary compressor can be used in air conditioning units, water chillers, and commercial refrigeration system

Экологические требования привели к необходимости замены хлорсодержащих хладагентов категории CFC (хлорфторуглероды), в т.ч. R12, и категории HCFC (хлорфторуглеводороды), в т.ч. R22, на альтернативные рабочие вещества HFC (фторуглеводороды), имеющие нулевой озоноразрушающий потенциал ODP: R134a, R407c, R410a и др. (табл.1.1, 1.2).

Таблица 1.1. Характеристика хладагентов.

	Хладагент	Формула	ODP	GWP[1]
R-11	*фтортрихлорметан*	$CFCl_3$	1	4000
R-12	*дифтордихлорметан*	CCl_2F_2	1	8500
R-22	*дифторхлорметан*	$CHClF_2$	0.055	1700
R-134a	*тетрафторэтан*	CH_2FCF_3	0	1300
R-404a	*смесь*	*	0	3700
R-407c	*смесь*	*	0	1600
R-410a	*смесь*	*	0	1700
R-744	*диоксид углерода*	CO_2	0	1
R-717	*аммиак*	NH_3	0	0
R-290	*пропан*	C_3H_8	0	3
R-600	*бутан*	C_4H_{10}	0	3



[1]GWP – Global Warming Potential – потенциал глобального потепления (воздействия на атмосферу)

*Смеси и их компоненты:

- R404a – близкозеотропная смесь R125/R143a/R134a в массовом соотношении 44/52/4 (%);
- R407c – зеотропная смесь R32/R125/R134a, 23/25/52 %;
- R410a – азеотропная смесь R32/R125 в равных долях 50/50 %;
- R32 – дифторметан CH_2F_2;
- R125 – пентафторэтан C_2HF_5;
- R143a – трифторэтан $C_2H_3F_3$.

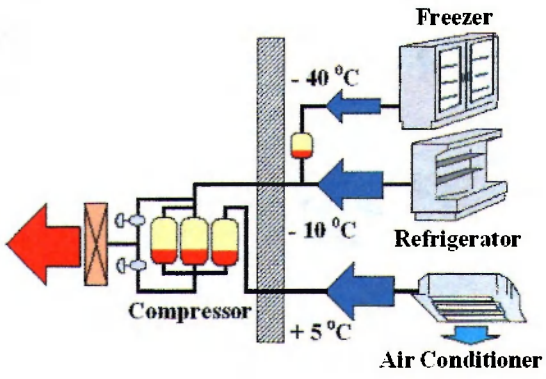


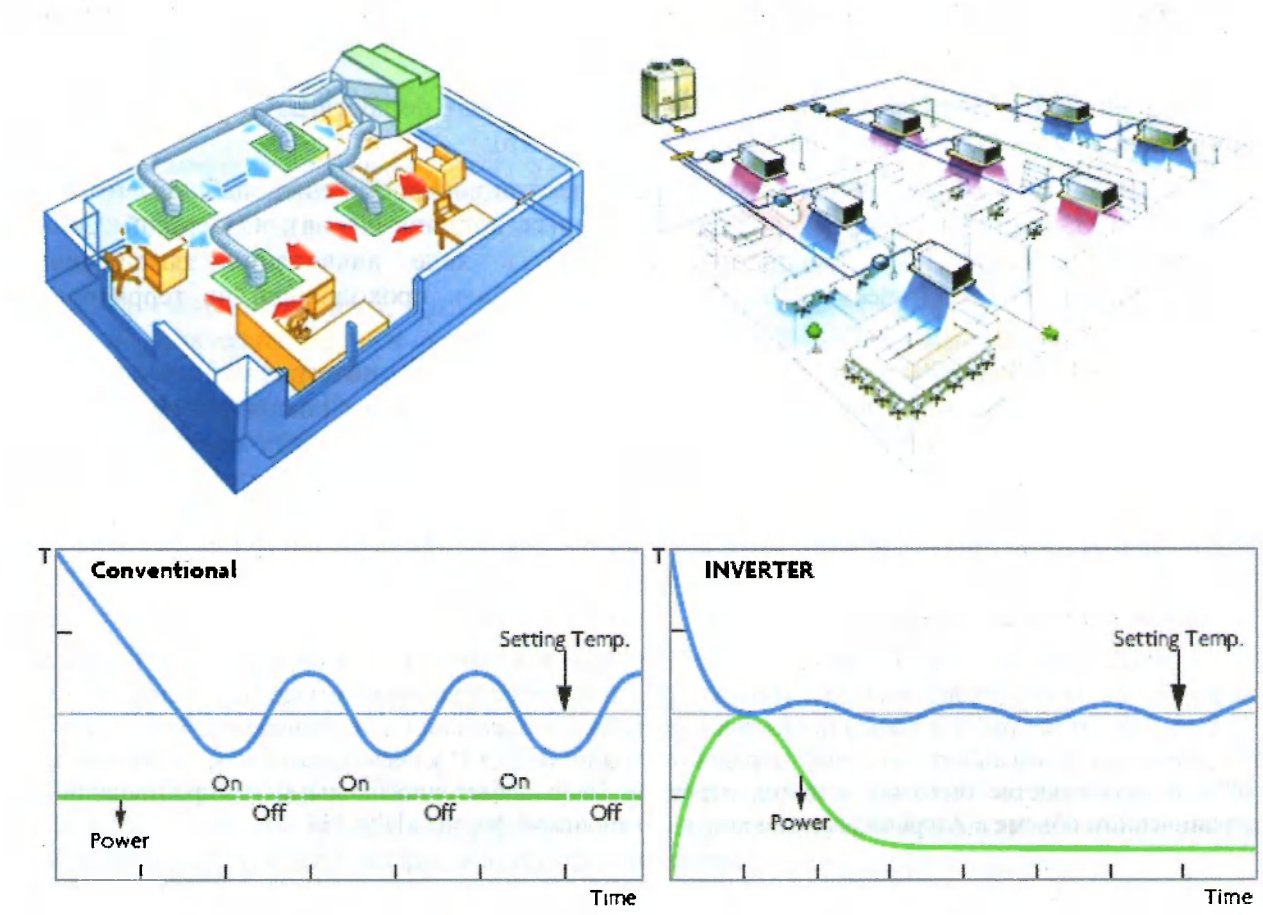
Таблица 1.2. Области применения хладагентов.

Температурный диапазон	Область применения	Хладагенты	Рекомендуемые хладагенты
0…10 °C	Кондиционирование воздуха	CFC: R11, R12 HCFC: R22	R134a R410a, R600, R717
–25...0 °C	Холодильная техника (in general)	CFC: R12 HCFC: R22	R134a, R290, R600a, R290/R600a, R410A, R600, R717
–50… –25 °C	Низкотемпературные пищевые технологии	CFC: R502	R507, R407a, R407b, R407c
<–50 °C	Глубокий холод	CFC: R13	R23

Совершенствуются способы управления СКВ. Решение задачи энергосбережения обусловило переход от качественного регулирования (системы с постоянной производительностью по воздуху CAV – constant air volume) к количественному регулированию (системы с переменной производительностью VAV – variable air volume).

В 1980-х годах, в Японии (Daikin Industries Ltd.), разрабатывается принципиально новый способ управления с переменным расходом хладагента VRV (variable refrigerant volume):

изменением частоты тока в цепи электропитания компрессора – инверторные системы [31], что дало возможность более точного и плавного регулирования температуры воздуха при существенном снижении энергозатрат.



Воздушная система CAV *VRV система*

В середине XX века были созданы первые насадочные аппараты для увлажнения, испарительного охлаждения, а также осушения на основе импрегнированного слоя десиканта – роторы-осушители (шведский инженер К.Г. Мунтерс), см. разделы 7…9.



Ротор-осушитель



Энергетические мировые кризисы активизировали разработку различного рода теплоутилизаторов (рекуперативного и регенеративного типов), а также стимулировали возврат к природным процессам и технологиям: прямого и непрямого испарительного охлаждения, комбинированным схемам. Для функционирования СКВ привлекаются возобновляемые источники энергии, см. разделы 9, 11.

С 1980-х годов активно развивается направление солнечной энергетики, в которое входит абсорбционная холодильная техника и техника кондиционирования воздуха.

Высотное здание с солнечными батареями на крыше

Кондиционирование воздуха является предметом фундаментальных и прикладных исследований авторитетных международных институтов IIR/IIF, ARI, профессиональных ассоциаций специалистов ASHRAE, REHVA и др. (см. § 1.2), технических университетов, национальных исследовательских лабораторий, научных групп крупных промышленных корпораций...

В нашей стране техника кондиционирования воздуха еще не достигла мирового уровня. Отставание возникло, главным образом, в связи с тем, что:

1) в 1945…1955 г.г., в период бурного роста кондиционеростроения, наблюдаемого в США (в 1953 году было продано 1 млн. оконных кондиционеров), Советский Союз занимался восстановлением народного хозяйства в ходе ликвидации тяжелейших последствий Великой Отечественной (II мировой) войны, проходившей на территории СССР;

2) распад СССР в 1991 году привел к разрушению системы интеграционных связей в промышленности. Многие специализированные производства, ранее планово размещенные на территории Союза, остались за пределами Украины. Это относится к производству местных неавтономных кондиционеров в г. Домодедово (РФ), автономных кондиционеров в г. Баку (Азербайджан); электролитических датчиков влажности – специальных приборов контроля и автоматизации СКВ в г. Гори (Грузия).

Историческая справка:

Серийное производство центральных кондиционеров было налажено в середине 50-х годов на Харьковском заводе «Кондиционер». Инициатором и основным заказчиком являлось министерство обороны. За 40 лет работы завода произошла смена шести поколений кондиционеров. Все эти годы потребность «гражданских» отраслей народного хозяйства СССР удовлетворялась не более чем на 30%. В производстве бытовых кондиционеров не было достаточного опыта, их производили в ограниченном объеме в Азербайджане по лицензии японской фирмы «Hitachi».

В то же время следует отметить, что отечественные ученые внесли огромный вклад в развитие теории кондиционирования.

Во второй половине 19 века в России был создан комитет по исследованию изменений, происходящих в человеческом организме под влиянием метеорологических условий. Член комитета инженер И.П. Флавицкий впервые доказал, что тепловые ощущения людей зависят не только от температуры, но и от влажности воздуха. Появилось понятие эффективной температуры. Впоследствии было установлено, что тепловой комфорт связан также и с подвижностью воздуха, что нашло отражение в шкале “эквивалентно-эффективной температуры».

В 1918 году проф. Л.К. Рамзин разработал d,h- диаграмму влажного воздуха, которая и сегодня является незаменимым расчетным инструментом при проектировании СКВ.

Широко известны работы проф. А.Л.Чижевского по ионизации воздуха («люстры Чижевского»).

Развитие кондиционирования воздуха связано с именами В.Н. Богословского, О.Я. Кокорина (Московский государственный строительный университет), Е.Е. Карписа (ГипроНИИ Академии наук СССР), Е.В. Стефанова (Ленинградское высшее военное инженерно-техническое училище), А.А. Гоголина, А.А. Рымкевича, А.Г. Сотникова (Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий СПбГУНПТ), Ю.В. Захарова (Украинский государственный морской технический университет), В.З. Жадана (Одесская государственная академия холода).

Этот ряд может и должен быть продолжен…

"The greatest thing in this world is not so much where we stand as in what direction we are moving"
Johann Wolfgang von Goethe

1.2. ТРЕБОВАНИЯ К СПЕЦИАЛИСТАМ И ЗАДАЧИ, СТОЯЩИЕ ПЕРЕД НИМИ. ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ

"Air conditioning is the control of the humidity of air by either increasing or decreasing its moisture content. Added to the control of humidity is the control of temperature by either heating or cooling the air, the purification of the air by washing or filtering the air, and the control of air motion and ventilation."

Willis H. Carrier

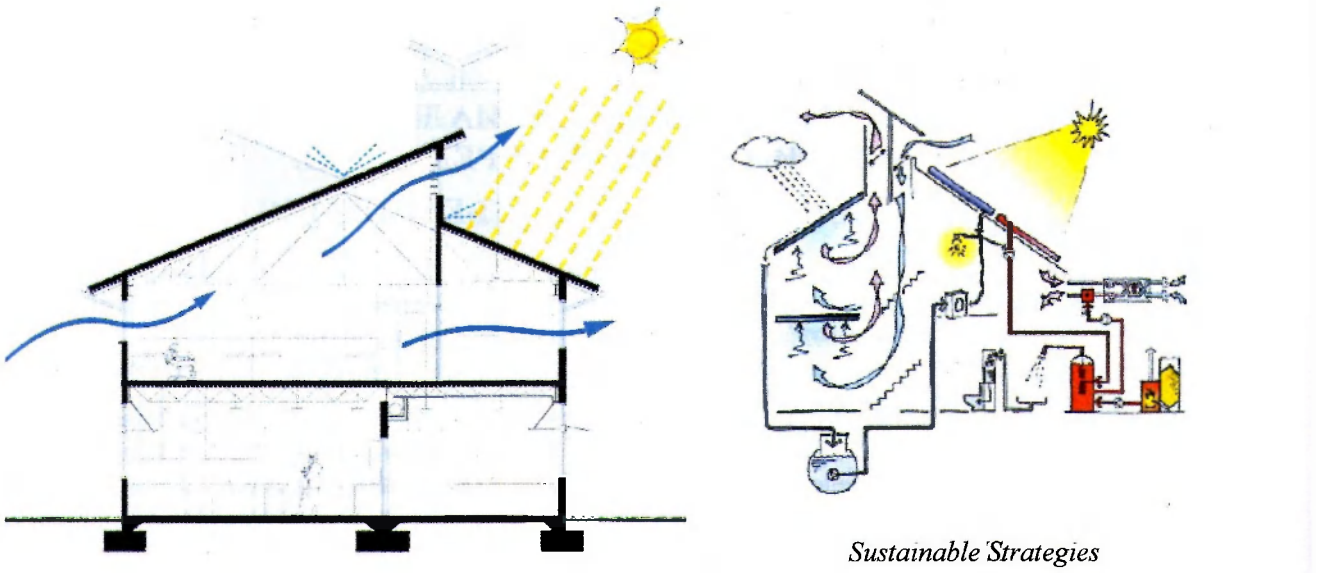
СКВ – сложные системы, в которых, в зависимости от назначения, проводятся различные по своей физической природе процессы обработки воздуха: термовлажностные (нагревание, охлаждение, увлажнение, осушение); очистка воздуха от аэрозольных примесей и различных химических вредностей; устранение запахов (озонирование); сообщение воздуху специальных запахов (парфюмеризация, одоризация); ионизация; шумоглушение и др.

Специалистам по кондиционированию воздуха необходимы специальные знания по вентиляции, холодильной технике, отоплению, очистке, автоматизации, поскольку все эти системы, как и СКВ, являются подсистемами в сложной системе кондиционирования микроклимата СКМ зданий и сооружений.

Кроме термовлажностной обработки воздуха, в СКВ (СКМ) осуществляется очистка воздуха от пыли и других вредностей, при соответствующем контроле качества воздуха. Человек в течение суток потребляет около 3 кг пищи и 15 кг воздуха, а за свою жизнь делает в среднем 600 млн. вдохов, что составляет около 600 тыс. м³ воздуха. Очевидно, что загрязненность воздуха даже в малых дозах может причинить серьезный ущерб здоровью человека. Люди все больше времени проводят в помещениях (дом, работа), в транспортных средствах. В результате исследований, проведенных в США в 1987 году, установлено, что человек проводит на открытом воздухе всего лишь 10…20 % времени, т.е. в среднем около 3 часов в день. В наши дни эта цифра существенно меньше. При этом отмечается неудовлетворительное качество воздуха в помещениях – «синдром больных зданий» – SBS ("Sick Building Syndrome"). По оценкам Всемирной организации здравоохранения, треть новых и реконструированных административных зданий мира «больны». Например, в США таких зданий более миллиона. Подсчитано, что снижение производительности труда по этой причине приводит к потерям в 60 млрд. $ в год [102]. Свыше 20 % конторских работников, так называемых «белых воротничков», страдают заболеваниями, вызванными низким качеством воздуха в их учреждениях. По данным агентства по охране окружающей среды США: уровень загрязнения воздуха некоторых зданий в 100 раз выше, чем на открытом воздухе. В связи с этим обозначена проблема обеспечения качества внутреннего воздуха помещений "IAQ – indoor air quality" [99, 190], которая является предметом современных исследований.



В настоящее время разработку проектов по КВ стремятся вести на стадии разработки архитектурного проекта здания, с учетом его формы и размещения по сторонам света. Исповедуется принцип проектирования энергоэкономичных общественных зданий "The design of energy – responsive commercial buildings" [46, 74, 93, 102, 275]. Активно разрабатываются новые направления: "Intelligent Buildings" с центральными интеллектуальными системами кондиционирования [144] и "Green Buildings" (GBs) с максимальным использованием потенциала окружающей среды за счет проветривания, естественного освещения, испарительного охлаждения, солнечной энергии и др. [101, 245].



Sustainable Strategies

Center for Global Ecology Carnegie Institution of Washington, USA

При обеспечении технологического процесса промышленного производства необходимо умение согласовывать допустимые отклонения параметров выпускаемых изделий с допустимыми параметрами воздуха в рабочей зоне. В то же время, необходимы знания в экологической плоскости, поскольку вентиляционные выбросы могут нанести ущерб окружающей среде.

Таким образом, специалистов по КВ отличает широта профессиональных интересов, а множество точек соприкосновения с другими смежными службами неизбежно приводит к взаимному обогащению идеями. Не случайно многое в развитие вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха (ВОК) сделано в системе строительных вузов.

За последние 40 лет коренным образом изменились требования к инженерным системам зданий. Изменилась и позиция строителей, а также владельцев зданий, первоначально состоящая в том, что системы ВОК предназначены лишь для нейтрализации климатических воздействий. Сейчас для многих из них очевидным является необходимость предварительной консультации архитекторов со специалистами ВОК до того, как провести первую линию на чертеже либо эскизе. Однако, как считают специалисты ряда ведущих компаний, для закрепления этого подхода, придания ему статуса *нормы проектирования* пока не хватает общественного признания и соответствующего имиджа.



«Независимо от нашего имиджа существует необходимость утвердить значимость нашей отрасли в стройиндустрии, в государстве и обществе в целом. Необходимо, чтобы все осознавали влияние нашей работы на здоровье и благоденствие людей. Мы должны продемонстрировать связь наших систем с производительностью труда, самочувствием людей и эффективностью использования здания. В заявлениях, касающихся экологических проблем, мы должны подчеркнуть свою роль в энергосбережении и охране окружающей среды – жизненно важных для будущего всего человечества»

Terry Wyatt, Partner & Head of R & D

Приводя эти слова Терри Вьетта, которые, на мой взгляд, являются ключевыми в понимании нашей профессии и наилучшим образом формулируют задачи, стоящие перед нами, я настоятельно рекомендую изучить весь материал статьи английского специалиста [23], поскольку рассмотрение в ней вопросов: «Как мы работаем?» и «Что мы делаем?», – отвечает на "извечно русский вопрос": «Что делать?», а точнее «Что и как делать?».

Специализация образования по кондиционированию воздуха и системам жизнеобеспечения позволяет получить работу во многих (более 250 [32]) традиционных отраслях промышленного производства. Потребность в специалистах данного профиля постоянно возрастает соразмерно с развитием таких современных отраслей, как прецизионное машиностроение, производство оптических и электронных приборов, в том числе комплектующих для персональных компьютеров, селекция растений (фитотроны), селекция животных (зоотроны) и др. Все эти технологии невозможны без СКВ.

Для решения профессиональных вопросов, получения образования, повышения квалификации, проведение консультаций и пр., специалисты объединяются в ассоциации.

Самое крупное и авторитетное профессиональное объединение – Американское общество инженеров по отоплению, рефрижерации и кондиционированию воздуха ASHRAE – American Society of Heating, Refrigeration & Air Conditioning Engineers (Атланта, штат Джорджия, США). Оно создано в 1894 г. (первоначально ASHVE), и все его рекомендации, нормы проектирования [127] признаны во всем мире.

Образовательный центр ASHRAE Learning Institute предлагает девять учебных курсов – *Fundamentals of: Thermodynamics; Thermodynamics and Psychrometrics; Air System Design; Water System Design; Steam System Design; Heating and Cooling Loads; Heating Systems; Refrigeration; Electrical Systems and Building Electrical Energy Use.*

Европейская федерация национальных ассоциаций стран континента в области отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха Federation of European Heating and Air-conditioning Associations – REHVA (Брюссель, Бельгия) образована в 1963 г. В настоящее время в федерацию входят инженерные ассоциации из 32 стран Европы.

Аббревиатура REHVA сохранилась от первоначального названия "Representatives of European Heating and Ventilating Associations"

В СНГ успешно функционируют: АПИК (ассоциация производителей индустрии климата) и НП АВОК (некоммерческое партнерство инженеров по вентиляции, отоплению, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и инженерной теплофизики), Россия. Аналогичная ассоциация создана в Украине: «АВОК-Украина».



на фотографии (справа-налево):

В.В. Притула – президент «АВОК-Украина», ректор Одесской государственной академии холода (ОГАХ);

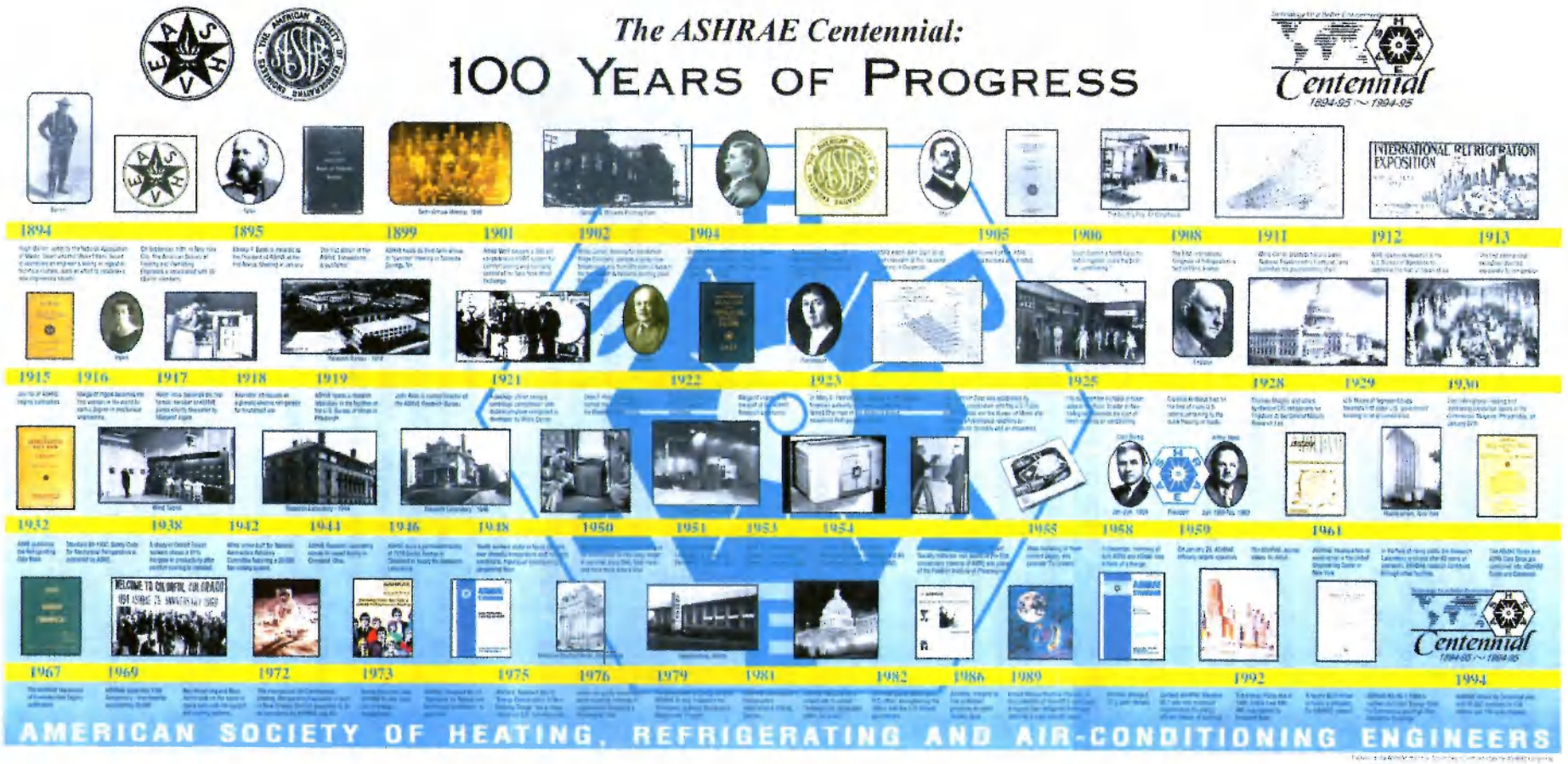
Ю.А. Табунщиков – президент НП «АВОК» (РФ), зав. кафедрой МАРХИ;

А.И. Липа – первый вице-президент «АВОК-Украина», проректор, зав. кафедрой ОГАХ

август 2004 г., Одесса

На вкладке (с. 28) показаны основные события истории ASHRAE (материал подготовлен к 100-летию ассоциации): на пути от ASHVE (американское общество инженеров по отоплению и вентиляции), ASRE (американское общество инженеров-холодильщиков) и ASHAE (американское общество инженеров по отоплению и кондиционированию воздуха). Свое название ASHRAE получила 29 января 1959 г.

Дата образования АВОК-Украина – 29 января 2004 г. (ровно через 45 лет после учреждения ASHRAE и в год 100-летия ASRE). В мае 2009 года на 53-й Генеральной Ассамблеи REHVA в Амстердаме АВОК-Украина была принята в члены европейской федерации.


The ASHRAE Centennial:
100 YEARS OF PROGRESS
Centennial
1894-95 ~ 1994-95
INTERNATIONAL REFRIGERATION EXPOSITION
1894
1895
1899
1901
1902
1904
1905
1906
1908
1911
1912
1913
1915
1916
1917
1918
1919
1921
1922
1923
1925
1928
1929
1930
1932
1938
1942
1944
1946
1948
1950
1951
1953
1954
1955
1958
1959
1961
1967
1969
1972
1973
1975
1976
1979
1981
1982
1986
1989
1992
1994
AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS

На этой странице приведены титульные листы первых выпусков журналов ASHRAE и ASRE



Здесь, в частности, сказано: ASHRAE Journal – официальный орган объединенной ассоциации инженеров по отоплению, холодильной техники и кондиционированию воздуха, являющей собой новый союз, который образован для концентрации усилий своих членов на решение проблем в области инженерии, научных исследований, проектирования, инсталляции, применения (в различных отраслях, прим. авт.) и управления.

1.3. ПАРАМЕТРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ОБЪЕКТЫ СКВ

Старейшему научному центру по изучению климата National Oceanic and Atmospheric Administration, первому федеральному агентству США (NOAA), основанному Томасом Джефферсоном в 1807 г., более 200 лет





Кондиционирование воздуха в помещениях должно быть обеспечено в любых климатических зонах в широком диапазоне изменений параметров наружного воздуха.

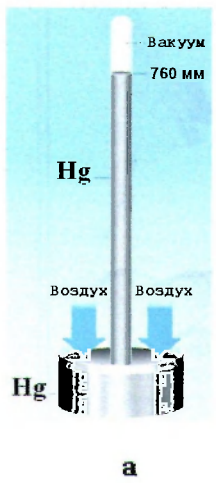
***По атмосферному давлению**: 500...1500 [мм. рт. ст.]*



Атмосферное (барометрическое) давление $P_б$ – гидростатическое давление, выражаемое весом атмосферного столба над любой точкой земной поверхности. *За нормальное принимается значение $P_б$ на уровне моря на широте 45° с. ш. при температуре воздуха 0 °С:*

$$P_б = Mg/4\pi R^2 = 5{,}2705\cdot10^{18}\cdot9{,}806/(4\cdot3{,}1416\cdot(6{,}371\cdot10^6)^2) = 101325 \text{ Па}, \quad (1.1)$$

где $M = 5{,}2705\cdot10^{18}$ кг – масса атмосферы, $R = 6{,}371\cdot10^6$ м – радиус Земли, $g = 9{,}806$ м/с^2 – ускорение свободного падения, $\pi = 3{,}1416$.



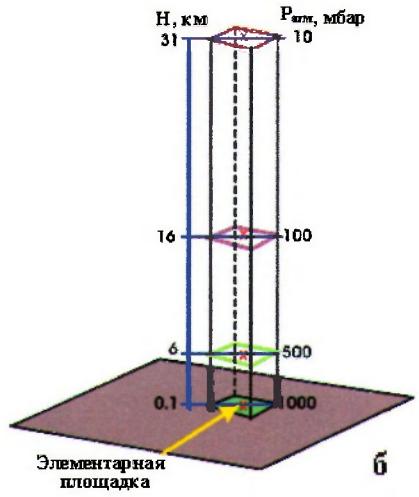
а

Нормальное значение $P_б$ уравновешивается ртутным столбом высотой 760 мм.

С высотой столб воздуха и давление уменьшаются:

$dP = - f(g\, dH)$, (рис.1.2, 2.1).

Рис.1.2. Давление атмосферного столба: а – нормальное; б – на разной высоте.



б

Так, например, в г. Ла-Пас (Боливия), находящемся на высоте 3659 м над уровнем моря, атмосферное давление составляет 500 мм. рт. ст. (67 кПа). В подземных сооружениях, напротив, давление выше, и в шахтах глубиной 4000 м достигает 1500 мм. рт. ст. (200 кПа). Величина $P_б$ колеблется, в связи с неравномерностью нагрева атмосферы от земной поверхности. При понижении температуры воздуха увеличивается его плотность и атмосферное давление. С нагревом воздуха от земли происходит его разрежение, давление падает. Самое высокое значение $P_б$ на нулевой отметке зафиксировано на севере Западной Сибири (Россия) – 812,4 мм. рт. ст. (108,3 кПа), а самое низкое – на островах Флорида-Кис (США) – 669,3 мм. рт. ст. (89,2 кПа).



Для сведения: атмосфера (от греч. atmos – пар и сфера) – газообразная оболочка, окружающая планету, которая вращается вместе с ней и удерживается притяжением Земли (см. раздел 2).

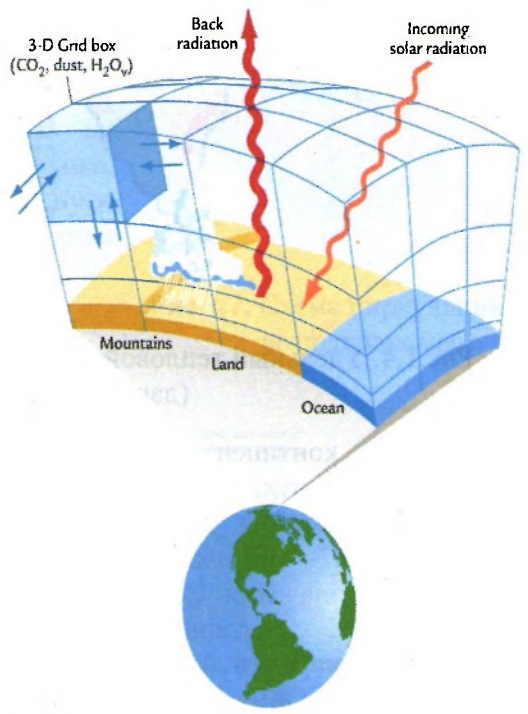
По температуре: *-50 ... + 50 [°C]*

Температура воздуха устанавливается в результате действия потоков лучистой теплоты от Солнца и теплового противоизлучения земной поверхности (рис.1.3). Ежегодно поверхность Земли получает от Солнца около $20 \cdot 10^{10}$ кДж лучистой энергии, половина которой тратиться на испарение воды.

Климат – от греческого "klima"
– наклон солнечных лучей к земной поверхности

Усредненная величина общей удельной тепловой нагрузки, поступающей от солнечной радиации, составляет 342 Вт/м^2. Исходя из этого, а также, учтя долю каждого из потоков (рис.1.3), можно рассчитать все составляющие энергетического баланса.

Например, лучистая энергия, воспринимаемая поверхностью Земли, в т.ч. водной поверхностью океанов, морей, озер, рек и пр. водоемов, составляет 51 % общей нагрузки, и, соответственно, равна 174 Вт/м^2. Величина отраженной радиации 103 Вт/м^2 (30 %). Скрытая тепловая нагрузка, переносимая водяным паром в атмосфере (преимущественно облаками), 79 Вт/м^2 (23%).



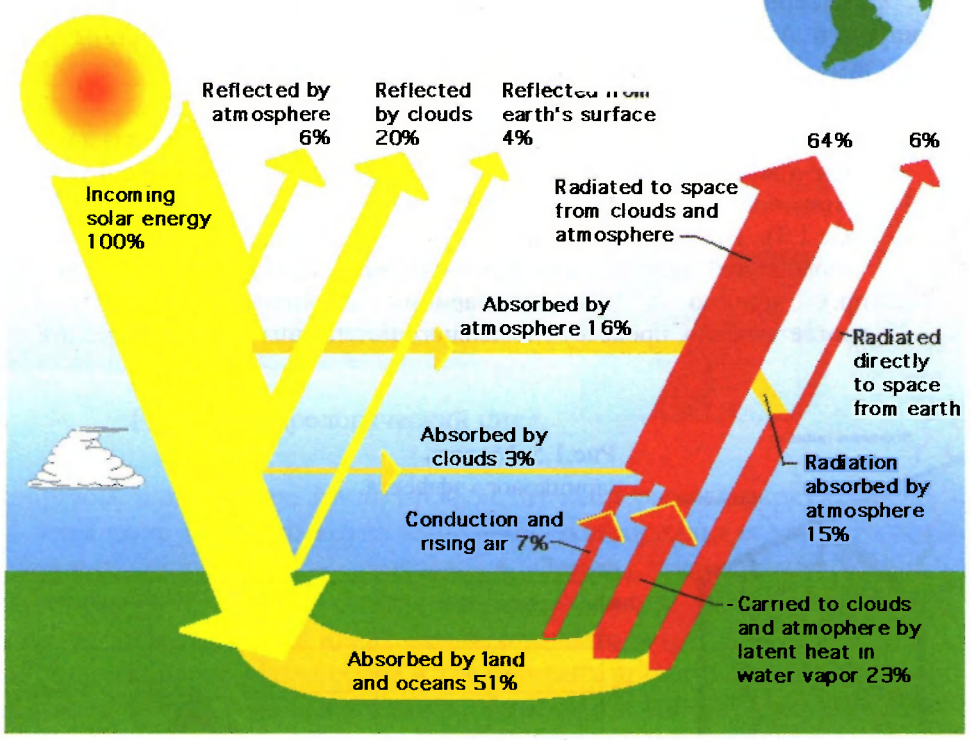


Рис.1.3. Энергетический баланс солнечной радиации
в атмосфере Земли [224].

Распределение теплового потока солнечной энергии на единицу поверхности зависит от угла падения солнечных лучей к поверхности Земли, т.е. от географической широты (рис. 1.4).

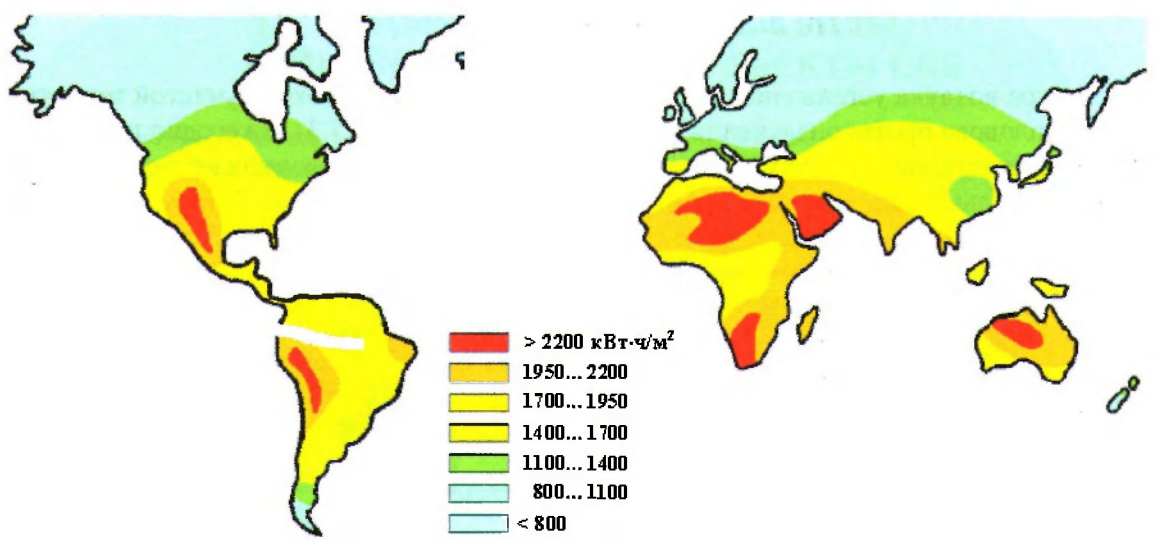
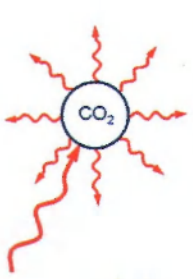


Рис.1.4. Удельный тепловой поток солнечной радиации в различных регионах Земли (данные департамента энергетики США).

На всех континентах, за исключением Антарктиды, максимальные значения температуры воздуха могут превышать 50 °С. В определенные годы зафиксированы: 57 °С – в США (Калифорния, долина Смерти); около 58 °С в Мексике и Ливии (г. Эль-Азизия). Полюс холода – Антарктида (станция «Восток», 3488 м над уровнем моря): -89 °С. Это амплитудные значения. Если рассматривать среднегодовые температуры, то самое высокое значение 34 °С характерно для г. Далол (Эфиопия), а самые низкие $t_{ср.год}$ наблюдаются: в Южном полушарии в Антарктиде на станции Плато: -56 °С, а в Северном полушарии в России (Якутия, Оймяконская впадина): -50 °С.



На формирование климата существенное влияние оказывают трехатомные газы атмосферы H_2O, CO_2 и др. (см. раздел 2), которые нелучепрозрачны для длинноволновой инфракрасной радиации, излучаемой земной поверхностью (рис.1.3). Непрерывно увеличивающееся количество этих газов, в результате человеческой деятельности (промышленное производство, работа транспорта и пр.), привело к так называемому парниковому эффекту (рис.1.5) и, соответственно, процессу глобального потепления климата (рис.1.6).

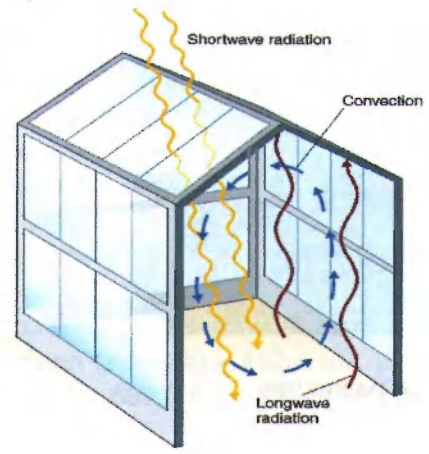


Рис.1.5. Модель парникового эффекта.

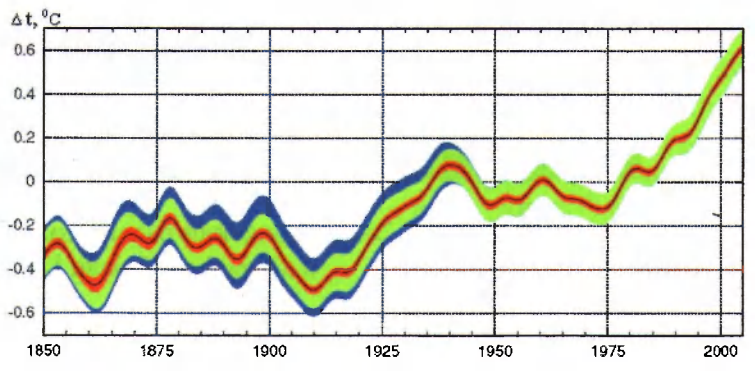


Рис.1.6. Девиация значений $t_{ср.год}$ для северного полушария [139].

По относительной влажности: *10 ...100 [%]*

Основным источником влаги в атмосфере являются экваториальные зоны океанов. Между тропиками Рака (23 N) и Козерога (23 S) солнечные лучи обладают наибольшей интенсивностью, падая практически перпендикулярно поверхности земного шара. Здесь происходит непрерывное испарение огромных масс воды. Воздушно-паровая смесь поднимается вверх, а на ее место с северного и южного полюсов поступают массы холодного воздуха, создавая господствующие нижние потоки воздуха от полюсов к экватору. Теплый увлажненный воздух, поднявшись на высоту 10…12 км, разделяется на два верхних потока, направляющихся к полюсам (рис.1.7, 1.11). На пути следования по мере охлаждения происходит конденсация влаги в виде атмосферных осадков (рис.1.8).

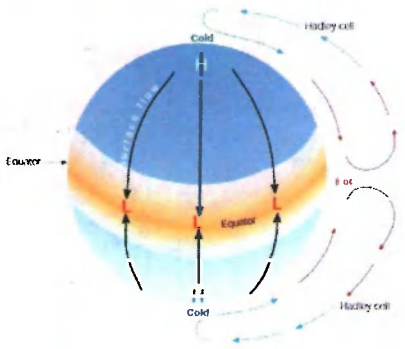
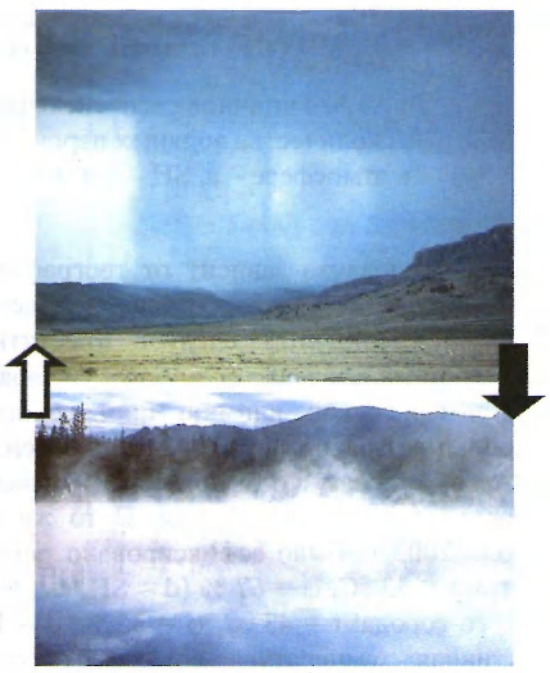


Рис.1.7. Схема циркуляции воздушных масс.



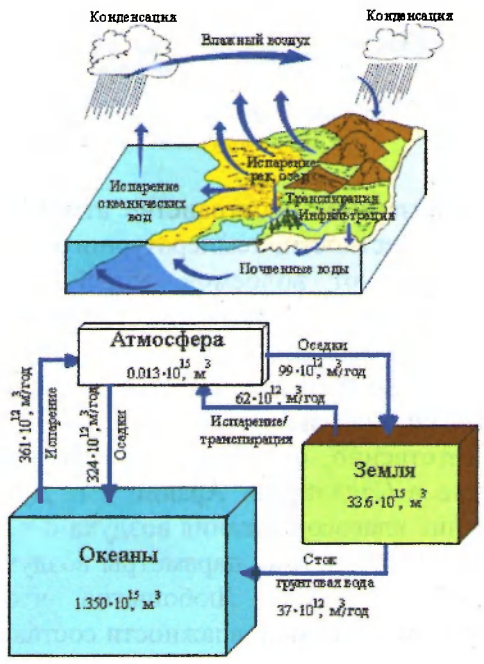


Рис.1.8. Гидрологический цикл.

Таким образом, в атмосфере Земли происходит непрерывная циркуляция масс воздуха и воды. При этом роль парового котла выполняет экваториальная зона, топлива – Солнце, конденсационных аппаратов – полюса, а Земля представляет собой замкнутую дистилляционную установку. В подтверждение данной модели содержание влаги в атмосферном воздухе убывает в направлении от экватора (рис.1.9). На рис. 1.9а видно, что количество водяных паров в атмосфере в тропических широтах (отмечено красным цветом) значительно больше, чем в полярных зонах, примерно в 100 раз. Распределение численных значений удельной влажности (specific humidity SH, см. § 2.2.4) представлено на рис.1.9б.

Необходимо заметить, что эти данные не дают полного представления о климате. Так, большие количества влаги при высоких температурах могут быть равнозначны по степени насыщения воздуха влагой меньшим значениям при более низких температурах воздуха. Для сравнительной оценки климатических зон в условиях, отличающихся по температуре, используют понятие *относительной влажности воздуха* φ (RH, relative humidity, см. § 2.2.2), рис.1.9в. Диапазон амплитудных значений этой величины: 10…100 %.

Максимальная среднегодовая относительная влажность наблюдается в Индонезии на острове Суматра – 93 % и в Бразилии в бассейне реки Амазонка – 90 %. Минимальное среднегодовое значение – 28 % в Судане (г. Хартум).

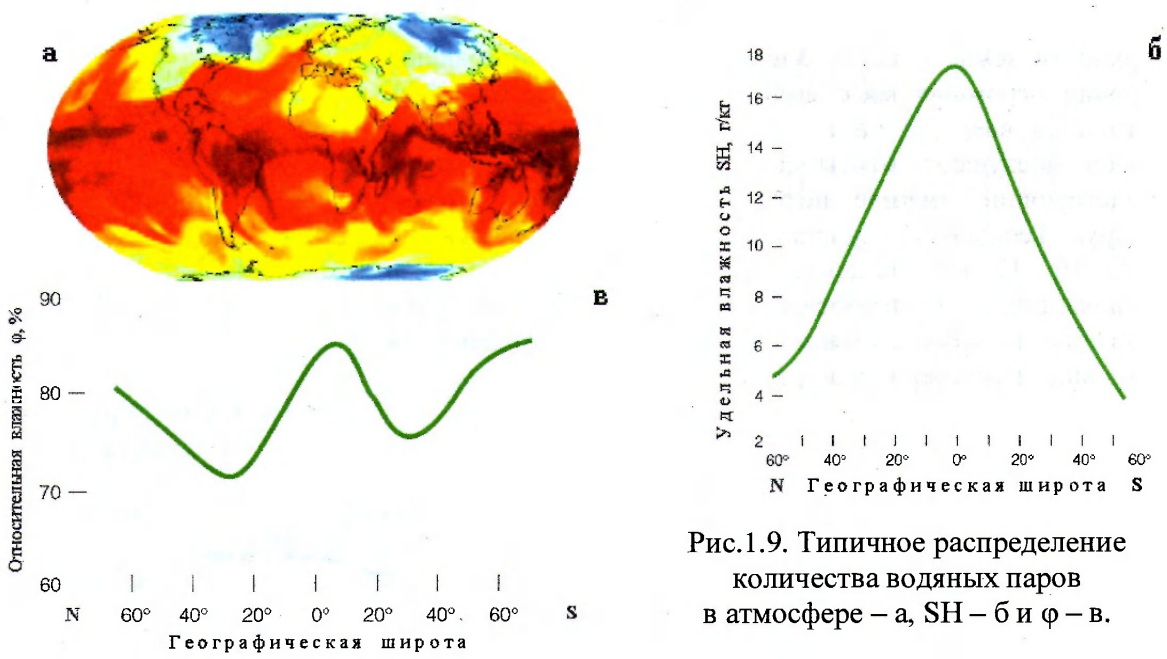


Рис.1.9. Типичное распределение количества водяных паров в атмосфере – а, SH – б и φ – в.

В приземном пространстве атмосферы влажность воздуха зависит от географической широты местности, температурного и ветрового режима, количества осадков, удаленности территории от водоемов, морей и океанов [44]. При этом следует отметить, что формирование климата – сложная многофакторная задача и общие глобальные закономерности не всегда соблюдаются. Например, сухой климат Чили объясняется влиянием холодного арктического течения Гумбольдта. Воды Красного моря и Персидского залива не смягчают сухой климат Саудовской Аравии из-за узкой формы этих водоемов и, соответственно, относительно небольшой поверхности испарения воды. В то же время, именно в Саудовской Аравии в г. Духан 9 июля 2003 г. было зафиксировано рекордное значение влагосодержания воздуха d = 36 г/кг при t = 43 °С, φ = 67 % (d ≈ SH, см. § 2.2.4). Нормативные летние параметры воздуха для этого города: t = 43 °С, φ = 35 %, d = 19 г/кг (прил. X, табл.X.1). Любопытно, что эффективная температура воздуха, ощущаемая человеком, при такой влажности составляет 77,7 ^{0}С.

«Все возникает из воды и все в нее превращается»
– греческий философ и математик Фалéс Милетский (6 век до н.э)



Возвращаясь к гидрологическому циклу, нужно иметь в виду, что кругооборот воды в природе обеспечивается обратимостью процессов испарения и конденсации. Время пребывания молекулы воды в атмосфере в этом цикле, составляющее период обновления атмосферной влаги, – около 10 суток (одна декада). Этот очень малый для природных циклов отрезок времени характеризует динамичность процесса и объясняет тот факт, что, хотя в атмосфере содержится всего лишь около 0,001 % суммарного объема воды (океаны – 97,5 %, земля – 2,4 %), воздух переносит в 30 раз больше влаги, чем способен удержать. Если бы из атмосферного воздуха единовременно был сконденсирован весь водяной пар, то выпавший на землю слой воды имел бы толщину только 2,5 см. Тем не менее, ежегодный уровень осадков в отдельных местностях может достигать высоких значений (рис.1.10) – до 12 м (Индия (Черрапунджа), Колумбия, Гавайи). Наименьшее значение этого показателя – 8 мм/год – район Кайнапс (Чили) [44].

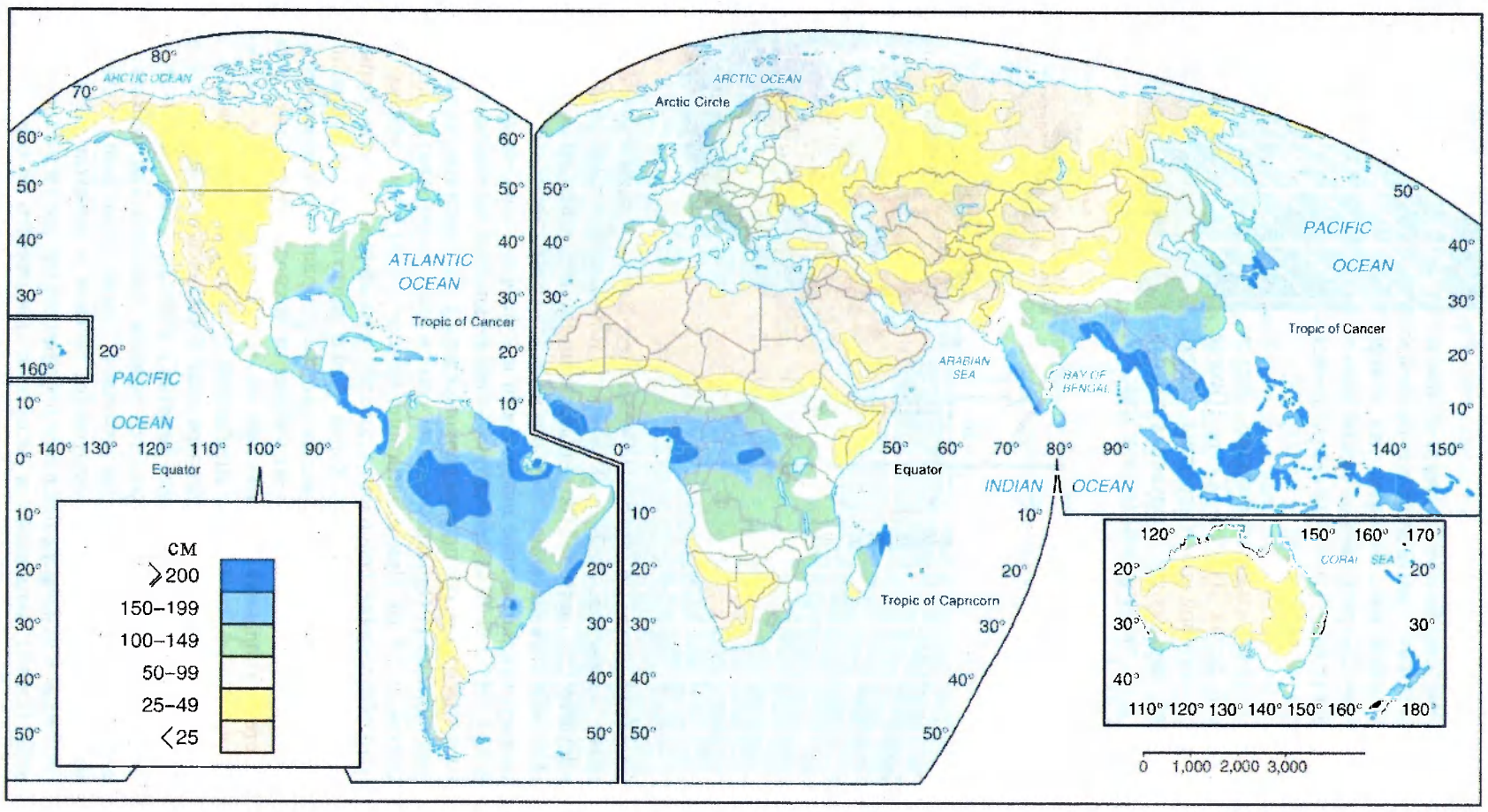


Рис.1.10. Метеорологические данные по количеству выпадающей влаги в различных районах земного шара за годовой цикл.

О гидрологическом цикле было известно еще в древнем Китае в 900 г. до н.э. Основоположник Метеорологии (340 г. до н.э.) Аристотель так описывал это явление природы:

> *«Солнце своим движением обеспечивает процессы обмена, возникновения и распада, с его участием каждый день чистая вода, превращаясь в пар, поднимается в верхние слои, где она охлаждается и конденсируется и, таким образом, возвращается на землю» [121].*



Современную модель гидрологического цикла разработал английский физик Джордж Хэдли (George Hadley) в 1735 г., в которой он определил общие принципы глобальной циркуляции воздушных масс в атмосфере Земли и роль экваториальных зон (рис.1.7, 1.11, Hadley cells) [13, 103].

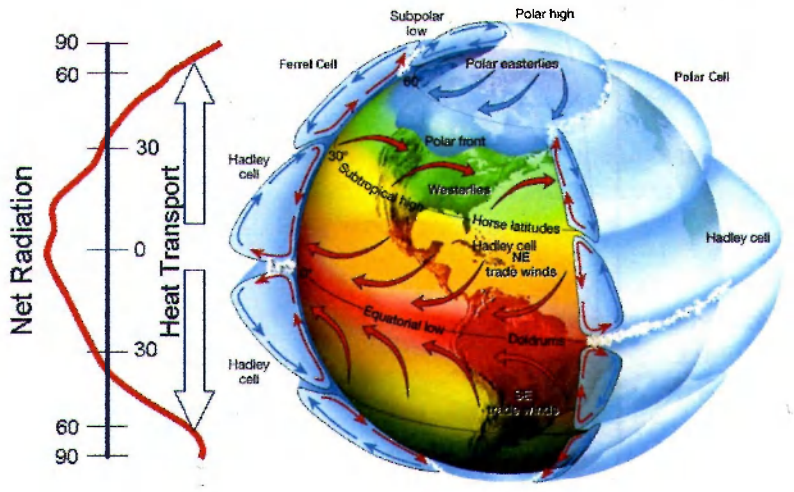


Рис.1.11. Модель циркуляции атмосферы [140] и фотография кучевых облаков.

Самые мощные конвективные ячейки в атмосфере Земли находятся в северном и южном полушариях в поясе от экватора до 20…30 ° широты и называются циркуляцией Хэдли (рис.1.11). Для понимания физической картины этого процесса можно воспользоваться описанием профессора Г.М. Шведа [103]: «Эта конвекция обусловлена межширотным перепадом температуры, возникающим потому, что нагревание поверхности и атмосферы солнечным излучением растет от полюсов к экватору. Вблизи экватора воздух в обеих ячейках поднимается. Поскольку воздух содержит много водяного пара, его подъем сопровождается образованием мощных кучево-дождевых облаков, имеющих вид башен. Одновременно на земном шаре около экватора существует 1500-5000 таких башен высотой до 19 км. При конденсации водяного пара в этих облаках выделяется много тепла - теплота парообразования. Она идет на дополнительный разогрев атмосферы вблизи экватора, что значительно усиливает циркуляцию Хэдли. Тело, движущееся по инерции в инерциальной системе отсчета, при переходе к вращающейся системе координат представляется движущимся по криволинейной траектории. Этот эффект отклонения от прямолинейного движения описывается во вращающейся системе координат как действие на тело силы Кориолиса. Движения атмосферы рассматриваются в системе координат, сцепленной с вращающейся планетой. В этой системе горизонтальные течения отклоняются благодаря силе Кориолиса в северном полушарии направо, в южном налево. Поэтому приповерхностные течения в ячейках Хэдли, направленные к экватору, в обоих полушариях отклоняются на запад. Эти течения известны как постоянно дующие ветры пассаты. Направления вращения Земли и зональной (вдоль параллели) составляющей пассатов противоположны. В результате трения воздушного течения о поверхность планеты в широтном поясе пассатов от Земли к атмосфере приложен постоянный момент силы трения относительно оси вращения планеты. Плечом силы является расстояние поверхности до оси вращения. На широтах выше 30 ° в обоих полушариях к атмосфере от вращающейся Земли приложен момент силы трения противоположного знака, который замедляет вращение атмосферы и равен по абсолютной величине моменту силы зоны пассатов. Чтобы существовал момент силы, замедляющий вращение атмосферы,

зональная составляющая приповерхностного ветра выше 30 ° широты в среднем должна быть направлена с запада на восток. Другими словами, на средних широтах атмосфера должна вращаться быстрее Земли, что и подтверждено наблюдениями. Но указанная зональная составляющая может быть получена благодаря отклоняющему действию силы Кориолиса на поток воздуха, текущий от низких широт к высоким. Постоянное существование такого потока свидетельствует, что в каждом полушарии на средних широтах существует ячейка циркуляции Ферелла, в которой воздух циркулирует в направлении, противоположном тому, которое наблюдается в ячейке Хэдли. Поскольку в ячейках Ферелла приповерхностное течение направлено от теплых низких широт к холодным высоким широтам, циркуляция в них не является термической конвекцией. Это вынужденная конвекция, возникающая в результате сложной саморегулировки движений атмосферы. Течения, связанные с ячейками Ферелла, не наблюдаются так явно, как пассаты, так как они замаскированы сильной циклонической активностью атмосферы. В поясе широт 20…30 ° в результате циркуляции в ячейках Хэдли и Ферелла происходит опускание воздуха. К земной поверхности, таким образом, поступает верхний сухой воздух. Поэтому не случайно, что в этом же широтном поясе находятся пустыни южного полушария в Южной Америке, Африке и Австралии и северного полушария в Северной Америке, Африке и Аравии. Великие пустыни Азии смещены к 30…40 ° широты».

В завершении считаю необходимым привести некоторые новые данные по содержанию влаги в атмосфере, связанные с проявлением процесса глобального потепления климата (рис.1.12, 1.13).



Рис.1.12. Данные НАСА (2005 г.) по распределению водяных паров в атмосфере.

Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) on NASA's Aqua satellite



Рис.1.13. Диаграмма распределения удельного количества атмосферной влаги, в соответствии с географической широтой (данные за 2008 г., отнесенные к показателям 2003 г.).

Согласно исследованиям Британских ученых (University of East Anglia), в период с 1976 г. по 2004 год, средняя поверхностная температура земли повысилась на 0.49 ^{0}C, а содержание водяного пара в атмосфере возросло на 2.2 %. При этом, по их прогнозам, к 2100 году уровень влажности в атмосфере может увеличиться на 10 %. Эти выводы были сделаны в результате обработки всего массива метеорологических наблюдений за XX-е столетие, с учетом новых данных за последние годы. Как считают ученые, вследствие нарушения баланса атмосферы Земли образовался «порочный круг», проявляющийся в автомодельном режиме глобального потепления и повышения уровня атмосферной влаги, где оба явления, благодаря парниковому эффекту, работают одно на другое. Возрастание атмосферной влаги уже привело к усилению тропических циклонов, как по частоте их возникновения, так и по силе воздействия на цивилизацию (см. § 7.2.5.2.2).

На рис.1.12 приведено распределение влаги в атмосфере на уровне 2 миль (3,2 км) над поверхностью Земли, полученное с помощью инфракрасного сканера специального метеорологического спутника NASA в период: лето-осень 2005 г. Эти данные наглядно свидетельствуют о содержании огромного количества водяных паров в тропических широтах и, особенно, над южной частью Азии.

На рис.1.13 представлена диаграмма распределения по географическим широтам (от южных до северных) количества водяных паров, содержащихся в атмосфере в 2008 году, по отношению к соответствующим данным за 2003 г. Заметно увеличение этого показателя более чем вдвое вблизи экватора.

Американские ученые (Texas A&M University) считают, что увеличение уровня атмосферной влаги может привести к удвоению эффекта глобального потепления, наблюдаемого в настоящее время.

"Water vapor is the big player in the atmosphere as far as climate is concerned"
Eric Fetzer, atmospheric scientist,
NASA's Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA

2. УЧЕНИЕ О ВОЗДУХЕ*

Основной запас воздуха находится в нижнем слое атмосферы Земли – тропосфере (дословно «область смешения»), рис.2.1, которая представляет собой механическую смесь различных химических элементов в газообразном состоянии (азот N_2, кислород O_2, аргон Ar, водород H_2, гелий He, неон Ne, озон O_3, криптон Kr, ксенон Xe) и неорганических соединений (водяной пар H_2O, углекислый газ CO_2, метан CH_4 и др.). Эта смесь, известная как атмосферный воздух, несмотря на различие плотностей компонентов, не расслаивается, благодаря постоянному термическому и динамическому перемешиванию. Период перемещения воздушных масс в вертикальном направлении – 1 месяц, за это же время огибают Землю ветры средних широт (пассаты), а воздухообмен между полушариями осуществляется в течение года [70]. Циркуляция воздушных масс в тропосфере формирует погоду и ее изменения. Водяные пары играют определяющую роль в регулировании температуры, т.к. они поглощают солнечную энергию и тепловое излучение поверхности Земли. С высотой содержание H_2O уменьшается (рис.2.2). Температура воздуха снижается в среднем примерно на 1°C при подъеме на каждые 180 м, а давление по зависимости:

$$P = 101{,}3 \exp(-H / 8200),\ \text{кПа}, \qquad (2.1)$$

где H – высота над уровнем моря, м (см. также табл.II.1).

*The General History of the AIR – название фундаментального труда Роберта Бойля (§ 2.1)

Расслоение газов наблюдается в стратосфере – слое, расположенном над тропосферой на высоте 20…50 км. Здесь особую роль для жизни на Земле играет слой озона, который экранирует нашу планету от жесткого солнечного излучения, поглощая большую часть ультрафиолетового спектра.

Атмосфера относительно Земли – тонкий слой. Как уже упоминалось, радиус планеты составляет 6371 км. Толщина двух нижних (наиболее важных для жизни на Земле) слоев атмосферы – тропосферы и стратосферы – 50 км. В привычном для человеческого глаза масштабе это – лист бумаги, обернутой вокруг апельсина (рис.2.1).

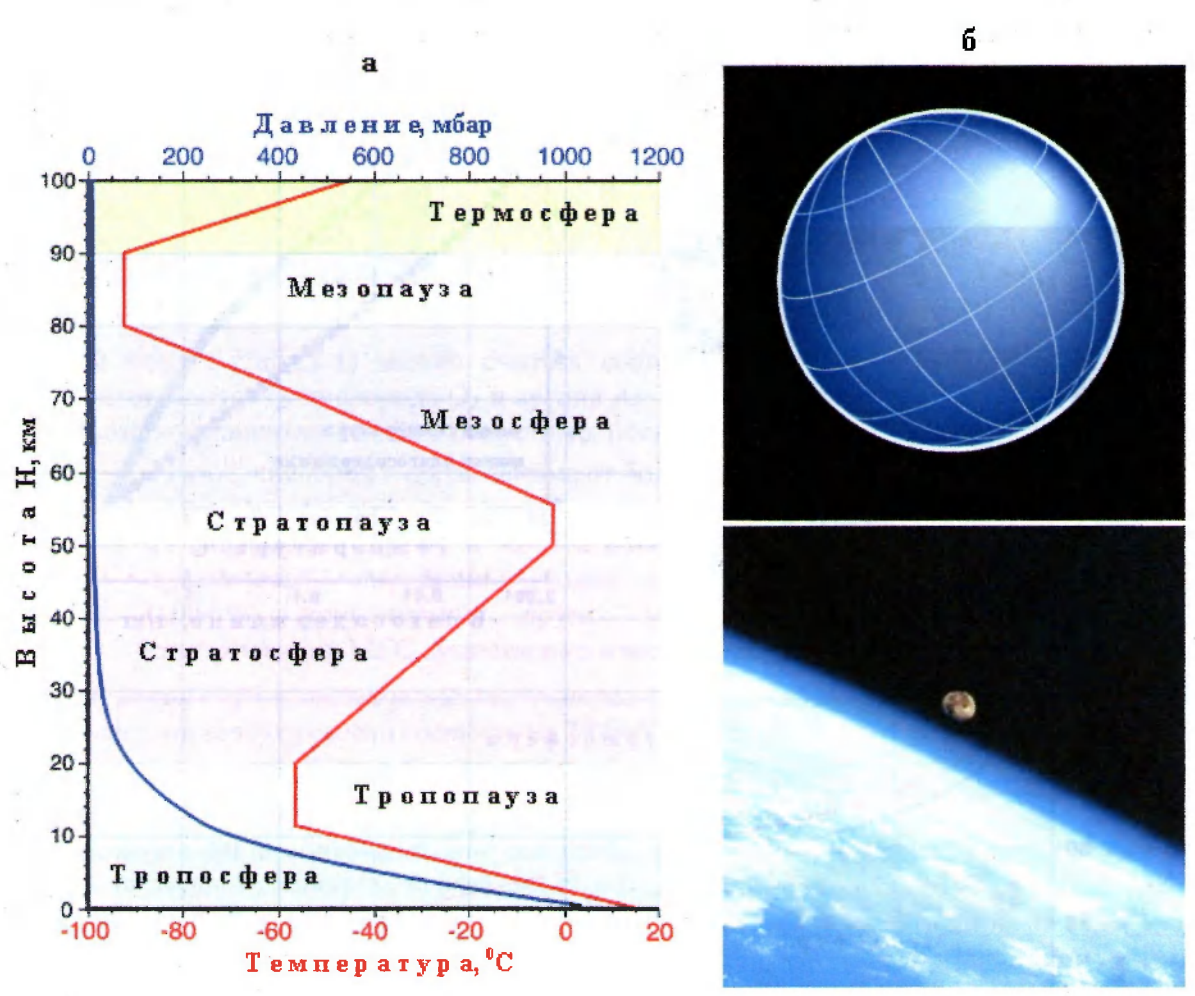


Рис.2.1. Атмосфера Земли: а – распределение давления и температуры; б – изображения.

Слоеное строение атмосферы Земли объясняется поэтапным поглощением солнечного света на пути к Земле. Первым фильтром солнечных лучей является термосфера, где ассимилируется самая коротковолновая часть спектра. При этом термосфера разогревается до 1000…1300 К. Стратосфера обязана своим существованием озону O_3, который поглощает солнечное излучение в диапазоне длин волн 220 нм $< \lambda <$ 290 нм и распадается на молекулярный кислород O_2 и атомарный кислород О. Теплые слои атмосферы чередуются с холодными, между ними происходит обмен энергией. В количественном отношении в термосфере поглощается лишь один процент солнечного излучения – дальний ультрафиолет. Три процента (ближний ультрафиолет) поглощаются озоном стратосферы. Четыре процента (инфракрасный «хвост» спектра) поглощаются водяными парами в верхних слоях тропосферы. Оставшиеся 92 % энергии солнечного света, в диапазоне: 290 нм $< \lambda <$ 2400 нм, приходятся на «окно прозрачности» атмосферы. Значительная его часть (45 %), преимущественно в синей области спектра, рассеивается воздухом, отчего небо голубое [140].

В тропосфере содержится около 80 % всей массы воздуха и более 99 % паров воды. Здесь с высотой содержание влаги уменьшается по зависимости, близкой к экспоненте (рис.2.2, шкала влагосодержания – логарифмическая). Относительная влажность также имеет тенденцию снижаться с высотой (на рисунке не показана) от среднего значения в 80…60 % у поверхности земли до 20...10 % на уровне 9 км ($P_б$ = 300 мбар).



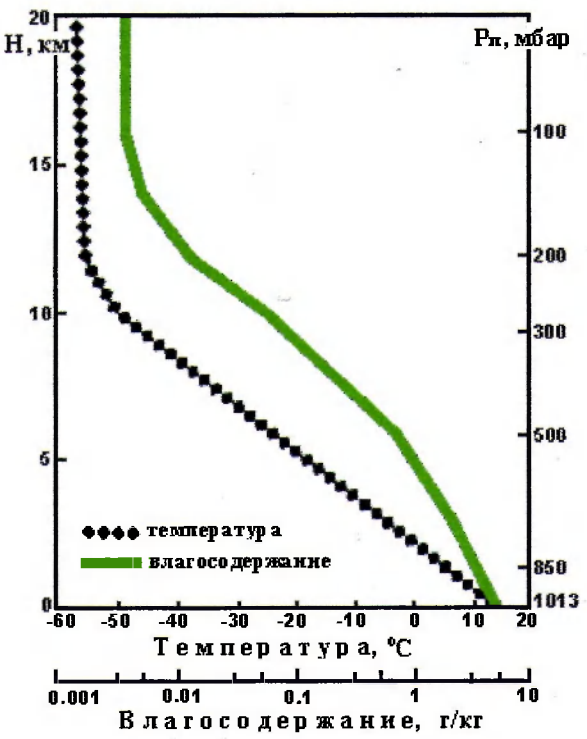


Рис.2.2. Распределение температуры и влагосодержания воздуха по высоте тропосферы.

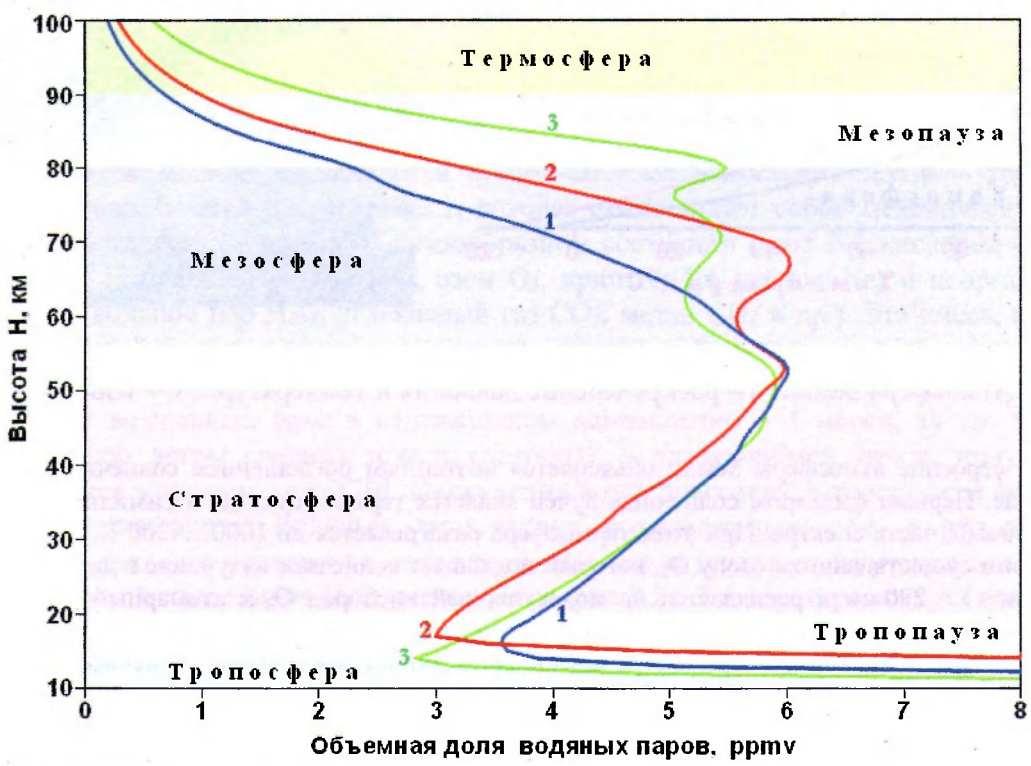


Рис.2.3. Распределение объемного содержания водяных паров в атмосфере: 1 – среднее; 2 – над экватором; 3 – в полярных широтах (летний период) [218].

При использовании воздуха в качестве *рабочего тела* системы кондиционирования его рассматривают в виде бинарной смеси: сухой воздух (*R729*) – водяной пар (*R718*) (рис.2.5, 2.7).

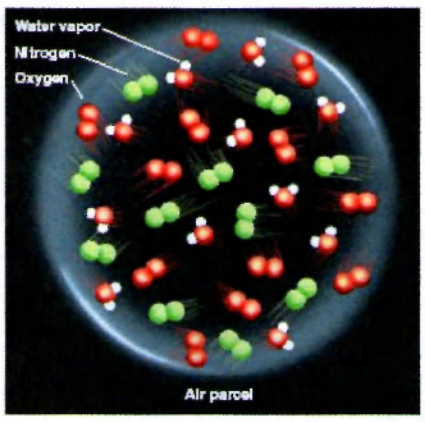


Рис.2.4. Состав атмосферного воздуха.

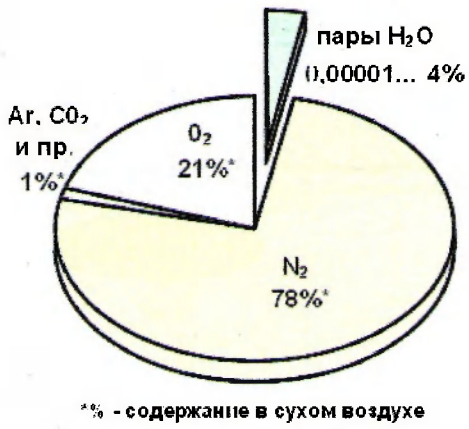


Рис.2.5. Влажный воздух – условно бинарная смесь ($N_2/O_2/Ar - H_20$) [229].

Таблица.2.1. Состав сухого воздуха.

Компонент	Объемная доля, %
N_2	78,08
O_2	20,95
Ar	0,93
CO_2	0,0375
Ne	0,0018
He	0,0005
CH_4	0,00018
H_2	0,00005
SO_2	Следы
Kr	Следы
Xe	Следы
O_3	Следы

Сухой воздух (табл.2.1) можно считать состоящим из трех компонентов: азота N_2, кислорода O_2 и аргона Ar. Пренебрежение остальными компонентами вполне допустимо, поскольку:

1) азот, кислород и аргон занимают более 99,9 % всего объема смеси;

2) содержание N_2, O_2 и Ar в атмосферном воздухе практически постоянно (колебания составляют 0,004 %), концентрации других малых газовых составляющих МГС существенно изменяются.

В расчетах термодинамических параметров принимается, что сухой воздух условно состоит из 78 % N_2, 21 % O_2 и 1 % Ar в объемных долях.

В отношении МГС необходимо еще раз особо отметить тенденцию увеличения концентраций так называемых парниковых газов: CO_2, CH_4, N_2O, NH_3, тропосферного озона и галогенопроизводных углеводородов (а также H_20), что ведет к изменению климата. Содержание углекислого газа CO_2 в результате антропогенной деятельности человека растет со скоростью 1…2 % в год, рис.2.6 [70, 195].

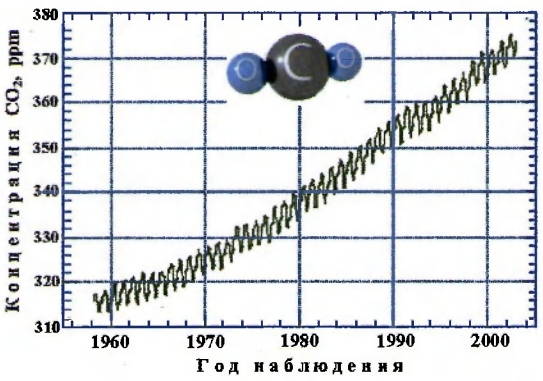
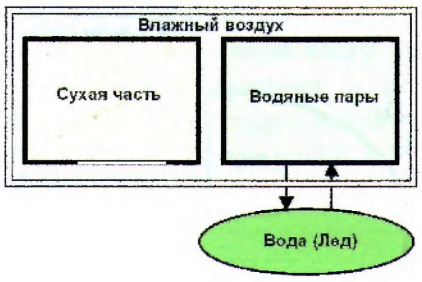


Рис.2.6. График роста концентрации CO_2. ppm – parts per million – $млн^{-1}$ (миллионная часть)

В интервалах величин t и P, характерных для условий кондиционирования (§ 1.4), *состав и агрегатное состояние сухого воздуха не изменяется.* Критическая температура $t_{кр}$, выше которой сухой воздух – неконденсируемый газ, равна -141 ^{0}C, см. прил. IV, S,T-диаграмма R729.

При тех же условиях, вторая часть воздуха (влажного воздуха) – водяной пар, – подвержена значительным изменениям. При атмосферном давлении уменьшение температуры ниже точки росы (§ 2.2.5) приводит к конденсации водяного пара, который переходит жидкую либо твердую фазу и выпадает из смеси (рис.2.7, 2.8). В связи с этим можно сделать два важных вывода:



1) возможность фазового перехода у одного из компонентов смеси отличает влажный воздух от обычной газовой смеси;
2) доля этого компонента в смеси не может быть произвольной, она в зависимости от температуры и давления ограничена определенной величиной, которая отвечает состоянию насыщения.

Рис.2.7. К модели влажного воздуха.

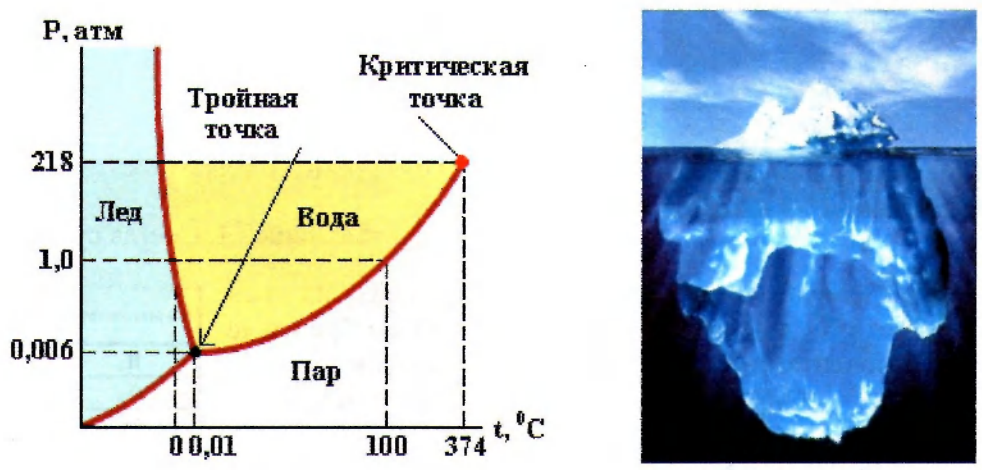


Рис.2.8. Фазовая t, P- диаграмма воды[1] и картина (справа), иллюстрирующие три агрегатных состояния воды.

Различают две характерные области состояний влажного воздуха (рис.2.9):

1. *Область ненасыщенного влажного воздуха*, в которой оба компонента (сухой воздух и влага) находятся в газовом агрегатном состоянии. С точки зрения термодинамики это гомогенная смесь сухого воздуха и перегретого[2] водяного пара. В связи с этим *оба компонента смеси могут считаться идеальными газами*[3]. Данная область характерна для процессов кондиционирования воздуха.

2. *Область пересыщенного влажного воздуха*, в которой смесь состоит из двух (либо трех) фаз: газовой фазы и конденсата: при положительных температурах – вода (обычно наблюдается в виде тумана (влажного пара – wet steam) – мелко распыленных капель), при отрицательных температурах – лед. Эта область используется при расчете воздушного холодильного цикла [75].

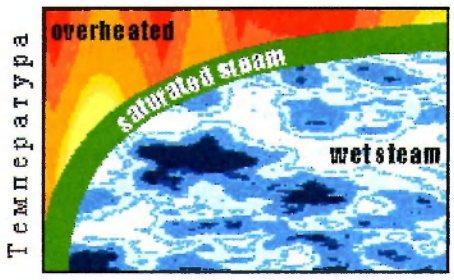


Рис.2.9. P, t- диаграмма влажного воздуха.

На границе указанных областей в системе "влажный воздух" устанавливается динамическое равновесие: *состояние насыщения (saturated steam – сухой насыщенный пар).*

[1] полная версия фазовой диаграммы воды размещена в приложении IV

[2] использование термина "перегретый пар" (overheated) объясняется тем, что температура пара в этом состоянии выше температуры насыщения

[3] впервые отметил английский ученый Джон Дальтон в 1801 г.

На рис.2.10 также показан разный темп изменения температуры воздуха в области ненасыщенного влажного воздуха – 10 °С/1 км (dry adiabatic rate) и в области насыщенного влажного воздуха – 5…6 °С/1 км (wet adiabatic rate).

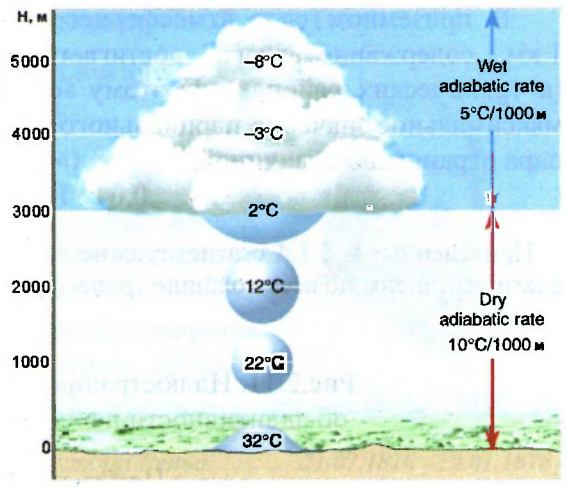


Рис.2.10. Две области состояний влажного воздуха в атмосфере.

Для математического описания смеси "влажный воздух" необходимо знать число независимых параметров, определяющих состояние смеси. Это можно сделать на основании уравнения связи:

$$N = 2 + C - F, \qquad (2.2)$$

где N – число параметров, C – число компонентов в смеси,
F – число сосуществующих фаз системы.

В области ненасыщенного влажного воздуха N = 3 (F = 1 (одновариантная система), C = 2, N = 2 + 2 – 1 = 3).

Для сухого воздуха, водяного пара либо жидкости, N = 2 (F = 1, C = 1).

Для двухфазной системы, находящейся в равновесии, N = 1 (F = 2, C = 1) – кривая равновесия, рис.2.9.

В случае однокомпонетной системы, состоящей из трех фаз, N = 0 (F = 3, C = 1) – тройная точка фазовой диаграммы воды.

Данное уравнение именуется правилом фаз Гиббса в честь его автора – американского физика Джозайя Уилларда Гиббса (получено в 1875 г.) [109].



Таким образом, в задачах кондиционирования состояние влажного воздуха определяется тремя независимыми параметрами.

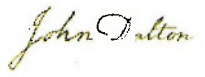
Обычно используют давление P и температуру t, поскольку их легко измерить, третий параметр определяется составом смеси. Для влажного воздуха параметр состава является одной из характеристик влажности: абсолютная влажность $\rho_п$, относительная влажность φ, плотность ρ, удельная влажность f, влагосодержание d, парциальное давление водяного пара $P_п$, температура точки росы t_d (τ), температура воздуха по мокрому термометру $t_м$ (§ 2.2).

2.1. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ И ИХ ПРИМЕНИМОСТЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

На влажный воздух как смесь идеальных[1] газов распространяются все известные физические законы идеальных газов. Каждый компонент занимает весь объем смеси V, имеет температуру смеси T и находится под своим парциальным[2] давлением.

В соответствии с законом *Дж. Дальтона* (установлен в 1801 году экспериментальным путем), давление смеси, т.е. *давление влажного воздуха, равно сумме парциальных давлений сухого воздуха P_c и водяного пара P_n* (рис.2.11):

$$P = P_c + P_п. \qquad (2.3)$$



В обычных условиях функционирования СКВ: $P \approx P_б$ – барометрическое давление.

[1] идеальный газ – гипотетический газ, состоящий из идентичных частиц бесконечно малого размера, в котором отсутствует межмолекулярное взаимодействие (размер молекул намного меньше расстояния между ними)

[2] от лат. partialis – частичный

В приземном слое атмосферного воздуха высотой 1 км содержание влаги достигает 4 % к объему (в тропических районах). Поэтому можно считать, что максимальное значение парциального давления водяного пара ограничено величиной:

$$0{,}04 \cdot 101{,}3 \approx 4 \text{ кПа}.$$

Приведенные в § 1.4 статистические данные о содержании влаги усреднены по всей толщине тропосферы.

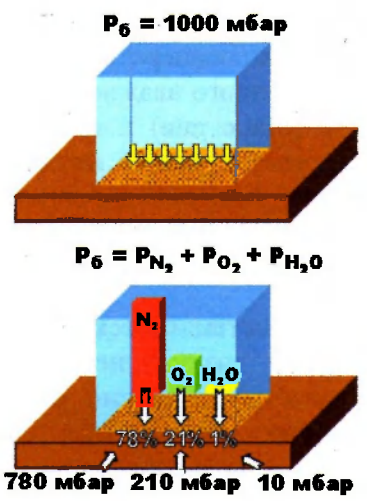
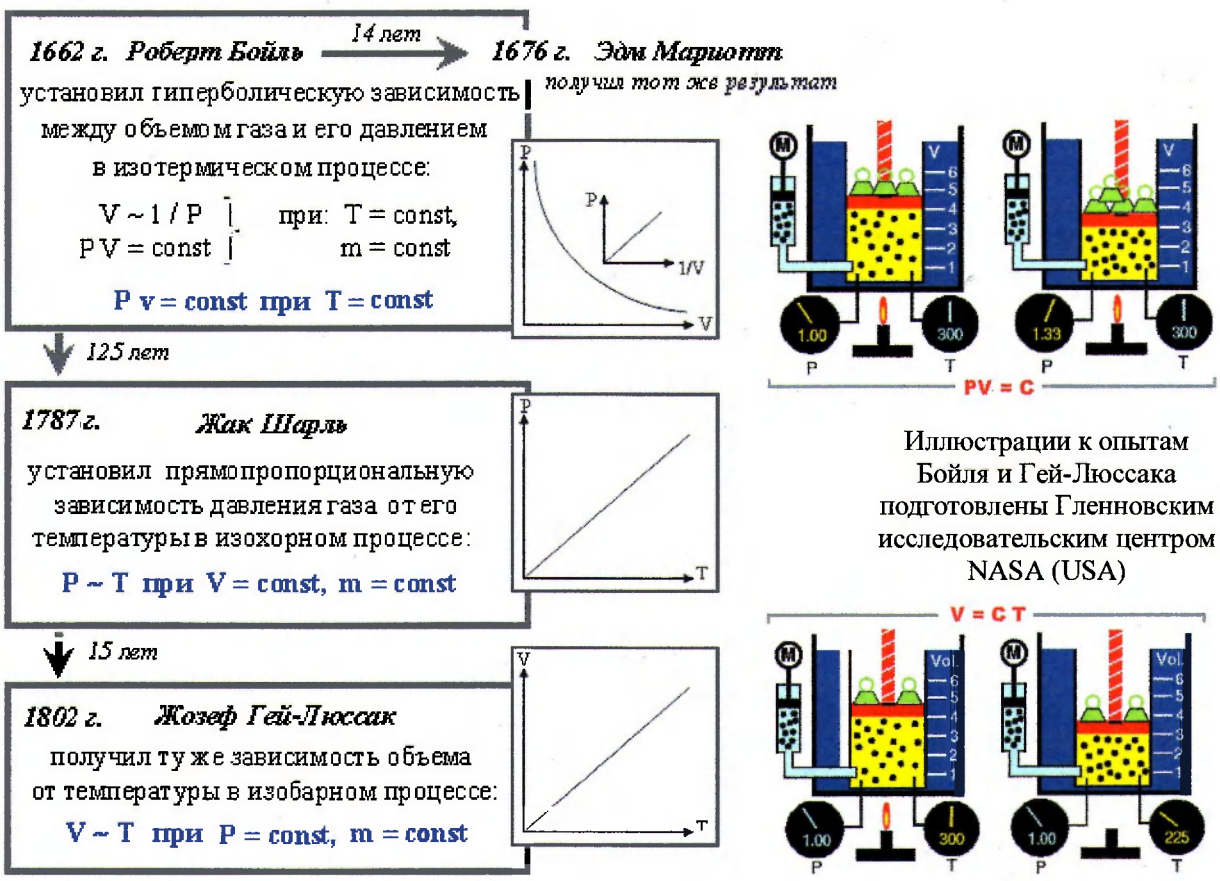


Рис.2.11. Иллюстрация к закону Дальтона об аддитивности парциальных давлений.

[1 мбар = 1 гПа]

В качестве уравнения состояния воздуха может быть использовано уравнение Клапейрона – Менделеева, предложенное на основании анализа результатов экспериментов Бойля, Мариотта, Шарля и Гей-Люссака примерно через два столетия после опубликования первой работы (рис.2.12).



Иллюстрации к опытам Бойля и Гей-Люссака подготовлены Гленновским исследовательским центром NASA (USA)

Рис.2.12. Хронология экспериментальных исследований, результаты которых возведены в ранг физических законов идеальных газов.

Исследования этих ученых – классический пример научного метода изучения влияния различных факторов на определенную физическую величину посредством получения зависимости от каждой (одной) переменной при фиксировании других на неизменном уровне.

Поскольку P v = const, P ~ T (V ~ T), то очевидно, что P v ~ T.

Заметив это, *Бенуа П. Э. Клапейрон* в 1834 году предложил уравнение для описания состояния 1 кг идеального газа:

$$P \cdot v = R \cdot T, \qquad (2.4)$$

где R – коэффициент пропорциональности, Дж/(кг·К) – был назван газовой постоянной. Каждому газу отвечает свое определенное значение R.



Henri Victor Regnault
21.07.1810 –19.01.1878

Физический смысл газовой постоянной R = P v/ T – работа расширения 1 кг идеального газа при его нагревании на 1° в изобарном процессе (§ 2.3).

Обозначение газовой константы R принято в честь выдающегося французского ученого-экспериментатора Анри Виктора Реньо.

Дмитрий Иванович Менделеев использовал гипотезу итальянского ученого *Амедео Авогадро* (1811 г.) о том, что одинаковые объемы газа (любого типа) при одинаковом давлении и температуре должны содержать равные количества молекул газа (рис.2.13), и в 1874 году записал уравнение Клапейрона для 1 кмоль газа:

$$P \mu v = \mu R T, \qquad (2.4^*)$$

где μ – молекулярная масса, кг/кмоль;
μv – объем 1 кмоль газа,
μv = idem для любого газа при P = idem, T = idem.

Так появилось понятие универсальной газовой постоянной μR, не зависящей от типа газа.

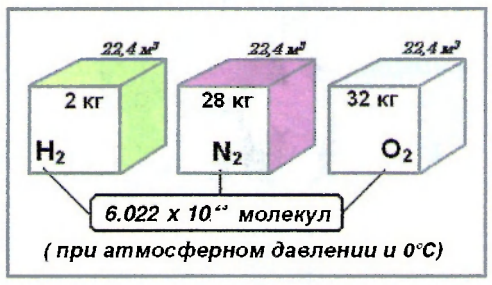


Рис.2.13. Иллюстрация к закону Авогадро.

Для нормальных условий ($P_б$ = 101,325 кПа, t = 0 °C (T = 273,15 K)):

$$\mu v_o = 22{,}4 \text{ л/моль } (м^3/\text{кмоль}),$$

$$\mu R = 101325 \cdot 22{,}4146 / 273{,}15 = 8314 \text{ Дж/(кмоль К)}.$$

Универсальную газовую константу также называют числом Реньо.

Таким образом, *газовая постоянная* любого газа R = 8314 / μ, Дж/(кг К). (2.5)

Для смеси величина μ:

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} r_i \mu_i, \text{ кг/кмоль}, \qquad (2.6)$$

где r_i – объемная доля компонентов;
μ_i – молекулярная масса, кг/кмоль.

μ, кг/кмоль			
Азот	N		14
Кислород	O		16
Водород	H		1
Вода	H_2O		18

Для сухого воздуха:

$\mu_{с.в} = 0{,}78\ \mu N_2 + 0{,}21 \mu O_2 + 0{,}01 \mu Ar = 0{,}78 \cdot 28 + 0{,}21 \cdot 32 + 0{,}01 \cdot 40 =$
$= 28{,}96$ кг/кмоль; $R_{с.в} = 287{,}1$ Дж/(кг·К).

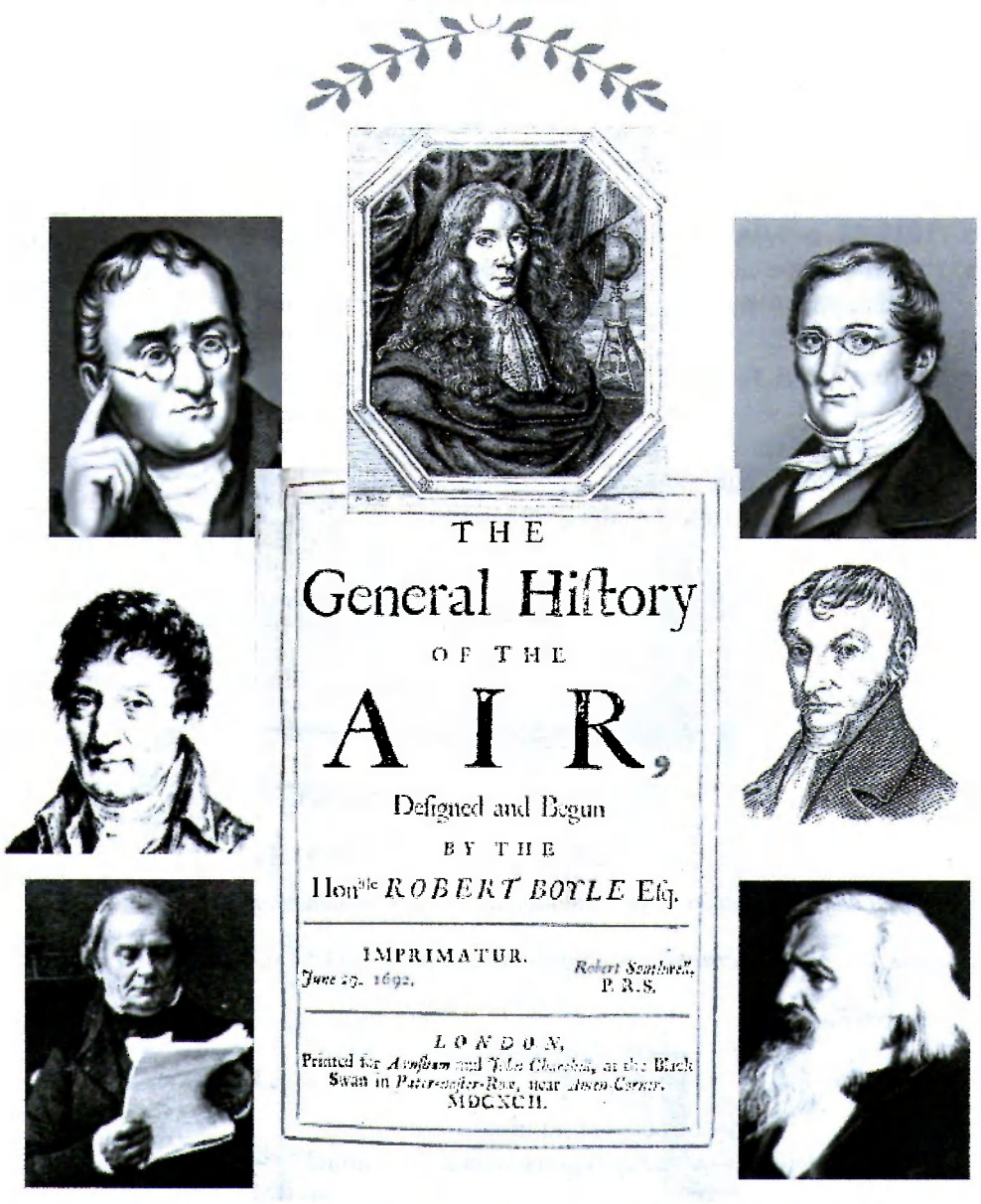
Для водяного пара: $\mu_п = 18$ кг/кмоль; $R_п = 461{,}9$ Дж/(кг·К).

Справка: моль (грамм-молекула) – единица количества чистого вещества; количество вещества в граммах (кг) в одном моле (кмоле) равно молекулярной массе вещества; моль любого вещества содержит одинаковое количество молекул – $6,0221367 \cdot 10^{23} = N_A$ – *число Авогадро*; один моль любого газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 л.

«Великие истины понятны и доступны каждому…», Д.И. Писарев,
при этом всегда следует чтить их первооткрывателей, автор

Учение о Воздухе создавали: Роберт Бойль
25.01.1627 – 30.12.1691

Джон Дальтон 06.09.1766 – 27.07.1844
Жак Александр Сезар Шарль 12.11.1746 – 07.04.1823
Бенуа Поль Эмиль Клапейрон 26.01.1799 – 28.01.1864
Жозеф Луи Гей-Люссак 06.12.1778 – 09.05.1850
Амедео Авогадро 09.06.1776 – 09.07.1856
Дмитрий Иванович Менделеев 08.02.1834 – 02.02.1907



В этом составе ученых также должен быть Эдм Марриот (1620 –1684)
(изображение, к сожалению, не сохранилось) со своей работой «Опыт о природе воздуха» (1676).

Центральная фигура коллажа – автор первого газового физического закона, великий ирландец Роберт Бойль (по праву считается отцом химии «The Father of Chemistry», вклад которого в данную науку оценивается также высоко, как вклад Коперника в космологию).

Фундаментальный труд «The General History of the Air» о воздухе и его свойствах достопочтимого Роберта Бойля, эсквайра (The Hon^ble ROBERT BOYLE, Esq.) был издан в Лондоне, в 1692 году, через полгода после кончины Бойля (хранится в исторической химической библиотеке Roy.G.Neville. Historical Chemical. Heritage Foundation Collections).

Применимость физических законов идеального газа для системы влажный воздух можно оценить величиной отклонения Z (фактора сжимаемости) [43]:

$$Z = Pv / RT, \qquad (2.4')$$

где P,v – данные реального газа.

В случае идеального газа Z = 1. На рис.2.14 представлена зависимость фактора сжимаемости Z для сухого воздуха в широком диапазоне давлений и температур. В области параметров P и T, характерных для функционирования систем кондиционирования воздуха, Z имеет очень малые отклонения от единицы (менее 1 %), как для сухого воздуха, так и для насыщенных водяных паров (табл.2.2).

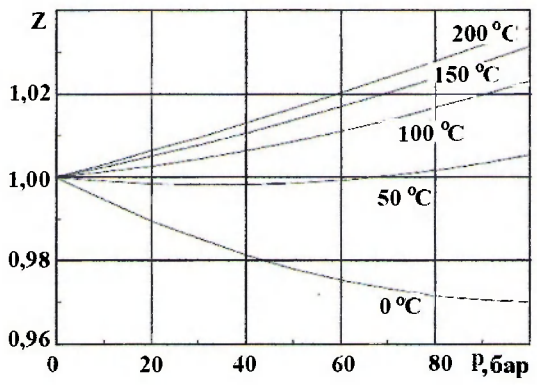


Рис.2.14. Зависимость Z (P, t) сухого воздуха.

Таблица 2.2. Зависимость Z (t) насыщенных водяных паров при $P_б$ = 1,013 бар.

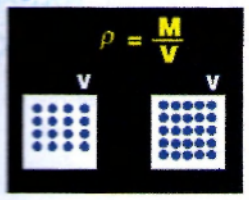
t, °C	0	10	20	30	50	70
Z	1,007	1,000	0,999	0,996	0,994	0,992

Величина Z сухого воздуха в этом же диапазоне температур при $P_б$ равна 0,996.
Расчеты Z произведены по уравнению 2.4', в соответствии со справочными данными [9].

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Водяной (перегретый) пар – невидимый, не имеющий запаха газ, присутствие которого в окружающем нас воздухе непосредственно не определяется ни одним из пяти органов чувств человека. Мы ощущаем его только в случае дискомфорта при повышенной влажности или сухости. Тем не менее, нам известны физические параметры, характеризующие влажность воздуха, и приборы для их измерения.

2.2.1. АБСОЛЮТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ



Абсолютная влажность воздуха (absolute humidity) – массовое содержание водяного пара в 1 м³ воздуха, равнозначна понятию плотности водяного пара (vapor density): $\rho_п$

$$\rho_п = m_п / V . \qquad (2.7)$$

В соответствии с уравнением состояния (2.4): $\rho_п = 1/v_п = P_п /(R_п T)$. (2.8)

В численном выражении: $\rho_п = P_п /(461{,}9\ T)$, кг/м³ ($P_п$ [Па], T [K]), (2.8')

либо $\rho_п = 2{,}16\ P_п /T$, кг/ м³ ($P_п$ [кПа], T [K]). (2.8")

2.2.2. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ

φ Отношение абсолютной влажности воздуха $\rho_п$ к максимально возможной $\rho_п$" при данной температуре называют *относительной влажностью* φ (relative humidity, RH):

$$\varphi = \rho_п / \rho_п", \text{ при } t = const, \qquad (2.9)$$

Состояние воздуха, в котором достигается максимальное количество водяного пара $\rho_п = \rho_п$" без образования конденсата, называется *состоянием насыщения* (saturation).

Для идеальных газов отношение плотностей в уравнении 2.9 можно заменить отношением парциальных давлений водяного пара. Поскольку $\rho_п = P_п /(R_п T)$, $\rho_п'' = P_п''/(R_п T)$,

то $$\varphi = P_п / P_п'', \text{ при } t = const, \qquad (2.9^*)$$

где $P_п''$ – парциальное давление (упругость) водяных паров в состоянии насыщения.

Величина φ выражается в долях единицы либо в процентах (%). Так как пределы изменения парциального давления пара $P_п = 0 \ldots P_п''$, то в случае сухого воздуха $\varphi = 0$, насыщенного: $\varphi = 1$ (100 %).

В термодинамических диаграммах водяного пара, некоторому состоянию пара (т. В) отвечает вполне определенное состояние насыщения (т. Н), которое может быть достигнуто в изотермическом процессе (рис.2.15) [21, 97].

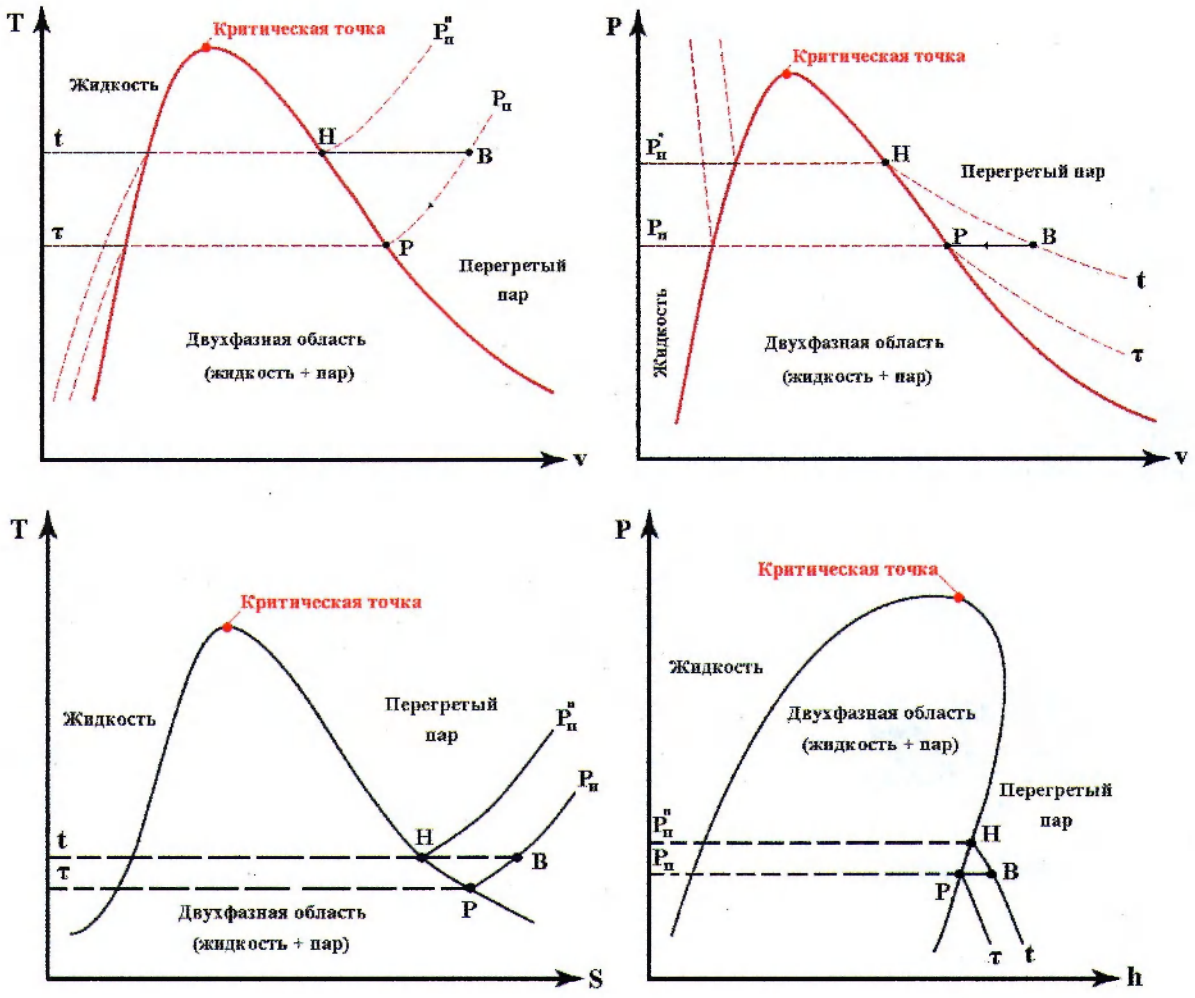


Рис.2.15. Термодинамические v,T; v,P; S,T (S – энтропия); h,P (h – энтальпия) диаграммы водяного пара:
P – точка росы, τ – температура точки росы.

Величина φ (RH) является мерой насыщения воздуха влагой при данной температуре.

"A dimensionless ratio, expressed in percent (% RH), of the amount of atmospheric moisture present relative to the amount that would be present if the air were saturated. Since the latter amount is dependent on temperature, relative humidity is a function of both moisture content and temperature. As such, relative humidity by itself does not directly indicate the actual amount of atmospheric moisture present" – определение относительной влажности NOAA – старейшего центра изучения климата, см. с. 30.

С ростом температуры воздух способен ассимилировать большее количество водяных паров $\rho_п$" (рис.2.16, кривая равновесия φ = 100 %). Так, например, при 30 °С воздух в насыщенном состоянии содержит в 3,2 раза больше влаги, чем при 10 ^{0}С. Поэтому, при постоянном количестве влаги в воздухе $\rho_п$ ($P_п$ = const), относительная влажность φ изменяется вслед за величиной $\rho_п$" (t) ($P_п$" (t)).

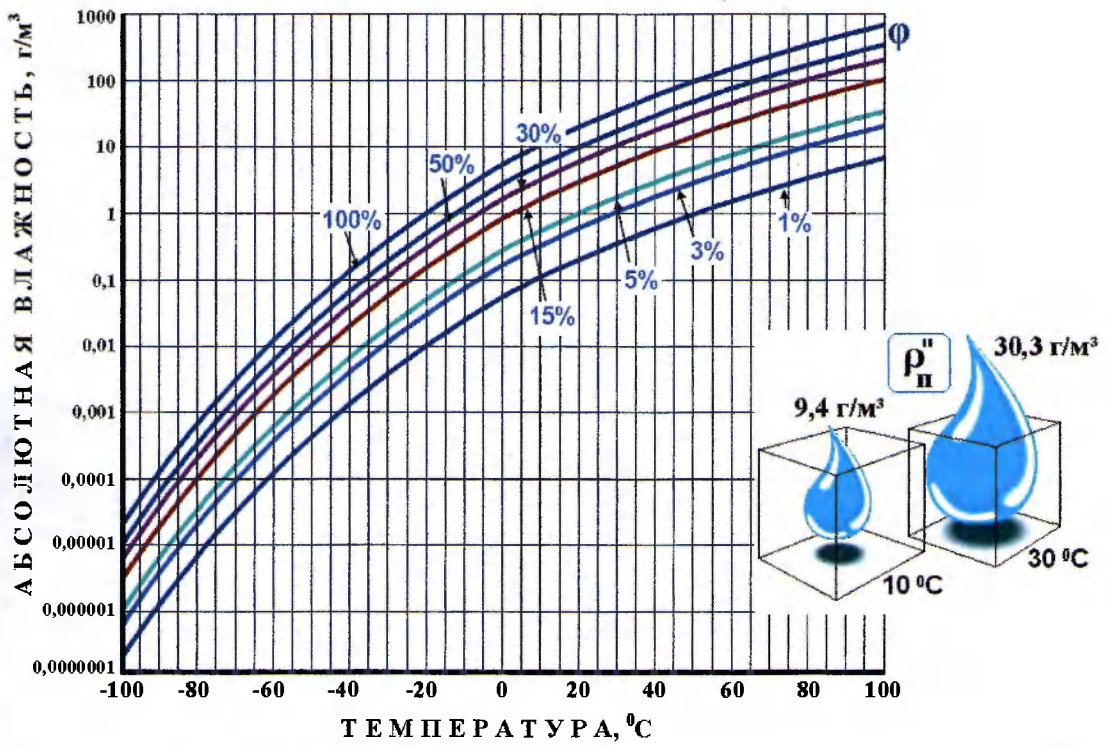
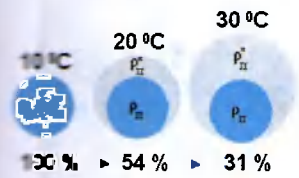
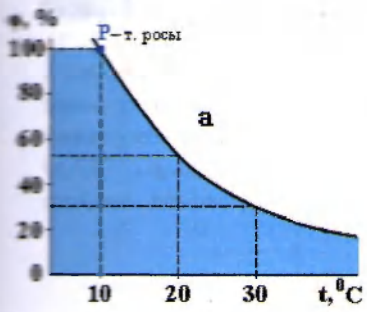


Рис.2.16. Зависимость $\rho_п = f(\varphi, t)$.



Если насыщенный водяными парами воздух (φ = 100 %, t = 10 °С) нагреть, то его относительная влажность уменьшится и составит: 54 % при t = 20 °С, 31 % при t = 30 °С, соответственно, (рис.2.17а).



По этой же причине зимний наружный воздух с параметрами t = -10 ^{0}С и φ = 80 %, просачивающийся в теплый дом с t = 20 °С, изменяет значение φ до 10 % (рис.2.17б).

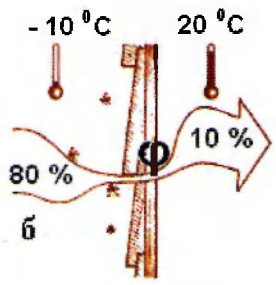


Рис. 2.17. К изменению относительной влажности φ от температуры t.

Другой наглядной иллюстрацией этого явления могут служить суточные колебания относительной влажности атмосферного воздуха, которые наблюдаются в «дни без осадков» при практически постоянном содержании влаги (рис.2.18). В утренние и вечерние часы значения φ максимальны. В дневное время, с увеличением температуры, φ воздуха уменьшается.



Рис.2.18. Распределение параметров атмосферного воздуха в течение суток.

2.2.3. ПЛОТНОСТЬ

ρ Плотность влажного воздуха как параметр газовой смеси – величина аддитивная:

$$\rho = (m_c + m_п)/V = \rho_c + \rho_п, \qquad (2.10)$$

где m_c, ρ_c – масса и плотность сухой части смеси.

Выражение величины ρ_c аналогично $\rho_п$ (2.8): $\rho_c = P_c/(R_{с.в}T)$. (2.11)

Таким образом: $\rho = P_c/(R_{с.в}\,T) + P_п/(R_п\,T) = (P_б - P_п)/(R_{с.в}\,T) + P_п/(R_п T)$,

$$\rho = P_б/(R_{с.в}T) - (P_п/T)(1/R_{с.в} - 1/R_п). \qquad (2.12)$$

В численном выражении:

$$\rho = (3{,}483\,P_б - 1{,}318\,P_п)/T, \text{ кг/м}^3, \qquad (2.12')$$

либо $\rho = (3{,}483\,P_б - 1{,}318\,\varphi\,P_п")/T$, кг/м³, здесь $P_б$, $P_п$, $P_п$" [кПа], T [K]. (2.12")

Из уравнения 2.12" видно, что с увеличением t (T) и φ плотность воздуха уменьшается (рис.2.19, 2.20).

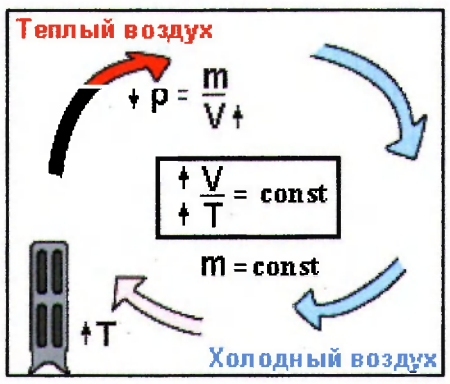
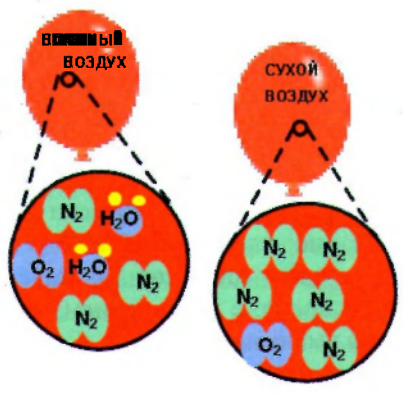


Рис.2.19. Влияние температуры на плотность воздуха.



Наглядной иллюстрацией того, что при нагревании воздуха его плотность уменьшается и теплый воздух поднимается, могут служить летательные аппараты – аэростаты (*воздушные шары), использующие различного рода горелки. Первооткрывателями тепловых воздушных шаров считают французов – братьев Жозефа и Этьена Монгольфье. Их первый шар (1782 г.) объемом 1 м³ в шелковой оболочке поднялся на высоту 30 м. Для нагревания воздуха Монгольфье сжигали мокрую солому, смешанную с шерстью и бумагой.*

*Влажный воздух легче, чем сухой**, т.к. его молекулярная масса $\mu_{вл\,в}$ меньше. Сухой воздух – условно однокомпонентный газ с молекулярной массой $\mu_{с.в}$ = 28,96 кг/кмоль, а влажный – двухкомпонентный, в котором второй компонент – водяной пар – имеет меньшую молекулярную массу $\mu_п$ = 18 кг/кмоль. Поэтому, в соответствии с уравнением 2.6: $\mu_{вл.в} < \mu_{с\,в}$. Для атмосферного воздуха с максимальной объемной долей пара 4%: $\mu_{вл.в} = 0{,}96 \cdot 28{,}96 + 0{,}04 \cdot 18 = 28{,}5$ кг/кмоль.



**первым это отметил Исаак Ньютон в своем фундаментальном труде «Оптика», опубликованном в 1704 г.*

В метеорологии области низкого атмосферного давления (циклоны) ассоциируются с влажным воздухом, а области высокого давления (антициклоны) с сухим воздухом.



Сухого воздуха со значением $\varphi = 0$ в природе не существует. Это состояние можно достичь только в процессе обработки (осушения) воздуха. Наименьшую плотность имеет воздух, насыщенный водяными парами при $\varphi = 1$.

Плотность воздуха невелика и составляет при нормальных условиях и $\varphi = 0$: 1,293 кг/м^3, что в 773 раза меньше плотности воды ($\rho_w \approx 1000$ кг/м^3).



Для уровня температур ≤ 30 °С различие плотностей влажного и сухого воздуха несущественно.

Например, при t = 20 °С величина ρ, кг/м^3: 1,194 ($\varphi = 0,6$); 1,197 ($\varphi = 0,3$); 1,2 ($\varphi = 0$).

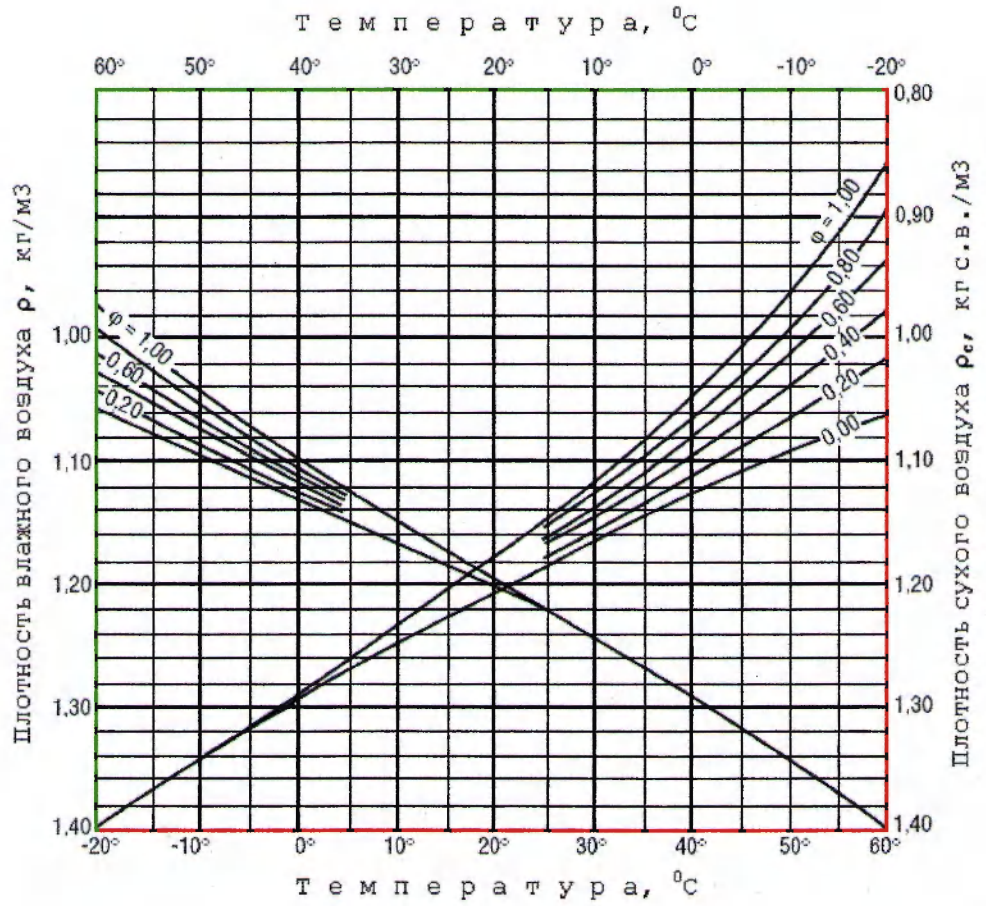
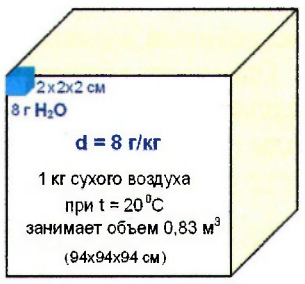


Рис.2.20. Зависимость плотности влажного воздуха ρ и сухой части влажного воздуха ρ_c от t и φ для $P_б$ = 101,325 кПа.

2.2.4. УДЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ, ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ И ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ

f Удельная *влажность* (specific humidity, SH) – масса водяных паров, содержащаяся в 1 кг влажного воздуха:

$$f = m_п / m_в, \quad кг\ влаги\ /\ кг\ вл.в. \qquad (2.13)$$



d При изменении массы влажного воздуха в процессе его обработки в СКВ (осушение, увлажнение) количество содержащегося в нем сухого воздуха остается неизменным. Поэтому удобно количество влаги в паро-воздушной смеси относить к 1 кг сухой части. Исходя из этих соображений, используется понятие *влагосодержания* (moisture content, humidity ratio, mixing ratio) d, *кг влаги/ кг с.ч*:

Величина d очень мала, и поэтому ее часто выражают в г/кг

$$d = m_п / m_с = (R_{с.в} / R_п)\ (P_п / P_с) = (287{,}1/461{,}9)\ P_п / (P_б - P_п),$$

$$d = 0{,}622\ P_п / (P_б - P_п). \qquad (2.14)$$

С учетом уравнения 2.9*: $d = 0{,}622\ P_п'' / [(P_б / \varphi) - P_п'']$. (2.14*)

Масса влажного воздуха $m_в = m_с (1 + d)$. (2.15)

Удельная влажность представляет интерес исключительно как параметр влажного воздуха, который используется в метеорологии. При расчете процессов кондиционирования воздуха f, как правило, не применяется. Величина f связана с влагосодержанием d следующим образом:

$$f = d/(1 + d) < d, \text{ однако, поскольку } d \ll 1, \text{ то } f \approx d, \qquad (2.13*)$$

например, при t = 25 °C и $\varphi = 0{,}5$ ($P_б = 101{,}325$ кПа): f = 9.7779 г/кг, d = 9.8744 г/кг.

Уравнение 2.14* связывает термические параметры влажного воздуха ($P_п''(t)$) с параметрами состава (d и φ) и является, по определению проф. Загоруйко В.А., *первым фундаментальным уравнением состояния влажного воздуха*, причем величина φ используется в качестве измерителя влажности [32]. Последнему замечанию есть объяснение. Из всех рассмотренных характеристик влажности только величина φ может быть легко и достоверно измерена (известно более 40 методов измерения [17, 21, 37, 110]). Абсолютная влажность $\rho_п$ может быть измерена исключительно абсолютными методами (метод разделения, метод полного поглощения и др.), требующими специальных лабораторных условий, что неприемлемо для инженерной практики. Величину парциального давления водяных паров $P_п$, представляющую собой лишь часть общего давления всех компонентов смеси, невозможно определить методом прямого измерения.

$P_п''$ Что касается второй физической величины в правой части уравнения (9*) – $P_п''$, то, поскольку она зависит только от температуры, ее можно измерить довольно простым способом. Сосуд с мановакуумметром предварительно вакуумируют (P = 0), а затем вводят в него воду. Фиксируемое прибором давление в сосуде повышается вследствие испарения водяных паров, и его установившееся значение будет соответствовать парциальному давлению насыщенных водяных паров $P_п''$ ($P_с = 0$) при данной температуре t (рис.2.21, 2.22).

Состояние насыщения (saturation) можно определить как состояние равновесия системы влажный воздух – вода, при котором:

количество испаряющихся паров равно количеству конденсирующихся паров.

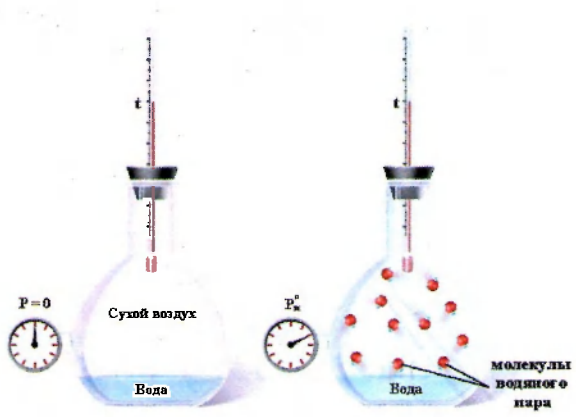


Рис. 2.21. К определению $P_п"$.

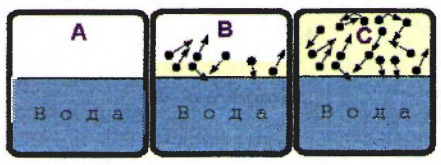


Рис.2.22. К понятию «состояние насыщения»:
A ($P = 0$), B ($0 < P < P_п"$), C ($P = P_п"$).



Величина $P_п"$ – важнейший параметр, определяющий состояние равновесия системы.

Как уже отмечалось (§ 2.2.2), с повышением температуры воздух в состоянии больше воспринять водяного пара. При этом, $\rho_п"$ и, соответственно, давление насыщения $P_п"$ увеличиваются. Зависимость $P_п" = f(t)$ является довольно сложной кривой (рис.2.23).

Экспериментальные данные по величине парциального давления насыщенных водяных паров и аппроксимирующие их зависимости более 100 лет были предметом исследования ведущих научных лабораторий мира и в настоящее время помещены в справочники по свойствам веществ [9, 22]. *Одними из первых исследователей данной зависимости были Анри Виктор Реньо [51, 109] (см. также § 2.1) и Генрих Густав Магнус.* Результаты, полученные ими в 1844…1854 годах, до сих пор востребованы.

Для инженерных расчетов[1] можно рекомендовать уравнение Магнуса (Магнуса –Тетенса[2], [132]):

$$P_п" (P_л) = c \cdot e^{at/(b+t)}, \text{ [мбар]} \qquad (2.16)$$

где c,a,b – коэффициенты, t – температура,°C (табл.2.4).

Таблица 2.4. Значения коэффициентов эмпирической зависимости 2.16.

H_2O	t, ^{0}C	c, мбар	a	b
Лед	-50,9…0,0	6,10714	22,44294	272,440
Вода	-50,9…0,0	6,10780	17,84362	245,425
Вода	0,0…100	6,10780	17,08085	234,175



Heinrich-Gustav Magnus
02.05.1802 – 04.04.1870
известный немецкий физик и химик, работал в лабораториях И. Я. Берцелиуса в Стокгольме, Ж.Л. Гей-Люссака и Л.Ж. Тенара в Париже, Берлинском университете

Наиболее точной аппроксимацией экспериментальной зависимости $P_п"(t)$ считается уравнение Sonntag [278] (однако девиация невелика, см. прил. III)

[1] Tetens O., 1930: Uber einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift fur Geophysik,vol. 6:297

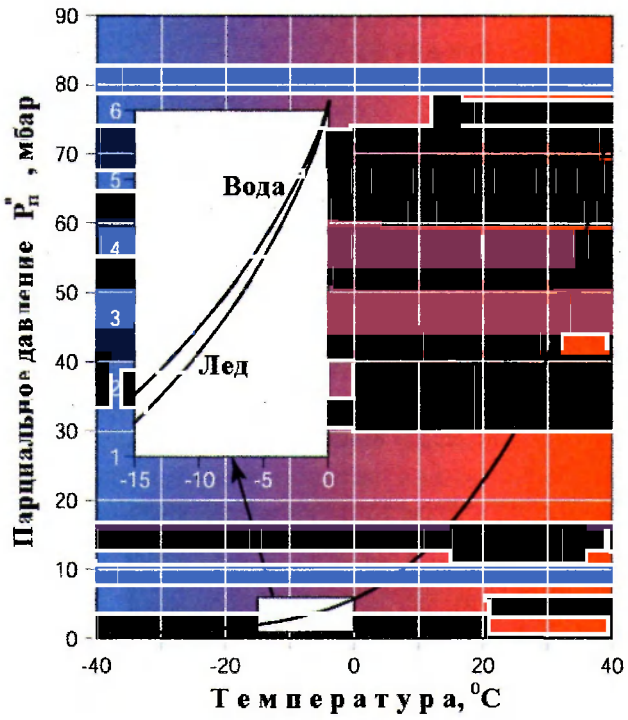


Рис.2.23. Зависимость $P_п'' = f(t)$.

Вода, лишенная растворенных в ней газов, может быть переохлаждена до t = - 70 °С (при $P_{атм}$). без превращения в лед. Однако она выходит из этого метастабильного состояния, если в нее ввести льдинку или пузырек воздуха (достаточно легкого встряхивания), при этом температура мгновенно увеличивается до 0 °С. Переохладить воду можно либо в тонких капиллярах, либо в виде эмульсии: маленьких капелек в неполярной среде – «масле» [65].

Капелька чистой воды в атмосферном холодном облаке не замерзает при 0 °С . Молекулярная структура воды и силы поверхностного натяжения обеспечивают незамерзаемость капельки чистой воды до t = - 40 °С.

Знание величины $P_п''$ позволяет косвенно измерить и парциальное давление $P_п$ водяного пара $P_п$. В открытом сосуде с влажным воздухом общее давление смеси $P_1 = P_с + P_п$, где $P_1 = P_б$. Если в этот сосуд ввести некоторое количество воды и затем его закрыть, то давление внутри сосуда после насыщения водяными парами повысится до значения $P_2 = P_с + P_п''$. Поскольку зависимость $P_п'' = f(t)$ определена, то можно найти парциальное давление сухой части $P_с = P_2 - P_п''$, а значит и $P_п = P_б - P_с = P_б + P_п'' - P_2$.

Значительно проще определить величину $P_п$ расчетным путем (2.9*): $P_п = \varphi P_п''$, – по значениям $P_п'' = f(t)$ (уравнение 2.16 либо табл. II.2, прил. II) и данным измерений величины φ, при t = const (рис.2.24).

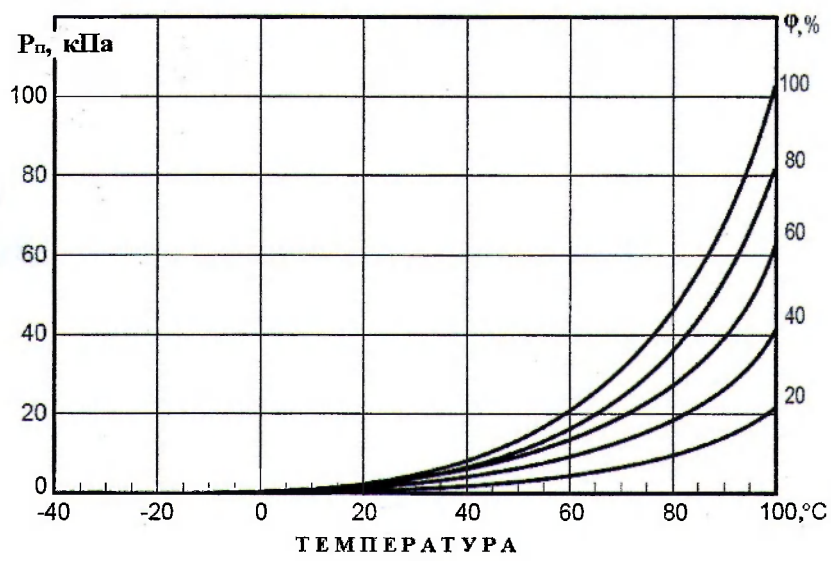


Рис.2.24. Зависимость $P_п = f(t, \varphi)$.

Величина $P_п$ однозначно определяется d: $P_п = P_б d /(0{,}622 + d)$. (2.14')

Учитывая вышесказанное относительно величин $P_п$, $P_п''$ и φ, можно получить выражения для рассмотренных характеристик влажности, исключив из них $P_п$ (аналогично уравнению 2.14* для влагосодержания d).

Плотность $\rho = (1 + d)/v_c$, кг/м^3, (2.12*)

v_c – *удельный объем влажного воздуха, отнесенный к массе его сухой части,*

$$v_c = 1/\rho_c = 287{,}1\ T/(P_б - \varphi P_п'') = 461{,}9\ T\ (0{,}622 + d)/P_б,\ м^3/кг\ с.в. \quad (2.11*)$$

Относительная влажность $\varphi = d\ P_б/[(0{,}622 + d)\ P_п'']$ (2.14**)

К особой группе параметров влажного воздуха принадлежат температуры точки росы и по мокрому термометру, см. § 2.2.5.



Утренняя роса

Фотография Ольги Сытиной

2.2.5. ТЕМПЕРАТУРА ТОЧКИ РОСЫ И ТЕМПЕРАТУРА ПО МОКРОМУ ТЕРМОМЕТРУ

Эти понятия возникли и применяются в качестве самостоятельных характеристик влажности (в единицах термометрической шкалы), в связи с тем, что они:

- являются результатом прямых измерений, проводимых с достаточной точностью с помощью простых и удобных в эксплуатации приборов;
- функционально связаны с другими характеристиками влажности, что позволяет производить их пересчет;
- определяют конечные предельные состояния типичных (эталонных) процессов термовлажностной обработки воздуха, и поэтому используются в качестве реперных точек в диаграммах влажного воздуха (рис.2.15, рис.4.9).

ТОЧКА РОСЫ ВОДЯНОГО ПАРА





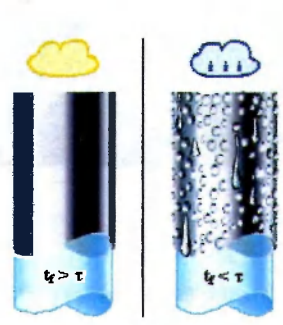
τ Точка росы (dewpoint) соответствует той температуре t_d (τ), при которой воздух с данным влагосодержанием становится насыщенным водяными парами.

Типичное проявление данного состояния воздуха ($t = \tau$) в природе – атмосферные облака и туманы. Туман (fog) возникает в приземном слое атмосферы, как правило, в утренние часы, когда температура воздуха минимальна, а значение φ максимально (рис.2.17). Зачастую под утро (либо вечерами) мы наблюдаем выпадение росы в результате конденсации влаги из насыщенного воздуха при его контакте с любой поверхностью (почва, растения, крыши домов и др.), имеющей температуру $t_f \leq \tau$. Причем роса выпадает и в ясную погоду (даже в условиях пустыни), когда поверхностный слой земли интенсивно выхолаживается в процессе радиационного теплообмена. При определенных условиях (§ 2.4) возможно образование инея.

"Dew is the moisture deposited in minute drops upon any cool surface by condensation of the vapour of the atmosphere; formed after a hot day, during or towards night and plentiful in the early morning",

New English Dictionary

В аппаратах СКВ точка росы достигается в процессе охлаждения ненасыщенного воздуха при контакте с рабочей поверхностью воздухоохладителя. До наступления момента насыщения при равномерном охлаждении парциальное давление паров не изменяется (процесс В-Р, рис.2.14): поскольку $d = const$, то и $P_п = const$ (см. уравнение 2.14'). Парциальное давление насыщенных водяных паров $P_п''$ (t) уменьшается с понижением температуры ($P_п''(t) \Rightarrow P_п$) до состояния равновесия при $P_п''(t) = P_п$, $t = \tau$ ($\varphi = 100$ %) (рис.2.25). При дальнейшем (даже самом незначительном) снижении температуры происходит конденсация пара.



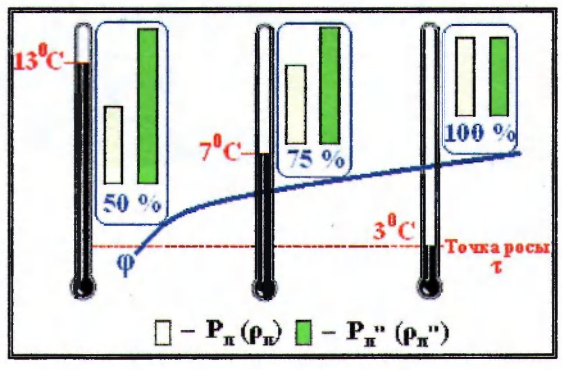


Рис.2.25. К анализу условий достижения точки росы в воздухоохладителе.



Этот процесс положен в основу принципа измерения τ с помощью прибора, известного как *гигрометр "точки росы"* (раздел 3). Если медленно охлаждать полированную поверхность, выполненную из теплопроводного материала, до тех пор, пока не начнется выпадение на ней конденсата, то величина τ определяется прямым путем - измерением в этот момент температуры поверхности.

По данным τ и t (температуре воздуха по обычному «сухому» термометру) можно рассчитать значение относительной влажности воздуха φ, либо решить обратную задачу определения τ по известным t и φ:

Схема расчета φ (величины τ и t известны): По табл.II.2 (прил.II) либо уравнению 2.16 определяют значения парциального давления насыщенных водяных паров $P_п"(t)$ и $P_п"(\tau)$. Поскольку при условии d = const: $P_п"(\tau) = P_п(t, \varphi)$, то $\varphi = P_п"(\tau) / P_п"(t) = P_п / P_п"$, при данной t.

$$\varphi = P_п"(\tau) / P_п"(t)$$

– *уравнение связи φ, τ и t* (2.9**), рис.2.26.

Схема расчета τ (величины t и φ известны): По табл.II.2 (прил.II) либо уравнению 2.16 определяют значение $P_п"(t)$ и далее по цепочке:

$$P_п"(t) \Rightarrow \varphi \; P_п"(t) = P_п(t, \varphi) = P_п"(\tau) \Rightarrow \tau.$$

Используя приведенный алгоритм, можно преобразовать эмпирическую зависимость Магнуса (2.16) относительно τ:

$$\tau = [b \cdot \alpha(t, \varphi)] / [a - \alpha(t, \varphi)], \; ^\circ C, \quad (2.16^*)$$

где $\alpha(t, \varphi) = (a \cdot t)/(b + t) + \ln \varphi$, [132].

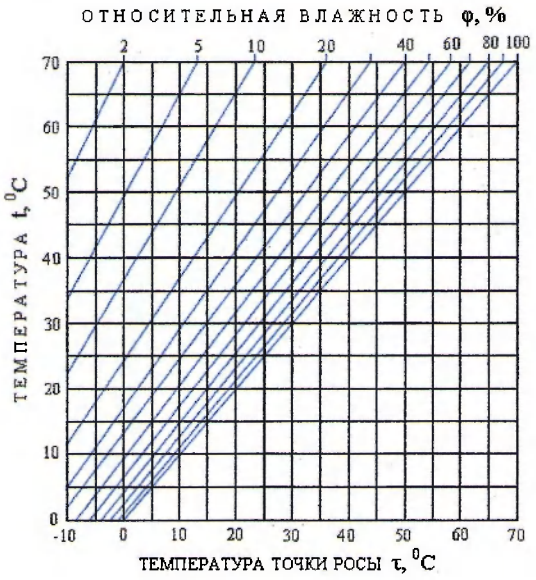


Рис.2.26. Зависимость $\tau = f(t, \varphi)$.



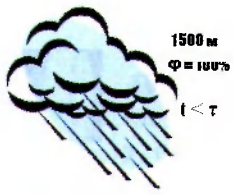
Одна из первых попыток связать температуру точки росы и относительную влажность принадлежит Джону Дальтону. Объясняя понятия влажности воздуха, Дальтон (в 1800 г.) демонстрировал опыт с постепенным добавлением кусочков льда в стеклянный стакан с водой. При появлении капелек конденсата на стенке стакана определялась температура воды t_w, которая и принималась за температуру точки росы влажного воздуха $\tau = t_w$ при данной температуре воздуха в помещении t. Затем Дальтон предлагал определить величину относительной влажности расчетным путем: $\varphi = 100 - 5(t - \tau)$, (%), и сравнить с величиной φ, измеренной с помощью гигрометра [209]. Легко убедиться (см. рис.2.26), что эта простая зависимость $\varphi = f(t, \tau)$ работает в области комнатных значений температур.

Приведенная на рис.2.27 фотография изолированных трубопроводов и поддона с каплями конденсата – наглядный пример того, что температура этих поверхностей ниже температуры точки росы воздуха помещения.



Рис.2.27. Фотография гидронной системы охлаждения воздуха.

by James Adler, Chief Refrigeration Engineer of Hixson Architecture Engineering Interiors



Температура точки росы является одним из главных параметров воздуха на службе у метеорологов, поскольку по этой величине судят о готовности природы к дождю и другим атмосферным осадкам.



Дождь, как и снег либо град, выпадает из тех облаков, которые перестали быть устойчивыми, то есть не могут удерживать во взвешенном состоянии водяные капли или ледяные кристаллы. Неустойчивым облако становится, когда перестает быть однородным по своей структуре и размерам формирующих его элементов.



Насыщенный водяной пар,
в отличие от перегретого пара,
визуализируется:
облака, туманы, русские (турецкие) парные,
влажный выброс градирен и др.



Состояние тумана можно легко получить в простом опыте. В стеклянный бутыль следует налить немного горячей воды, несколько минут подождать, а затем, создать там разрежение, например, с помощью пылесоса, работающего в течение 1-2 секунд. Быстрое адиабатическое расширение воздуха приведет к понижению его температуры до уровня точки росы $t \leq \tau$ и образованию видимой области тумана, а также капелек конденсата на стекле изнутри (рис.2.28). Для большей надежности в получении искомого результата следует перед подключением пылесоса ввести в бутыль зажженную спичку (продукты сгорания будут работать как центры конденсации).

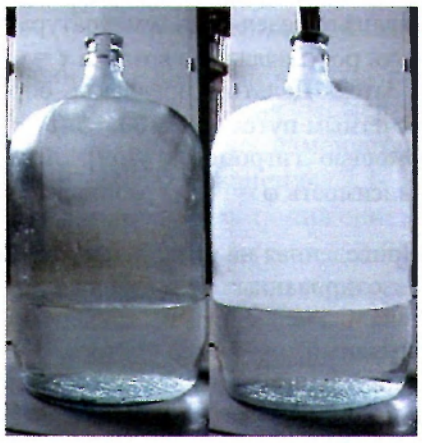


Рис.2.28. Лабораторный опыт получения тумана.

Как уже отмечалось (§ 2.2.3), области пониженного давления (циклоны) связывают с влажной атмосферой и дождливой погодой. Видимые следы тумана в локальных зонах пониженного давления, образующихся в ясном небе вслед за движением реактивного самолета – наглядная иллюстрация процесса адиабатического охлаждения воздуха при его расширении (рис.2.29).



Рис.2.29. Полет реактивного самолета-истребителя F/A-18 Hornet*.

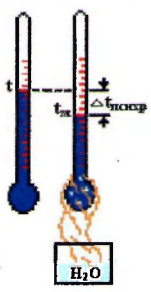
* фотография Джона Гэя (John Gay), выполненная с палубы авианосца США в Тихом океане в момент преодоления самолетом звукового барьера в полете на высоте 75 футов (около 23 м), завоевала первый приз World Press Photo 2000 в разделе «Наука и техника»

МОКРЫЙ ТЕРМОМЕТР

$t_м$

Мокрый (смоченный, влажный, wet bulb) термометр – чувствительный элемент которого имеет фитильную тканевую оболочку и смачивается водой. За счет испарения воды в ненасыщенный влажный воздух происходит понижение температуры до определенного значения $t_м$, которое визуально фиксируется. Показания мокрого термометра стабилизируются на этом уровне при достижении теплового равновесия между внутренней энергией, расходуемой водой на испарение, и теплотой, поступающей от воздуха.

По показаниям пары термометров – сухого (dry bulb) и мокрого – определяется *психрометрическая разность температур* $\Delta t_{психр} = f(\varphi)$, которая тем больше, чем меньше относительная влажность воздуха. Например, в условиях горячего сухого воздуха пустынь величина $\Delta t_{психр}$ может достигать 25 °, на море не более 5 °. Для насыщенного водяными парами воздуха $\Delta t_{психр} = 0$ ($\varphi = 1$). На этом принципе основан психрометрический (от греческого "psihros" – холодный) метод измерения влажности (раздел 3) [17, 21, 37, 49].



В инженерных расчетах процессов и аппаратов кондиционирования принимается, что температура по мокрому термометру $t_м$ определяет состояние воздуха на линии насыщения ($\varphi = 1$), достигаемое в адиабатическом процессе испарительного охлаждения и увлажнения оборотной водой при постоянной энтальпии воздуха h = const (контактный аппарат).

Величину парциального давления водяного пара $P_п$ можно определить с помощью психрометрического уравнения Реньо:

$$P_п = P_п'' - A\, P_б\, \Delta t_{психр}, \qquad (2.17)$$

где A – психрометрический коэффициент, зависящий от скорости движения воздуха (v) вблизи смоченной поверхности мокрого термометра (табл.2.5, [52]).

Таблица 2.5. Значение коэффициента А.

v, м/с	0,0	0,4	0,8	2,3	3,0	4,0
$A \cdot 10^6$, K^{-1}	1300	900	800	700	690	670

Для пересчета рассмотренных характеристик влажности в инженерной практике используют различные конверторы, например, конвертор компании GE (рис.2.30).

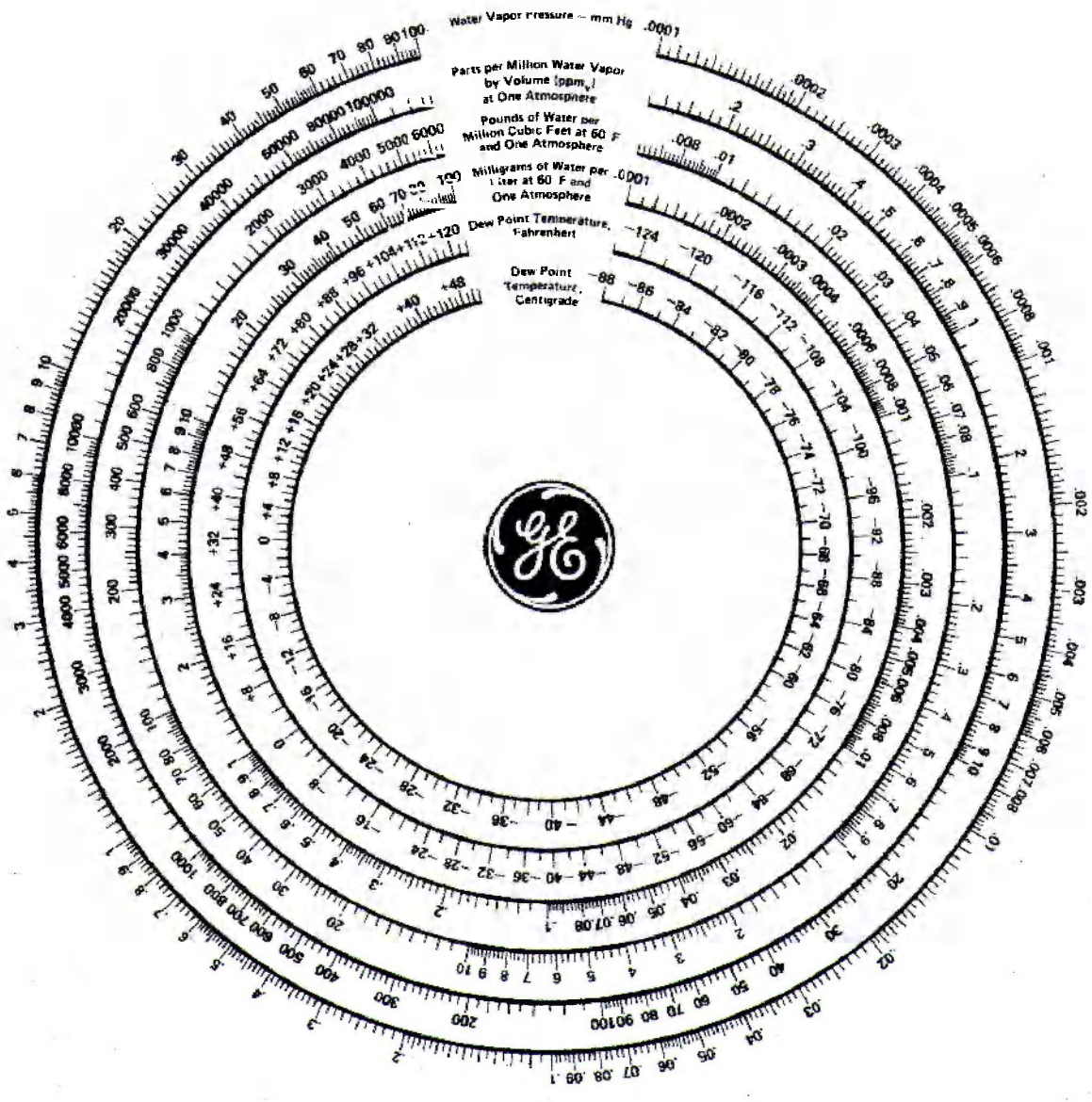


Рис.2.30. Конвектор параметров влажности компании General Eastern (GE).

На шести окружностях помещены следующие данные (от внешнего круга к внутреннему):

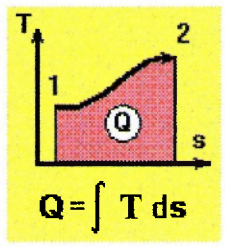
- парциальное давление насыщенных водяных паров $P_п$" [мм.рт.ст.];
- абсолютная влажность $\rho_п$ [ppm$_v$];
- абсолютная влажность $\rho_п$ [фунт/мл. куб.футов] при t = 60 °F (15,5 °C);
- абсолютная влажность $\rho_п$ [мг/л] при t = 60 °F (15,5 °C);
- температура точки росы τ [°F];
- температура точки росы τ [°C].

2.3. КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА:

ЭНТАЛЬПИЯ (ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ) И ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Энтальпия* H (от греч. enthalpo – нагреваю) – термодинамический потенциал системы. При выборе в качестве основных независимых переменных энтропии S и давлении P:

$$dH = T\,dS + V\,dP, \quad \text{кДж}. \qquad (2.18)$$



Для изобарных процессов (P = const) $dH = T\,dS$,

а изменение энтропии, по определению: $dS = dQ/T$, (2.19)

– аналитическое выражение II закона термодинамики (равенство Клаузиуса для обратимых (равновесных) процессов).

Таким образом, $dH = dQ$, *изменение энтальпии равно количеству теплоты, которое сообщают системе (в данном случае, влажному воздуху) или отводят от нее при постоянном давлении (рис.2.31, 2.32).*

Следовательно, приращения энтальпии ΔH определяют тепловые балансы изобарных процессов, в т.ч. тепловые эффекты фазовых переходов (плавление льда, кипение воды).

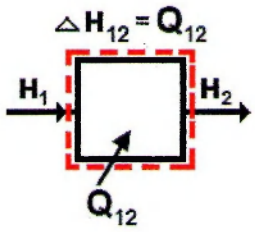
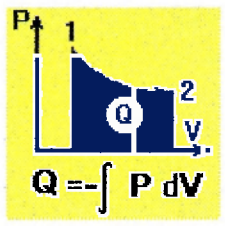


Рис.2.31. Приращение энтальпии открытой системы (поток воздуха) при P = const.

При тепловой изоляции в адиабатно-изобарном процессе *энтальпия* сохраняется (§ 4.1, рис.4.3), в связи с чем эта физическая величина *также именуется теплосодержанием* (heat content).

В соответствии с I законом термодинамики энтальпия и внутренняя энергия U системы связаны соотношением:

$$dH = dQ = dU + P\,dV. \qquad (2.20)$$



Поскольку внутренняя энергия идеального газа $dU = C_v\,dT$ зависит только от температуры:

$$dH = C_v\,dT + P\,dV \qquad (2.21)$$

(для изотермического процесса $dU = 0$, $dH = P\,dV$, рис.2.32),

C_v – изохорная теплоемкость.

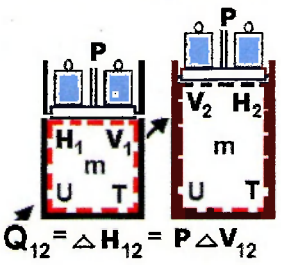


Рис.2.32. Приращение энтальпии закрытой системы (неподвижный воздух) при P = const и T = const.

Величина энтальпии пропорциональна количеству вещества. В расчетах обычно используют величину удельной энтальпии

$h = H/G$, [кДж/кг] (на кг массы):

$$h = C_v\,T + P\,v \qquad (2.21')$$

Учитывая, что $P\,v = RT$, можно записать: $h = C_p\,T$, (2.22)

где $C_p = C_v + R$ – изобарная теплоемкость (формула Майера). (2.23)

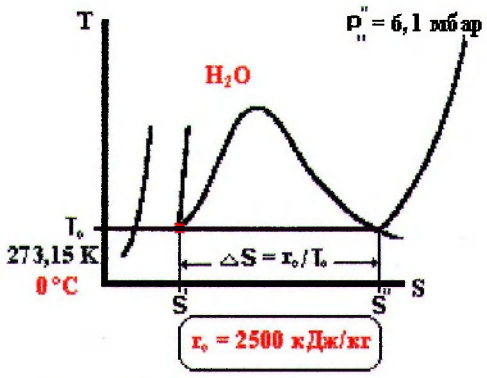
Энтальпия идеального газа, как и внутренняя энергия, *зависит только от температуры*.

*термин «энтальпия» ввел голландский физик Ханеке Камерлинг-Оннес в 1909 г.

Энтальпия смеси – аддитивная величина и для влажного воздуха слагается из энтальпии сухого воздуха и энтальпии водяных паров. В расчетах процессов кондиционирования воздуха величину удельной энтальпии влажного воздуха $h_в$ относят к 1 кг сухой части смеси, масса которой не изменяется:

$$h_в = h_{с.в} + h_п\, d, \text{ кДж/кг с.в,} \qquad (2.24)$$

где $h_{с.в}$ – энтальпия сухого воздуха, кДж/кг с.в, $h_п$ – энтальпия пара, кДж/кг пара. Величина влагосодержания d в уравнении 2.24 используется для приведения в соответствие размерности слагаемых.



Для определения калорических величин смесей необходимо иметь единую точку отсчета. За начало отсчета энтальпий сухого воздуха и водяного пара принимается 0 °С (рис.2.33). Несмотря на то, что при этой температуре энтальпия воды, в которую превращается водяной пар, не равна нулю: h_w = - 0,0416 Дж/кг, – для практических расчетов этим можно пренебречь. Для справки: $h_w = 0$ в "тройной" точке при t = 0,01 °С (273,16 К).

Рис.2.33. S, T- диаграмма для воды.

Энтальпия сухого воздуха – количество теплоты, необходимое для изменения его температуры от 0 °С до t (рис.2.34):

$$h_{с.в} = C_{с.в}\, t, \text{ кДж/кг,} \qquad (2.22')$$

где $C_{с.в}$ – среднее значение удельной теплоемкости сухого воздуха при постоянном давлении P = 100 кПа в интервале температур от 0 °С до t. В пределах: -50 °С < t < 50 °С эту величину можно считать постоянной $C_{с.в}$ = 1,006 кДж/(кг· К). Следовательно, $h_{с.в}$ = 1,006 t, кДж/кг. (2. 22")

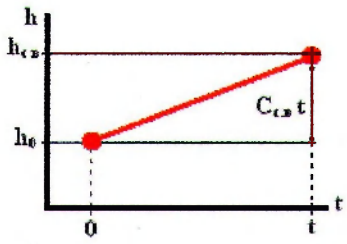


Рис.2.34. К определению энтальпии $h_{с.в}$.

Энтальпия водяного пара, образующегося в процессе испарения воды при $t = t_w = t_в$:

$$h_п = h_w + r, \text{ кДж/кг,} \qquad (2.25)$$

где h_w – энтальпия воды, $h_w = C_w\, t$, r – скрытая теплота парообразования при данной температуре. Величина C_w постоянна и равна 4,19 кДж/(кг·К). Величина r зависит от температуры.

Учитывая, что *энтальпия – параметр состояния и не зависит от пути перехода из одного состояния в другое (рис.2.35)*, можно записать:

$$h_п = r_o + \Delta h_п, \qquad (2.26)$$

где r_o – скрытая теплота парообразования при 0 °С; $\Delta h_п$ – теплота, сообщаемая водяным парам при их нагревании от 0 °С до t:

$$\Delta h_п = C_п\, t, \qquad (2.27)$$

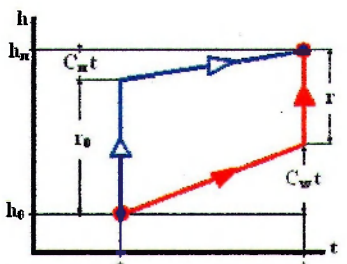


Рис.2.35. К определению $h_п$.

$C_п$ – среднее значение удельной теплоемкости водяного пара при постоянном давлении, для интервала температур -55 °С < t < 50 °С: $C_п$ = 1,86 кДж/(кг·К). Величина r_o = 2500 кДж/кг.

Таким образом, $h_п = 2500 + 1{,}86\, t$, кДж/кг. (2.26')

В соответствии с уравнением (2.24) энтальпия влажного воздуха:

$$h_в = C_{с.в}\, t + (r_о + C_п\, t)\, d, \qquad (2.24^*)$$

в численном выражении $h_в = 1{,}006\, t + (2500 + 1{,}86\, t)\, d$, кДж/кг. (2.24')

На данном этапе изучения материала имеет смысл оценить вклад каждого из трех слагаемых уравнения 2.24' в величину $h_в$. Например, в процессе нагревания влажного воздуха с параметрами $d = 4$ г/кг, $t = 0$ °С и массой сухой части 1 кг до температуры 10 °С необходимо затратить:

0,004 · 2500 = 10 кДж – на испарение водяных паров при t = 0 °С;
0,004 · 1,86 · 10 = 0,07 кДж – на их перегрев до 10 °С;
1,006 · 10 = 10,06 кДж – на нагревание сухой части воздуха.

Очевидным является соизмеримость затрат энергии на испарение воды и на нагревание сухой части. При существенно большей величине теплоемкости $C_п$, по отношению к $C_{с.в}$, расход теплоты на перегрев водяных паров незначителен, т.к. величина d мала.

Если в уравнении 2.24* перегруппировать члены, то можно записать:

$$h_в = (C_{с.в} + C_п\, d)\, t + r_о\, d, \text{ или } h_в = C_в\, t + r_о\, d, \qquad (2.24^{**})$$

где $C_в = C_{с.в} + C_п\, d$, – теплоемкость влажного воздуха, (2.28)

$$C_в = 1{,}006 + 1{,}86\, d, \text{ кДж/кг с.в} \qquad (2.28')$$

Первое слагаемое в уравнении 2.24** $C_в t$ представляет собой *явную часть* теплосодержания влажного воздуха, которая зависит в основном от температуры ($C_в \approx C_{с.в}$). Второе слагаемое $r_о d$ – *скрытую часть*, которая изменяется только при изменении влагосодержания воздуха.

Если воздуху конвективным путем передается явная теплота, то он нагревается: растет его температура и энтальпия.

При поступлении в воздух водяного пара с той же температурой ему передается скрытая теплота. Энтальпия растет вместе с влагосодержанием при неизменной температуре.



В области пересыщенного влажного воздуха энтальпию $h_в$ следует определять как сумму произведений массовых долей компонентов и их удельных энтальпий. В самом общем случае, когда влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха, насыщенных водяных паров в количестве d'', взвешенных капель влаги $g_ж$ и кристаллов льда $g_л$:

$$h_в = h_{с.в} + h_п\, d'' + h_ж\, g_ж + h_л\, g_л, \qquad (2.29)$$

где $h_л$ – энтальпия льда, $h_л = r_л + C_л\, t$ ($r_л$ – скрытая теплота плавления льда при 0 °С, $r_л = 333{,}4$ кДж/кг; $C_л$ – среднее значение теплоемкости льда в интервале температур от 0 до t °С, при обычных давлениях и температурах $C_л = 2{,}05$ кДж/(кг·К)).

Этот случай (состояние смешанного тумана) возможен только при $t \approx 0$ °С. При $t > 0$ °С в воздухе будет только капельная влага, при $t \ll 0$ °С – кристаллы льда, и уравнение 2.29 упрощается до трех слагаемых, соответствующих данным компонентам.

Поскольку рабочей областью проведения процессов кондиционирования воздуха, как правило, является область ненасыщенного воздуха, то уравнение 2.24*, связывающее калорические параметры с параметрами состава, является *вторым фундаментальным уравнением состояния влажного воздуха* [32].

Уравнения 2.14* и 2.24*, определяющие, соответственно, содержание влаги (moisture content) и теплоты (heat content) во влажном воздухе, лежат в основе всех инженерных расчетов процессов и аппаратов СКВ, и составляют базу для построения различных диаграмм состояния (глава 4).

2.4. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДЕ

(ГЛАВНОЙ КОМПОНЕНТЕ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА)

И ОБЛАСТИ ТУМАНА

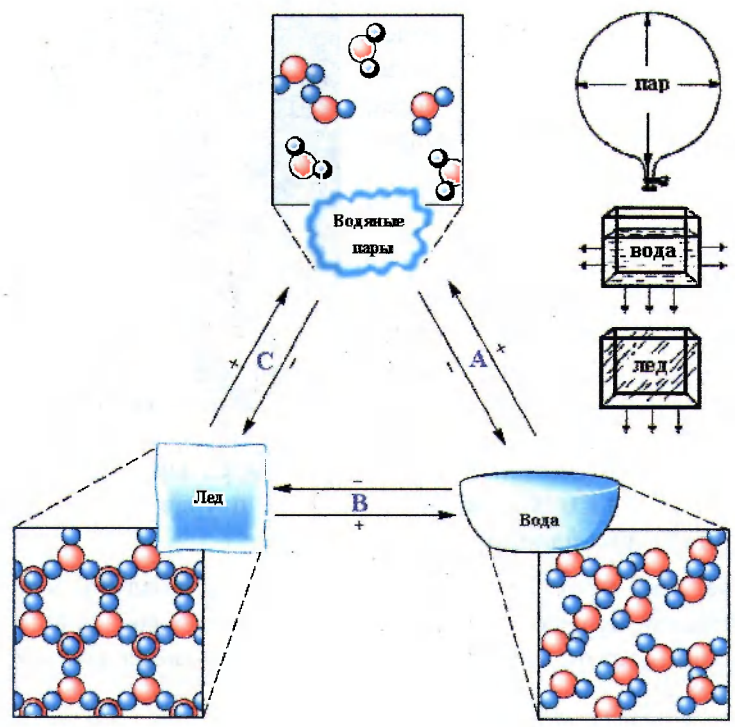


«Вода стоит особняком в истории нашей планеты. Нет природного тела, которое могло бы сравниться с ней по влиянию на ход основных, самых грандиозных геологических процессов, Нет земного вещества – минерала, горной породы, живого тела, которое ее бы не заключало. Все земное вещество…ею проникнуто и охвачено»

академик В.И. Вернадский

Как вы уже заметили, сведения о воде наполняют весь предшествующий материал, это данные по гидрологическому циклу, фазовой диаграмме и, естественно, все рассмотренные характеристики влажности воздуха. Разговор о воде будет продолжен в каждом разделе книги с расширением информации по свойствам, поскольку от ее поведения зависит характер протекания любых процессов термовлажностной обработки воздуха.

Ниже представлен материал, иллюстрирующий наиболее общие представления о воде, включающий данные о молекулярной структуре, фазовых переходах, о скрытой теплоте плавления льда и парообразования воды, а также о некоторых особенностях области тумана (в частности, низкотемпературной области), как дополнение к главе 2.



Вода может находиться в любой из трех форм своего существования: газ – жидкость – твердое тело, при этом путь трансформации из одной формы в другую может быть различным (рис.2.36).

Рис.2.36. Схема фазовых переходов H_2O и молекулярное строение льда, воды и водяного пара:

A– испарение (+), конденсация (–);

B – плавление (+), замораживание (–);

C – сублимация или возгонка (+), десублимация или сухая конденсация (–).

Лед обладает упорядоченной молекулярной структурой (частица льда – «одна широкая молекула»). Причем строение молекул таково, что вода в этом замороженном состоянии расширяется в объеме (примерно на 9 %) и ее плотность уменьшается. Поэтому лед плавает на поверхности воды.



В жидкой фазе молекулы воды объединяются в небольшие группы (полуупорядоченная структура). Тот факт, что эти группы малы, позволяет воде двигаться в определенном направлении (течь).

В состоянии пара молекулы, обладая большой энергией, постоянно перемещаются во всех направлениях: неупорядоченная (хаотичная) структура (газ – *франц. gaz – от греч. chaos – хаос*).

При температуре воздуха t = 0…-10 °С область тумана (в природе облака), кроме пересыщенного водного пара содержит переохлажденную капельную воду, в диапазоне t = -10…-20 °С – переохлажденную воду и кристаллы льда, при более низких температурах (t < -20 °С) – преимущественно кристаллы льда.



Рис.2.37. Типичная картина обледенения (изморозь).

Когда во влажном воздухе одновременно присутствуют капли воды и кристаллы льда: вода будет трансформироваться в лед, – в соответствии с эффектом Бергерона (T. Bergeron, 1935 г.). Поскольку парциальное давление насыщенных водяных паров над водой всегда больше, чем надо льдом: $P_п"_{H2O} > P_п"_л$ (рис.2.23, 2.40), вода даже в холодном облаке будет испаряться до момента достижения равновесия и уменьшаться в размере, а лед, наоборот, будет расти и превращаться в большой ледяной кристалл (рис.2.38). В результате этого роста лед будет выпадать из атмосферного воздуха в виде града (рис.2.39).

Исходя из определения относительной влажности (2.9*), и учитывая, что в области ледяного тумана $P_п = P_п"_л$, можно записать выражение для φ надо льдом:

$$\varphi_л = P_п"_л / P_п"_{H2O} < 1 \text{ ,при } t = const, \quad (2.30).$$

Численные значения $\varphi_л$ приведены в табл.2.6.

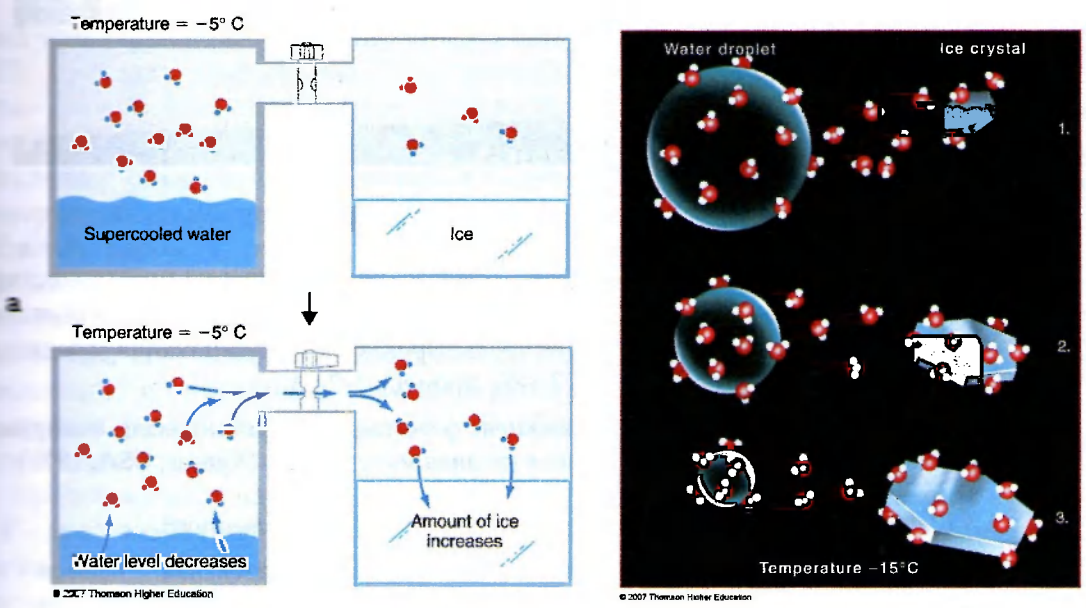


Рис.2.38. Опыт Бергерона (а) и трансформация воды в холодном облаке (б).

Для анализа области тумана при наличии льда также используют число S (saturation ratio) – степень насыщения (пересыщения) водяными парами:

$$S = 1/\varphi_л = P_п''_{.H2O} / P_п''_{.л} > 1, \text{ при } t = const, \quad \text{(табл.2.6)} \qquad (2.31)$$

При S >1 происходит наращивание льда в процессе десублимации, при S < 1 – возгонка.

Таблица 2.6. Пересыщение надо льдом.

t, ^{0}C	$P_п''_{.H2O}$, мбар	$P_п''_{.л}$, мбар	ΔP, мбар	φ, %	S, %
0	6,11	6,11	0	100	100
-5	4,22	4,02	0,20	95	105
-10	2,86	2,60	0,26	91	110
-12	2,44	2,17	0,27	89	112
-15	1,91	1,65	0,26	87	116
-20	1,26	1,03	0,23	82	122
-25	0,81	0,63	0,18	79	129
-30	0,51	0,38	0,13	75	134
-40	0,19	0,13	0,06	67	148
-50	0,064	0,039	0,025	61	163



Рис.2.39. Фотографии града[1].

На рис.2.39 отчетливо видны концентрические слои льдообразования, наглядно проявляющие цикличность процесса формирования градины (рис.2.38б, процесс 1-2-3).

[1]на нижней фотографии зафиксирована рекордно большая градина массой 766 г (Kansas, USA, 1970)

Рис.2.37 и 2.38 – оригинальные иллюстрации Thomson Higher Education[2]

[2] Thomson Higher Education – система дистанционного высшего образования Thomson Learning EMEA (Europe, Middle East and Africa) одной из самых крупных мировых информационных компаний (с 2007 года Thomson - Reuters), работающей в 52 странах мира.

Рис.2.40 проявляет еще одну особенность поведения системы влажный воздух в области тумана: разность парциальных давлений $\Delta P = P_{п}"_{.H2O} - P_{п}"_{.л}$ имеет свой максимум при t = - 12 °С (см. также табл.2.6).

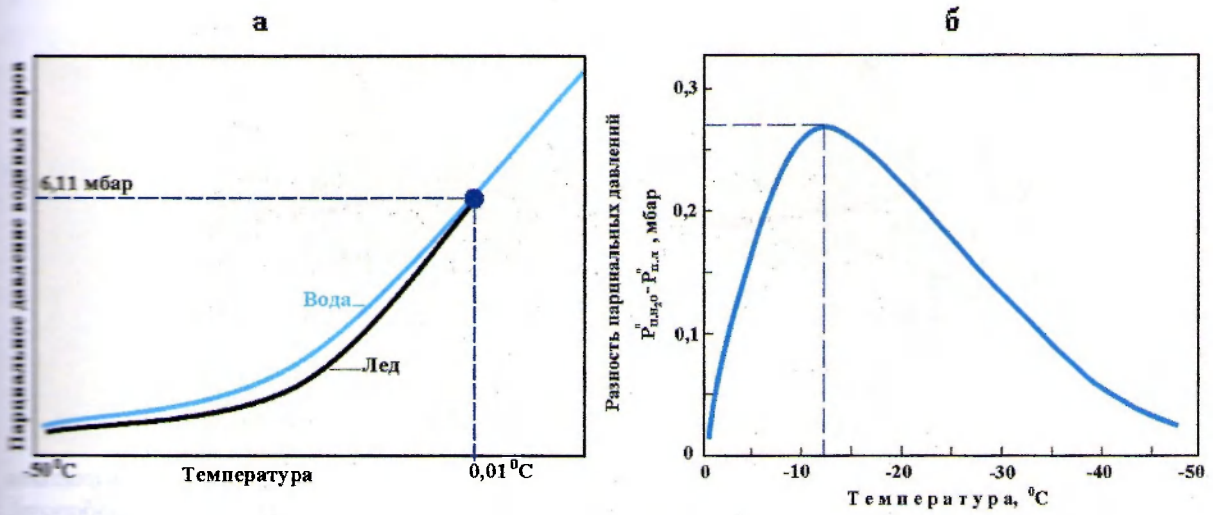
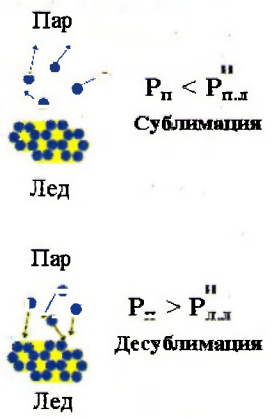


Рис.2.40. Положение кривых насыщения водяных паров над водой и льдом в t, $P_{п}$ - диаграмме (а) и зависимость разности парциальных давлений $P_{п}"_{.H2O} - P_{п}"_{.л}$ от t (б).

Необходимо заметить, что образование града – привилегия больших воздушных масс (природных макросистем), однако закономерности этого процесса, в частности Bergeron process, должны учитываться и в инженерных приложениях, например, при анализе механизма инеообразования поверхностных воздухоохладителей.

В расширение наших знаний о воде, имеет смысл еще раз вернуться к фазовой диаграмме состояний (рис.2.8, рис.2.41). Как справедливо заметил японский физик Норикадзу Маэно [63], на этой диаграмме имеются точки, которым часто дают неверную интерпретацию. Анализируя фазовые переходы воды и льда в пар, отложенное в диаграмме давление следует рассматривать как парциальное давление водяного пара. Тогда линии А и С, разделяющие состояние пара от состояний воды и льда, – линии равновесия (насыщения) системы влажный воздух, а область пара – область перегретого пара.

Для верного трактования того либо иного явления всегда следует сверяться с природой. Автор монографии «Наука о льде» [93] приводит пример как при давлении в 1 атм, т.е. при атмосферном давлении, и температуре воздуха t < 0 °С снежинки за несколько дней превращаются в ледяные крупинки круглой формы. Последнее объясняется сублимацией (возгонкой) молекул воды с поверхности снежинок, в условиях, когда парциальное давление водяных паров в окружающем воздухе меньше парциального давления насыщения надо льдом: $P_{п} < P_{п}"_{.л}$. Это явление аналогично постепенному испарению сухого льда либо нафталина без их плавления. При этом обратный фазовый переход через линию С, связанный с процессом кристаллизации непосредственно из состояния пара в лед, т. е. процесс десублимации можно назвать сухой конденсацией.



Представленная на рис.2.41 фазовая P, t - диаграмма воды получена из привычной нам P - диаграммы (рис.2.8) путем* зеркального отображения ее и поворота на 90 °. При этом легко заметить, что P, t - диаграмма отражает зависимость парциального давления насыщенных водяных паров воды (см. рис.2.23).

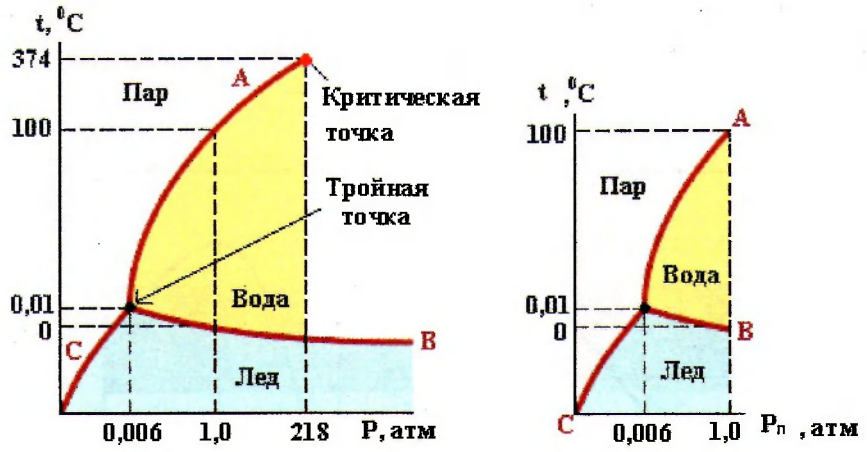


Рис.2.41. Фазовая P, t - диаграмма воды
(справа – фрагмент, характерный для открытой системы).

** этот же прием, как показано в прил. VI, используется для трансформации европейского варианта диаграммы влажного воздуха Рамзина–Молье в американскую диаграмму Керриера (и, наоборот), см. также главу 4*

Такое понимание особенно важно для открытых систем, для которых: $P = P_б$, а парциальное давление $P_п = f(P_б, d)$ (2.14'). Поскольку $P_п = f(d)$ – практически линейная зависимость (см. с. 108), то ось парциальных давлений фазовой диаграммы может одновременно осью влагосодержаний d, а это значит, что фазовая диаграмма воды является основой диаграмм влажного воздуха (глава 4).

Фазовая диаграмма также показывает существенное увеличение температуры кипения воды $t_{кип}$ и незначительное понижение температуры плавления льда $t_{плавл}$ с ростом давления. При увеличении P на 1 атм $t_{кип}$ повышается на 28 °C, а $t_{плавл}$ уменьшается на 0,0075 °C. Эта особенность воды используется в закрытых системах, например, в скороварках, популярность которых высока у жителей высокогорья, а также живущих на верхних этажах высотных домов [63], поскольку здесь с высотой: $P_б \downarrow$ и $t_{кип} \downarrow$ (рис.2.42).

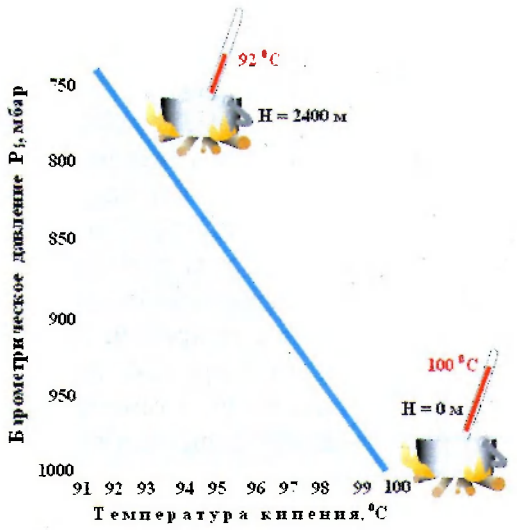


Рис.2.42. Зависимость температуры кипения воды от $P_б$.



Тройная точка (t = 0,01 °C, P = 6,11 мбар) – реперная точка и основа абсолютной шкалы температур (К), рис.2.43. Привычные для нас температуры замерзания (0 °C) и кипения (100 °C) воды не являются константами, поскольку зависят от атмосферного давления, которое изменяется вместе с погодой.

Рис.2.43. Имитация тройной точки воды.

Фазовые переходы воды осуществляются при определенных затратах энергии на изменение молекулярной структуры и характеризуются скрытой теплотой фазового перехода (рис.2.44).

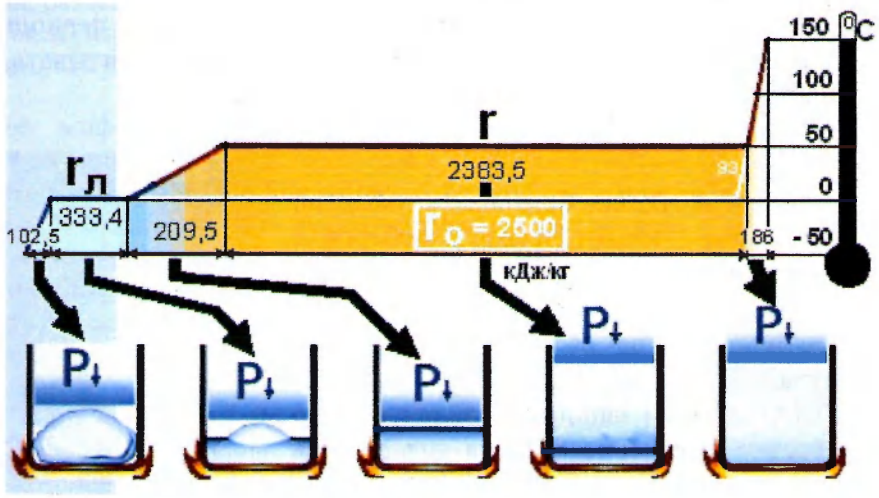


Рис.2.44. Затраты энергии (теплоты) на превращение льда в жидкость, а затем в состояние перегретого пара при нагревании от -50 °С до 150 °С.

Различают скрытую теплоту парообразования r (при t = 0 °С – r_0), скрытую теплоту плавления льда $r_л$ и скрытую теплоту сублимации $r_0 + r_л$ (рис.2.44, 2.45).

Термин «скрытая теплота» употребляется в связи с тем, что в процессе фазовых превращений, несмотря на поглощение или выделении теплоты, изменений температуры не наблюдается.

Величины r и $r_л$ экспериментально определил шотландский ученый Джозеф Блэк в 1757 году. В 1759...1763 г.г. Блэк указал на различие между количеством теплоты и ее интенсивностью (температурой), ввел понятие теплоемкости.

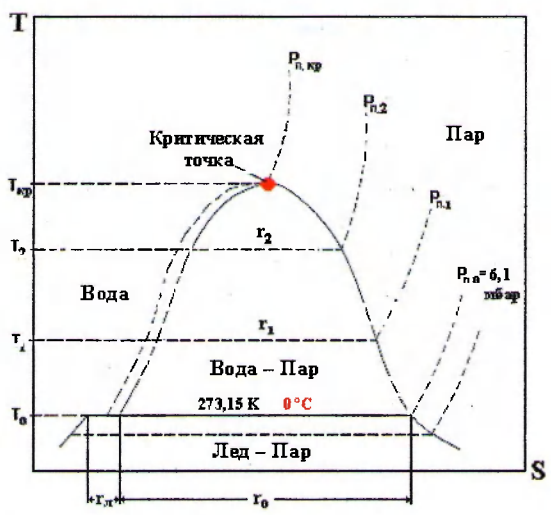
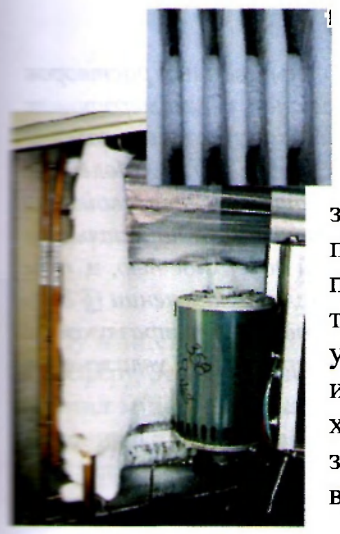


Рис.2.45. S, T- диаграмма: к определению r (r_0) и $r_л$.



Область тумана, хотя и не является рабочей для процессов кондиционирования воздуха (за исключением процессов расширения сжатого влажного воздуха в детандере – СКВ с воздушными холодильными машинами [75]), представляет значительный интерес, как в теоретическом, так и в практическом плане [3, 76]. Ее поведение определяется особенностями фазовых переходов воды и зависит от многих факторов, прежде всего от температурных режимов. Как уже отмечалось, низкотемпературные условия работы воздухоохладителей могут привести к инеобразованию рабочих поверхностей этих аппаратов. В холодильных камерах возможно образование «снеговой шубы», что заставляет нас работать в направлении предварительного осушения воздуха (§ 7.2.5.2.2).

Общая характеристика области тумана – ее метастабильность. При любых возмущениях, наличии центров конденсации (кристаллизации), происходит фазовый переход: конденсация водяных паров, замораживание либо десублимация. Смешение холодного наружного и теплого рециркуляционного воздуха – типичная задача СКВ, – может привести эту смесь в область тумана (§ 4.2). Кроме того, наружный воздух, в определенные периоды года, может быть атмосферным туманом (холодным или теплым), и это надо учитывать, например, в мероприятиях по антиобледенению входных воздушных клапанов.

Общеизвестны регионы: Великобритания (туманный Альбион), Нидерланды, атлантическое побережье Канады, тихоокеанское побережье США и др., для которых атмосферный туман – явление регулярное и длительное, что отражается на расчетных параметрах наружного воздуха. Например, в г. Сан-Франциско (Калифорния, США) туман заполняет значительную часть этого мегаполиса ежедневно с конца дня до утра (рис.2.46).



Photo by Russel D. Curtis [226]



"The coldest winter I ever spend was summer in San Francisco", Mark Twein

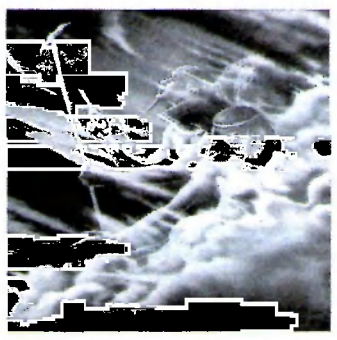
Рис.2.46. Мост «Золотые Ворота» и г. Сан-Франциско в тумане.

Далее будет сказано:

Вода прекрасный растворитель: используется для приготовления различных водных растворов неорганических и органических веществ, применяемых в качестве абсорбентов и незамерзающих промежуточных хладоносителей (§ 7.1). В тонких капиллярах адсорбентов вода создает явление капиллярной конденсации, что способствует процессу адсорбции водяных паров (§ 7.2). Молекулы воды со свойственной им ярко выраженной полярностью, усиливают избирательные свойства десикантов (§ 7.2.1). Капли воды, имея форму сферы, создают эффект повышенного парциального давления водяных паров по отношению к парциальному давлению над плоской поверхностью, и, тем самым, ускоряют процесс ассимиляции водяного пара воздухом, нуждающимся в увлажнении (§ 8.1). Вода, как несжимаемая жидкость способна воспринимать и генерировать ультразвуковые колебания, которые создаются в ультразвуковых пьезоэлектрических устройствах увлажнения воздуха (§ 8.1.2) ...

«Мифы, выражающие мироощущение и миропонимание времени их создания, являются неотъемлемой частью современного общественно-культурного достояния» [64].

В завершении раздела, названного мною «Учение о Воздухе», считаю уместным приобщить [redacted] телей к истокам человеческого понимания и отношения к воздуху и влаге (воде), как главным [redacted] утверждающим субстанциям.



В [redacted] ипетской мифологии Ancient Egyptian Creation Myths, [redacted] одной из самых древних цивилизаций в 4-ом тысячелетии [redacted] (3100 BC), *бог воздуха Шу (Shu – God of Air)* и *богиня влаги* [redacted] (*Tefnut – Goddess of Moisture)* являются первой божественной [redacted] ннеады – Великой девятки богов (Atum, Shu, Tefnut, Geb, Nut. [redacted] Isis. Seth и Nephthys), которые правили миром и Египтом.

По [redacted] анной версии сотворения мира (Гелиопольской космогонии) [redacted] был Хаос – бесконечное и пустое пространство – мировой [redacted] Нун. из которого появился Атум (демиург) "The One who [redacted] Himself" – тот, кто возник сам по себе. Затем Атум создал Шу [redacted] обеспечивающего воздушное пространство и Тефнут [tf], [redacted] значение которой нести живительную влагу. Последующий брак [redacted] и Тефтут принес расцвет природе.

[redacted] изображениях Шу и Тефтун над их головами видны отличительные знаки перо и сосуд с [redacted] соответственно, а также объединяющие символы: в руках у них жезл (символ власти) и *знак* [redacted] [ankh] – крест с петлей в верхней части – *символ жизни*. Насколько большое первостепенное [redacted] воздуху и влаге придавали древние египтяне можно судить по тому, что боги земли (Геб) и [redacted] появились позже, как дети Шу и Тефтут.



На папирусе изображено все святое семейство:
Шу с помощью Тефтун поддерживает Нут, Геб склоняется к земле.

[redacted] ипетворяет холодный и сухой воздух, Тефтун – теплый и влажный. Вместе они наполняют [redacted] феру Земли. Примечательно, что холодный и сухой воздух, т.е. наиболее плотный (§ 2.2.3), [redacted] мужское начало, а легкий (теплый и влажный) – женское. Божественная пара находится в [redacted] с природой во всех ее проявлениях: круговорот воды, роса, дождь, снег и пр.

[redacted] ставляется, что уже в древнеегипетской мифологии было заложено отождествление системы [redacted] воздух» с идеальным газом в естественных природных условиях.

3. ГИГРОМЕТРИЯ

"hygro" is from "hugros" (moist)
spoken by people of Greece starting about 1000 B.C.

3.1. ПРИНЦИПЫ И ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ



Известно более 40 методов измерения влажности воздуха, использующие различные физико-химические процессы, такие как: конденсация, испарение, сорбция, электролиз, диффузия. Существуют микроволновые, инфракрасные спектральные, емкостные, цветовые и др. гигрометры [17, 21, 37, 98, 110, 188, 314]. Большое число методов объясняется разнообразием требований к задаче измерения, включая температурный интервал, точность, быстродействие, стабильность и пр. В соответствии с этим, каждый метод (способ и средство измерения) имеет определенные достоинства и недостатки. Универсального решения не существует.

Измерение влажности в объектах и аппаратах кондиционирования воздуха, в основном, выполняется такими приборами, как: психрометры; конденсационные гигрометры точки росы; механические (волосные) гигрометры; резистивные и емкостные датчики влажности.

В современных приборах чаще всего используется зависимость электрических свойств материалов от влажности воздуха для безинерционного и точного измерения.



3.1.1. Психрометры

Психрометрический метод является одним из самых распространенных методов измерения относительной влажности и основан на функциональной связи φ с психрометрической разностью температур $\Delta t_{психр}$. Эта связь устанавливается через величину парциального давления $P_п$ ($\Delta t_{психр}$) (2.17) и величину $P_п"(t)$ (2.16): $\varphi = P_п/P_п"$.

Психрометрическая разность температур $\Delta t_{психр} = t - t_м$ определяется с помощью пары ртутных термометров (либо электрических датчиков), обладающих одинаковыми размерами и инерционностью. Термометры располагаются рядом, при этом чувствительный элемент одного из них (так называемый мокрый термометр) обтянут тонким слоем хлопчатобумажной ткани (как правило, батист), который на момент измерений смачивается дистиллированной водой.

На рис.3.1, 3.3…3.5 представлены основные типы психрометров, используемых для измерения относительной влажности воздуха: Августа, Ассмана, американский вариант – психрометр пращевого типа (Sling Psychrometer) и дистанционные психрометры.

Наиболее простой прибор – психрометр Августа был создан в 1818 г. (Ernst Ferdinand August), аналогичный прибор в 1845 г. предлагает Анри Виктор Реньо (см. § 3.2, рис.3.42).

Аспирационный психрометр (в потоке воздуха) впервые был разработан Белли в 1831 г., а конструкция Ассмана (1886 г., Richard Assman) сохранилась до наших дней и, сегодня, является стандартным решением.

Устройство психрометра Августа (рис.3.1) не требует дополнительных пояснений.

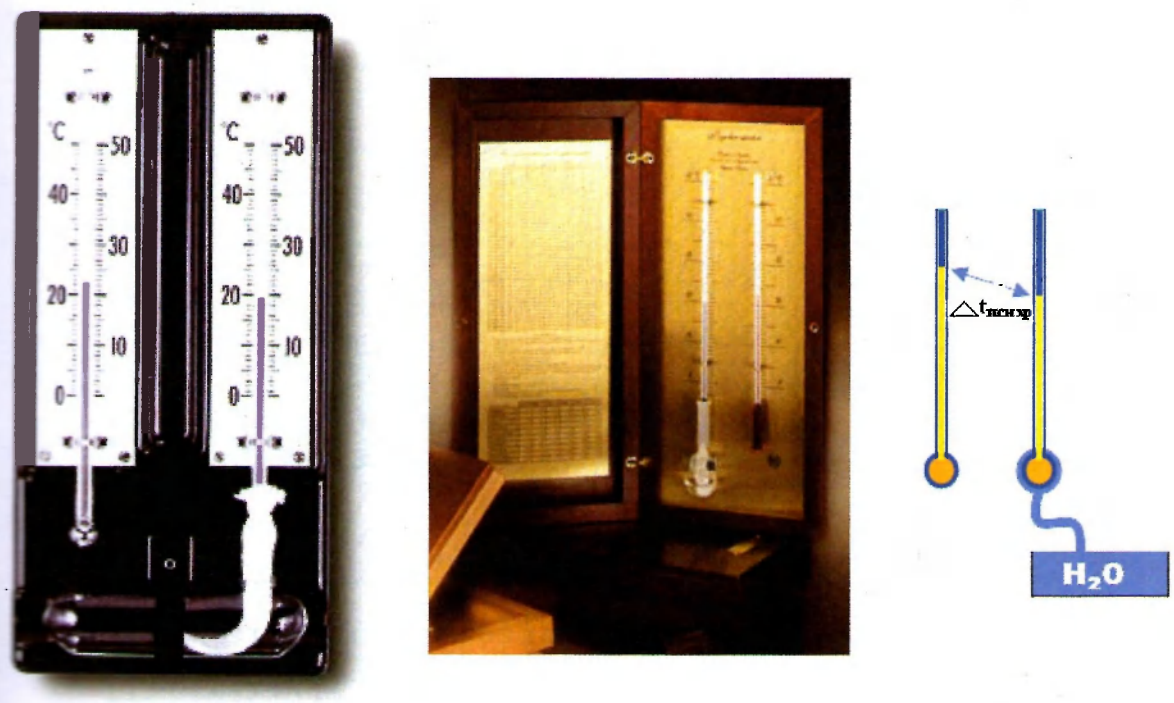


Рис.3.1. Психрометры Августа
(часто сопровождаются психрометрической таблицей).

В психрометре Ассмана (рис.3.4) чувствительные элементы термометров помещены в [illegible]ные колпачки – трубки из нержавеющей стали, при этом их наружная поверхность [illegible]льно полируется для экранирования от воздействия радиационного излучения. Через [illegible] трубки с помощью специального вентилятора с электрическим или ручным [illegible]нным) приводом прогоняется поток воздуха со скоростью $v_в$ = 3…5 м/с. При $v_в$ > 3 [illegible] погрешность измерения и психрометрический коэффициент стабилизируются на [illegible]ном минимальном уровне (§ 2.2.5).

В США распространен Sling Psychrometer (рис.3.5), использующий ручной привод [illegible]ращения пары термометров вокруг оси рукоятки со скоростью 300 об/мин, что [illegible]чивает указанную выше необходимую величину $v_в$.

[illegible] стабилизации показаний данных приборов необходима временная экспозиция около [illegible] мин.

Величина психрометрического коэффициента А в уравнении Реньо ($P_п = P_п' - A\,P_б\,\Delta t_{психр}$, [illegible] для психрометров: Августа – 0,0008 $К^{-1}$; Ассмана – 0,000662 $К^{-1}$ (при наличии льда – [illegible]583 $К^{-1}$) [184]. На основании этих данных составляются таблицы (табл. 3.1), различного [illegible] диаграммы и номограммы (рис.3.2, 3.3), с помощью которых, по результатам [illegible]ений t и $t_м$, можно определить величину φ, а также других параметров влажности.

Психрометрический метод относится к базовым методам, и в области положительных [illegible]ператур является одним из лучших. Точность измерения относительной влажности [illegible]ционными психрометрами в диапазоне φ = 5…95 % при t > 0 °С: ± 2 %, t ≥ -10 °С: [illegible] [37].

В области низких температур воздуха при t < -10 °С данный метод практически не [illegible]ет.

На рис.3.2, в качестве примера, показано, что сочетанию величин t = 32 °С и $t_м$ = 20 °С [illegible] нормальном атмосферном давлении отвечает значение φ = 35 %.

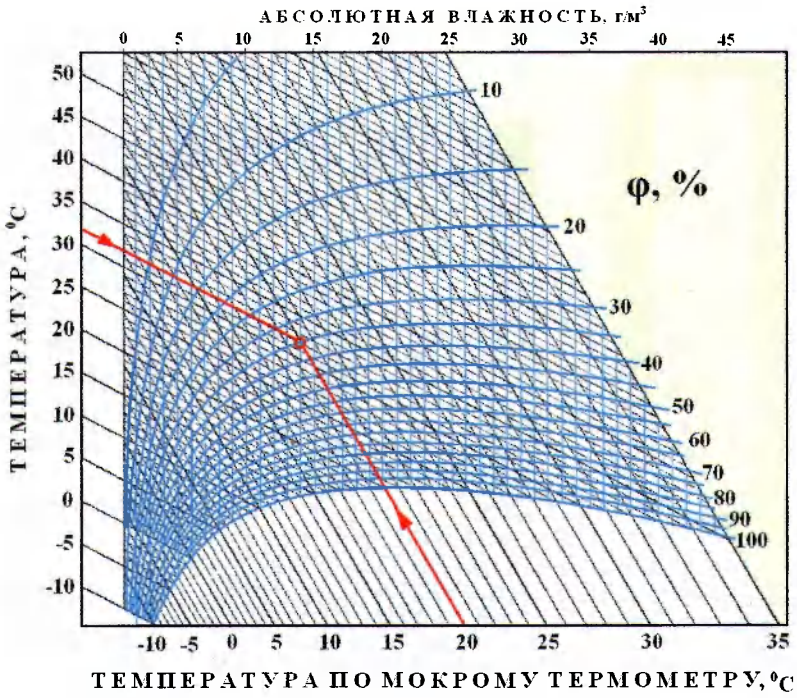


Рис.3.2. Диаграмма влажного воздуха t, $t_м$ – номограмма определения φ.

Таблица 3.1. Значения относительной влажности воздуха φ [%] в зависимости от температуры t [°C] и психрометрической разности температур (t - $t_м$) [°C].

t, °C	Психрометрическая разность температур (t - $t_м$), °C														
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
-10,0	85	69	54	39	24	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-7,5	87	73	60	48	35	22	10	-	-	-	-	-	-	-	-
-5,0	88	77	66	54	43	32	21	11	1	-	-	-	-	-	-
-2,5	90	80	70	60	50	41	37	22	12	3	-	-	-	-	-
0,0	91	82	73	65	56	47	39	31	23	15	-	-	-	-	-
2,5	92	84	76	68	61	53	46	38	31	24	-	-	-	-	-
5,0	93	86	78	71	65	58	51	45	38	32	1	-	-	-	-
7,5	93	87	80	74	68	62	56	50	44	38	11	-	-	-	-
10,0	94	88	82	76	71	65	60	54	49	44	19	-	-	-	-
12,5	94	89	84	78	73	68	63	58	53	48	25	4	-	-	-
15,0	95	90	85	80	75	70	66	61	57	52	32	12	-	-	-
17,5	95	90	86	81	77	72	68	64	60	55	36	18	2	-	-
20,0	95	91	87	82	78	74	70	66	62	58	40	24	8	-	-
22,5	96	92	87	83	80	76	72	68	64	61	44	28	14	1	-
25,0	96	92	88	84	81	77	73	70	66	63	47	32	19	7	-
27,5	96	92	89	85	82	78	75	71	68	65	50	36	23	12	1
30,0	96	93	89	86	82	79	76	73	70	67	52	39	27	16	6
32,5	97	93	90	86	83	80	77	74	71	68	54	42	30	20	11
35,0	97	93	90	87	84	81	78	75	72	69	56	44	33	23	14
37,5	97	94	91	87	85	82	79	76	73	70	58	46	36	26	18
40,0	97	94	91	88	85	82	79	77	74	72	59	48	38	29	21

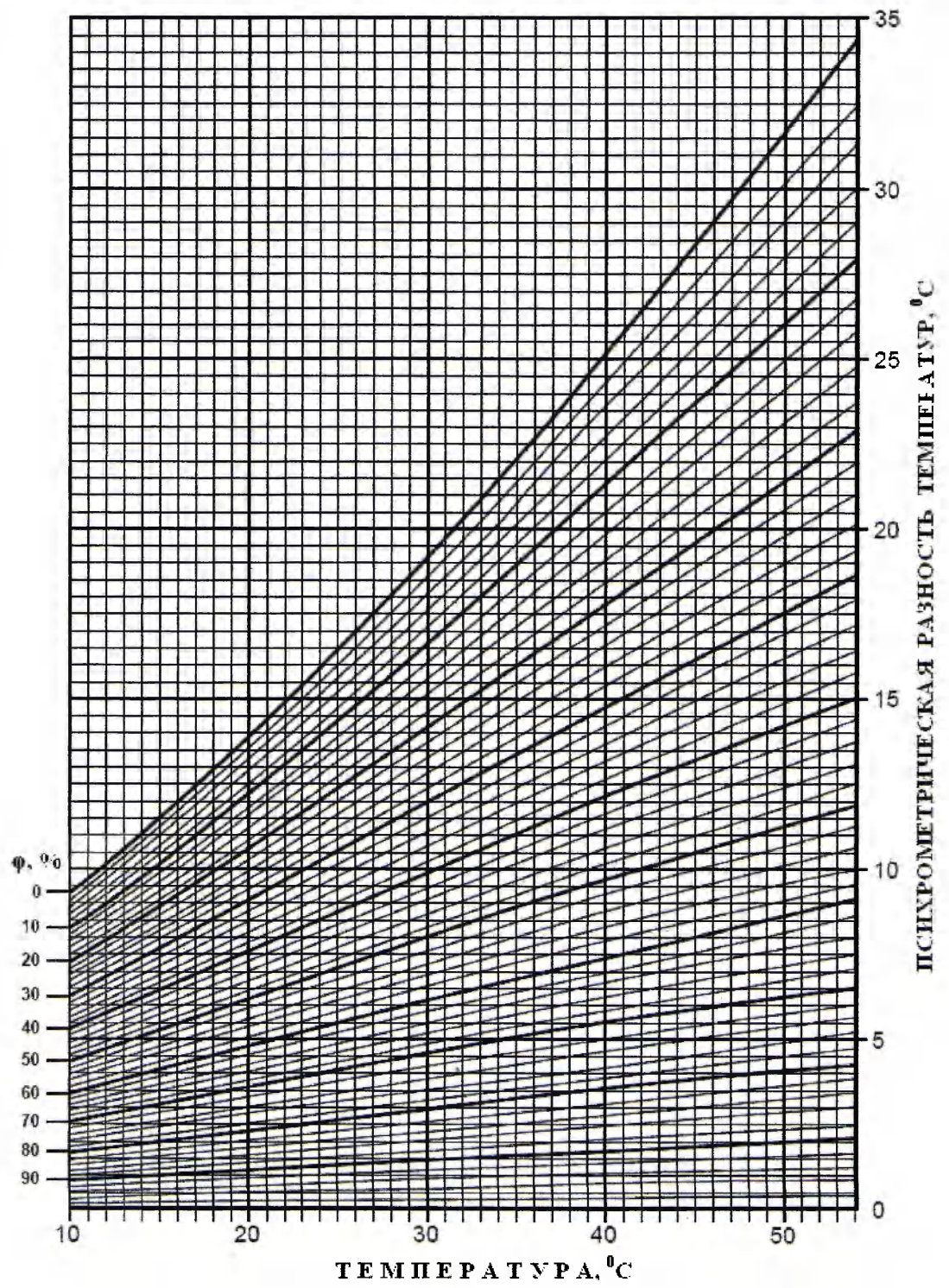


Рис.3.3. Номограмма определения φ (t, $\Delta t_{психр}$) при $v_в \geq 3$ м/с.

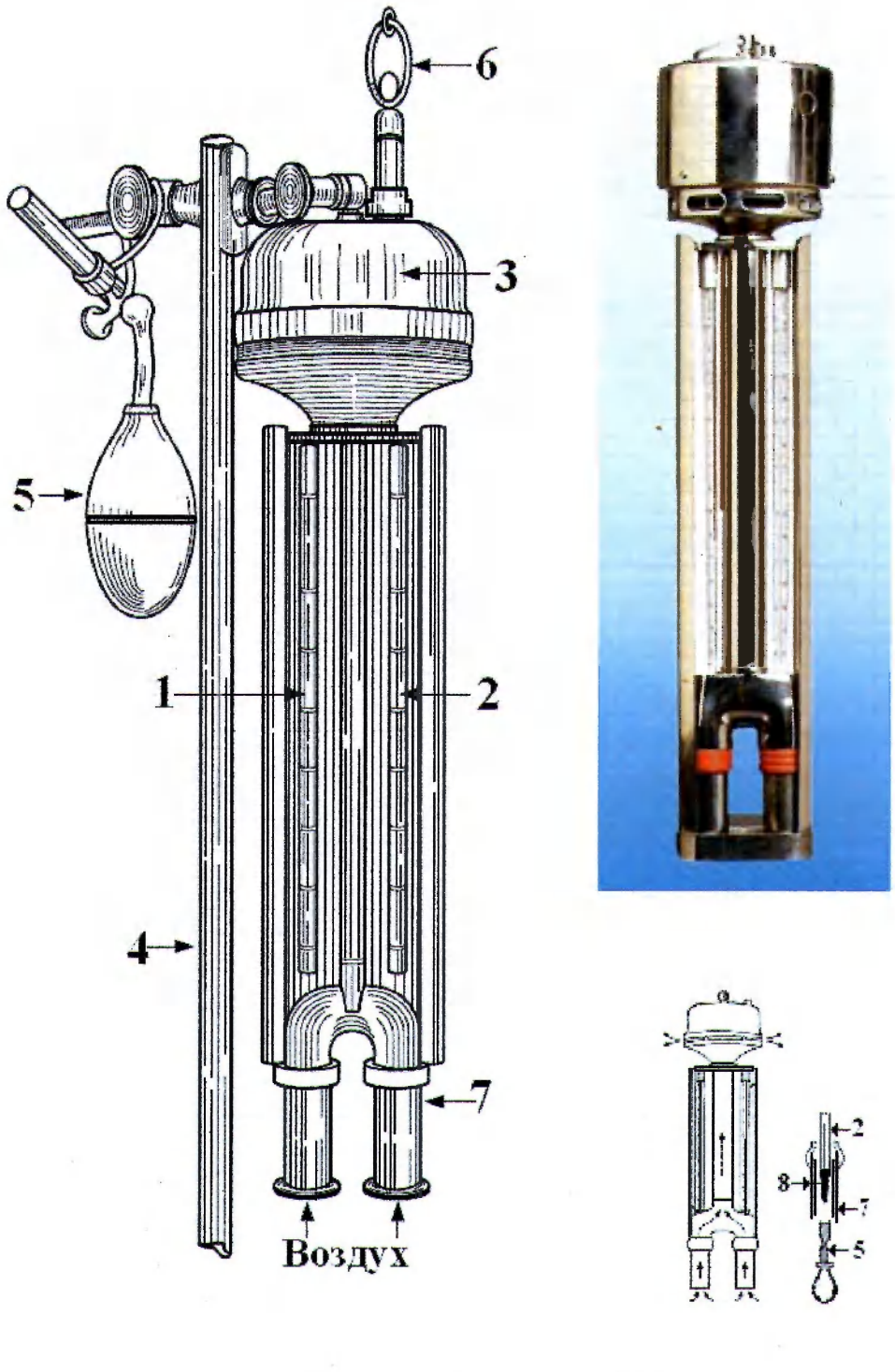


Рис.3.4. Психрометр Ассмана (схема и фотография):

1 – сухой термометр; 2 – мокрый термометр; 3 – вентилятор механический с пружинным механизмом; 4 – штатив; 5 – резиновая груша с пипеткой; 6 – подвесное кольцо; 7 – защитные экраны (колпачки); 8 – фитиль.





Рис.3.5. Sling Psychrometer.

Психрометр пращевой

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

Для осуществления дистанционного измерения (рис.3.6) вместо ртутных термометров применяют термометры сопротивления, термисторы либо термопары. Важным моментом при этом является непрерывность смачивания фитиля мокрого термометра, для чего необходима водяная емкость значительного объема [37, 182].

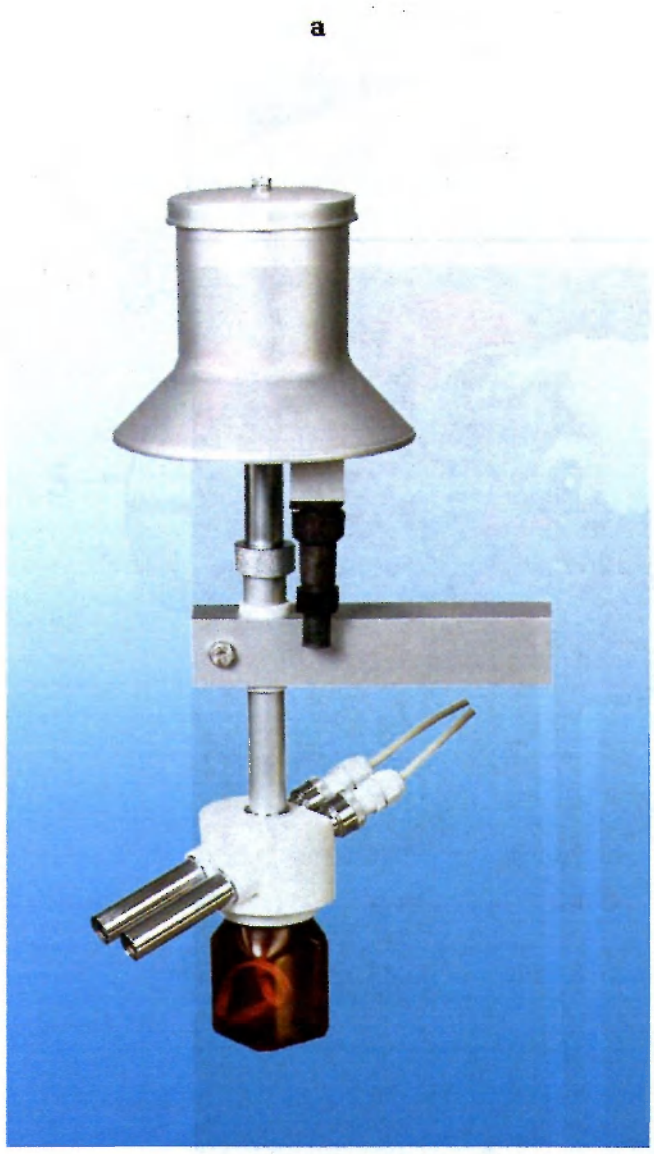


Рис.3.6. Метеорологический прибор – электрический психрометр Франкенберга (а), датчики дистанционного психрометра (термопары, заделанные в трубки) – б, и схемы подпитки мокрого термометра – в:

1 – сухой термометр; 2 – мокрый термометр; 3 – фитиль; 4 – водяная емкость.

3.1.2. Конденсационные гигрометры

Конденсационные оптические гигрометры с охлаждением рабочей зеркальной металлической поверхности измеряют температуру точки росы (dew point) или температуру образования инея (frost point) при $t < 0$ °C, в связи с чем, они относятся к приборам, построенным на базовых (фундаментальных) принципах измерения влажностных характеристик (§ 2.2.5).

Современные приборы этого типа работают в широком диапазоне значений τ = -80… 85 °C, обладают высокой точностью (0,2, 0,15 либо 0,1) °C) и поэтому используются в качестве эталонных для тарировки гигрометров другого типа.

В 1960-е годы, с момента внедрения термоэлектрических охладителей и электрооптических методов обнаружения росы, началось массовое применение конденсационных гигрометров в инженерной практике. До этого времени их использование было ограничено уровнем лабораторных исследований, из-за технических проблем, возникавших при охлаждении зеркала криогенными жидкостями, контроле его температуры и обнаружении момента выпадения росы (обычно визуальным путем).

Также, до 1980 г., оставались нерешенными вопросы корректировки результатов измерения с учетом загрязнения поверхности зеркала различными примесями, выпадающими из воздуха вместе с конденсатом. В указанный период различными приборостроительными компаниями предлагается решение этой проблемы. Наибольшее распространение получил метод PACER (Program Automatic Error Reduction) – программа автоматического уменьшения погрешности, – разработанный компанией General Eastern (GE).

Устройство гигрометра показано на рис.3.7 и 3.8. Основной элемент – полированная зеркальная поверхность металлической пластины из родия, золота, платины или нержавеющей стали, – охлаждается термоэлектрическим модулем (ТМО), работа которого основана на эффекте Пельтье [31]. На поверхность зеркала под углом 45 ° направлен световой поток инфракрасного спектра от светодиода, который отражается от зеркала и принимается световым детектором (фототранзистором). В случае сухой поверхности фотодетектор фактически получает 100 % светового сигнала. При появлении на зеркале росы или инея часть светового потока рассеивается и фотодетектор, соответственно, принимает меньшее количество света. Электрическая схема оптической системы (уравновешенный мост), элементами которой являются два фотодетектора (рабочий и контрольный), фиксируя этот момент, выдает управляющий сигнал на блок питания ТМО для уменьшения мощности охлаждения. Измерение величины τ производится высокоточным четырехпроводным платиновым 100-омным термосопротивлением (PRTD), вмонтированным в пластину зеркала.

Расход влажного воздуха над зеркалом должен быть в пределах 0.25…2.5 л/мин. При этом, измерения можно производить непосредственно в потоке воздуха с помощью портативного прибора-датчика (рис.3.7) либо в стационарном приборе в отбираемых пробах (рис.3.8, 3.9).

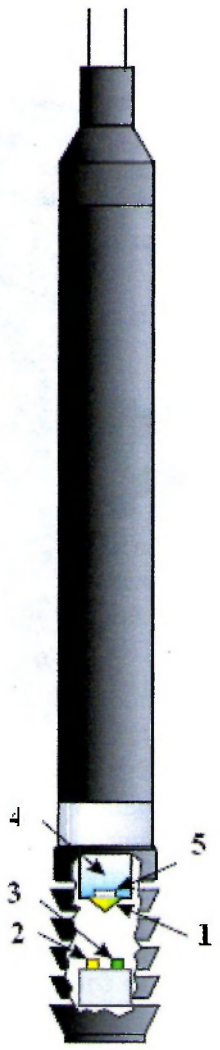


Рис.3.7. Конденсационный датчик точки росы ММ0037:

1 – зеркало-призма; 2 – фотодиод; 3 – фототранзистор; термоэлектрический модуль охлаждения; термометр сопротивления Pt 100.

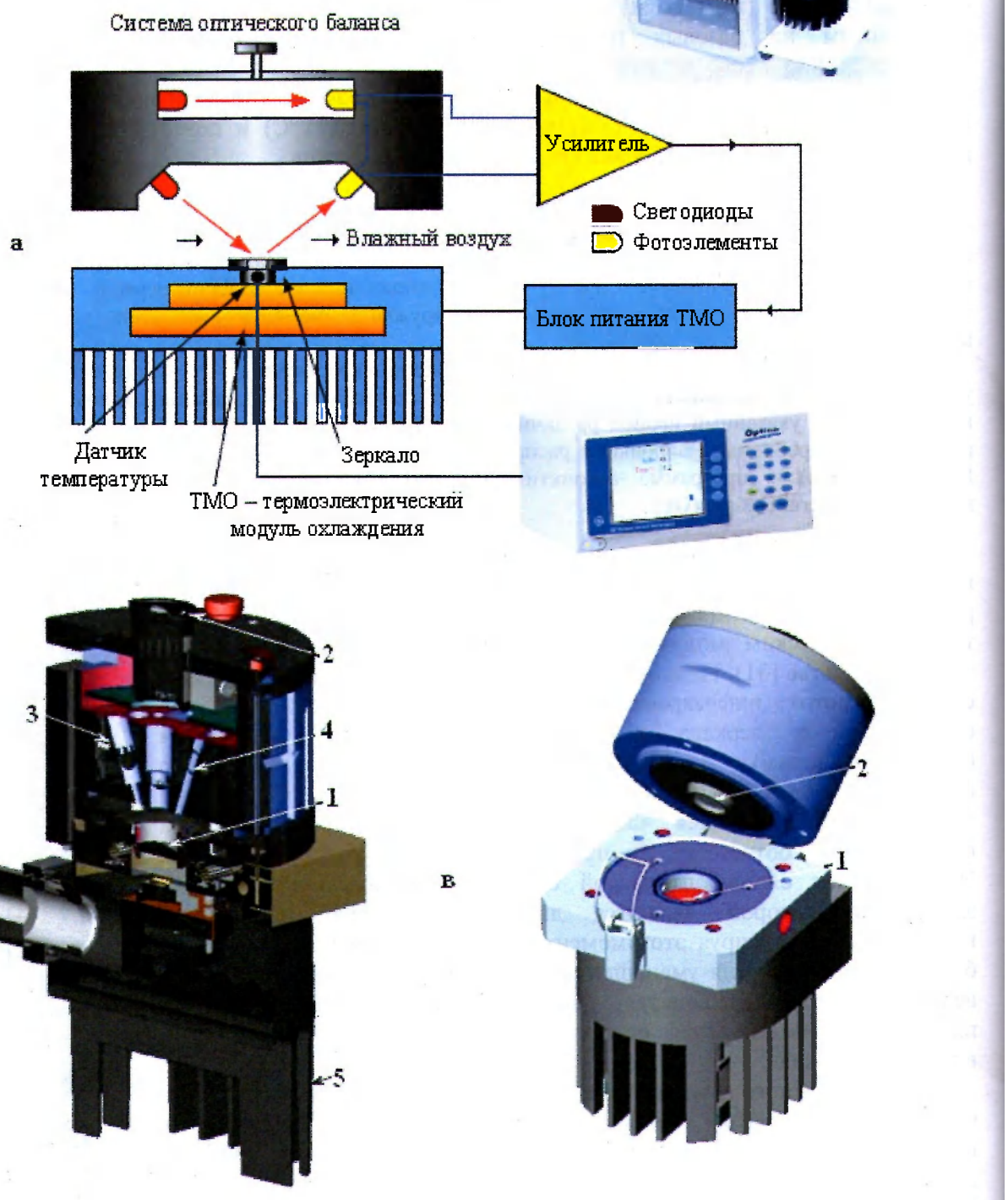


Рис.3.8. Конденсационный гигрометр точки росы Optica DPH-2020: схема работы – а, внешний вид (фотография) – б и устройство– в:

1 – зеркало; 2 – линза (концентратор света); 3 – фотодиод; 4 – фототранзистор; 5 – ребра теплоотводящей поверхности ТМО.



Рис. 3.9. Система отбора проб воздуха.

Следует подчеркнуть, что значение температуры точки росы определяется в установившемся режиме образования водяной пленки определенной постоянной величины (≥ 1 мкм). при равенстве молекул, конденсируемых на поверхность зеркала и испаряющихся с нее. Это, во-первых, позволяет избежать погрешности измерения, возникающей из-за кривизны поверхности элементов конденсата [98], а во-вторых, характеризует отсутствие градиента температур в пленке, и, следовательно, равенство температур пленки и металлической пластины. Поддержание равновесного режима особенно важно при отрицательных значениях τ, когда скорость осаждения инея значительно ниже скорости сублимации [37].

Чувствительность данного метода определяется темпом изменения величины τ от φ:

$$\partial \tau / \partial \varphi = (k/r_м)/ \varphi \, [(1/T) - (k/r_м)\ln \varphi]^2, \qquad (3.1)$$

где $r_м$ – скрытая теплота испарения воды (либо льда), рассчитанная на одну молекулу,
k – постоянная Больцмана (вывод уравнения выполнен в [37]).

Из уравнения 3.1 видно, что на изменение τ (φ) определяющее влияние оказывает величина $k/r_м$, которая в диапазоне -40…40 °С составляет 1,8…1,95. Это существенный коэффициент усиления и метод позволяет контролировать относительную влажность воздуха φ с точностью ± 1 % по замерам температуры точки росы τ с указанной выше точностью (0,2…0,1) °С.

Программа автоматического уменьшения погрешности PACER предназначена для гигрометров, работающих в промышленных условиях, т.е. для замеров в загрязненной воздушной среде. Программа предусматривает определенный цикл операций (рис.3.10). На первом этапе, по достижению точки росы пробы воздуха, устройство продолжает охлаждение зеркала. Охлаждение осуществляется значительно ниже τ для формирования толстого слоя конденсата (возможно выпадения всей влаги). Предполагается, что в этом слое содержаться все нерастворимые компоненты загрязнения. Затем, на втором этапе, происходит быстрое нагревание зеркала, способствующее испарению влаги и растворимых примесей. При этом нерастворимые компоненты остаются на зеркале в виде сухого остатка, который локализуется в нескольких местах (пятнах, либо по терминологии производителя –

островках кристаллизуемой соли) и занимает всего лишь около 15 % рабочей площади зеркала (рис. 3.10б). Общая масса загрязнения не уменьшается, она только перераспределяется. Таким образом, при повторном охлаждении, на последнем этапе цикла, получают зеркало с 85 % площади чистой и блестящей поверхности. В конце второго этапа очень быстро (за 5 с) осуществляется автоматическая коррекция прибора в результате сравнения сигнала от контрольной пары излучатель – приемник.

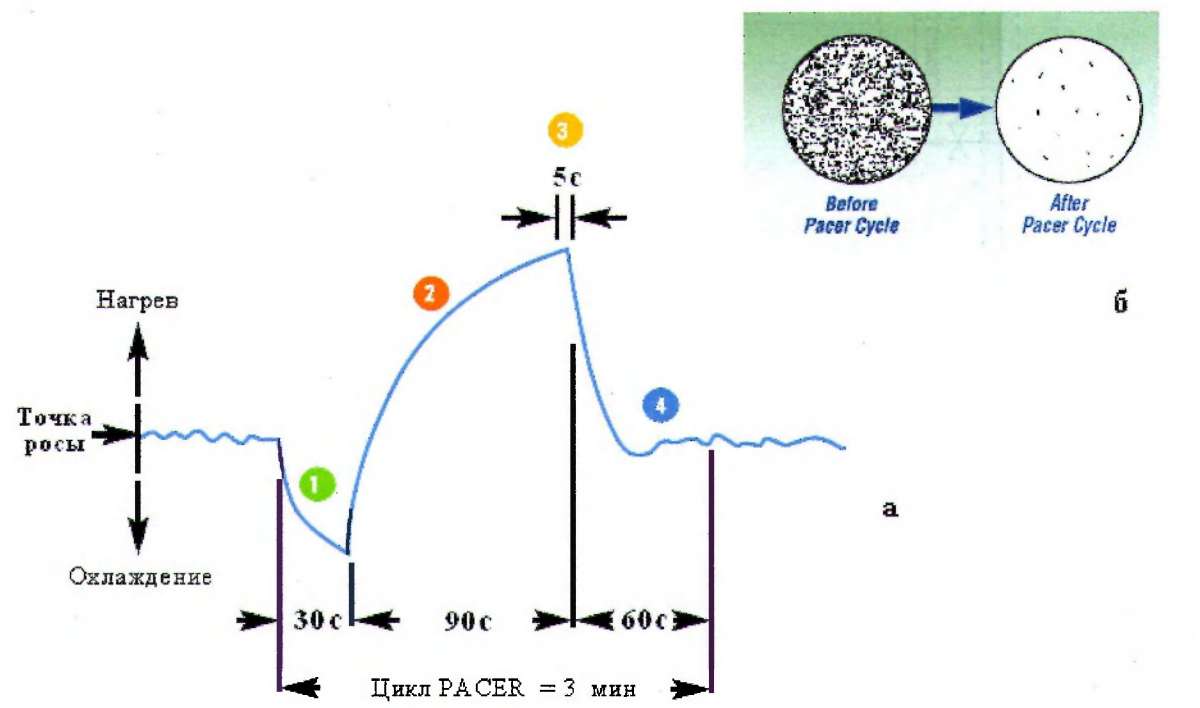


Рис.3.10. Цикл изменения температуры зеркала
конденсационного гигрометра в соответствии с программой PACER (а):
1 – охлаждение ниже τ; 2 – быстрое (flash) нагревание;
3 – автоматическая коррекция; 4 – охлаждение до τ,
и иллюстрация состояния рабочей поверхности зеркала (б).

Применение метода PACER требует физической очистки зеркала после каждого измерения: ватным тампоном, пропитанным раствором для очистки стекол, а затем дистиллированной водой. На рис.3.8в показано, что верхняя часть прибора с оптической системой легко разобщается с нижней частью, где расположено охлаждаемое зеркало, и, таким образом осуществляется доступ к зеркалу для его обслуживания.

Конденсационные гигрометры выпускаются с одно- и двухступенчатым термоэлектрическим охлаждением зеркала, а также с дополнительными ступенями охлаждения за счет работы водоохлаждающих и с непосредственным кипением хладагента холодильных машин (рис.3.11).

Понижение температуры зеркала по отношению к температуре окружающей среды, в которой находится прибор возможно до 45 °С (одна ступень), 65 °С (две), 95 °С (четыре), 112 °С (пять), рис.3.12.

При измерении температуры точки росы ниже 0 °С необходимо знать в какой фазе пребывает конденсат на зеркале: переохлажденная вода или иней. В низкотемпературных гигрометрах с многоступенчатой схемой охлаждения для этих целей предусмотрен микроскоп с 10-кратным увеличением (рис.3.11).

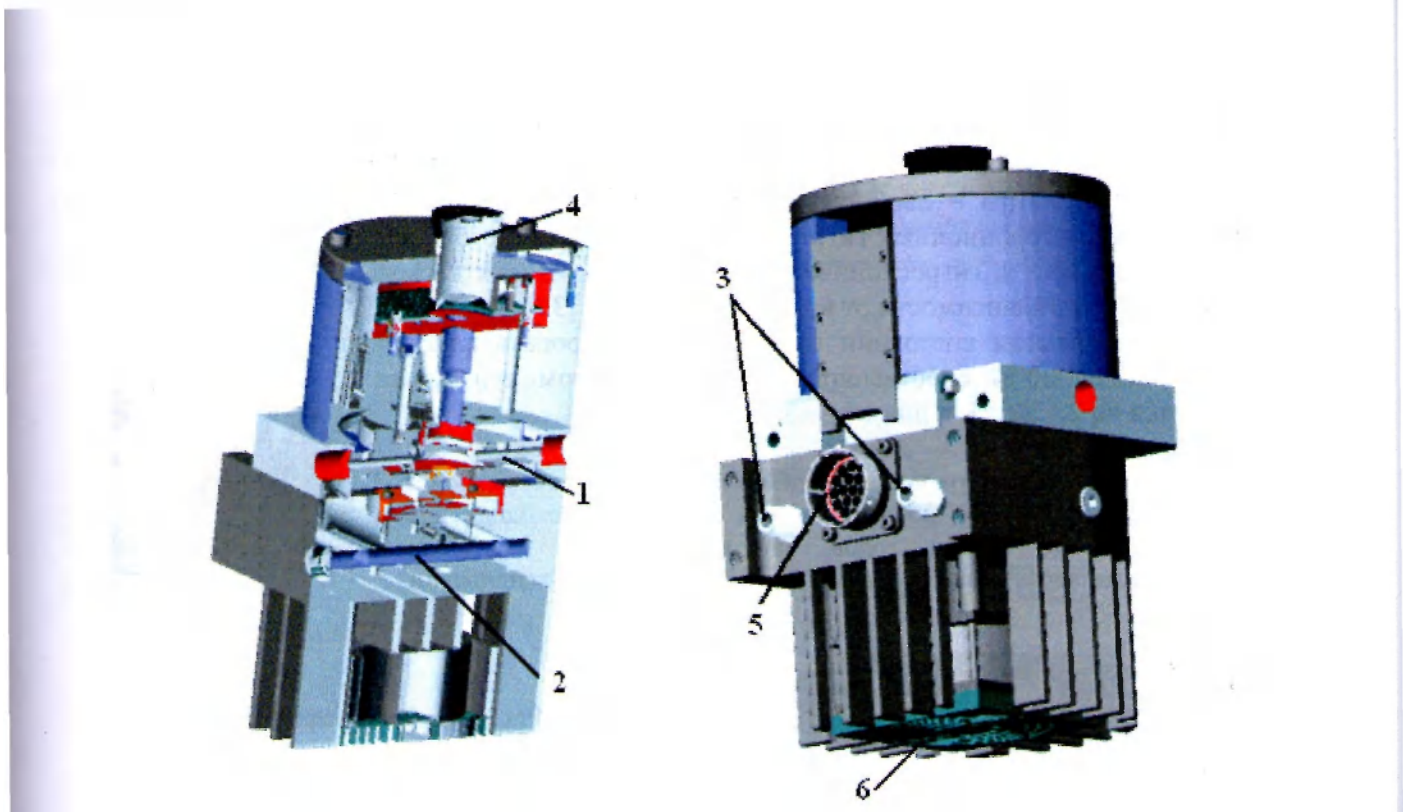


Рис.3.11. Конденсационные гигрометры с многоступенчатой схемой охлаждения: 1 – воздушный канал (для измерения); 2 – водяной канал охлаждения; 3 – штуцеры подвода и отвода воды; 4 – микроскоп; 5 – коммутирующий разъем электропитания; 6 – вентилятор охлаждения термоэлектрического модуля.

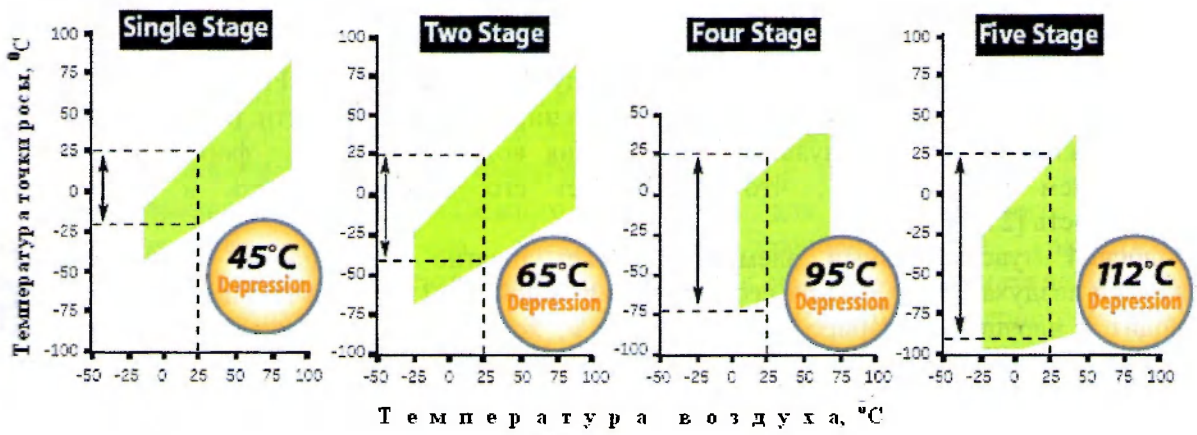


Рис.3.12. Зависимость величины τ (t) для гигрометров с 1, 2, 4 и 5 ступенями охлаждения.

Данный метод измерения работает в широком диапазоне температур -150…350 °С и давлений 0,01…40 МПа исследуемого воздуха [37]. Регистрация показаний в области положительных значений температуры точки росы происходит за 1 с, при отрицательных значениях τ существенно возрастает и при $\tau \leq -60$ °С занимает несколько часов.

Конденсационные гигрометры по отношению к гигрометрам других типов имеют более высокую стоимость, требуют квалифицированного технического обслуживания.

3.1.3. Механические (волосные) гигрометры

Волосные гигрометры – наиболее простые приборы измерения – относятся к классу сорбционных гигрометров деформационного типа, использующих свойства гигроскопических материалов изменять свои линейные размеры в зависимости от влажности воздуха [37].



Волос в нормальном состоянии способен адсорбировать влагу в количестве более 30 % собственной массы. При этом его длина увеличивается на 2…2,5 %, а диаметр на 15…20 %.

В качестве чувствительного элемента волосного гигрометра используется женский (либо конский) волос, поскольку исходная длина имеет значение. До 1960-х годов, по качественным показателям, предпочтение отдавалось волосам натуральных блондинок из Скандинавии.



Рис. 3.13. Фотография[1] сортировки пряди волос для гигрометра [128].

[1]выполнена в 1943 году в Вашингтонском технологическом институте. В комментарии к данной фотографии сообщается, что волосы для гигрометров поступают преимущественно из скандинавских стран, а цена мотка белокурых волос – 25 $: “from northern Midwestern states where Scandinavian blood predominates. A good hank of blond hair usually brings about $25”.

Волос, как правило, обрабатывается по методу Франкенберга (F. Frankenberger, 1944): калибруется в специальных валках для обеспечения его однородности по всей длине, а затем обезжиривается. В результате вальцевания волос приобретает форму эллипса с соотношением полуосей 4:1, что увеличивает его чувствительность и уменьшает инерционность [21, 98].

Волосной чувствительный элемент работает штатно в диапазоне относительной влажности воздуха 20…90 % при его натяжении силой 1…2 г. Превышение этих значений приводит к нарушению тарировки гигрометра и, хотя волос выдерживает значительные усилия[2], а также сохраняет эластичность вплоть до 5 %-удлинения, волос может стать непригодным для использования.

[2]к сведению: *наиболее ломкие волосы у африканцев, а наиболее сильными волосами обладают азиаты. Один волос азиата, за счет кератина, может выдержать усилие в 1 кг, 100 волос – соответственно 100 кг, а средняя копна головы человека – 12 тонн.*

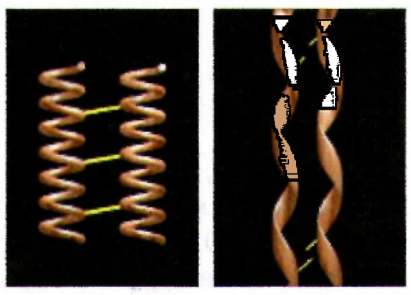
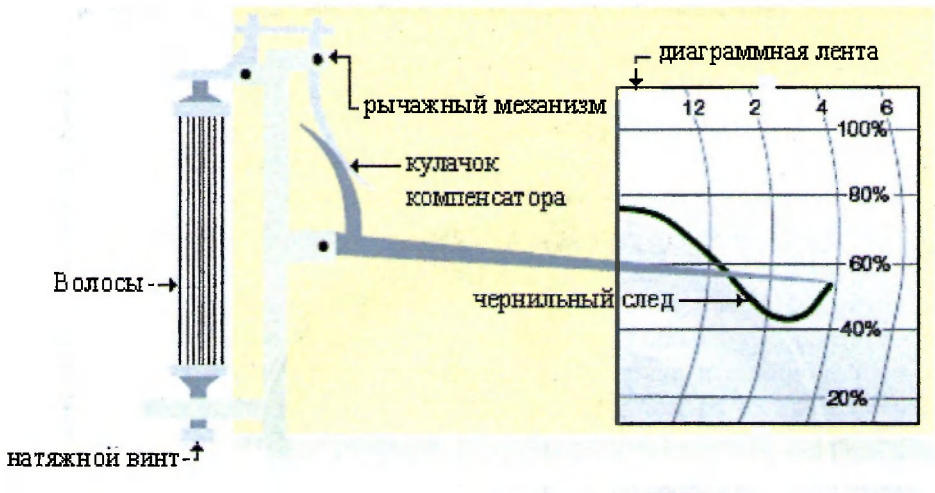


Рис.3.14. Разрушение кератина в напряженном волосе.

Изменение длины волоса передается с помощью простого рычажного механизма на стрелку в показывающем приборе (рис.3.16) либо специальное перо с автоматическим подводом чернил в самописце (рис.3.15).



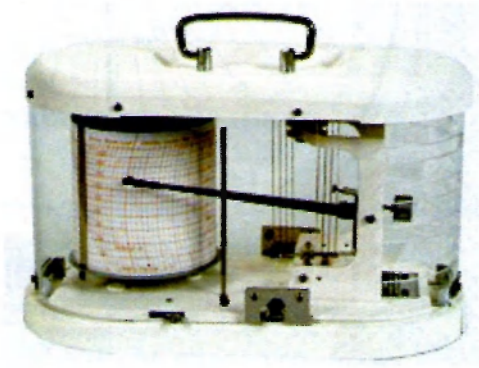


Рис.3.15. Схема и фотография волосного самопищущего гигрометра.

Зависимость длины волоса от величины относительной влажности воздуха носит нелинейный характер и характеризуется значительным гистерезисом. Волосной гигрометр обладает существенной инерционностью (около 15 мин). Его показания по истечению времени требует обновления тарировки. Погрешность измерения составляет ± 5 %. Может применяться при отрицательных температурах.

Использование механизма волосного гигрометра для дистанционного измерения посредством различного рода электрических преобразователей (резистивных, индукционных и пр.) практически невозможно, в виду малого усилия натяжения волоса [37]. Однако эта задача решается с помощью гигроскопического полимерного материала (например, бутирата целлюлозы). Изменение длины полоски таких полимеров преобразуется в электрический сигнал тензометром.

Созданию дистанционных приборов с волосным датчиком влажности могут помочь результаты исследования норвежских ученых из университета Осло [223] на предмет выявления электрической проводимости человеческих волос (как частный случай кератинизированных тканей) в цепи постоянного тока (DC). В диапазоне φ = 31…85 % установлена экспоненциальная зависимость электропроводности волос G от влажности воздуха, независящая от частоты тока < 1 кГц:

$$G = G_0 \exp(k \varphi), \qquad (3.1)$$

где $k = 0{,}2$, $G_0 = 50$ aS (аттосименс)

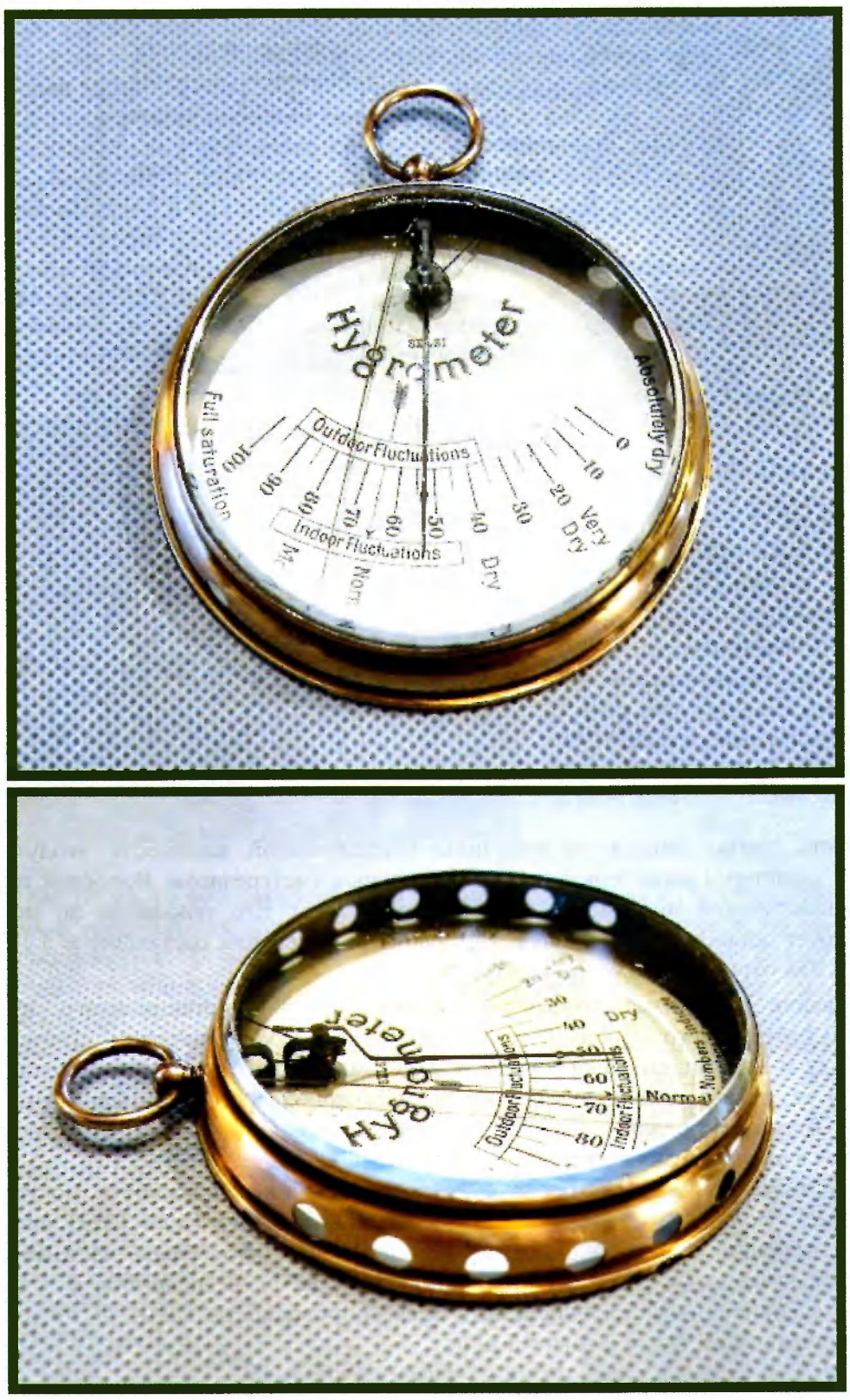
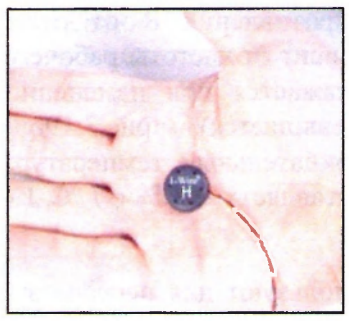


Рис.3.16. Гигрометр Selsi Hair Hygrometer.

антикварный волосной показывающий прибор в форме карманных часов

3.1.4. Электрические датчики влажности



Существует достаточно большая группа различных датчиков влажности, использующих электрофизические свойства материалов чувствительного элемента. Основное достоинство этих устройств - миниатюрность, что необходимо при измерении влажности очень малых масс воздуха, исследовании влажностных полей, а также в труднодоступных местах [37].

Современная техника измерений и автоматизации в области кондиционирования воздуха, в основном, использует два типа датчиков: резистивные и емкостные, которые обладают высокой чувствительностью (0,1 % φ), быстродействием (< 15 с), достаточной точностью (± 2 %), незначительным гистерезисом (< 3 %), стабильностью показаний (изменения не более 2 % за 5 лет) и при этом дешевы. Рабочий диапазон φ = 0…100 % (10…95 %) при температурах: -40…120 °С.

3.1.4.1. Резистивные датчики

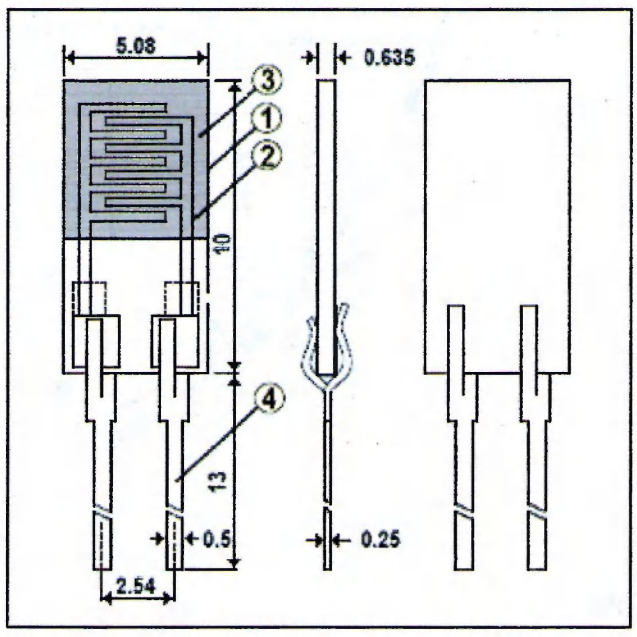
Резистивные датчики гигрометров устроены следующим образом: на керамической либо стеклянной основе располагается тонкий слой гигроскопического полимера, в который встроены два электрода в виде гребенки из благородных металлов (золото либо платина), рис.3.17. Электроды подключаются к источнику (генератору) переменного тока частотой f = 1…10 кГц и напряжением U ≤ 1 В (такое малое напряжение предотвращает поляризацию и саморазогрев датчика).

Датчик реагирует на изменение влажности воздуха. Увеличение φ приводит к уменьшению величины сопротивления полимера: от 100…10 МОм при φ = 10 % до 2…10 кОм при φ = 90 % (рис.3.19).



Рис.3.17. Устройство резистивного датчика влажности:

1 – основание;
2 – электроды;
3 – гигроскопический полимер;
4 – электроконтакты.



Рабочая характеристика датчиков, а именно, зависимость сопротивления R от относительной влажности φ практически не зависит от частоты рабочего тока при f > 1 кГц (рис.3.19а) и несколько искажается при изменении температуры* (с ростом t величина R уменьшается), рис.3.19б [267]. Резистивные датчики имеют отрицательный температурный коэффициент, который, как правило, составляет: -0.7 % φ / °С. Корректирующий фактор:

$$C = -0.7(t-25) \qquad (3.2)$$

используют для пересчета значения φ, полученного по тарировочной зависимости φ (R) при $t = 25\ ^0$ С.

Проблема температурной компенсации решается размещением на одном основании датчика двух чувствительных элементов по φ и t (рис.3.18) с включением их в определенную измерительную схему (рис.3.20).

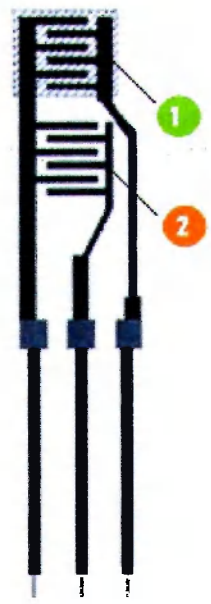




Рис.3.18. Резистивный датчик влажности с температурной компенсацией*:
1 – чувствительный элемент по φ; 2 – терморезистор.

*на фото слева показаны миниатюрные датчики компании Sensirion, справа – TDK

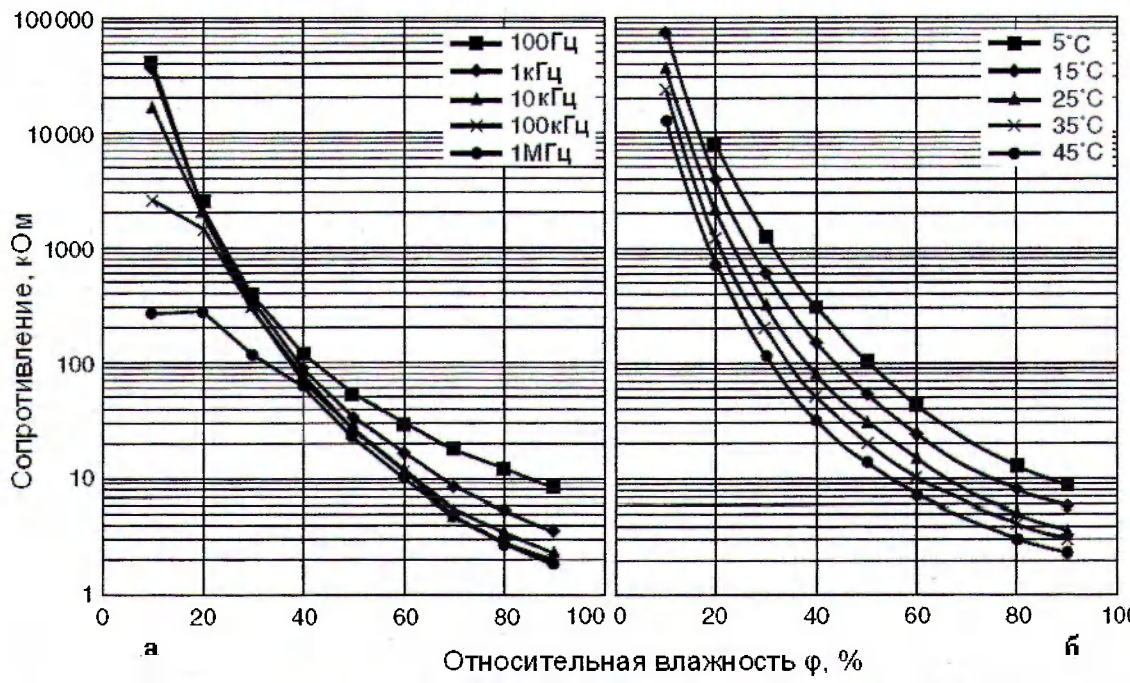


Рис.3.19. Частотные характеристики (а) и зависимость сопротивления датчика CHS-XS (TDK) от величины φ при различных значениях температуры (U = 1 В, f = 1 кГц) – б.

*температурная чувствительность R (t) на два порядка меньше влажностной R (φ), однако при существенном изменении температуры необходимо вводить соответствующую поправку [89].

На рис.3.20а приведена зависимость сопротивления материалов, используемых в качестве терморезистора (датчика температуры) [296]. Номинальное сопротивление силиконового термодатчика при 25 °С – 1035 Ом. Сопротивление в 1 кОм тонкой фольги платины проявляется при 0 °С, никеля при 21 °С. Темп изменения R (t) (угловой коэффициент линейной зависимости) для силикона – 8 Ом/°С, никеля – 5 Ом/°С, платины – 4 Ом/°С.

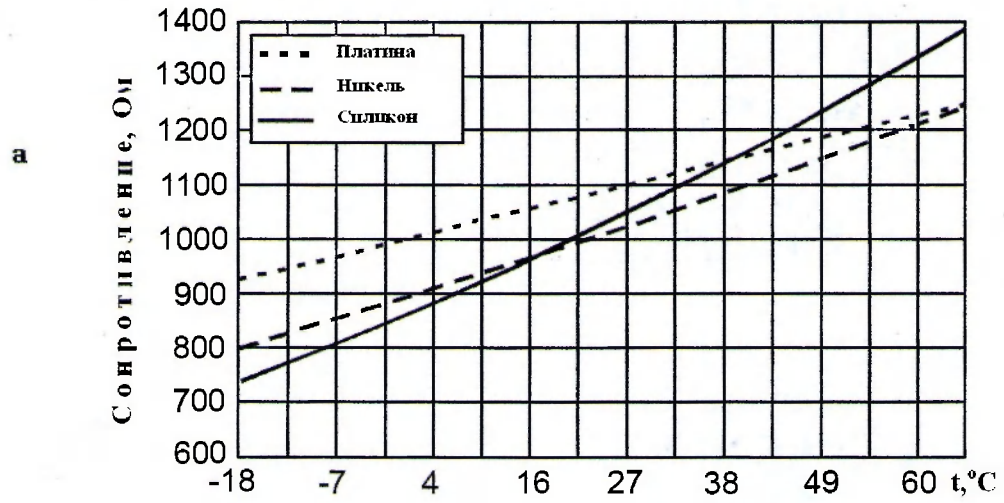
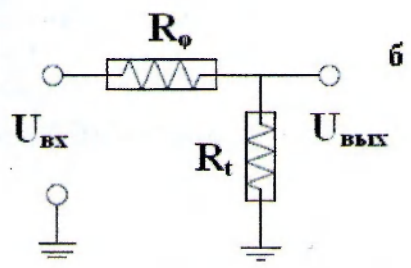


Рис.3.20. Зависимость сопротивления термодатчика от температуры (а)
и
простейшая схема температурной компенсации (б):
R_φ – сопротивление гигроскопичного полимера;
R_t – сопротивление терморезистора.



Электронная схема преобразует сигнал датчика влажности в линейную зависимость выходного напряжения $U_{вых}(\varphi)$ постоянного тока в полном диапазоне φ от 0 до 100 % (рис.3.21а) с точностью ± 3…5 %. На рис.3.21б показаны результаты работы узла температурной компенсации.

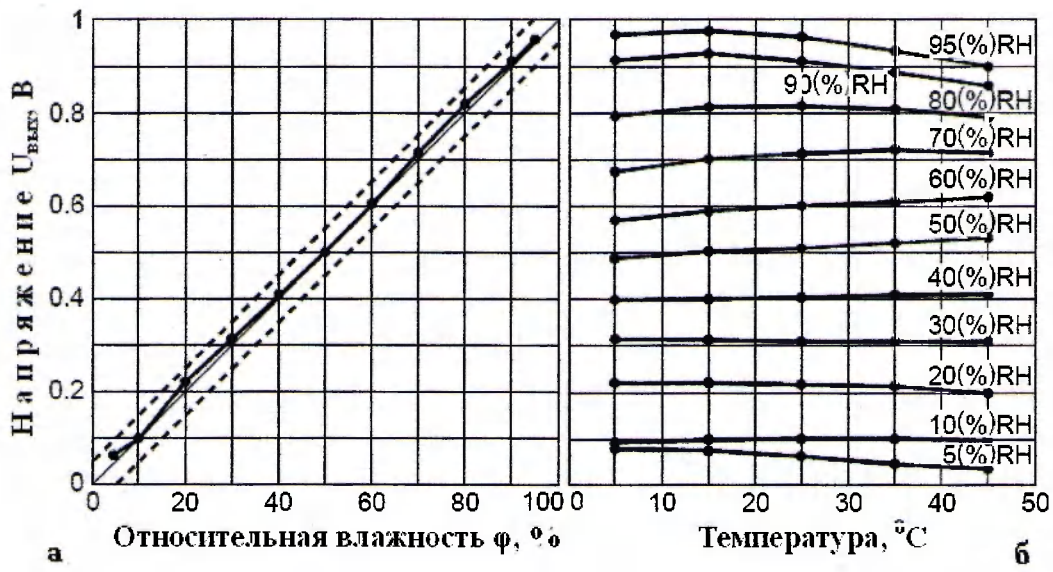
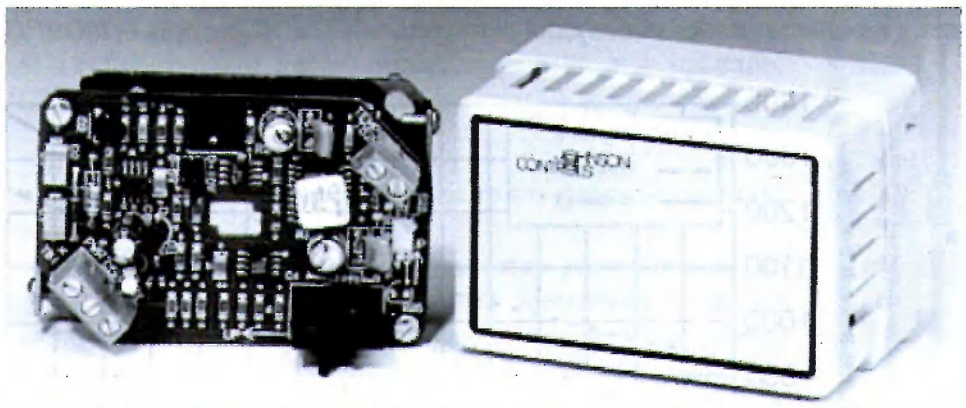


Рис.3.21. Зависимость выходного напряжения $U_{вых}(\varphi)$ – а
и $U_{вых}(\varphi, t)$ – б, как результат температурной компенсации [272].

Компания Johnson Controls выпускает резистивные датчики влажности в настенном исполнении и для монтажа на воздуховоды СКВ в комплекте с блоком температурной компенсации (рис.3.22).

а



б



Рис.3.22. Датчики Johnson Controls настенные (HE-67xx-0N0BT Wall Mount Humidity Element) – а и для измерения в воздуховодах (HE-67xx-0N00P Duct Probe Humidity Element) – б [296].

Резистивным датчикам также присуща зависимость электрической емкости от влажности воздуха за счет своей конструкции – перемежающиеся гребенчатые электроды. Однако, в области низких значений $\varphi = 0…30$ % она существенно нелинейна (рис.3.23) и практически непригодна для использования в приборах измерения. С изменением конструкции отмеченный недостаток устраняется (см. следующий параграф).

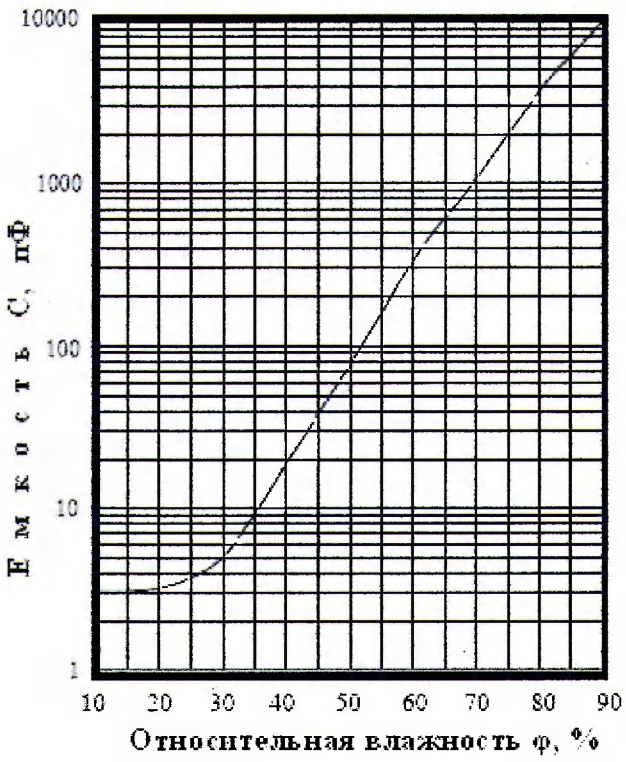


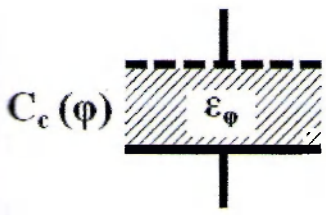
Рис.3.23. Зависимость электрической емкости резистивного датчика от относительной влажности воздуха при t = 25 °С и f = 1 кГц [298].

3.1.4.2. Емкостные датчики



Емкостные датчики влажности используют две токопроводящие пластины, между которыми заключена диэлектрическая пленка (рис.3.24). Это образует конденсатор, чувствительный к количеству водяного пара в воздухе. При поглощении водяных паров активная часть датчика изменяет свою диэлектрическую постоянную, и, таким образом, изменяется емкость датчика пропорционально изменениям относительной влажности.

Достоинством емкостных датчиков является их приспособленность к работе в химически агрессивных средах (например, воздушные среды плавательных бассейнов, содержащие пары хлора, или помещений содержания домашнего скота с парами аммиака).



Особенностью емкостного датчика является то, что верхний электрод выполнен из пористого металла толщиной 0,1 … 1,0 мкм. Рекомендуемая частота тока – 10…20 кГц.

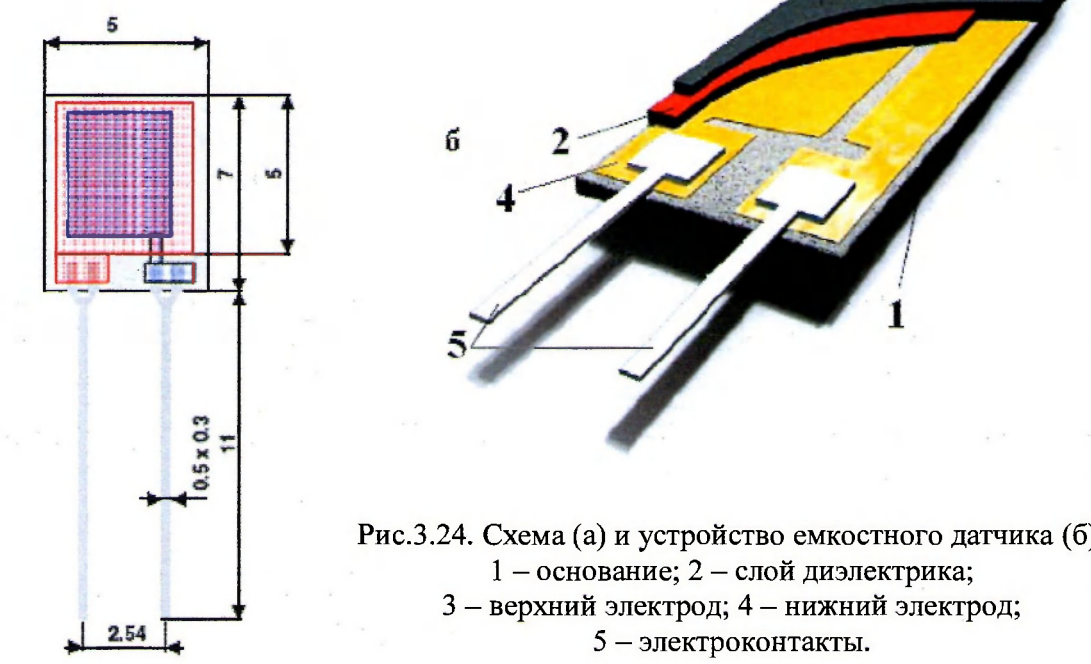
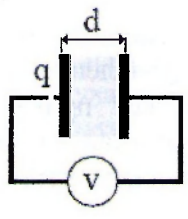


Рис.3.24. Схема (а) и устройство емкостного датчика (б):
1 – основание; 2 – слой диэлектрика;
3 – верхний электрод; 4 – нижний электрод;
5 – электроконтакты.

Емкость датчика определяется как емкость конденсатора:

$$C_c(\varphi) = (\varepsilon_\varphi\, \varepsilon_0\, A)/d, \qquad (3.3)$$



где ε_φ – относительная диэлектрическая проницаемость;
ε_0 – диэлектрическая константа (проницаемость в вакууме), $\varepsilon_0 = 88{,}54$ пФ;
A – площадь поверхности электродов; d – расстояние между электродами.

Решение уравнения 3.3 выполняется фирмами-производителями данной продукции на основании экспериментальных данных.

Например, компания Humirel для датчиков HTS2030SMD предлагает аппроксимацию зависимости C_c (φ) (рис.3.25) в виде полинома:

$$C_c = C_s (3{,}903 \cdot 10^{-8}\ \varphi^3 - 8{,}294 \cdot 10^{-6}\ \varphi^2 + 2{,}188 \cdot 10^{-3}\ \varphi + 0{,}898),\ \text{пФ}, \qquad (3.4)$$

где C_s – величина емкости датчика при φ = 55%. Соответственно:

$$\varphi = -3{,}4656 \cdot 10^3\ X^3 + 1{,}0732 \cdot 10^4\ X^2 - 1{,}0457 \cdot 10^4\ X + 3{,}2459 \cdot 10^3,\ \%, \qquad (3.5')$$

где $X = C_c/C_s$.

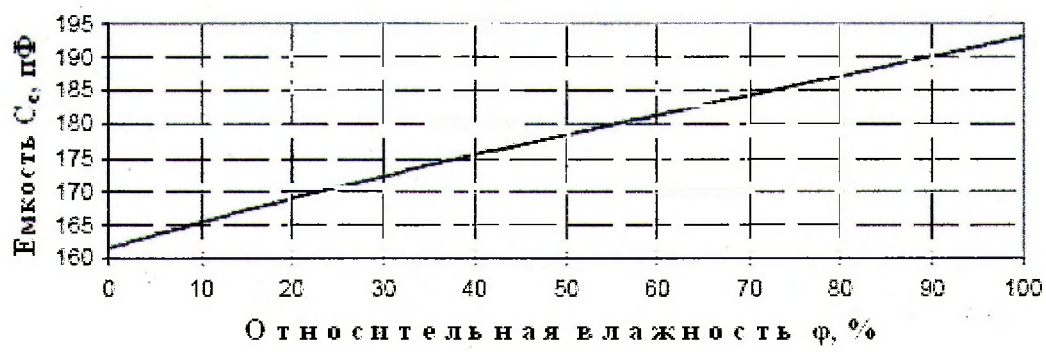


Рис.3.25.Зависимость емкости датчика HTS2030SMD от φ.

Соотношение между измеряемой емкостью датчика и относительной влажностью φ_x можно определить следующим образом:

$$C_c = C_s + S\ (\varphi_x - 55),\ \text{пФ} \qquad (3.5)$$

где S – показатель чувствительности датчика.

Таким образом, $$\varphi_x = (C_c - C_s)/S + 55 \qquad (3.5')$$

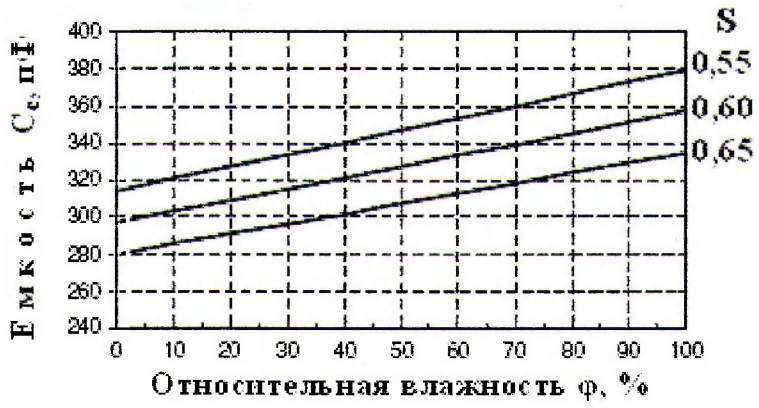


Рис.3.26. Зависимость емкости датчика от величины относительной влажности при различных значениях S (данные компании Smartec).

Любые электрические цепи обладают собственной емкостью в несколько пикофарад. Проявления паразитной емкости в цепи емкостных датчиков, чувствительной к влажности, может привести к существенной ошибке измерения φ: ± 6%, рис.3.25 (при φ = 55 % номинальная емкость C_c = 180 пФ). Поэтому соединительные провода от выводов датчиков должны быть изолированы лаком, и иметь минимальную длину.

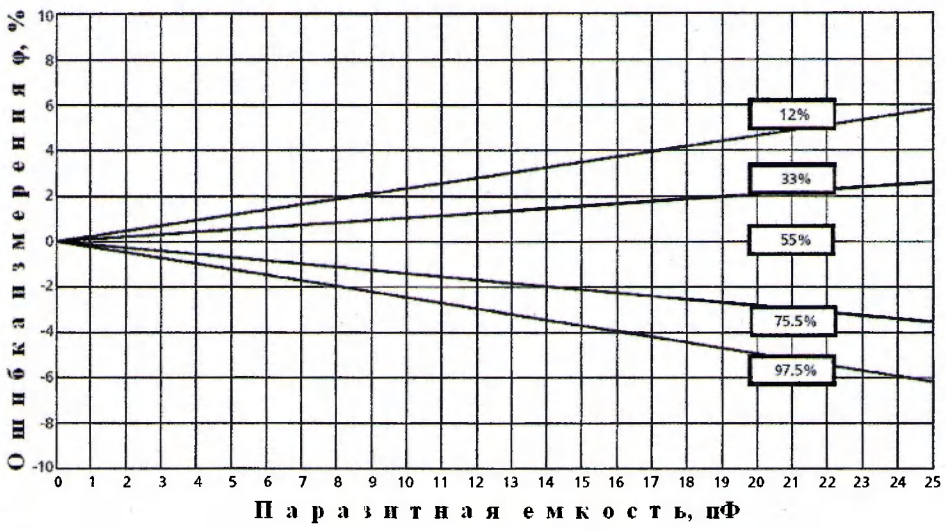
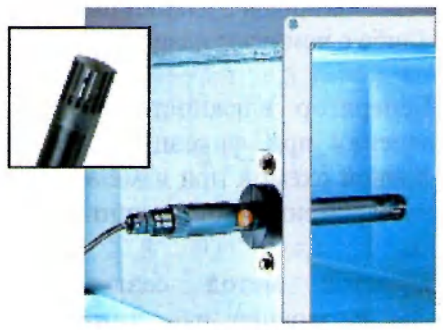


Рис.3.27. Зависимость ошибки измерения от величины паразитной емкости при различных значениях φ.

При использовании электрических датчиков в качестве элементов автоматизации систем кондиционирования воздуха точность этих приборов сказывается на эксплуатационных расходах СКВ.



Компания Testo в своих материалах [281] приводит пример использования датчиков влажности в круглогодичной СКВ для офисных помещений (т.е. в СКВ комфортного назначения). На рис.3.28 показано различие в расходах на поддержание комфортных значений относительной влажности 30…65 %, зафиксированных соответствующими стандартами (см. раздел 9), при различной точности измерения и поддержания φ.

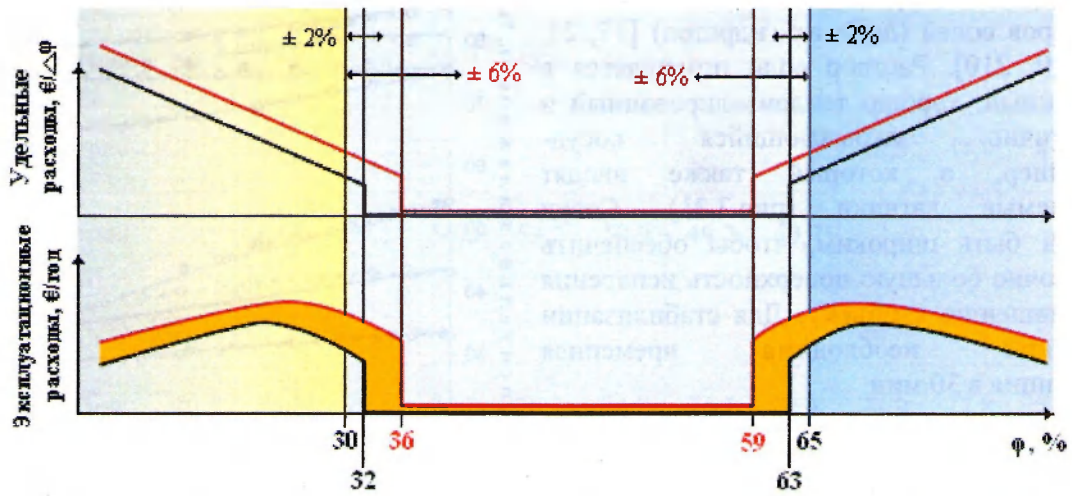


Рис.3.28. Анализ эксплуатационных расходов круглогодичной СКВ комфортного назначения при 2-х и 6-и процентной точности поддержания φ.

Превышение значения 65 % относительной влажности в помещении является сигналом для перевода работы СКВ на режим осушения, а при φ < 30 % – на увлажнение воздуха. Чем точнее работает автоматика, тем меньше расход энергии и воды. Использование датчиков влажности с точностью ± 2 % позволяет снизить годовые эксплуатационные расходы на 20…40 % по отношению к варианту с датчиками точностью ± 6 %.

3.1.5. Калибровка гигрометров

Калибровка (поверка) гигрометров производится с помощью точных приборов, построенных на базовых принципах измерения влажности (главным образом конденсационные гигрометры точки росы), в определенном интервале значений φ, создаваемом в генераторе влажности (рис.3.29).

Генератор влажности работает в режиме климатической камеры, в которой воздух доводится до состояния насыщения с последующим контролируемым изменением относительной влажности (за счет смешения с сухим воздухом, нагревания либо изменения давления) [12].

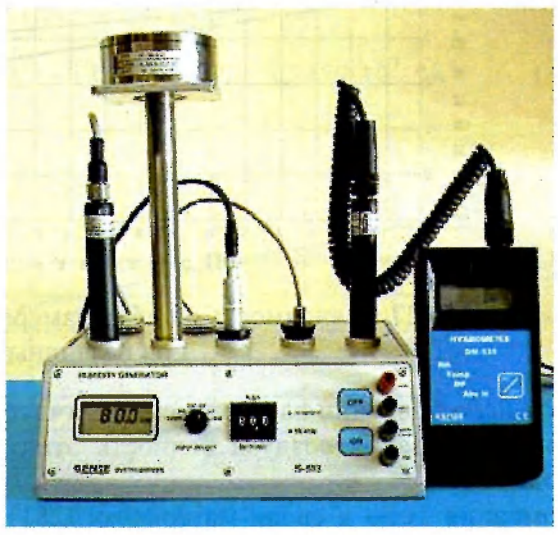


Рис.3.29. Поверка датчиков влажности в генераторе влажности S-503 (DIG) * Humidity Generator/Calibrator компании Ohmic Instruments Co.

*в данном случае устройство имеет 5 портов (вводов) для одновременной поверки различных датчиков с диаметром 18,5 мм (либо с помощью адаптеров 12 мм и 8 мм)

Генератор влажности S-503 выпускается в двух вариантах: с аналоговой схемой измерения при фиксации контрольных значений φ в пяти точках: 20-30-50-70-80 %, и цифровой схемой при изменении φ от 10 % до 90 % с шагом 0,1 %. Каждый шаг требует 10 минут времени стабилизации.

Простой метод создания воздушной среды с заранее известным значением φ состоит в применении насыщенных растворов солей (либо их гидратов) [17, 21, 98, 110, 210]. Раствор соли помещается в стеклянный, хорошо теплоизолированный и герметично закрывающийся сосуд-контейнер, в который также вводят поверяемые датчики (рис.3.31). Сосуд должен быть широким, чтобы обеспечить достаточно большую поверхность испарения по отношению к объему. Для стабилизации показаний необходима временная экспозиция в 30 мин.

Значение φ над солью зависит только от температуры (рис.3.30, табл.3.2). Применяя различные соли (минимум 3…4) можно получить рабочую характеристику поверяемого датчика.

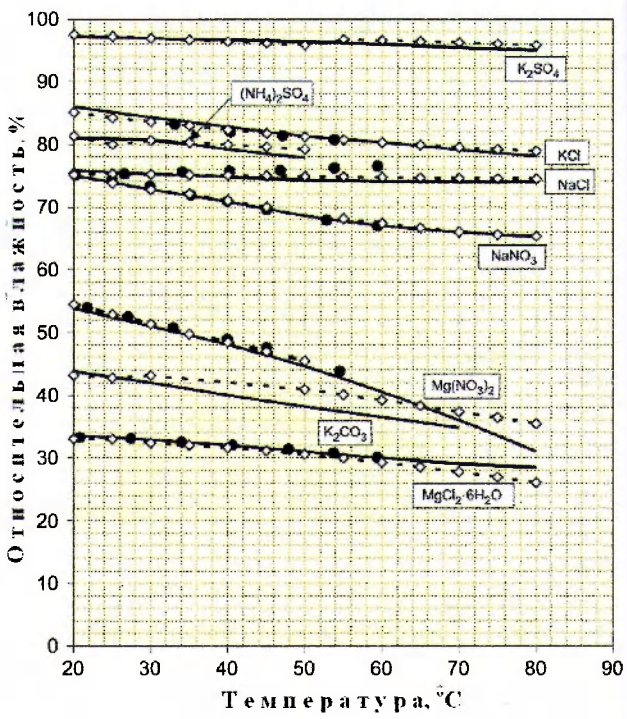


Рис.3.30. Зависимость φ (t) в состоянии равновесия с насыщенными растворами солей [119].

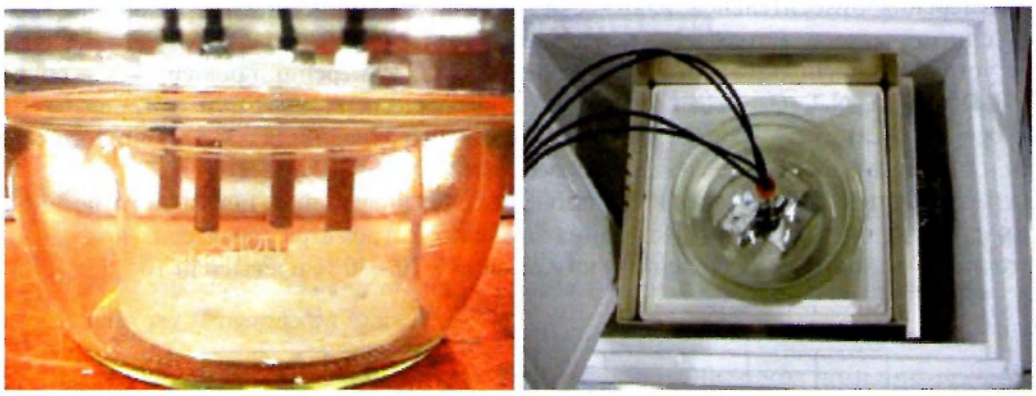


Рис.3.31. Генератор влажности с гидратами солей.

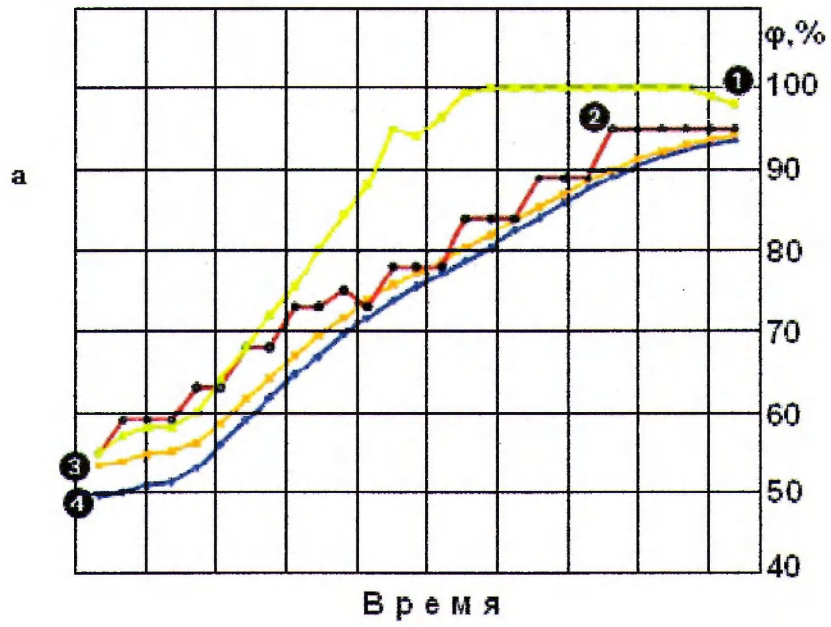
Таблица 3.2. Значения относительной влажности воздуха, находящегося в состоянии равновесия с насыщенными растворами солей при температуре 0…100 °С [210].

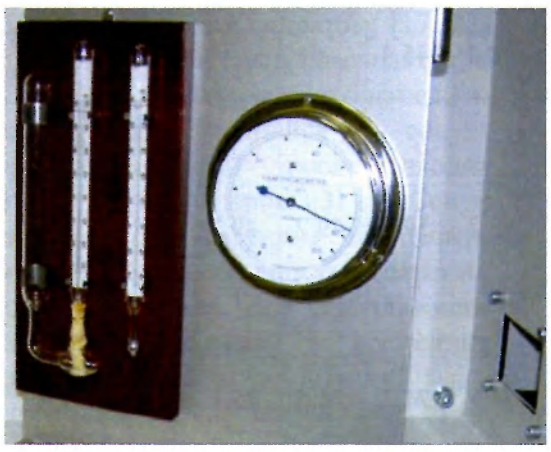
Соль	0 ^{0}C	10^{0}C	20^{0}C	30^{0}C	40^{0}C	50^{0}C	60^{0}C	70^{0}C	80^{0}C	90^{0}C	100^{0}C
Бромид лития LiBr	7,8	7,1	6,6	6,2	5,8	5,5	5,3	5,2	5,2	5,3	5,4
Хлорид лития LiCl	11,2	11,3	11,3	11,3	11,2	11,1	11,0	10,8	9,4	10,3	12,1
Хлорид магния $MgCl_2 \cdot 6H_20$	33,7	33,5	33,1	32,4	31,6	30,5	29,3	27,8	26,1	24,1	22,0
Карбонат калия K_2CO_3	43,1	43,1	43,2	43,2		40,9	39,2	37,4	35,4	33,4	31,3
Нитрат магния $Mg(NO_3)_2$	60,4	57,4	54,4	51,4	48,4	45,4					
Нитрит натрия $NaNO_2$									48,5	44,9	41,0
Бромид натрия NaBr		62,2	59,1	56,0	53,2	50,9	49,7	49,7			
Нитрат натрия $NaNO_3$									63,0	60,7	58,3
Хлорид натрия NaCl	75,5	75,7	75,5	75,1	74,7	74,7	74,5	75,1	73,9	73,8	73,9
Хлорид калия KCl	88,6	86,8	85,1	83,6	82,3	81,2	80,2	79,5			
Хлорид бария BaCl									85,1	83,9	82,6
Сульфат калия K_2SO_4	98,8	98,2	97,6	97,0	96,4	95,8	96,6	96,3	95,8	95,2	94,5

В завершение раздела 3.1, на рис.3.32, приведены результаты сопоставления показаний 4-х приборов измерения относительной влажности воздуха: механических гигрометров с волосом и нитью из синтетического материала, психрометра Августа и емкостного датчика влажности. Последнее устройство использовалось в качестве эталона. Измерения проводились в специальном тестере WL-201 (G.U.N.T Geratebau GmbH) – климатической камере, в которой, с помощью ультразвукового увлажнителя, а также термоэлектрического охладителя – механического осушителя, создавался и поддерживался определенный уровень влажности воздуха.

Близкие к эталонным значениям φ, в диапазоне высоких значений φ, показали гигрометр с нитью из синтетики и психрометр Августа. Показания волосного гигрометра характеризуются значительно меньшей точностью, при этом отклонения в интервале φ = 70 - 80 % превысили 10…15 %.

а





б

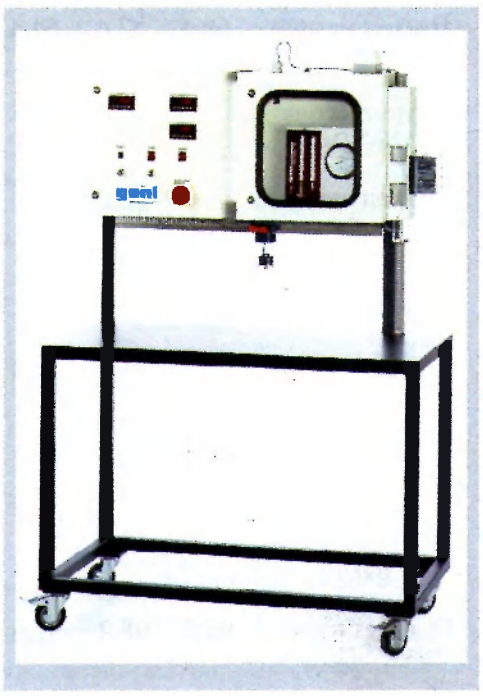


Рис.3.32. Результаты тестирования различных приборов измерения влажности (а): 1 – волосной гигрометр; 2 – психрометр Августа; 3 – механический гигрометр с нитью из синтетического материала; 4 – емкостной датчик, и тестер приборов – климатическая камера WL-201 (б).

3.2. СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ. КОДЕКС ДА ВИНЧИ



История создания приборов, как и сама наука измерения характеристик влажности воздуха «Гигрометрия», настолько интересна и познавательна, что заслуживает отдельного рассмотрения. Учитывая цель и формат настоящего издания, а также то, что в предыдущем параграфе приведены некоторые исторические данные, ниже изложены только сведения, касающиеся, в основном, предтечи гигрометрии – эпохи Возрождения великого Леонардо да Винчи.

Первые опыты по измерению влажности датируются 1200 годом до н.э. и проводились в древнем Китае во времена правления династии Чанг. Уже тогда осуществлялись систематические метеорологические наблюдения и велись соответствующие записи: радуги считались видимыми драконами дождя, а влажность воздуха измерялась с помощью древесного угля – по изменению его массы.

Современная гигрометрия Старого Света ведет свой временной отсчет с XV века. Письменные документы среди первых упоминают измеритель влажности шерсти Николаса Де Куза, 1450 г., измеритель влажности хлопка Леона Батиста Альберти и Леонардо да Винчи, 1483…1486 г.г. [21, 195].



"If someone should hang a good deal of wool, tied together on one end of a large pair of scales, and should balance it with stones at the other end in a place where the air is temperate it would be found that the weight of the wool would increase when the air became more humid, and decrease when the air tended to dryness". Nicolas Cryfts

"Если в умеренном климате вешать много шерсти на одном конце механической системы (механических весов), балансируя это камнями на другом конце, то можно заметить увеличение веса шерсти, когда воздух станет более влажным, и уменьшение, когда воздух станет более сухим" (вольный перевод автора).

Таким способом Николас Де Куза разрешил споры при торговле шерстью, являющих одну из насущных проблем того времени.

Николас Де Куза (Nicolas of Cusa, Nicolas Cryfts, 1401–1464) – немецкий кардинал, философ и государственный деятель



Leonardo da Vinci
15.04.1452 – 02.05.1519

Леонардо да Винчи, вслед за Леоном Б. Альберти (итальянским архитектором), заменил в устройстве де Куза гигроскопический материал: шерсть на вату из хлопка, а в качестве противовеса использовал воск (рис.3.33, 3.34). Но, главное, что назначение прибора да Винчи было иное: это уже был метеорологический прибор.

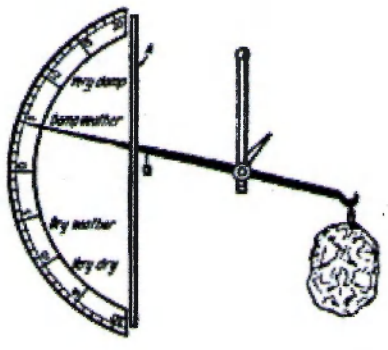


Рис.3.33. Схема гигрометра да Винчи.

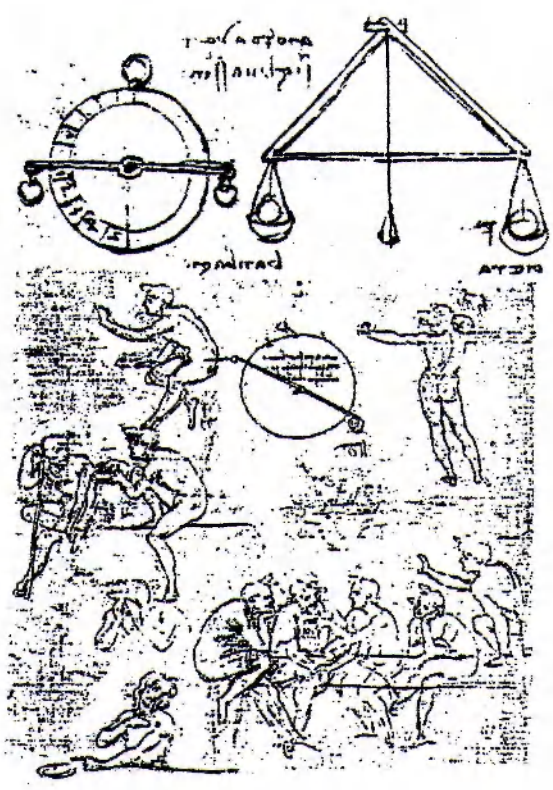


Рис.3.34. Фотокопия архивного документа – листа с набросками: гигрометра (вверху), баланса (в середине), а также фрагментов фрески «Тайная Вечеря», руки Леонардо да Винчи.

Hygrometers. Codex Atlanticus:
folio 30 v. former folio 8 v.b.,
folio 675 former folio 249 v.a.

Должен признаться, что испытал особые чувства, обнаружив в одной из публикаций [265] черновые наброски гигрометра на эскизе рабочих фрагментов мирового шедевра Леонардо – фреске «Тайная вечеря». В свое время я долго стоял перед ней в трапезной церкви Санта-Мария-делле-Грацие в Милане, не подозревая, что ум великого итальянца при работе над эскизами фрески был занят еще и проектом гигрометра...

На рис.3.34 можно прочитать три надписи. Сверху и снизу эскиза гигрометра, соответственно: *"Modo a vedere quando si guasta il tempo"* (использовать для показа изменения погоды) и *" bambagia – cera "* (вата – воск). А на схеме баланса: "*A misurare quanta via si vada per ora col corso di un vento* " (для измерения как далеко вы можете путешествовать после ветра*).

*видимо после перемены погоды, прим. автора

Все материалы по гигрометру собраны в кодексе «Атлантикус» – сборнике технических изобретений Леонардо да Винчи (хранится в библиотеке Амброзиана в Милане, рис.3.36).

Ниже, на рис.3.35 показаны музейные экспонаты, сделанные по эскизам да Винчи.

Рис.3.35. Модели гигрометров да Винчи.

Памяти
Леонардо да Винчи

одного из величайших
гениев человечества





Капелла Сент-Юбер
с захоронением
Леонардо да Винчи

находится в замке Амбуаз,
долина Луары,
Франция

Фотографии автора,
02.11.2008



Кодекс Атлантикус – самое большое и наиболее удивительное собрание рукописей Леонардо да Винчи, вместившее в себя 1750 рисунков на 1119 страницах.

«Отдельные части "Атлантикуса", написанные между 1492 и 1499 г.г., свидетельствуют о том, что учёный сделал поистине революционный шаг в технике: он создал теоретические основы инженерной практики, т.е., по сути, превратил инженерное дело в теоретическую дисциплину. Гениальный мыслитель считал науку высшей формой знания и отмечал, что "никакое человеческое знание нельзя считать наукой, если оно не располагает математическими доказательствами". И потому стремился найти математические закономерности и в теории механизмов, и в живописи, и в архитектуре».

www.renesans.narod.ru/leonard-inventor.htm



Рис.3.36. Экспозиционный зал кодекса «Атлантикус» Леонардо да Винчи в библиотеке Амброзиана (Милан).



Рис.3.37. Гигрометр, разработанный Джоном Ковентри (John Coventry, вторая половина XVIII века), – усовершенствованная конструкция прибора да Винчи.

Этот гигрометр (рис.3.37), а также большинство приборов измерения влажности, приведенных ниже на с. 100…103, хранятся во Флорентийском институте-музее истории науки (Institute and Museum of the History of Science) – галерея Кастельяни (экспозиционные залы X – Гигрометрия и IX – коллекция Медичи).

Большую коллекцию метеорологических приборов также содержит музей истории и технологии Смитсониановского иститута в Вашингтоне [142] и океанологический музей в Монако.

В начале XVII в., в 1614 г., итальянский ученый-изобретатель Санторио Санторре (Santorio Santorre) предлагает несколько гигрометров: с использованием гигроскопической соли (вместо шерсти или хлопка) в описанной выше системе баланса, и нити шпагата, изменяющей свою длину при изменении влажности. Причем, в последнем случае, для определенного натяжения нити в ее середине размещался небольшой груз, либо нить наматывалась на неподвижную ось и связывалась свободным концом со стрелкой. По сути, эта была первая конструкция механического гигрометра, которая затем, со временем, претерпевала лишь небольшие изменения, главным образом, в части материала чувствительного элемента. В этой группе гигрометров известны приборы итальянцев: инженера-математика Винченсо Вивиани (Vincenzo Viviani) и врача Франческо Фолли (Francesco Folli, 1664 г.) с полосками бумаги, а также швейцарского физика Горацио Бенедикта де Соссюра (Horace-Benedict de Saussure, 1783 г.) с человеческим волосом, рис.3.39.



Г.Б. де Соссюр

Родоначальник группы конденсационных гигрометров по праву считается Великий Герцог Тосканский – Фердинанд II де Медичи. В середине 1640-х годов он изобретает различные приборы: термометр, ареометр и гигрометр. В 1657 г. во Флоренции открывает академию наук – Accademia del Cimento.

Гигрометр Фердинанда II состоит из двух сосудов (рис.3.40а). Один из них, в виде усеченного конуса, выполнен так, чтобы, при вводе в стеклянный мерительный стакан, он полностью перекрывал бы доступ воздуха в стакан извне. В конус насыпается снег или лед, при этом воздух в стакане охлаждается и влага выпадает в виде конденсата, являясь мерой влажности воздуха – прямой метод измерения.



Фердинанд II

Первый конденсационный гигрометр точки росы разработал британский химик Джон Фредерик Даниелль (John Frederic Daniell, 1820 г.) (рис.3.38, 3.41). Его прибор представлял собой систему двух сообщающихся сосудов с парами эфира внутри и термометром в одном из них. Короткая часть прибора – колба в виде большого шара (для развития поверхности) снаружи обтянута хлопчатобумажной тканью. Для измерения ткань смачивается эфиром. Быстрое испарение эфира охлаждает пары эфира внутри системы, и они конденсируются в сосуд с термометром. Это момент подготовки прибора к работе. Далее жидкий эфир, отбирая теплоту парообразования, начинает испаряться и охлаждать колбу с термометром. При появлении первых капелек на колбе фиксируется температура точки росы.



Дж. Ф. Даниелль

В 1845 г. Джованни Алессандро Майочи (Giovanni Alessandro Maiocchi) разрабатывает гигрометр упругости (парциального давления) водяного пара в состоянии насыщения (рис.3.40б). Прибор состоит из стеклянной трубки, закрытой у основания металлическим вентилем, который связывает ее со второй открытой трубкой меньшего размера. Большая трубка сверху имеет два вентиля и небольшой раструб. Трубки заполнены ртутью, уровень которой в малой мерительной трубке контролируется по шкале, нанесенной на металлическом цилиндре, обхватывающем трубку. Цилиндр свободно перемещается вдоль трубки и имеет две шкалы (миллиметровую и нониус). Для измерения упругости пара через раструб в большую трубку вводится некоторое количество воды, вентили закрываются. Затем вода в трубке испаряется и по разности уровней ртути определяется искомая величина.

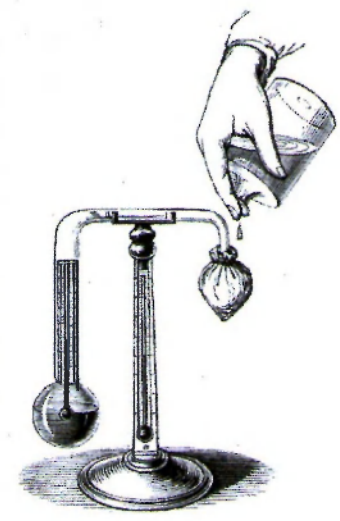


Рис.3.38. Схема работы гигрометра Даниеля.

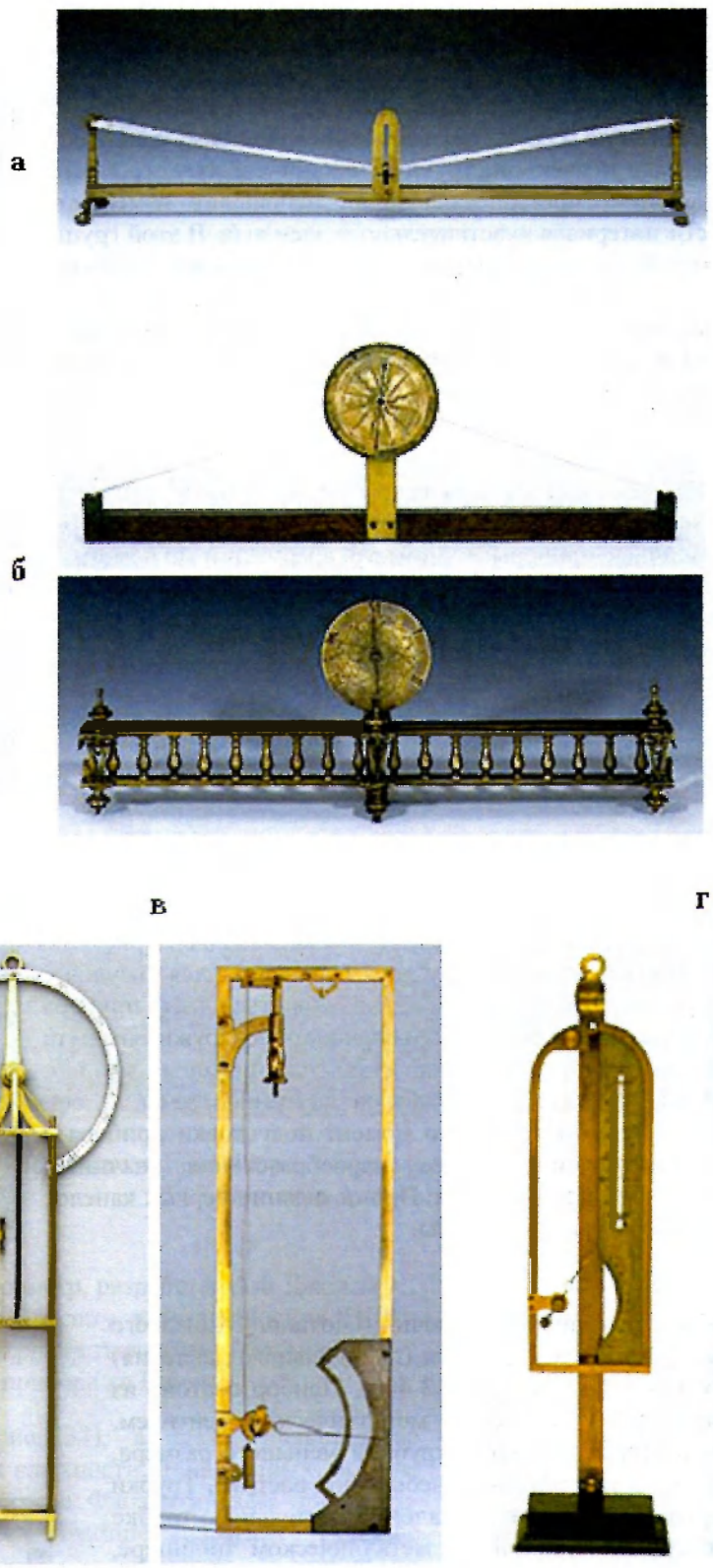


Рис.3.39. Механические гигрометры:
вверху – с полоской бумаги (paper-ribbon): а – Вивиани; б – Фолли,
снизу – волосные (hair): в – де Соссюр; г – автор не известен.



а



б

Рис.3.40. Гигрометры Фердинанда II (а) и Майочи (б).

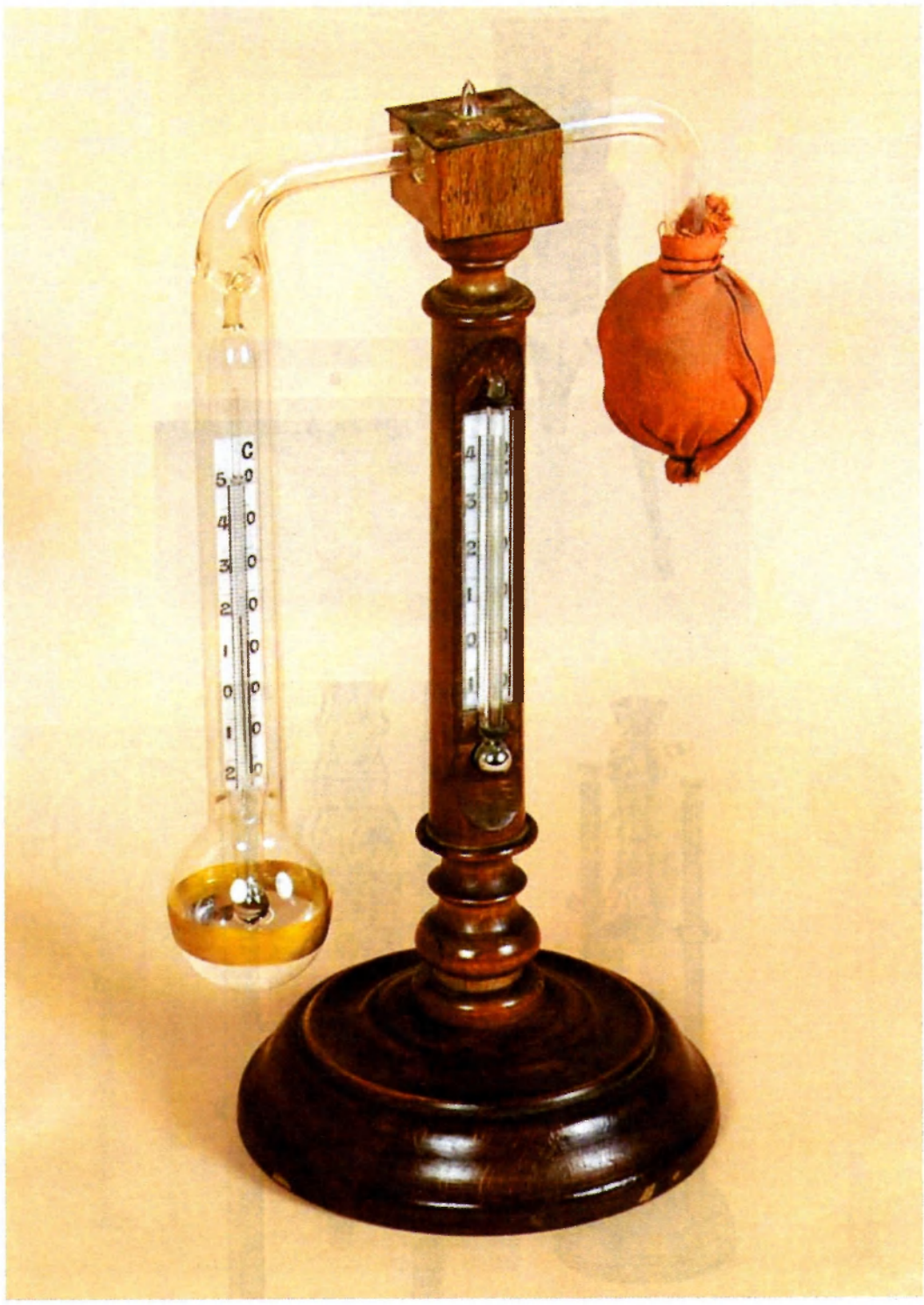
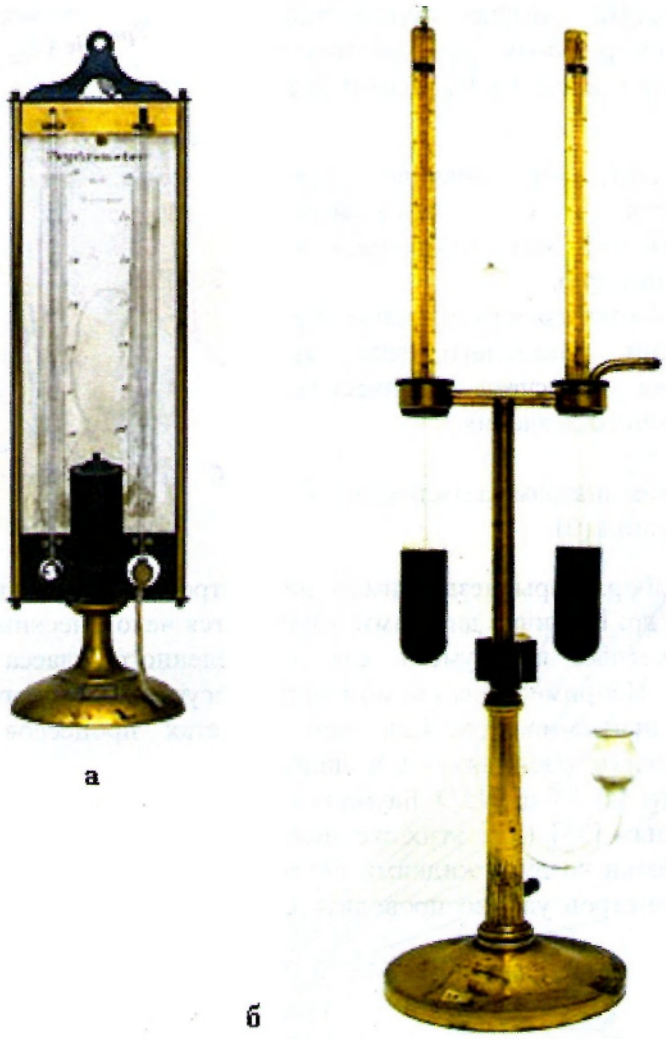


Рис.3.41. Конденсационный гигрометр точки росы Даниелля.



а б

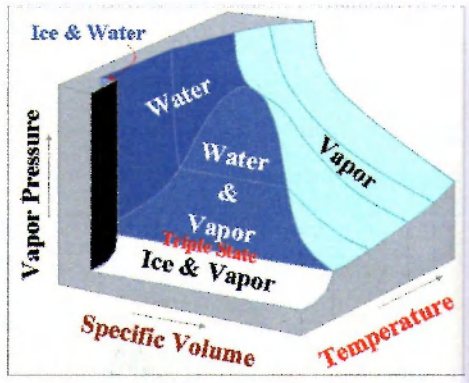
Рис.3.42. Психрометры Ассмана (а) и Реньо (б).

4. ДИАГРАММЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

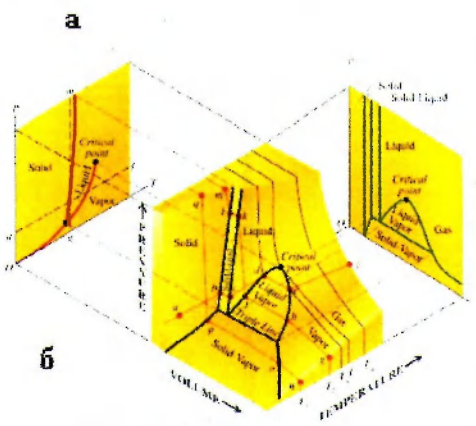
Процесс изменения состояния влажного воздуха представляется пространственной кривой (f = 3) на трехмерной термодинамической поверхности (рис.4.1а). Для упрощения графического анализа используют диаграммы, построенные на плоскости в двух измерениях при некотором постоянном значении третьего параметра, например, термодинамические диаграммы: T - P, V - P (рис.4.1б).

Анализ процессов термовлажностной обработки кондиционируемого воздуха обычно проводится с помощью диаграмм, построенных для постоянных значений барометрического давления $P_б$, в связи с тем, что:

1. СКВ разрабатываются, как правило, для конкретных объектов с известным местоположением и высотой (по отношению к нулевой отметке – уровню моря).
2. Это позволяет использовать известное положение независимости энтальпии идеального газа от давления, для простого пересчета физических величин в случае переменного давления.



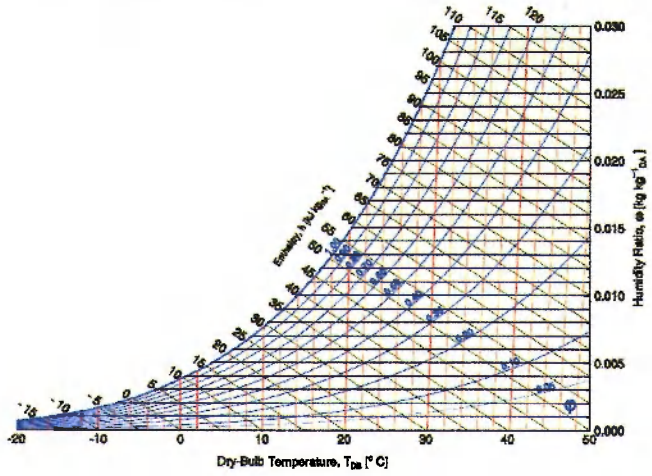
а



б

Рис.4.1. Трехмерная диаграмма состояния (а) и ее проекции (б).

В зависимости от выбора пары независимых параметров известны диаграммы: d - h, t – h, t - d, t - $t_м$, t - $P_п$ и др. Различие диаграмм объясняется человеческим желанием иметь наиболее удобный расчетный инструмент для определенного класса задач, а также сложившейся практикой. Например, для расчета систем осушения сжатого воздуха удобна психрометрическая t,d-диаграмма (рис.4.2), при расчетах процессов испарительного охлаждения воздуха и воды (в градирнях) – t, h- диаграмма (рис.4.3, § 5.3, рис.5.7) [8]. Ее же рекомендуют специалисты МГТУ им. Н.Э. Баумана для расчета СКВ летательных аппаратов при переменных давлениях [35] (для этих же целей используется S,h- диаграмма [21]). Анализ процессов обработки воздуха жидкими поглотителями влаги, работы подогревных электролитических гигрометров удобно проводить с помощью t, $P_п$ – диаграмм (рис.2.18, § 7.1, рис.7.12).



Предпочтение определенным диаграммам наблюдается главным образом из-за привязанности к традициям. Например, в США и Великобритании по этой причине до недавнего времени применялись только t, d- и t, h-диаграммы. В СНГ и ряде западноевропейских стран (Германия, Франция, Швеция и др.) используют диаграмму Рамзина-Молье [79, 287].

Знакомство с психрометрической t,d- диаграммой* [21, 37, 49, 147, 173, 205], рис.4.2 (приложение VI) полезно, поскольку на ее основе построены все расчетные методики ASHRAE.

Рис.4.2. Психрометрическая диаграмма (карта)[147].

*разработана В.Х.Кэрриером в 1904 году

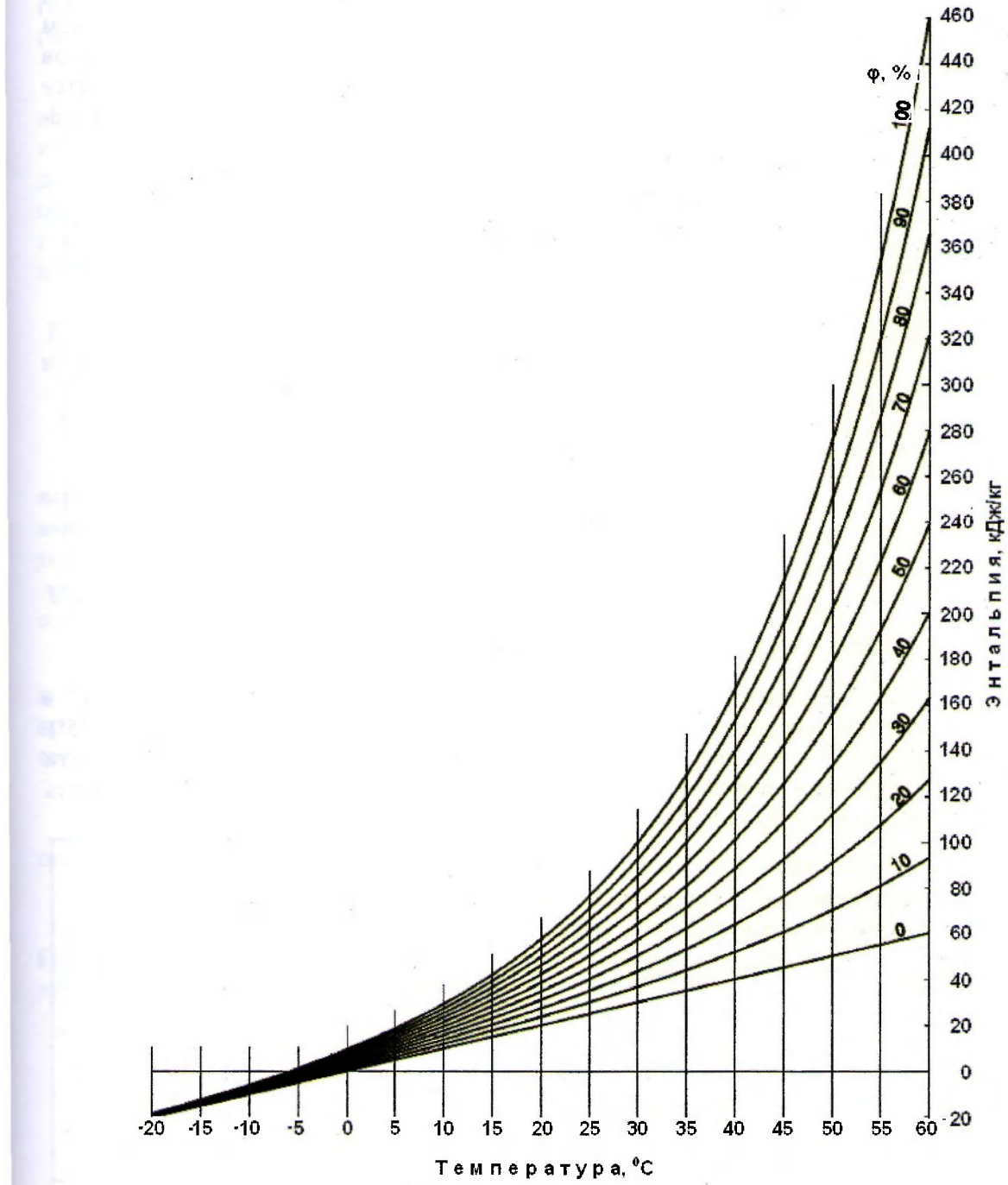
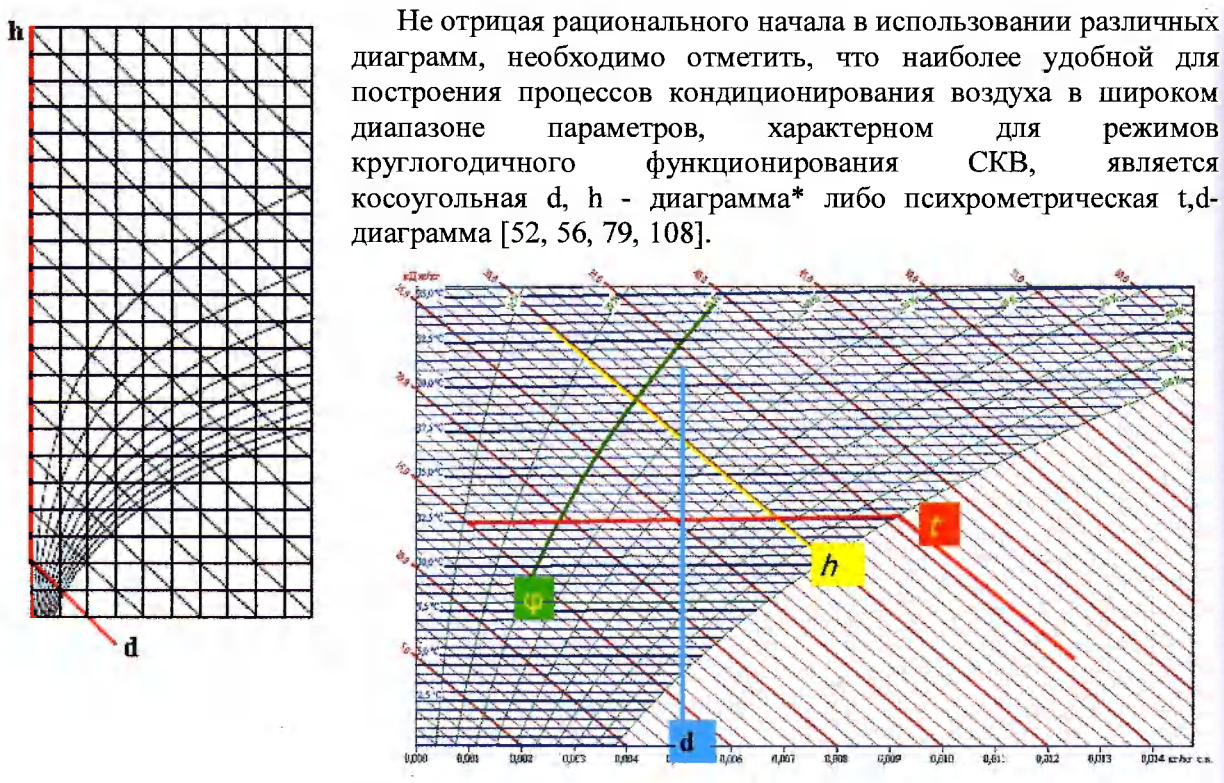


Рис.4.3. Прямоугольная t, h– диаграмма влажного воздуха (Otto H. Mueller, 1905) [150].

4.1. d,h - ДИАГРАММА. ПОСТРОЕНИЕ И РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА



Не отрицая рационального начала в использовании различных диаграмм, необходимо отметить, что наиболее удобной для построения процессов кондиционирования воздуха в широком диапазоне параметров, характерном для режимов круглогодичного функционирования СКВ, является косоугольная d, h - диаграмма* либо психрометрическая t,d-диаграмма [52, 56, 79, 108].

Рис.4.4.Косоугольная d,h – диаграмма влажного воздуха.

Диаграмма d,h представляет собой графическую интерпретацию уравнения 2.24* в косоугольной системе координат (угол между осями > 90°, обычно составляет 135°). Увеличение угла между осями продиктовано необходимостью расширения рабочей области ненасыщенного влажного воздуха, т.к. в обычной прямоугольной диаграмме эта область существенно сужена (рис.4.5, 4.6).

Расположение изотерм в координатах d – h обусловлено уравнением 2.24′. Если взять производную h по d, полагая t = const, то можно получить выражение:

$$(\partial h / \partial d)_t = 2500 + 1{,}86\,t, \qquad (4.1)$$

которое определяет зависимость энтальпии от влагосодержания при постоянной температуре, т.е. положение изотермы, ее наклон. Изотерма t = 0 °С ненасыщенной области, выходя из нулевой точки начала координат (d = 0, h = 0), имеет большой наклон: $\Delta h / \Delta d)_{t=0} - r_o -$ 2500 кДж/кг. Изотермы t > 0 °С имеют еще больший (на 1,86t) наклон, увеличивающийся с ростом температуры.

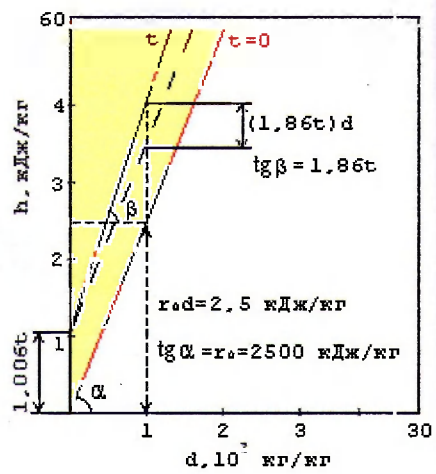


Рис.4.5. Изотермы прямоугольной d, h- диаграммы.

*была разработана в 1918 году профессором МВТУ Л. К. Рамзиным, а затем в 1923 г. – Р. Молье (в западноевропейских странах именуется диаграммой Молье, Рихард Молье – профессор Дрезденской высшей технической школы). Библиографические очерки об этих ученых помещены в приложение IX.

Кроме того, в прямоугольной диаграмме линии постоянной относительной влажности φ = const расположены очень близко друг от друга и пересекают изотермы под малыми острыми углами. Все это затрудняло бы построение процессов и уменьшало точность расчетов. Поэтому ось координат “d” разворачивают по часовой стрелке на угол α так, чтобы с учетом принятых масштабов величин h и d нулевая изотерма располагалась бы горизонтально под нормальным углом (90°) к оси ординат h (рис.4.6).

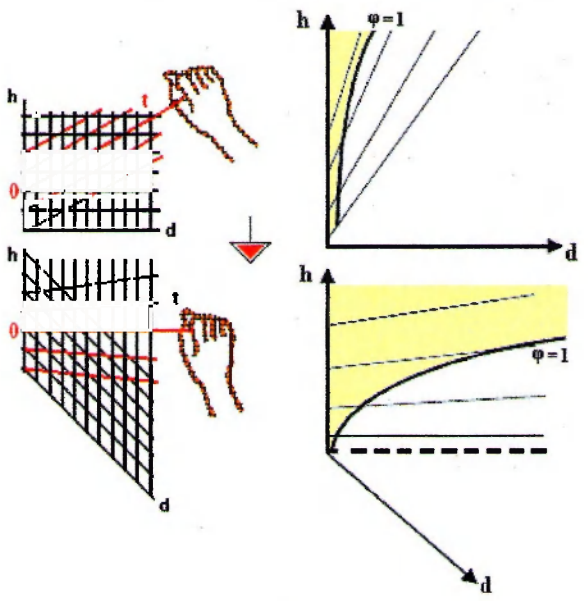


Рис.4.6. Трансформация* d,h- диаграммы: из прямоугольной в косоугольную систему координат.
*www.padfield.org/tim/cfys/mollier/moll1.php

Для удобства работы значения d нанесены на ось “d”, совпадающей с нулевой изотермой (рис.4.5, 4.6). В дальнейшем изложении материала, при обращении к диаграмме, обозначение горизонтальной оси “d” (проекции оси влагосодержания) заменено на d.

При выборе масштабов общепринятым является выполнение условия: значение энтальпии 2,5 кДж/кг на оси ординат устанавливается на том же расстоянии, что и значение влагосодержания 1 г/кг на оси абсцисс, тогда tg α = 1, а угол α = 45°.

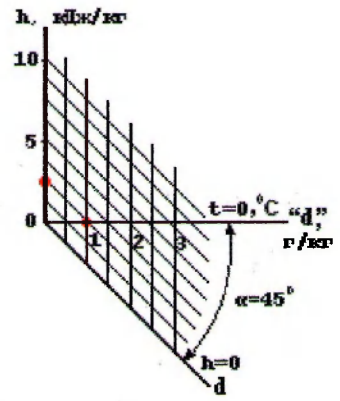


Диаграмма наполняется координатной сеткой линий d = const и h = const, а затем по соответствующим уравнениям выстраиваются изолинии t = const, φ = const, ρ = const (либо ρ_c = const).

Рис.4.7. Скелет косоугольной d, h- диаграммы.

Как уже отмечалось, положение изотерм в d,h – диаграмме определяется уравнением 2.24':

$$h = 1{,}006\,t + 2{,}5\,d + 1{,}86\cdot10^{-3}\,t\,d, \quad \text{кДж/кг} \quad (d\ [\text{г/кг}]).$$

Графическая интерпретация слагаемых этого уравнения дает в d,h- диаграмме (рис.4.8) три отрезка:

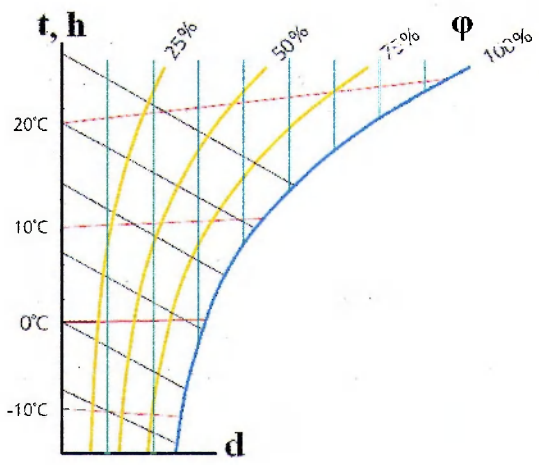
$$h = a + b\,d + c\,d,$$

где a = 1,006 t, кДж/кг; b = 2,5, кДж/г; c = $1{,}86\cdot10^{-3}$ t, кДж/г.

За счет отрезка cd (третьего слагаемого в уравнении 2.24') семейство изотерм – расходящиеся линии, имеющие разный наклон в области положительных и отрицательных температур (рис.4.6).

Семейство кривых, отвечающих постоянным значениям относительной влажности φ = const, располагается между линией насыщения φ = 1 (100 %) и линией φ = 0 (совпадает с осью ординат) (рис.4.9).

Рис.4.8. К построению изотерм в косоугольной d,h- диаграмме.



Кривые φ = const определяются как геометрическое место точек с координатами t и d. Значением t задаются, а затем определяют $P_n^{"}$ (t) (2.16) и d (2.13).*

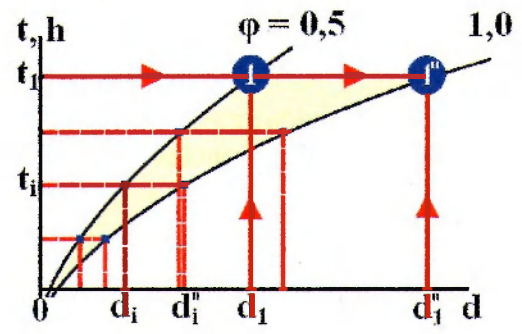


Рис.4.9. К построению изолиний φ.

Соотношение d/d" = ψ, определяющее долю отрезка изотермы от d = 0 до d", также как и φ, характеризует *степень насыщения воздуха*. Уравнение связи величин ψ и φ (в соответствии с 2.14*):

$$\psi = \varphi\,(P_б - P_п")/(P_б - \varphi\,P_п"). \qquad (4.2)$$

Очевидно, что ψ < φ. Только в случае полного насыщения ψ = φ = 1. Однако, в диапазоне значений параметров влажного воздуха, характерных для КВ, можно считать ψ ≈ φ. При $P_б$ = 101,325 кПа и t = 0…40 °С → $P_п"$ = 0,6…7 кПа, $P_б$ » $P_п"$ → $(P_б - P_п")/(P_б - \varphi\,P_п") \approx 1$.

Построение изолиний φ = const ведется только до изотермы точки кипения при данном атмосферном давлении $P_б$, т.е. до тех пор, пока парциальное давление пара $P_п^{"} < P_б$. В режиме кипения в открытой системе $P_п^{"} = P_б$ и линии φ = const теряют физический смысл (см. уравнение 2.14*): d – 0,622 φ/(1 - φ), – на диаграмме они трансформируются в линии d = const [52, 68]. Изотерма точки кипения представляет собой асимптоту линии φ = 1.

В нижней части диаграммы (рис.4.10, 4.11) проводится линия, отвечающая зависимости парциального давления водяных паров от влагосодержания $P_п$ = f (d) (2.14'). Поскольку d « 0,622, то $P_п \approx (P_б/0{,}622)d$, что объясняет близость $P_п$ = f(d) к прямой линии. Шкала значений $P_п$, как правило, разбивается на ординате справа (иногда на абсциссе параллельно шкале d).

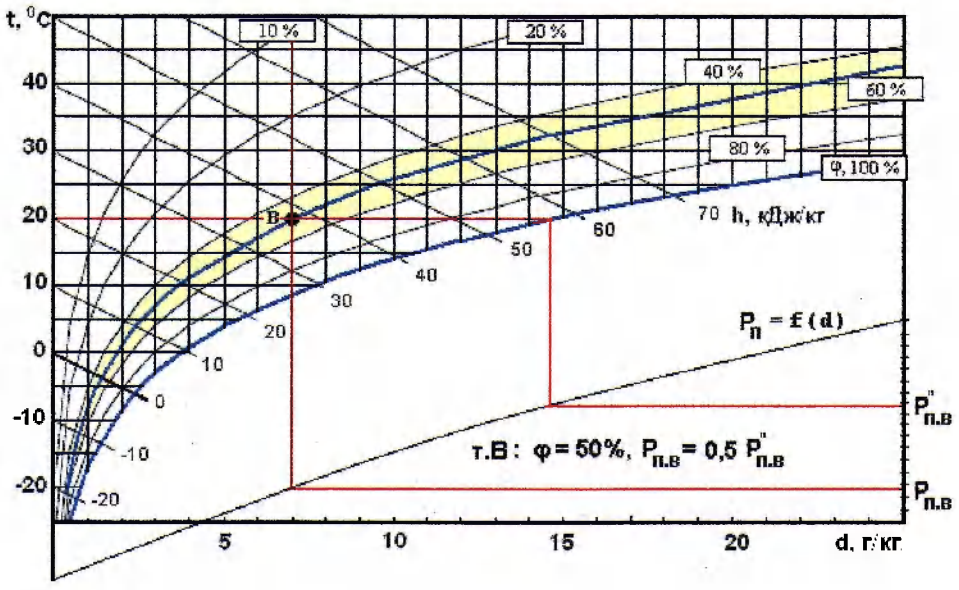


Рис.4.10. Линия зависимости $P_п$ = f (d) в d, h- диаграмме.

В поле диаграммы (рис.4.11) также наносятся линии постоянной плотности влажного воздуха $\rho = const$ (2.12', 2.12") [21] и (либо) сухой его части $\rho_c = const$ (2.11) (в психрометрических картах, как правило, проводятся изохоры $v_c = const$ (2.12**)) [147, 205, 210]. Наличие линий $\rho_c = const$ ($v_c = const$) обусловлено тем, что тепловые и влажностные балансы ведутся на основании массового расхода сухой части G_c влажного воздуха (см. § 2.2.4, § 2.3). При этом значения ρ_c (v_c) могут быть использованы для пересчета массового расхода воздуха в объемный расход $V_в$ ($V_в = G_c/\rho_c$, $V_в = v_c G_c$), что характерно для задачи подбора оборудования.

Диаграмма - d,h является, по существу, номограммой (от греческого "nomos" – закон), с помощью которой можно рассчитать все необходимые параметры влажного воздуха для определенного его состояния по известному местоположению точки (рис.4.11, т. В), либо решить обратную задачу: установить точку по известным двум независимым параметрам и $P_б = const$.

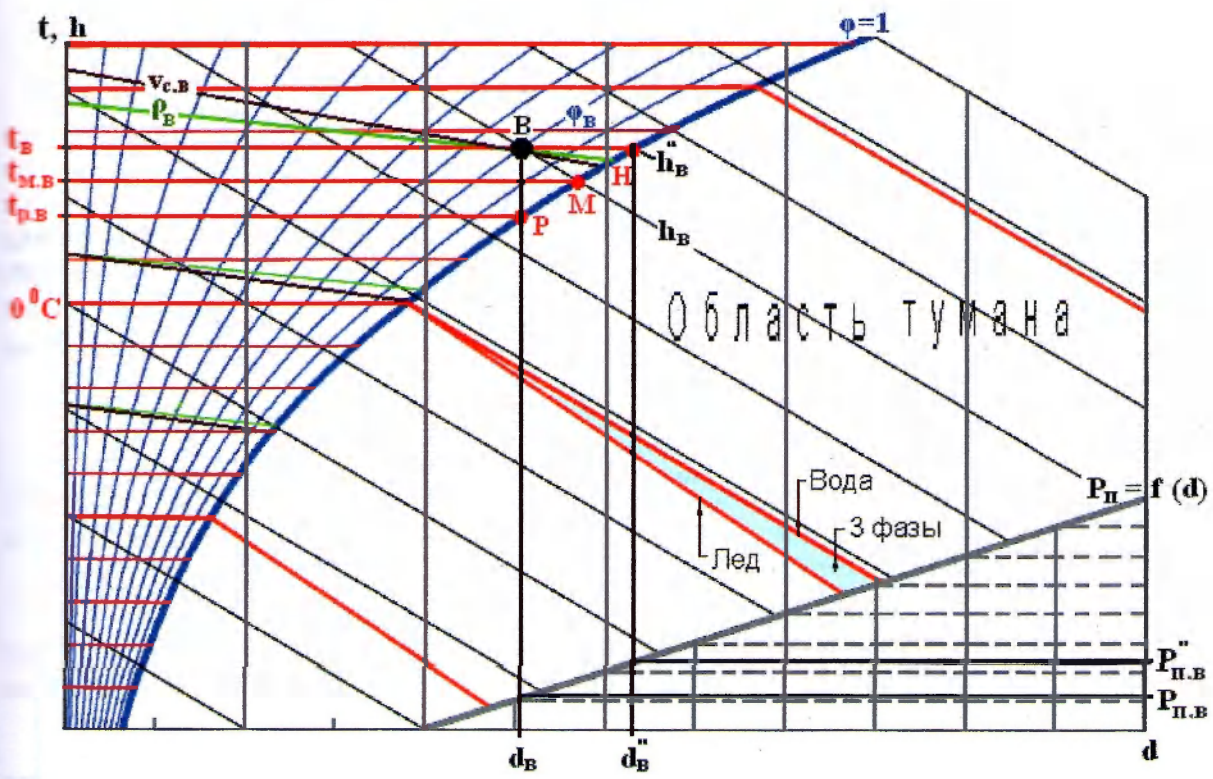


Рис.4.11. Расчетная схема определения параметров воздуха в рабочей области d, h- диаграммы.

Для описания состояния влажного воздуха в качестве третьего независимого параметра (при первых двух: $P_б$ и t) можно использовать любой из рассмотренных параметров состава:

$$\rho_п,\ \varphi,\ \rho,\ d,\ P_п,\ \tau,\ t_м.$$

Однако следует помнить, что если выбирается иная комбинация трех параметров, то цель может быть достигнута только при условии их независимости. Поскольку параметры $\rho_п$, d, $P_п$, τ являются зависимыми друг от друга, то в качестве независимого параметра может быть использован лишь один из них.

В приложении II приведены данные по зависимости $\rho_п(\tau)$ (табл. II.3).

На рис.4.11 отмечены реперные точки и соответствующие им температуры воздуха: Р ($t_р$) – точка росы; М ($t_м$), Н (t) – состояния адиабатического и изотермического насыщения, соответственно. Легко заметить, что для ненасыщенного влажного воздуха справедливо соотношение температур: $t_р < t_м < t$, – которое можно рассматривать как *условие существования области ненасыщенного влажного воздуха*. Состояние насыщенного влажного воздуха характеризуется равенством температур $t_р = t_м = t$ и величиной $\varphi = 1$.

Диаграммы влажного воздуха могут дополняться изолиниями $t_м = const$. Это делается для инженерных задач (высокотемпературная конвективная сушка влажных материалов и др. [68]), решение которых на основе допущения h =const приводит к существенной ошибке. Положение изолиний $t_м = const$ в рабочей области диаграммы влажного воздуха (рис.4.12) можно установить, если продолжить в эту часть диаграммы линии изотерм воздуха области тумана.

В соответствии с уравнением (2.29) при $t > 0$:

$$h_в = h_{с.в.} + h_п\, d'' + h_w\, g_w, \qquad (4.3)$$

либо $h_в = C_{с.в.}\, t_м + (r_о + C_п\, t_м)\, d'' + C_w\, t_м\, g_w$ (в области тумана $t = t_м$), (4.4)

$$h_в = h_м + C_w\, t_м\, g_w, \qquad (4.4')$$

где $h_м = h'' = C_{с.в.}\, t_м + (r_о + C_п\, t_м)\, d''$ – энтальпия насыщенного воздуха при температуре $t_м$, $g_w = d - d''$ – массовое количество капельной влаги, отнесенное к 1 кг сухого воздуха.

Уравнение 4.4' определяет изотерму воздуха в области тумана. Это прямая линия, пересекающаяся на линии насыщения с изотермой ненасыщенной области и имеющая наклон:

$$(\Delta h / \Delta d)_{t_м} = C_w\, t_м. \qquad (4.4^*)$$

Если в диаграмме влажного воздуха изотермы $t_м = const$ не нанесены (как в рабочей части, так и в области тумана), то можно провести следующие построения (рис.4.12):

1) через т. Н ($\varphi = 1$, $t_м$), состояния насыщения, провести изоэнтальпу h = const до ее пересечения с осью ординат – т. А (d = 0, $h_н$);
2) отложить на этой оси вниз от т. А отрезок АС, равный $C_w\, t_м\, d''$;
3) полученную т. С соединить с т. Н прямой линией, которая и будет отвечать изолинии $t_м = const$.

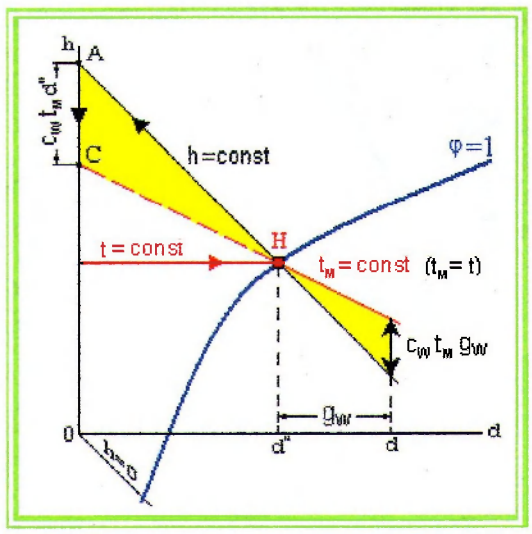
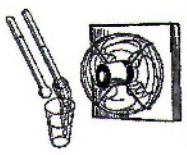
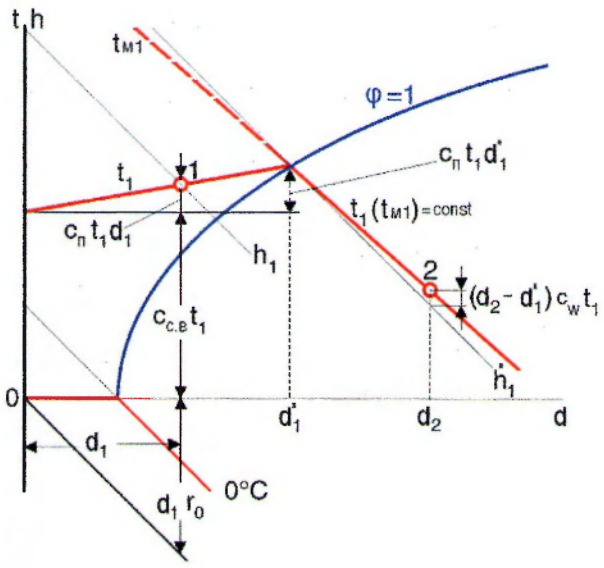


Рис.4.12. Положение изотермы в области тумана и построение линии $t_м = const$ в рабочей области d,h- диаграммы.

Необходимо отметить, что при анализе термовлажностных процессов обработки воздуха в диаграммах температура мокрого термометра $t_м$ используется исключительно как термодинамический параметр состояния влажного воздуха, именуемый температурой адиабатического насыщения воздуха либо теоретическим пределом охлаждения воды § 5.4 [8, 202], а не как результат измерения мокрым термометром.

Фактическое (измеряемое) значение температуры мокрого термометра $\mathbf{t_{м.изм}}$ зависит от многих факторов: условий тепло- и массообмена; конструктивных особенностей приборов измерения; состояния фитиля и пр.





На рис.4.13 еще раз показано положение изотерм воздуха в d,h-диаграмме (для положительных значений t) с уточнением всех слагаемых уравнений 2.18* и 4.3. Построения проведены для точки 1 в рабочей области диаграммы. Точка 2 в области тумана находится на той же изотерме t_1.

Рис.4.13. К построению изотерм t и $t_м$ в d,h- диаграмме влажного воздуха.

Как уже отмечалось (см. с. 63), в области пересыщенного воздуха при $t > 0$ °C влагосодержание воздуха d складывается из влагосодержания воздуха в состоянии насыщения d'' и содержания воды g_w при данной температуре: $d = d'' + g_w$. В случае $t = 0$ °C в d,h- диаграмме имеется изотермическая поверхность, характеризующая состояние смеси влажного и ледяного тумана. Эта поверхность ограничена двумя изотермами 0 °C, которые отделяют ее сверху от области влажного тумана, а снизу от области ледяного тумана (рис. 4.11, 4.14, 4.15, клиновидный сектор). Точки внутри данного сектора характеризуют состояние смеси сухого насыщенного пара (d_0'', на линии $\varphi = 1$), воды (g_w) и льда ($g_л$):

$$d = d_0'' + g_w + g_л.$$

Исходя из правила смешения, соотношение $g_w/g_л$ определяется графически в d,h-диаграмме, как отношение соответствующих отрезков. Для состояния точки А (рис.4.14): $g_w / g_л = b/a$. Поскольку: $g_w + g_л = d_A - d_0''$, при $t = 0$ °C, то содержание воды и льда:

$$g_w = \Delta d\,(1 + a/b), \qquad g_л = \Delta d\,(1 + b/a),$$

где $\Delta d = d_A - d_0''$ – разность влагосодержаний воздуха в области тумана и в состоянии насыщения ($\varphi = 1$) при 0 °C.

Величины g_w и $g_л$ можно найти непосредственно в d,h- диаграмме [21]. Для этого следует через т.А (рис.4.14) провести прямую линию, параллельную изотерме $t_л$ °C для льда до пересечения с изотермой 0 °C для воды (т.В). Из подобия треугольников ABC ~ E0B и CBD ~ B0F:

$$g_w = d_B - d_0'';$$

$$g_л = d_A - d_B.$$

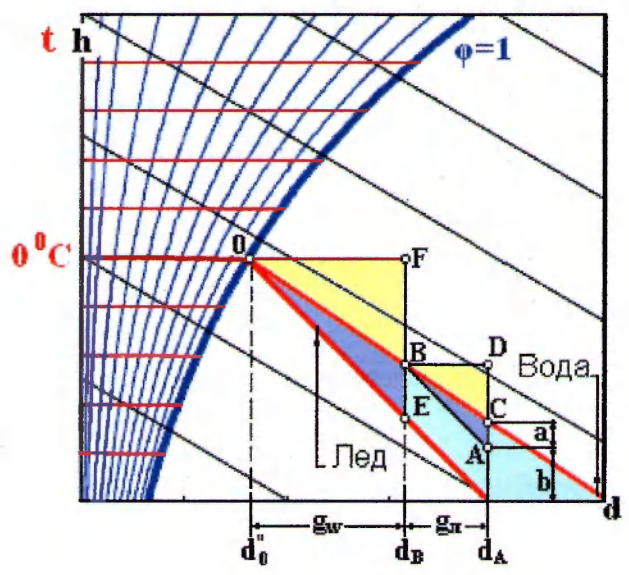


Рис.4.14. К определению содержания воды и льда в области смешанного тумана.

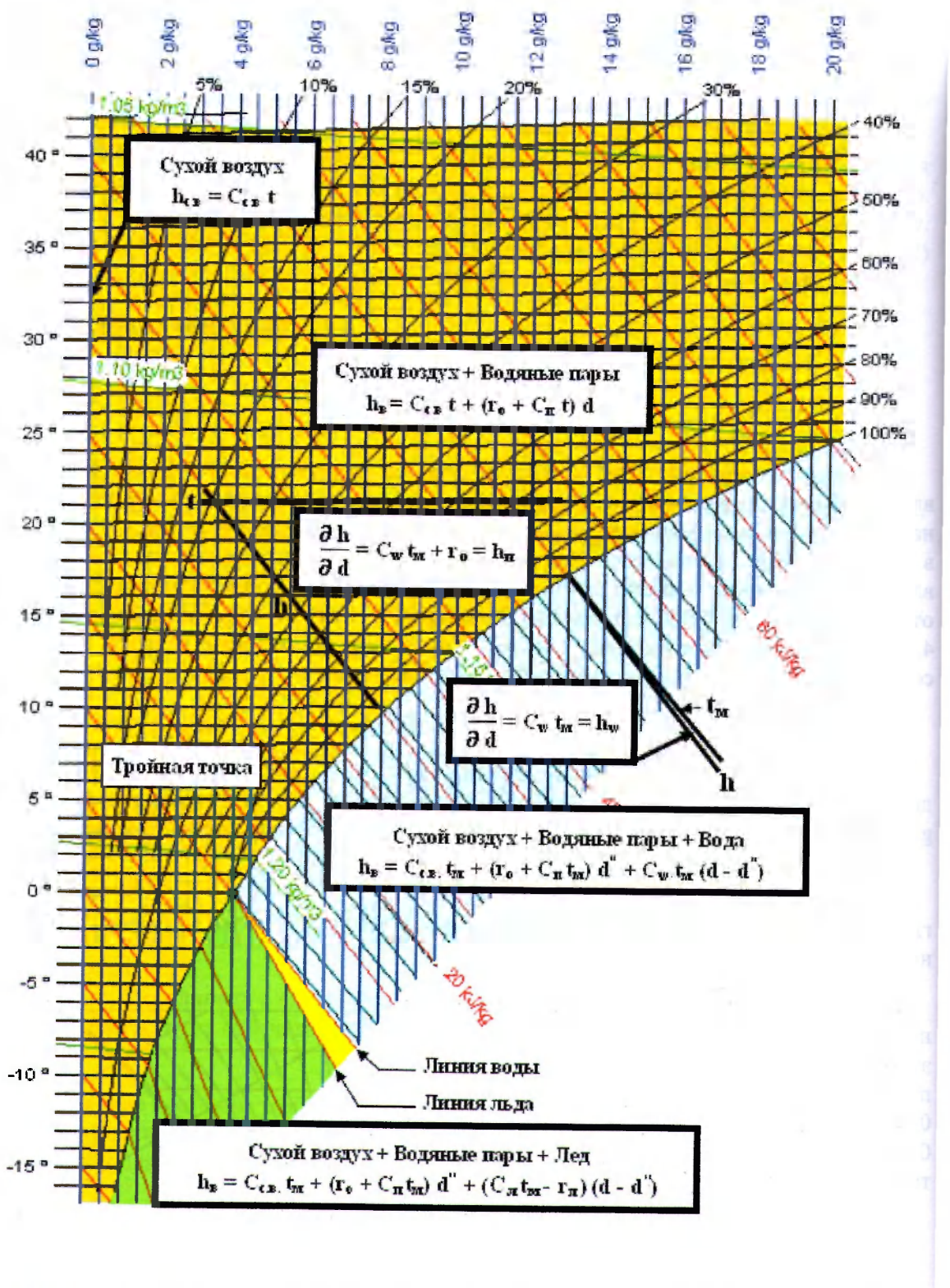


Рис.4.15. К определению энтальпии влажного воздуха во всех областях d, h- диаграммы*: перегретого пара, влажного и ледяного тумана.

*diagram by Kunz Beratungen GMBH, Dietlikon, Switzerland:
www.kunz.beratungen.ch

Поле d,h-диаграммы – изобарная поверхность, определяющая состояние влажного воздуха для данного атмосферного давления. Однако, эту же поверхность можно использовать и для других атмосферных давлений, а также в задачах с переменными значениями $P_б$. Учитывая, что энтальпия не зависит от давления (§ 2.3) изменение величины $P_б$ в d,h- диаграмме можно учесть местоположением изолиний φ = const ($\varphi = f(P_б)$), в соответствии с уравнением связи термических параметров и параметров состава (2.14*). Анализ уравнения 2.14*: $d = 0{,}622\ \varphi P_п''/(P_б - \varphi P_п'')$ позволяет упростить задачу и отказаться от дополнительных построений. Так как при t = const $\rightarrow P_п''$ = const, то, если пренебречь малой по отношению к $P_б$ величиной $\varphi P_п''$, можно считать, что $d \simeq f(\varphi/P_б)$. Следовательно, для влажного воздуха с одинаковым влагосодержанием справедливо соотношение:

$$\varphi_1 / P_{б.1} = \varphi_2 / P_{б.2}. \qquad (4.5)$$

Отсюда следует правило:

Положение изолинии φ_x = const для давления P_x в диаграмме, отвечающей давлению $P_{диагр}$, определяет значение: $\varphi_{диагр} = \varphi_x (P_{диагр} / P_x)$. (4.5*)

Например, кривая насыщения $\varphi_x = 1$ для давления $P_x = 200$ кПа будет соответствовать изолинии $\varphi_{диагр} = 0{,}5$ на диаграмме, созданной для $P_{диагр} = 100$ кПа. Изолиния $\varphi_x = 0{,}5 \rightarrow \varphi_{диагр} = 0{,}25$ и т.д. Очевидно, что такой способ подходит для значений $P_x > P_{диагр}$, в противном случае потребуются построения в поле диаграммы (по приведенному выше алгоритму, рис.4.16).

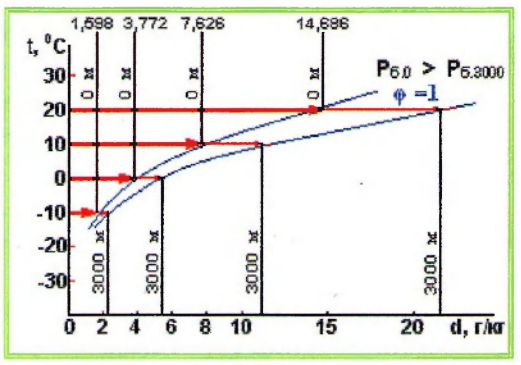


Рис.4.16. К построению линий $\varphi = 1$ для $P_б$ на уровне моря (H = 0 м) и на высоте 3000 м.

Погрешность упрощенного способа определяется как $(P_б - \varphi P_п'')/P_б$. Использование d,h-диаграммы для условий, отличающихся по величине атмосферного давления, считается целесообразным, когда погрешность не превышает 4 % [37].

4.2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СМЕШЕНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУХА в d,h-ДИАГРАММЕ

Пользуясь d,h- диаграммой можно определять не только все параметры воздуха, характеризующие его данное состояние, но и параметры смеси различных количеств воздуха с разными параметрами.

Обычно в СКВ осуществляется смешение двух потоков воздуха (рис.4.17):

1 – с массовым расходом G_1, кг/с, и параметрами d_1 и h_1;
2 – с массовым расходом G_2, кг/с, и параметрами d_2 и h_2.

Количество (расход) G_c, влагосодержание d_c и энтальпия h_c смеси (поток С) рассчитываются из уравнений баланса:

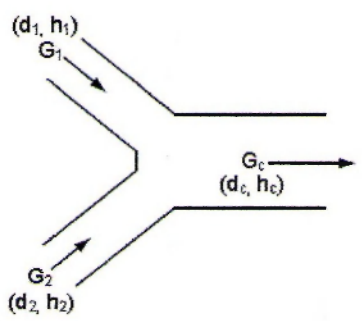


Рис.4.17. Схема смешения.

- по массе: $G_c - G_1 + G_2$; (4.6)

- по влаге: $d_c G_c = d_1 G_1 + d_2 G_2 \rightarrow d_c = (d_1 G_1 + d_2 G_2)/(G_1 + G_2)$; (4.7)

- по теплоте: $h_c G_c = h_1 G_1 + h_2 G_2 \rightarrow h_c = (h_1 G_1 + h_2 G_2)/(G_1 + G_2)$. (4.8)

Еще проще параметры смеси определяются с помощью построений в d,h- диаграмме – по координатам точки смеси т. С (d_c, h_c), рис.4.18. После элементарных алгебраических преобразований уравнений 4.6…4.8 можно записать:

$$(d_2 - d_c)/(d_c - d_1) = (h_2 - h_c)/(h_c - h_1) = G_1/G_2. \quad (4.9)$$

Из выражения 4.9 следует, что:

1. Процесс смешения представляется в d,h- диаграмме отрезком прямой линии. соединяющей точки 1 (d_1, h_1) и 2 (d_2, h_2), причем точка смеси (т. С) делит этот отрезок 1-2 на две части в отношении, обратно пропорциональном смешиваемым количествам.
2. Для определения параметров смеси не обязательно знание величин G_1 и G_2, достаточно знать только их соотношение.

Т. е., если $G_1/G_2 = 1/n$, то длину отрезка 1 – 2 следует разделить на n+1 частей и от точки 2 отложить одну такую часть.

Сформулированное выше правило смешения следует из подобия треугольников 1-С-В, С-2-D и 1-2-А (рис.4.18 [90]):

$$1C/2C = CB/2D = (h_c - h_1)/(h_2 - h_c) = G_2/G_1 = n,$$

$$12/C2 = 2A/2D = (h_2 - h_1)/(h_2 - h_c) = G_c/G_1 = n+1.$$

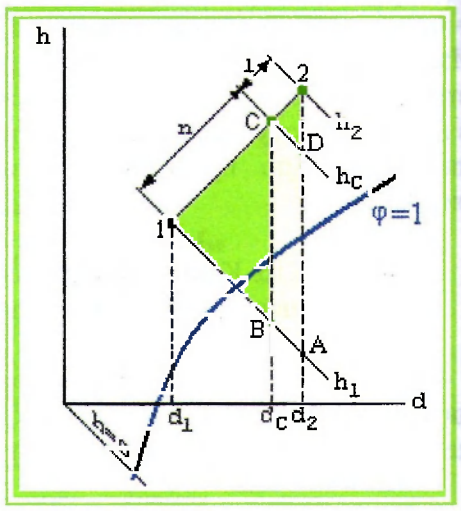


Рис.4.18. Графическая интерпретация процесса смешения двух потоков воздуха в рабочей области d,h- диаграммы.

Отрезок 1С, примыкающий к точке 1, соответствует расходу G_2, отрезок 2С, примыкающий к точке 2, – расходу G_1, а весь отрезок 12 – общему (суммарному) расходу Gc.

Если в процессе нахождения точки смеси возникнут какие-либо сомнения, то можно обратиться за помощью к простому правилу: *точка смеси должна быть ближе к точке, отвечающей большому расходу воздуха (аналогично центру тяжести механической системы с грузами разной массы, рис.4.19).*

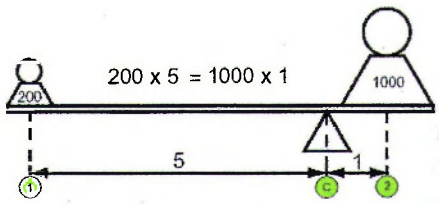


Рис.4.19. Схема балансировки механической системы.

В подтверждение второго следствия, вытекающего из уравнения 4.9, задача смешения имеет простое аналитическое решение. Если числитель и знаменатель правой части уравнения 4.7, а также уравнения 4.8, разделить на G_1, то, соответственно, получим:

$$d_c = (d_1 + n\, d_2)/(1 + n), \quad (4.7^*)$$

$$h_c = (h_1 + n\, h_2)/(1 + n). \quad (4.8^*)$$

Для многокомпонентной смеси проводится последовательный расчет параметров, в процессе которого сначала объединяются любые два компонента, а затем последующие по схеме: «два + один» (рис.4.20) либо «два + два» и т.д.

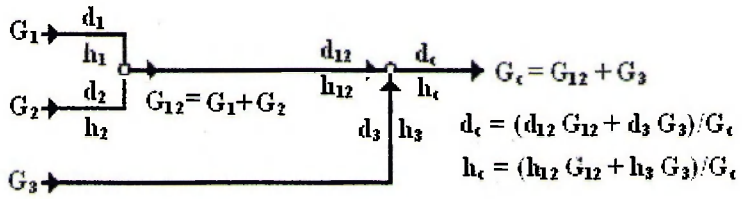


Рис.4.20. Расчетная схема смешения трех потоков.

В случае, когда точка смеси C' (рис.4.21), определяемая по правилу смешения (4.9), оказывается в области тумана – она не характеризует параметры смеси. Поскольку в данной области состояние воздуха метастабильно, то из него при любом возмущении (например, при контакте со стенкой камеры смешения) будет выпадать конденсат, а система «влажный воздух» стремиться к состоянию равновесия. Таким образом, фактическая точка смеси т. С в d,h- диаграмме должна находиться на линии $\varphi = 1$. В качестве второго определяющего параметра можно использовать температуру по мокрому термометру $t_м$, либо значение энтальпии h_c из уравнения теплового баланса процесса конденсации:

$$q_{конд} = h_{c'} - h_c = C_w\, t_м\, g_w, \qquad (4.4")$$

где $t_м$ – температура конденсата ($t_м = t_c$),
$g_w = d_{c'} - d_c$ – количество конденсата, кг, отнесенное к 1 кг сухого воздуха.

Эта задача решается методом последовательного приближения в ходе итерационных расчетов. Задаваясь рядом значений $h_c < h_{c'}$, можно добиться тождества левой и правой частей уравнения 4.4".

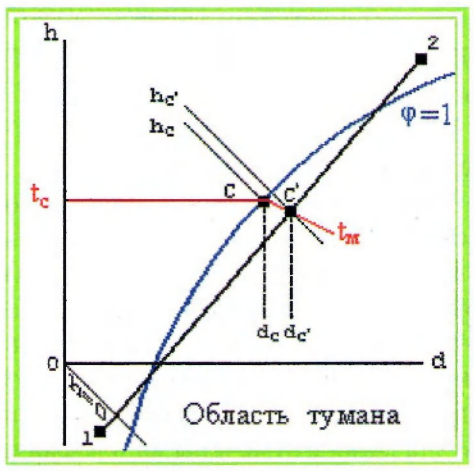


Рис.4.21. К определению параметров смеси в области тумана.

В инженерных расчетах, величиной $C_w\, t_м\, g_w$ можно пренебречь, ввиду ее малости, и считать, что точка C' переходит на линию $\varphi = 1$ по изоэнтальпе.

Одним из способов, использующий в аэропортах для борьбы с туманом является механическое подмешивание в слой тумана сухого воздуха, расположенного выше (за счет работы вертолетов, рис.4.22). Т.е., таким образом, решается задача смещения текущего состояния воздуха в область ненасыщенного влажного воздуха.

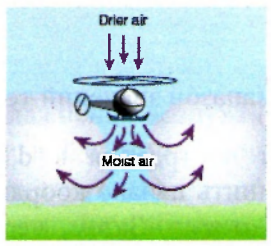


Рис.4.22. Способ борьбы с атмосферным туманом [229].

4.3. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В d,h- ДИАГРАММЕ

В процессах термовлажностной обработки воздуха в аппаратах СКВ состояние воздуха, как рабочего тела, целенаправленно изменяется. Изменение параметров воздуха зависит от соотношения количества теплоты и влаги, которые воспринимаются или отдаются воздухом. При этом, учитывая, что по своей физической природе процессы тепло- и массообмена – инерционные процессы, состояние воздуха изменяется не мгновенно, а

постепенно, т.е. за какой-то промежуток времени. Если допустить, что процесс теплообмена и процесс влагообмена протекают с одинаковой скоростью, то можно полагать, что в каждый момент времени воздух будет воспринимать или терять Q (кДж/с) теплоты и W (кг/с) влаги. Отношение этих величин:

$$\varepsilon = Q/W, \ \text{кДж/кг}, \qquad (4.10)$$

– называется *тепловлажностным отношением* или *угловым коэффициентом процесса*.

Величины Q и W определяются балансовыми уравнениями: $Q = G_в \, \Delta h, \qquad (4.11)$

$$W = G_в \, \Delta d, \qquad (4.12)$$

где $G_в$, кг/с – массовый расход воздуха, проходящего через аппарат в процессе его обработки; $\Delta h_в$, кДж/кг и $\Delta d_в$, кг/кг – разности конечных и начальных значений энтальпии и влагосодержания воздуха, соответственно. Таким образом, процесс постепенного изменения параметров воздуха изображается в d,h-диаграмме (рис.4.23) прямой, соединяющей точки начального и конечного состояния воздуха, т.к. для любой точки, лежащей на этой линии, отношение приращений:

$$\Delta h / \Delta d = \varepsilon = \text{const}, \qquad (4.13)$$

что отвечает принятому допущению об одинаковом темпе процессов тепло- и влагообмена.

На рис.4.23 показано, что ε могут иметь как положительные, так и отрицательные значения.

Для построения процессов обработки воздуха по известному (из расчета) значению ε в d,h- диаграмме имеется шкала* значений ε в виде углового масштаба (угла α). Эта шкала сформирована с помощью лучей, сходящихся в нулевой точке диаграммы – т. 0 (t = 0 °C, d = 0 кг/кг), так называемых «лучей диаграммы» (рис.4.24). В поле диаграммы лучи не проводятся, чтобы не затемнять рабочую область, шкала выведена за рамку диаграммы, где значения ε отмечены видимыми окончаниями лучей (рис.4.30).

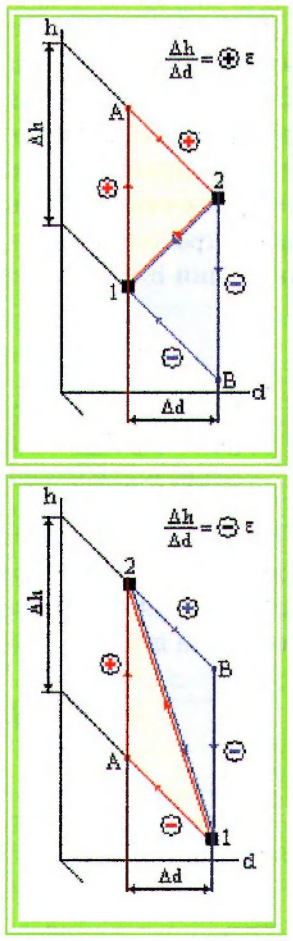


Рис.4.23. К определению ε.

**Впервые шкала ε была включена в диаграмму влажного воздуха проф. Р. Молье [52, 108].*

Диапазон значений тепловлажностного отношения: $-\infty \geq \varepsilon \leq +\infty$.

Для построения в d,h- диаграмме какого-либо процесса необходимо прямой линией соединить начало координат с отметкой на шкале ε, и зафиксировать, таким образом, *«луч диаграммы»*. Затем, через точку известного начального состояния воздуха, параллельно этой линии, провести прямую, которая будет отвечать понятию *«луч процесса»*.

Любая прямая, проведенная параллельно лучу диаграммы,
будет соответствовать тому же тепловлажностному отношению

Следуя этому правилу, выполняются построения всех возможных политропических процессов обработки влажного воздуха в d,h- диаграмме.

На рис.4.24, в качестве примера, через т.1 проведен луч процесса ε = 4000 кДж/кг.

Как правило, в d,h-диаграммах, построенных в общепринятых масштабах (см. с. 107) лучи процесса с тепловлажностной характеристикой $\varepsilon > 40000$ кДж/кг и $\varepsilon < -15000$ кДж/кг можно проводить по линии d = const ($\varepsilon = \pm \infty$).

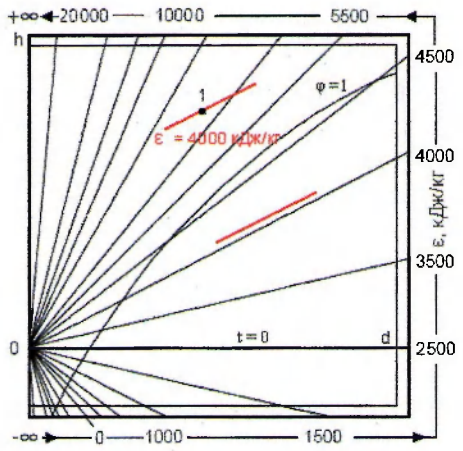


Рис.4.24. Лучи диаграммы.

Процесс обработки воздуха определяется не только значением ε, но и направлением луча процесса. Если поменять местами точки начального и конечного состояний воздуха, то численное значение и знак ε не изменятся, однако изменятся знаки приращений Δh и Δd на противоположные (процессы 1-2, 2-1, рис.4.23). Поле диаграммы может быть разбито линиями h = const и d = const, проведенными через точку начального состояния т. 0 (полюс диаграммы) на четыре сектора, характеризующих возможное течение процессов (рис.4.25) (секторы I, III и II, IV отвечают различным (взаимнопротивоположным) процессам при одинаковых значениях ε).

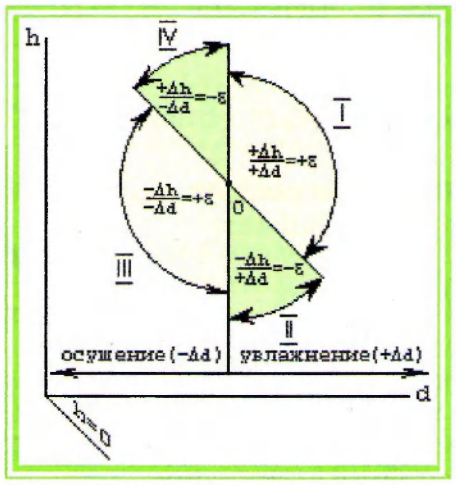


Рис.4.25. Секторы d,h- диаграммы.

Все процессы, идущие вправо от линии d = const, – процессы увлажнения воздуха (знак приращений Δd – положительный). Это I и II секторы, причем в I секторе процессы проходят с увеличением энтальпии ($+\Delta h$), а во II секторе с ее уменьшением ($-\Delta h$).

Все процессы, идущие влево от линии d = const, – процессы осушения воздуха (знак приращений Δd– отрицательный). Это III и IV секторы, с уменьшением ($-\Delta h$) и увеличением энтальпии ($+\Delta h$), соответственно.

Такое разбиение поля диаграммы дает общее представление картины процессов и оказывается полезным для анализа, поскольку при проектировании аппаратов СКВ основной расчетной величиной является тепловая нагрузка (воздухонагреватели и воздухоохладители) либо влажностная (увлажнители и осушители), определяемые через интегральные разности Δh и Δd. Однако, складывающаяся при этом картина является неполной, поскольку интерес представляет и знак приращения температуры $\Delta t_в$, как вектор термической обработки воздуха: нагревания либо охлаждения. Изотерма, проведенная через

полюс (луч ε_t, рис.4.26), открывает в рамках I и III секторов, в пределах значений $0 < \varepsilon < \varepsilon_t$, участки рабочей области, где изменение энтальпии и температуры происходит с противоположными знаками. Последнее обстоятельство объясняется разнонаправленностью потоков явной и скрытой теплоты. Например, в процессе охлаждения воздуха 0-1 в указанной части I сектора температура воздуха падает, а энтальпия растет за счет роста влагосодержания и, соответственно, скрытой части энтальпии ($r_o d$).

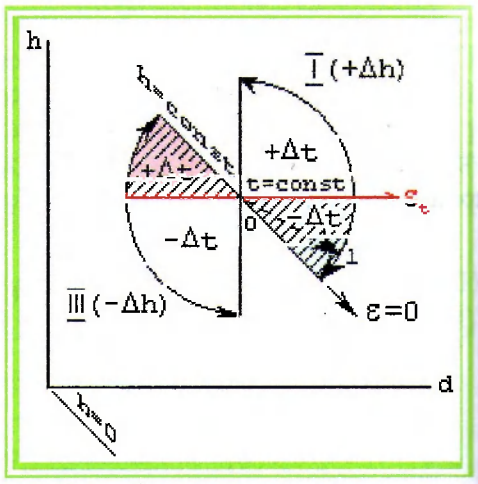


Рис.4.26. Зоны нагревания и охлаждения воздуха в I и III секторах.

Анализ соотношения явной ($Q_{явн}$) и скрытой ($Q_{скр}$) составляющих полной тепловой нагрузки ($Q_п$) объекта кондиционирования (помещения), тепловлажностного потенциала наружного воздуха (отвечающего климату конкретного региона), является определяющим моментом в выборе технологии обработки воздуха при проектировании СКВ.

На рис.4.27 в d,h- диаграмме приведена интерпретация явной и скрытой частей Q_Σ в политропическом процессе 1-2, в соответствии с балансовым уравнением:

$$Q_\Sigma = G_в \Delta h = G_в (C_в \Delta t + r_0 \Delta d).$$

Приведенная тепловая нагрузка на единицу производительности по воздуху [кДж/кг]:

$Q_\Sigma / G_в = \Delta h$ (на рис.4.27 – отрезок ac);
$Q_{явн} / G_в = C_в \Delta t$ ..... (отрезок bc);
$Q_{скр} / G_в = r_0 \Delta d$ ..... (отрезок ab).

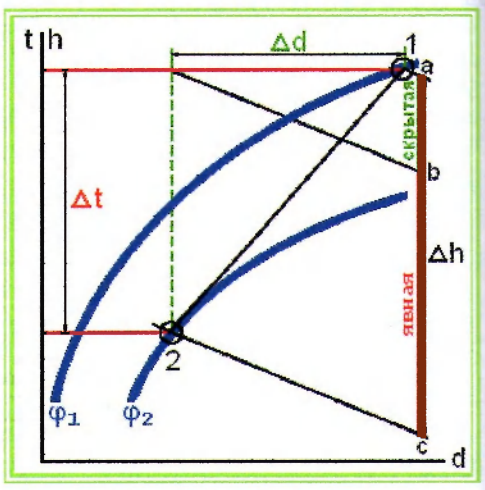


Рис.4.27. Графическая интерпретация составляющих Q_Σ в d,h- диаграмме.

Если процесс термовлажностной обработки воздуха проходит при постоянном значении одного из параметров состояния, то он считается *простым*.

Простые процессы, проходящие по линиям d = const, h = const, t = const, рассматриваются в составе *типичных* процессов, характерных для определенного класса аппаратов обработки воздуха.

На рис.4.28, в d,h- диаграмме, показаны типичные процессы обработки воздуха в аппаратах кондиционирования воздуха в летнем (1–2–3) и зимнем режимах функционирования (4–5–6–7) центральной прямоточной СКВ (рис.4.29). Процесс ассимиляции тепло- и влагоизбытков в объекте кондиционирования – помещении $Q_п$, $W_п$ (либо ассимиляции влагоизбытков и внесения теплоты с приточным воздухом, в случае отрицательной тепловой нагрузки помещения в холодном периоде года – режим отопления), характеризующейся $\varepsilon_п = Q_п / W_п$, т.н. *прямой процесс*, на рис.4.28 не показан. Процессы приведения наружного воздуха в состояние приточного, т.е. все процессы термовлажностной обработки воздуха в аппаратах СКВ называются *компенсирующими*.

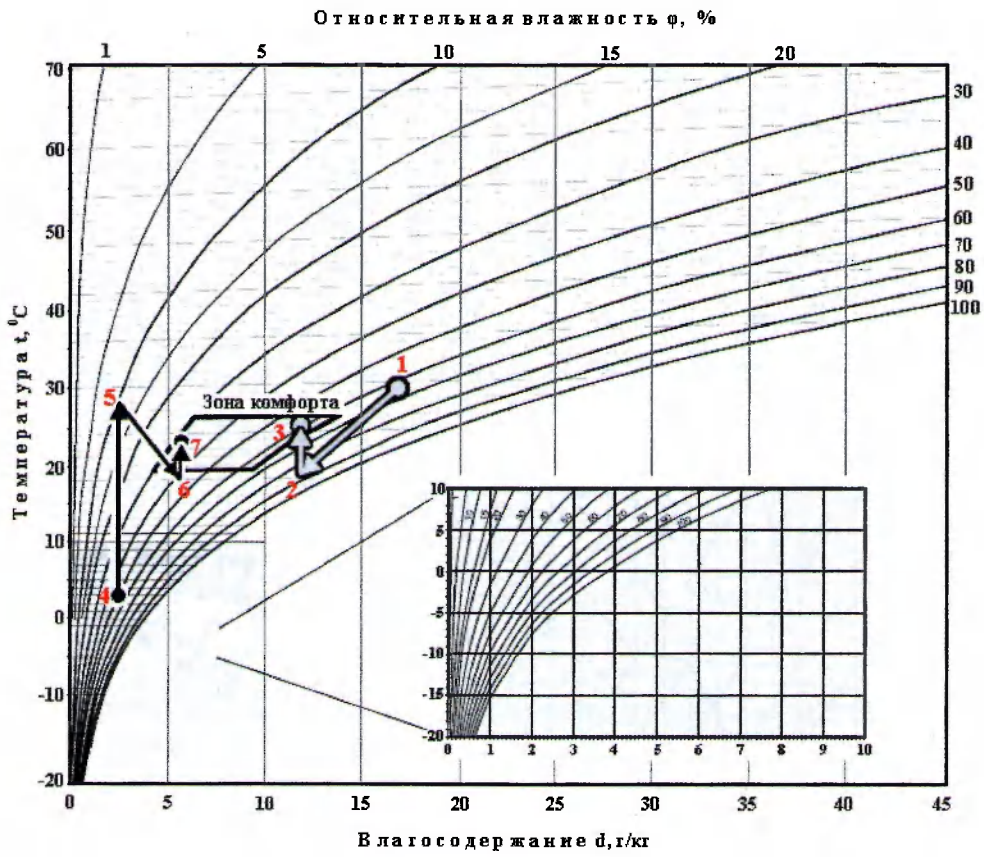


Рис.4.28. Процессы обработки воздуха в аппаратах СКВ:

1–2 – охлаждение и осушение воздуха в контактном либо поверхностном аппарате при температуре рабочей поверхности меньшей, чем температура точки росы;
2–3 – нагревание воздуха в воздухонагревателе второго подогрева;
(6–7)
4–5 – нагревание воздуха в воздухонагревателе первого подогрева;
5–6 – увлажнение воздуха в изоэнтальпийном увлажнителе.

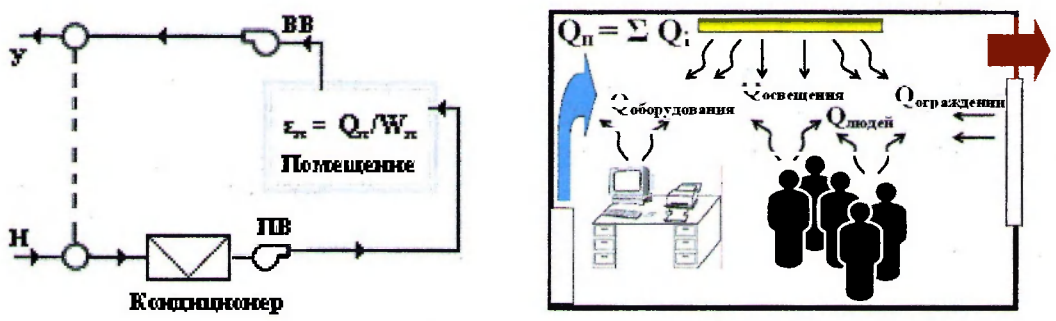


Рис.4.29. Схема центральной СКВ: ПВ, ВВ – приточный и вытяжной вентиляторы; Н, У – наружный и удаляемый воздух.

Эти, и другие процессы и аппараты: контактного и поверхностного типа; осушители и увлажнители; прямого и косвенно-испарительного охлаждения; теплоутилизаторы явной и полной теплоты, – подробно рассмотрены в последующих главах 5…11.

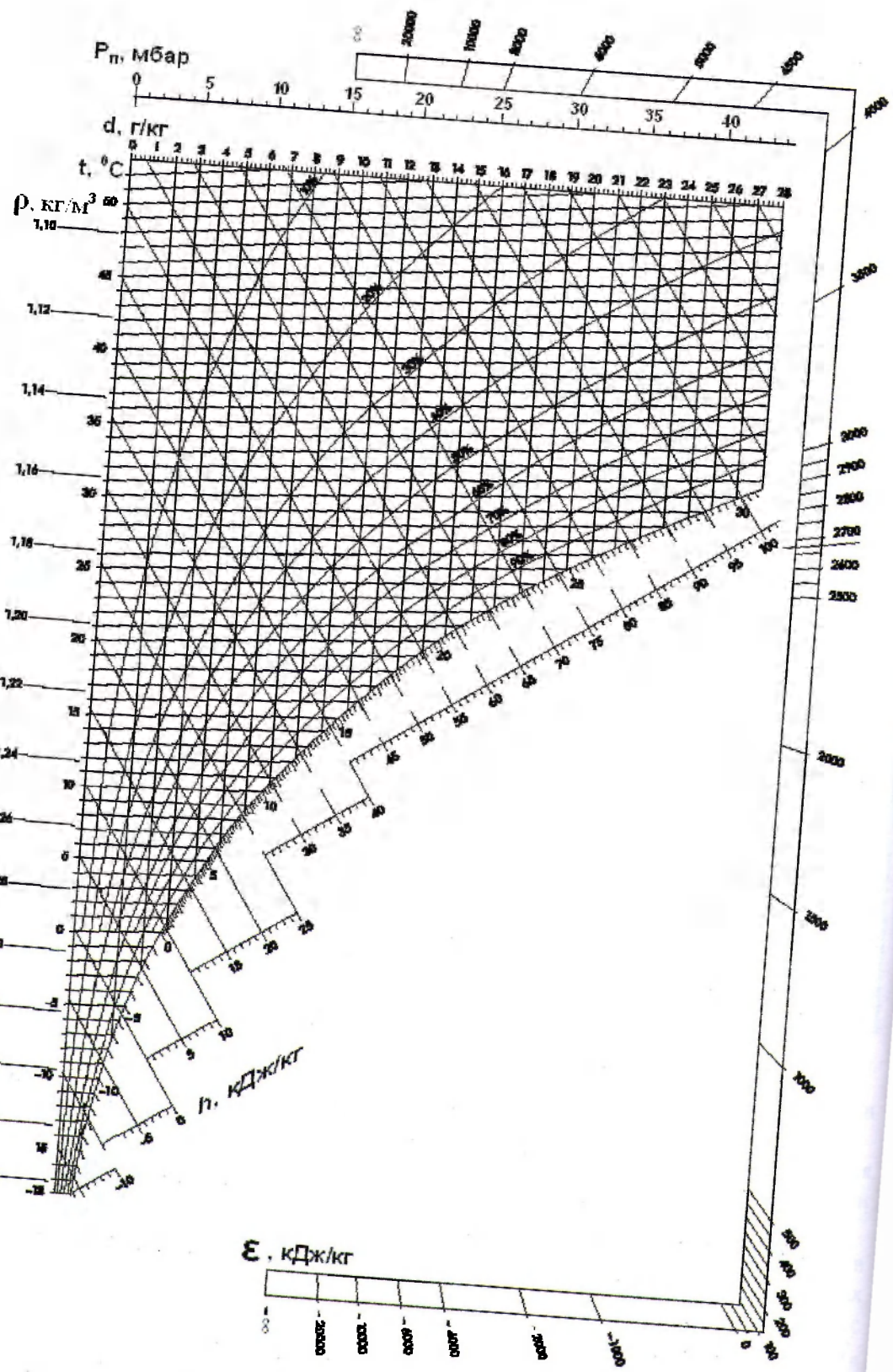


Рис.4.30. Диаграмма – d,h со шкалой ε.

5. ОБРАБОТКА ВОЗДУХА В КОНТАКТНЫХ АППАРАТАХ

Непосредственный контакт воздуха с водой широко используется в СКВ для получения требуемых параметров воздуха, поскольку:

1) в зависимости от температуры воды можно добиться необходимого сочетания процессов термо- и влагообработки воздуха: охлаждение с осушением либо увлажнением, увлажнение с нагреванием либо без него и др. (всего 7 типичных процессов);
2) рассматриваемый способ реализуется достаточно простыми средствами и в сопоставлении с другими способами требует меньших затрат энергии (особенно в условиях адиабатного процесса).

В поле d,h-диаграммы, как правило, эти процессы захватывают область в пределах двух касательных, проведенных из точки начального состояния воздуха т. Н к кривой φ = 1 (рис.5.1), т.е. полностью II сектор и частично I и III секторы. В случае обработки воздуха с малыми значениями начального влагосодержания (т. Н′) левая граница этой области трансформируется из касательной в секущую к линии насыщения в точке ее пересечения с нулевой изотермой.

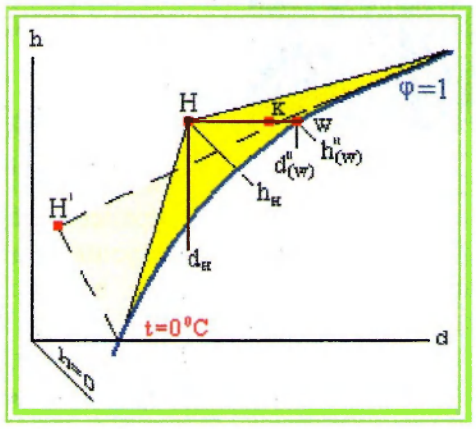


Рис.5.1. Формирование в d,h- диаграмме области возможных процессов обработки воздуха водой.

Линия процесса – прямая линия, положение которой определяется тепловлажностным отношением: $\varepsilon = (h''_{(w)} - h_н)/(d''_{(w)} - d_н)$, где $h_н$, $d_н$ - координаты точки Н начального состояния; $h''_{(w)}$, $d''_{(w)}$ - координаты точки W насыщенного состояния воздуха при температуре воды t_w.

Завершение процесса в точке W возможно только в идеализированных условиях его протекания при бесконечной поверхности и неограниченном времени контакта. В реальном аппарате эти величины конечны ($F < \infty$, $G_в > 0$). Поэтому точка К состояния воздуха на выходе из аппарата должна находиться между точками Н и W (рис.5.1). При такой трактовке процесс контактирования воздуха и воды можно рассматривать как процесс смешения воздуха состояния Н и насыщенных водяных паров в пограничном слое состояния W. Нахождение точки смеси – конечного состояния воздуха (точка К) – требует знания массового расхода пара W, который зависит от многих факторов, и, прежде всего, от интенсивности испарения, величины поверхности (рис.5.2).

5.1. ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА. СООТНОШЕНИЕ ЛЬЮИСА

Уравнение кинетики процесса массопереноса предложил Дж. Дальтон в 1803 году. Для элемента поверхности dF поток массы вещества можно определить как:

$$dW = \beta (P_п''_{(w)} - P_п) dF, \text{ кг/с}, \qquad (5.1)$$

где β – коэффициент пропорциональности, $P_п''_{(w)}$ – парциальное давление насыщенных водяных паров при t_w, $P_п$ – парциальное давление водяных паров в основной массе (ядре потока) воздуха.

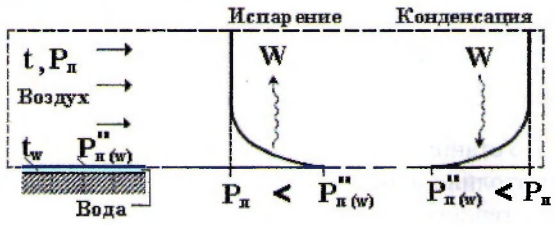


Рис.5.2. К физической картине массопереноса.

В 1922 году американский ученый *Уоррен Кэндалл Льюис* заменил в уравнении Дальтона (5.1) движущую силу процесса на разность влагосодержаний [212]:

$$dW = \sigma\,(d''_{(w)} - d)\,dF,\ \text{кг/с}, \qquad (5.2)$$

где σ – коэффициент влагообмена (или коэффициент испарения), кг/(м²·с). Поскольку в обычных условиях при небольших значениях влагосодержания (до 20 г/кг) величина d пропорциональна $P_п$, то такая замена допустима.



Льюис, используя аналогию (подобие) переноса теплоты и массы в условиях конвективного (молярного) переноса, установил соотношение между коэффициентом испарения σ и коэффициентом теплоотдачи α для процесса адиабатического увлажнения воздуха.

Количество теплоты, которое влажный воздух конвективным путем передает к поверхности воды, определяется известным уравнением Ньютона:

$$dQ_{конв} = \alpha\,(t - t_w)\,dF,\ \text{Вт}, \qquad (5.3)$$

либо $$q_{конв} = \alpha\,(t - t_w),\ \text{Вт/м}^2, \qquad (5.3')$$

где α – коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха, Вт/(м²·К): $q_{конв}$ – удельный поток теплоты на единицу поверхности.

В адиабатическом процессе без отвода и подвода теплоты от постороннего источника $q_{конв}$ расходуется на испарение воды с поверхности (рис.5.3).

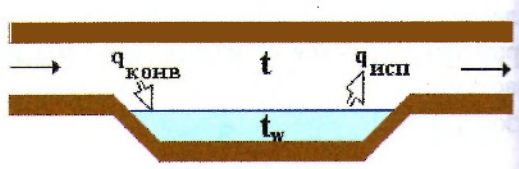


Рис.5.3. К анализу адиабатического процесса контактирования воды и воздуха.

В соответствии с размерностью коэффициента испарения σ, $кг_{с.в.}$/(м²·с), определяющей его физический смысл: σ – масса сухого воздуха (кг), которая за единицу времени (1 с) приходит к водной поверхности, воспринимает массу испарившегося водяного пара ($d''_{(w)}$ - d) с единицы поверхности (1 м²) и возвращается в основной поток влажного воздуха. Эта масса воздуха охлаждается в пограничном слое до температуры t_w, а затем нагревается на обратном пути до t, получая тоже количество теплоты:

$$q_{исп} = C_в\,\sigma\,(t - t_w), \qquad (5.4)$$

$q_{исп} = q_{конв}$ (уравнение 4.4, по сути, есть уравнение теплового баланса).

Таким образом, $$\alpha\,(t - t_w) = C_в\ \sigma\,(t - t_w)\ \text{и}\ \sigma = \alpha / C_в, \qquad (5.5)$$

либо $$\alpha / (\sigma\,C_в) = le = 1. \qquad (5.5^*)$$

Число le называется соотношением Льюиса.

Приведенный вывод соотношения Льюиса предложен Р.М. Ладыженским [51], а также Дм. Воронцом и Дж. Козичем [21] и, на мой взгляд, является наиболее лаконичным. Аналогичный результат может быть получен и другим путем, например, с помощью теории подобия [8, 52, 67].

Равенство единице соотношения le выполняется только для аналогичных механизмов переноса теплоты и массы при сравнительно небольших тепловых нагрузках, характерных для тепломассообменных аппаратов СКВ, аппаратов испарительного охлаждения воды (градирен) [8]. Фактически величина le = 0,8…1,2 и определяется следующим выражением (формула Ф. Бошняковича):

$$le = \alpha / (\sigma\,C_в) = 0{,}908\,[(0{,}622 + d''_{(w)})/(0{,}622 + d) - 1]/\ln[(0{,}622 + d''_{(w)})/(0{,}622 + d)] \qquad (5.6)$$

Установление соотношения между коэффициентом испарения σ и коэффициентом теплоотдачи α позволило использовать огромный экспериментальный материал, накопленный в мировой практике по теплообмену в различных аппаратах в виде критериальных уравнений для чисел Нуссельта Nu = α l /λ: Nu = f (Re, Pr) – для простого пересчета значений α на значения σ. Так, в определенной степени, был ликвидирован разрыв между исследованиями по теплообмену и массообмену, который сложился исторически.

5.2. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ КИНЕТИКИ ПОЛИТРОПИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА МЕЖДУ ВОЗДУХОМ И ВОДОЙ

При непосредственном контакте воздуха с водой процесс теплообмена обусловлен конвекцией (*явная теплота*, уравнение 5.3) и влагообменом, а именно переносом теплоты за счет потока массы вещества (*скрытая теплота*). Выражение для скрытой части теплового потока:

$$dQ_{скр} = r\, dW, \qquad (5.7)$$

где r – скрытая теплота парообразования при t_w. Тогда уравнение полного потока теплоты:

$$dQ = \alpha\,(t_w - t)\,dF + r\,dW, \qquad (5.8)$$

либо с учетом (5.2) $$dQ = [\alpha\,(t_w - t) + r\,\sigma\,(d''_{(w)} - d)]dF. \qquad (5.8')$$

Уравнения 5.8 и 5.8' записаны для случая $t_w > t$.

В уравнении 5.8' содержатся два коэффициента обмена α и σ и две движущие силы процесса – разность температур и разность влагосодержаний, что вызывает определенные трудности в расчетной практике. Это неудобство можно устранить, если использовать соотношение Льюиса. Такое решение было предложено немецким ученым Фридрихом Меркелем[1] в 1925 году. Если в правой части уравнения (5.7') вынести за скобки коэффициент σ, то:

$$dQ = \sigma\, dF\,[(\alpha/\sigma)\,(t_w - t) + r\,(d''_{(w)} - d)]. \qquad (5.8'')$$

Учитывая, что $\alpha/\sigma = C_в = C_{с.в} + C_п\, d$, $r = r_o + C_п\, t_w - C_w\, t_w$ (см. уравнения 2.19…2.21):

$$dQ = \sigma\, dF\,[(C_{с.в} + C_п\, d)\,(t_w - t) + (r_o + C_п\, t_w - C_w\, t_w)\,(d''_{(w)} - d)]. \qquad (5.8''')$$

Выражение в квадратных скобках уравнения (5.7'''):

$$[\ldots] = C_{с.в.}\, t_w - C_{с.в}\, t + C_п\, d\, t_w - C_п\, d\, t + r_o\, d''_{(w)} - r_o\, d - C_w t_w\, d''_{(w)} + C_w\, t_w\, d + C_п\, t_w\, d''_{(w)} -$$

$$- C_п\, t_w\, d = C_{с.в.}\, t_w + (r_o + C_п\, t_w)\, d''_{(w)} - [C_{с.в.}\, t + (r_o + C_п\, t)\, d] - C_w\, t_w\,(d''_{(w)} - d),$$

$$\text{т.е. } [\ldots] = h''_{(w)} - h - C_w\, t_w\,(d''_{(w)} - d).$$

Величина $C_w\, t_w\,(d''_{(w)} - d)$ – теплосодержание воды, испарившейся в процессе тепломассообмена, – мала и составляет не более 1% разности энтальпий воздуха $(h''_{(w)} - h)$, в связи с чем, – ею можно пренебречь [33].

Таким образом, $$dQ = \sigma\,(h''_{(w)} - h)\,dF. \qquad (5.8^*)$$

Вывод уравнения 5.8* значительно упрощается, если изначально пренебречь теплосодержанием испарившейся воды, и в уравнения 5.7, 5.8 вместо r подставить $h_п$ [60].

Это уравнение (5.8*) с одним коэффициентом обмена σ и одной движущей силой – *разностью энтальпий* – весьма удобно для инженерных расчетов. Оно является основным уравнением кинетики процесса тепломассопереноса и называется *уравнением Меркеля*, а интегральная характеристика интенсивности процесса *числом Меркеля* (Me):

$$Me = \sigma\, F/G_w = C_w \int dt_w/(\, h''_{(w)} - h). \qquad (5.9)$$

Число Me получается в результате интегрирования дифференциальных уравнений[2]:

$$dQ = C_w\, G_w\, dt_w = \sigma\,(\, h''_{(w)} - h)\, dF \qquad (5.10)$$

Число Меркеля представляет собой одну из форм чисел единиц переноса NTU, широко используемых для расчета тепломассообменных аппаратов, для которых сложно определить практическую величину поверхности обмена:

$$NTU = \int dh/(\, h''_{(w)} - h) = \sigma\, F/\, G_в = \mu\, Me, \qquad (5.11)$$

где $\mu = G_w/G_в$ – коэффициент орошения. (5.12)

[1] Ф. Меркель – профессор Дрезденского технического университета, см. прилож. IX

[2] Графическое решение см. на рис.5.8

5.3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУХА. ТИПИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА ВОДОЙ

Если разделить уравнение (5.8*) на уравнение (5.2), то с учетом уравнений баланса (4.8) и (4.9) можно получить дифференциальное уравнение изменения состояния воздуха в контакте с водой:

$$dQ/dW = G_в\, dh /G_в\, d(d) = \sigma\, (h''_{(w)} - h)\, dF / [\sigma\, (\, d''_{(w)} - d)\, dF],$$

и в конечных разностях $\Delta h/\Delta d = (h''_{(w)} - h)/(d''_{(w)} - d)$. (5.13)

В интегральном виде уравнение 5.13 совпадает с выражением 4.13 для тепловлажностной характеристики процесса ε при условии $t_w = \text{const}$. Постоянство температуры воды возможно:

1) в адиабатическом процессе, где в установившемся режиме $h = \text{const}$ и $t_w = t_м = \text{const}$;
2) в политропических процессах, когда количество воды бесконечно велико по сравнению с количеством воздуха: $\mu = \infty$.

На практике $\mu \neq \infty$: $\mu = (0{,}2\ldots3)$ кг/кг. Поэтому в реальных условиях проведения политропических процессов $t_w \neq \text{const}$, и действительная линия изменения состояния воздуха изменяется не по прямой, а по кривой линии (рис.5.4). Причем в зависимости от схемы движения потоков (противоток, прямоток либо поперечный ток), путь перехода из начального состояния воздуха в конечное будет различным.

Применительно к центральным кондиционерам (рис.5.5), в которых, как правило, в качестве тепломассообменных аппаратов используются форсуночные камеры орошения, схема тока четко не определена, поскольку распыление воды осуществляется как по ходу, так и против хода движения воздушного потока. Такая организация процесса позволяет рассматривать его как промежуточный вариант между противотоком и прямотоком, и линию процесса можно представить прямой, соединяющей начальное состояние воздуха Н с точкой на кривой насыщения φ = 1, отвечающей средней температуре воды $t_{w.cp.}$ (рис.5.4).

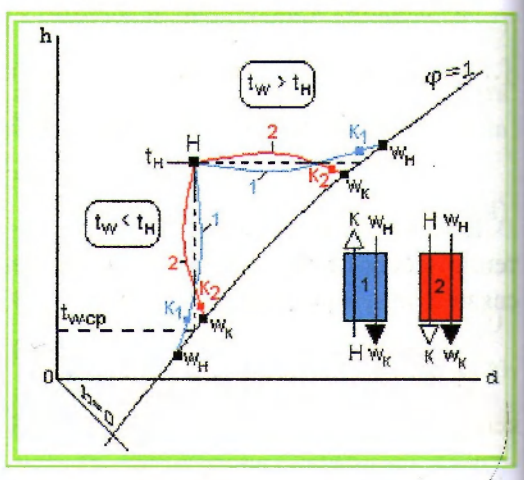


Рис.5.4. Интерпретация в d,h- диаграмме процессов обработки воздуха в контактных аппаратах $\mu < \infty$) при различных начальных условиях и схемах движения потоков: 1 – противоток; 2 – прямоток.

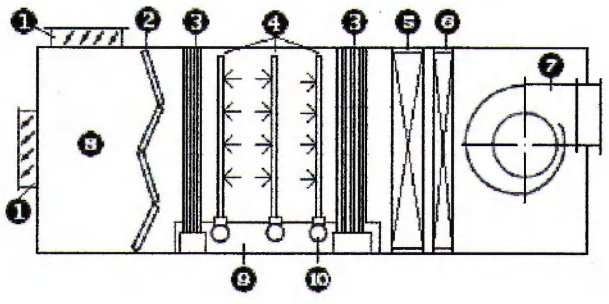


Рис.5.5. Схема центрального кондиционера:

1 – воздушные клапаны; 2 – фильтр: 3 – каплеуловители; 4 – стояки с форсунками; 5, 6 – поверхностные аппараты; 7 – вентилятор; 8 – камера смешения; 9 – поддон камеры орошения; 10 – водяной коллектор.

Построение линии обработки воздуха (рис.5.6) при известной схеме организации потоков можно провести с помощью уравнения (5.13) и уравнения теплового баланса:

$$Q = G_в\, \Delta h_в = C_w\, G_w\, \Delta t_w\ , \qquad (5.14)$$

решая эту задачу поэтапно. Если разбить интегральную разность энтальпий воздуха $\Delta h_o = h_н - h_к$ на n элементарных участков, то для каждого участка:

$$\begin{cases} \Delta h = \Delta h_o / n, \\ \Delta d = \Delta h\, (d''_{(w)} - d)/(h''_{(w)} - h), \\ \Delta t_w = \Delta h\, G_в/(C_w\, G_w). \end{cases}$$

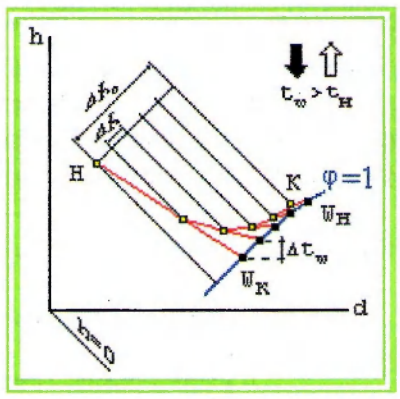


Рис.5.6. К построению линии процесса в d,h- диаграмме в контактном противоточном аппарате при $t_w > t_н$.

На рис.5.7 показано построение линии процесса изменения состояния воздушного потока в контактных прямо- и противоточном аппарате для случая $t_w < t_н$.

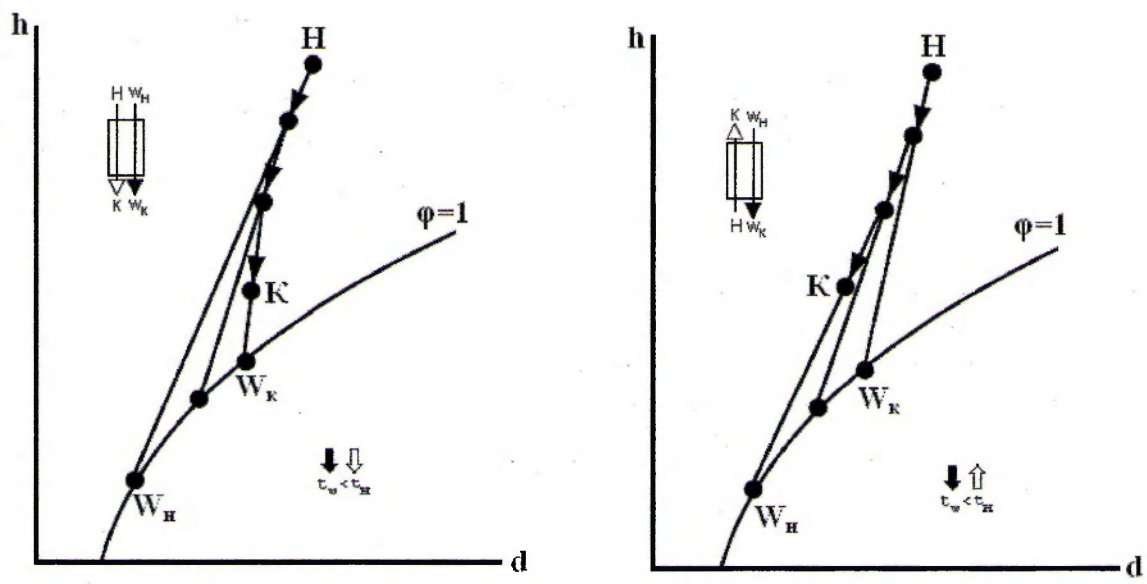


Рис.5.7. Графическая процедура построения линии обработки воздуха в контактных аппаратах в d,h- диаграмме при $t_w < t_н$: а – прямоток; б – противоток.

Удобнее и проще эта процедура выстраивается в рамках прямоугольной t,h-диаграммы, поскольку в этих координатах уравнение теплового баланса 5.14, связывающее энтальпию воздуха с температурой воды, интерпретируется прямой линией – так называемой *рабочей линией* [53] (рис.5.8, линия AB). Линии процесса, связывающие параметры воздуха (температуру и энтальпию) с параметрами насыщенного воздуха при t_w, для элементарной ячейки (на рис.5.7 конноды HC, ED) легко определяются графически, в соответствии с уравнением:

$$\Delta h/\Delta t = (h''_{(w)} - h)/(t_w - t)\ . \qquad (5.15)$$

Выражение 5.15 получается в результате деления дифференциальных уравнений для тепловых потоков полной и явной теплоты (баланса и кинетики, соответственно в левой и правой части), с учетом le = 1:

$$dQ = G_в\, dh = \sigma\, (h''_{(w)} - h)\, dF, \qquad dQ_{явн} = C_в\, G_в\, dt = \alpha\, (t_w - t)\, dF\ ,$$

$$dh/dt = (\sigma\, /\alpha\, C_в)\, (h''_{(w)} - h)/(t_w - t). \qquad (5.15')$$

Расчетная графическая процедура (рис.5.8) начинается с нижнего сечения аппарата, от известного начального состояния воздуха Н, до верхнего сечения, где определяется искомое (конечное) состояние К по приведенному ниже алгоритму.

В контактных аппаратах СКВ, как правило, изменение температуры воды Δt_w невелико: 2…4 градуса. В этих условиях линия изменения состояния воздуха подходит к кривой насыщения в d,h- диаграмме под очень острым углом. Это позволяет обозначать процесс обработки воздуха водой *прямой линией*, связывающей его начальное состояние с точкой W на кривой $\varphi = 1$ при $t_{w.ср.}$ либо $t_{w.н.}$, $t_{w.к.}$, в зависимости от типа аппарата и схемы организации процесса.

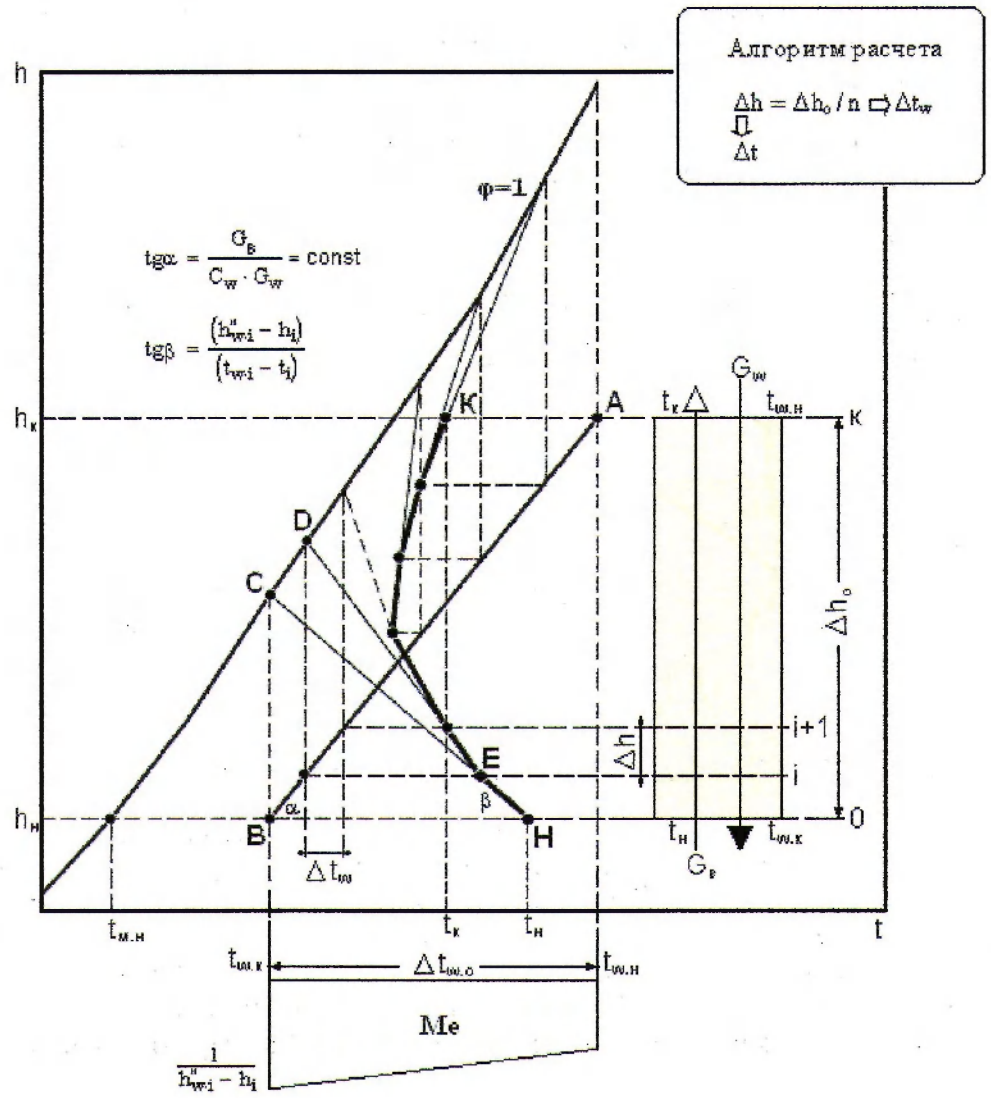


Рис.5.8. Графическая процедура построения линии обработки воздуха в контактном противоточном* аппарате и определения числа Меркеля (Me) в t,h- диаграмме.

Число Me определяется как площадь фигуры, построенной на отрезке $\Delta t_{w.o}$ на основании расчетных значений $[1/(h''_{w\,i} - h_i)]$, умноженная на величину теплоемкости воды C_w при средней температуре воды $t_{w.ср} = (t_{w.н} + t_{w.к})/2$.

*в случае перекрестного тока задача решается разбиением модуля на ряд элементарных противоточных ячеек [55].

Как уже отмечалось, область существования процессов обработки воздуха водой ограничивается в d,h- диаграмме двумя касательными к кривой насыщения. В пределах этой области различают семь типичных процессов с различными тепловлажностными характеристиками ε, которые реализуются в контактных аппаратах для охлаждения, нагревания, осушения либо увлажнения воздуха при определенных значениях t_w.

Анализ процессов удобно проводить в d,h-диаграмме, совмещенной с тепловой диаграммой (рис.5.9), с помощью которой проявляется распределение явной $Q_{явн}$ и скрытой $Q_{скр}$ составляющих полного потока теплоты Q_Σ. Так, в отношении простых процессов можно заметить, что:

– в процессе Н-К2 охлаждения воздуха при постоянном влагосодержании (d = const) до точки росы ($t_к \le \tau$): $Q_{скр} = 0$, $Q_\Sigma = Q_{явн}$;
– в изоэнтальпийном процессе Н-К4 (h = const) адиабатического увлажнения и охлаждения воздуха: $Q_{явн} = Q_{скр}$ и $Q_\Sigma = 0$;
– в изотермическом процессе увлажнения Н-К6 (t = const): $Q_{явн} = 0$, $Q_\Sigma = Q_{скр}$.

Результаты анализа типичных процесов сведены в таблицу 5.1.

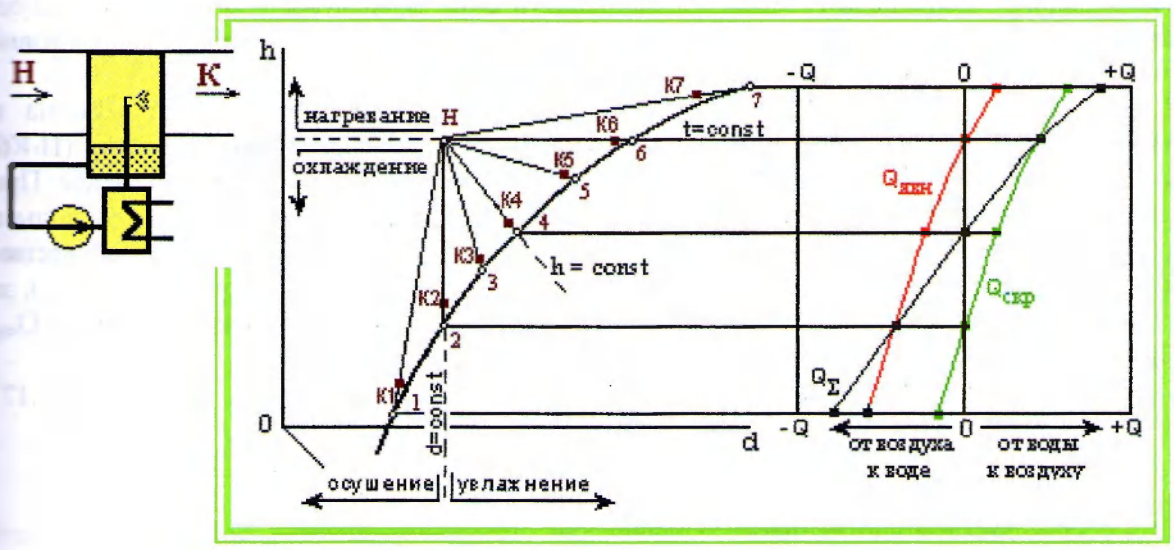


Рис.5.9. Типичные процессы обработки воздуха водой.

На рис.5.9 линии Н-1…Н-7 соответствуют идеальным процессам, в которых воздух достигает полного насыщения. Так как время контакта воздуха с водой в реальных аппаратах ограничено (при длине камеры 2 м и скорости воздуха 3 м/с составляет 0,7 с), то конечное состояние воздуха К1…К7 характеризуется значением $\varphi_к < 1$. При номинальных значениях коэффициента орошения μ (1,0 – камеры КЦ-М (МОВЕН), КЦКП (ВЕЗА); 2,5 – камеры ОКФ-3; 3,0 – камеры ОКС), отвечающих расчетному режиму работы аппарата с максимальным значением коэффициента адиабатной эффективности процесса $E_a = 0{,}95$: $\varphi_т = 0{,}9…0{,}95$.

$$E_a = (t_н - t_к)/(t_н - t_м) \qquad (5.16)$$

На эти значения, в качестве первого приближения, следует ориентироваться при проектировании СКВ, причем фиксирование $\varphi_к$ на одном уровне очень удобно, поскольку:

1) дает четкий ориентир окончания процесса в контактном аппарате;
2) позволяет легко увязать этот процесс с последующими процессами обработки воздуха в других аппаратах СКВ;
3) обеспечивает необходимые условия для использования простого способа регулирования относительной влажности воздуха в объекте кондиционирования (помещении) по методу "точки росы".

При непосредственном контакте с водой невозможно проведение трех процессов: *нагревания воздуха без изменения его влагосодержания, осушения и одновременного нагревания воздуха, осушения воздуха без изменения температуры* [104]. Эти процессы изображаются в d,h- диаграмме линиями, лежащими вне сектора К1-Н-К7 (на рис.5.9 не показаны), рассмотрены в главах 6 и 7.

5.4. ИЗОБАРНО-АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС. ТЕМПЕРАТУРА АДИАБАТИЧЕСКОГО НАСЫЩЕНИЯ (ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ОХЛАЖДЕНИЯ)

Рассмотрим еще раз задачу адиабатического контактирования воздуха и воды, с целью уточнения понятий температуры по мокрому термометру и температуры адиабатического насыщения [8].

Условия проведения процесса: ненасыщенный влажный воздух контактирует с определенным объемом воды, омывая ее свободную поверхность; слой воды достаточно тонок и можно пренебречь градиентом температур воды в слое $\delta t_w = 0°$; расход воздуха велик и состояние воздуха (t, d) не изменяется; отсутствует подвод или отвод теплоты извне (лучистым теплообменом можно пренебречь), $Q_{внеш} = 0$, рис.5.3, 5.10.

Если $t_w > t$ (процесс Н-К7, рис. 5.9), то, вследствие конвективного теплообмена и испарения ($Q_{явн} + Q_{скр}$), температура воды будет понижаться до равенства $t_w = t$ (Н-К6. $Q_{явн} = 0$), но, т.к. воздух ненасыщен $P_п < P_п"$ ($Q_{скр} > 0$), испарение будет продолжаться. При этом снижение t_w определяется разностью тепловых потоков $Q_{скр}$ - $Q_{явн}$ ($Q_{скр}$ – от воды к воздуху, $Q_{явн}$ – от воздуха к воде, $Q_{скр} > Q_{явн}$, рис. 5.9). По мере уменьшения t_w испарение воды будет замедляться при перераспределении величин тепловых потоков ($Q_{скр}\downarrow$, $Q_{явн}\uparrow$), за счет увеличивающейся разности температур ($t - t_w$), до установления равенства $Q_{явн} = Q_{скр}$ (Н-К4):

$$\alpha (t_w - t)\, dF = \beta (P_п"_{(w)} - P_п)\, dF, \qquad (5.17)$$

где t_w – температура воды при адиабатическом испарении или *температура мокрого термометра* $t_м$ (2.17).

Это состояние термодинамического равновесия определяет предел охлаждения воды. Дальнейшее понижение температуры воды в рассматриваемых условиях невозможно. Процессы тепломассообмена будут иметь место до полного испарения воды при неизменной температуре $t_м$.

Температура по мокрому термометру $t_м$ определяется параметрами воздуха (t, $P_п$), а также условиями тепло- и массообмена, от которых зависят значения коэффициентов обмена α и β.

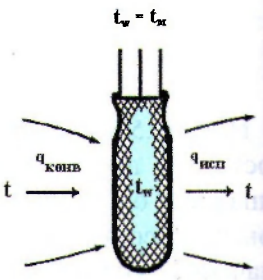


Рис.5.10. К описанию процессов тепло- массообмена в поле шарика мокрого термометра.

Изменим условия задачи: $Q_{внеш} = 0$; вода в количестве G_w [кг] и с температурой t_w приведена в контакт с ограниченным количеством воздуха $G_в$ [кг] с параметрами t и d (h); $P_п"_{(w)} > P_п$.

В этих условиях, в результате тепло- и массобмена между воздухом и водой, система воздух-вода придет к состоянию термодинамического равновесия ($t = t_w = t^*$), воздух станет насыщенным $\varphi = 1$. Исходя из постоянства энтальпии системы, можно записать:

$$G_w C_w t_w + G_в h = (G_w - \Delta G_w) C_w t^* + G_в h"_{(t^*)}, \qquad (5.18)$$

где $\Delta G_w = G_в(d"_{(t^*)} - d)$, $h"_{(t^*)}$ и $d"_{(t^*)}$ – энтальпия и влагосодержание насыщенного влажного воздуха при равновесной температуре t^*.

Равновесная температура t зависит от начальных состояний воздуха и воды и их количеств, однако не зависит от условий тепло- массообмена.*

Для осуществления адиабатного процесса контактирования воды и воздуха, в котором испарение воды в количестве, необходимом для насыщения воздуха при конечной температуре этого процесса $t^* = t_{ад}$, происходило бы только за счет теплоты $Q_{явн}$, подведенного от воздуха, необходимо равенство температур $t_w = t_{ад}$. Следовательно, для организации такого процесса следует внести в теплоизолированный сосуд ($Q_{внеш} = 0$) с влажным воздухом с параметрами t и d (h) воду с температурой $t_w = t_{ад}$ (рис.5.11).

Для этого случая, заменив в уравнении 5.18 t* и t_w на $t_{ад}$, а также обозначив энтальпию и влагосодержание насыщенного воздуха при $t_{ад}$ как h" и d", соответственно, получим:

$$t_{ад} = (h" - h)/ C_w (d" - d). \qquad (5.19)$$

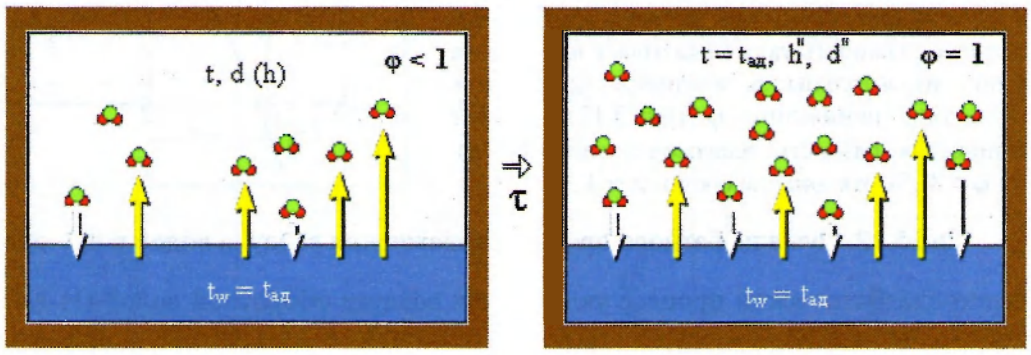


Рис.5.11. К описанию задачи адиабатического насыщения воздуха в случае $t_w = t_{ад}$ (τ – отрезок времени).

Таким образом:

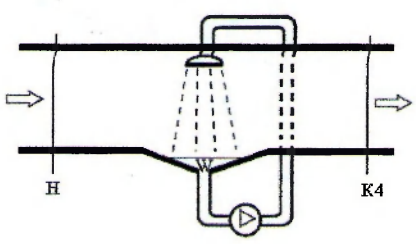
Температура адиабатического насыщения $t_{ад}$ (либо теоретический предел охлаждения) определяется только начальным состоянием воздуха.

Это обстоятельство позволяет нанести на d,h- диаграмму линии равных значений $t_{ад}$ (изолинии $t_{ад}$ = const), совпадающие с продолжением в область ненасыщенного воздуха изотерм области тумана – изотерм мокрого, содержащего капельную влагу, воздуха [8].

Необходимо отметить, что температура адиабатического насыщения и температура мокрого термометра различаются между собой по величине, однако, при определенных условиях, в частности при определении $t_м$ по психрометру Ассмана (§ 2.2.5, § 3.1), это различие незначительно [8]. В связи с этим, *в инженерной практике понятие $t_{ад}$ заменяется температурой мокрого термометра $t_м$ = const.*

Случай адиабатического насыщения ограниченного объема воздуха не представляет практического интереса, поскольку не используется при термовлажностной обработке воздуха в аппаратах СКВ. Он рассмотрен здесь исключительно ради доказательства правомочности проведения в поле d,h-диаграммы изотерм $t_м$ = const.

Практический интерес представляет *изобарно-адиабатический процесс увлажнения воздуха* (камеры орошения центральных кондиционеров) в оборотном водяном цикле, которые в d,h-диаграмме интерпретируются лучом процесса, совпадающем с линией $t_м$ = const рис.5.12).



Для определения тепловлажностной характеристики процесса используем уравнения баланса по теплоте

$Q = G_в \Delta h = \bar{w}\, h_w$. и по влаге $\bar{w} = G_в \Delta d$.

Величина ε, в соответствии с уравнением 4.10: $\varepsilon = Q/W = h_w = C_w t_w$. (5.20)

Учитывая, что в оборотном цикле вода приобретает температуру, равную температуре мокрого термометра $t_w = t_м = const$, линия данного процесса обработки воздуха в d,h-диаграмме (рис.5.12) будет определяться лучом, определяемым тепловлажностным отношением:

$$\varepsilon = C_w\, t_м. \qquad (5.20')$$

Совершенно очевидно, что уравнения 5.20' и 4.4* идентичны, а линия процесса адиабатического увлажнения воздуха совпадает с продолжением изотермы области тумана, т.е. с линией $t_м = const$ (рис.5.12).

При $t_м = 0$ °С значение $\varepsilon = 0$ кДж/кг и луч процесса совпадает с нулевой изоэнтальпой. С увеличением температуры эти линии несколько расходятся, однако разница существенна только при высоких значениях t. Относительная влажность также оказывает влияние на расхождение изоэнтальпы и изолинии $t_м$, которое усиливается при понижении φ (рис.5.12) за счет увеличивающейся разности влагосодержаний (d"-d). В области $\varphi < 30$ % отклонение составляет 1,5…2 %.

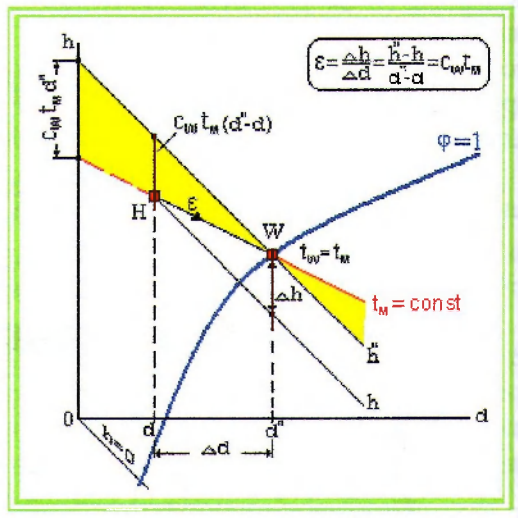


Рис.5.12. Луч адиабатного процесса увлажнения воздуха водой в d,h- диаграмме.

Изобарно-адиабатический процесс увлажнения воздуха оборотной водой (Н-К4, рис.5.9) в контактных аппаратах (STAW, CTAW, см. раздел 8) в диаграммах влажного воздуха общепринято обозначать линией h = const (изоэнтальпой). Для решения инженерных задач в обычных условиях функционирования СКВ это удобно и вполне допустимо. При более строгом подходе необходимо учитывать, что добавление некоторого количества воды к ненасыщенному влажному воздуху приводит к увеличению его влагосодержания и энтальпии.

В завершении знакомства с типичными процессами контактирования воды и воздуха, считаю полезным привести анализ этих процессов, выполненный проф. Р. Молье [235, 236]. Состояние воды с начальной температурой t_w (W – состояние насыщенного воздуха над поверхностью воды, рис.5.13) зафиксировано как полюс диаграммы (в отличие от полюса О по начальному состоянию воздуха, см. § 4.3). В зависимости от начальных параметров ненасыщенного воздуха рабочая область d,h- диаграммы разбита на секторы возможных процессов обработки воздуха и воды:



1 – охлаждение воздуха: $t > t_w$;
2 – нагревание воздуха: $t < t_w$;
3 – осушение: $d > d_w$;
4 – увлажнение: $d < d_w$;
5 – нагревание воды: $t_м > t_{м.w}$;
6 – охлаждение воды: $t_м < t_{м.w}$

Все процессы, идущие из зон, ограниченных касательной к кривой насыщения $\varphi = 1$ в т. W и самой линией $\varphi = 1$, независимо от сектора диаграммы, проходят через область тумана и характеризуются конечным насыщенным состоянием воздуха.

Рис.5.13. Зоны типичных процессов обработки воздуха водой в d,h- диаграмме по Р. Молье).

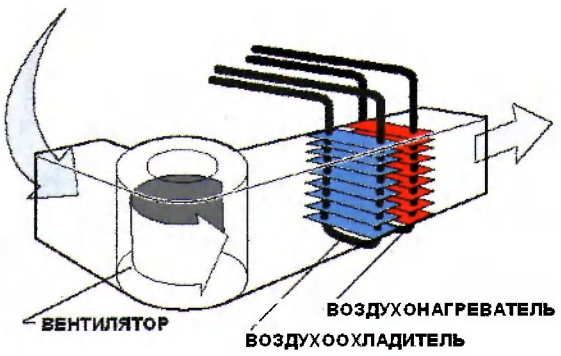
Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

Таблица 5.1. К анализу типичных процессов термовлажностной обработки воздуха водой.

№ Процесса	Характер изменения параметров			Направление потоков теплоты			Преобладающий поток	ε	Условия проведения процесса	
	t	d	h	$Q_{явн}$	$Q_{скр}$	Q_{Σ}			Величина t_w	Требования к обработке воды
1	↓	↓	↓	–	–	–	$Q_{явн}$	$-\infty < \varepsilon < \varepsilon_1$	$t_w < \tau$	Вода охлаждается в холодильной установке
2	↓	const	↓	–	0	–		$-\infty$	$t_w = \tau$	
3	↓	↑	↓	–	+	–		$-\infty < \varepsilon < 0$	$\tau < t_w < t_м$	
4	↓	↑	const	–	+	0	$Q_{явн} = Q_{скр}$	0	$t_w = t_м$	Оборотная вода не обрабатывается
5	↓	↑	↑	–	+	+	$Q_{скр}$	$0 < \varepsilon < \varepsilon_t$	$t_м < t_w < t_н$	Вода подогревается в бойлерной установке
6	const	↑	↑	0	+	+		ε_t	$t_w = t_н$	
7	↑	↑	↑	+	+	+		$\varepsilon_t < \varepsilon < \varepsilon_7$	$t_w > t_н$	

6. ОБРАБОТКА ВОЗДУХА В ПОВЕРХНОСТНЫХ АППАРАТАХ

В поверхностных теплообменных аппаратах – воздухонагревателях и воздухоохладителях (рис.6.1, 6.3), при наличии градиента температур, передача теплоты происходит за счет конвективного теплообмена между воздухом и сухой поверхностью. То есть осуществляются простые процессы нагревания или охлаждения воздуха при неизменном влагосодержании d = const (рис.6.2, линии AC, CA, BD). Энтальпия воздуха h увеличивается либо уменьшается, следуя за изменениями явной составляющей $C_в t$ при постоянной величине скрытой части r_o d = const.



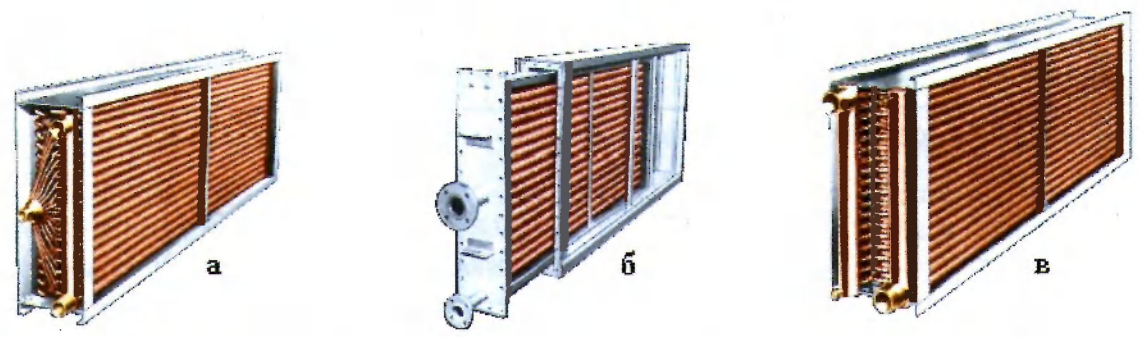


Рис.6.1. Аппараты поверхностного типа: а – воздухоохладитель с непосредственным кипением хладагента; б – паровой воздухонагреватель; в – аппарат для охлаждения или нагревания воздуха (вода, незамерзающие растворы, пар).

В случае нагревания (AC, рис.6.2) тепловлажностная характеристика процесса: ε = + Q/0 = + ∞. В случае охлаждения (CA, BD, рис.6.2): ε = – Q/0 = – ∞. Величина тепловой нагрузки поверхностного аппарата:

$$Q = G_в \Delta h_в = G_в C_в \Delta t. \qquad (6.1)$$

Простой процесс «чистого» сухого охлаждения возможен в диапазоне значений температуры поверхности воздухоохладителя t_f: $\tau < t_f < t$. При снижении температуры воздуха t до уровня температуры точки росы τ (t = τ) наступает насыщение воздуха водяными парами, φ = 1 (линия процесса BD, рис.6.2). Дальнейшее охлаждение, как известно, будет сопровождаться конденсацией влаги (процесс DF). Количество выпавшей влаги W определяется уравнением баланса (4.12). На рис.6.2 показано, в качестве примера, что в процессе DF из одного килограмма воздуха выпадает 2,23 грамма влаги.

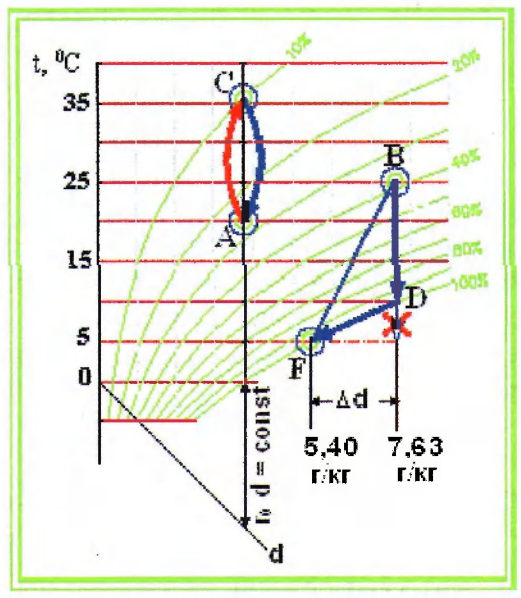


Рис.6.2. Процессы обработки воздуха в поверхностных аппаратах.

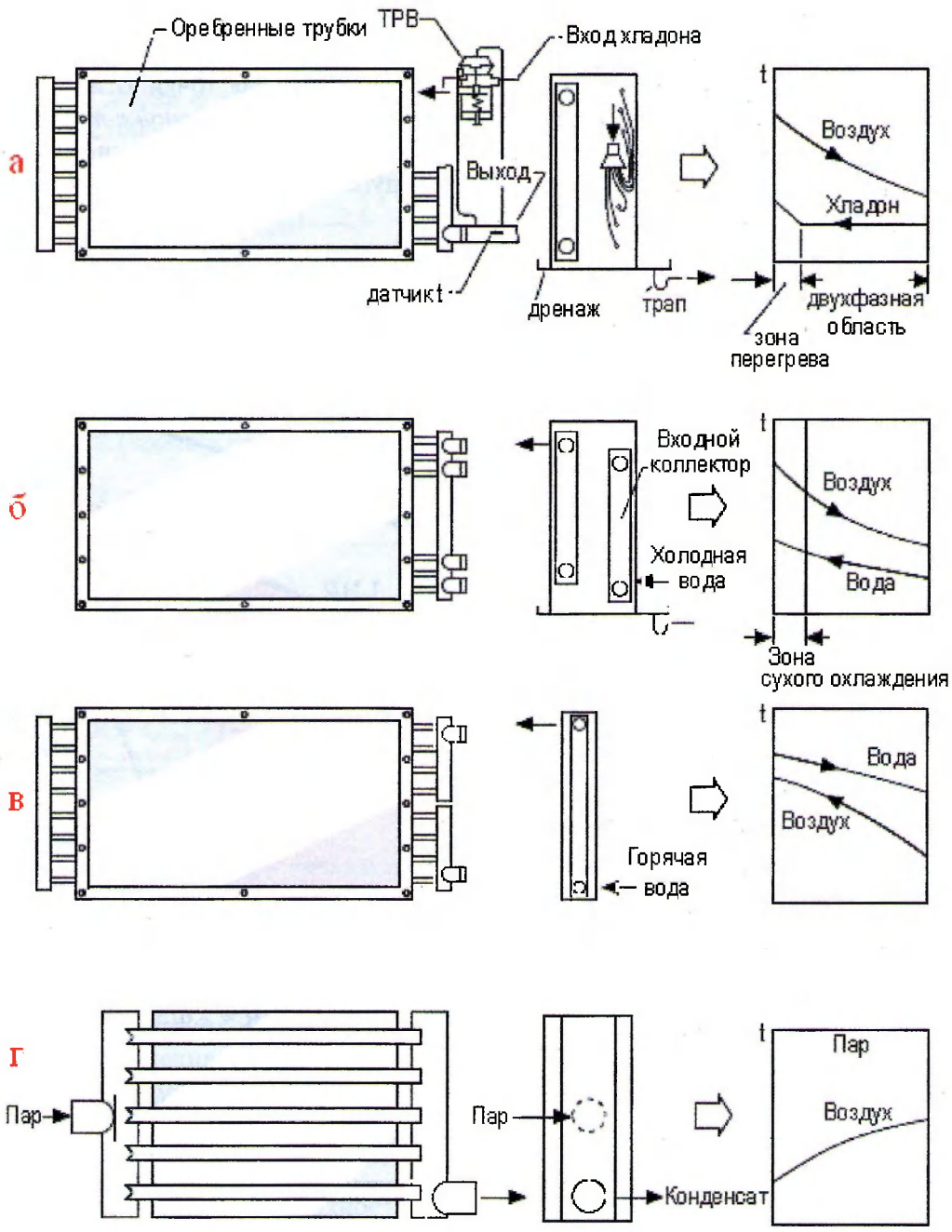


Рис.6.3. Схемы организации потоков контактирующих сред
и распределение температур в поверхностных теплообменниках [303]:

а – хладоновый воздухоохладитель
(непосредственного кипения);
б – водяной воздухоохладитель;
в – водяной воздухонагреватель;
г – паровой воздухонагреватель.

Сложный процесс B - D - F (рис.6.2) возможен только при равномерном охлаждении всей массы воздуха в условиях постепенного снижения температуры поверхности воздухоохладителя (ВО) по мере понижения температуры воздуха.

При внезапном контакте воздуха в состоянии точки B с поверхностью, имеющей температуру $t_f < \tau$, выпадение конденсата (при отрицательных температурах – инея) произойдет в самом начале процесса. В этом случае характеристика процесса $\varepsilon \neq \infty$, а линия процесса в d,h- диаграмме (рис.6.2) – прямая линия, связывающая точки B и F (на линии $\varphi = 1$) – *типичный процесс охлаждения и осушения воздуха холодной водой с температурой ниже температуры точки росы* – соответствует режиму работы контактного аппарата. Такой режим возможен в пределах III сектора между линией $d = const$ и касательной к кривой $\varphi = 1$ (рис.6.4).

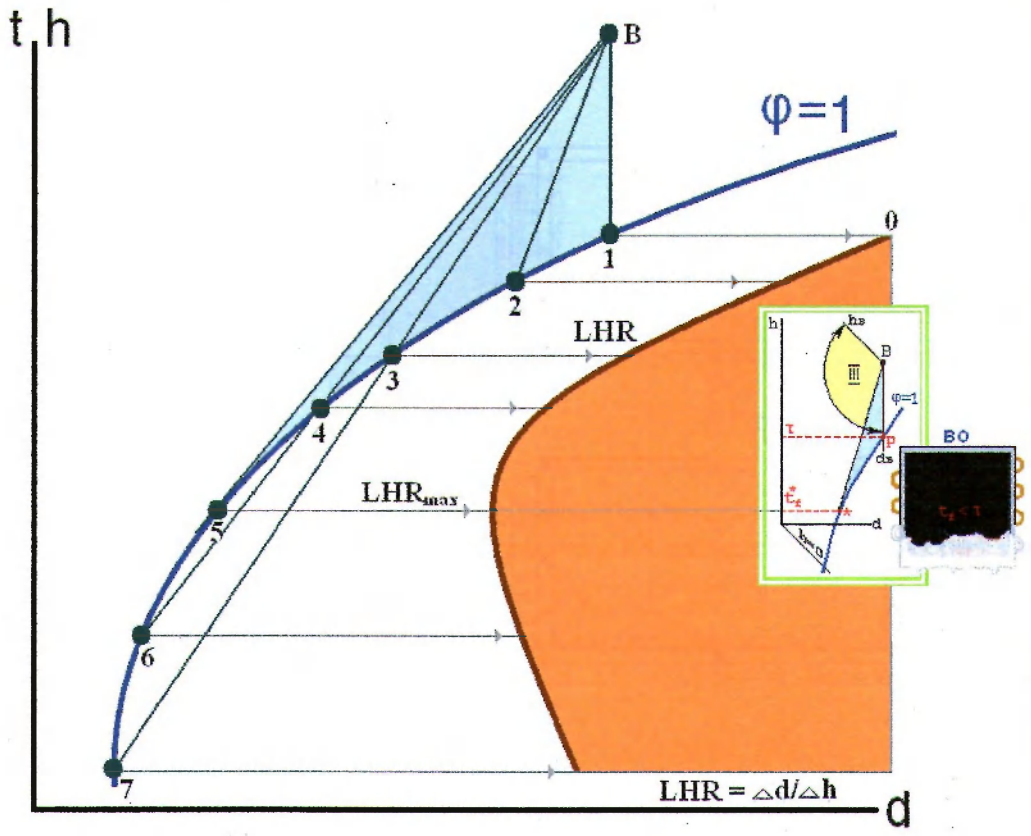


Рис.6.4. Область осушения воздуха в поверхностном аппарате и характер изменения величины LHR.

Наибольшая осушающая способность воздухоохладителя возникает в случае $t_f = t^*_f$ (процесс B-5, рис.6.4). При последующем понижении температуры поверхности $t_f < t^*_f$ тепловлажностная характеристика процесса ε будет увеличиваться, луч процесса в d,h-диаграмме будет смещаться к линии $d_в = const$, а осушающая способность аппарата, отнесенная к холодопроизводительности, – уменьшаться [95].

В отечественной инженерной практике при расчете поверхностных ВО в режиме охлаждения и осушения воздуха часто пользуются коэффициентом влаговыпадения ζ, представляющим отношение полного количества теплоты, отведенной от воздуха, к ее явной части:

$$\zeta = Q_\Sigma / Q_{явн} = \Delta h / (C_в \Delta t), \quad \zeta \geq 1, \qquad (6.2)$$

($\zeta = 1$ – в случае сухого охлаждения). Особенно удобен этот безразмерный коэффициент в работе с диаграммой- t,n, где он определяет наклон линии процесса.

Величина ζ связана с тепловлажностной характеристикой ε простым соотношением. Если разделить числитель и знаменатель правой части выражения 6.2 на Δd, то, с учетом того, что $\Delta h/\Delta d = \varepsilon$, получим: $\zeta = \varepsilon /(C_в\, \Delta t/\Delta d)$. С другой стороны, $\varepsilon = (C_в\, \Delta t + r_o\, \Delta d)/\Delta d = C_в\, \Delta t/\Delta d + r_o$. Следовательно:

$$\zeta = \varepsilon /(\varepsilon - r_o). \qquad (6.2')$$

Из уравнения 6.3 видно, что чем больше отклонение луча процесса (в пределе касательной к линии φ – 1) от линии d = const (ε = ∞, ζ = 1), т.е. чем ближе величина ε к величине r_o = 2500 кДж/кг, тем больше коэффициент влаговыпадения ζ.

Характерные значения ζ для ВО, работающих в составе СКВ: 1,1…1,6 – системы комфортного назначения; 1,1…2,0 – технологическое кондиционирование [95]. Если решается задача осушения наружного воздуха, то в условиях теплого и влажного тропического климата ε процесса, идущего по касательной к φ = 1: ε_φ = 3800…3300 кДж/кг и ζ = 3…4. В климатических условиях умеренных широт, в т.ч. Украины, добиться высоких значений ζ невозможно.

В американской практике применяют величину обратную ζ:

SHR (sensible heat ratio) – *отношение явной теплоты к общей* [205]:

$$SHR = Q_{явн} /Q_\Sigma, \qquad (6.3)$$

$$SHR = 1/\zeta = 1 - r_o/\varepsilon. \qquad (6.3')$$

Величина SHR ≤ 1, и это, в отличие от ζ, дает возможность четко оценивать степень осушения в привычных долях единицы.

Кроме SHR, также пользуются:

$LHR = Q_{скр} /Q_\Sigma$ – *отношением скрытой теплоты к общей* (6.4)

(latent heat ratio, часто упоминается как DF – Dehunidification Fraction),

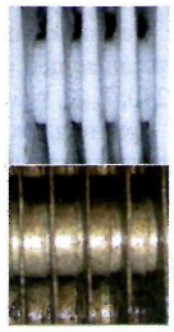
$$LHR = 1 - SHR, \qquad (6.4')$$

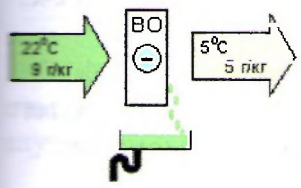
и $LSR = Q_{скр} /Q_{явн}$ – *отношением скрытой теплоты к явной* (6.5)

(latent to sensible ratio), $LSR = (1 - SHR)/ SHR$. (6.5')

Величина LHR позволяет оценить осушающую способность воздухоохладителя при изменении его холодопроизводительности. На рис.6.4 зависимость LHR (t_f) имеет максимум в точке касания луча процесса к кривой насыщения. Как уже отмечалось, луч процессов охлаждения и осушения воздуха с температурой рабочей поверхности $t_f < t^*_f$ (на рис.6.4: 1-6, 1-7) в d,h- диаграмме смещается вправо, и выпадение влаги начинается при более высокой температуре, например, в процессе 1-7 – в точке 3. Для завершения процесса 1-3-7 в т. 3 можно уменьшить рабочую поверхность аппарата, т.е. понизить его типоразмер.

Осушение воздуха в поверхностных воздухоохладителях (§ 6.2), так называемый конденсационный, термический или механический способ*, следует применять при положительных температурах поверхности t_f во избежание обрастания инеем. При соблюдении этого требования (обычно $t_f \geq$ 2 °С) осушение в поверхностном аппарате возможно до значений влагосодержания порядка 5 г/кг*.

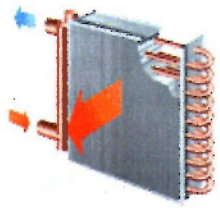




Для ряда производственных и специальных объектов используют автономные конденсационные осушительные установки - механические осушители (§ 6.2) [24, 25].

*более глубокое осушение воздуха обеспечивается сорбционными методами (см. главу 7)

6.1. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АППАРАТОВ



Аппараты, как правило, изготавливаются на основе оребренных труб со стороны воздушного потока, определяющей термическое сопротивление процесса теплопередачи. Теплопередача описывается каноническим уравнением:

$$Q = k\,F\,\Delta t_{ср}, \qquad (6.6)$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/м^2·К; F – поверхность теплообмена, м^2; $\Delta t_{ср}$, К (°С) – средняя разность температур между воздухом и рабочим агентом (тепло- хладоносителем) внутри трубы.

Средняя разность температур для всего аппарата в результате интегрирования по всей поверхности обычно рассчитывается как среднелогарифмическая разность температур (LMTD – logarithmic mean temperature difference): $\Delta t_{ср.лог} = (\theta_б - \theta_м)/\ln(\theta_б/\theta_м)$, где $\theta_б$ и $\theta_м$ – бóльшая и меньшая разности температур сред на входе и выходе аппарата.

В качестве расчетной поверхности F используется наружная поверхность ребер и труб в межреберном пространстве $F_н = F_р + F_{тр}$ (рис.6.6) или поверхность со стороны тепло-хладоносителя, т.е. внутренняя поверхность труб $F_{вн}$.

Коэффициент теплопередачи k аппарата, определяется в соответствии с уравнением аддитивности термических сопротивлений:

$$k = 1/R_{\Sigma} = 1/(R_{вн} + R_{пер} + R_н). \qquad (6.7)$$

Если принять $F = F_{вн}$, то:

$$R_{\Sigma} = F_{вн}\,\Delta t_{ср}/Q; \quad R_{вн} = 1/\alpha_{вн}; \quad R_н = 1/(\zeta\,\alpha_н E_н \beta); \quad R_{пер} = \sum \delta_i/\lambda_i\,(F_{вн}/F_{ст}),$$

где R_{Σ} – общее термическое сопротивление, $R_{вн}$, $R_н$ – термические сопротивления теплоотдачи с внутренней и наружной стороны трубы, соответственно; $R_{пер}$ – термическое сопротивление *перехода*, включающее сопротивления собственно трубы (стенки), места контакта ребра с трубой, отложений внутри и на наружной поверхности трубы (загрязнения); $\alpha_{вн}$, $\alpha_н$ – коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной стороны трубы, Вт/м^2·К; $E_н = 1-(F_р/F_н)(1-E_р)$ – эффективность наружной оребренной поверхности; $E_р$ – эффективность ребра; $F_{вн}$, $F_н$, $F_{ст}$, $F_р$ – площади внутренней, наружной поверхности, стенок труб и ребер, соответственно, м^2; $\beta = F_н/F_{вн}$ – коэффициент оребрения; δ_i – толщина i-слоя (толщина стенки трубы $\delta_{тр}$, отложений и контактного слоя.), разделяющего две теплообменивающие среды, м; λ_i – коэффициент теплопроводности i - слоя (в частности, $\lambda_{тр}$ – коэффициент теплопроводности материала трубы), Вт/(м·К). Величина $\alpha_н$ в случае сухого охлаждения (ζ=1) определяется уравнением конвективного теплообмена (6.8), при осушении воздуха выпадение влаги учитывается произведением $\zeta\alpha_н$ [96].

Оценивая составляющие величины R_{Σ}, необходимо отметить, что:

- термическое сопротивление тонкостенных металлических труб, за исключением труб из нержавеющей стали, $R_{тр} = \delta_{тр}/\lambda_{тр}$ пренебрежимо мало. Для сведения, λ [Вт/(м·К)]: $\lambda_{меди} = 400$, $\lambda_{алюминия} = 240$, $\lambda_{стали} = 50$, $\lambda_{нерж.\ стали} = 15$, $\lambda_{воды} = 0{,}6$, $\lambda_{воздуха} = 0{,}025$;
- при надлежащем сервисном обслуживании теплообменников (очистки наружной поверхности) загрязнения несущественны, величина термического сопротивления внутренних отложений: $0{,}176\cdot10^{-3}$ м^2·К/Вт – для воды и хладагентов; $0{,}352\cdot10^{-3}$ м^2·К/Вт – для этиленгликоля;
- минимизация контактного термического сопротивления решается на этапе изготовления за счет применения современных технологий (рассмотрены ниже).

Основной вклад в общее сопротивление системы вносит $R_н$, которое в условиях воздушной среды существенно выше величин термических сопротивлений, характерных для тепло- хладоносителей (вода, незамерзающие жидкости, пар) и хладагентов (аммиак, фторуглеводороды, диоксид углерода), применяемых в теплообменниках (рис.6.5).

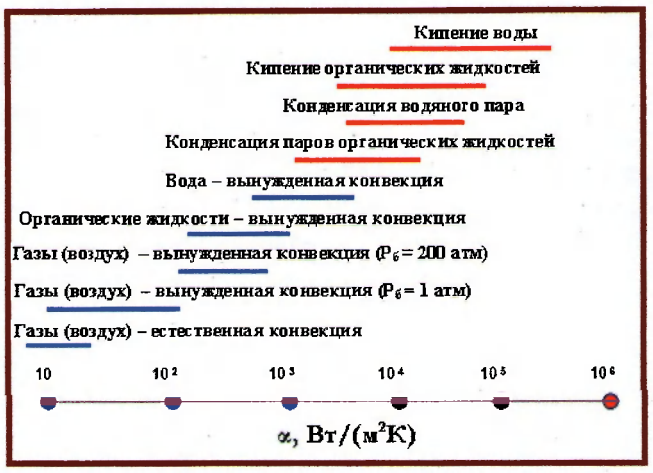


Рис.6.5. Примерные значения коэффициента теплоотдачи α в зависимости от среды и условий протекания процесса.

В соответствии с уравнением Ньютона, описывающем процесс конвективного теплообмена (теплоотдачи), тепловой поток Q, передаваемый от воздуха к агенту ($t_в > t_a$):

$$Q = \alpha_{вн} F_{вн} \theta_{вн} = \alpha_н F_н \theta_н, \qquad (6.8)$$

где $\theta_{вн} = t_{тр.вн} - t_в$, $\theta_н = t_в - t_{тр.н}$, (рис.6.6).

Поскольку $\alpha_н \ll \alpha_{вн}$, а для гладкой (неоребренной) трубы $F_н \approx F_{вн}$ ($F_н/F_{вн} = d_н/d_{вн}$), то градиент температур $\theta_н$ с наружной (воздушной) стороны значительно больше градиента температур $\theta_{вн}$ с внутренней стороны трубы (рис.6.6а): $\theta_н \gg \theta_{вн}$. Таким образом: $R_н \gg R_{вн}$ ($R_н = \theta_н/Q$, $R_{вн} = \theta_{вн}/Q$).

В подтверждение справедливости последнего неравенства и для оценки величин R_Σ (k), $R_н$, $R_{вн}$ имеет смысл привести численный *пример расчета теплопередачи от воздуха к воде через стенку гладкой незагрязненной трубы*. Принимаем: материал трубы – сталь, $\delta_{тр} = 2$ мм, $\lambda_{стали} = 50$ Вт/(м·К), $\alpha_н = 50$ Вт/(м²·К), $\alpha_{вн} = 5000$ Вт/(м²·К), $\zeta = 1$. В соответствии с уравнением 6.6: ($\beta = 1$, $E_р = 1$): $R_\Sigma = 1/5000 + 2\cdot10^{-3}/50 + 1/50 = 0{,}0002 + 0{,}00004 + 0{,}02 = 0{,}02024$ (м²·К/Вт).

Незначительность термического сопротивления стенки трубы очевидна, она составляет в данном случае 0,2% R_Σ. Величина $R_{вн}$ – 1% R_Σ. Снижение $R_{вн}$, а тем более $R_{тр}$, в малой степени влияет на R_Σ. Если применить медную трубу с $\delta_{тр} = 1$ мм (т.е. уменьшить $R_{тр}$ в 16 раз) и увеличить $\alpha_{вн}$ (за счет изменения режима течения жидкости) до 10000 Вт/(м²·К), что соответствует уменьшению $R_{вн}$ в 2 раза, – то изменение величины R_Σ составит всего лишь 1.07 %, а величина $R_н = 0{,}999\ R_\Sigma$.

Величину $R_н$ ($\theta_н$) можно уменьшить: развитием наружной поверхности трубы $F_н$ за счет ее оребрения (рис.6.6б), а также интенсификацией процесса теплоотдачи – увеличением $\alpha_н$.

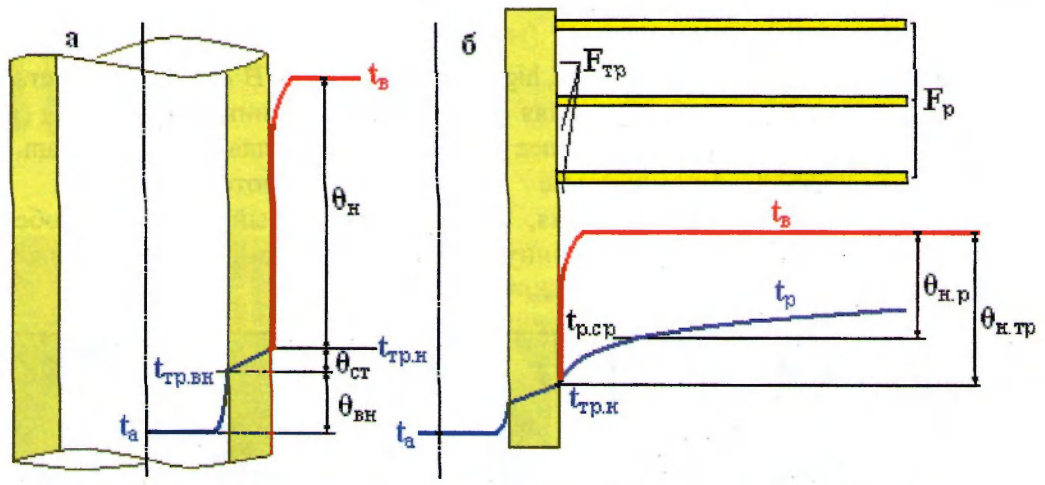


Рис.6.6. Распределение температур в окрестности стенки гладкой (а) и оребренной трубы (б) воздухоохладителя.

Эффективность ребра $E_р$ определяется как отношение теплового потока, действительно отведенного ребром $q_р$, к тепловому потоку $q_{р.max}$, который ребро отвело бы в идеальном случае при $\lambda_р = \infty$ с однородной температурой, равной температуре в основании [42, 47]:

$$E_р = q_р/q_{р.max} = \theta_{н.р}/\theta_{н.тр} = (t_в - t_{р.ср})/(t_в - t_{тр.н}) < 1, \quad (6.9)$$

где $t_{р.ср}$ – средняя температура ребра, $t_{тр.н}$ – температура наружной поверхности трубы, $t_в$ – температура воздуха, $0_{н.р} = t_в - t_{р.ср}$, $\theta_{н.тр} = t_в - t_{тр.н}$, (см. рис.6.6). Эффективность ребра $E_р$ и всей оребренной поверхности $E_н$ всегда меньше эффективности теплопередающей поверхности трубы, однако за счет существенного развития поверхности $E_н \beta \gg 1$. Таким образом, оребрением можно уменьшить величину $R_н = 1/(\zeta \alpha_н E_н \beta)$ и, в определенной степени, выравнить величины слагаемых общего термического сопротивления системы $R_у$. Выпадение влаги ($\zeta > 1$) также способствует снижению Rн.

В проведенном анализе в качестве расчетной поверхности была выбрана $F_{вн}$ для того, чтобы показать в явном виде влияние оребрения (β) на величину $R_н$. Как правило, в расчетной практике аппаратов обработки воздуха, используют $F_н$ и соответствующее значение коэффициента теплопередачи k', при этом $k' F_н = k F_{вн}$ ($k = \beta k'$).

Для плоских ребер постоянной толщины существует аналитическое решение для $E_р$:

$$E_р = th (mh_y)/(mh_y), \quad (6.10)$$

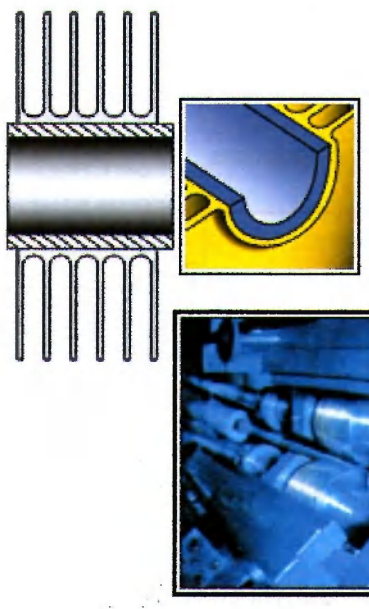
где комплекс $m = (2 \alpha_н /(\lambda_р \delta_р))^{0,5}$, $м^{-1}$, h_y – условная высота, зависящая от формы и размеров ребра, м; $\lambda_р$ и $\delta_р$ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К), и, соответственно, толщина ребра, м. Значения h_y для различных ребер можно найти в специальной литературе [95].

Степень развития поверхности определяется в ходе решении оптимизационной задачи с учетом экономических показателей [88]. В современных аппаратах СКВ: коэффициент оребрения $\beta = 6…25$. Высокие значения β нивелируют разницу между $F_р$ и $F_н$, при этом $E_р \approx E_п$.

6.1.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РЕБЕР И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Оребрение труб осуществляется литьем под давлением, накаткой, методом экструзии, насадным либо навивным образом с использованием пайки, сварки и без них и др. При выборе способа учитывают параметры рабочего режима (температуру и давление), массогабаритные, энергетические, стоимостные и другие ограничения.

Ниже представлены варианты оребрения труб, применяемых в аппаратах СКВ.



EH (extruded high fin, compound). В основе – биметаллическая труба. Внешняя оболочка из алюминия, внутренняя (камера) из другого, более прочного металла (медь, сталь и пр.). Алюминиевые ребра формируются методом экструзии (выдавливания, рис.6.7). Данный способ обеспечивает антикоррозионную защиту камеры. Максимальная рабочая температура $t_{max} = 290…300$ °С.

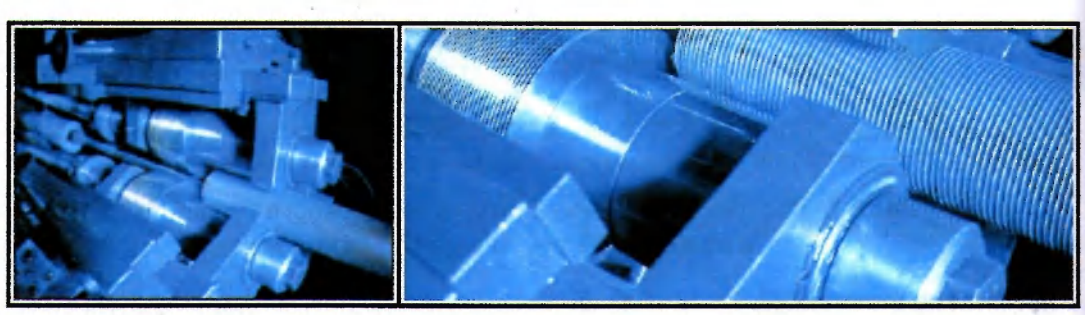
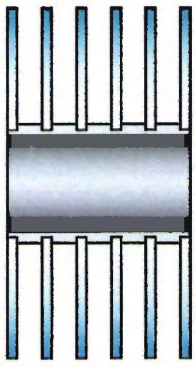


Рис.6.7. Технологический процесс оребрения EH на оборудовании Extruded Finning Machine компании Spiro-Gills Products Limited (England).

G (embedded fin, keyfin): ребро внедряется в углубление трубы и надежно закрепляется в нем за счет заполнения базовым материалом трубы (сталь: углеродистая, хроммолибденовая, нержавеющая; медь, медные сплавы: медноникелиевые CuNi 90/10 и др.). Температура t_{max} = 450 °С.

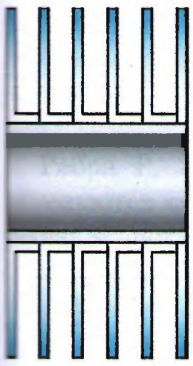




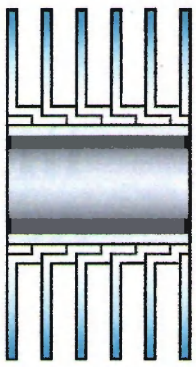
Насадные (навивные) ребра – Applied Fins

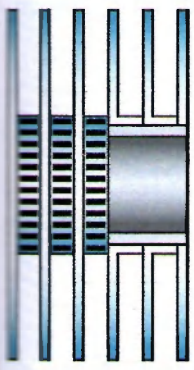


L (wrap-on): ребро имеет отворот, за счет чего увеличивается площадь контакта ребра с поверхностью трубы и легко фиксируется шаг ребер. Материал трубы: без ограничений. Температура t_{max} = 150 °С.



LL (overlap L fin): ребра L с отворотами, с помощью которых, при последовательной специальной установке ребер (отворот на отворот) полностью перекрывается наружная поверхность трубы. Этот вариант оребрения является альтернативой более дорогому варианту EH. Температура t_{max} = 170…180 °С.

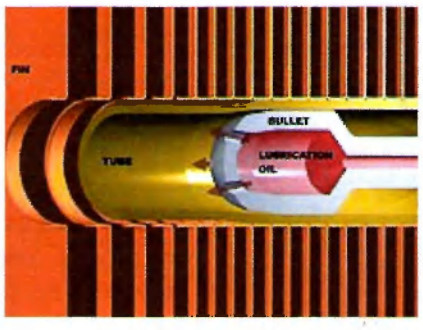




Качество контакта ребер L (LL) с медной трубой достигается управляемой деформацией трубы – расширением изнутри (раздачей): механическим, протяжкой шарика диаметром большим $d_{вн}$ трубы на 0,5 мм, либо гидравлическим способом – подачей масла под давлением 15…20 МПа (рис.6.8) [95]. Для стальных труб применяется горячее цинкование. Материал ребер: алюминий, медь.

KL: ребро L, однако контакт организуется посредством операции “knurling” – внешним обжатием (по оси трубы). Температура t_{max} = 260 °С.

а



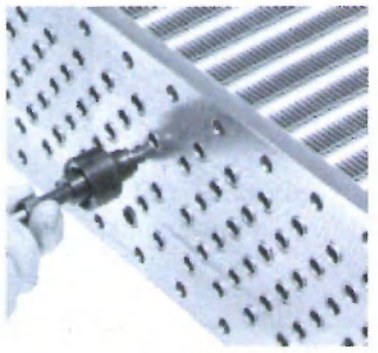
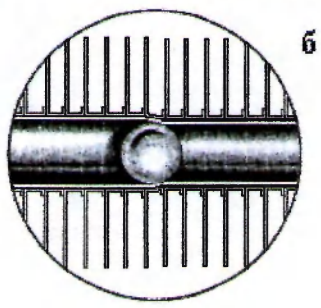
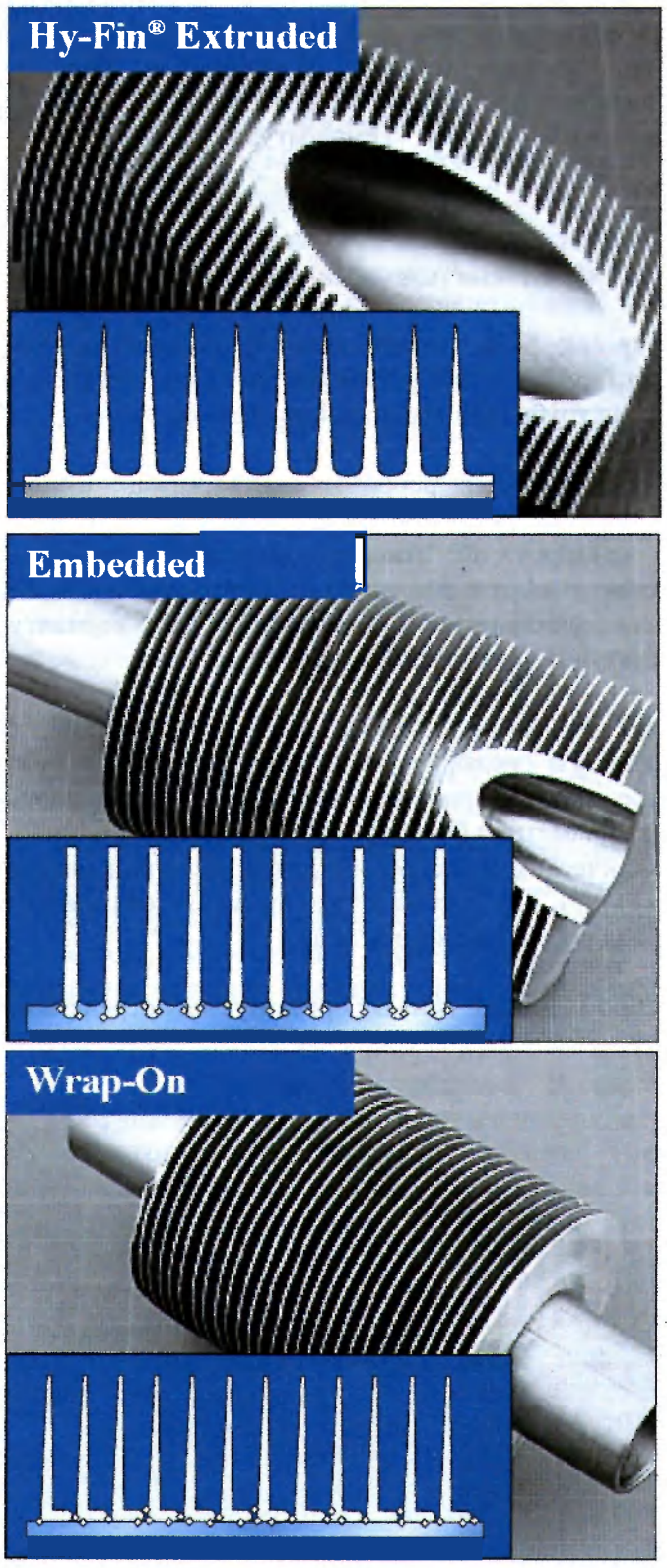


Рис.6.8. Схемы гидравлического (а) и механического (б) способов расширения трубы при ее оребрении насадными ребрами.

б



На вкладке, с. 142, показаны три основных типа оребрения одиночных труб: extruded high fin, embedded fin и wrap-on.



иллюстрации Hudson Products Corporation (USA) [171]

Сварочный способ соединения с трубой WELDED FIN TUBE характерен для радиальных навивных ребер P, S, SC (рис.6.9, 6.10) и продольных ребер Longitudinal Fin (рис.6.11).

Сварка HF производится при частоте электрического тока 450000 Гц по линии контакта ребра с трубой (рис.6.9), где происходит локальный нагрев и пластическая деформация металла, что обеспечивает прочный однородный шов.

Материал ребра: углеродистая сталь, алюминий, медь. Материал трубы определяется технологией сварки. Температура t_{max} = 250 °C.



Рис.6.9. Фотография сварки ребер (Spiro-Gills Products L.)

Ребра P, S и SC – так называемые спиральные ребра, – образуются спиральной навивкой на трубу. Полугофрированное ребро SC после установки на трубу сворачивают у его основания.

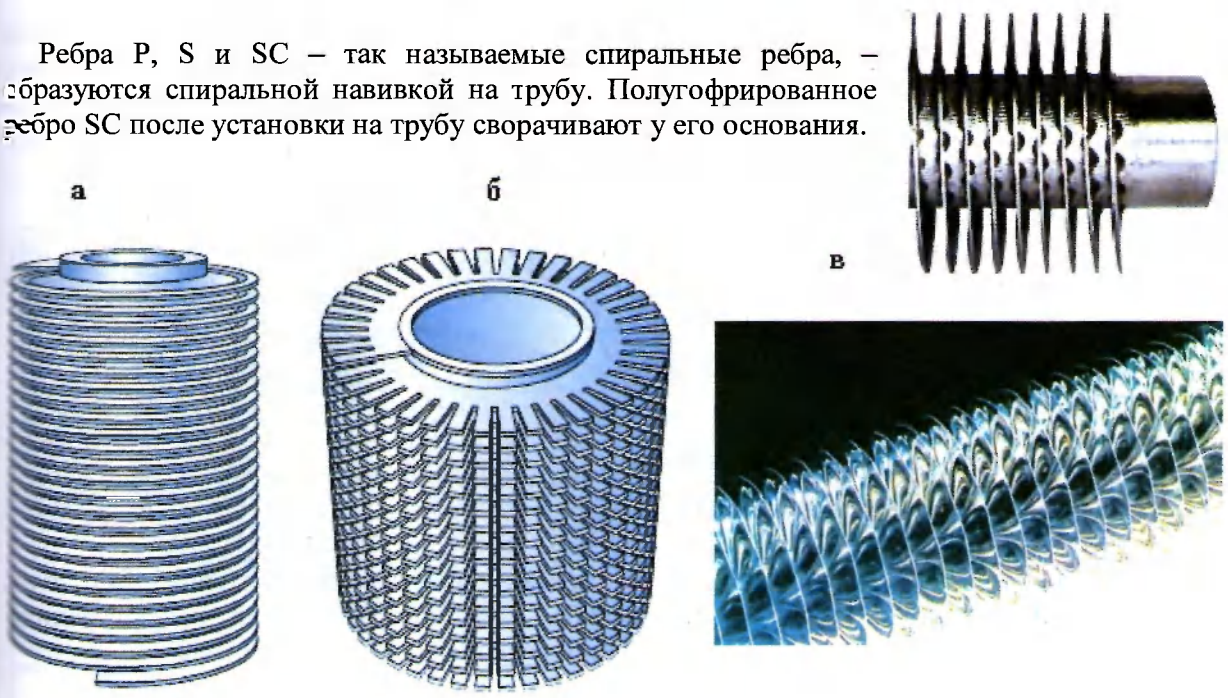


Рис.6.10. Спиральные ребра группы WELDED FIN TUBE: а – P (plain fin) – плоское; б – S (serrated fin) – зубчатое; в – SC (semi crimped fin) – полугофрированное.

Продольные ребра перед сваркой вставляются в специально подготовленные канавки, – образуют U-образные каналы на поверхности трубы.

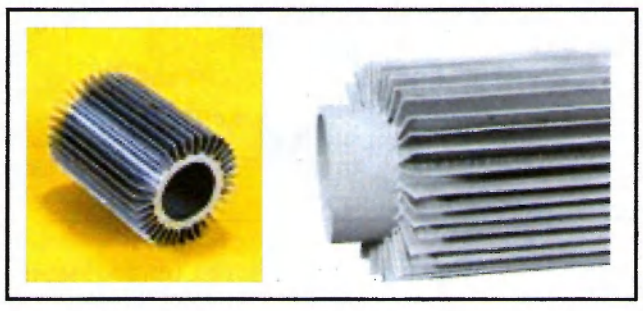


Рис.6.11. Продольные ребра группы WELDED FIN TUBE – Longitudinal Fin.



Для изготовления теплообменников используют, как правило, круглые бесшовные трубы. Наружный диаметр труб жидкостных теплообменников D: 7 мм, 8 мм (1/4"), 9,5 мм (3/8"), 12,7 мм (1/2"), 15,9 мм (5/8") – стандарт. Толщина стенки труб $\delta_{тр}$: 0,64 мм …5,08 мм (0,025"…0,2"), в случае медных труб - до 1,65 мм (0.065"). Для паровых теплообменников характерно большее значение D: 25,4 мм (1") – стандарт, 28,6 мм (1-1/8"), 38,1 мм (1-1/2"), что объясняется необходимостью дренажа конденсата, образующегося в процессе теплообмена. Минимальная толщина $\delta_{тр}$: 5 мм (0,20") – D =5/8", 9 мм (0,35") – D =1". Ряд производителей предлагает расширенный типоразмерный ряд труб с D до 101,6 мм (4") и более.

В стандартных вариантах используются алюминиевые ребра толщиной $\delta_р$: 0,2 мм (0,008") для жидкостных теплообменников и 0,25 мм (0,010") для паровых воздухонагревателей. Значение $\delta_р$ для медных ребер, как правило, 0,15, 0,2 и 0,25 мм ($\delta_{р\,мин}$ = 0,08 мм). В расширении ряда, ребра L, LL, KL, G изготавливаются толщиной до 0,76 мм (0.031"), а ребра SC до 1 мм (0.040"). Высота ребер от 6.35 мм (1/4") до 25.4 мм (1").

Насадные ребра устанавливаются отдельно на каждую трубу (отдельные ребра, рис.6.9… 6.12а) либо на весь пучок трубок (пластинчатые ребра, рис.6.12б, 6.13). Отдельные насадные ребра могут быть прямоугольными, квадратными, шестиугольными, круглыми либо овальными.

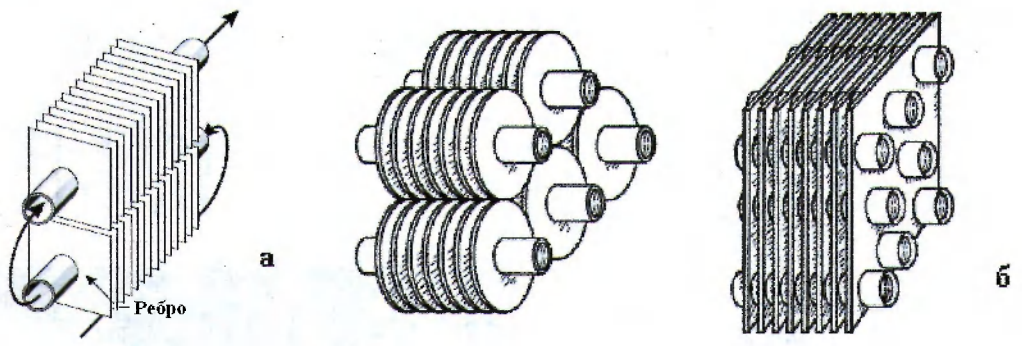


Рис.6.12. Элементы теплообменников с отдельно-оребренными трубами (а) и пластинчатым оребрением (б).

Пластинчатые ребра, как правило, – прямоугольной формы: сплошные или перфорированные (с просечками), плоские либо имеют определенную конфигурацию поверхности, образующуюся при их изготовлении на специальных штампах (рис.6.13).

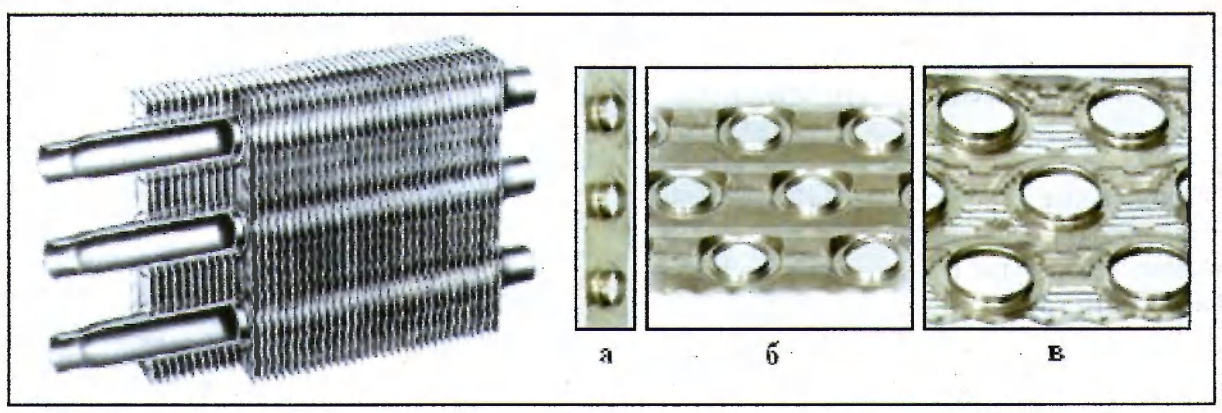


Рис.6.13. Устройство теплообменника с пластинчатым оребрением и типы ребер: а – плоские; б – волнообразные; в – с просечками.

Использование гофрированных пластинчатых ребер позволяет: увеличить теплообменную поверхность, а также интенсифицировать процесс теплоотдачи с наружной стороны трубы за счет срыва пограничного слоя и турбулизации воздушного потока. При этом, поскольку турбулизация потока приводит к росту аэродинамического сопротивления аппарата, гофрированные ребра для теплообменников отличаются, как формой поверхности, так и своей геометрией (высотой и шагом гофр). Так, например, пластины Hi-F(High Efficiency) и E-F (Energy Efficient) – разработка McQuay (рис.6.14), со специальным рифлением в торцевой части, отклоняющим входящий воздушный поток, создают необходимую начальную турбулентность. Последующие волны гофрированной поверхности пластин поддерживают необходимый режим течения и устраняют мертвые (застойные) зоны "dead spots" в тыльной части трубы. Пластины E-F имеют больший шаг гофров, т.е. более гладкие, чем Hi-F, с меньшим на 33% аэродинамическим сопротивлением – рекомендуются для вентиляторных установок с меньшим напором. Аналогично этому подходу, пластины Trane (рис.6.14) классифицируются, как: high performance – Sigma-Flo®, economical – Delta-Flo™, energy-efficient – Prima-Flo® fins, – соответственно с определенным понижением эффективности и величины аэродинамического сопротивления [294].

В водяных теплообменниках Trane, работающих в режиме "Low-flow" [294] с малыми расходами воды, для увеличения коэффициента теплоотдачи с внутренней стороны трубы также применяются различного рода турбулизаторы, например проволочные спирали (рис.6.14).



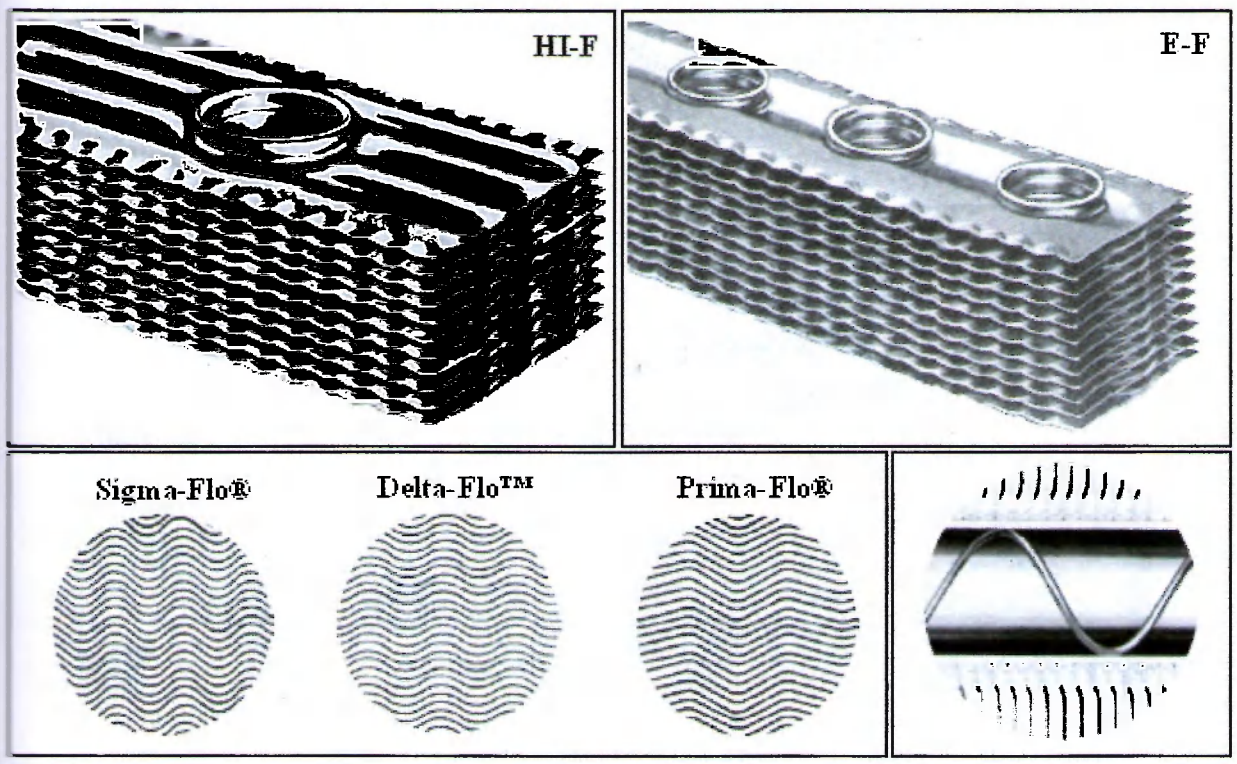


Рис.6.14. Гофрированные пластинчатые ребра Hl-F, E-F (McQuay) и Sigma-Flo, Delta-Flo, Prima-Flo (Trane), а также проволочный турбулизатор жидкостного потока от компании Trane (в правом нижнем углу).

Образцы перфорированных ребер (louvered fin) представлены на рис.6.15…6.17.

Просечные участки поверхности способствуют разрушению пограничного слоя, что приводит к интенсификации теплоотдачи, т.е. снижению термического сопротивления со стороны воздушного потока, без существенного роста аэродинамического сопротивления аппарата (рис.6.18…6.20). В связи с этим перфорированные поверхности являются одними из наиболее перспективных элементов в конструктивном оформлении современных поверхностных аппаратов.

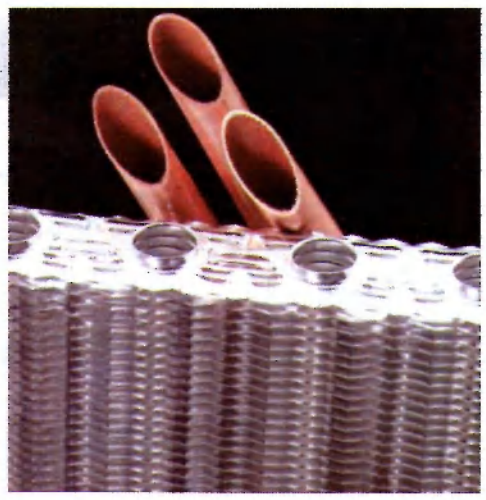
а



б



в



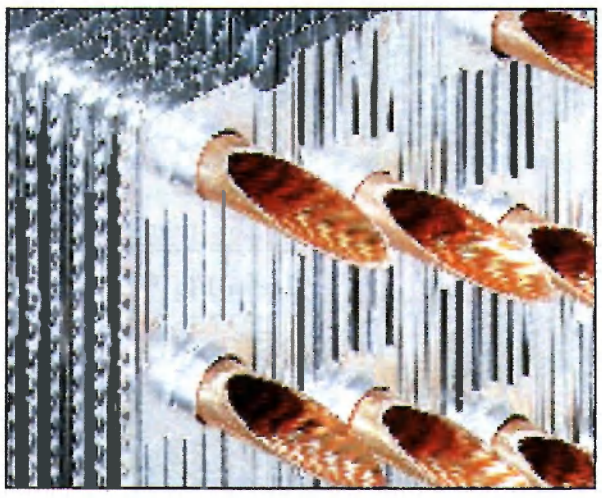


Рис.6.15. Различные перфорированные элементы:
одиночные (а – NREL Tabbed Circular Fin, б – McElroy Enhanced Fins)
и пластинчатые ребра – в.

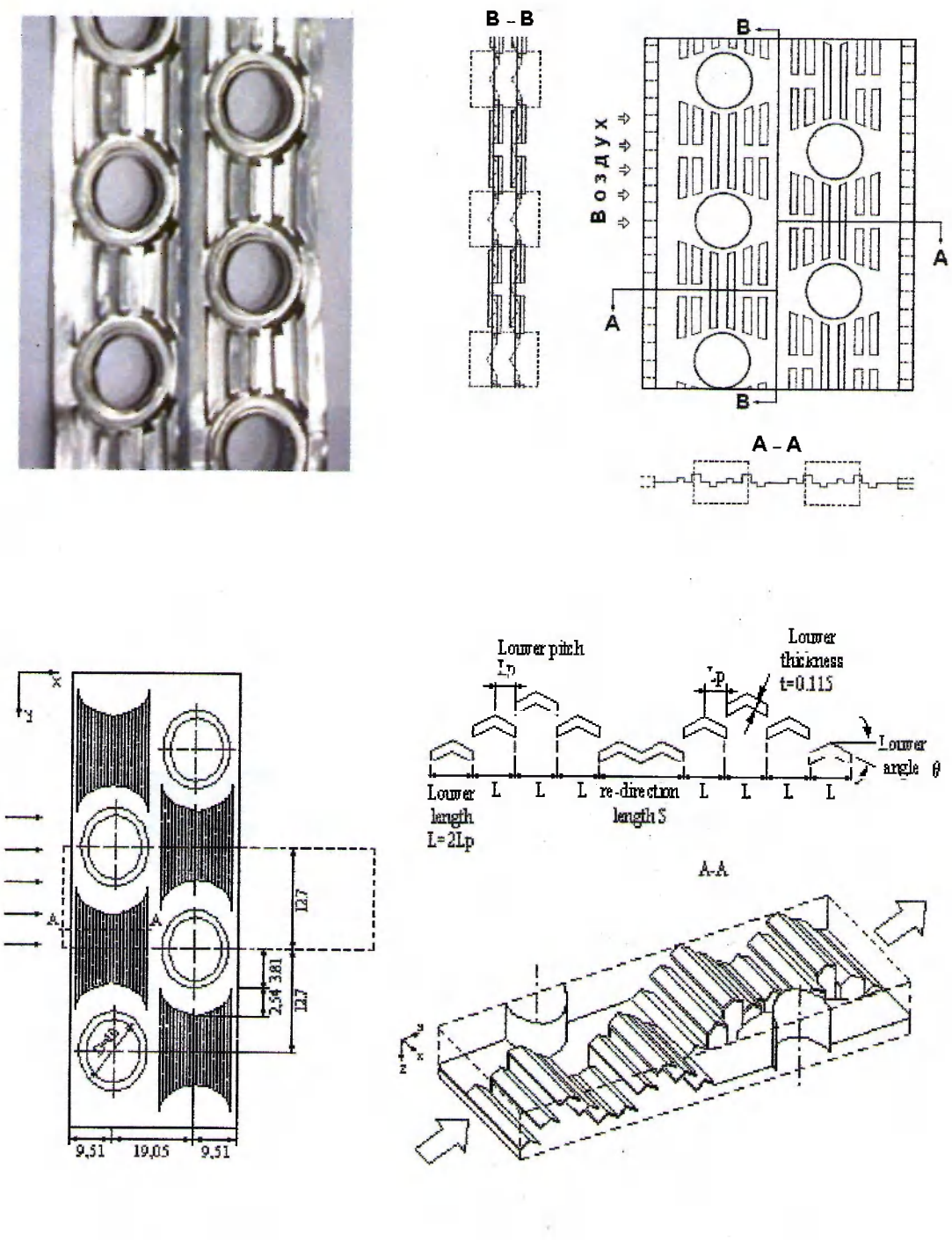
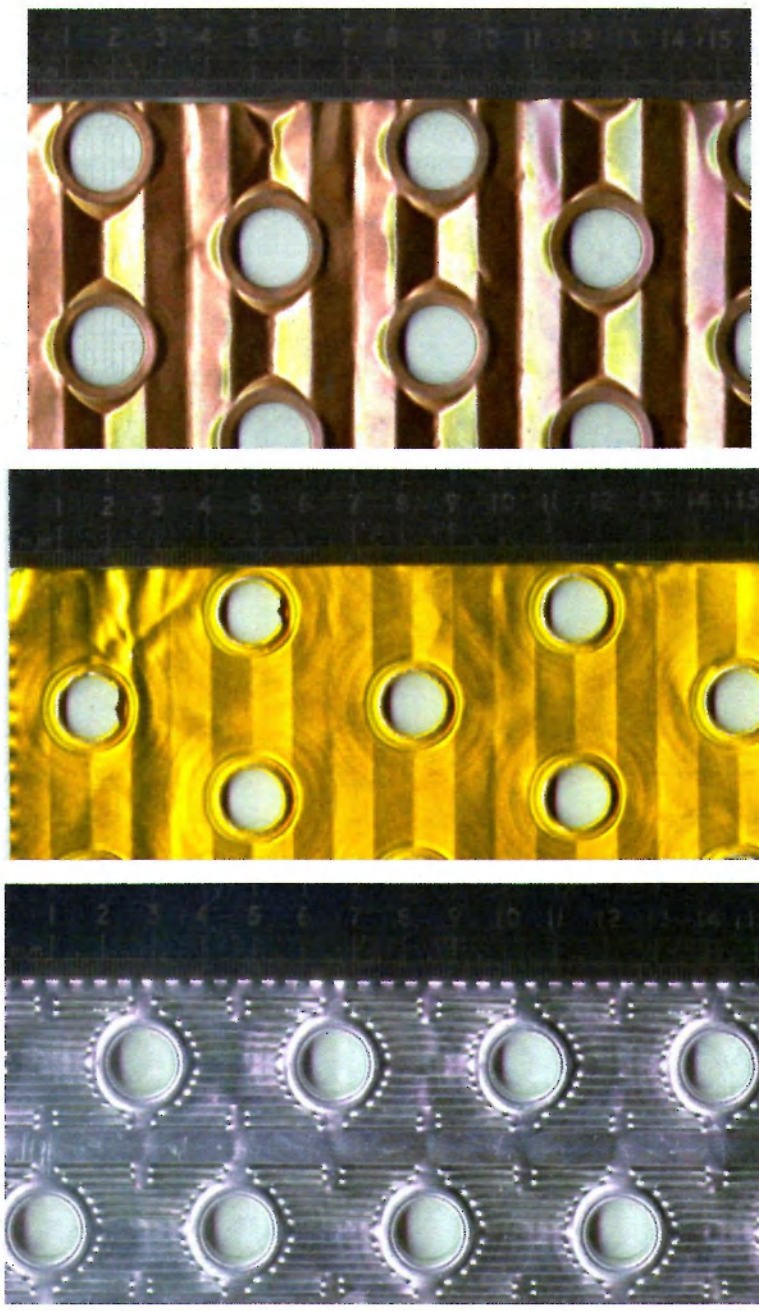


Рис.6.16. Эскизы (и фотография) перфорированных пластинчатых ребер.

Просечной элемент характеризуется толщиной t, длиной L, углом наклона θ и шагом L_p.



а

б

в

Рис.6.17. Образцы пластинчатых ребер теплообменников компании SPC (S & P Coil Products Limited, UK):
а – медная рифленая (rippled) пластина;
б – алюминиевая рифленая пластина, покрытая винилом;
в – алюминиевая просечная (louvered) пластина.

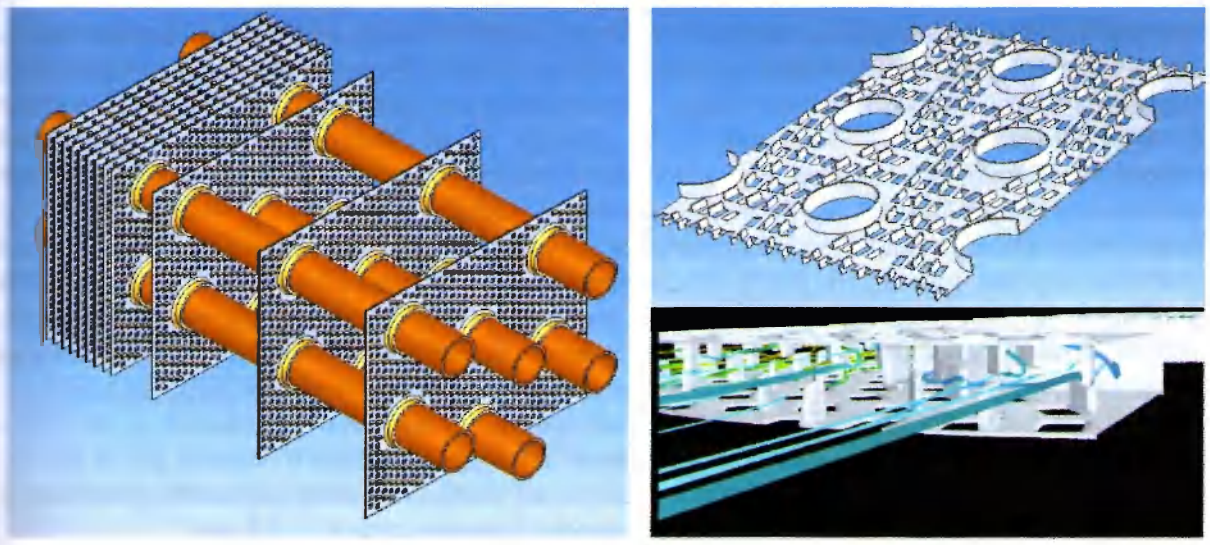


Рис.6.18. Картина течения воздушного потока в каналах межреберного пространства перфорированной пластинчато-ребристой поверхности (NREL Tabbed Plate Fin).

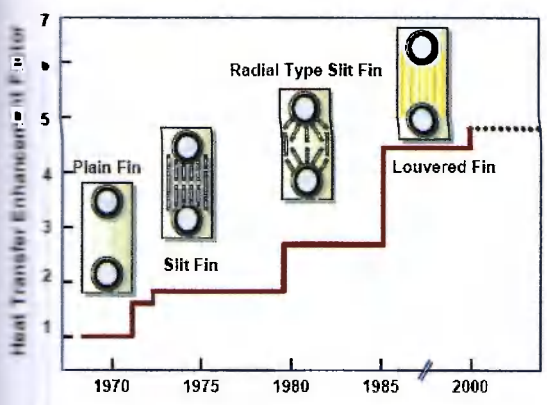


Рис.6.19. Хронология совершенствования оребрения труб теплообменников [268].

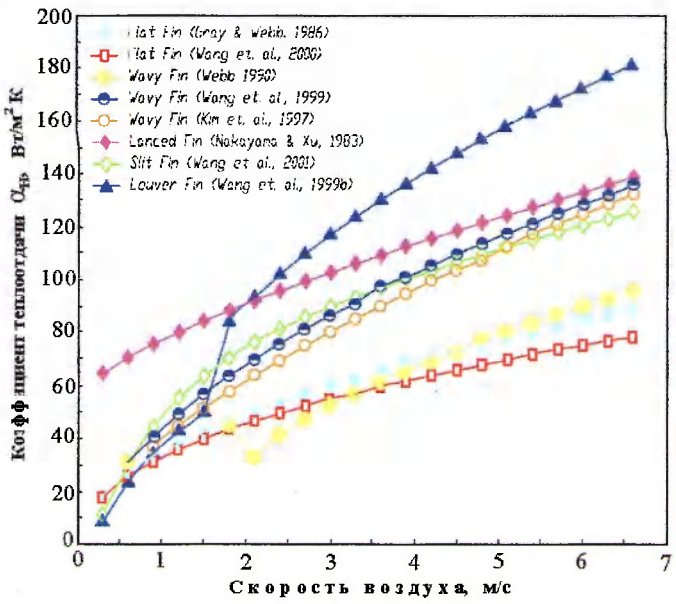


Рис.6.20. Сопоставление значений коэффициентов теплоотдачи со стороны воздушного потока $\alpha_н$ от его скорости для различных поверхностей [143].

Площадь наружной поверхности $F_н$ оребренных труб и, соответственно, степень развития поверхности в единице объема $a = F_н/V$, характеризующая компактность теплообменника, зависят от линейной плотности ребер (пластин) на единицу длины трубы n_L и геометрии (формы) поверхности. Диапазон типичных значений n_L = 250…800 ед/м (6…20 ед. на дюйм). При размещении плоского ребра с n_L = 800 ед/м достигается значение а =1440 м^2/м^3. За счет профилирования ребер величину можно развить поверхность до а = 3300 м^2/м^3.

Величина $R_н$ за счет оребрения и интенсификации теплообмена может быть уменьшена до 50...80% $R_Σ$ [189, 194, 221].

6.1.2. КОМПОНОВКА ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Теплообменники выпускаются одно- и многорядными по ходу воздушного потока (число рядов (rows) $n_r = 1…12$) с различным количеством труб в ряду. Воздухонагреватели чаще всего выпускаются одно- и двухрядными. Число рядов у воздухоохладителей, как правило, четное: 4, 6, 8 и 10 (иногда 12). Значения n_r – кратные двум, обусловлены конструктивным расположением входного и выходного коллекторов хладоносителя с одной стороны ВО. Существуют теплообменники и с нечетным числом $n_r = 3,5,7...$

Трубы в смежных рядах могут располагаться по одной оси (коридорное расположение) и в шахматном порядке (рис.6.21б, 6.22). Последний вариант позволяет увеличить поверхность теплообмена за счет размещения большего количества труб, при одинаковых габаритах аппаратов, а также улучшить теплоотдачу в условиях извилистого обтекания труб в смежных рядах (однако, при этом несколько возрастает величина аэродинамического сопротивления).

Габаритные размеры теплообменников характеризуются высотой H, длиной L (H x L – фронтальная поверхность) и шириной W (глубиной, по ходу воздушного потока), рис.6.21.

Шаг ребер t = 1,3…6,4 мм определяется требуемым значением коэффициента оребрения β, при этом по условиям очистки наружной поверхности рекомендуется $t \geq 2,0$ мм.

Трубы в пучке дистанцируются друг от друга на расстоянии (с шагом) X_a – по ходу воздуха (горизонтальный шаг или расстояние между рядами) и X_b – по фронту (вертикальный шаг или расстояние между трубами в ряду). Как правило, при коридорном расположении труб: $X_a = X_b$ – размещение по углам квадрата, рис.6.22а.

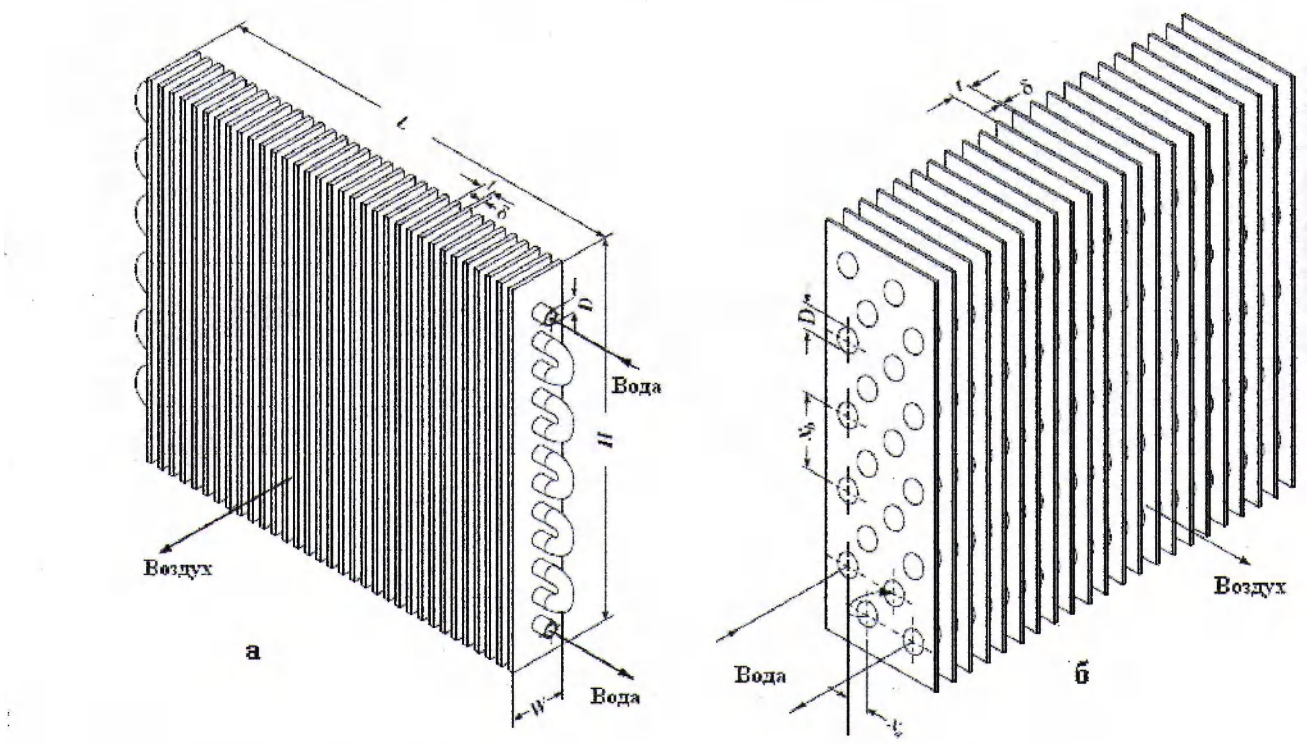


Рис.6.21. Однорядный воздухонагреватель с 12 трубами (а)
и матрица (оребренный пучок труб) 4-х рядного воздухоохладителя с 5 трубами в ряду (б).

Оценить влияние способа размещения труб на конвективный теплообмен можно с помощью эмпирической корреляционной зависимости:

$$Nu = c\,Re^n, \qquad (6.11)$$

где Nu, Re – критерии Нуссельта и Рейнольдса, соответственно, c – коэффициент, зависящий от геометрии ребристой поверхности теплообменника, n – показатель степени, определяемый режимом течения с учетом условий обтекания трубного пучка.

Из табл.6.2 видно, что при переходе от ламинарного к развитому турбулентному режиму течения ($Re > 2 \cdot 10^5$) шахматное расположение труб предпочтительнее.

Понятие «шахматное расположение труб» объединяет целую группу вариантов размещения труб в трубном пучке теплообменника, отличающихся организацией потока воздуха. В основном применяются схемы размещения труб по углам повернутого квадрата (рис.6.22б), при этом $X_a = 0{,}5\ X_b$, по углам равностороннего треугольника с потоком, направленным вдоль высоты ($X_a = 0{,}866\ X_b$, схема "Delta", рис.6.22в) или основания (рис.6.22г) треугольника ($X_a = 0{,}577\ X_b$). Известны также варианты с размещением труб по углам треугольника с углом при вершине 45° или по углам ромбов [42]. В большинстве случаев используют схему "Delta".

Таблица 6.2. Значения n (5.5) [280].

Размещение труб	Re	n
коридорное	$\leq 4 \cdot 10^4$	0,72
шахматное	$1 \cdot 10^3 \ldots 2 \cdot 10^4$	0,65
	$2 \cdot 10^4 \ldots 2 \cdot 10^5$	0,80
	$\geq 2 \cdot 10^5$	0,95

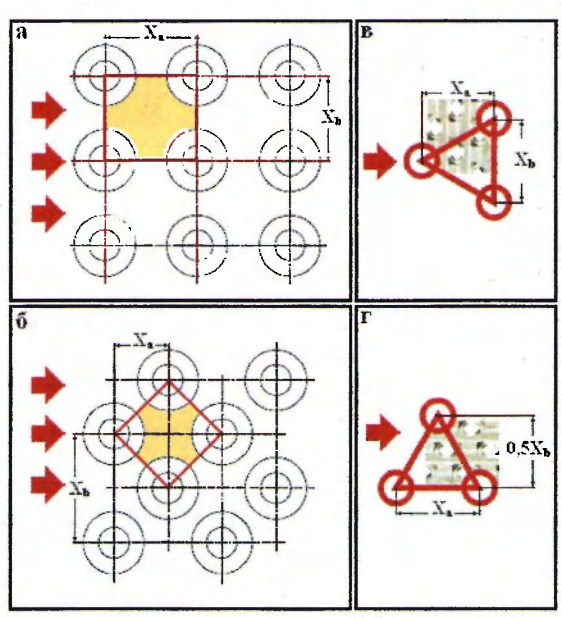


Рис.6.22. Расположение труб: коридорное – по углам квадрата (а) и шахматное (б, в, г): по углам повернутого квадрата (б); по углам равностороннего треугольника с потоком, параллельным его высоте (в) или основанию (г).

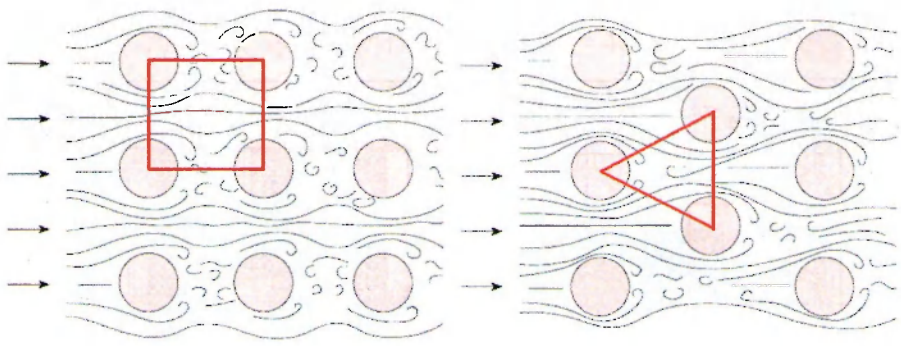


Рис.6.23. Схема обтекания трубных пучков воздушным потоком.

Величина шага X_b принимается в соответствии с требуемыми значениями коэффициентов оребрения β и эффективности ребра η_p. Для обеспечения сухого охлаждения следует принимать $\beta = 20 \ldots 25$ и $\eta_p = 0{,}5 \ldots 0{,}6$, для аппаратов, работающих в режиме осушения рекомендуются $\beta = 10 \ldots 12$ и $\eta_p > 0{,}85$ [95]. Стандартный ряд значений X_b современных поверхностных аппаратов содержит пять шагов труб: 25, 30, 42, 50 и 60 мм. На рис. 6.24, 6.27 показана компоновка трубного пучка теплообменников компании THERMOKEY. Для теплообменников с пластинчатооребренными трубами связь коэффициента оребрения с геометрическими параметрами трубного пучка определяется уравнением [95]:

$$\beta = [2\ (X_a\ X_b - 0{,}785\ D^2)/t + \pi\ D\ (1 - \delta_p/t)]/(\pi\ d_{вн}). \qquad (6.12)$$

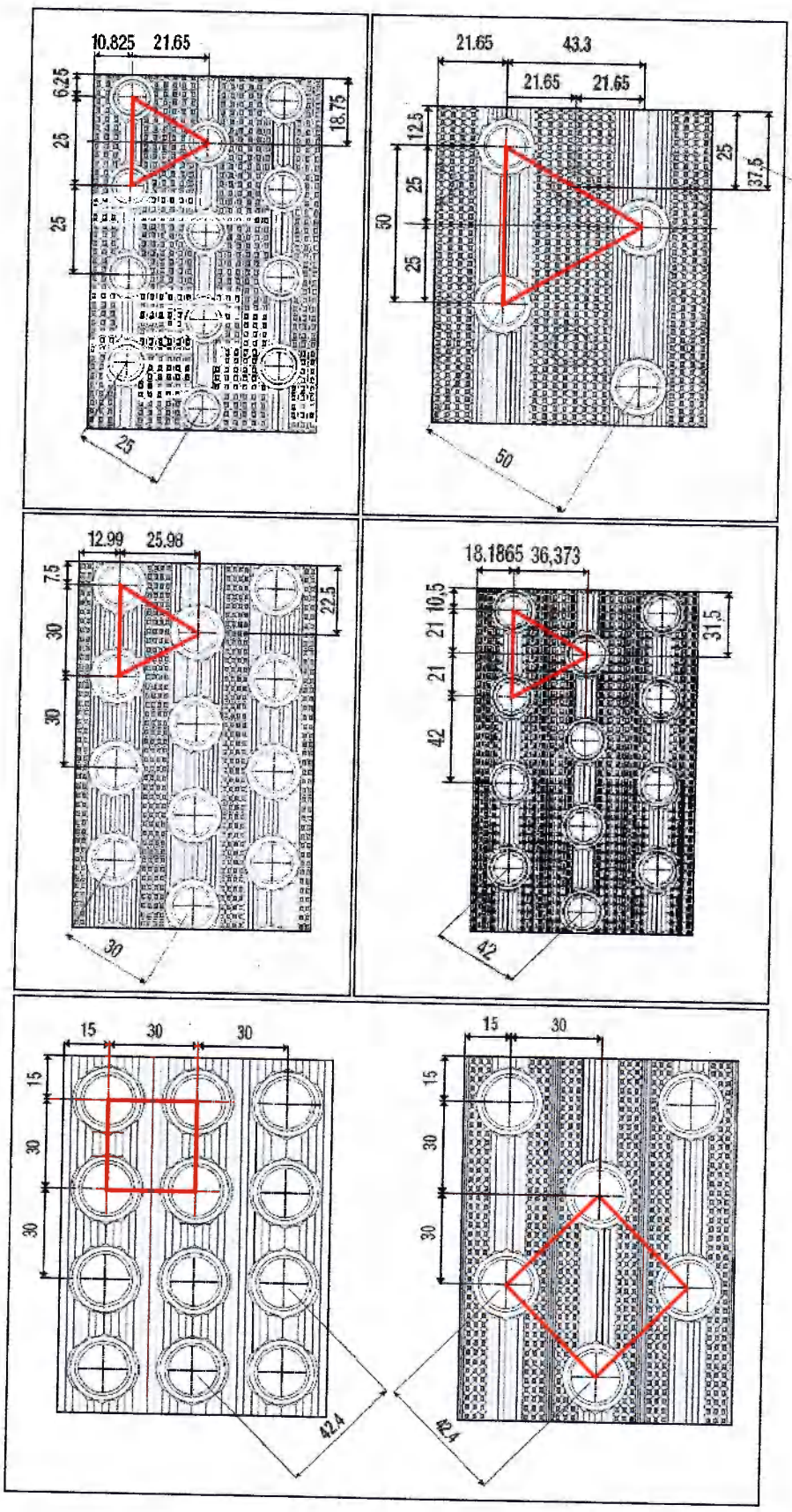


Рис. 6.24. Элементы теплообменников с круглой трубой компании THERMOKEY (Italy).

Альтернативным вариантом круглых труб являются эллиптические (овальные) трубы, применение которых обусловлено улучшенными теплотехническими и аэродинамическими характеристики аппаратов (рис.6.25…6.27).

В аппаратах компании “Evapco” (рис.6.26) это достигается за счет взаимного расположения труб по схеме “Delta”, а также разворота боковых поверхностей труб. Данное инженерное решение обеспечивает наиболее полное обтекание труб без застойных зон, характерных для случая с круглыми трубами (рис.6.23). Кроме этого, используются известные решения (описаны выше, – пластины McQuay) по применению гофрированных пластинчатых ребер с турбулизацией воздушного потока в межреберном пространстве трубного пучка (рис.6.26б) и торцевому рифлению, обеспечивающему срыв пограничного слоя на входе в аппарат (рис.6.26в).

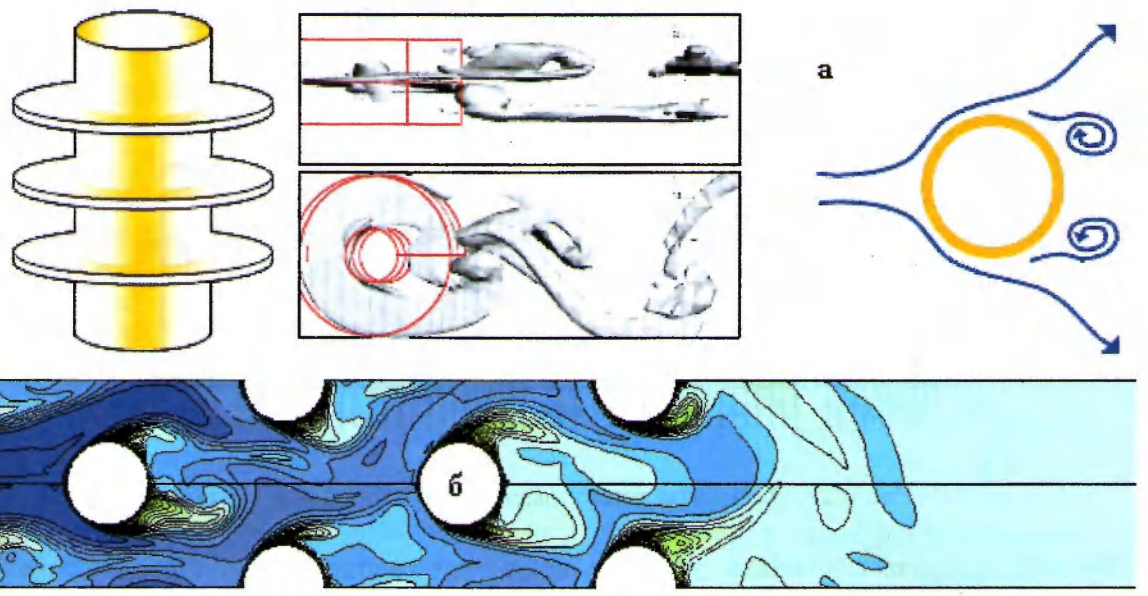


Рис.6.25. Аэродинамическая картина и схема обтекания одиночной круглой трубы (Re = 300) – а, пучка круглых труб (Re = 4000) – б.

Визуализация обтекания труб выполнена в Thermo-Fluid Dynamics Lab., Pusan National University, prof. Man Yeong Ha.

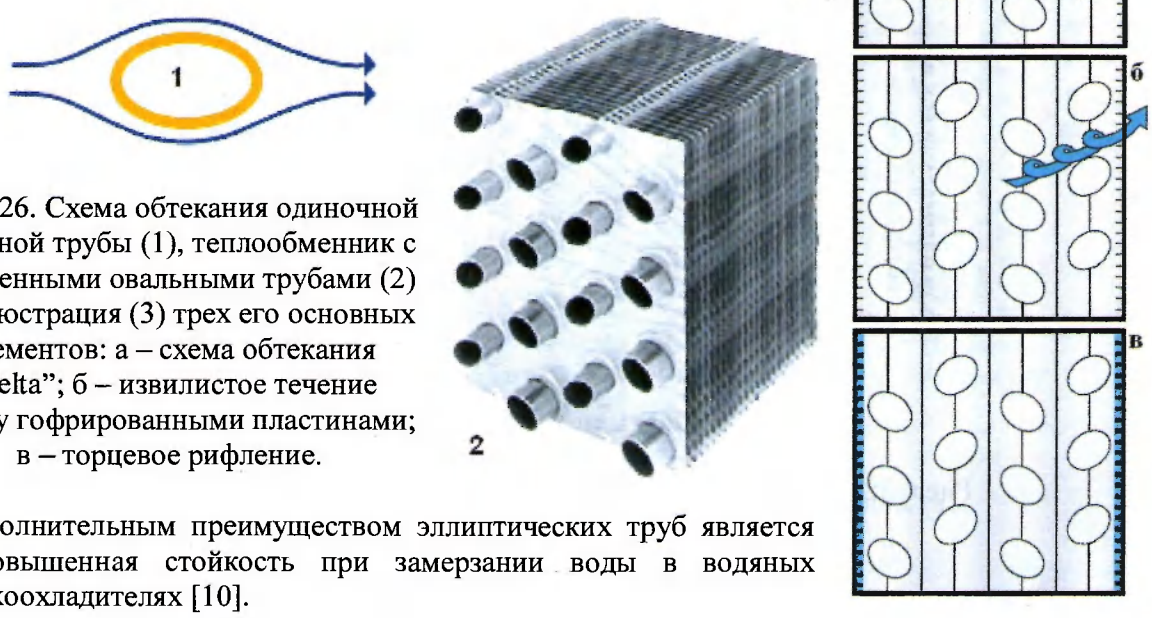


Рис.6.26. Схема обтекания одиночной овальной трубы (1), теплообменник с оребренными овальными трубами (2) и иллюстрация (3) трех его основных элементов: а – схема обтекания “Delta”; б – извилистое течение между гофрированными пластинами; в – торцевое рифление.

Дополнительным преимуществом эллиптических труб является их повышенная стойкость при замерзании воды в водяных воздухоохладителях [10].

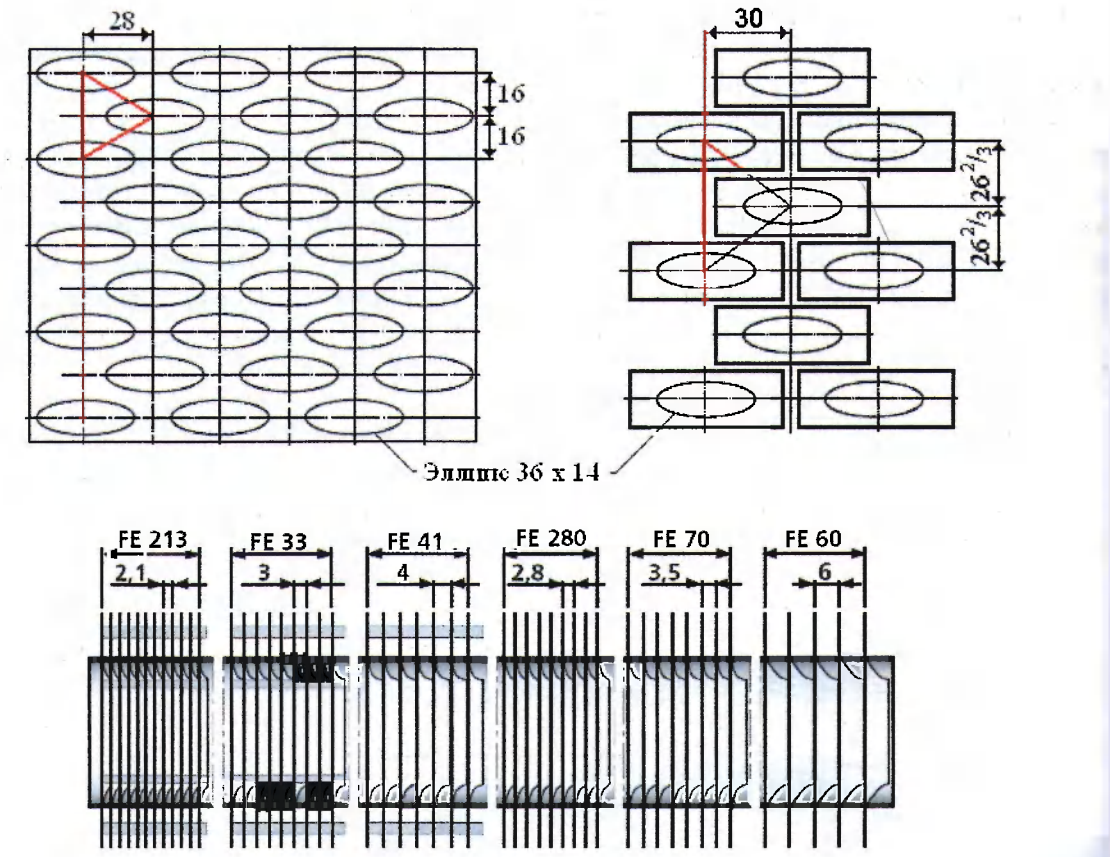


Рис.6.27. Элементы теплообменников с овальной трубой.

Рис.6.28 позволяет оценить уменьшение потери напора воздушного потока через теплообменники с овальными трубами по сравнению с круглыми.

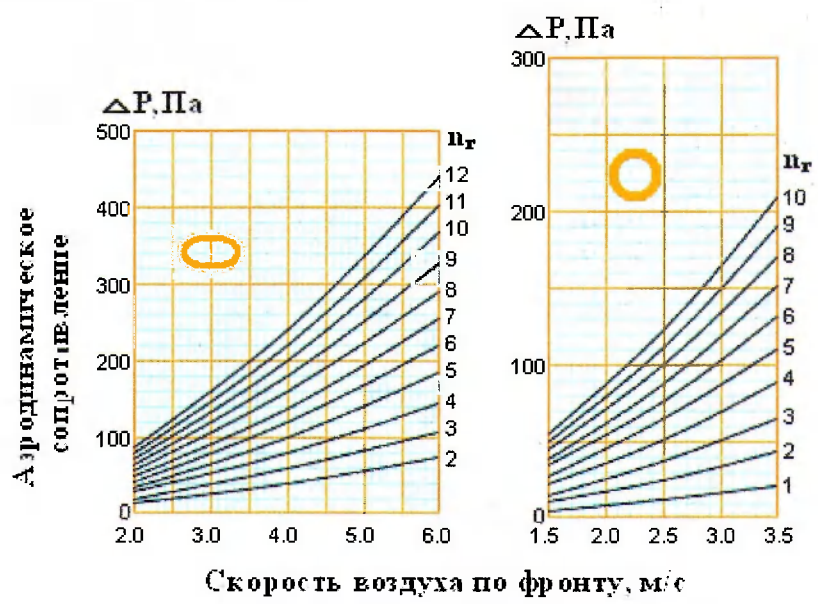


Рис.6.28. Аэродинамические характеристики* теплообменников
с овальными и гладкими трубами
при различном числе рядов труб n_r.

*данные индийской компании Kimukoh – пионера применения овальных труб

Наращивание теплообменной поверхности в многорядных теплообменниках сопряжено с задачей равномерного распределения потока тепло- хладоносителя (хладагента). Ввод и вывод рабочего вещества производится через трубы-коллекторы (рис.6.29, 6.30). Отдельные трубки смежных рядов соединяются короткими U-образными элементами «калачами» (рис 6.30). В водяных аппаратах коллекторы оснащены устройствами (пробками) для выпуска воздуха (вверху выпускного коллектора) и слива воды (снизу выпускного коллектора). Паровые воздухонагреватели имеют систему дренирования конденсата.

В воздухоохладителях непосредственного охлаждения (DX–Direct Expansion) при кипении хладагента в трубках последние объединяются в отдельные контуры циркуляции, работающие по параллельной схеме. Выделение контуров циркуляции с ограниченной длиной трубки обусловлено, прежде всего, тем, что потери напора хладагента в ВО, зависящие от массовой скорости хладагента и плотности теплового потока, не должны превышать 0,3…0,5 бар [87]. Кроме этого, должны быть обеспечены условия нормального возврата масла в компрессор. В выполнении этих требований существуют рекомендации по величине холодопроизводительности ВО на контур: для R-134a – 1,8…5,0 кВт; для R-407c – 2,8…7,0 кВт [14].

Каждая трубка теплообменника в ряду и контуре циркуляции должна получать одинаковое количество рабочего вещества. В воздухоохладителях DX хладагент, после дросселирования в регулирующем вентиле, попадает в контуры циркуляции с помощью специальных устройств – распределителей жидкого хладагента (диафрагменные либо на основе трубки Вентури [59, 87]) и разветвляемых трубок равной геометрии (с одинаковым диаметром и длиной) – так называемый «паук» (рис 6.29, 6.31).

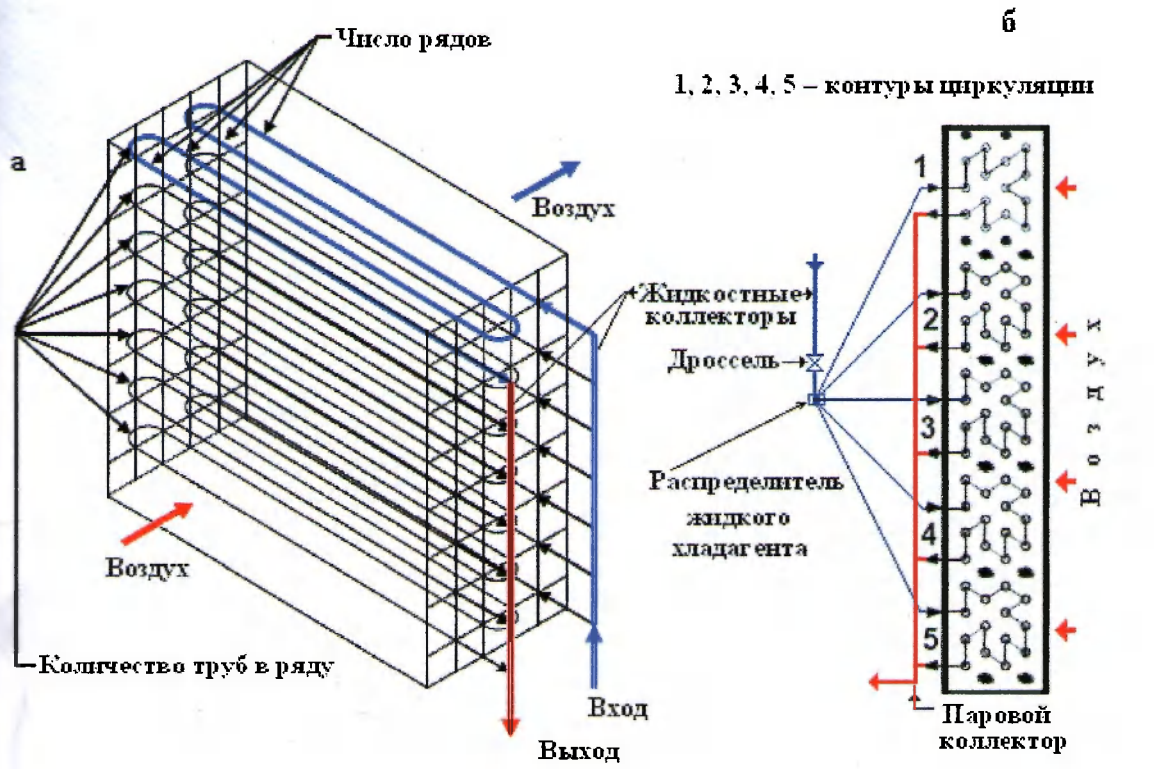


Рис.6.29. Схемы распределения рабочего вещества в водяном (а) и хладоновом (б) воздухоохладителях ($n_r = 4$).

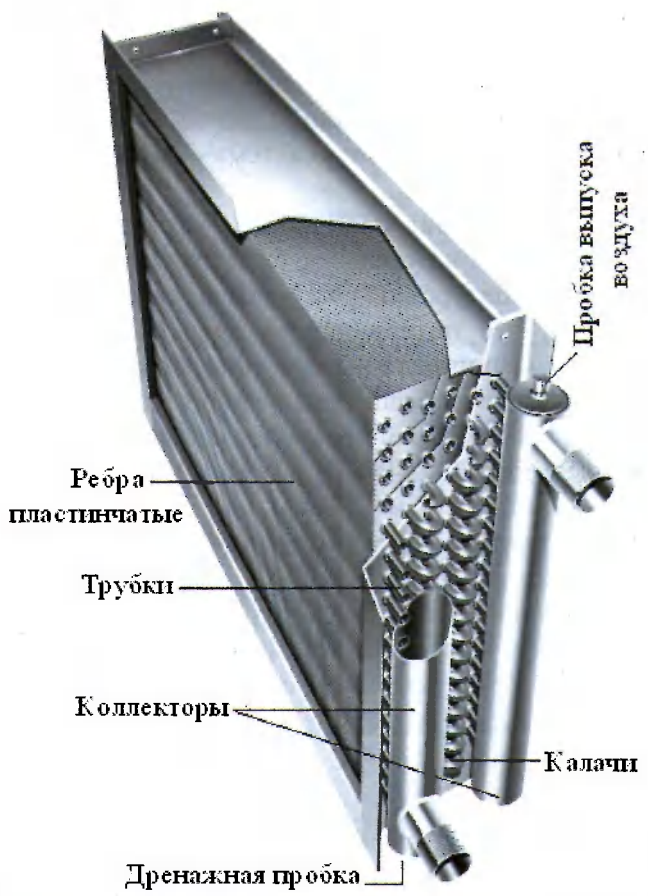
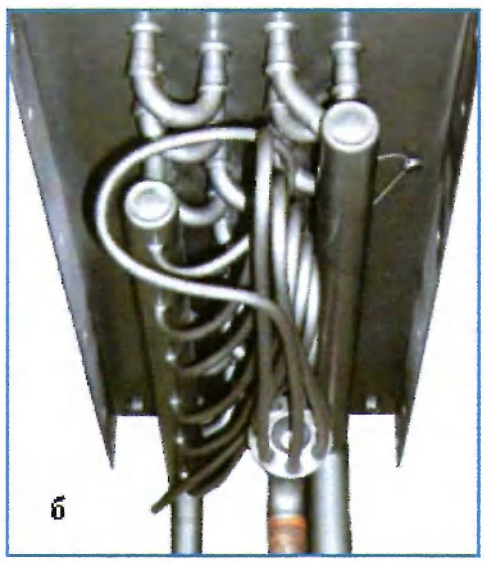
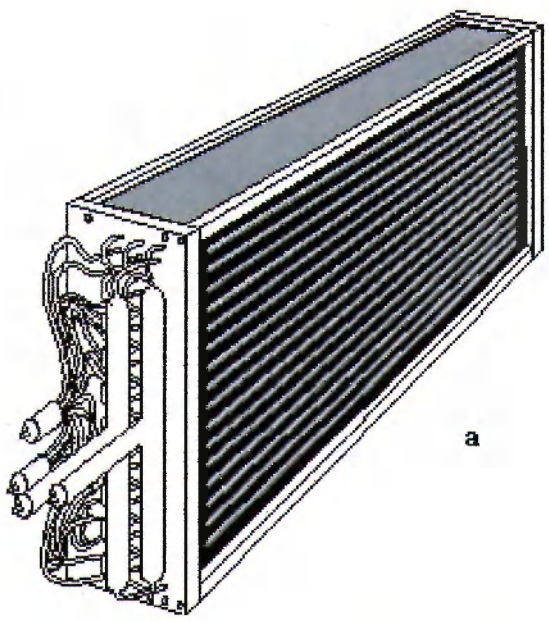




Рис.6.30. Конструкция поверхностного аппарата с промежуточным теплохладоносителем (вода, $n_r = 6$) и фотография пайки калачей к медным трубкам ТО.





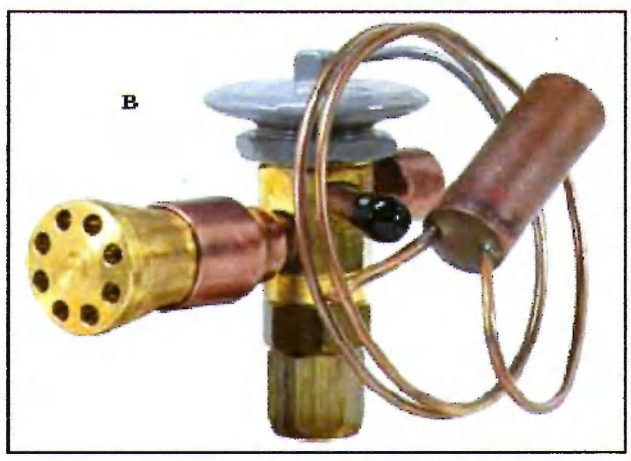


Рис.6.31. Конструкция поверхностного воздухоохладителя с непосредственным кипением хладагента (а), а также фотографии аппарата с торца (б) и ТРВ (TX valve) с датчиком температуры и распределителем жидкого хладагента (в).

Все аппараты, независимо от варианта размещения труб, должны подвергаться механической либо гидравлической очистки наружной поверхности. На рис.6.32 показан гидравлический способ очистки (Conco Service Centr., Italy) – водой под давлением 70…80 бар через систему 12 форсунок, перемещающихся по фронту теплообменника вдоль его высоты с помощью направляющей рейсшины, которая в свою очередь перманентно смещается по длине.

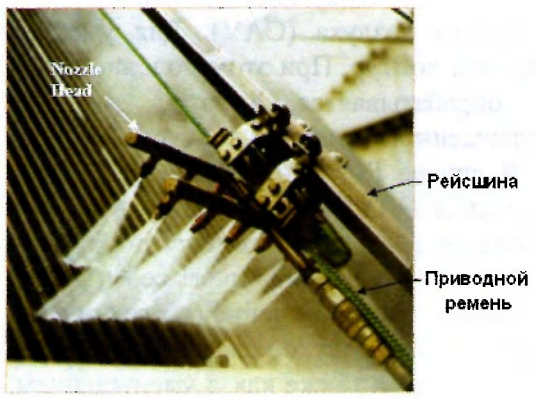


Рис.6.32. Устройство очистки ТО Conco - j&w® System.

6.1.3. СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ

Схемы распределения потоков в теплообменниках во многом определяют возможности их управления.

Воздухоохладители с непосредственным кипением хладагента в многоконтурных схемах циркуляции могут быть в трех вариантах исполнения: Face Control; Row Control; Interlaced, рис.6.33.

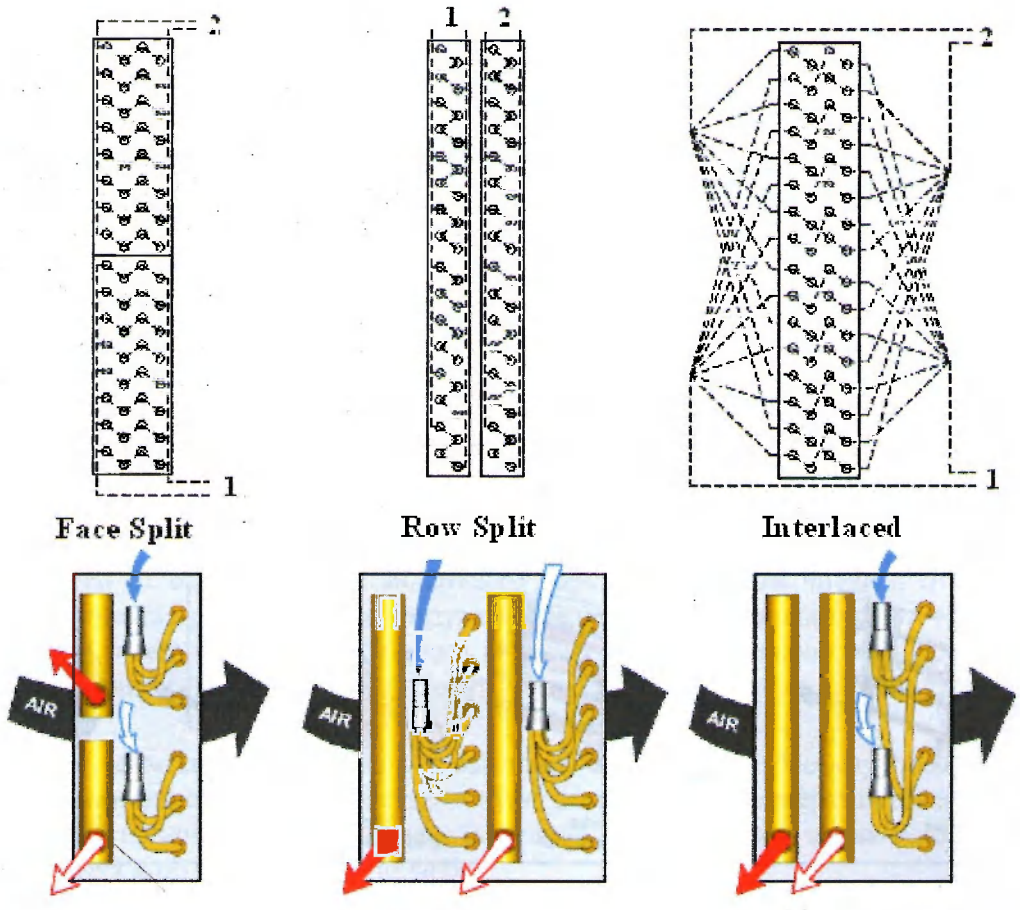


Рис.6.33. Схемы распределения хладагента в воздухоохладителях с непосредственным кипением.

Face Control (или параллельная схема) наиболее часто используется в СКВ с постоянным расходом воздуха (CAV). Для уменьшения холодопроизводительности Q_0 отключается верхний контур. При этом половина расхода воздуха, проходя через него, как через байпас, не обрабатывается, а затем смешивается с другой половиной воздушного потока, охлажденной в нижнем контуре.

В случае Row Control (последовательной схемы), применяемой в СКВ с переменным расходом воздуха (VAV) и мультизональных системах, регулирование Q_0 обеспечивается отключением первого контура по ходу движения воздуха.

Смешанная схема Interlaced (Intertwined) предполагает перемежение трубок обоих контуров и ее применение не ограничено особенностями СКВ.

Водяные воздухоохладители выпускаются 8-рядными (один змеевик) – стандартный вариант (S), а также как с уменьшением числа рядов: $n_r = 6$ (3/4 змеевика) – L; $n_r = 4$ (1/2 змеевика) – H, так и с увеличением рядности за счет применения схем M и D в 1½ и 2 змеевика, соответственно, (рис.6.34а). Схемы L/H применяют для повышения скорости воды v_w в трубах, а M/D – для снижения v_w, относительно стандартного решения.

Водяные воздухонагреватели, как уже отмечалось, в основном, – одно- и двухрядные теплообменники с целым змеевиком, 1/2-ой либо 1/4-ой частью змеевика (рис.6.34б).

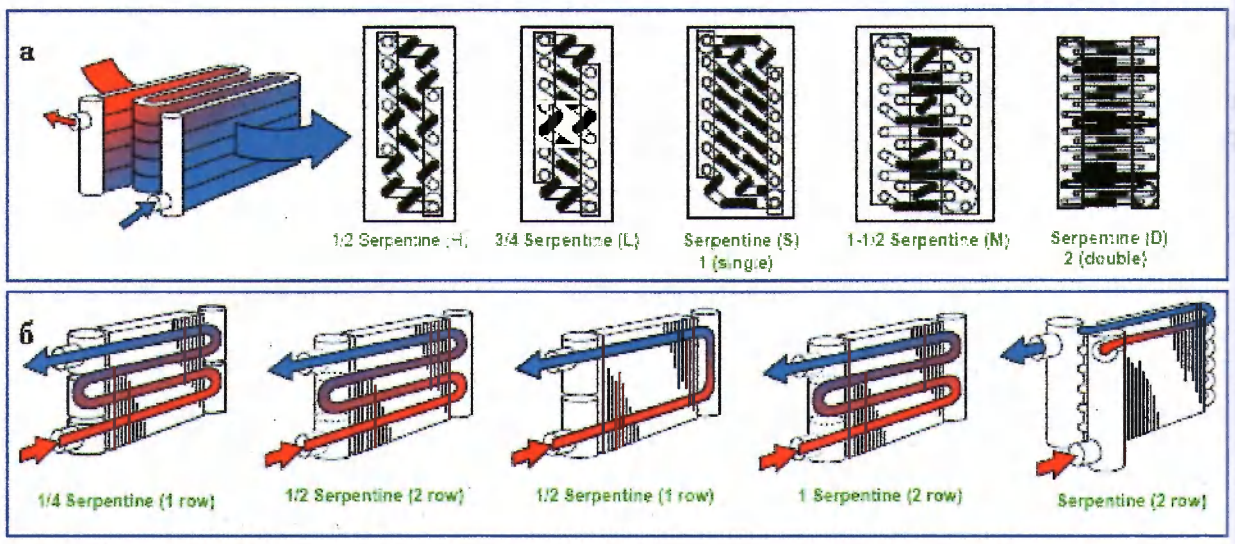


Рис.6.34. Варианты распределения воды в воздухоохладителях (а) и воздухонагревателях (б).

Типичные схемы подвода пара и отвода конденсата в паровых воздухонагревателях показаны на рис.6.35 и 6.36.

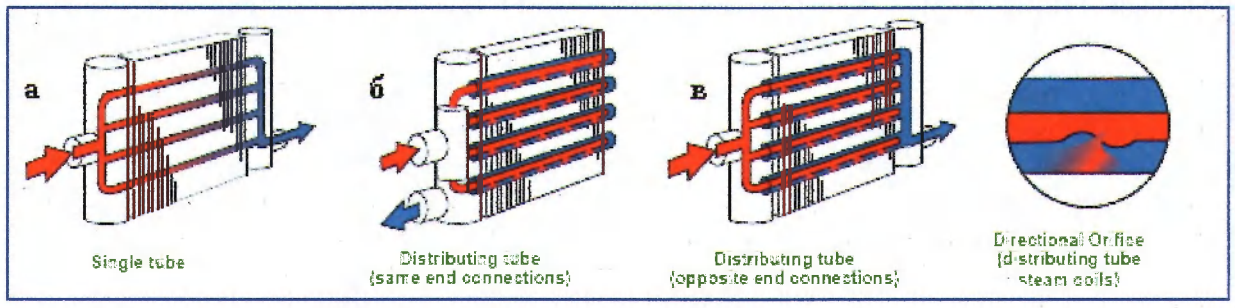


Рис.6.35. Паровые воздухонагреватели горизонтального типа с простой трубкой (а) и с двойной трубкой: при расположении коллекторов подвода пара и отвода конденсата на одной стороне (б) или оппозитно (в).

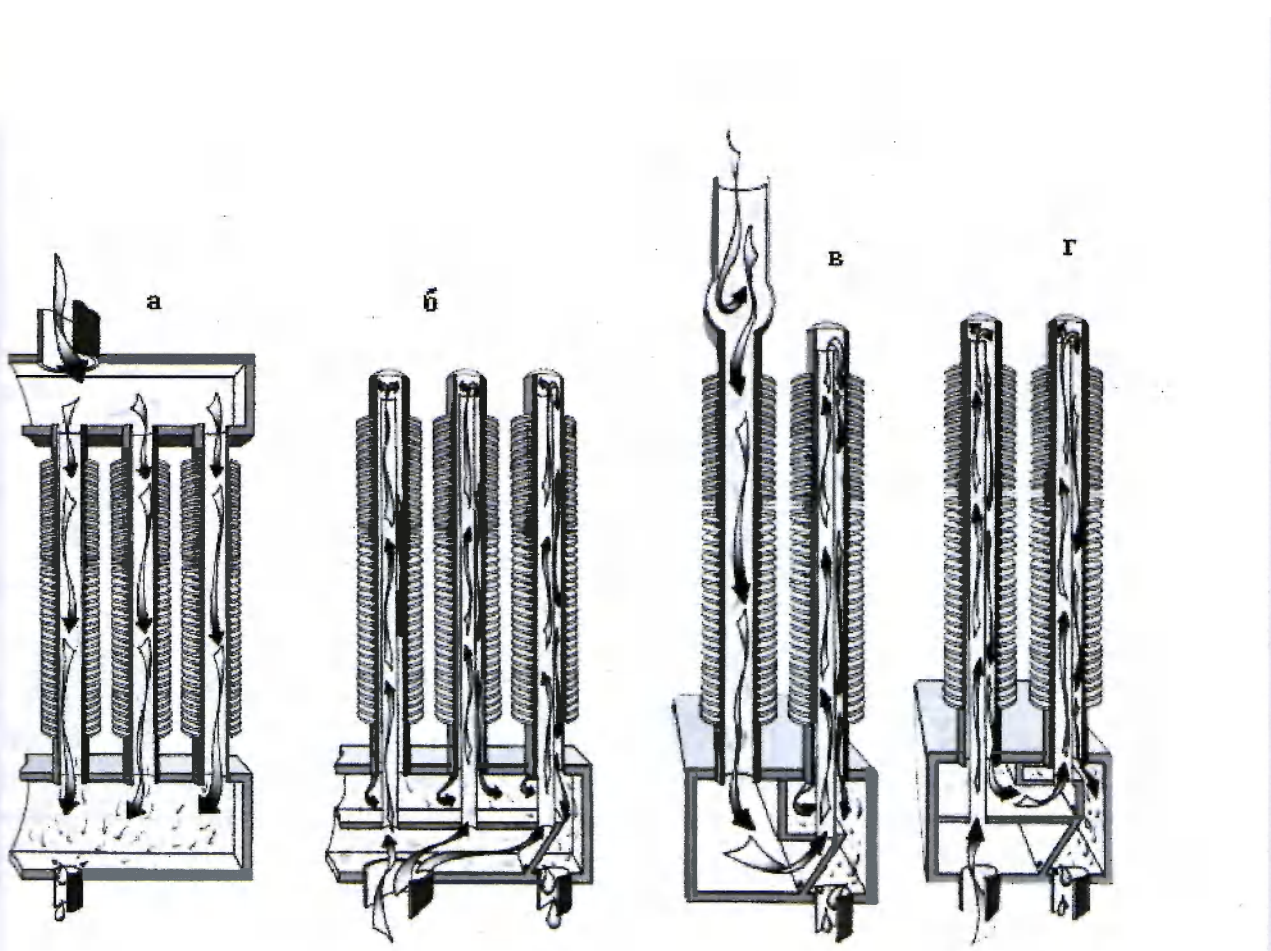


Рис.6.36. Различные типы паровых воздухонагревателей Armstrong вертикального исполнения: S-type (а); C-type (б); T-type (в); P-type (г).

Тип S (Standard coils) является стандартным вариантом воздухонагревателей с простой паровой трубкой для различных сфер применения (в т. ч. системы кондиционирования воздуха) при температуре воздуха на входе $t \geq 35$ °F (1,7 °C) и при постоянном давлении пара. Пар подается по схеме «сверху-вниз», при этом образующийся в процессе теплопередачи конденсат стекает в нижнюю камеру и отводится (рис.6.36а).

Данный вариант не рекомендуется для задач быстрого нагрева воздуха, в случае мультизональных систем, и когда паровой клапан используется для регулирования температуры.

Тип C (Centifeed coils) предусматривает использование двойной трубки и комбинированной камеры (коллекторов) для распределения пара и сбора конденсата (рис.6.36б). Двойная трубка – inner steam distribution tube – конструктивно представляет собой трубу в трубе: внутренняя для пара, наружная – для отвода конденсата. Этот тип аппарата свободен от ограничений стандартного варианта S, в том числе и от опасности замерзания конденсата при нагревании воздуха с отрицательной температурой $t < 0$ °C.

Типы T и P (Tandem Coils) – комбинации вариантов S/C, различающихся друг от друга только расположением коллекторов: оппозитно – T (рис.6.36в), на одной стороне – P (рис.6.36г).

Рис.6.33…6.35 заимствованы из каталога компании McQuay (2006 McQuay Products Catalog). Иллюстрации на вкладке (рис.6.37) соответствуют номенклатуре поверхностных аппаратов одного из лидеров кондиционеростроения – компании Trane, со всем своим многообразием схем распределения контактирующих потоков.

При расчете (подборе) теплообменников следует пользоваться оригинальными данными заводов-изготовителей.

Особенности расчета оребренных поверхностей теплообменных аппаратов изложены в [5, 35, 88, 95].

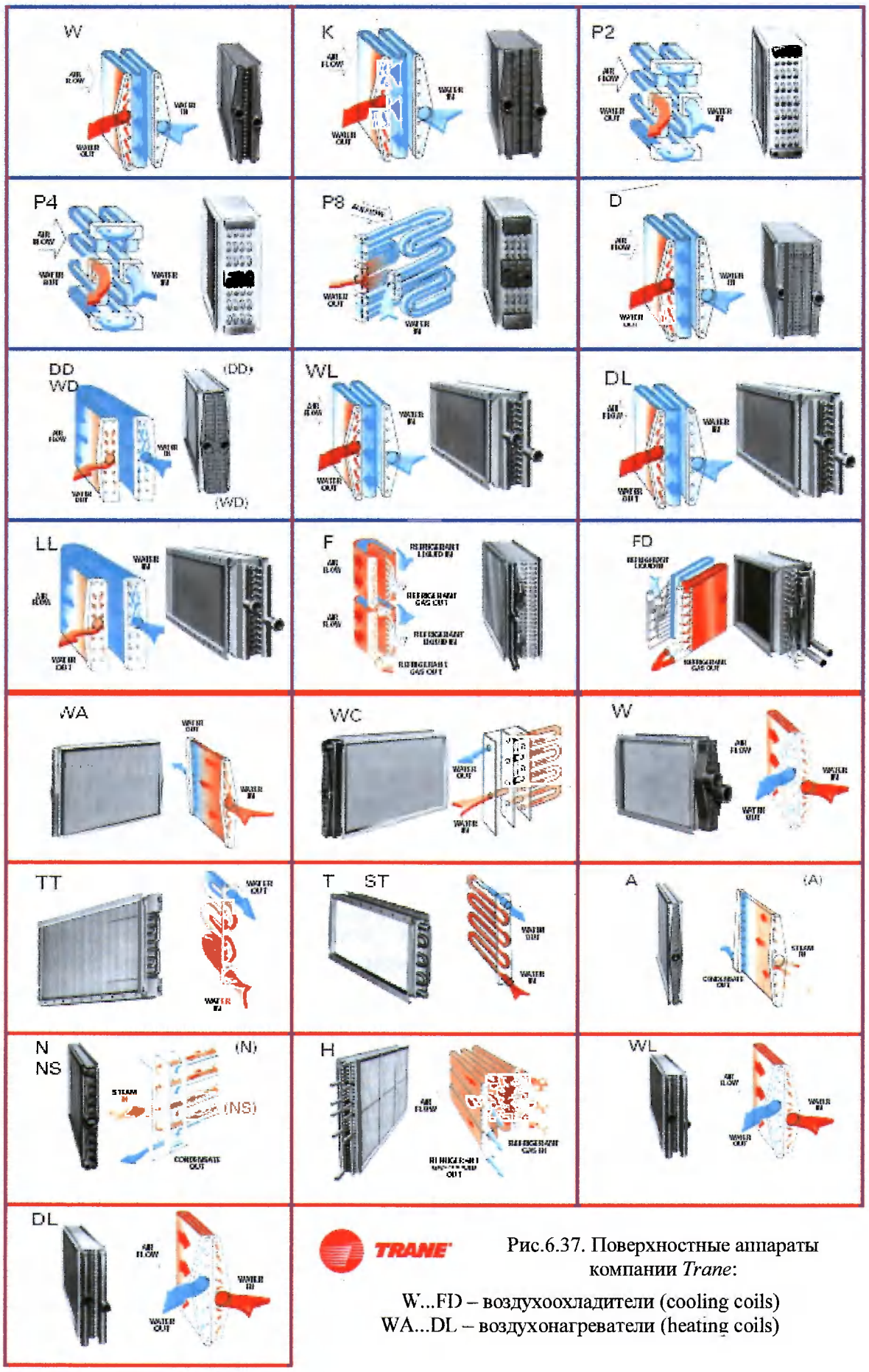
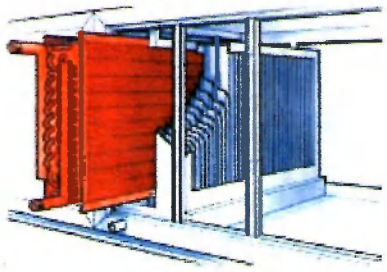


Рис.6.37. Поверхностные аппараты компании *Trane*:

W...FD – воздухоохладители (cooling coils)
WA...DL – воздухонагреватели (heating coils)

6.1.4. КОМПОНОВКА КОНДИЦИОНЕРОВ. АГРЕГАТИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ АППАРАТЫ – ФЭНКОЙЛЫ

Процессы охлаждения и нагревания воздуха в центральных кондиционерах обеспечиваются соответствующим набором секций поверхностных аппаратов.





В местных автономных и неавтономных кондиционерах, в т.ч. сплит-системах, поверхностные аппараты входят в состав фэнкойлов либо внутренних блоков, имеющих собственные вентиляторы (рис.6.38…6.42).

а

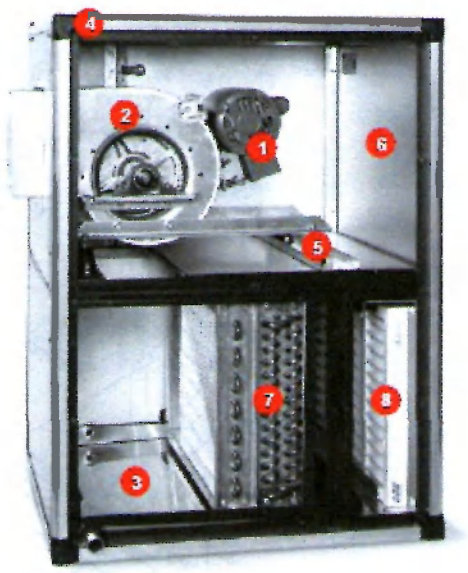
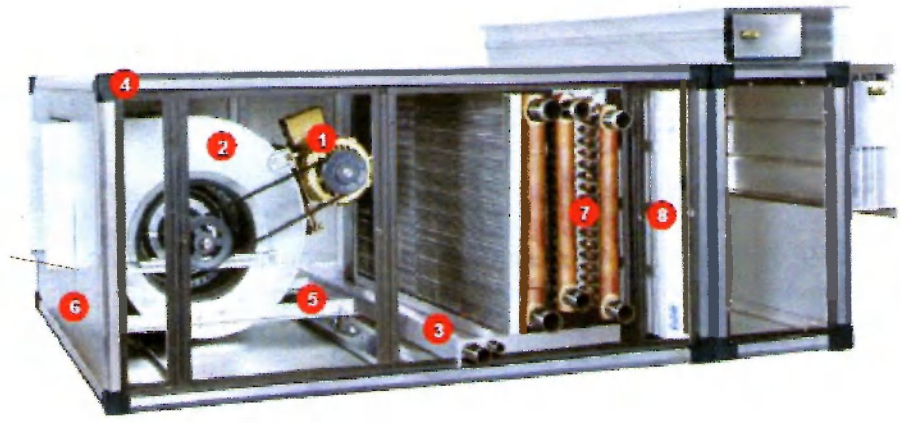
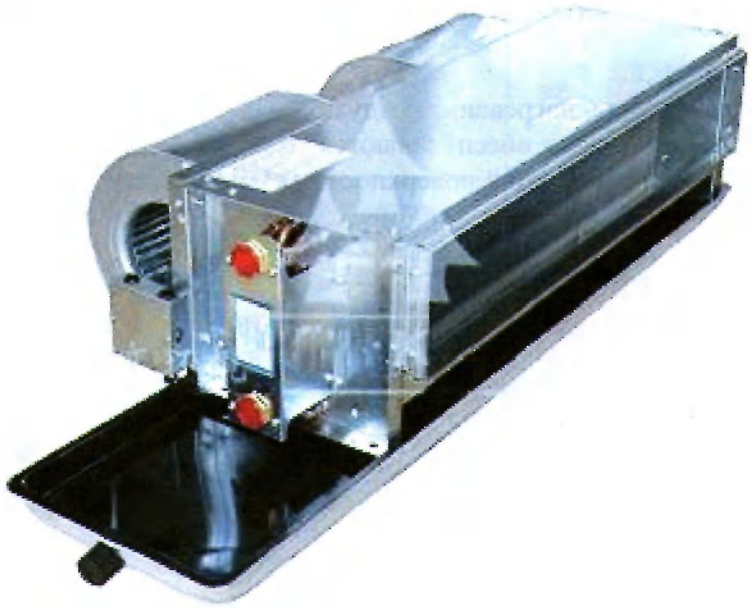


Рис.6.38. Местные кондиционеры вертикального (а) и горизонтального исполнения (б):

1 – электродвигатель вентилятора;
2 – центробежный вентилятор;
3 – поддон для отвода конденсата;
4 – уголок корпуса;
5 – виброосновaние вентилятора;
6 – листовая панель корпуса;
7 – поверхностные аппараты;
8 – фильтр.

б





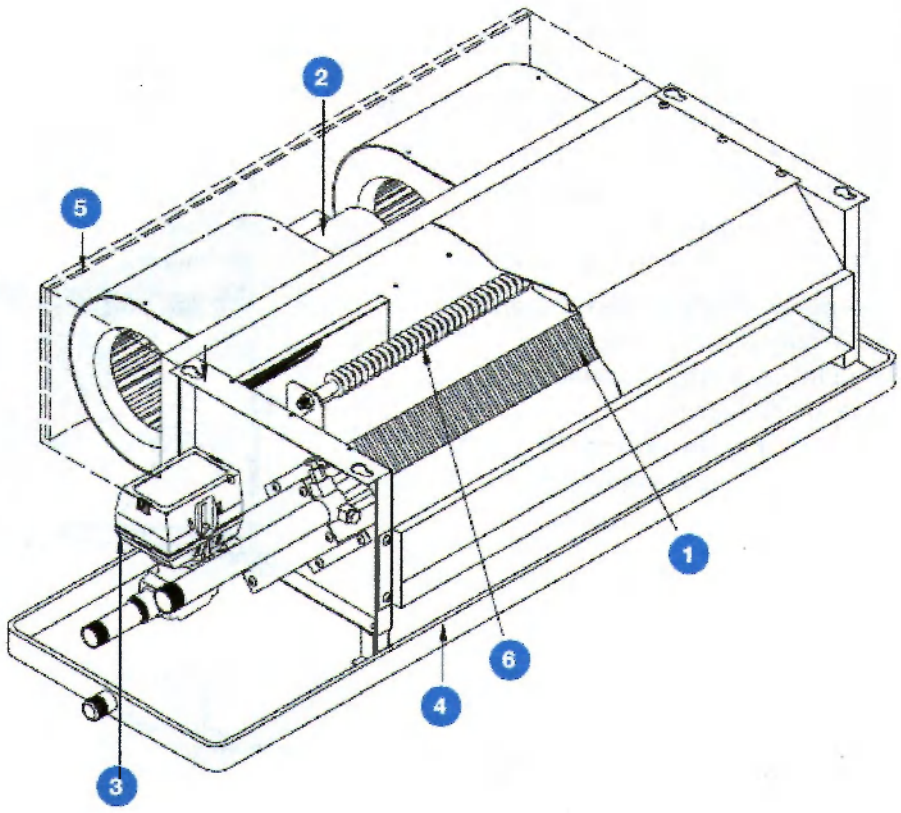


Рис.6.39. Фэнкойл полупромышленный горизонтального типа:
1 – теплообменник (воздухоохладитель); 2 – вентиляторный блок; 3 – клапан;
4 – поддон для сбора конденсата; 5 – воздушный фильтр; 6 – электронагреватель.

Позиции 5 и 6 опционные

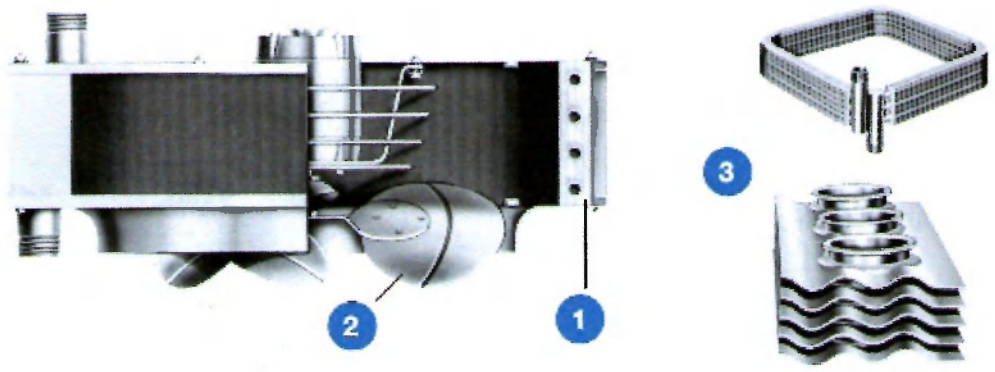
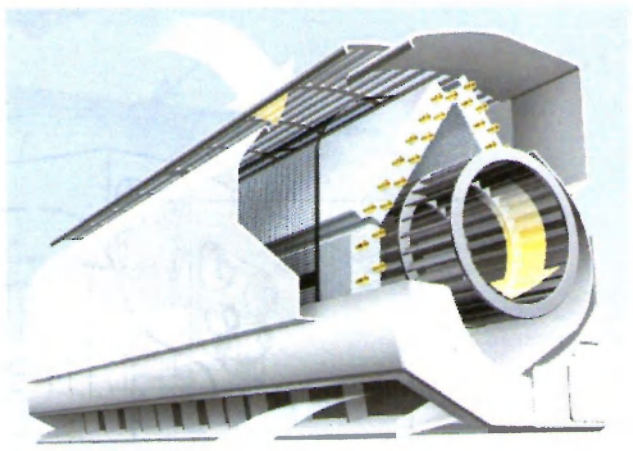


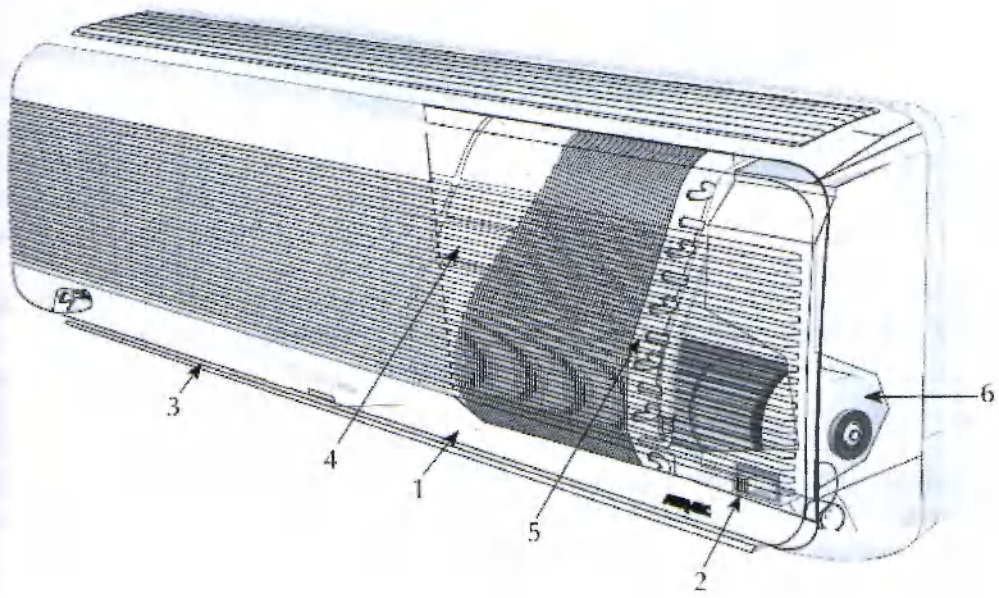
Рис.6.40. Фэнкойл вертикального типа (Trane):
1 – теплообменник; 2 – вентилятор; 3 – оребренный элемент.

В данном случае (модель S) компания Trane решила задачу на базе однорядного змеевикового теплообменника прямоугольной формы с гофрированными ребрами “Sigma-Flo fin” (см. § 6.1.1).

Рис.6.41. Внутренний блок:

1 – передняя панель;
2 – кнопка включения;
3 – жалюзийная решетка;
4 – фильтр;
5 – теплообменник;
6 – вентилятор.





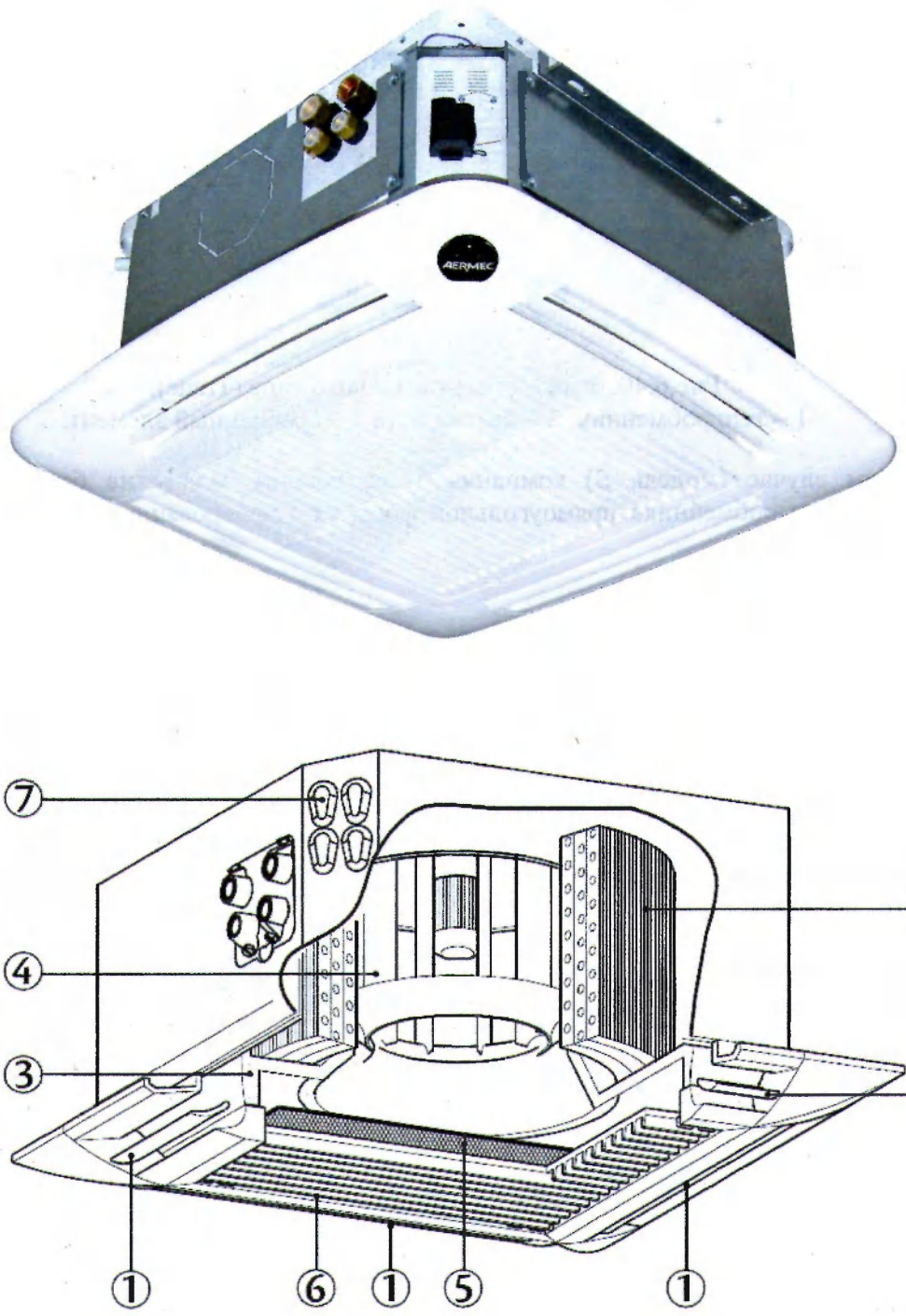


Рис.6.42. Фэнкойл кассетного типа: 1 – дефлекторы; 2 – теплообменник (воздухоохладитель); 3 – поддон для сбора конденсата; 4 – вентилятор; 5 – воздушный фильтр; 6 – воздухораспределительная решетка.

Кроме приведенных моделей фэнкойлов, размещаемых на потолке, существуют различные варианты настенных и напольных исполнений. Электрические воздухонагреватели имеют аналогичный дизайн (рассмотрены в § 6.1.5).

6.1.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛИ

6.1.5.1. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. УСТРОЙСТВО И МАТЕРИАЛЫ

Основными элементами электрических воздухонагревателей являются открытые элементы (спираль, пластина) либо ТЭН (трубчатый электронагреватель, tubular electric element) (рис.6.43).

В оболочке ТЭН – металлической трубе размещается нихромовая либо фехралевая проволока диаметром 0,2…2 мм, закрепленная в торцевых изоляторах. Остальное внутритрубное пространство заполнено порошком окиси магния MgO (периклаз) – материалом, обладающим высокими значениями коэффициента теплопроводности и электрического сопротивления. Периклаз обеспечивает малый перепад температур (< 150 °С) между разогретой до высоких температур спиралью и оболочкой, а также выполняет роль эффективного электроизолятора.



Рис.6.43. Открытый элемент - спираль (а) и ТЭН (б):
1 – нагревательный элемент (проволока из жаропрочного материала); 2 – центрующий «холодный» стержень; 3 – электроизоляционный порошок (магнезия); 4 – круговая сварка; 5 – металлическая трубка; 6 – керамическая втулка; 7 – резьбовая пара.

Окись магния – вещество с уникальными свойствами, имеет самое разнообразное применение: как магнезия широко используется в медицине (лекарственное средство) и в спорте (смазка для рук гимнастов и тяжелоатлетов), как периклаз применяется для технических целей в качестве компоненты при производстве жаропрочной керамики, изоляционного наполнителя для ТЭН. Название периклаз окись магния получила от одноименного минерала вулканического происхождения, поскольку работает при высоких температурах (близких к 1000 °С).

MgO – белое порошкообразное вещество (рис.6.44), обладает кубической кристаллической структурой и состоит из решетки ионов кислорода с ионами магния Mg^{2+} внутри нее, соответствует структуре хлористого натрия NaCl. Молекулярная масса 40,3 г/моль, плотность 3,3…3,4 г/см^3, модуль упругости 250 ГПа, температура плавления 2800 °С. максимальная рабочая температура 1100 °С, теплоемкость 950…1050 Дж/кг·К (t = 30…1000 °С), коэффициент теплопроводности λ = 7…11 Вт/м·К (t = 30…100 °С), электрическое сопротивление 1000 МОм при t > 20 °С и 100 МОм при t > 600 °С, напряжение пробоя более 3000 В, ток утечки при рабочей температуре 0,05 мА.



MgO – гигроскопичное вещество. В присутствии водяных паров формируется гидроокись магния: $MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$. Однако при нагревании исходный материал легко восстанавливается. Эту особенность нужно учитывать при эксплуатации ТЭН во влажных средах (например, в судовых системах).

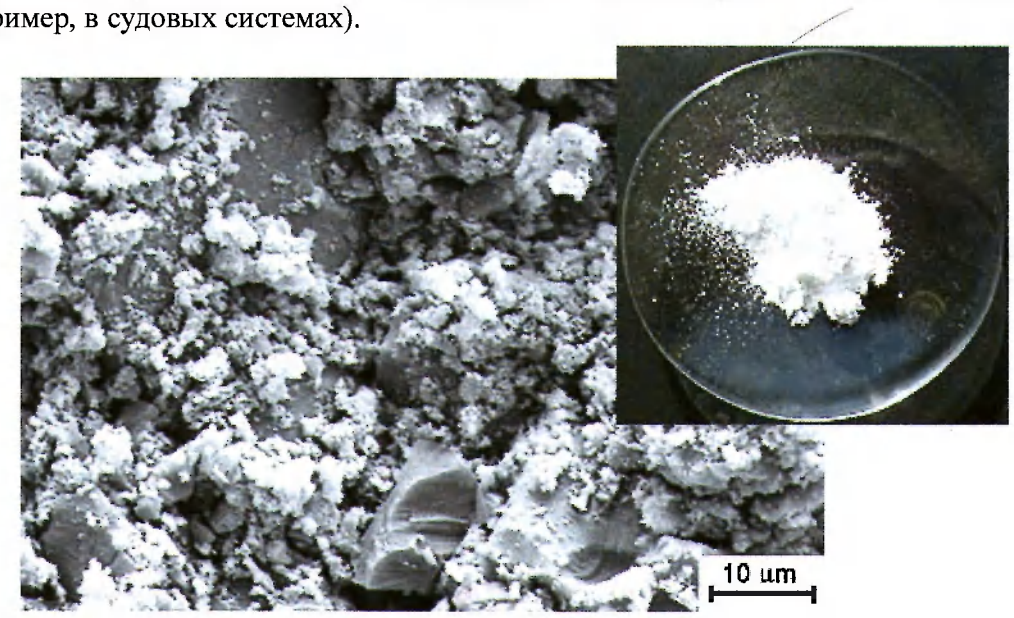


Рис.6.44. Микрофотография поверхности окиси магния
и фотография порошкового материала.

На рис.6.45а приведена фотография производственного участка запрессовки спирали ТЭН изоляционным порошком MgO. ТЭН в прямой трубе подвешивается вертикально на виброустановке, где периклаз уплотняется с периодическим обстукиванием оболочки, при этом обеспечивается постоянный автоматический контроль расположения проволочной спирали относительно центральной оси оболочки. Скорость технологической операции: 600мм длины трубы в минуту.

Свойства периклаза позволяют ему надежно уплотнять спираль не только в прямых трубчатых электронагревательных элементах, но и различной сложной конфигурации, например: U, W, Triple U- образные ТЭН, рис.6.46. Подготовленный прямой элемент после операции запрессовки периклаза подвергают отжигу (рис.6.45б) с последующей прокаткой (рис.6.45в), предавая металлической оболочке любую форму.

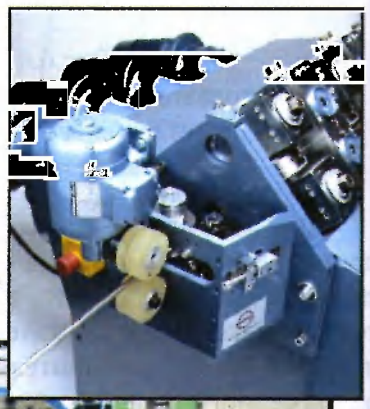




Рис.6.45. Уплотнение спиралей ТЭН периклазом (а), отжиг (б) и прокатка (в)
на оборудовании TEMPCO Electric Heater Corporation.

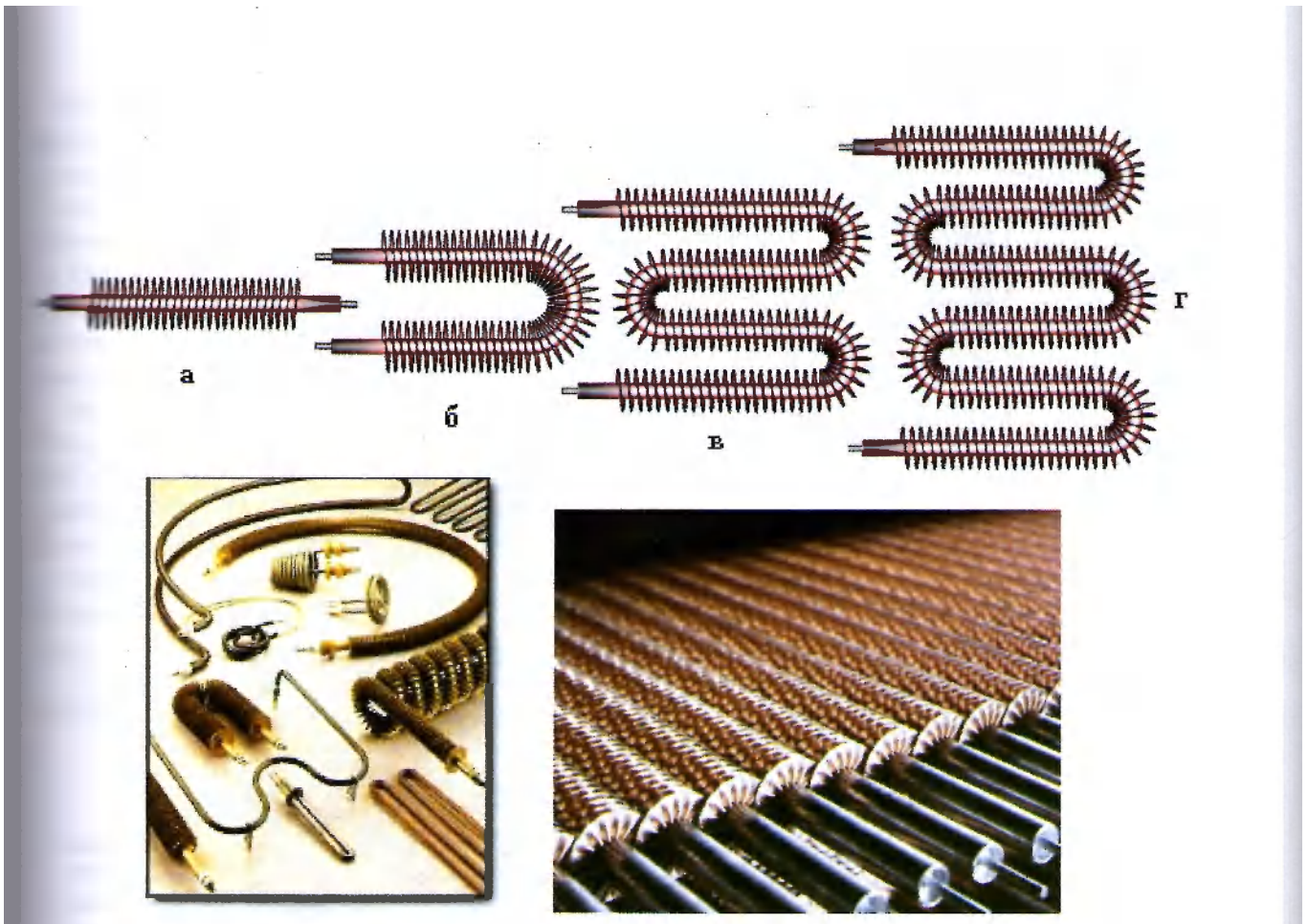


Рис.6.46. Форма ТЭН (эскизы и фотографии): прямая – а; U – б; W – в; Triple U – г.

Выбор материала оболочки ТЭН зависит от свойств нагреваемой среды (воздух, вода, масла и пр.) и необходимого уровня ее нагрева, а также от рабочей температуры спирали и, соответственно, плотности теплового потока. В этом качестве используются: *медь – максимальная температура 177 °С* (чистая вода); *низкоуглеродистая сталь – 399 °С* (водные растворы солей); *нержавеющая сталь марки 316*: Cr (16-18 %), Ni (11-14 %), Fe, возможна модификация с добавлением молибдена 2-3 %, – *649 °С*, (деионизированная вода, воздух); *инколой 800*: Ni (30-35%), Cr (19-23%), Fe, либо *инколой 840*: Ni (18-20 %), Cr (18-21 %), Fe, – *871 ^{0}С*, *инконел 600*: Fe (6-10 %), Cr (14-18 %), Ni, – *982 °С*. Указанные значения температур являются граничными для чрезмерного окисления поверхности. Типичными материалами оболочки ТЭН для нагревания воздуха являются нержавеющая сталь и жаропрочный никелехромовый сплав инколой.

Стандартный диаметр: 8, 10,9, 12, 12,4 и 15,9 мм. ТЭНы могут иметь спиральное либо пластинчатое оребрение (рис.6.47).

Как уже упоминалось, материал нагревательного элемента (спирали) – сплавы с различным содержанием никеля Ni и хрома Cr (нихром), либо железа Fe, хрома и алюминия Al (фехраль).

Нихромовые материалы были созданы в начале XX века, а фехралевые сплавы появились чуть позже в 30-е годы. Ведущие разработчики и мировые производители – компании Kanthal (Sweden), Gilphal (France), Fecralloy (UK). Их продукция имеет собственную торговую марку. Поэтому при выборе надо ориентироваться на технические данные и, прежде всего, на состав предлагаемых материалов (табл.6.3, 6.4). На рис.6.48 и 6.49 приведены некоторые характеристики сплавов фирмы Kanthal (Nikrothal – нихромые сплавы, Kanthal – фехралевые) [99]. Нагревательные элементы из сплавов Kanthal имеют 2…4 раза более длительный ресурс, чем из Nikrothal (рис.6.48), а также более высокую допустимую температуру накала (рис.6.49).

а



б

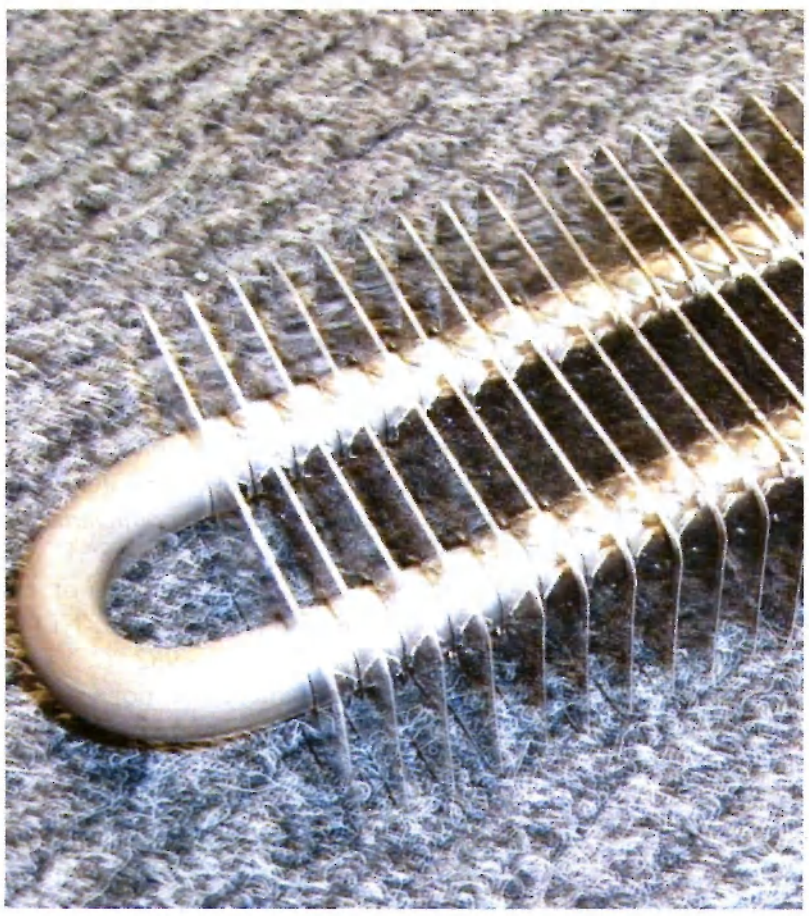


Рис.6.47. ТЭНы с навивным (а) и пластинчатым оребрением (б).

К качеству оребрения ТЭН, а именно к обеспечению надежного контакта ребер с поверхностью трубы, предъявляются очень высокие требования. Эквивалентный зазор между ними должен быть не более 10 мкм, поскольку, в противном случае, в этом месте возникает большое переходное термическое сопротивление, приводящее к перепаду температур в несколько сотен градусов. При этом ребро не только не работает, но и ухудшает механизм теплопередачи [15].

Исследования высокотемпературных сплавов показали, что хром хорошо совместим с железом, при этом максимальное содержание Cr составляет 47 % в точке эвтектики и снижается до 30 % при комнатных температурах. С добавлением хрома удельное электрическое сопротивление материала увеличивается. Оптимальное значение этой величины для нагревательных элементов соответствует 20 % Cr.

Такие сплавы обладают необходимыми электрическими свойствами в сочетании с высокой прочностью и ковкостью. Ковкость необходима для выполнения операции волочения в технологии получения проволоки. Сплавы не подвержены коррозии, а также жаростоустойчивы и не разрушаются в многочисленном цикле «нагревание – охлаждение».

Фирма Kanthal рекомендует в качестве ТЭН для воздухонагревателей сплавы Kanthal D и Nikrothal 80 при удельной тепловой нагрузке $\sigma_т = 2…25$ Вт/см^2 и рабочей температуре t ≈ 700 °С. Для воздухонагревателей с открытыми спиралями – материалы Nikrothal 80 и 60, Kanthal D и AF (t < 600 °С, $\sigma_т = 7…8$ Вт/см^2 – режим принудительной конвекции, и $\sigma_т = 3…4$ Вт/см^2 – режим естественной конвекции).

Наряду с открытыми спиралями также используются пластинчатые элементы из нихромового либо хромокадмиевого Cd/Cr сплавов (компании Termolec, McQuay,VTS Clima и т.д.).

Ресурс электрического нагревателя определяется температурным режимом работы, который устанавливается в соответствии с выбранной удельной тепловой нагрузкой.

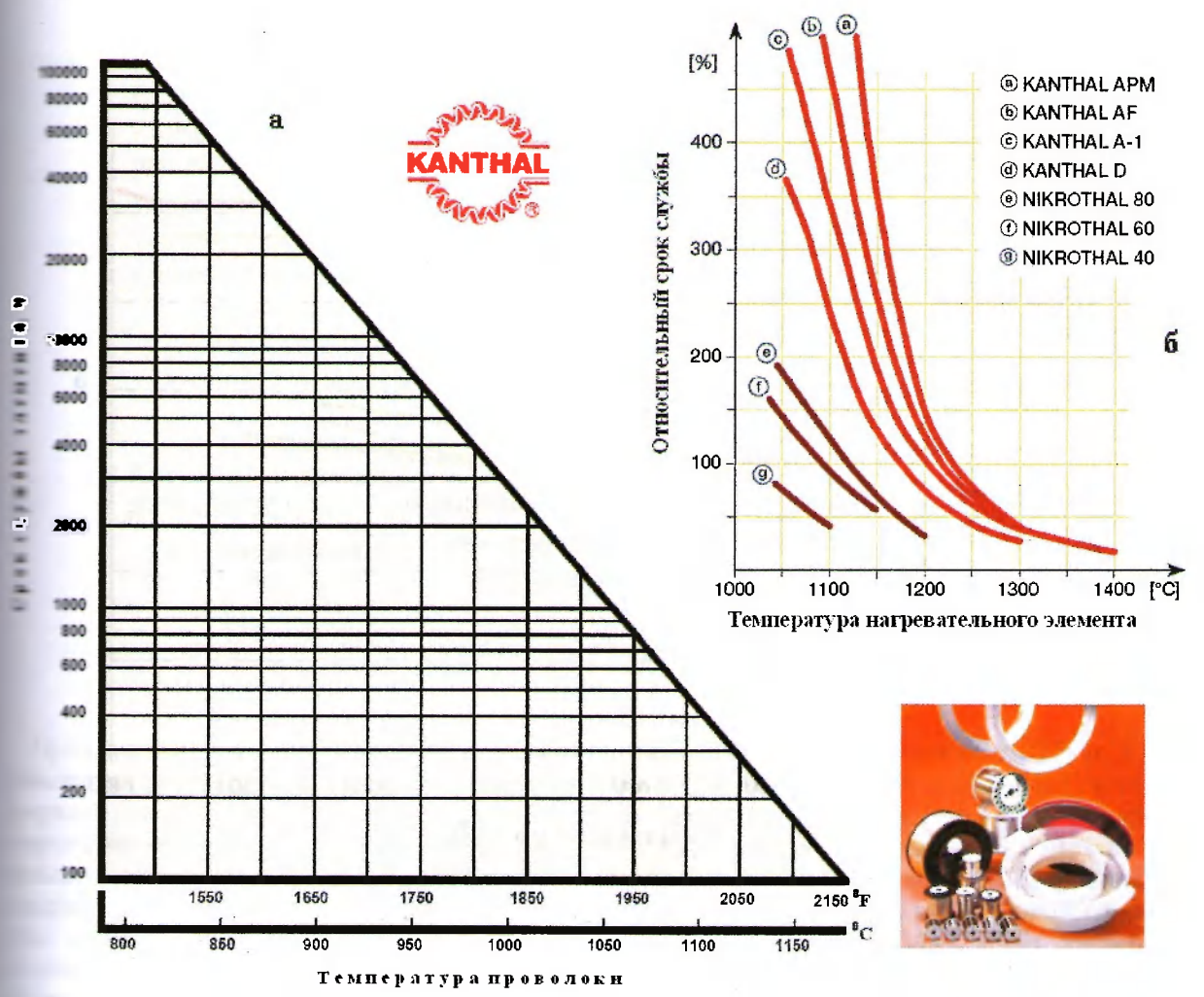


Рис.6.48. Зависимость срока службы нагревательного элемента от температуры:
а – типичная картина для нихромовых элементов; б – для продукции Kanthal
(относительно Kanthal A-1 при t = 1200 °С).

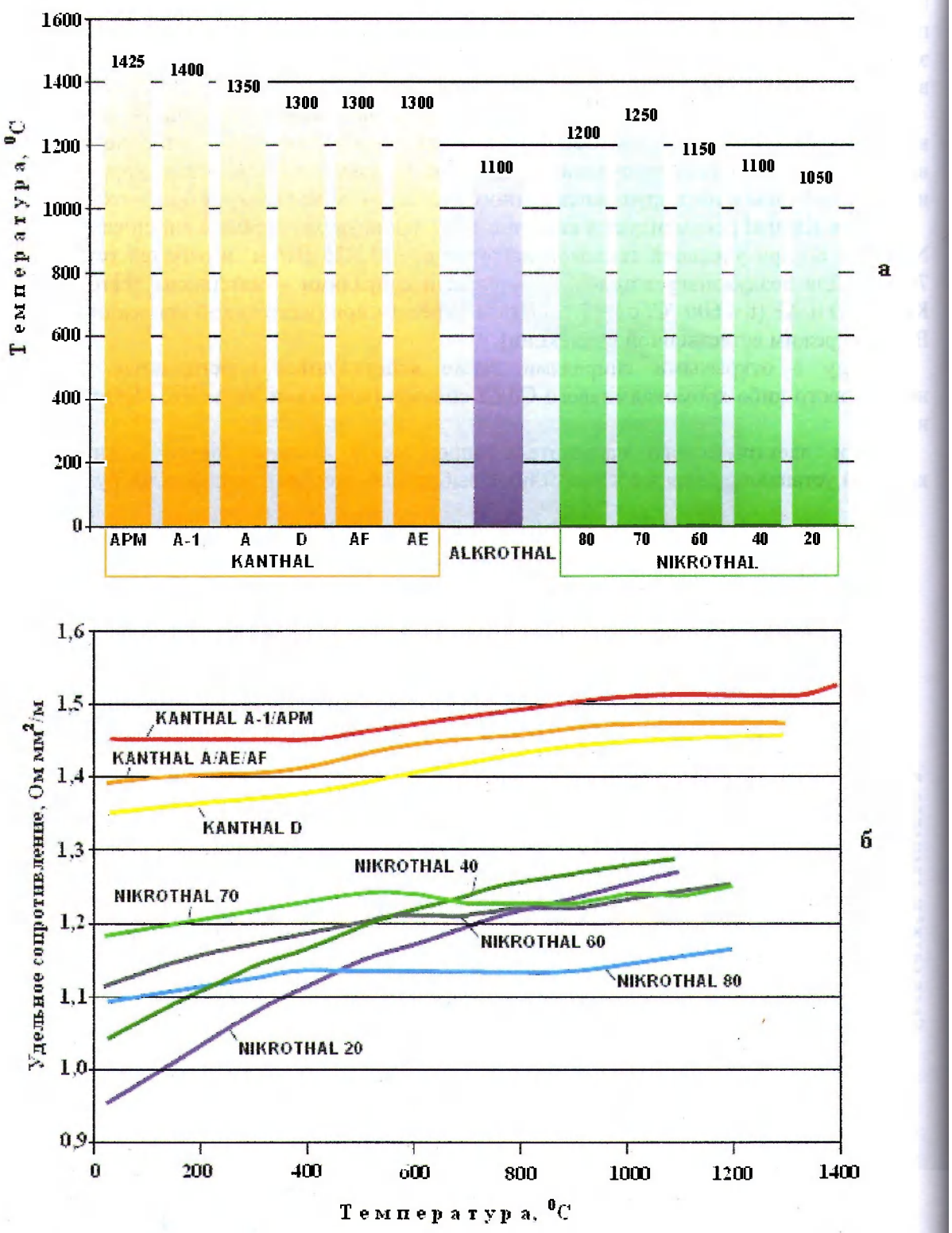


Рис.6.49. Данные по предельно-допустимой температуре сплавов Kanthal и Nikrothal (а)
и зависимость удельного электрического сопротивления этих материалов от температуры (б).

Таблица 6.3. Состав нихромовых и фехралиевых сплавов фирмы Kanthal [199].

Сплав	Ni, %	Cr, %	Al, %	Fe
Nikrothal (N 80)	80	20	-	-
Nikrothal (N 60)	60	16	-	24
Kanthal D (D)	-	22	4,8	73,2
Kanthal AF (AF)	-	22	5,3	72,7

Таблица 6.4. Свойства сплавов [199].

Свойства	N 80	N 60	D	AF
Максимально-допустимая рабочая температура, °С	1200	1150	1300	1300
Температура плавления, °С	1400	1390	1500	1500
Плотность ρ, г/см^3	8,3	8,2	7,25	7,15
Электрическое сопротивление r при 20 °С, Ом·мм^2/м	1,09	1,11	1.35	1,39
Коэффициент теплопроводности λ при 50 °С, Вт/м К	15	13	11	11
Теплоемкость при 20 °С, кДж/кг·К	0,46	0,50	0,46	0,46
Температурный фактор C_t, влияющий на величину r при t: 250 °С	1,03	1,05	1,01	1,01
500 °С	1,04	1,08	1,03	1,03
800 °С	1,04	1,10	1,06	1,05
1000 °С	1,05	1,11	1,07	1,06
1200 °С	1,07	-	1,08	1,06
Коэффициент температурного расширения, К$^{-1}$, при t: 20…100 °С	-	-	-	-
20…250 °С	$15\cdot 10^{-6}$	$14\cdot 10^{-6}$	$11\cdot 10^{-6}$	$11\cdot 10^{-6}$
20…500 °С	$16\cdot 10^{-6}$	$15\cdot 10^{-6}$	$12\cdot 10^{-6}$	$12\cdot 10^{-6}$
20…700 °С	$17\cdot 10^{-6}$	$16\cdot 10^{-6}$	$14\cdot 10^{-6}$	$14\cdot 10^{-6}$
20…1000 °С	$18\cdot 10^{-6}$	$17\cdot 10^{-6}$	$15\cdot 10^{-6}$	$15\cdot 10^{-6}$

Представленные данные позволяют увидеть различие нихромовых и фехралиевых сплавов. Кроме повышения уровня рабочей температуры спирали и ресурса работы (уже отмечалось), в случае фехралей замена никеля железом уменьшает количество материала, поскольку удельное сопротивление Fe выше, а также снижает массу нагревательного элемента на 20…30 % за счет меньшей плотности. Сплавы Kanthal меннее склоны к высокотемпературной коррозии: их поверхностная оксидная пленка – окись алюминия Al_2O_3 более прочная, чем окись хрома Cr_2O_3. При этом стоимость фехралиевых сплавов ниже (никель стоит дорого). В тоже время имеются и негативные последствия этой замены. Фехрали, как правило, гораздо более ломкие чем нихром. Во избежание микротрещин спирали из них можно навивать только в нагретом состоянии (не менее 300 °С). Выдерживают меньшее число рабочих циклов. Однако, созданием современного сплава Kanthal APM (Cr – 22 %, Al – 5,8 %, остальное – Fe) [199…201] фирма Kanthal практически устранила указанные недостатки.

6.1.5.2. ОСОБЕННОСТИ АППАРАТОВ. РЕЖИМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Отличительной особенностью электронагревателей является то, что количество тепловой энергии, передаваемой от нагревательного элемента к воздуху, практически не зависит от термических параметров и скорости воздуха. При постоянстве напряжения сети U и величины собственного сопротивления спирали R величина электрического тока неизменна, в то время как кинетика теплопередачи известным образом влияет на изменение параметров теплоносителя (воды, например).

Тепловая нагрузка Q численно равна мощности греющего элемента N:

$$Q = N = U^2/R_t, \text{ Вт.} \qquad (6.13)$$

С учетом уравнения 6.6 можно записать: $Q = k\,F\,\Delta t_{cp} = U^2/R_t.$ (6.14)

Из выражения 6.14 видно, что уменьшение величины k (↓) при U = const, R_t = const*, F = const однозначно приведет к возрастанию градиента температур Δt_{cp} (↑) между поверхностью нагревателя и воздухом, и, как следствие, увеличению температуры спирали, что, в свою очередь, может привести к разрушению нагревательного элемента. Поскольку уменьшение k главным образом является следствием ухудшения теплоотдачи при снижении скорости воздушного потока, постольку необходимо устанавливать ограничение по величине минимальной скорости воздушного потока.

*изменение величины R (t) несущественно, поскольку температурный коэффициент сопротивления $C_t = R_t/R_{20}$ близок к единице и практически постоянен во всем диапазоне t (табл. 6.4), R_{20} – сопротивление при 20 °С.

На рис.6.50 и 6.51 приведены данные по минимальной скорости воздушного потока v_{min} для открытой спирали и ТЭН, в соответствии с выбранной удельной тепловой нагрузкой $\sigma_т$, а на рис.6.52, в качестве примера, значения температуры оболочки ТЭН при различных значениях $\sigma_т$ и скорости воздуха.

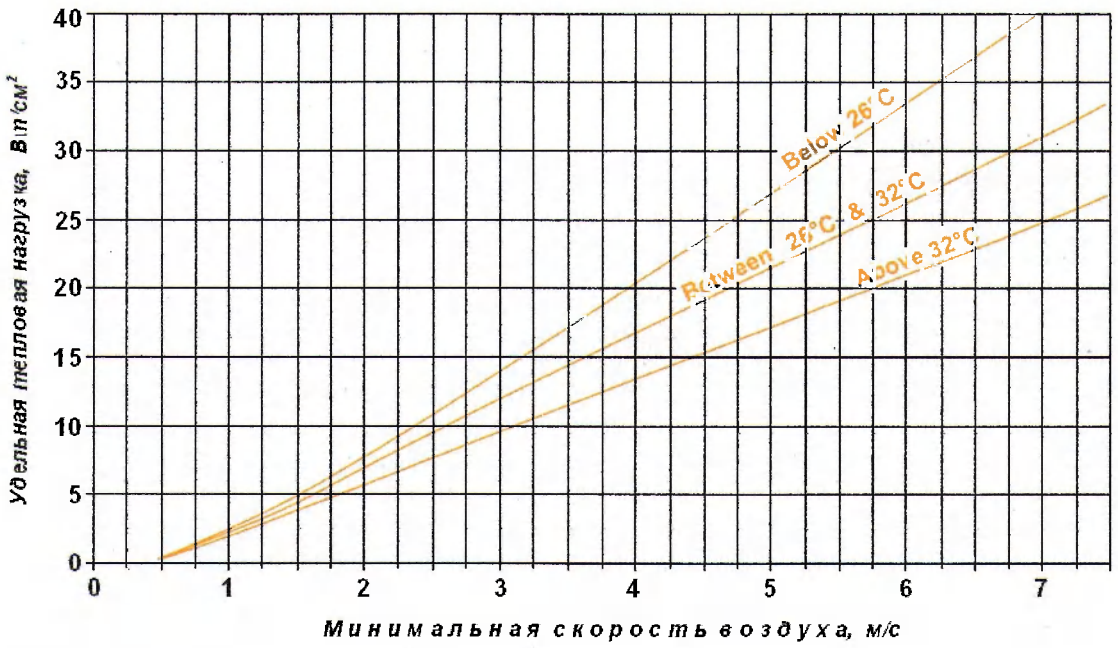


Рис.6.50. Зависимость удельной тепловой нагрузки от минимальной скорости воздуха для открытых спиралей при различных значениях температур нагреваемого воздуха [163].

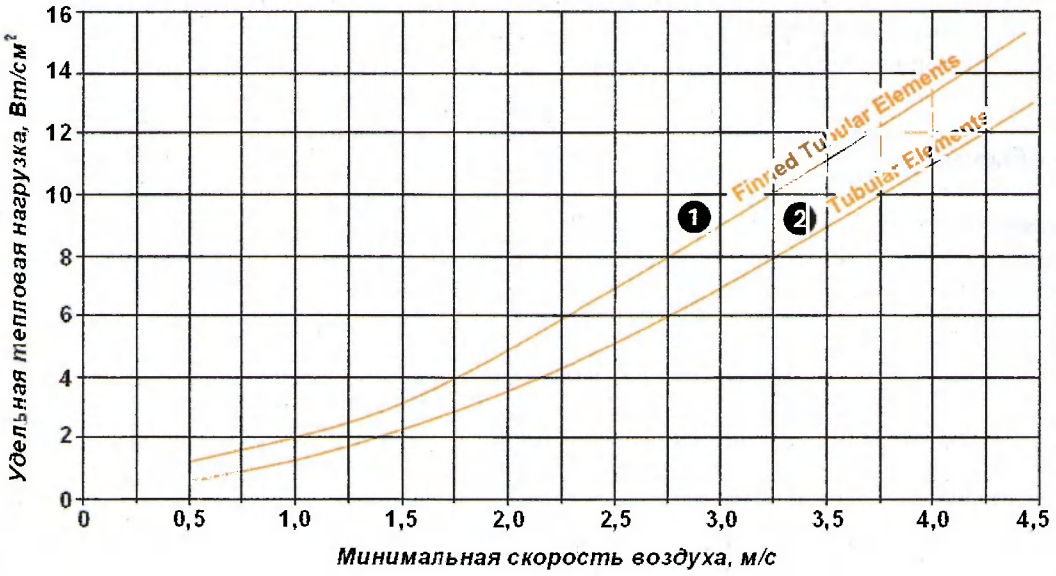


Рис.6.51. Зависимость удельной тепловой нагрузки от минимальной скорости воздуха для оребренных (1) и гладкотрубных (2) ТЭН [163].

Эти данные подтверждают понимание того, что ограничение по скорости воздуха возрастает (v_{min} ↑) от открытых спиралей к оребренным трубчатым элементам и гладкотрубным ТЭН. Так, например, при $\sigma_т$ = 8 Вт/см^2 величина v_{min} изменяется от 2 м/с до 2,75 м/с и 3,25 м/с, соответственно указанному ряду.

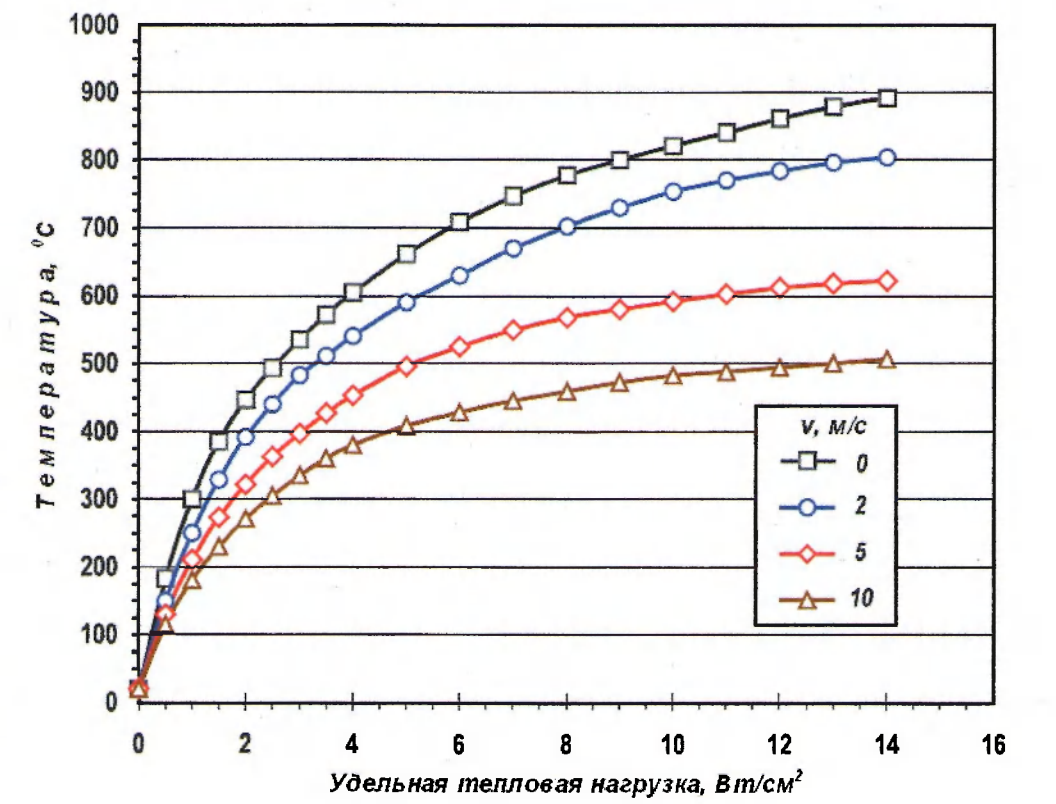


Рис.6.52. Зависимость температуры наружной поверхности гладкотрубного ТЭН от $\sigma_т$ и скорости воздушного потока v при $t_в$ = 20 °С.

Мощность электрического воздухонагревателя выбирается, исходя из требуемого уровня подогрева (разности температур на входе и выходе) Δt определенного расхода воздуха по уравнению теплового баланса:

$$N = Q = C_в \rho_в L_в \Delta t, \text{ кВт}, \qquad (6.15)$$

где $L_в$ – объемный расход воздуха, $м^3/с$.

В соответствии с уравнением 6.15, на рис.6.53. в логарифмических шкалах приведена номограмма определения разности температур воздуха в зависимости от N и $L_в$ (из расчета $C_в \rho_в = 1{,}25$ кДж/$м^3$·К).

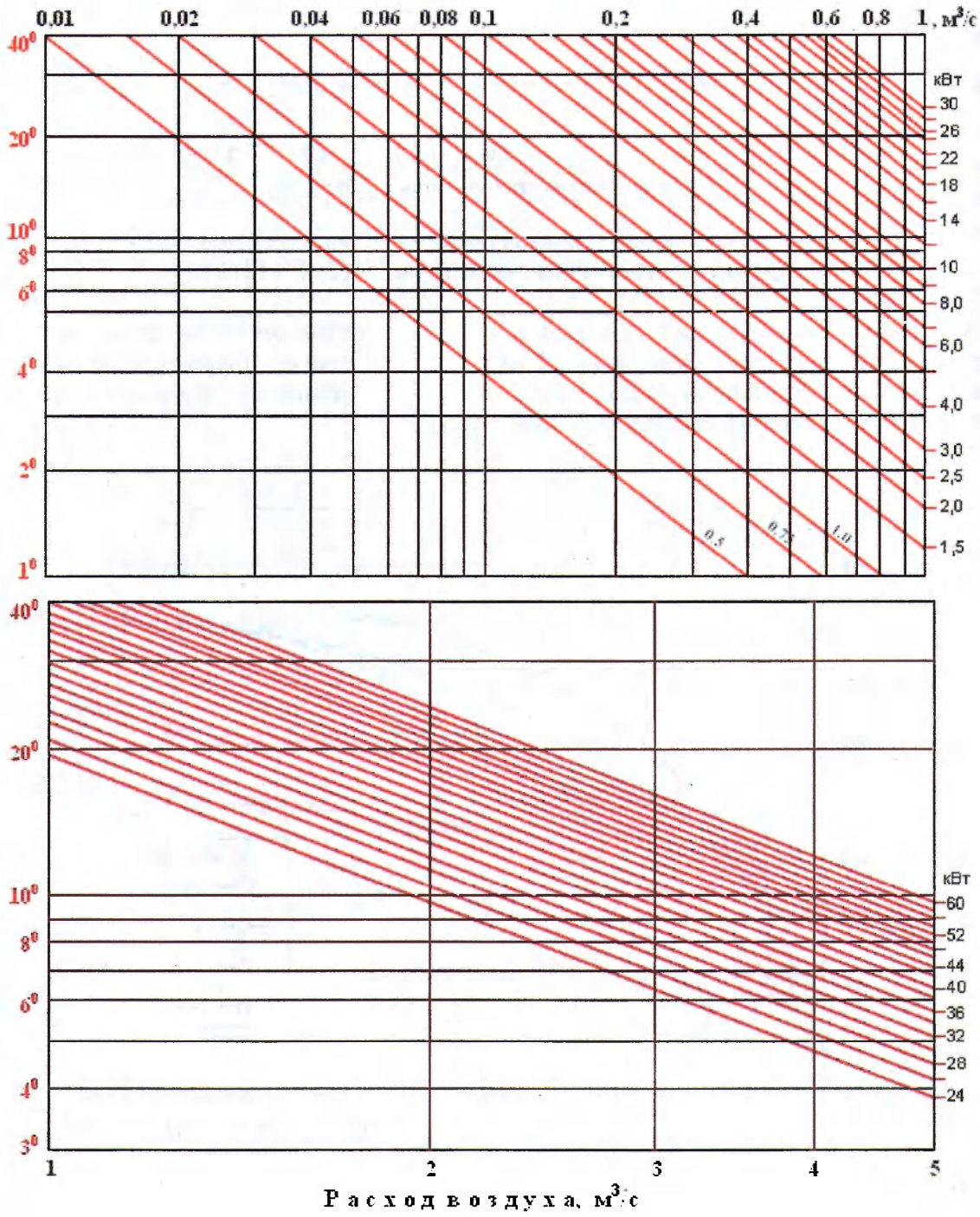


Рис.6.53. Номограмма определения разности температур для N = 1,5…60 кВт и $L_в$ = 0,01…5 $м^3/с$.

Мощность нагревателя связана с величиной $\sigma_т$ и геометрическими параметрами спирали выражением:

$$d = \sqrt[3]{[(4/\pi^2)\,(r_{20}\,N^2/10\,\sigma_т\,U^2)]},\ мм, \qquad (6.16)$$

$$\text{или}\quad d = \sqrt[3]{0{,}04\,(r_{20}/\sigma_т)\,(N/U)^2},\ мм, \qquad (6.16')$$

где d и L – диаметр и активная длина проводника, см.

Удельная тепловая нагрузка, отнесенная к величине поверхности проводника

$$\sigma_т = N/\pi dL,\ Вт/см^2. \qquad (6.17)$$

Относительное сопротивление $r_{20} = R_{20} \cdot 100\,\pi d^2/4L$, Ом·мм^2/м, (6.18)

$R_{20} = U^2/N$, Ом, (при 20 °С).

Пример: для воздухонагревателя мощностью N = 1 кВт (U = 220В) и $\sigma_т$ = 8 Вт/см^2 при выборе материала спирали из сплава Kanthal D, для которого r_{20} = 1,35 Ом·мм^2/м, расчетная величина d = 0,52 мм (6.16). Для ближайшего из типоразмерного ряда значения d = 0,55 мм [200], расчетная активная длина проводника L = 7,2 м (6.17).

Кроме теплотехнических характерик, интерес представляют также данные по аэродинамическому сопротивлению ΔP (рис.6.54). Наименьшее значение величины ΔP характерно для открытых элементов.

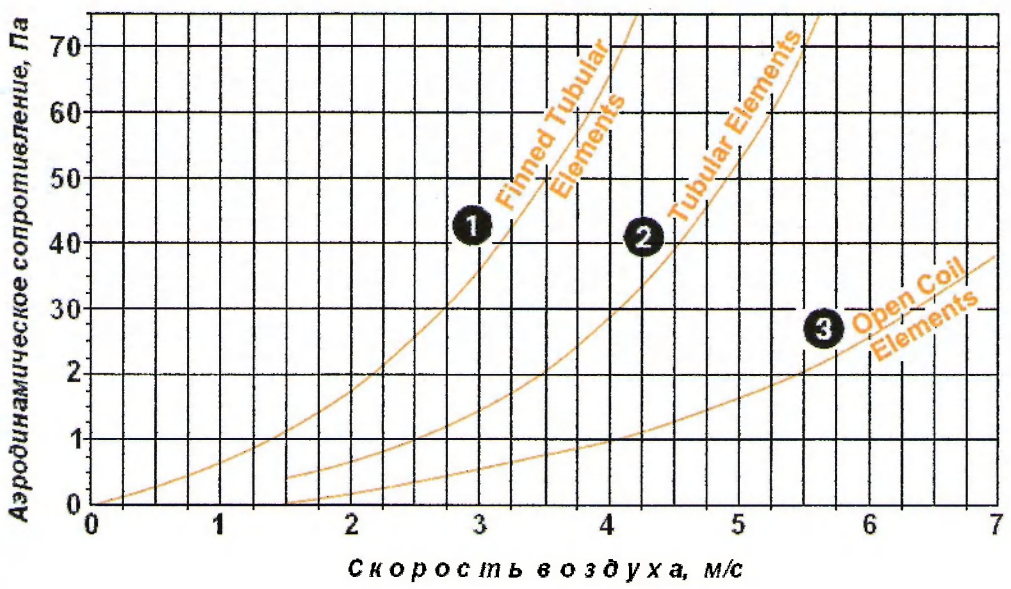


Рис.6.54. Зависимость аэродинамического сопротивления от скорости воздуха для различных нагревательных элементов: 1 – оребренные ТЭН; 2 – гладкотрубные ТЭН; 3 – открытые спирали.

Ресурс работы открытых элементов меньший, чем у ТЭН, однако стоимость их существенно ниже. Проволочная спираль ТЕНов, запресованная наполнителем трубки, защищена от механических воздействий и от окисления, в связи с отсутствием контакта с воздухом. В то же время открытые элементы обладают меньшим временем разгона (рис.6.55), т.е. менее инерционны.

Воздухонагреватели представляют собой секции с набором открытых спиралей либо ТЭН. Нагревательные элементы могут быть встроены непосредственно в воздуховоды. На рис.6.56…6.59 показаны различные аппараты, используемые как в центральных, так и в автономных кондиционерах.

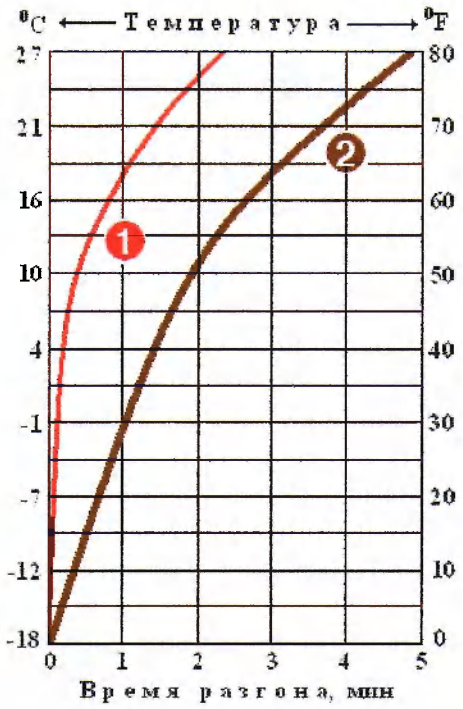


Рис.6.55. Кривые разгона:
1 – открытые спирали; 2 – ТЭН.

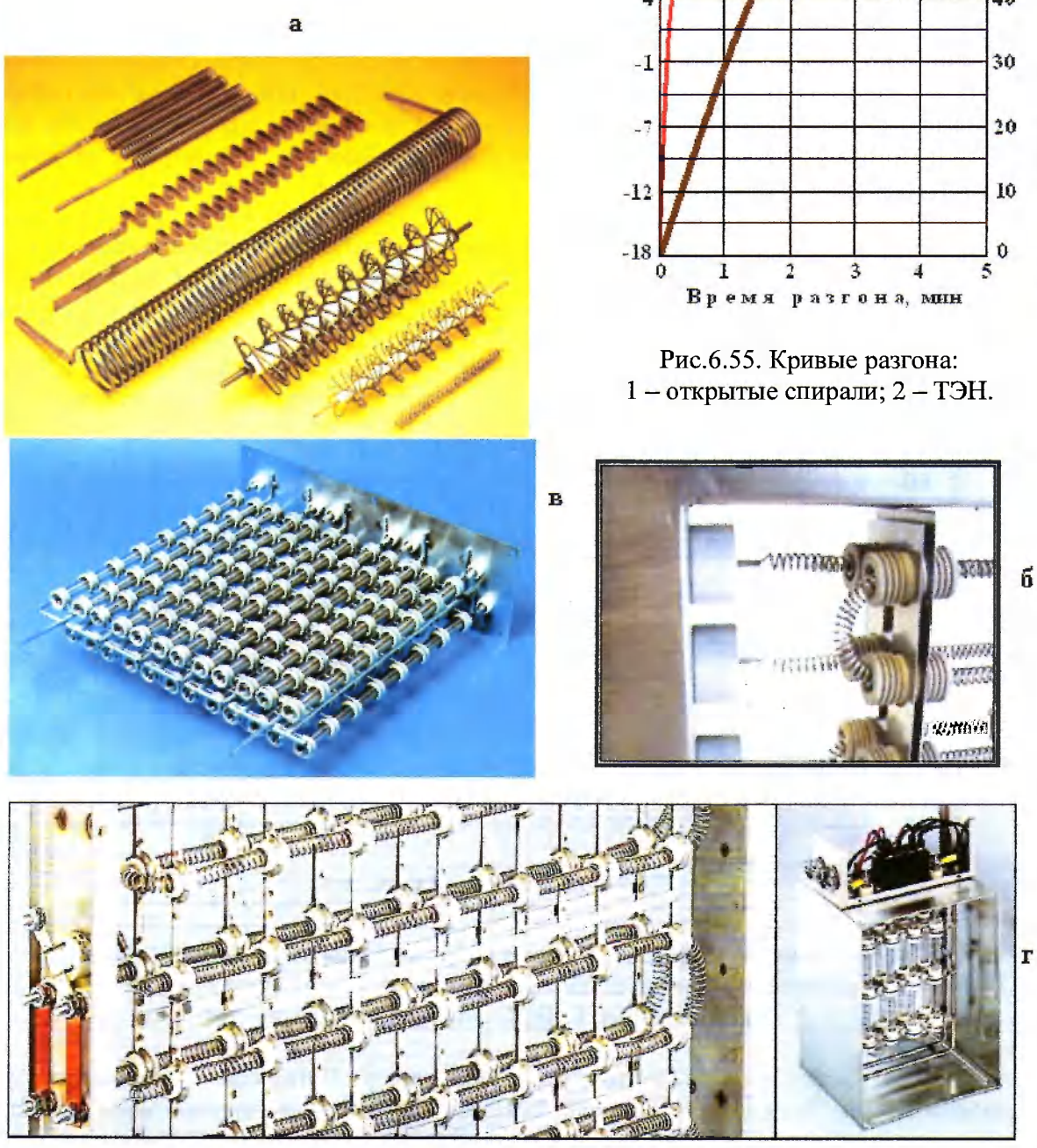
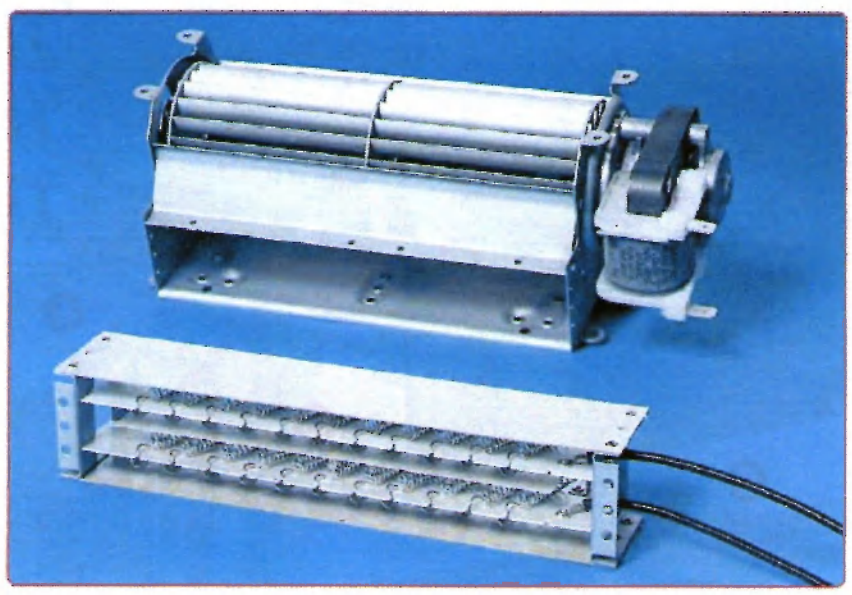


Рис.6.56. Воздухонагреватели с открытыми нагревательными элементами: фотографии пластин и спиралей – а, узла крепления спиралей на изоляторах – б, нагревательного блока в сборе – в, и аппаратов – г.

а



б

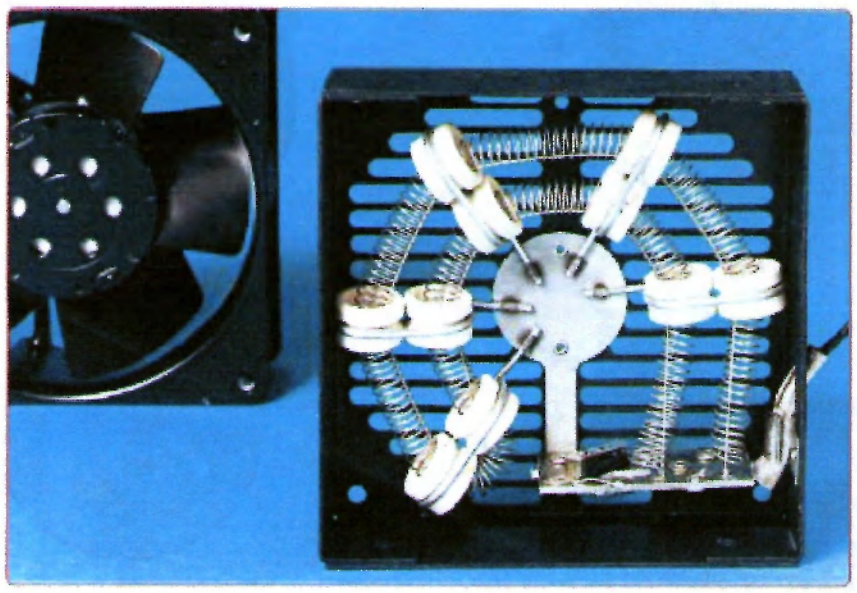


Рис.6.57. Фэикойлы с открытыми спиралями:
с диаметральным (а) и осевым вентилятором (б).

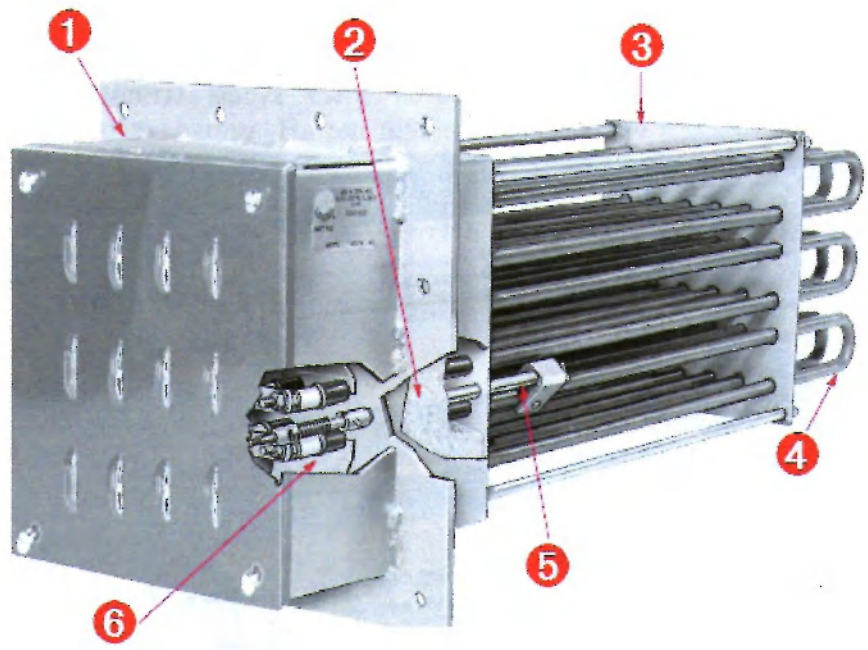








Рис.6.58. Высокотемпературные промышленные блоки нагрева воздуха с гладкотрубными ТЭН:

1 – комутационная коробка с вентиляционными отверстиями; 2 – минеральная изоляция; 3 – опорная пластина из толстой нержавеющей стали (6 мм); 4 – ТЭН с оболочкой из сплава инколой; 5 – датчик контроля температуры повехности (термопара); 6 – пластина крепления ТЭН.

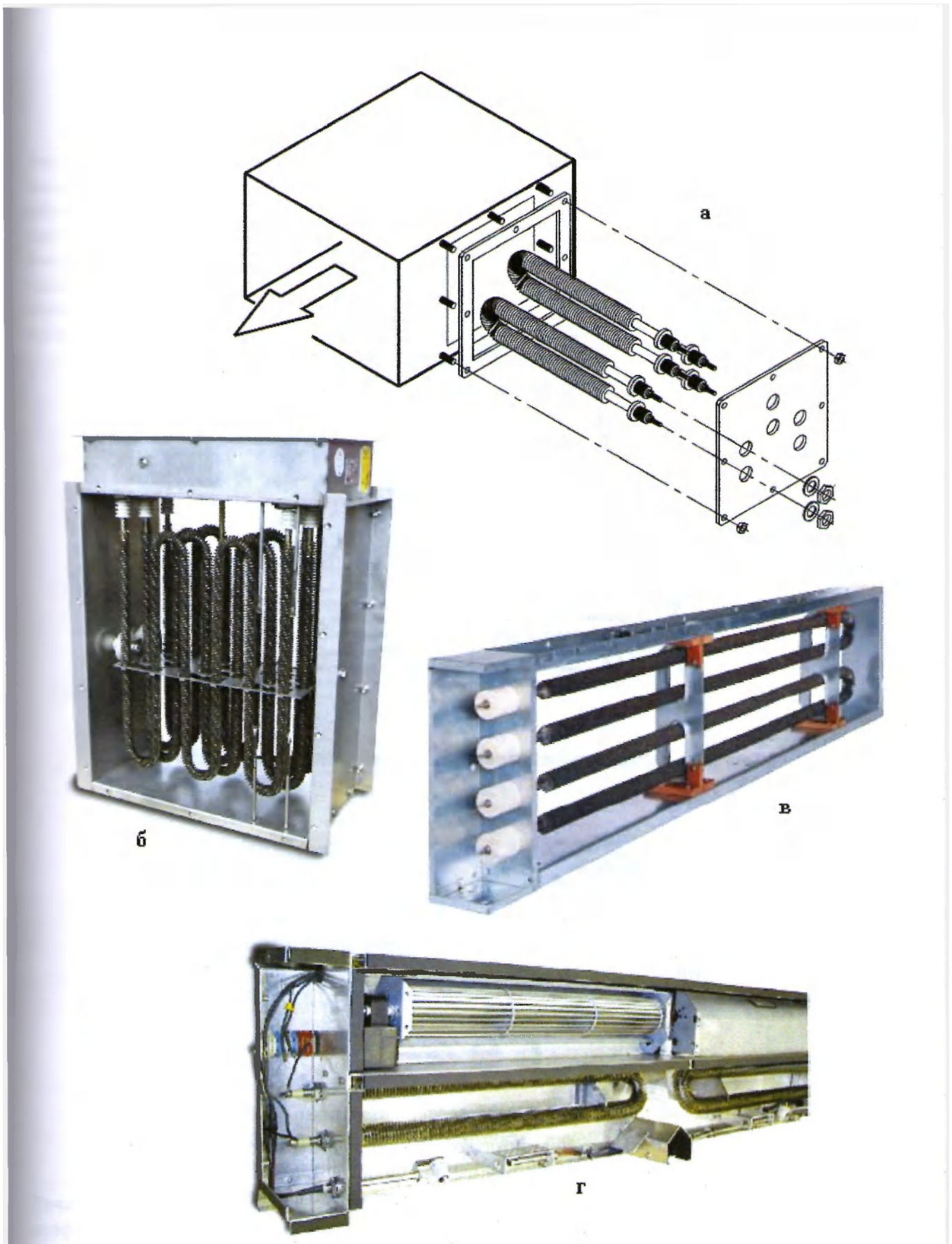


Рис.6.59. Различные варианты размещения низкотемпературных оребренных ТЭН в СКВ:
а – непосредственно в воздуховоде; б, в – вертикальный и горизонтальный блоки;
г – внутренний блок сплит-системы.



Рис.6.60. Приточная воздухонагревательная установка CIRRUS (Fastlane Ventilation Equipment Limited), состоящая из секции с ТЭНами, кассетного фильтра и центробежного вентилятора.

6.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСУШИТЕЛИ

В таких помещениях, как склады, архивы, книгохранилища, а также в плавательных бассейнах и других объектах, где возникает необходимость осушения воздуха без его охлаждения, применяют механические осушители, производительностью 5…5000 кг влаги/сутки. Эти установки представляют собой обычные парокомпрессорные холодильные машины, в которых теплообменные аппараты (испаритель-воздухоохладитель и воздушный конденсатор-воздухонагреватель) расположены по ходу движения воздушного потока (рис.6.61…6.66). Воздух, проходя через теплообменники, последовательно обрабатывается: охлаждается, осушается (линия ВМ) и нагревается без изменения влагосодержания – MN (рис.6.61).

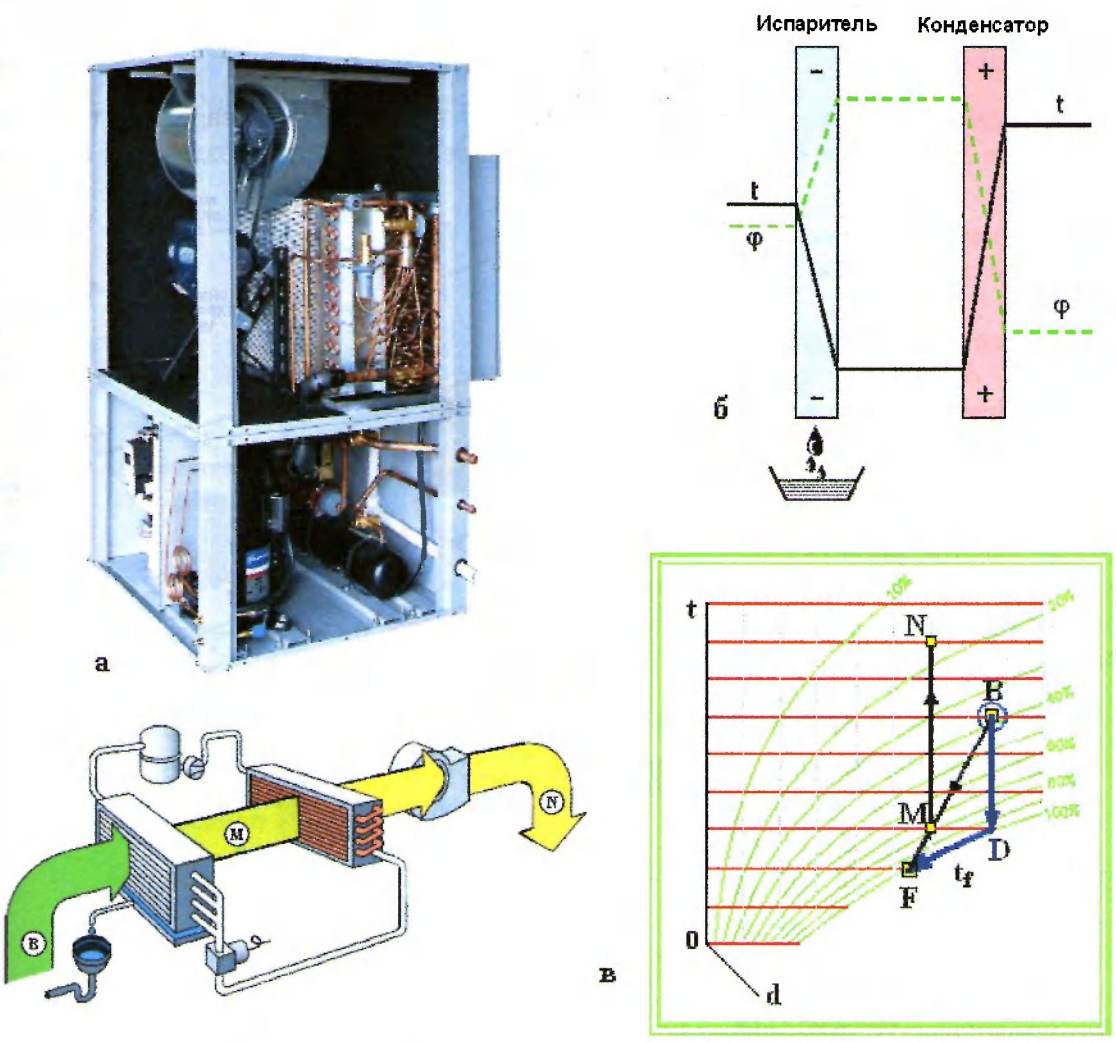


Рис.6.61. Конструкция и схема механического осушителя (а),
картина распределения температуры и относительной влажности воздуха (б),
изображение в d,h-диаграмме процессов обработки воздуха (в).

Точка M отвечает реальным условиям протекания процесса в воздухоохладителе и при коэффициенте эффективности* $\eta < 1$ несколько отстоит от точки F (идеализированного состояния, определяемого при $\eta = 1$).

*коэффициент эффективности определяется как $\eta = (t_н - t_к)/(t_н - t_f)$, индексы: н, к – характеризуют начальное и конечное состояние воздуха (на рис.6.61: н – т.В, к – т.М). Значение $\varphi_к$: 90…95 % при 4-рядном теплообменнике; 96…98 % при 6 (8) рядах.

Производительность осушителя по влаге:

$W_0 = G_в\ \Delta d$, кг/с (на рис.6.61: $\Delta d = d_в - d_м$)) либо $W_0 = Q_{скр}/q$. (6.1

Используя коэффициент влаговыпадения ζ или соотношение SHR, можно получить следующие выражения для величины W_0:

$$W_0 = Q_0/q\ [(\zeta - 1)/\zeta], \quad (6.19$$

$$W_0 = Q_0/q\ (1- SHR), \quad (6.1$$

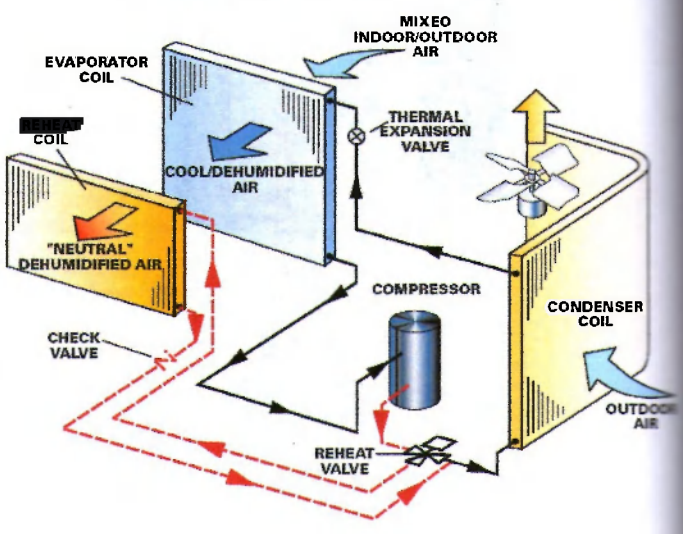
где Q_0 – холодопроизводительность установки ($Q_0 = Q_{эв}$), кВт; q – количество теплоты, выделяемое при конденсации 1 кг влаги (при $t > 0$ $q = r_0$, $q = 2500$ кДж/кг).

Знание величины ζ либо SHR позволяет (аналогично 1е, см. § 5.1) вести расчет полного теплообмена (а также массообмена), по эмпирическим зависимостям, полученным в условиях сухого конвективного теплообмена [95].

Поскольку теплота конденсации $Q_к > Q_0$: $Q_к = Q_0 + N_i$, (6.2

где N_i – индикаторная мощность компрессора), то в стандартном варианте температура воздуха после механического осушителя всегда выше температуры воздуха на входе (рис. 6.61 ($t_N > t_B$)).

Ниже показаны схемы механического осушителя, в которых, в отличие от стандартного варианта, применен секционированный конденсатор при размещении одной из секций вне потока обрабатываемого воздуха (рис.6.62…6.66). Эти схемы используются для регулирования температуры воздуха после осушителя, в случае необходимости осушения воздуха в объекте без изменения его температуры либо осушения и охлаждения.



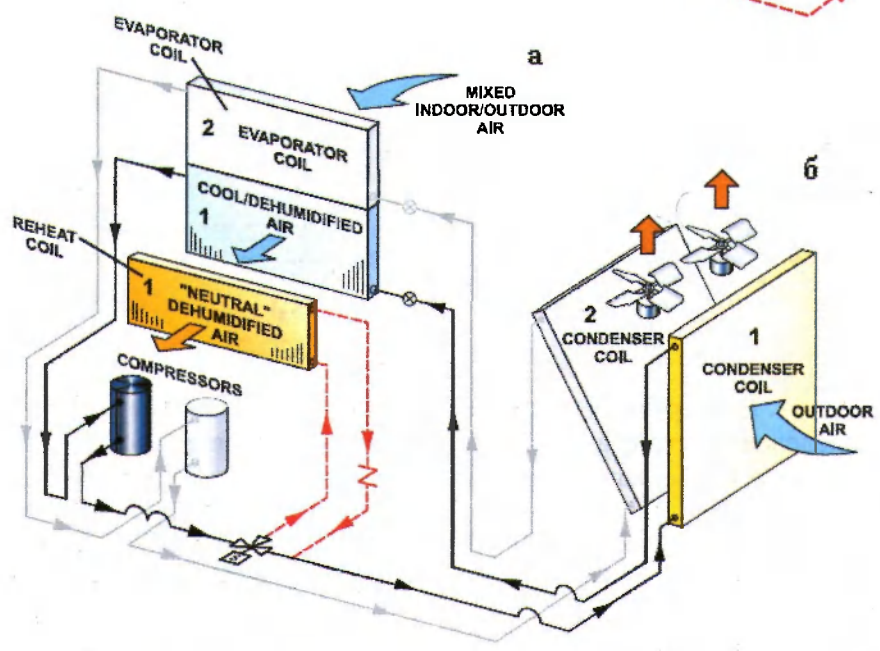


Рис.6.62. Схемы механического осушителя с выносной секцией конденсатора Humiditrol Dehumidification Systems (Lennox):
а – одноконтурная; б – двухконтурная (с 2-мя компрессорами).

Система Humiditrol компании Lennox (рис.6.62б) представляет собой двухконтурную холодильную машину и имеет бо́льшие возможности регулирования параметров воздуха на выходе, обеспечивает режим кондиционирования.

Тот же принцип разделения конденсатора холодильной машины на секции применяется для осушителей воздуха плавательных бассейнов, при этом одна часть конденсатора используется для нагревания приточного осушенного в испарителе воздуха, а другая часть для нагревания воды бассейна, рис.6.64 (CALOREX, DESERT AIRE и др.).



Рис.6.63. Выносной конденсатор Desert Aire.

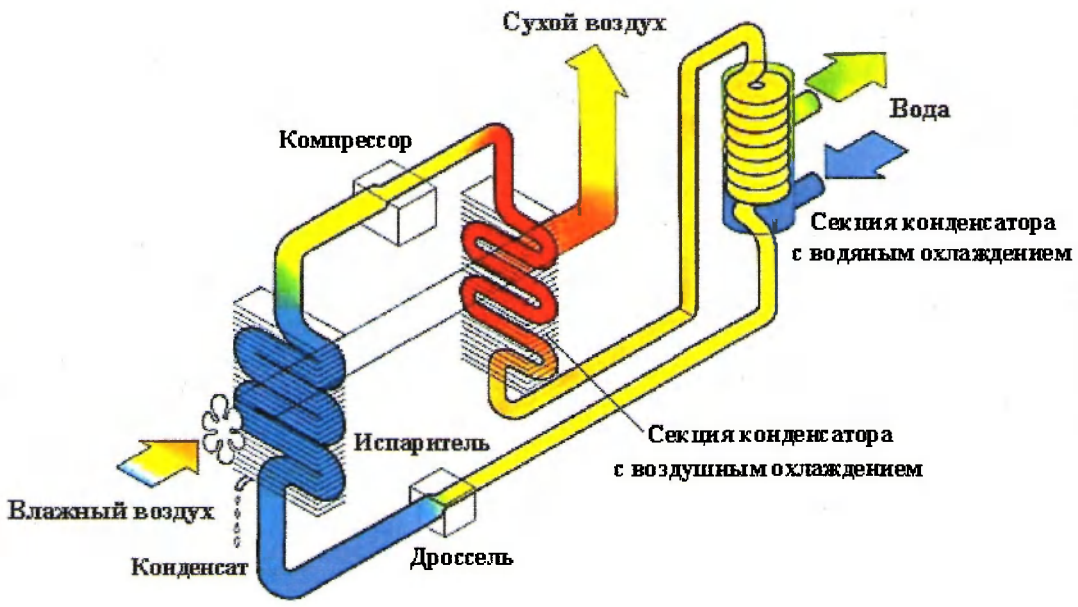


Рис.6.64. Принципиальная схема системы Variheat (Calorex).

На рис.6.65 приведена схема моноблочного механического осушителя Delta (Calorex) по системе Variheat с водяным теплообменником LPHW (Low Pressure Hot Water) – секцией конденсатора и разделением воздушных потоков. В данном двухвентиляторном аппарате созданы необходимые условия для регулирования параметров приточного воздуха при работе с частичной или полной рециркуляцией воздуха помещения бассейна, различным алгоритмом включения секций, как конденсатора, так и испарителя. При этом, кроме основного режима осушения, могут быть осуществлены: режим кондиционирования воздуха (при повышенных тепловых нагрузках от солнечной радиации, поступающей через значительную площадь остекления помещения бассейна), а также экономичный «ночной» режим.

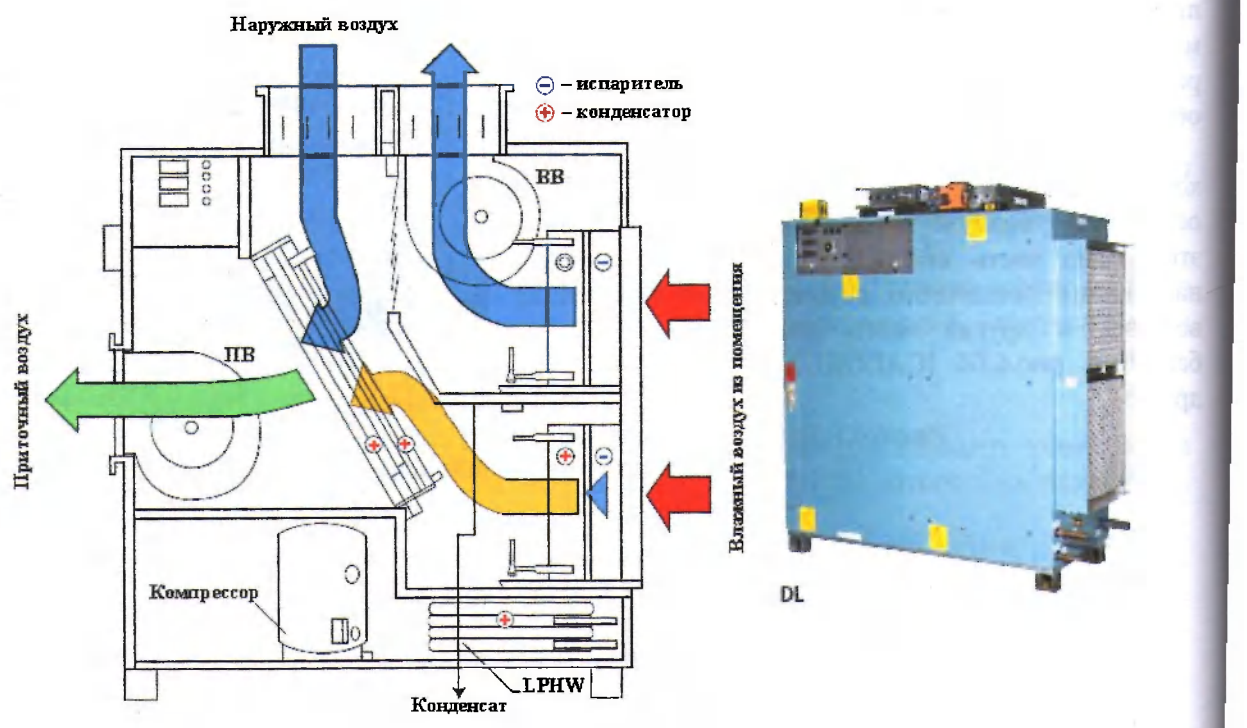


Рис.6.65. Осушитель Delta (Calorex):
ПВ, ВВ – приточный и вытяжной вентиляторы.

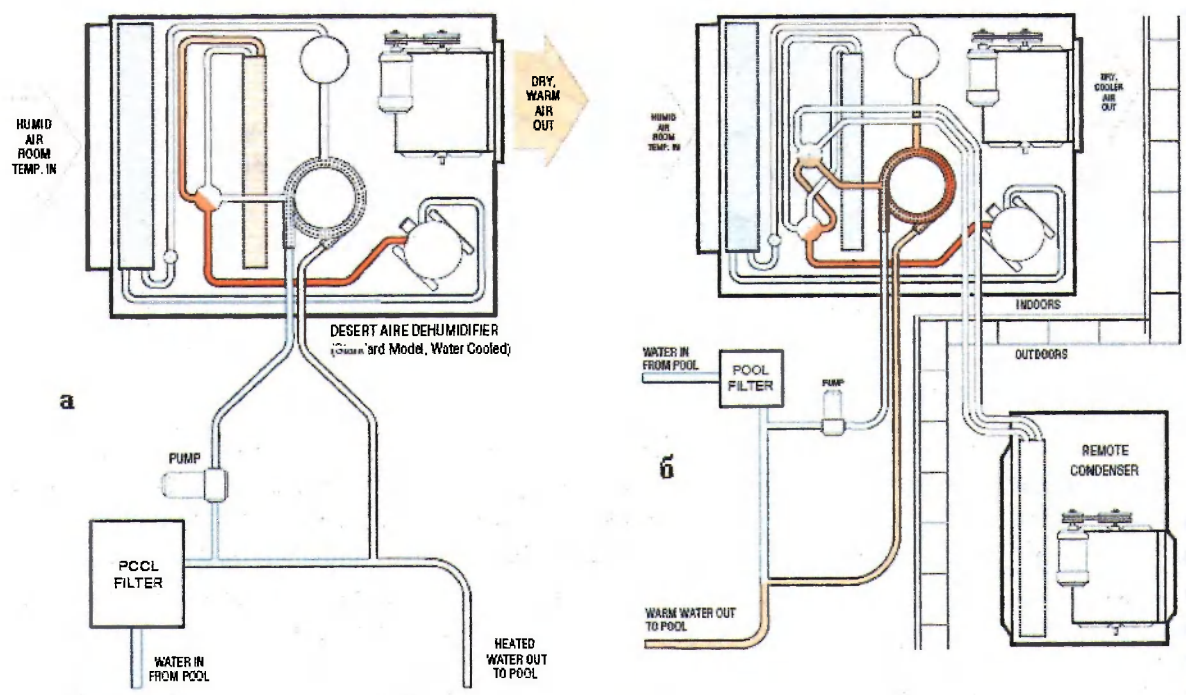
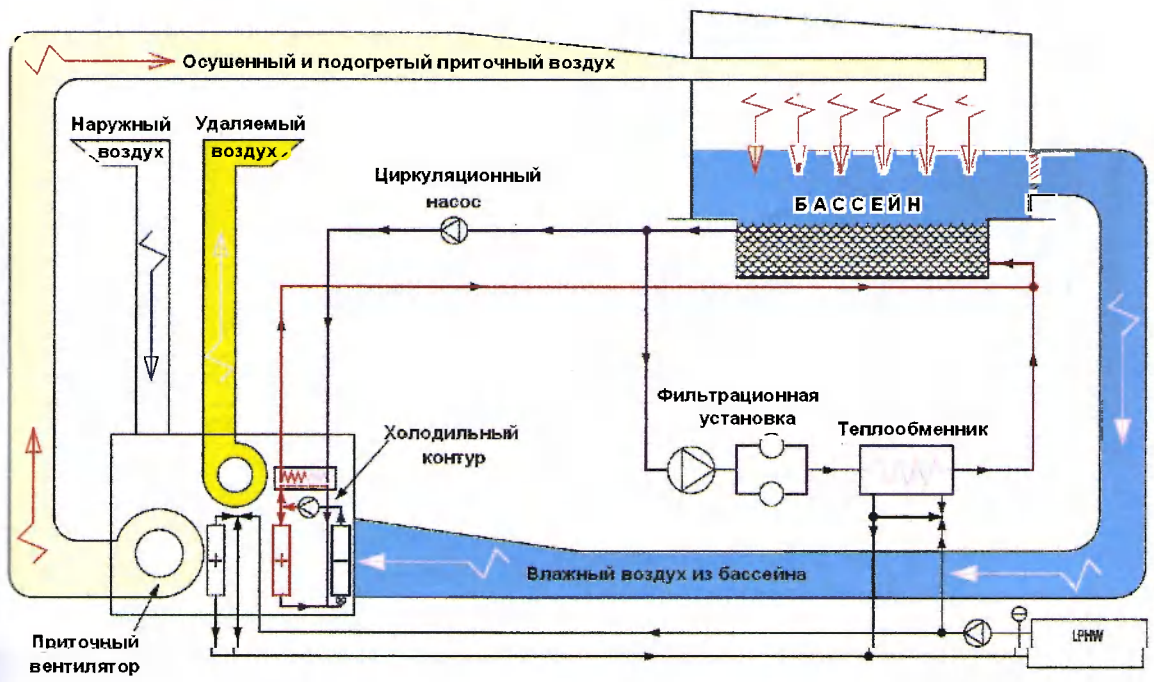


Рис.6.66. Схема механического осушителя (Desert Aire)
с отводом части теплоты конденсации на нагревание воды (а)
и выносным воздушным конденсатором и нагреванием воды (б).

На рис.6.67…6.71, 6.74 приведены схемы систем механического осушения комфортного (плавательный бассейн) и технологического назначения: участки сушки морепродуктов, древесины, камеры созревания сыра.



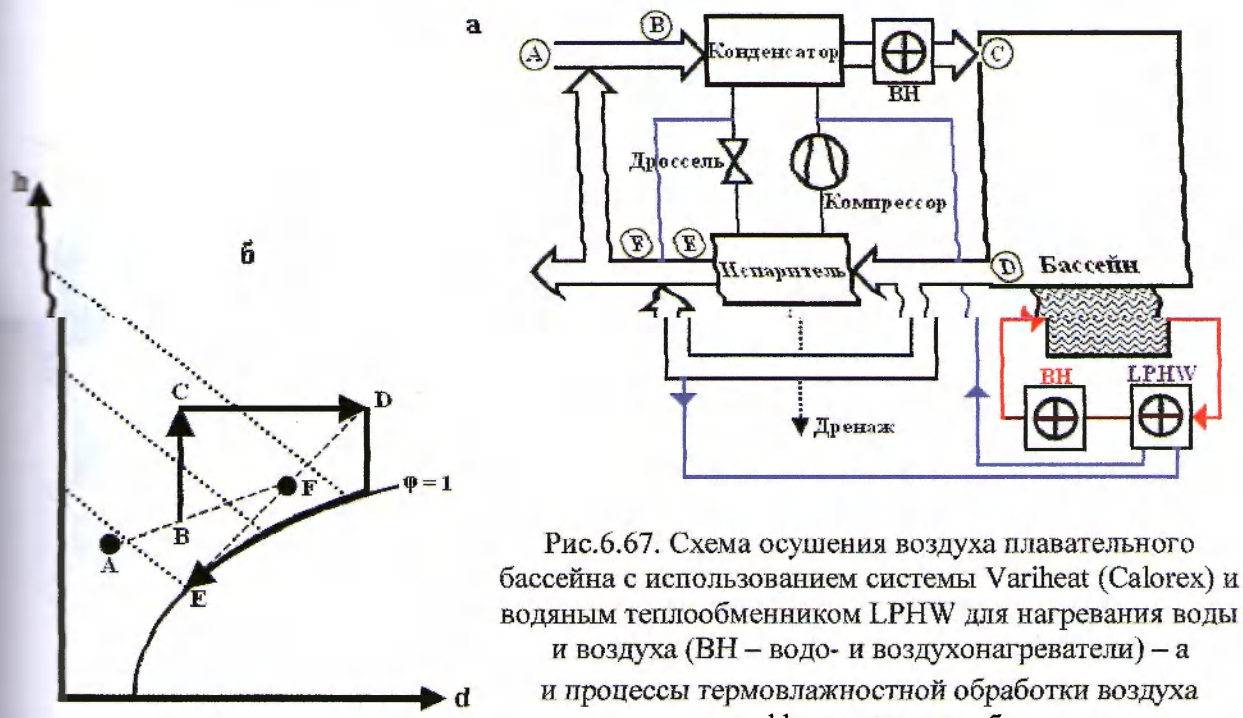


Рис.6.67. Схема осушения воздуха плавательного бассейна с использованием системы Variheat (Calorex) и водяным теплообменником LPHW для нагревания воды и воздуха (ВН – водо- и воздухонагреватели) – а и процессы термовлажностной обработки воздуха в d,h- диаграмме – б.

Как правило, часть рециркуляционного воздуха (≈ 20 %) из помещения бассейна (на диаграмме – т. D) охлаждается и осушается в воздухоохладителе (испарителе холодильной машины, т. Е). Другая часть этого потока (≈ 80 %) пропускается через обводной канал (байпас) и смешивается с первой частью (до состояния т. F) и с наружным воздухом (т. А) до состояния т. В. Затем этот воздух нагревается *в конденсаторе холодильной машины*, а *при необходимости дополнительно в* воздухонагревателе ВН, до рекомендуемой температуры состояния приточного воздуха (т. С).

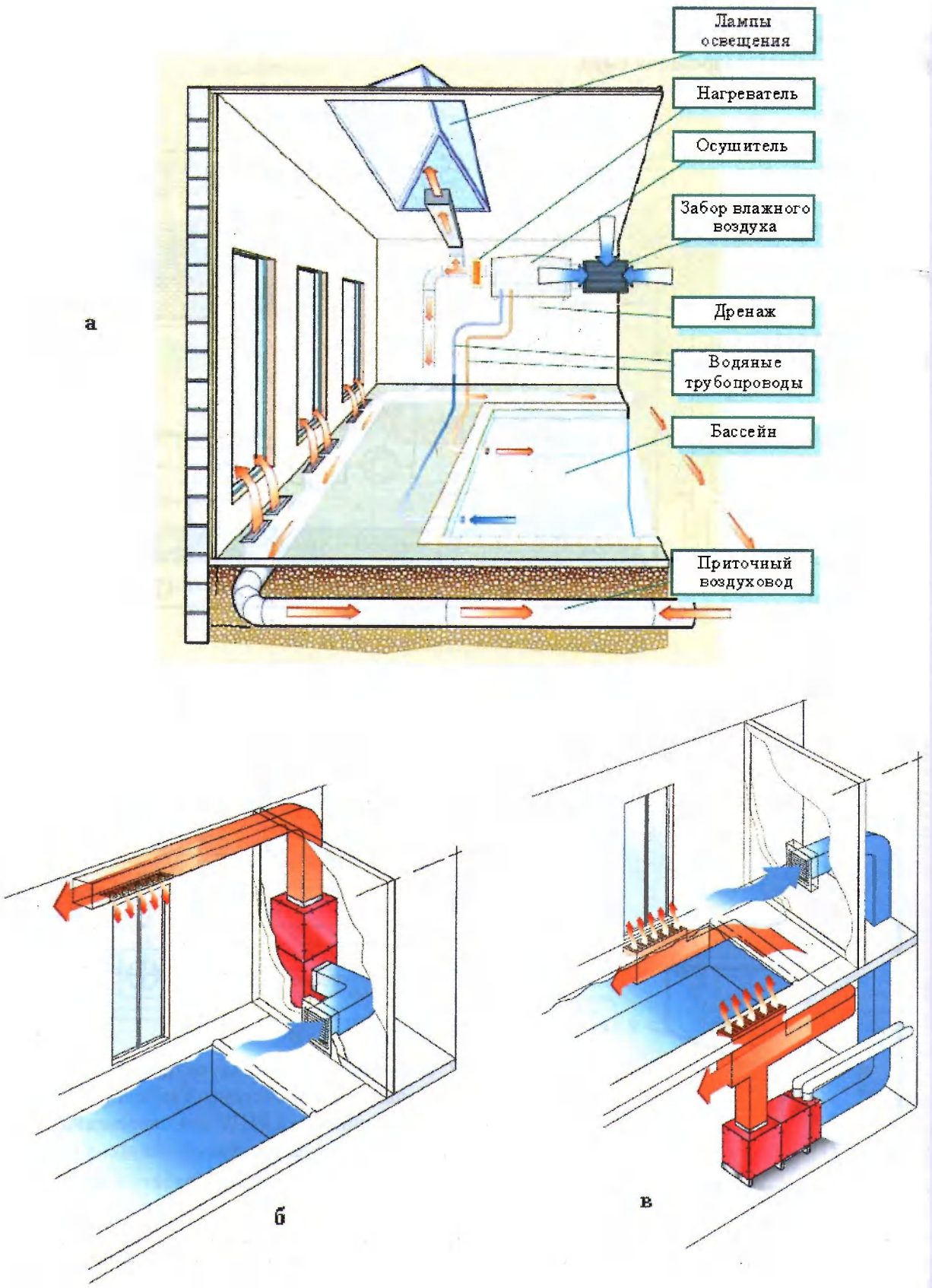
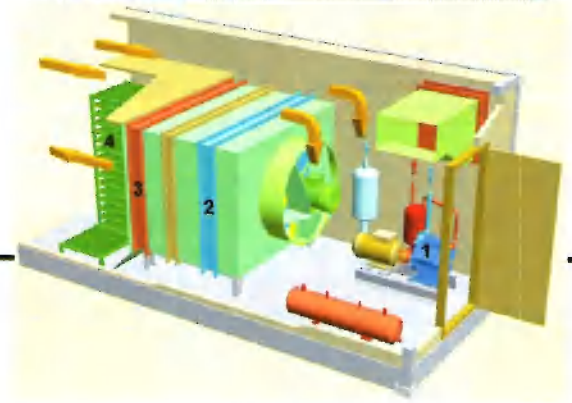


Рис.6.68. Аксонометрическая технологическая схема осушения воздуха Variheat (Calorex) плавательного бассейна (а) при раздаче воздуха «сверху» (б) и «снизу» (в).







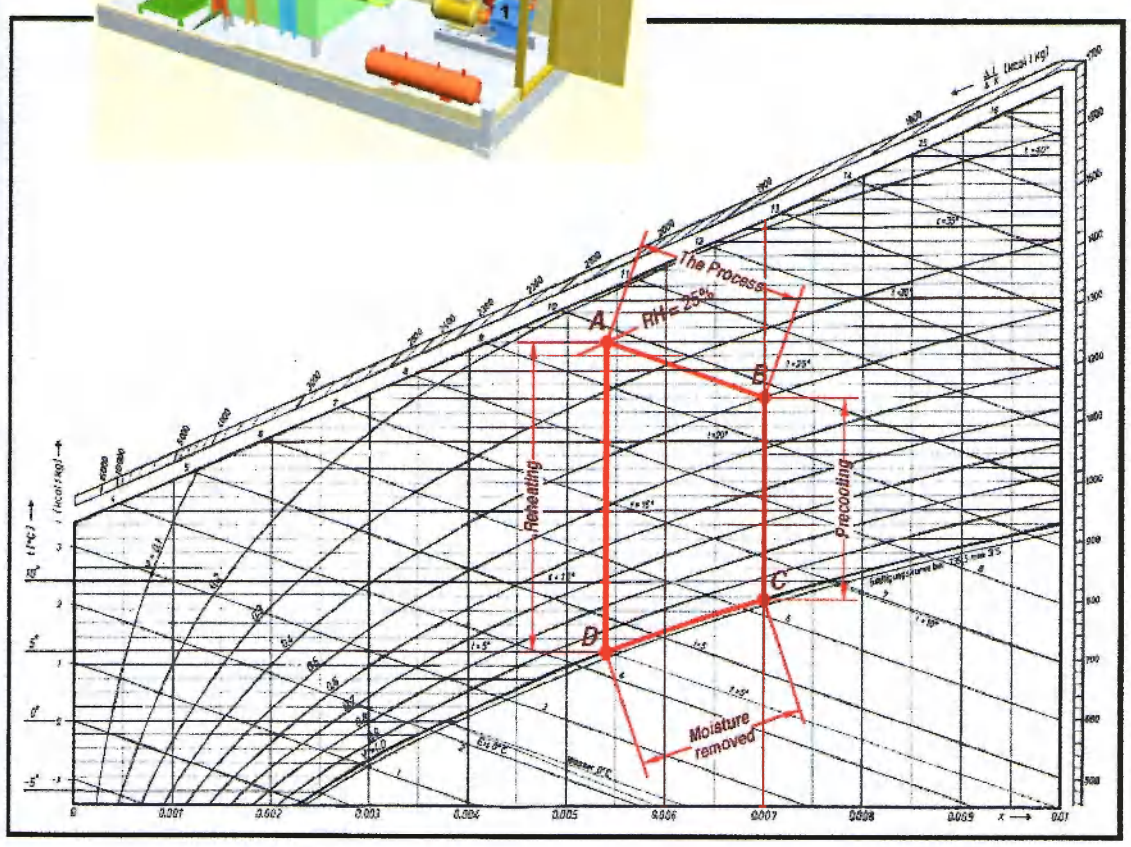


Рис.6.69. Стандартный механический осушитель в цеху для сушки морепродуктов:
1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – испаритель; 4 – стеллажи с продуктом,
и процессы термовлажностной обработки воздуха в d.h- диаграмме:
AB – процесс сушки продукта; BCD – охлаждение и осушение воздуха;
DA – нагревание воздуха в конденсаторе.

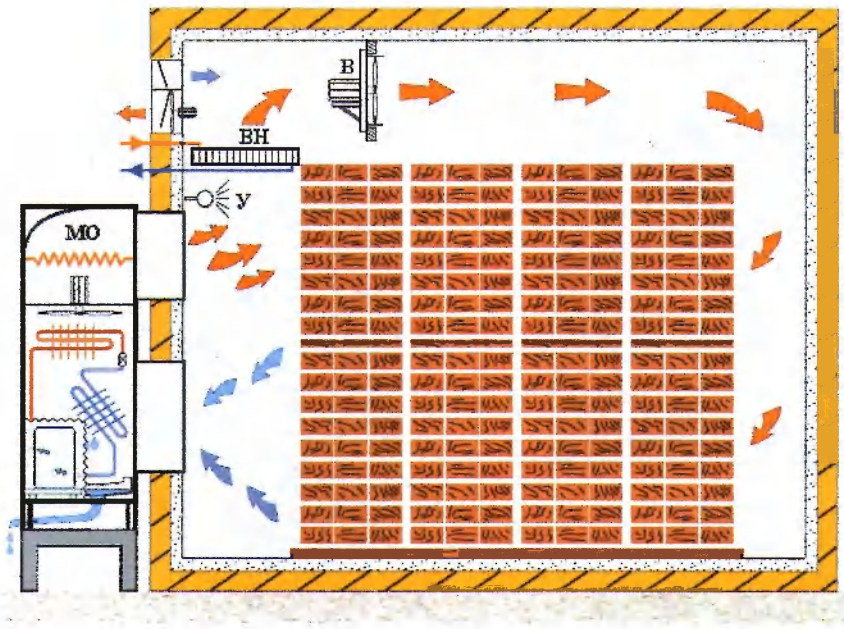


Рис.6.70. Сушка древесины с механическим осушителем (МО).





Рис.6.71. Камеры вяления мяса, созревания сыра и вина – объекты осушения.



Производительность механических осушителей зависит от параметров осушаемого воздуха и возрастает при больших значениях φ и t (рис.6.72, 6.73).

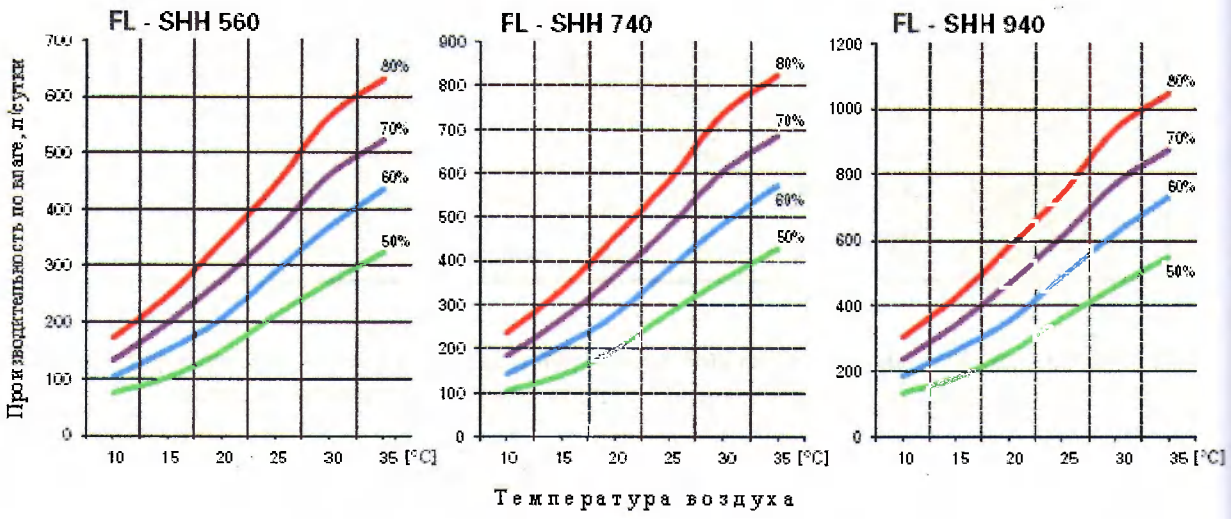


Рис.6.72. Производительность осушителей FL.

Наряду со стационарными установками выпускаются мобильные (передвижные) механические осушители (Calorex Porta Dry, Dantherm CDT и др.), как правило, производительностью до 110 кг/сутки по удаляемой влаге.







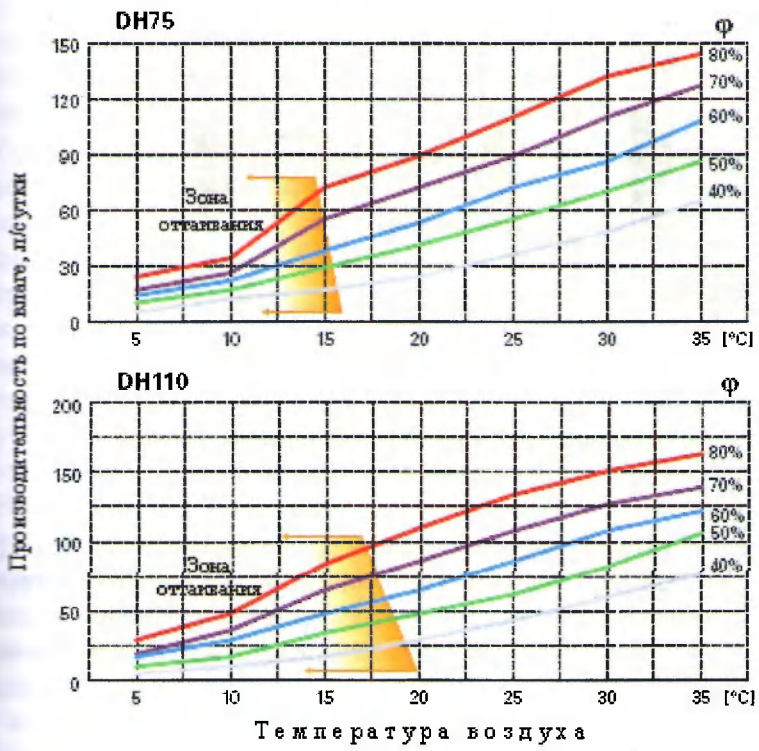


Рис.6.73. Производительность осушителей Calorex: DH 110/DH75.

Мобильные установки применяются в экспозиционных залах музеев, небольших частных бассейнах (рис.6.74) и прочих объектах.





Рис.6.74. Фотографии объектов с использованием мобильных осушителей.

В качестве механических осушителей могут быть использованы и воздушные холодильные машины ВХМ с турбоагрегатом: компрессор–детандер (рис.6.75) [32, 33].

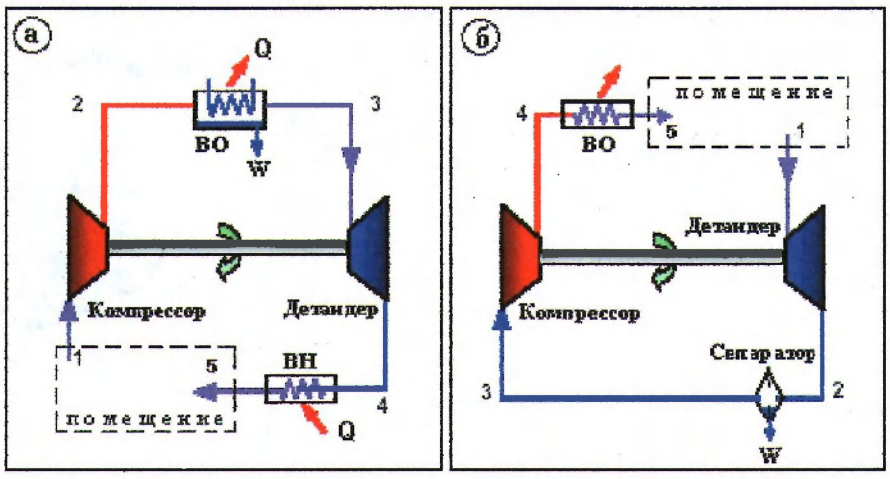


Рис.6.75. Схемы ВХМ для осушения воздуха, работающие в цикле:
а – "сжатие - расширение"; б – "расширение - сжатие".

По первой схеме с целью повышения температурного уровня точки росы влажный воздух сжимается в компрессоре (процесс 1-2) до давления 0,2…0,4 МПа (2…4 бар). Затем в теплообменнике ВО за счет низкопотенциального источника (например, в судовых условиях – забортная вода) он охлаждается до $t < \tau$, где происходит конденсация влаги W и ее отвод (2-3). В детандере воздух расширяется (3-4) до необходимого давления $P_{изб.}$ (несколько больше атмосферного, для преодоления сопротивления воздушного тракта), а в теплообменнике ВН нагревается (4-5) до требуемой температуры.

На рис.6.76, в качестве примера, показано, что при сжатии атмосферного влажного воздуха с температурой точки росы 0 °С до избыточного давления 3 бар значение τ увеличивается до 20 °С.

Осушение воздуха по второй схеме происходит за счет расширения воздуха в детандере ниже атмосферного давления, что приводит к понижению его температуры $t < \tau$ (1-2) и конденсации влаги. Конденсат отводится в сепараторе (2-3), а осушенный воздух сжимается в компрессоре до $P_{изб}$. В теплообменнике ВО воздух охлаждается (4-5).

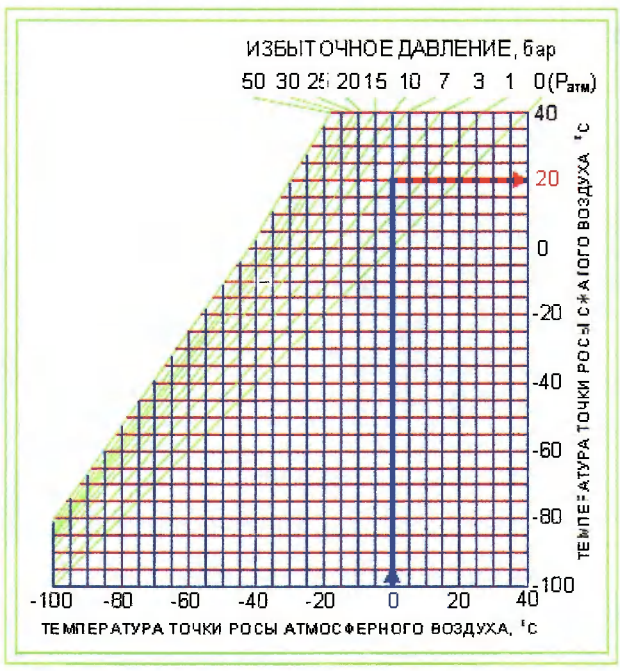
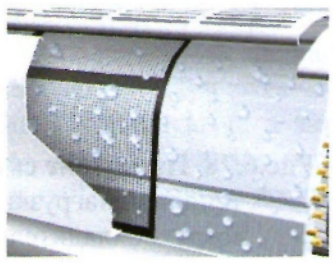


Рис.6.76. Зависимость температуры точки росы влажного воздуха от давления.

Latent heat is more difficult remove than sensible heat...

6.2.1. АДАПТИВНЫЕ ЦИКЛЫ ОСУШЕНИЯ

- Adaptive Dedicated Dehumidification Cycles -



Конденсационный способ осушения воздуха широко используется в местных автономных и неавтономных кондиционерах, поверхностных воздухоохладителях приточных установок, а также во внутренних блоках сплит-систем.

Однако следует иметь в виду, что в традиционном исполнении эта техника характеризуется цикличностью работы холодильной машины (включением и отключением компрессора) при непрерывной работе приточных вентиляторов. Такой режим работы, при существенной влажностной нагрузке помещения (SHR < 0,8) и управлении по заданной температуре, в случае, когда время работы компрессора составляет ≤ 50 % времени цикла, может привести к уменьшению осушающей способности. Последнее объясняется тем, что в период отключения компрессора происходит испарение сконденсированной влаги с поверхности воздухоохладителя в омывающий воздушный поток приточного воздуха. Другими словами: происходит возврат части влаги, которая не была отведена с рабочей поверхности через дренажное устройство.

На рис.6.77, 6.78 приведены результаты исследования Hugh I. Henderson [181]. Удаление влаги происходит с того момента времени t_0, когда на поверхности ребер и труб (в межреберном пространстве) воздухоохладителя образуется определенное ее количество M_0 и влага начинает стекать в поддон, а затем отводится посредством дренажа. Т.е. по прошествии t_0 количество образующегося конденсата M_L соответствует количеству влаги, отводимой через дренаж, и, таким образом, определяет полезную осушающую производительность аппарата. В период времени, когда компрессор холодильной машины отключен, а приточный вентилятор работает, начальная (накопительная) масса влаги M_0 в адиабатическом процессе испарения будет возвращена в приточный воздух.

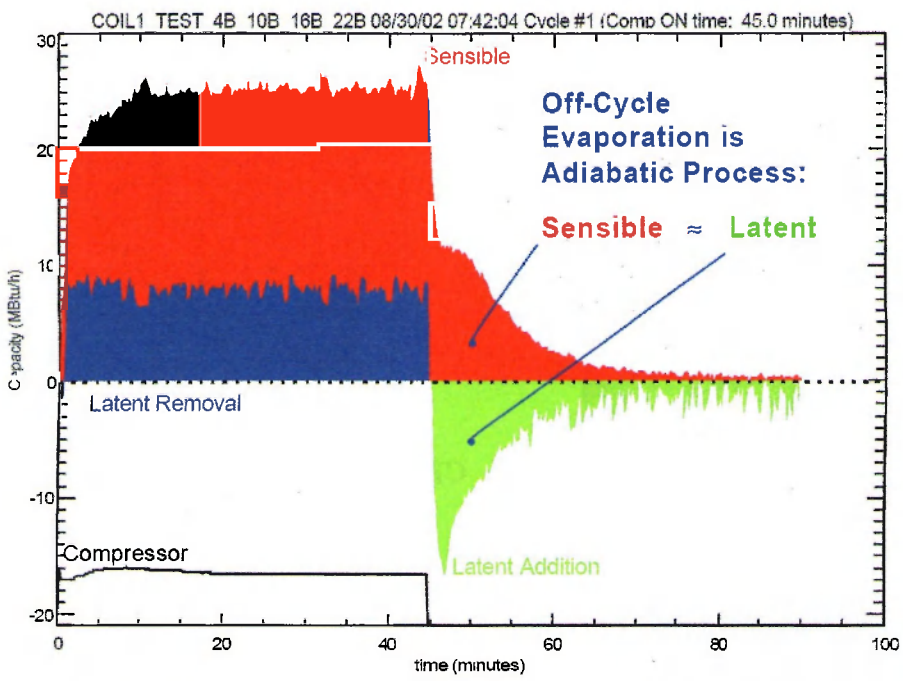


Рис.6.77. Динамика изменения величин явной и скрытой части холодопроизводительности воздухоохладителя при цикличной работе компрессора [181].

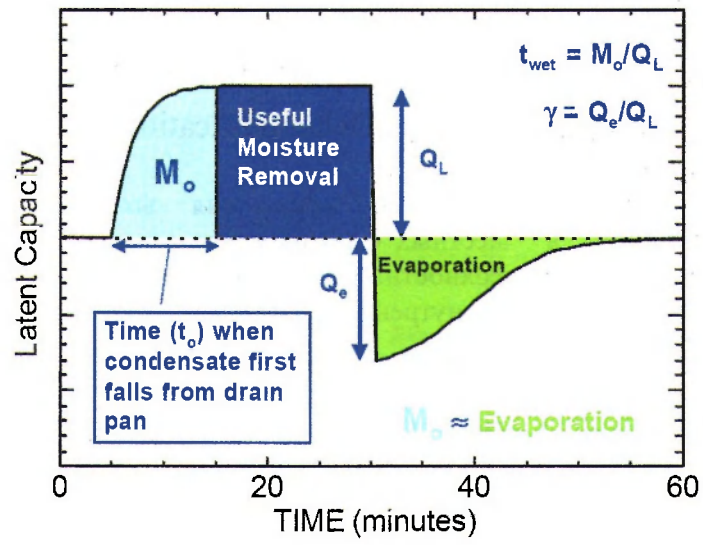


Рис.6.78. Изменение скрытой тепловой нагрузки воздухоохладителя в течение рабочего цикла [181].

Для повышения производительности кондиционеров по скрытой тепловой нагрузке (LHR) разработан ряд адаптивных оригинальных схем, позволяющих повысить эффективность осушения воздуха без его переохлаждения.

Компания APC (USA), для этих целей, предлагает простое решение [155]: секционирование воздухоохладителя ВО (испарителя холодильной машины) и, при переходе на режим осушения, – отключение ¼ части ВО (рис.6.79). При этом достигается понижение температуры рабочей части поверхности t_f и более глубокое осушение воздуха. Поскольку только часть воздушного потока охлаждается при меньшем значении t_f, а часть не охлаждается вовсе, температура всего потока после смешения выше, чем конечная температура воздуха в режиме охлаждения.

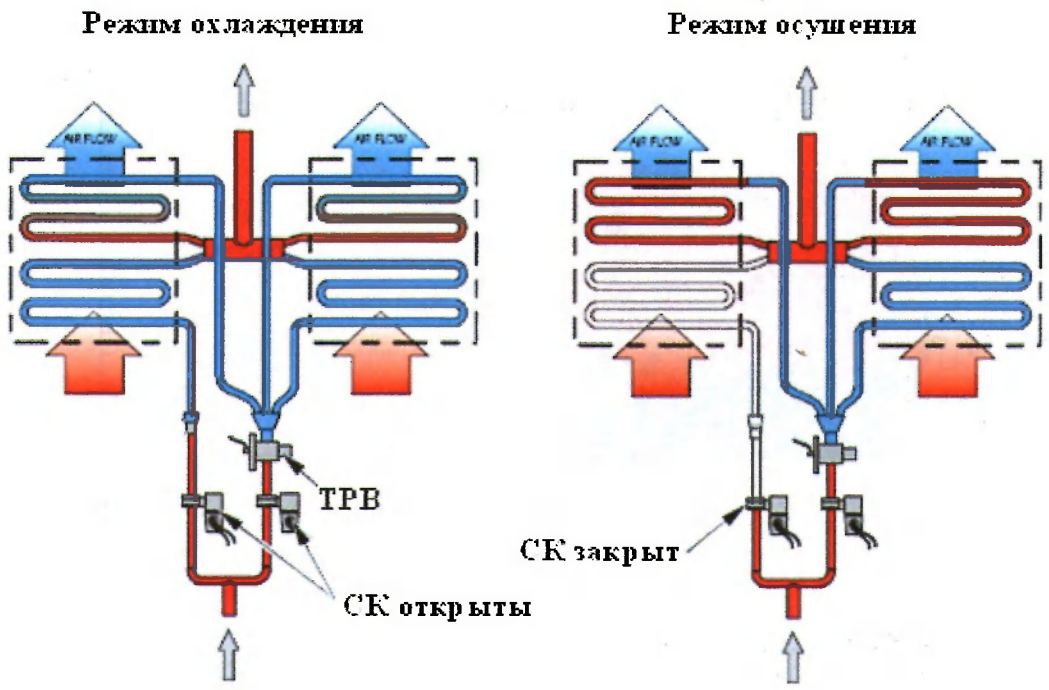


Рис.6.79. Режимы работы воздухоохладителя в составе холодильной машины с непосредственным охлаждением: ТРВ – терморегулирующий вентиль; СК – соленоидные клапаны.

Компания Carrier разработала схему Humidi-MiZer™ Adaptive Dehumidification System [187, 288], которая также базируется на цикле одноступенчатой холодильной машины с использованием двухсекционного воздухоохладителя, но при этом обеспечивает управление потоками как жидкого так и газообразного хладагента с помощью соленоидных клапанов (рис.6.80). В режиме осушения клапан HGSV открыт, а клапан LLSV закрыт. При этом часть горячих паров хладагента после компрессора байпасируется, минуя конденсатор, а затем смешивается с жидкостью, образующейся в конденсации другой части паров. Парожидкостная смесь поступает в теплообменник Humidi-MiZer coil, где она охлаждаясь приходит в состояние жидкости.



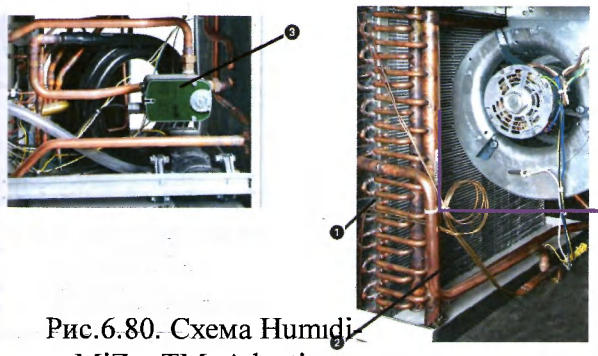


Рис.6.80. Схема Humidi-MiZer TM Adaptive Dehumidification System.

Аналогичное техническое решение ClimaDry Modulating Reheat Option с применением двухсекционного воздухоохладителя предлагает компания ClimateMaster (Oklahoma City, USA), рис.6.81.

Рис.6.81. Фотографии воздухоохладителя ClimaDry:
1 – основная секция;
2 – Reheat coil*;
3 – распределительный клапан.

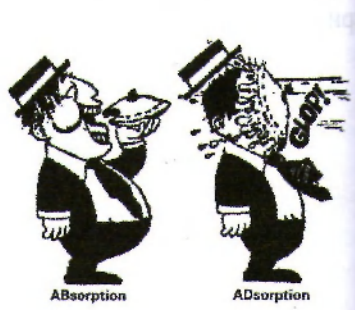
*аналог Humidi-MiZer coil, прим. автора

7. ОСУШЕНИЕ ВОЗДУХА СОРБЕНТАМИ

Сорбенты (от латинского sorbens – поглощающий) – вещества, способные поглощать пары (в т.ч. водяные). В зависимости от того, приводит ли сорбция к изменению химического (физического) состояния вещества или нет, сорбенты подразделяются на абсорбенты и адсорбенты. К абсорбентам относятся гигроскопические соли, водные растворы солей. Адсорбенты – твердые тела с развитой поверхностью (пористой структуры либо тонкодисперсные).

Сорбенты, используемые для осушения, именуются десикантами (от desicco (лат.) – высушиваю).

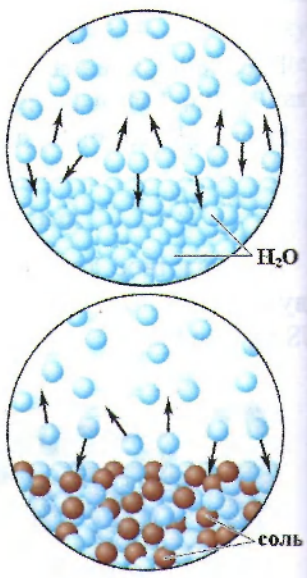
Движущей силой процесса сорбции влаги, с позиций теории массопереноса, является разность парциальных давлений водяных паров в осушаемом воздухе и в пограничном, с поверхностью сорбента, слое воздуха.



Абсорбция – поглощение объемом (AB – в, лат.)
*Адсорбция – поглощение поверхностью (AD – на, лат.)**

7.1. АБСОРБЦИЯ ВЛАГИ. РАБОЧИЕ ВЕЩЕСТВА, ЦИКЛЫ И УСТАНОВКИ

Процесс абсорбции водяных паров основан на том, что их парциальное давление над поверхностью растворов в состоянии насыщения $P_р''$ меньше, чем $P_п''$ над чистой водой: $P_р'' < P_п''$. Это происходит вследствие того, что молекулы растворенного вещества связывают (притягивают) часть молекул растворителя (воды), и поверхность раствора покидает меньшее число молекул H_2O (рис.7.1.). Следовательно, количество растворенного вещества в растворе, его концентрация $\xi_р$, влияет на величину понижения давления. Данную закономерность впервые (1882 г.) установил французский ученый *Франсуа Мари Рауль (Francois Marie Raoult)* и дал количественное описание:



$$(P_п'' - P_р'') / P_п'' = \xi_р, \qquad (7.1)$$



– I закон Рауля: *относительное понижение парциального давления насыщенных водяных паров над поверхностью раствора пропорционально его концентрации.*

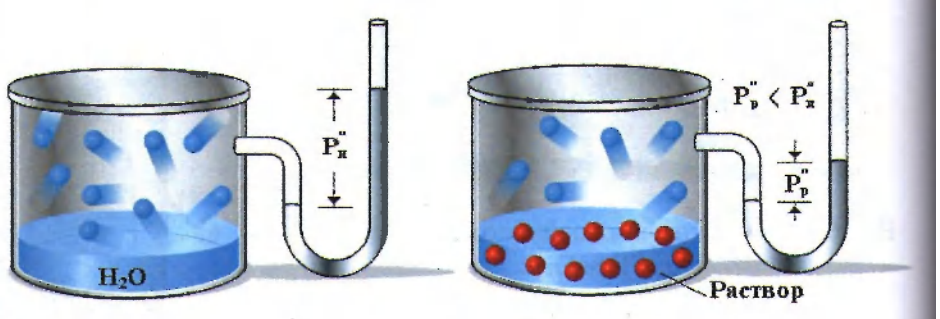


Рис.7.1. Иллюстрация к I закону Рауля.

Концентрация раствора $\xi_р$ выражается молярной долей $\xi_{м.д.}$ (отношение количества растворенного вещества к количеству вещества всего раствора) либо массовой долей ξ (отношение массы растворенного вещества к массе раствора) [97].

*иллюстрация [145]

Закон Рауля сформулирован для одинаковых температурных условий раствора и чистой воды (t = idem). Естественно, что при понижении температуры раствора t_p заданной концентрации ξ_p давление P_p'' будет уменьшаться. Таким образом, если за счет определенной концентрации ξ_p и температуры t_p уменьшить величину P_p'' настолько, что она станет меньше парциального давления водяных паров в основной массе воздуха $P_п$: $P_p'' < P_п$, то возникнет процесс переноса массы пара от воздуха к раствору и его поглощение. В справочной литературе [9, 146, 164] приводятся табличные данные, связывающие параметры P_p'', t_p и ξ_p для растворов различных солей.

Вода обладает сильными полярными свойствами (см. 7.2.1.1), в связи с чем она является прекрасным растворителем (рис.7.2).

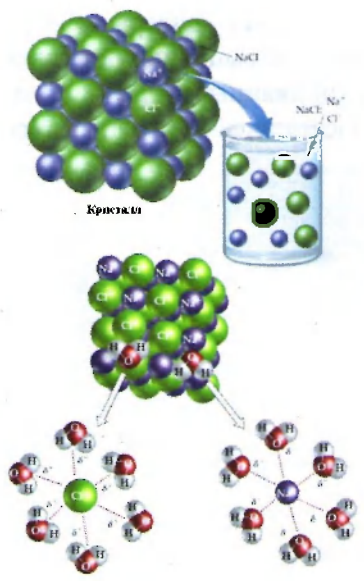


Рис.7.2. Образование раствора $NaCl \cdot H_2O$.



В качестве абсорбентов влаги применяют водные растворы солей: хлоридов кальция $CaCl_2$, магния $MgCl_2$, лития LiCl, бромида лития LiBr, а также различные гликоли (водные растворы органических веществ): этиленгликоль EG, диэтиленгликоль DEG, триэтиленгликоль TEG, тетраэтиленгликоль TREG, полиэтиленгликоль PG, пропиленгликоль и др. (прил.VII). Достижимая конечная относительная влажность воздуха $\varphi_к$: $CaCl_2$ - 45…48 %, $MgCl_2$ - 37…42 %, LiCl - 14…23 %. Они же, а также NaCl, используются в качестве хладоносителей.

На рис.7.3, в качестве примера, показано понижение парциального давления водяных паров над поверхностью этиленгликоля, которое при t_p = 40 °C уменьшается до $P_p'' = 0{,}3$ мм.рт.ст. при $P_п'' = 50$ мм.рт.ст. над чистой водой (т.е. на 167 %).

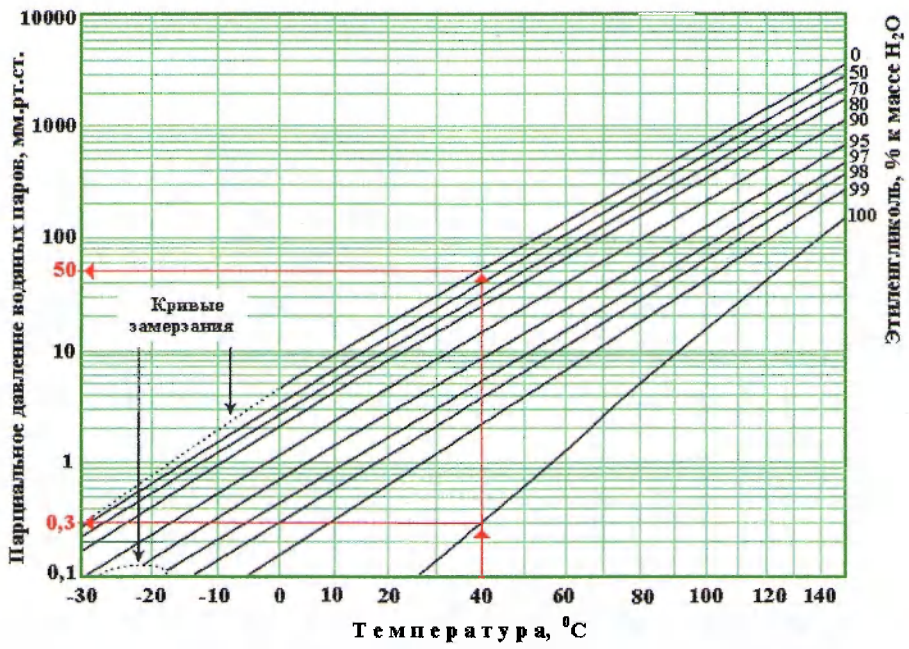


Рис.7.3. Зависимость парциального давления водяных паров от температуры и концентрации этиленгликоля [165].

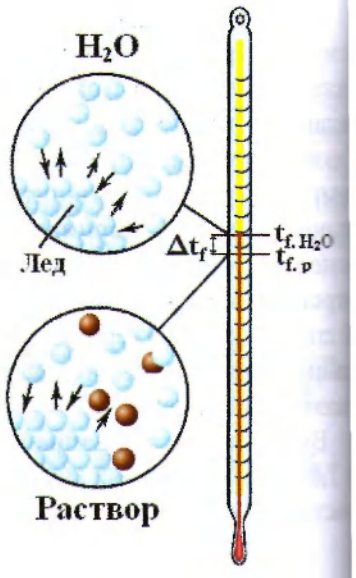
Любопытно, что морская вода снижает парциальное давления водяного пара всего лишь на 2,1 %, при испарении наполовину – на 2,26 % , а в момент кристаллизации только на 10 %.

В поле d,h- диаграмм влажного воздуха зачастую проводятся линии насыщения воздуха над поверхностью растворов, маркированные по температуре замерзания t_f, т.н. криоскопической температуре. Это сделано, в связи с тем, что:

$$\Delta t_f = k_f \xi_p \quad (\Delta t_b = k_b \xi_p), \quad (7.2)$$

где k_f и k_b – коэффициенты замерзания и кипения растворителя*, соответственно, -

– II закон Рауля (1888 г.):
понижение температуры замерзания раствора t_f
(повышение температуры кипения t_b*)*
пропорционально его концентрации.



* для воды: $k_f = 1{,}86$; $k_b = 0{,}512$ [К· кг H_2O/моль раств. в-ва]

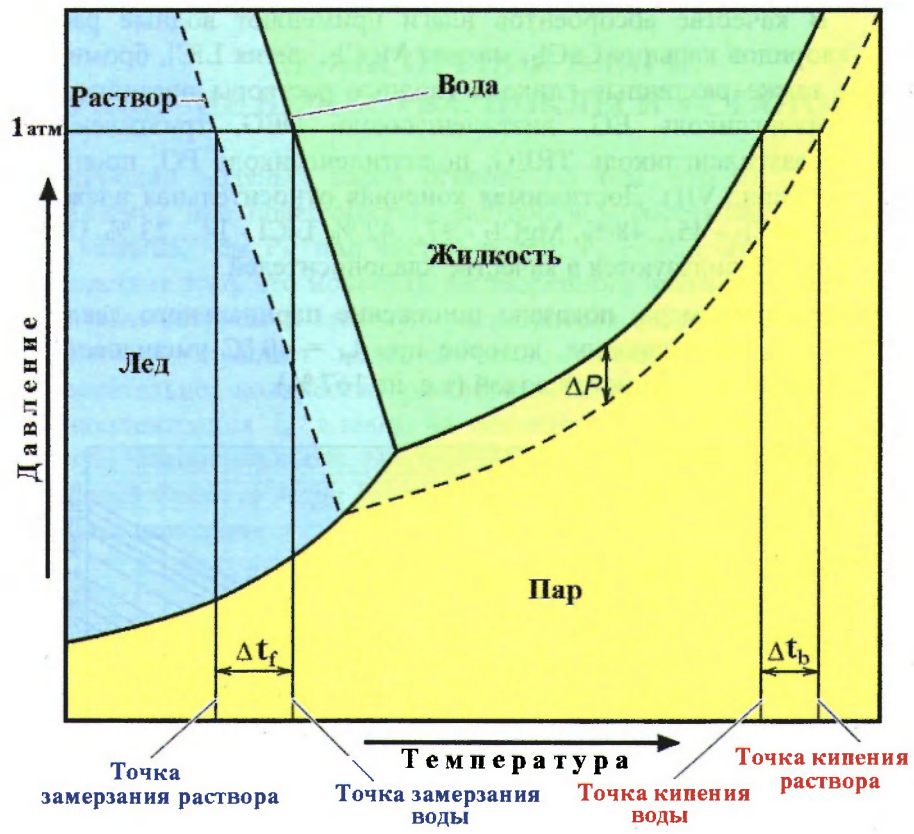
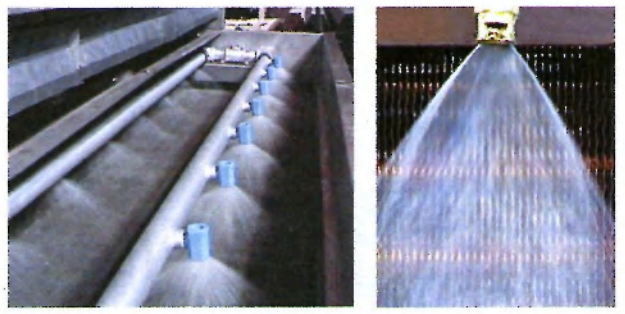


Рис.7.4. Иллюстрации (в т.ч. фазовая диаграмма) ко II закону Рауля.

Таблица 7.1. Значения температур замерзания и кипения этиленгликоля при различной концентрации.

Этиленгликоль, %	0	10	20	30	40	50	60
t_f, °C	0	-3	-8	-16	-25	-37	-55
t_b, °C	100	101,1	102,2	104,4	104,4	107,2	111,1

Таким образом, можно считать, что понижение давления насыщения однозначно определяется значением t_f. Последнее обстоятельство позволяет унифицировать нанесенные кривые насыщения воздуха над водными растворами различных солей, криоскопическая температура которых достигается при определенных концентрациях.



Такие диаграммы обычно применяют для расчета процессов обработки воздуха в поверхностном воздухоохладителе при орошении его наружной поверхности растворами-антифризами, когда $t_f < 0$ °С. Следует помнить, что данными кривыми можно пользоваться при условии: $\xi < \xi_э$, т.е. для слабых растворов, для которых справедливы законы Рауля (рис.7.5, левая кривая).

Минимальная криоскопическая температура раствора соли наблюдается в так называемой криогидратной точке (либо точке эвтектики, на рис.7.5 – т. Е). Для LiCl t_e = -75,5 °С при 25,3 %, $CaCl_2$: -54,2 °С (29,9 %), $MgCl_2$: 33,6 °С (20,6 %), NaCl: -21,1 °С (23,3 %).

В криогидратной точке раствор замерзает в виде однородной смеси воды и соли (эвтектический лед). При концентрации соли более $\xi_э$ и $t < t_f$ из раствора будут выпадать кристаллы соли. В связи с этим рассолы готовят в пределах концентраций $\xi < \xi_э$.

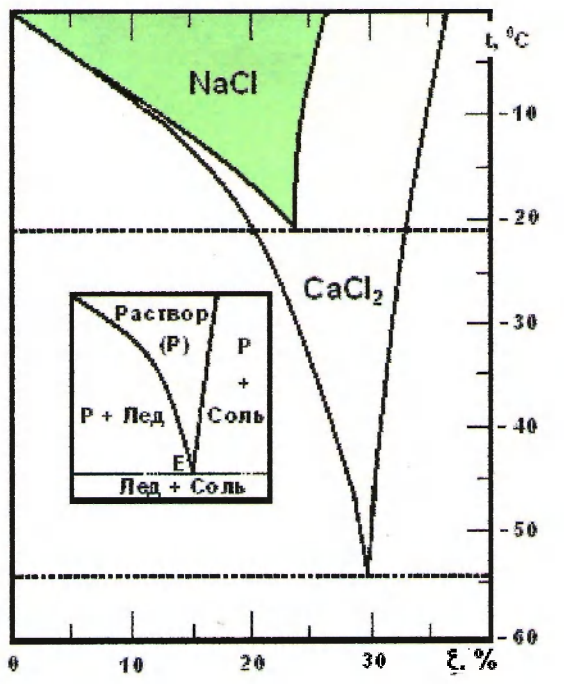


Рис.7.5. Типичная V-образная фазовая диаграмма водных растворов солей.

Наиболее глубокое осушение воздуха возможно при работе с насыщенными растворами солей, когда $\xi > \xi_э$ (рис.7.5, 7.6, на рис.7.5 – правая кривая). Поэтому при работе с конкретным раствором соли в полном диапазоне концентраций предпочтительнее использование диаграмм с кривыми насыщения, построенными для значений $\xi = const$ (рис.7.9…7.13, прил. VII).

На рис.7.6 приведены данные по максимальным значениям концентрации ξ_{max} наиболее употребляемых водных растворов солей – галогенидов [216]:

LiBr, LiCl и $CaCl_2$.

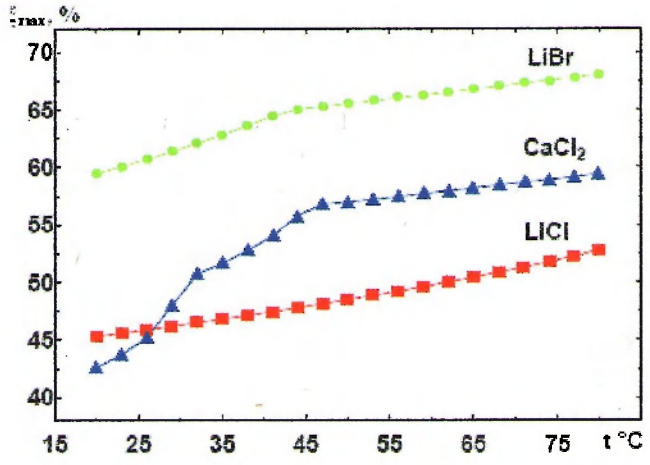
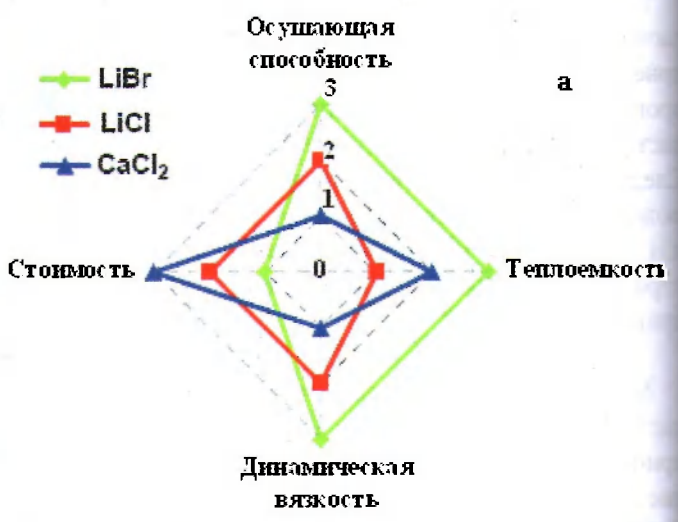


Рис.7.6. Зависимость ξ_{max} некоторых растворов от температуры.

Самым эффективным абсорбентом является раствор LiBr⊙H_2O: при t = 20 °С: P_p" = 0,17 кПа, $\varphi_к \approx 6$ %. Однако он оказывает наибольшее коррозионное воздействие на металлы. По этой причине на практике обычно применяют гидраты LiCl и $CaCl_2 \cdot 6\ H_2O$ (прил. VIII), причем по экономическим соображениям использование гексагидрата хлорида кальция предпочтительнее (рис.7.7, 7.8).



б



а

Рис.7.7. Сопоставление абсорбентов LiBr, LiCl и $CaCl_2$ по 4-м показателям с использованием 3-х бальной шкалы [216] – а, и фотография воздуховода, подверженного коррозии из-за воздействия аэрозоли с LiCl [148] – б.

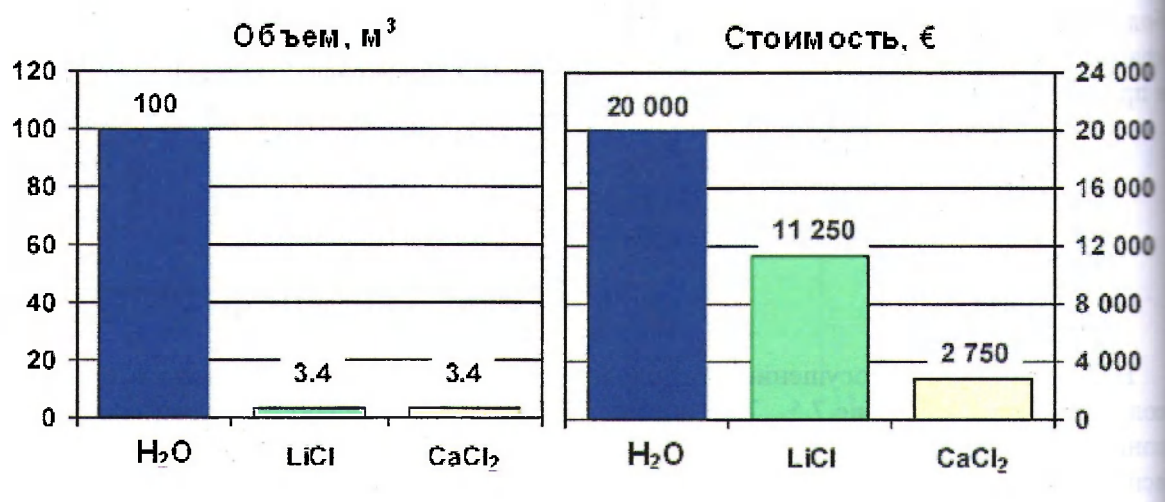


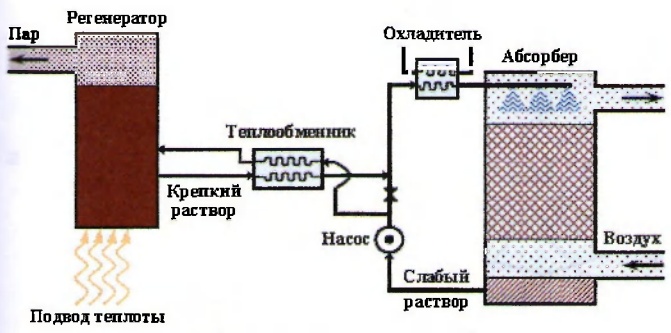
Рис.7.8. Сопоставление рабочих веществ: H_2O, LiCl и $CaCl_2$ по объему и стоимости [206].

На рис.7.7а проведено сопоставление абсорбентов LiBr⊙H_2O, LiCl ⊙H_2O, $CaCl_2$ ⊙6 H_2O по четырем ключевым показателям: осушающей способности, теплоемкости, динамической вязкости и стоимости, которые оценены по 3-х бальной шкале. За исключением осушающей способности остальные три показателя лучше при меньших значениях.

На рис.7.8 приведены данные по необходимому объему и стоимости холодной воды (6/12 ^{0}C), а также водных растворов LiCl и $CaCl_2$, используемых для осушения воздуха.

Осушение воздуха растворами реализуется в камерах орошения или в насадочных абсорберах (рис.7.9, 7.23) при условии устройства в них эффективных сепараторов капельной влаги и использовании некорродирующих материалов. В процессе поглощения влаги происходит ослабление раствора – уменьшение его концентрации, поэтому часть

раствора, обычно 10…15 %, пропускают через регенератор. Здесь избыточная влага передаётся во вспомогательный поток воздуха при $P_p'' > P_п$, что обеспечивается нагреванием ослабленного раствора, например, с использованием солнечной энергии (рис.7.10, 7.11), либо за счет теплоты конденсации холодильной машины (рис.7.10) [151, 219]. Существуют и другие способы восстановления концентрации: вымораживание, добавление соли, однако сегодня практического применения они не находят.



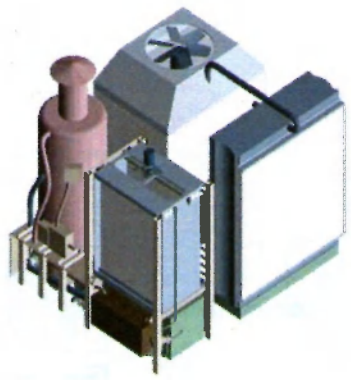


Рис.7.9. Схема установки осушения воздуха жидкими поглотителями влаги.

При абсорбции водяных паров растворами выделяется теплота фазового перехода – теплота конденсации, а также теплота гидратации, растворения и разбавления, которая составляет 5…15 % общей теплоты сорбции [33]. Поскольку эффективность процесса осушения зависит как от концентрации ξ_p, так и температуры t_p раствора, для отвода теплоты сорбции предусмотрены соответствующие теплообменники.

Если начальная температура сорбента равна температуре осушаемого воздуха, то можно принять, что количество скрытой теплоты, передаваемой от воздуха к сорбенту приблизительно равно количество явной теплоты, получаемой воздухом от сорбента. При этом процесс осушения воздуха протекает изоэнтальпийно ($\varepsilon \approx 0$, более точно $\varepsilon = C_w t_к$, см. § 7.2.2), конечная температура воздуха $t_к$ возрастает.

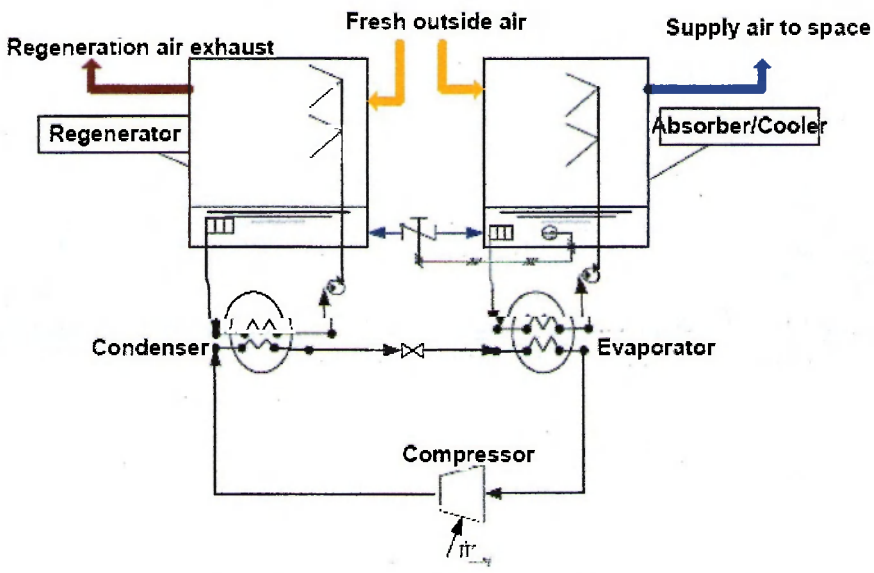
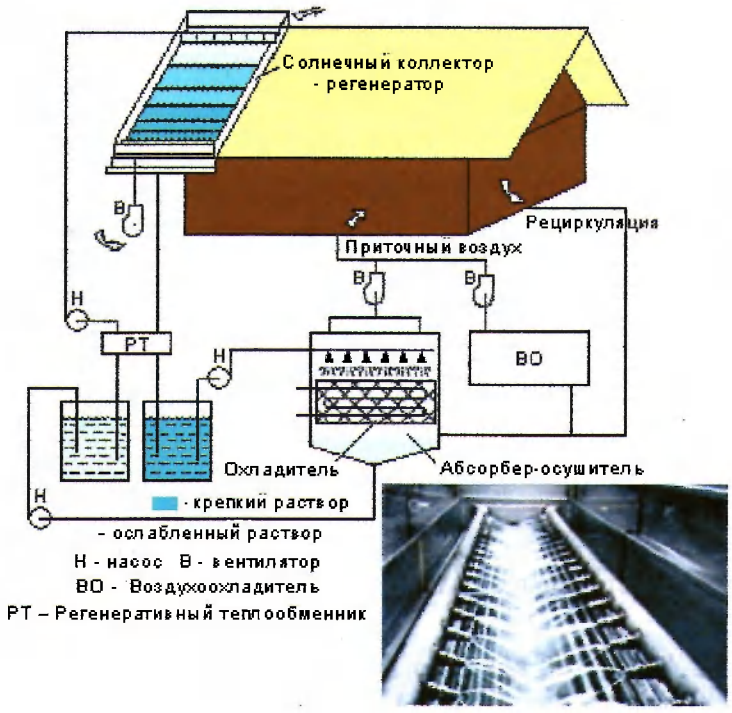


Рис.7.10. Комбинированная схема осушения
DX – absorption cycle [117].

а

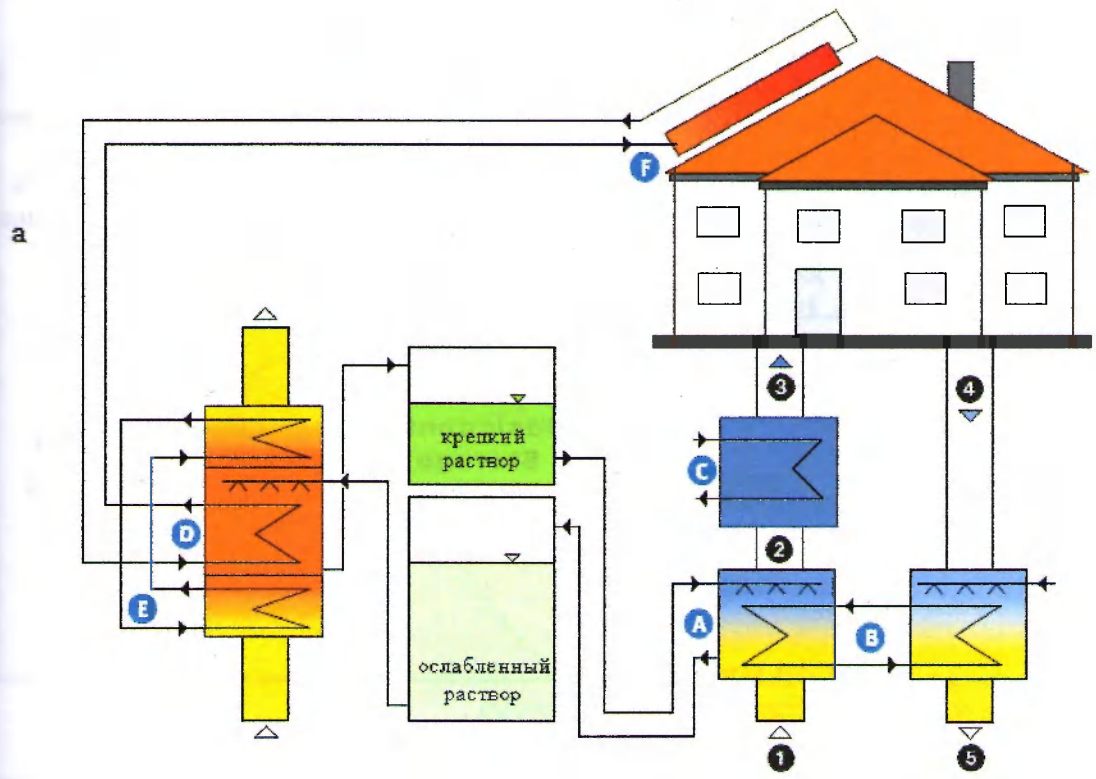


б



Рис.7.11. СКВ с осушением приточного воздуха по открытому абсорбционному циклу с применением солнечного коллектора в качестве регенератора:
а – схема; б – фотография системы на крыше офисного здания "Email Fabrik", Amberg [206] .

На рис.7.12, 7.13 приведены: схемы систем кондиционирования воздуха комфортного назначения с абсорбционными хлорлитиевыми осушительными установками; построения процессов обработки приточного воздуха в d,h-диаграмме (рис.7.21б), а также указаны параметры и расход воздуха, температуры и расход воды в циркуляционном контуре, концентрации десиканта в режимах сорбции и регенерации (рис.7.22).



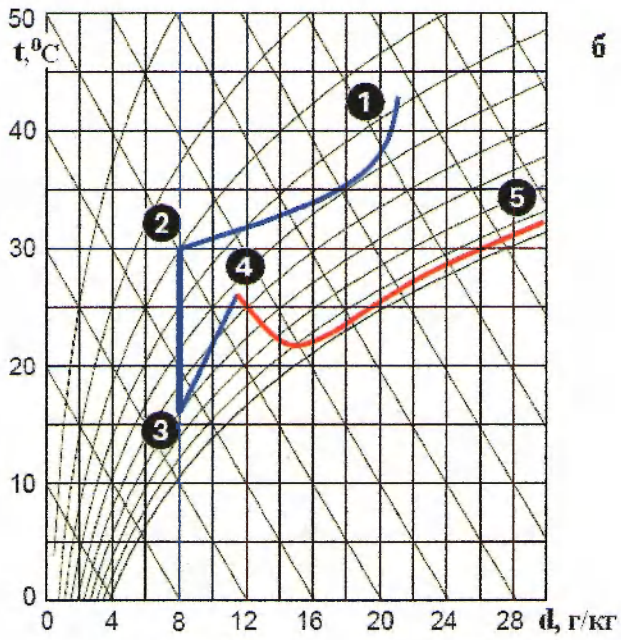
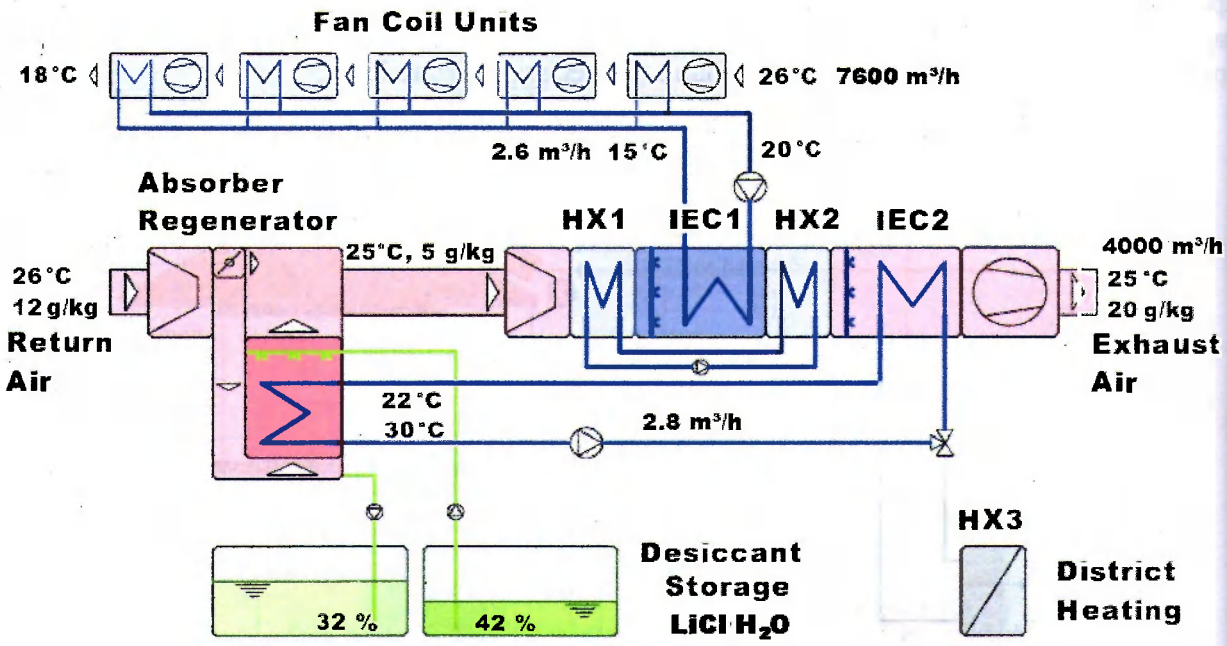


Рис.7.12. Схема центральной СКВ (а):

A – абсорбер-осушитель; D – десорбер (деконценратор абсорбента); F – солнечный коллектор в контуре нагрева для выпаривания избыточной влаги из абсорбента; C – поверхностный воздухоохладитель; B, D – контуры теплоутилизации с теплообменниками-рекуператорами,

и d,h-диаграмма [203] с построениями процессов обработки воздуха для климатических условий субтропиков, г. Дубаи, ОАЭ (б):

1-2 – осушение с одновременным охлаждением в абсорбере-рекуператоре; 2-3 – охлаждение в поверхностном воздухоохладителе; 3-4 – процесс ассимиляции тепло- и влагоизбытков в помещении; 4-5 – отвод тепла абсорбции в рекуператоре с использованием приема испарительного охлаждения.



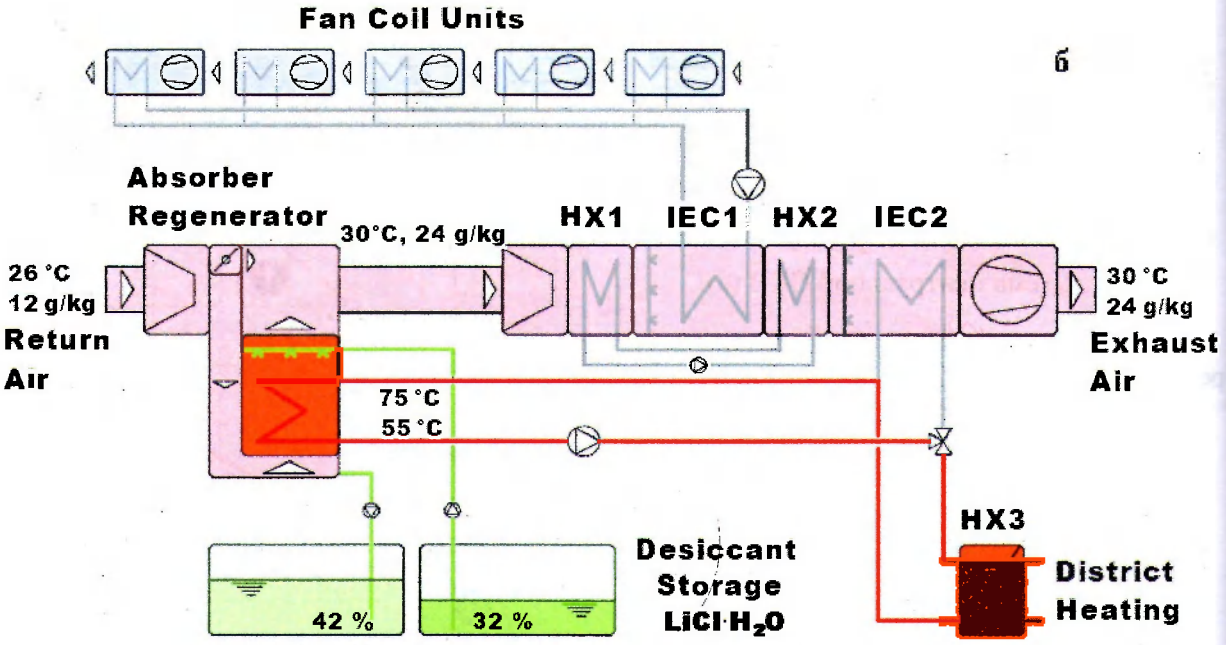


Рис.7.13. Схема СКВ* с применением фэнкойлов и охлаждением воды в абсорбционной установке [207]:

а – режим осушения; б – режим регенерации; HX1, HX2 – теплообменники контура теплоутилизации; IEC1 – аппарат непрямого испарительного охлаждения воды; IEC2 – тепломассообменный аппарат обработки воздуха; HX3 – водонагреватель.

*для континентального климата (Мюнхен, Германия)

Регулированием ξ_p и t_p раствора обеспечивается проведение процесса с любым значением (в т.ч. изотермически (ε_t)), рис.7.14, 7.15.

Коэффициент орошения μ определяется из уравнения теплового баланса:

$$\mu = \Delta h_в / C_p \Delta t_p, \qquad (7.3)$$

где C_p и Δt_p – теплоемкость и разность температур раствора.

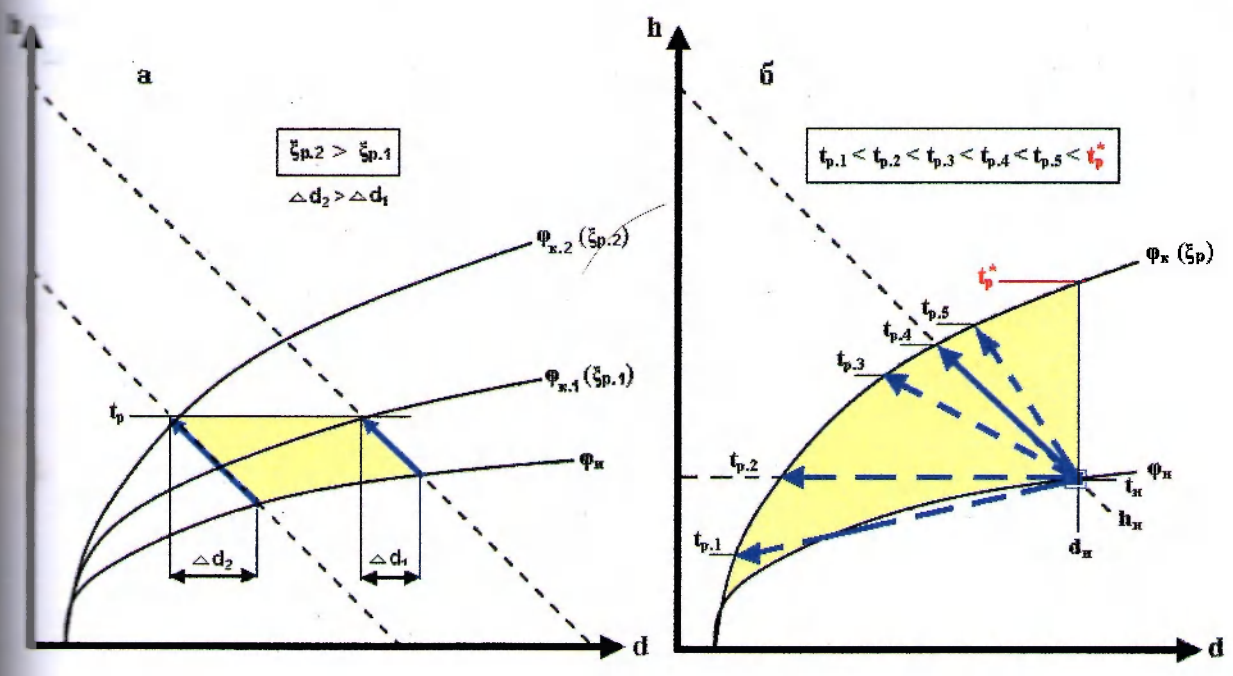


Рис.7.14. Влияние концентрации ξ_p (а) и температуры t_p (б) раствора на процесс осушения воздуха в d,h-диаграмме.

t_p – равновесная изотерма, при которой осушение прекращается*

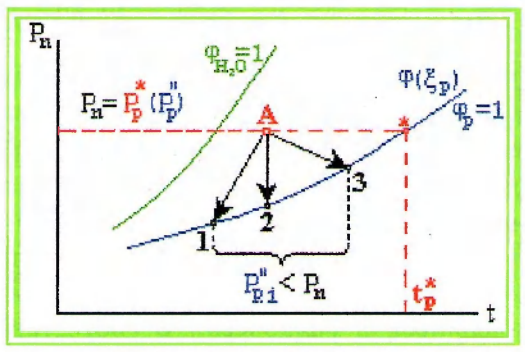


Рис.7.15. Влияние температуры t_p раствора на процесс осушения воздуха в t, $P_п$ - диаграмме.

Следует заметить, что интерпретация процесса осушения воздуха (абсорбции влаги) в d,h-диаграмме прямой линией (рис.7.14) допустима, аналогично изображению процессов кондиционирования воздуха и воды (§ 5.3). В наиболее общем случае (политропические процессы), это справедливо при условии: $\mu = \infty$ и ξ_p = const. В абсорбционном осушителе содержание ξ_p = const обеспечивается в цикле: сорбция – десорбция влаги.

Анализ абсорбционного цикла осушения воздуха в d,h- диаграмме выполнен специалистами Пекинского муниципального департамента инженерной механики и университета Tsinghua (КНР) [216]. Предложено рассматривать этот цикл в соответствии с изменениями состояния насыщенного слоя воздуха над поверхностью абсорбента, которые следуют за количественными изменениями состава и температуры раствора. Для упрощения анализа разработана модель, по которой абсорбционный цикл осушения воздуха в d,h-диаграмме можно условно отображать двумя изотермами и двумя изолиниями φ = const (ξ_p = const), рис. 7.16.

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

На рис.7.16: 1-2 – гипотетический процесс осушения воздуха. Точка 1 отвечает начальному состоянию раствора (ξ_1, t_1). Точка 2 характеризует конечную концентрацию $\xi_2 < \xi_1$, при $t = idem$, и находится на линии влагосодержания осушаемого воздуха (например, воздуха помещения с избыточной влажностной нагрузкой $W_{п}$) d_A. На участке 1-2 цикла срабатывается потенциал процесса влагообмена от воздуха к раствору Δd_A ($\Delta P_{п}$), в т.2 достигается равенство парциальных давлений $P_{п.А} = P_{р.2}$ и процесс осушения заканчивается. При этом концентрация раствора уменьшается до ξ_2, а его температура повышается, в результате выделения теплоты абсорбции. Это явление условно отображается изолинией $\varphi_2 = const$, отвечающей состоянию насыщенного слоя воздуха над раствором постоянной концентрации $\xi_{р.2} = const$.

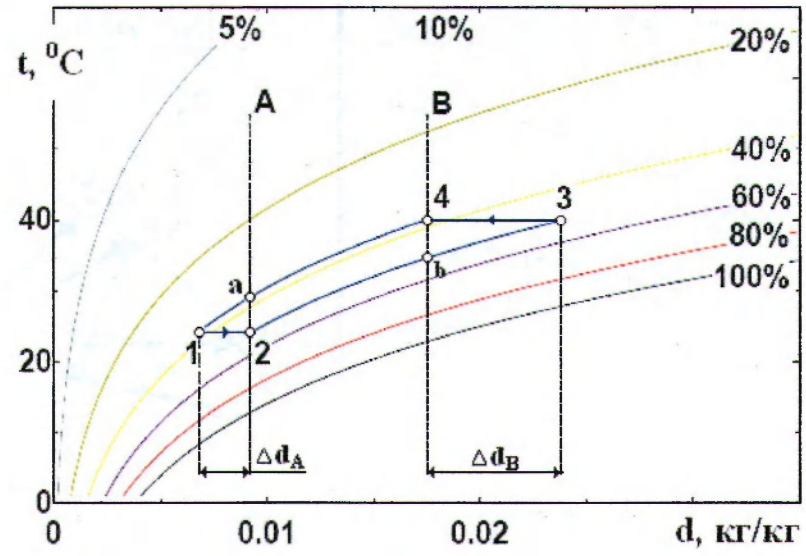


Рис.7.16. Модель абсорбционного цикла осушения воздуха в d,h- диаграмме.

Для реактивации раствора – восстановления осушающей способности – осуществляют выпаривание раствора (процесс 2-3-4 до первоначальной концентрации ξ_1 с последующим охлаждением (4-1) до t_1. В процессе 3-4 избыточная влага раствора Δd_B передается воздуху с влагосодержанием d_B, пропускаемому через регенератор (например, наружный воздух). Точка 4 определяется пересечением линий $d_B = const$ и $\varphi_1 = const$ ($\xi_1 = const$).

Точки a и b (выделены в расширение анализа, предложенного авторами [216]) – характеризуют состояния раствора (а точнее насыщенного слоя воздуха над раствором), находящиеся в равновесии с соответствующими воздушными потоками: a – крепкий раствор (ξ_1) с осушаемым воздухом; b – слабый раствор (ξ_2) с воздухом реактивации. Это означает, что:

– нагревание раствора для его реактивации следует проводить до уровня температуры $t > t_b$, а укрепление раствора до ξ_1 при использовании воздуха с параметрами т. 4 требует нагревания раствора до точки 3 ($t_3 = t_4$), участок b-3;

– охлаждение крепкого раствора необходимо довести до значений $t < t_a$, и чтобы обеспечить осушение воздуха с параметрами т. 2 на глубину осушения Δd_A температура раствора с концентрацией ξ_1 должна быть равна t_1 ($t_1 = t_2$).

В рассмотренной модели участки сорбции 1-2 и десорбции влаги 3-4 условно представлены соответствующими изотермами, что позволяет легко определять необходимые параметры раствора, в соответствии с положением в d,h-диаграмме соответствующих точек цикла:

– точка 1 находится исходя из требуемой глубины осушения Δd_A и исходного положения т. 2 воздуха помещения;

– точка 3,– как место пересечения изолинии $\varphi_2 = const$ ($\xi_2 = const$) и изотермы t_4, отвечающей параметрам вспомогательного потока воздуха, пропускаемого через регенератор.

Графические построения абсорбционного цикла осушения в диаграмме влажного воздуха позволяют проанализировать влияние различных факторов на эффективность процесса и режимные характеристики.

Например, увеличением температуры регенерации (рис.7.17) достигается более высокая концентрация раствора $\xi_{1'} > \xi_1$ и, соответственно, большая глубина осушения. Здесь необходимо помнить, что повышение концентрации раствора ограничено максимальным значением $\xi_{max}(t)$ (рис.7.6) и должно выполняться условие $\xi_{1'} < \xi_{max}$, поскольку при достижении $\xi_{1'} = \xi_{max}$ в точке 4 и дальнейшем охлаждении раствора произойдет его кристаллизация (рис.7.5).

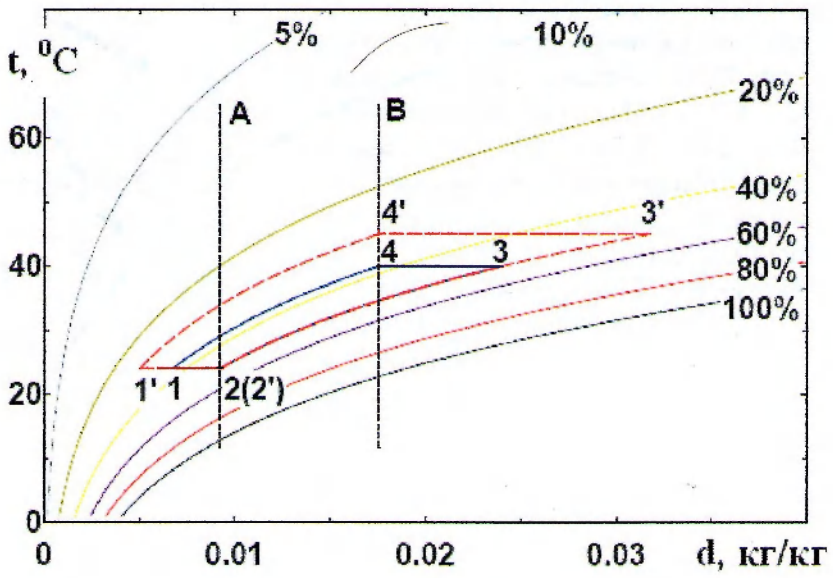


Рис.7.17. Влияние температуры регенерации на абсорбционный цикл осушения воздуха.

Растворы с большими значениями $\xi_{max}(t)$ способны обеспечить большую глубину осушения при данной температуре t_1. На рис.7.18. построены циклы осушения воздуха для разных растворов LiBr, LiCl и $CaCl_2$ для условий комфортного кондиционирования $t_1 = 24$ °C. Очевидно, что при замене $CaCl_2$ на LiCl и LiBr эффективность процесса возрастает.

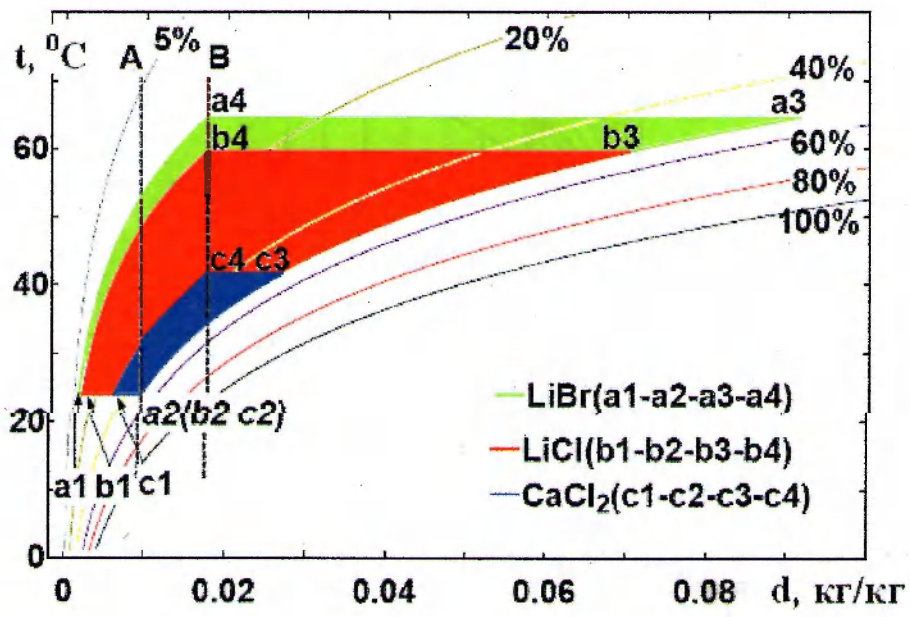


Рис.7.18. Возможности различных сорбентов в достижении глубины осушения.

На рис.7.19, в d,h- диаграмме, показано сопоставление абсорбционного и конденсационного способов осушения воздуха. Для обеспечения абсорбционного цикла потребная холодопроизводительность $Q_{0.abs}$ меньше, чем в случае механического осушителя $Q_{0.DX}$.

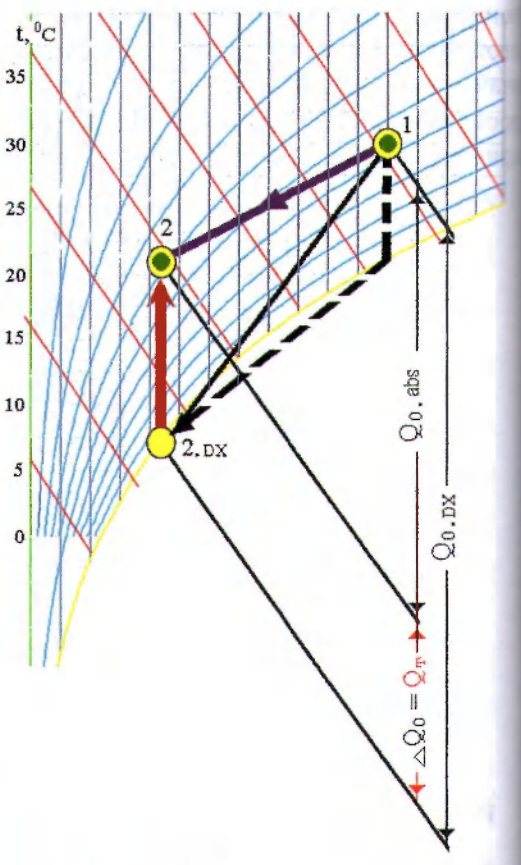


Рис.7.19. Интерпретация процессов осушения воздуха в d,h- диаграмме:
(1-2) – в абсорбере;
(1-2_{DX} - 2) – в механическом осушителе.

Применение абсорбентов для обработки воздуха значительно расширяет возможности контактных аппаратов. На рис.7.20 показаны как процессы осушения (А-1, А-2, А-3), так и процессы увлажнения (В-1, В-2, В-3). Для увлажнения воздуха температуру абсорбента поддерживают на требуемом уровне за счет подвода к нему теплоты пропорционально количеству влаги, поглощаемой воздухом из раствора. Концентрация раствора поддерживается автоматически добавлением воды. Возможность непрерывной регенерации сорбента является одним из достоинств абсорбционных аппаратов.

В случае хлорлитиевых абсорберов, например, обеспечиваются любые конечные параметры воздуха в диапазоне температур (-15…+50) °С и относительной влажности (5…100) % [40], рис. 7.20, 7.21. Осушение воздуха возможно до d ≈ 1 г/кг [20, 92].

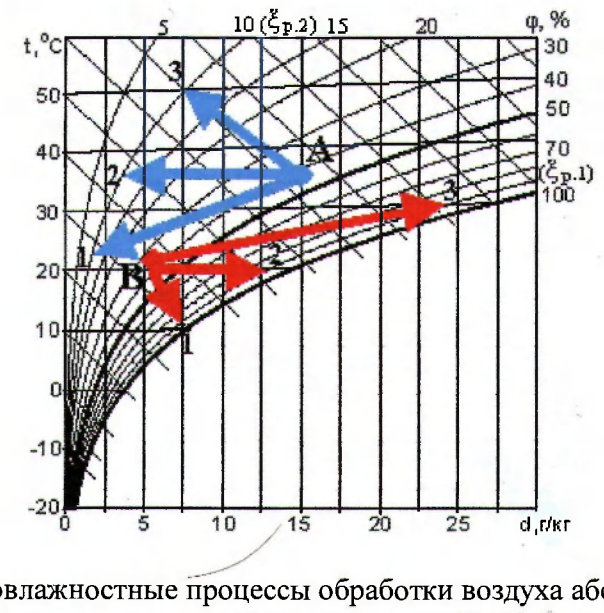


Рис.7.20. Термовлажностные процессы обработки воздуха абсорбентами в d,h- диаграмме: иллюстрация универсальности абсорбционного метода.

На рис.7.21 приведены диаграммы влажного воздуха, в которых проведены кривые равновесной относительной влажности π над водными растворами солей LiBr и LiCl определенной концентрации, а на рис.7.22 – зависимость парциального давления водяного пара над раствором $CaCl_2 \cdot H_2O$.

В приложении VII представлены диаграммы состояния различных абсорбентов.

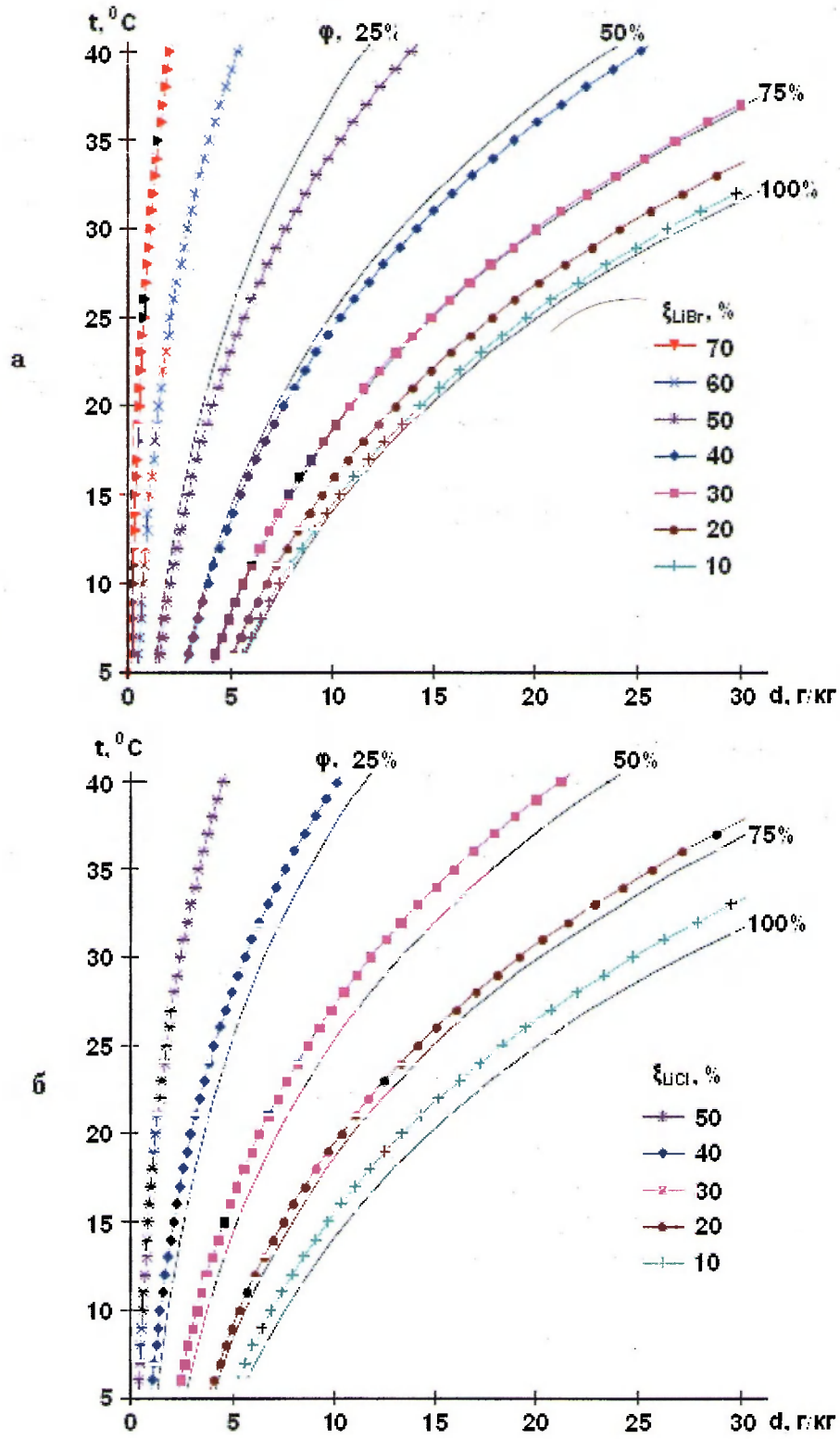


Рис.7.21. d,h -диаграммы влажного воздуха с линиями равновесной относительной влажности воздуха π над растворами солей LiBr (а) и LiCl (б) с определенной концентрацией ξ = const [167].

Линии π = const на рис.7.21, характеризующие величину относительного парциального давления водяных паров над растворами определенных значений ξ и t, являются аналогом линий φ = const и определяются выражением:

$$\pi = P_p(\xi, t) / P_п''(t). \qquad (7.4)$$

Численное решение уравнения 7.4, основанное на аппроксимации эмпирических зависимостей $P_p(\xi, t)$ и $P_п''(t)$, выполнено инженерной компанией M. Conde Eng. [146] для водных растворов LiCl и $CaCl_2$.

Эмпирические зависимости $P_p(\xi, t)$ для водных растворов LiCl и LiBr приведены в работе [167].

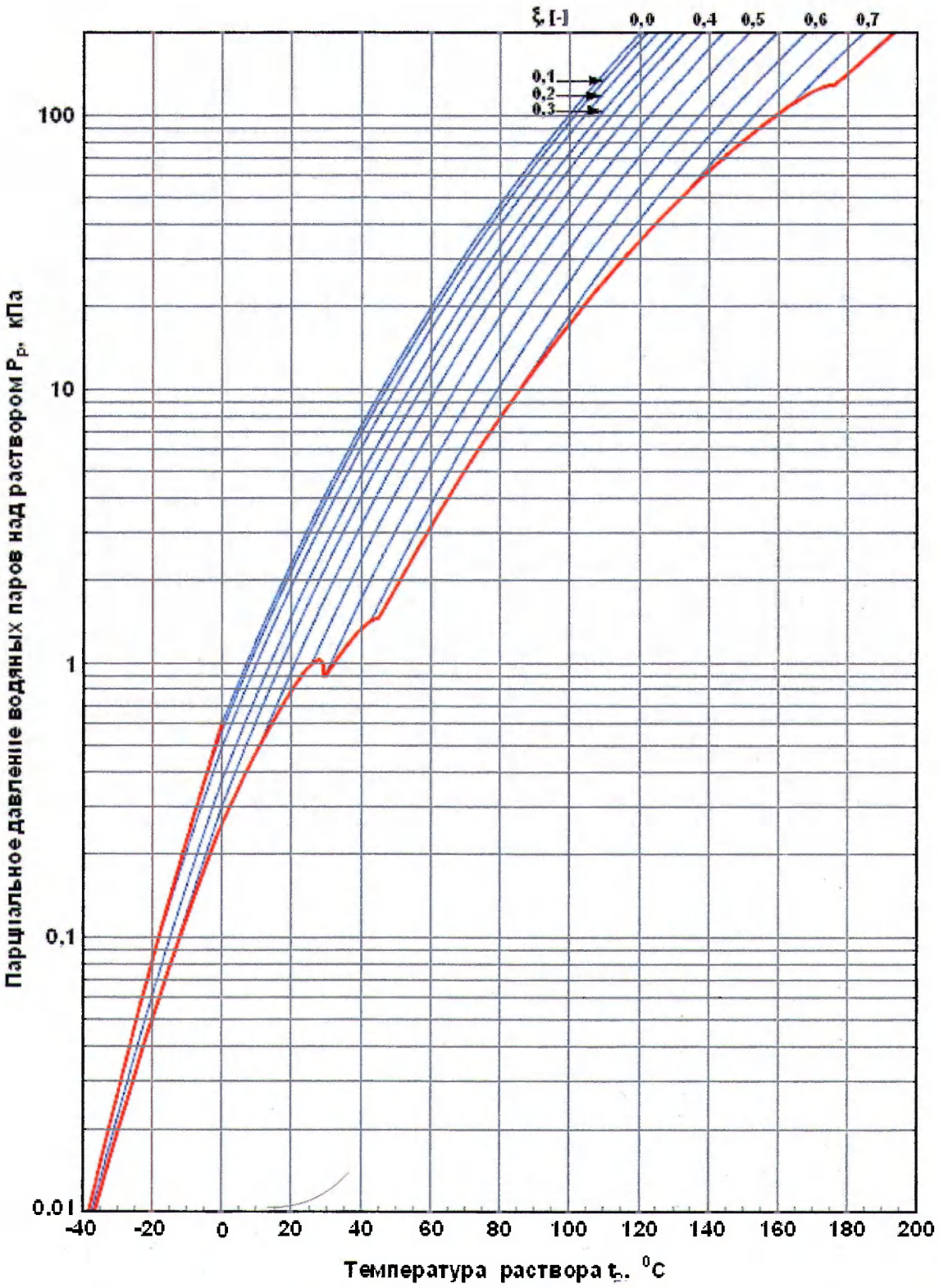


Рис.7.22. Зависимость величина парциального давления водяных паров P_p над $CaCl_2 \cdot H_2O$ от температуры t_p и концентрации ξ (Othmer diagram) [146].

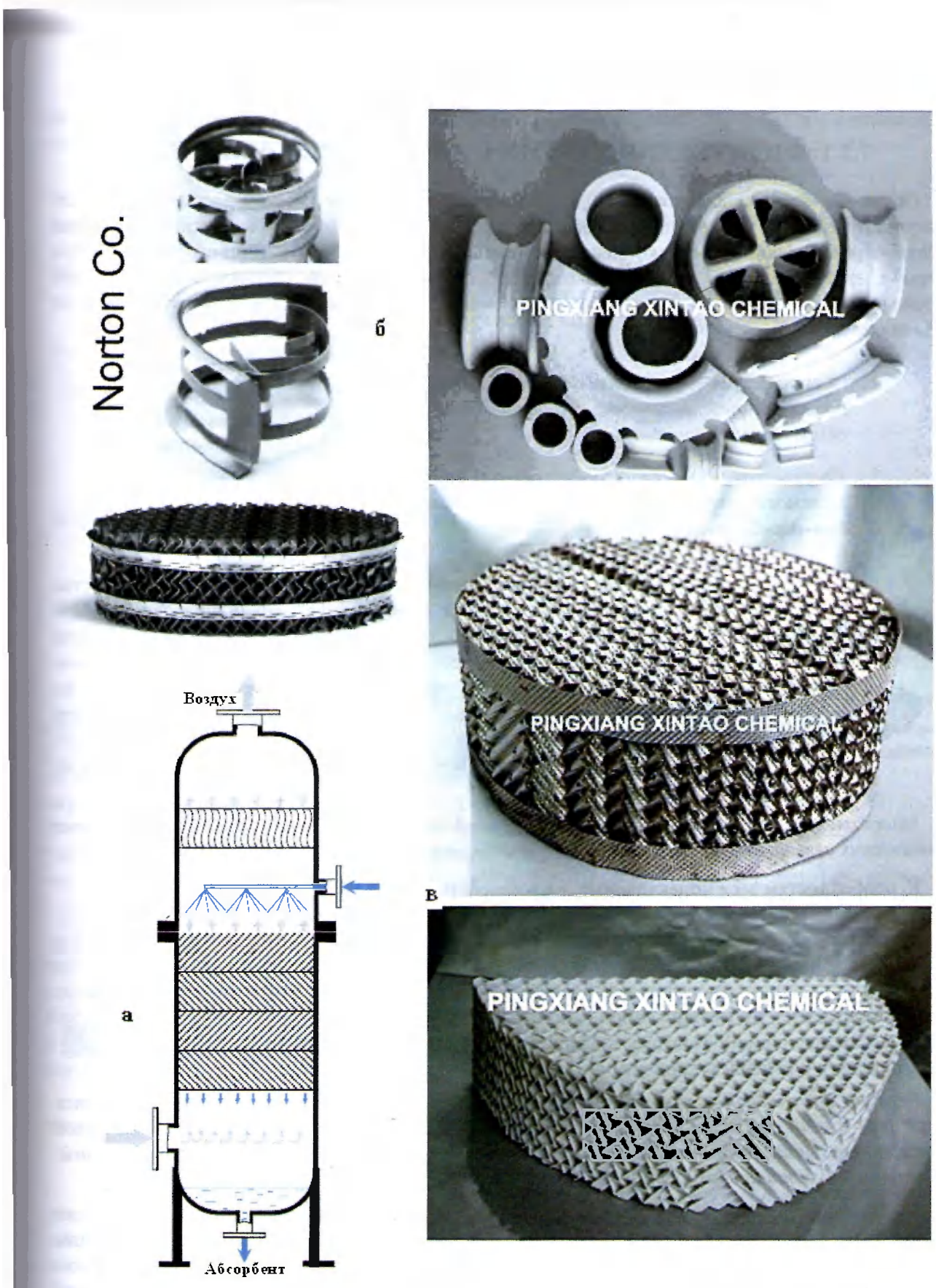


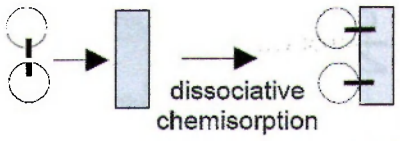
Рис.7.23. Схема абсорбера (а) и насадки: нерегулярной структуры (кольца, седла и пр.) – б;
упорядоченные (гофрированные листы и наборные элементы) – в,
материал: металлическая фольга, керамика.

7.2. АДСОРБЦИЯ ВЛАГИ

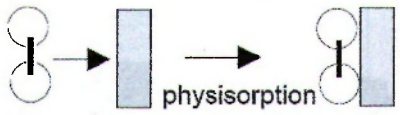
7.2.1. ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА. АДСОРБЦИОННЫЕ СИЛЫ

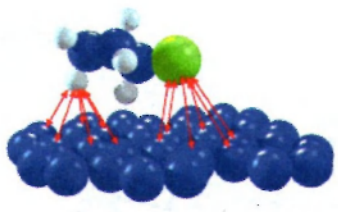
Осушение воздуха адсорбентами, в наиболее общем случае, можно рассматривать, как результат действия четырех процессов: хемосорбции (chemisorption), физической адсорбции (physisorption), капиллярной конденсации (capillary condensation) и ионного обмена. При этом следует заметить, что, в зависимости от особенностей адсорбентов и условий проведения процесса, один из указанных механизмов может доминировать либо не проявляться вовсе.

1. *Хемосорбция – взаимодействие молекул поглощаемого вещества и адсорбента на основе химических связей.*



2. *Физическая адсорбция обусловлена силами межмолекулярного взаимодействия (силами Ван-дер-Ваальса).*

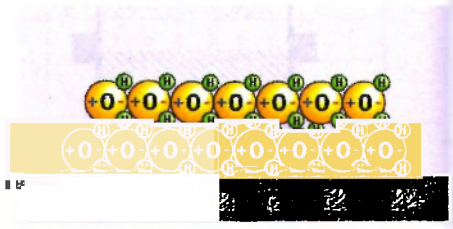




Как известно, газ можно представить как множество молекул, движущихся свободно во всех направлениях. При контакте с поверхностью твердого тела газовые молекулы притягиваются поверхностными частицами. Это явление свойственно всем твердым веществам, поскольку на поверхности частицы имеют меньшее число соседей, чем внутри объемной фазы, и они, стремясь компенсировать это несоответствие, привлекают к себе молекулы окружающего их газа.

Межмолекулярное взаимодействие не приводит к разрыву или образованию новых химических связей, при этом молекула сохраняет свою индивидуальность [80].

К особенностям межмолекулярных взаимодействий в процессе адсорбции относят весьма тесное сближение молекул поглощаемого вещества с атомами, ионами или функциональными группами, образующими поверхность адсорбента, а при относительно больших величинах адсорбции даже и между собой (полимолекулярная физическая адсорбция). Поэтому адсорбция часто имеет много общего с явлением конденсации пара [80].



Явления физической и химической адсорбции трудно различимы. Обычно наблюдается картина, когда основная масса адсорбированного вещества (в результате физической сорбции) связывается сравнительно слабо и лишь небольшая часть – прочно (хемосорбцией: локально, на части поверхности).

3. Наличие влаги в порах, представляющих собой капиллярные каналы, создает необходимые условия для процесса *капиллярной конденсации*. В качестве движущей силы этого процесса можно принять разность парциальных давлений пара ($P_п$ - $P''_{п.г}$) в осушаемом воздухе и в капилляре, где, как известно, образуется мениск с вогнутой поверхностью, над которой парциальное давление $P''_{п.г}$ меньше, чем над плоской поверхностью $P''_{п.\infty}$ (см. уравнение 7.10).

4. Ионный обмен характерен для адсорбентов с явно выраженными ионообменными свойствами и емкостью (иониты, цеолиты), где свободные (незакрепленные) ионы матрицы адсорбента способны к эквивалентному обратимому замещению ионами среды.

Межмолекулярное взаимодействие в процессе физической адсорбции проявляется на расстояниях, соизмеримых с размерами молекул, r < 1 нм (рис.7.24, 7.25) и оценивается потенциалом Леннарда-Джонса[1]:

$$U_{LG} = 4U_0[(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6]), \qquad (7.5)$$

либо

$$U_{LG} = U_0[(r_0/r)^{12} - 2(r_0/r)^6]), \qquad (7.5')$$

где: σ – расстояние между молекулами, отвечающее равновесному положению ($U_{LG} = 0$);
U_0 – минимальная энергия взаимодействия (глубина потенциальной ямы);
r_0 – расстояние между молекулами, отвечающее U_0.

Решая совместно уравнения 7.5 и 7.5': $r_0 = 2^{1/6}\,\sigma$. (7.6)

Для водяных паров:

σ = 0,3165555 нм, r_0 = 0,3553209 нм,
U_0 = 0,6501696 кДж/моль.

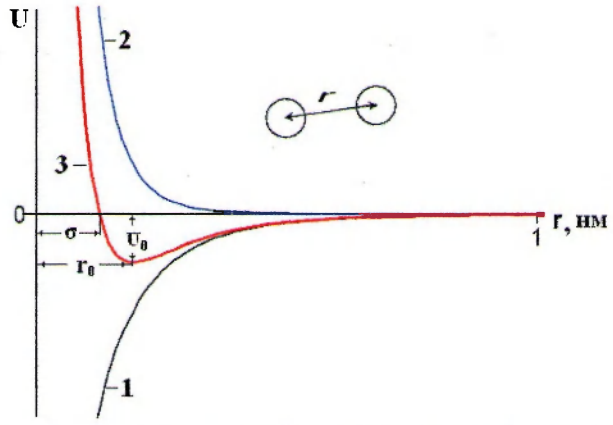
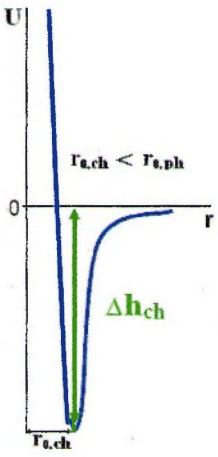


Рис.7.24. Изменение потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия U на расстоянии между молекулами r ≤ 1 нм:
1 – энергия сил притяжения;
2 – энергия сил отталкивания;
3 – потенциал Леннарда-Джонса.

Ход кривой потенциала U_{LG} и несимметричность энергетической потенциальной ямы на рис. 7.24 объясняется различной степенной зависимостью от r энергии сил притяжения $U_{прит}$ и отталкивания $U_{от}$: $U_{прит} \sim r^{-6}$, отталкивания $U_{от} \sim r^{-12}$. На расстояниях r < σ преобладают силы отталкивания[2], и потенциальная энергия молекул – положительна. В случае r > σ, за счет связывания молекул (атомов) силами притяжения, потенциальная энергия является отрицательной, а при дальнейшем увеличении расстояния между ними обращается в нуль, что означает, что молекула становится свободной [11, 91].



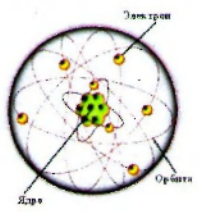
Адсорбция газов и паров на твердых поверхностях сопровождается выделением теплоты, поскольку при контакте с поверхностью молекула теряет одну из степеней свободы (в газовой фазе их три, а в связанном состоянии на поверхности – две). Значения теплоты химической сорбции близки по величине к теплоте химических реакций ($\Delta h_{ch} > 100$ кДж/моль), а значения теплоты физической сорбции ($\Delta h_{ph} = U_0$) – к теплоте конденсации ($\Delta h_{ph} < 20$ кДж/моль).

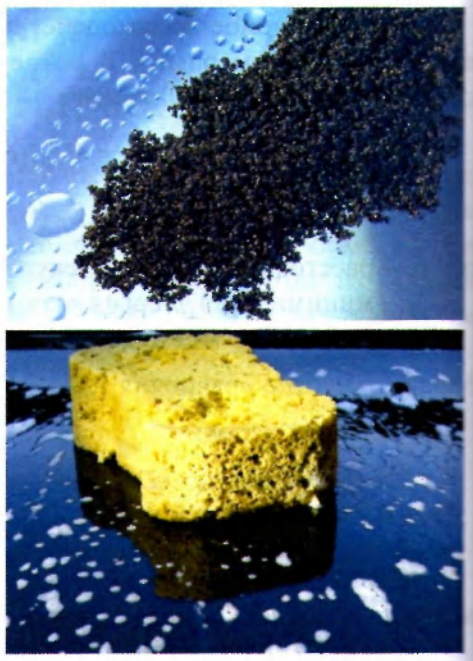
Теплота адсорбции H_2O: $q_{адс} \cong 3000$ кДж/кг, – слагается из скрытой теплоты конденсации и теплоты смачивания.

Рис.7.25. Потенциал хемосорбции.

[1]предложен английским химиком Джоном Эдвардом Леннард-Джонсом (J.A. Lennard-Johnes) в 1931 г. Он же, впервые теоретически обосновал (в 1932 г.) возможность образования ковалентной связи между поверхностью адсорбента и атомом поглощаемого вещества. Показал, что величина энергии активации образования такой связи является критерием типа адсорбции (химической или физической)

[2]силы отталкивания действуют на очень малых расстояниях при соприкосновении электронных оболочек атомов, входящих в состав молекул, и объясняются невозможностью взаимного проникновения заполненных электронных оболочек (принцип запрета Паули)





Любая поверхность обладает свойством притягивать молекулы газа, однако в качестве адсорбентов рассматриваются только мелкодисперсные либо пористые вещества с высокоразвитой поверхностью в единице объема. В соответствии со своим размером (диаметром) поры адсорбентов классифицируются как микропоры (до 2 нм), мезопоры (2…50 нм), макропоры (свыше 50 нм).

Микропоры соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул и имеют значительную удельная поверхность ≥ 1000 м^2/г.

Мезопоры с удельной поверхностью 100…200 м^2/г в процессе адсорбции заполняются послойно, ссужаясь до размеров капилляров, в результате чего срабатывает механизм капиллярной конденсации.

Макропоры в процессе адсорбции заполняются только в условиях насыщения газовой среды (в случае влажного воздуха при φ→1), их можно рассматривать в качестве транспортных каналов на пути вещества к мезо- и микропорам. Удельная поверхность макропор не превышает 0,5…0,2 м^2/г.

На рис. 7.26 приведено распределение потенциала межмолекулярного взаимодействия газовых молекул $U_{LG}(r)$ в порах адсорбента. Очевидно увеличение величины U_0 с уменьшением размера поры.

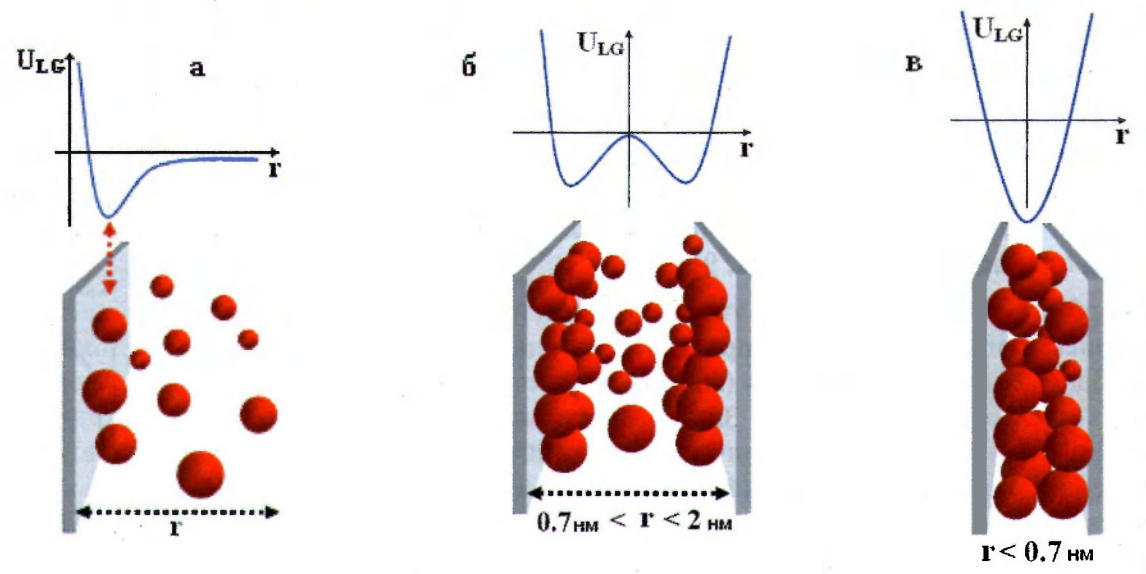
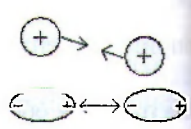


Рис. 7.26. Потенциал Леннарда-Джонса U_{LG} (r)
на свободной поверхности (а), в микропорах (б) и капиллярах (в).

Межмолекулярное взаимодействие Ван-дер-Ваальса осуществляется, прежде всего, за счет дисперсионных сил, которые возникают из-за мгновенных дипольных моментов, появляющихся у неполярных молекул случайным образом при их движении, с величиной примерно одинаковой для различных веществ, что определяет неспецифичный характер этих сил.

Молекулы газа находятся в постоянном движении и сталкиваются между собой. При этом симметричные электронные облака нейтральных молекул деформируются, что приводит на короткое время к возникновению дипольных моментов и, соответственно, притяжению молекул.



Дисперсионные силы могут быть усилены электростатическими (ориентационными и индукционными) силами (рис.7.27).

«Ориентационные силы возникают при взаимодействии полярных молекул с поверхностью, содержащей электростатические заряды (ионы, диполи)» [41]. Индукционные силы проявляются между полярной и неполярной молекулами при поляризации одной из них в поле другой. Взаимодействие, вызываемое электростатическими силами, специфично, поскольку зависит от химической природы компонентов адсорбционной системы.

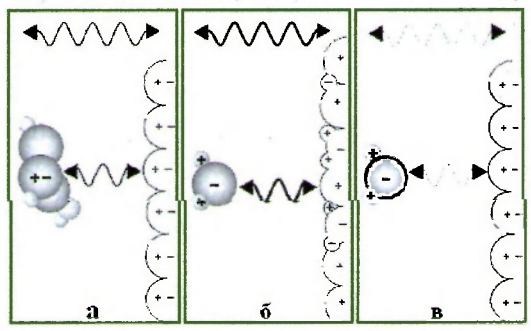


Рис.7.27. Силы межмолекулярного взаимодействия: дисперсионные – а; ориентационные – б; индукционные – в [152].

В монографии профессора Н.В. Кельцева [41] отмечается, что:

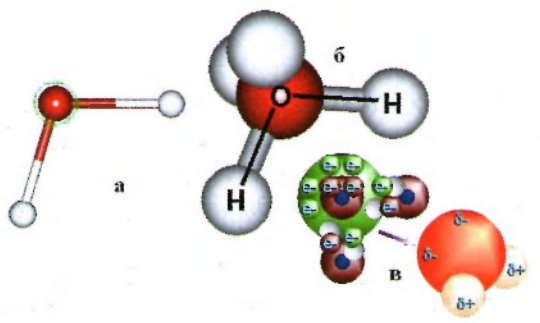
- «…вклад специфического взаимодействия в общую энергию взаимодействия при адсорбции любых молекул на электронейтральных углеродных адсорбентах практически равен нулю, а при адсорбции полярных молекул на цеолитах, отличающихся гетероионным характером, соизмерим* с вкладом неспецифической составляющей» (§ 7.2.4);
- «…специфическое взаимодействие может усиливаться за счет образования водородной связи между адсорбированной молекулой и молекулой адсорбента» (§ 7.2.2). Примером такого взаимодействия может служить адсорбция воды алюмогелями и силикагелями, поверхность которых, в результате необратимой хемосорбции, покрыта гидроксильными группами (§ 7.2.4).

*Следует заметить, что при адсорбции H_2O ориентационные силы превосходят дисперсионные в 3 раза [11].

7.2.2. ОСОБЕННОСТИ АДСОРБЦИИ ПАРОВ ВОДЫ. ВОДОРОДНЫЕ СВЯЗИ

«Молекула воды H_2O проста, а вода как жидкость или пар уникальна…, ее молекулы способны образовывать межмолекулярные ассоциаты не только за счет ориентационных, индукционных и дисперсионных взаимодействий (сил Ван-дер-Ваальса), но и за счет водородных связей. Энергия последних (10…40 кДж/моль) заметно превосходит силы Ван-дер-Ваальса (1…4 кДж/моль). Каждая молекула воды способна образовывать четыре водородные связи: две в качестве донора и две – в качестве акцептора протона. При этом для водородных и ковалентных связей, образуемых атомами кислорода, характерна определенная взаимная пространственная ориентация» [85].

Водородная связь относится к специальному типу связи и обусловлена тем, что радиус иона H+ на порядок меньше, чем у других ионов. По своей природе и по силе занимает промежуточное положение между химическим и ван-дер-ваальсовым взаимодействиями.



Молекула воды (рис.7.28, 7.30) состоит из достаточно большого атома кислорода и двух небольших атомов водорода. Внутри находятся положительно заряженные атомные ядра кислорода и водорода, а снаружи вся конструкция покрыта единым облаком из вращающихся отрицательно заряженных электронов.

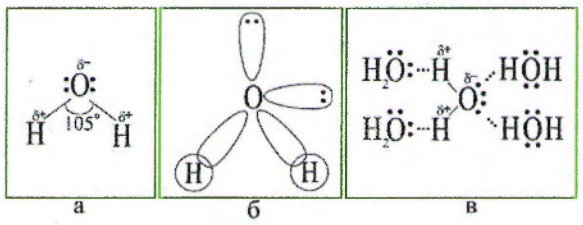


Рис.7.28. Молекула воды: а – геометрия, б – структура, в – схема водородных связей (показаны пунктиром).

Так как масса и положительный заряд ядра кислорода больше, чем у ядер водорода, то электронное облако стягивается, главным образом, в сторону кислородного ядра. Над ядрами водорода имеется недостаток электронной плотности, а на противоположной стороне молекулы, за ядром кислорода, наблюдается избыток электронной плотности (рис.7.28а). Такая асимметричность распределения электрических зарядов придает воде ярко выраженные полярные свойства, она является диполем с высоким дипольным моментом – 1,87 дебай.

Ковалентной связью называется связывание атомов с помощью общих (поделенных между ними) электронных пар. Идеальной ковалентной связью характеризуются частицы, состоящие из одинаковых атомов (N_2, O_2, H_2). Если образуется связь между различными атомами, то электронная плотность смещается к одному из ядер атомов и происходит поляризация связи. Если полярные связи расположены в молекуле симметрично, то положительные и отрицательные заряды компенсируют друг друга, и молекула в целом является неполярной (например, молекула CO_2), рис.7.29. Многоатомные молекулы с несимметричным расположением полярных связей и, следовательно, электронной плотности, являются полярными. Это относится и к молекуле воды с ее угловым строением (рис.7.28…7.30). Ковалентные связи очень прочны и в случае молекулы воды не рвутся даже при фазовых переходах.

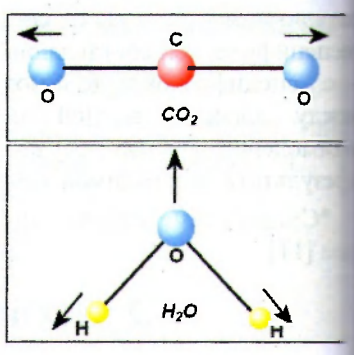


Рис.7.29. Строение молекул CO_2 и H_2O.

Водородные связи образуются за счет электростатического взаимодействия, благодаря которому положительные и отрицательные заряды притягиваются друг к другу. Водородные связи слабее ковалентных (для H_2O в 24 раза). Водяной пар соответствует такому состоянию, когда все водородные связи разорваны [65].

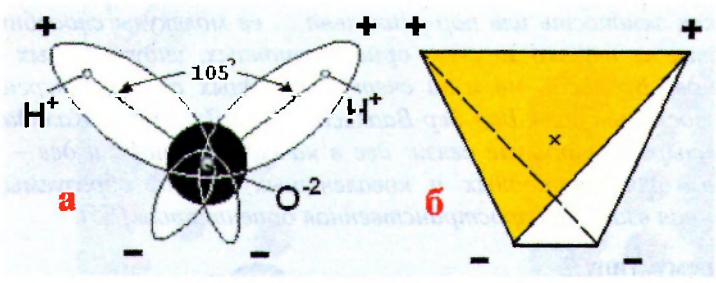


Рис.7.30. Молекула воды:
а – электронные орбитали ядер кислорода и водорода;
б – тетраэдрическое расположение зарядов.

Если соединить прямыми линиями эпицентры положительных и отрицательных зарядов, то получится объемная геометрическая фигура, а именно практически правильный тетраэдр (валентный угол связи H-O-H: 105°, – близок к тетраэдральному 109°5′), рис.7.30б. Таким образом, *молекула воды представляет собой тетраэдрический магнит.*

Различие в величине дипольного момента компонентов воздуха определяет преимущество молекул воды в процессе адсорбции перед молекулами других веществ, например:

$H_2O > NH_3 > CH_4$ (рис.7.31).

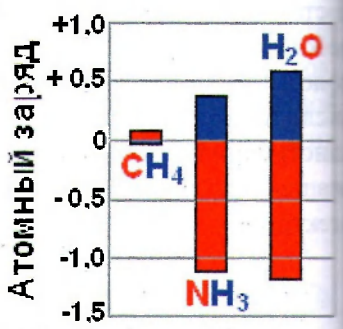
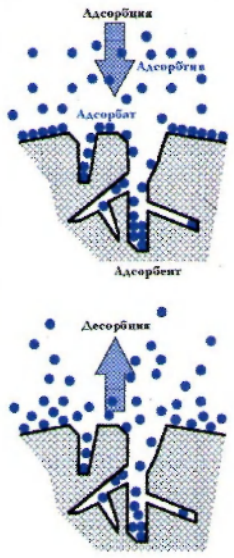


Рис.7.31. Полярность молекул воды, аммиака и метана.

7.2.3. КИНЕТИКА АДСОРБЦИИ



В процессе адсорбции концентрация и парциальное давление поглощаемого вещества непрерывно растет. В результате устанавливается равновесие между состоянием вещества в объемной газовой фазе (адсорбтивом) и на поверхности адсорбента (адсорбатом): $P_п = P''_п$. Предельное содержание адсорбата, соответствующее полному насыщению адсорбента поглощаемым веществом, называют статической величиной адсорбции или статической емкостью адсорбента.

Величина адсорбции определяется как количество адсорбата V, связанное единицей поверхности S: $a = V/S$, но т.к. площадь поверхности измерить трудно, величину адсорбции обычно приводят к единице массы адсорбента M:

$$a = V/M \text{ [моль/кг, кг/кг, доли ед., \%]}. \qquad (7.7)$$

Физическая адсорбция является обратимым процессом, что дает возможность последовательно проводить процессы адсорбции и десорбции.

Особенностью адсорбции является ее селективность, т.е. избирательная способность адсорбентов по-разному поглощать компоненты газовой смеси.

Величина адсорбции a зависит от структуры адсорбента, от природы адсорбируемого вещества, его парциального давления в газовой фазе $P_п$ и от температуры t. Для данной адсорбционной системы (адсорбат – адсорбент) величина a зависит только от двух переменных: $a = f(P_п, t)$. Анализ адсорбционного процесса можно еще упростить, если рассматривать его при постоянном значении одного из термодинамических параметров t или $P_п$. При $t = \text{const}$: $a = f(P_п)$ – *изотерма адсорбции*, при $P_п = \text{const}$: $a = f(t)$ – *изобара адсорбции*. Эти зависимости (как правило, эмпирические) – основные характеристики адсорбентов – используются для сопоставления различных материалов и составляют основу инженерных расчетов.

Экспериментальные данные по величине газовой адсорбции (в т.ч. и водяных паров) различными адсорбентами, как правило, аппроксимируются пятью типичными изотермами адсорбции (рис.7.32).

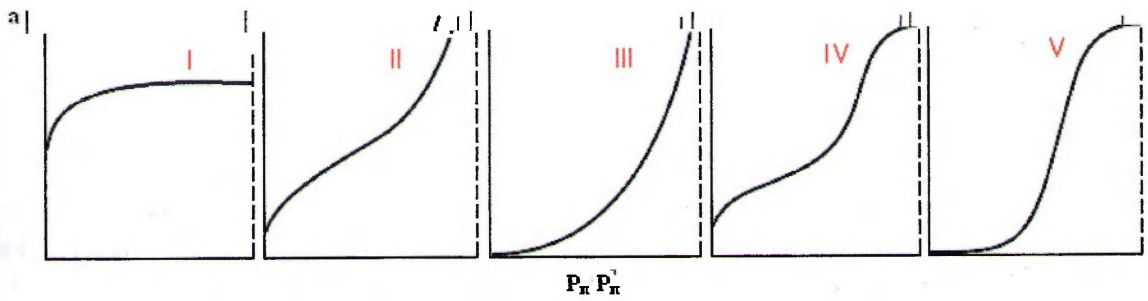


Рис.7.32. Классификация BDDT изотерм адсорбции: $P_п/P''_п$ – относительное давление (при адсорбции H_2O равнозначно относительной влажности φ) [284].

Данная классификация является базовой, предложена в 1940 г. S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming, E. Teller

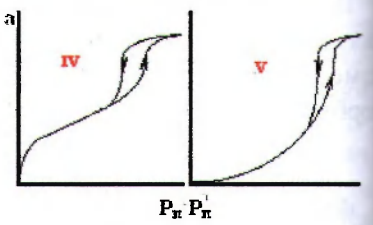
В настоящее время классификация существенно расширена, см. на сайте IUPAC – The International Union of Pure and Applied Chemistry – международной неправительственной организации, созданной в 1919 году для продвижения химии и химических технологий, а также на с. 248, рис.7.82б.

Характер кривых – изотерм адсорбции соответствует физики процессов и объясняет особенности их протекания (рис.7.32, 7.33):

• *изотермы I типа* (изотермы Лэнгмюра) характеризуются монотонным ростом до максимального значения, что типично для мономолекулярной адсорбции, – хорошо согласуются с изотермами адсорбции H_2O цеолитами (А и Х типа);
• *II.* – соответствуют физической полимолекулярной адсорбции;
• *III* – характерны для адсорбции, теплота которой равна или меньше теплоты конденсации адсорбата [1], – адсорбция H_2O активированными углями;

Крутой подъем кривых адсорбции II и III в области высоких значений φ объясняется явлением капиллярной конденсации, когда капилляры уже заполнены $P_n = P_{n.p}$, но по отношению к плоской поверхности еще не достигнуто состояние насыщения $P_n < P_{n.\infty}$ [2].

- *IV и V* – повторяют до определенных значений относительных давлений (φ) изотермы II и III, соответственно. Однако, вследствие существенного проявления капиллярной конденсации, имеют петли гистерезиса: адсорбция H_2O мезопористыми адсорбентами, в т.ч. алюмогелями, силикагелями.



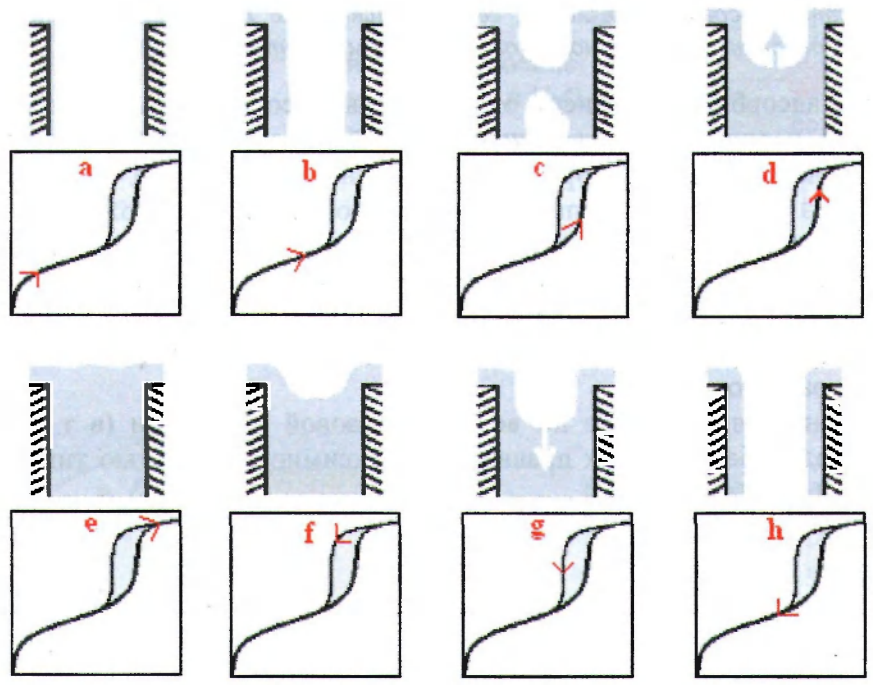


Рис.7.33. Процессы адсорбции и десорбции на мезопористом адсорбенте (изотерма адсорбции а ($P_п/P''_п$) - IV типа) [222]: a – монослойная адсорбция; b – полимолекулярная (послойная) адсорбция; c – начало капиллярной конденсации; d – капиллярная конденсация; e – адсорбция на внешней поверхности; f – начало капиллярной десорбции; g – капиллярная десорбция; h – послойная десорбция.

Для описания и анализа кинетики адсорбции существует довольно большое количество различных моделей (Лэнгмюра, БЭТ, Фрейндлиха, Дубинина-Астахова и др.).

Уравнение И. Лэнгмюра (7.6), предложенное им в 1916 г., для мономолекулярной адсорбции, основано на равновесии процессов адсорбции и десорбции:

$$d\Theta/dt = k_a P_п N(1 - \Theta) = k_d N\Theta, \qquad a = a_m k P_п /(1 + k P_п), \qquad (7.8)$$

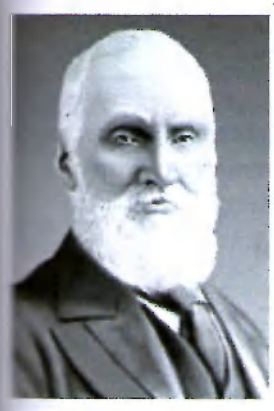
где Θ – доля поверхности адсорбента, заполненная адсорбатом, $\Theta = a/a_m$; k_a и k_d – коэффициенты адсорбции и десорбции, соответственно; $k = k_a/k_d$; a_m – емкость монослоя молекул адсорбата.

Уравнение БЭТ (1938 г.): Брунауера-Эммета-Теллера (Stepen Brunauer, Paul Emmett, Edward Teller), – описывает полимолекулярную адсорбцию:

$$a = (a_m C P_п/P^{"}_п)/(1 - P_п/P^{"}_п [1 + (C - 1) P_п/P^{"}_п]), \quad (7.9)$$

где C – коэффициент, зависящий от величины теплоты адсорбции.

Каноническое уравнение У.Томсона определяет потенциал масообмена при капиллярной конденсации.



Уильям Томсон (лорд Кельвин), в 1870 г., исходя из условия равенства химических потенциалов в смежных фазах, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, установил зависимость упругости насыщенного пара от формы поверхности жидкости:



$$P_п{"}_{.r} / P^{"}_{п.\infty} = \exp \pm (2\sigma /(r\, \rho_w\, R_п\, T)), \quad (7.10)$$

где r – радиус кривизны поверхности, м; σ – коэффициент межфазного поверхностного натяжения, н/м; $R_п$ – газовая постоянная, Дж/(кг·К); ρ_w – плотность жидкости, кг/м^3; T – температура, К.

Знак ± показателя степени при экспоненте соответствует знаку кривизны поверхности: в случае вогнутой формы поверхности - (–), выпуклой - (+).

На рис.7.34 показана примерная картина насыщения адсорбента поглощаемым веществом: мономолекулярная адсорбция с покрытием поверхности адсорбента (как внешней, так и в каналах) в один слой при заполнении статической емкости на 15 %, полимолекулярная адсорбция с присоединением капиллярной конденсации (70 % заполнение) и полное насыщение (100 % заполнение).

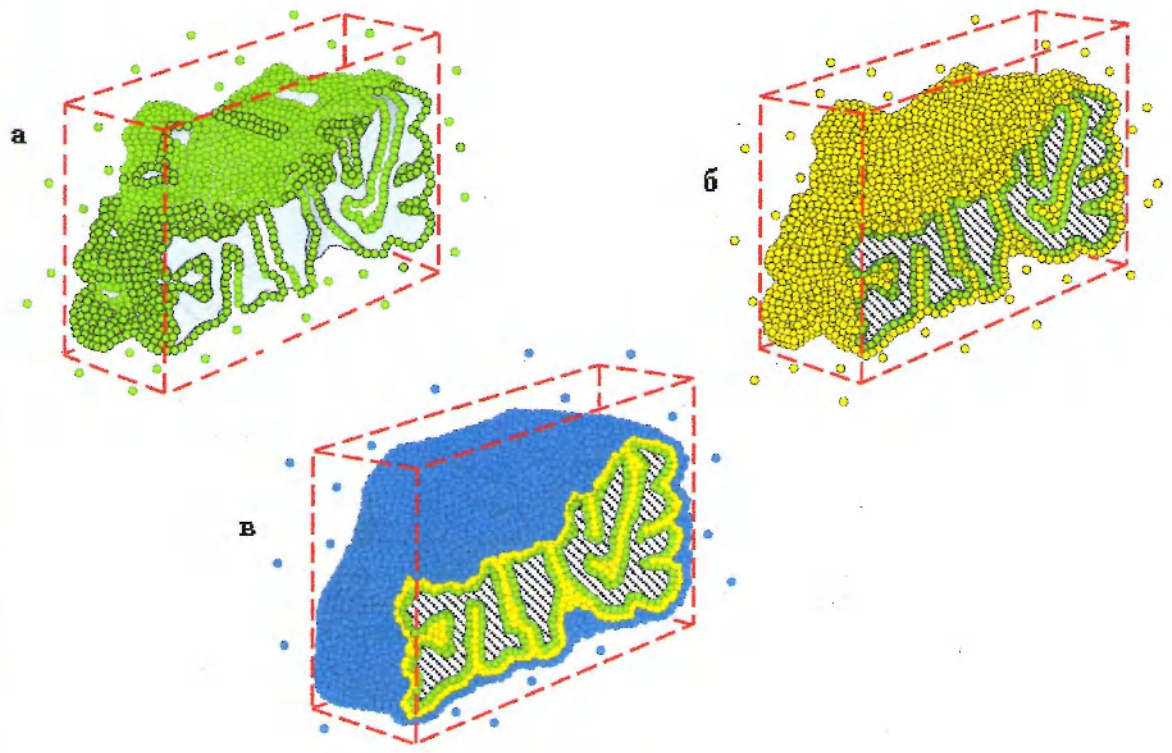


Рис.7.34. Поэтапное заполнение адсорбента: а – монослойная адсорбция; б – многослойная адсорбция и капиллярная конденсация; в – достижение статической емкости.
иллюстрации Quantachrome Instruments Corporate Headquarters: www.quantachrome.com

7.2.4. АДСОРБЕНТЫ



В качестве адсорбентов влаги (десикантов) применяют различные вещества:

- неорганические: алюмогели, силикагели, натуральные и синтетические цеолиты;
- органические: активированные угли, полимеры;
- нанокомпозиты (двухкомпонентные системы).

Адсорбенты отличаются как адсорбционными свойствами, вследствие различной природы материалов, так и физическими параметрами: размерами, плотностью и пр.

7.2.4.1. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СОРБЕНТЫ

7.2.4.1.1. АЛЮМОГЕЛИ



Алюмогель (activated alumina, активная окись алюминия) получают высушиванием гидрооксида алюминия $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ (n =1…3). Кристаллические частицы алюмогеля образуют щелевидные или бутылкообразные поры со средним размером 12…20 нм. Удельная поверхность до 400 $м^2/г$. Влагоемкость – 40 % собственной массы. Степень осушения воздуха за счет усиления дисперсионных сил электростатическими силами при взаимодействии с полярными парами воды – высокая: до d = (0,041…0,01) г/кг (τ = - 60 °C) [33, 41]. Температурный уровень регенерации 175 ^{0}C. Алюмогель стоек к воздействию капельной влаги.

В случае алюмогеля работают все три, упомянутые выше, механизма адсорбции (рис.7.35).

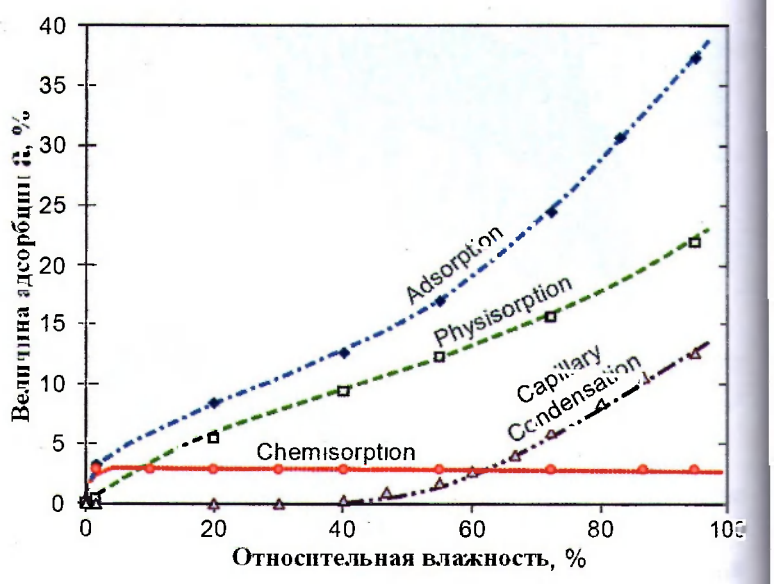


Рис.7.35. Изотерма адсорбции H_2O алюмогелем (t = 25 °C), как результат хемосорбции, физической сорбции и капиллярной конденсации [159].

Хеморсобция специфично проявляется в формировании первичного слоя адсорбата в процессе диссоциативного присоединения молекул воды на участках поверхности оксида алюминия (рис.7.36).

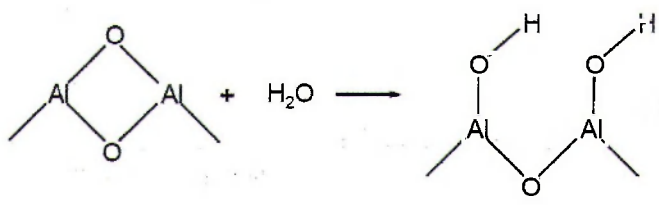


Рис.7.36. Схема хемосорбции молекул воды алюмогелем.

Этот процесс возникает уже при минимальном значении относительной влажности $\varphi > 0$. Мономолекулярный слой H_2O емкостью 2..3 % окончательно образуется при $\varphi = 10$ % и характеризуется низким уровнем парциального давления. Теплота хемосорбции, выделяющая при формировании монослоя, 25..38 кДж/моль.

Представленная на рис.7.36 схема процесса химической сорбции основана на том, что на обезвоженной поверхности окиси алюминия всегда присутствуют ионы кислорода (химические связи при дегидратации до конца не разрушаются), которые, при контакте с молекулами H_2O, образуют монослой ионов $O\text{-}H^-$ – поверхностных гидроксильных групп.

В дальнейшем, при повышении парциального давления и $\varphi > 10$ % преобладает полимолекулярная физическая адсорбция с поглощением большого количества влаги (рис.7.35, 7.37). На рис.7.37 показано присоединение недиссоциированных молекул H_2O к поверхностному слою за счет водородных связей.

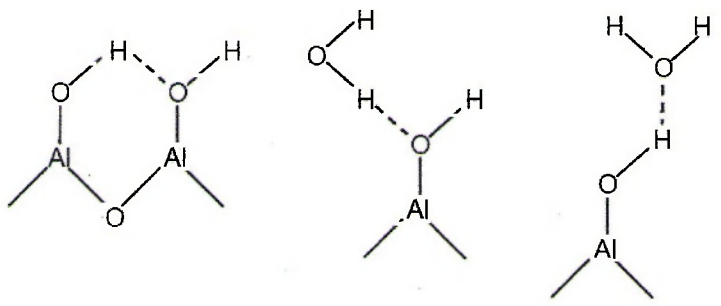


Рис.7.37. Схема физической адсорбции молекул воды алюмогелем.

При высоких значениях $\varphi > 60$ % существенное влияние на процесс адсорбции оказывает капиллярная конденсация. При чем, как уже отмечалось, именно она приводит к несовпадению изотерм адсорбции и десорбции с образованием петли гистерезиса (рис.7.38, $t = 25$ °C). Если считать, что адсорбция завершена на уровне $a = 29$ % в точке A кривой адсорбции (при $\varphi = 80$ %), то уменьшение относительной влажности воздуха не приведет сразу к десорбции влаги. Десорбция начнется только при $\varphi = 65$ % в т. B левой ветви петли гистерезиса и закончится на требуемом уровне, например, $a = 9$ % в точке C при $\varphi = 10$ %. Дальнейший переход к последующей адсорбции влаги возможен начиная со значения $\varphi = 25$ % (т. D).

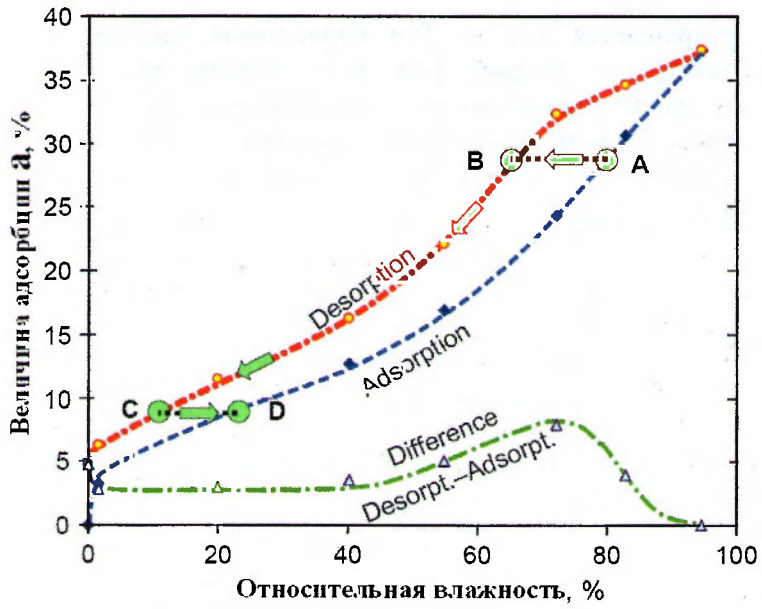


Рис.7.38. Петля гистерезиса процессов адсорбции – десорбции H_2O на алюмогеле при $t = 25$ °C [159].

На рис.7.35, 7.38 приведены рабочие характеристики (изотермы адсорбции) алюмогеле компании Axens IFP Group Technologies (сферы 1,5…8 мм, удельная поверхность 320…33 $м^2/г$, общий объем пор 44…46 $см^3/100$ г). На рис.7.39 – изотермы адсорбции алюмогеле Grace & Davison Chemical Co. (сферы и гранулы) и Engelhard (сферы, 355 $м^2/г$).

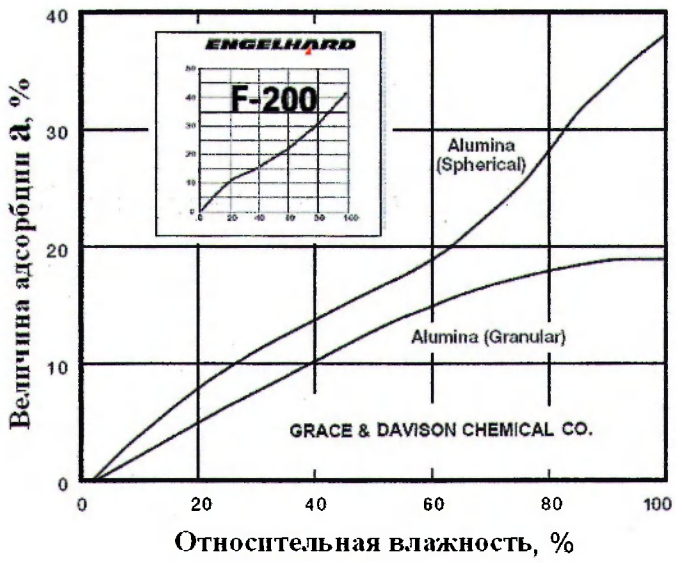


Рис.7.39. Изотермы адсорбции алюмогелей Grace & Davison Chemical Co. и Engelhard Co.

Grace & Davison Chemical Co. – одна из крупнейших мировых химических корпораций (Columbia, Maryland, USA), основана в 1832 г.

Engelhard Co. – старейшая (1902 г.) американская химическая компания, в августе 2006 г. приобретена корпорацией BASF AG (Ludwigshafen, Germany)

7.2.4.1.2. СИЛИКАГЕЛИ



Силикагель (silica gel) по своей природе – гидратированный аморфный кремнезем $SiO_2 \cdot n\,H_2O$, который в результате поликонденсации превращается в гель. Его коллоидные частицы имеют форму глобул, близкую к сферической [41]. Силикагель получают в результате взаимодействия раствора силиката натрия с раствором серной кислоты или подкисленным раствором алюминия сернокислого с образованием диоксида кремния – гидрогеля, затем следует операция прокаливания.

В процессе термообработки материала происходит сращивание отдельных частиц (зерен) с образованием жесткого кремнекислородного каркаса корпускулярной структуры (рис.7.40), пронизанного порами размером от 0,5 нм до 300 нм. Средний размер пор меньше, чем у алюмогеля: 2…11 нм. Поры асимметричны (рис.7.37б), они сужаются по направлению от поверхности, подобно кратерам вулканов, и работают на механизм капиллярной конденсации [153, 295]. Величина внутренней поверхности ≥ 850 $м^2/г$*. За счет этого силикагель – десикант с высокой влагоемкостью до 35…40 (45) % собственной массы. Имеет большую осушающую способность: конечное влагосодержание воздуха $d = 0{,}079…0{,}025$ г/кг, что отвечает температуре точки росы τ = -40…-50 °С [32]. Восстанавливает свои свойства за 2…3 часа при температуре 180…120 °С (нагревание до $t \geq 300$ °С не рекомендуется, поскольку при этом утрачиваются гигроскопические свойства материала). Микропористый силикагель разрушается под действием капельной влаги. Макропористый силикагель – водостоек. Силикагель производится в виде тонкодисперсного порошка либо гранулированным, размером до 7 мм в диаметре.

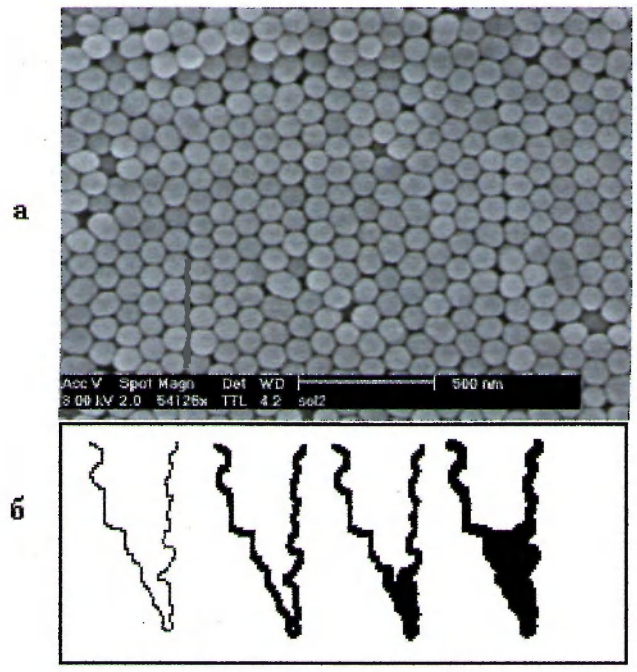
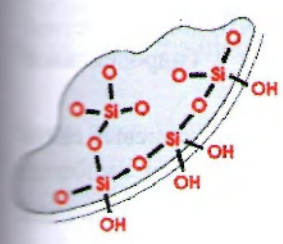


Рис.7.40. Корпускулярное строение силикагеля (а) и конструкция пор (б).

*для того, чтобы понять, насколько велико это число, достаточно представить, что в 10 г силикагеля (столовая ложка) содержится большая поверхность пор (8500 м^2), чем поверхность футбольного поля (105м х 70м = 7350 м^2) [153]



Силикагели – гидрофильные сорбенты. Адсорбционная способность обусловлена наличием высокоразвитой капиллярной структуры, а также химической активностью гидроксилированной поверхности*, проявляемой определенными силанольными группами Si-OH, которые способствуют образованию водородных связей с молекулами сорбата (рис.7.41…7.44).

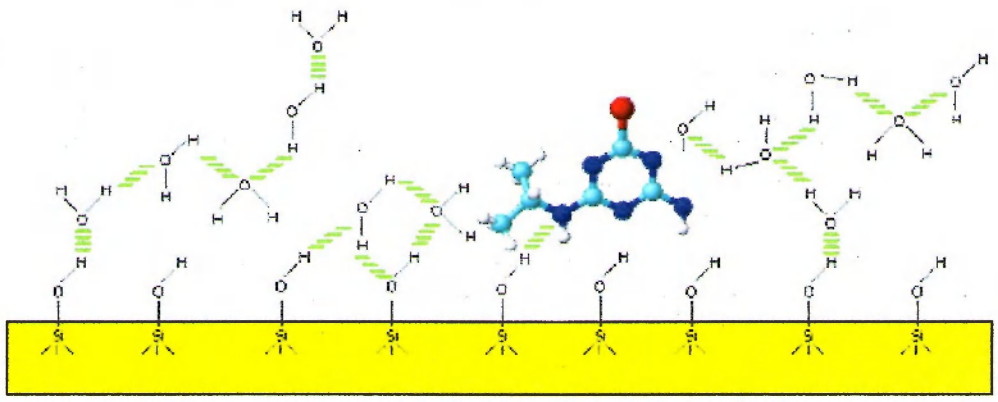


Рис.7.41. Схема адсорбции водяных паров (и других газов) силикагелями за счет водородных связей.

*«…на каждом квадратном нанометре поверхности кремнезема может находиться до 4,6 гидроксильных групп, связанных с атомами кремния», «…гидроксилированная поверхность характерна не только для различных модификаций кремнезема, но и для большого числа других минеральных веществ, относящихся к различным классам неорганических соединений - оксидам, гидроксидам, солям, твердым кислотам. Более того, даже на поверхности металлов есть гидроксилы. Это объясняется наличием у всех металлов (даже у платины!) поверхностной оксидной пленки» [57].

В общем случае силанольные группы образуются на поверхности в результате двух основных, благоприятных с термодинамических позиций, процессов [315].

Во-первых, такие группы формируются в ходе синтеза, например, в процессе конденсационной полимеризации $Si(OH)_4$, когда пересыщенный раствор монокремниевой кислоты превращается в поликремниевые кислоты с последующим формированием золей и гелей SiO_2, содержащих ОН-группы на поверхности. Конечный продукт после высушивания – ксерогель сохраняет частично или полностью силанолы на поверхности.

Во-вторых, силанолы могут образоваться в результате регидроксилирования термически дегидроксилированного кремнезема после обработки его водой или водными растворами. Поверхностный атом Si стремится иметь законченную тетраэдрическую конфигурацию, и остаточная валентность, после раскрытия силоксанового мостика ≡Si-O-Si≡, насыщается в водной среде ОН-группой [73], рис. 7.42б.

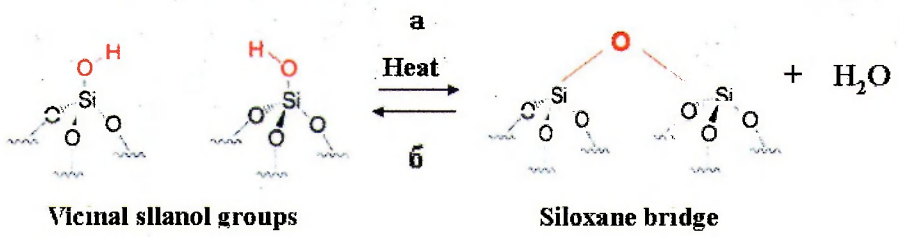


Рис.7.42. Схемы процессов дегидроксирирования поверхности силикагеля (а) и гидролиза напряженной силоксановой связи (б) [58].

Современные представления о силикагеле (модель Л.Т. Журавлева [73, 315]) выделяют три типа силанольных связей (рис.7.43):

1) свободные одиночные (изолированные) группы, характеризующиеся тем, что поверхностный атом кремния имеет три корневые связи в материале (силикагеле) и одну с гидроксильной группой ОН на поверхности: ≡SiOH;
2) свободные геминальные (изолированные) группы, в которых атом Si имеет две корневые связи и две связи с гидроксильными группами: $=Si(OH)_2$;
3) вицинальные (мостиковые) силанолы – связанные между собой водородной связью одиночные силанолы, геминалы и их комбинации.

Силанольные группы Si-OH могут находиться как на поверхности (в основном в местах со значительной кривизной), так и в узких порах (диаметром менее 1 нм) – ультрамикропорах, доступных лишь для молекул самых малых размеров, например воды или в местах контакта глобул.

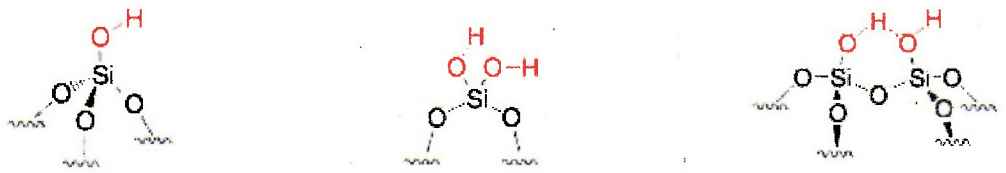


Рис.7.43. Силанольные группы: одиночные; геминальные; вицинальные.

Поверхность силикагелей состоит, преимущественно, из гидрофильных областей с силанольными группами Si-OH, а также гидрофобных участков с менее реакционноспособными силоксановыми группировками ≡Si-O-Si≡ (рис.7.44).

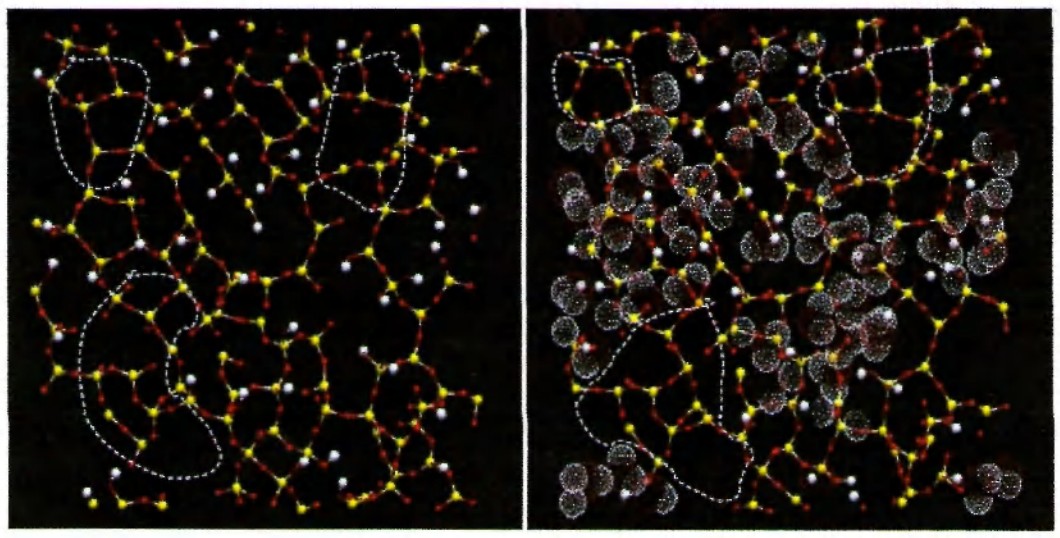


Рис.7.44. Гидрофильные области и гидрофобные участки (очерчены пунктирной линией) поверхности силикагеля [178].

В настоящее время возможности химической технологии позволяют, за счет изменения условий проведения процессов дегидроксилирования и гидролиза, создавать силикагели с заранее заданными гидрофильными либо гидрофобными свойствами.

Силикагели выпускаются с различными физическими параметрами (форма, размеры, плотность, пористость и пр.) и свойствами – рабочими характеристиками (величина адсорбции, температура регенерации).

Ниже представлены данные по величине адсорбции H_2O силикагелей корпорации Grace & Davison Chemical Co. (рис.7.45) и немецкой компании LLFA (табл.7.2, рис.7.46).

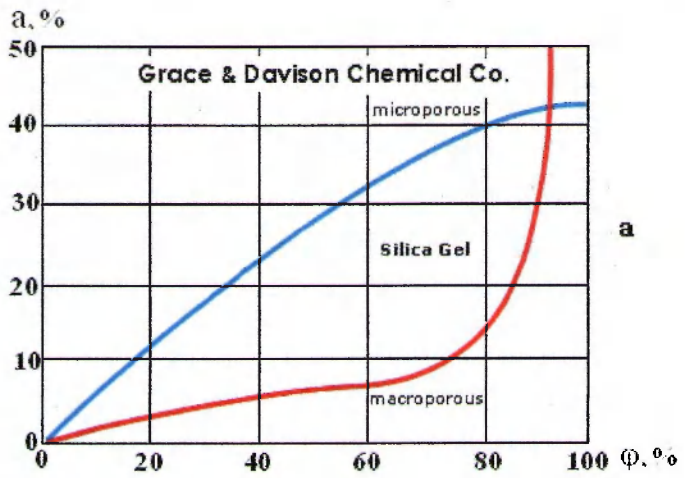


Рис.7.45. Изотермы t = 25 °C (а) и изобары (б) адсорбции силикагелей Grace & Davison Chemical Co.

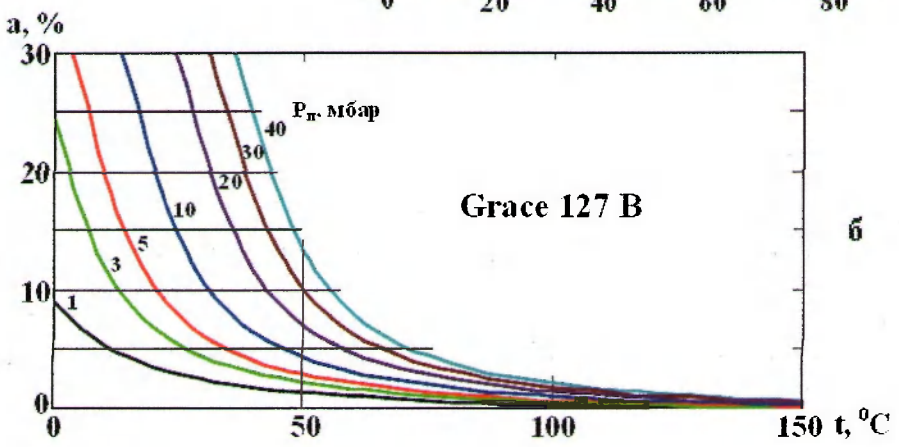
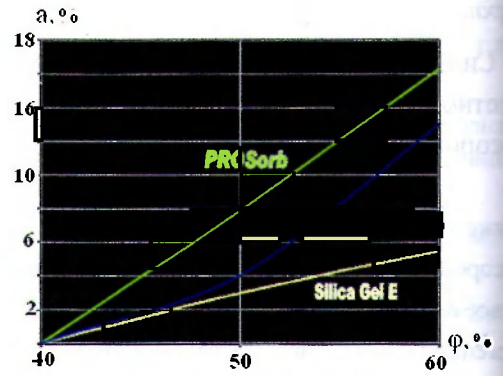


Таблица 7.2. Данные по величине адсорбции силикагелями LLFA.

Марка	**PROSorb**		**ART SORB**		Silica Gel E microporous		Silica Gel M macroporous	
φ , %	a, %		a, %		a, %		a, %	
10	6,2		6,5		7,0		2	
20	10,6		11,5		14		3	
30	16,2		16		20,5		4	
40	22,5	Δa 16,3	22	Δa 13	25	Δa 5,5	5	Δa 3
50	30,4		26		28		6,5	
60	38,8		35		30,5		8	
70	44,9		54		32		11	
80	46,8		67		33		17	
90	48		74		34		32,5	
100	49		80		35		93,5	

Силикагели LLFA могут быть рекомендованы для следующих рабочих диапазонов φ:

20…40 % – Silicagel Plus;
40…60 % – Prosorb;
60…80 % – ArtSorb.



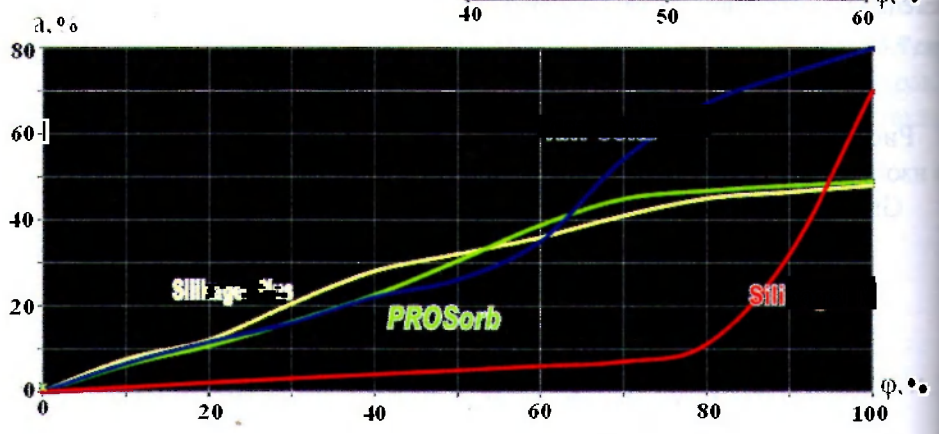


Рис.7.46. Изотермы адсорбции силикагелей LLFA при t = 25 °C.

Силикагель, как вещество, обладающее адсорбционными свойствами, известен с 1640 года. Применялся в противогазах I мировой войны для поглощения вредных газов. В 1919 г. был запатентован профессором Walter A. Patrick (Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, USA). С 1930 г. использовался в системе балансировки цепеллинов, а именно, в качестве адсорбента влаги для компенсации потери массы летательного аппарата при расходовании им топлива. Во II мировой войне применялся как десикант для военной техники и медикаментов. Силикагель – основной наполнитель современных адсорберов – осушителей воздуха.

7.2.4.1.3. ЦЕОЛИТЫ



Природный минерал вулканического происхождения цеолит был обнаружен в 1756 году шведским ученым Э.Ф. Кронштедтом, который наблюдал, как при нагревании из него быстро испаряется (как бы выкипает) влага. В связи с этим минерал получил название цеолит – *кипящий камень* (от греч. "zeo" – кипеть и "lithos" – камень). Однако его адсорбирующие качества были замечены только через 150 лет рабочими, которые зафиксировали поглощение цеолитами запахов из воздуха. С тех пор в различных частях земного шара найдено около 50 различных видов цеолитов, более 200 созданы искусственно. Фотографии основных природных цеолитов приведены на вкладке, с. 226-227.

Цеолиты – кристаллические водные алюмосиликаты* щелочных (Na, K…) и щелочноземельных (Ca, Mg, Sr, Ba…) металлов. Их кристаллическая структура, как правило, образована тетраэдрами SiO_4 и AlO_4 (рис.7.47), которые объединяются своими вершинами в трехмерный каркас (полиэдр), пронизанный пустотами: полостями и каналами регулярной структуры. Размер пор в зависимости от типа цеолита может быть от 0,3 до 3 нм. Поскольку эта величина соизмерима с диаметром молекул, то цеолиты действуют как молекулярные сита и избирательно адсорбируют газовые молекулы. *Диаметр молекул H_2O – 0,28 нм, поэтому все цеолиты являются десикантами.*



Треугольная пирамида, как одна из форм тетраэдра (правильного четырехгранника), наглядно иллюстрирует структуру цеолита «А» типа: на ее вершинах размещаются атомы Si или Al, грани заполняют атомы кислорода (рис.7.47, 7.50).

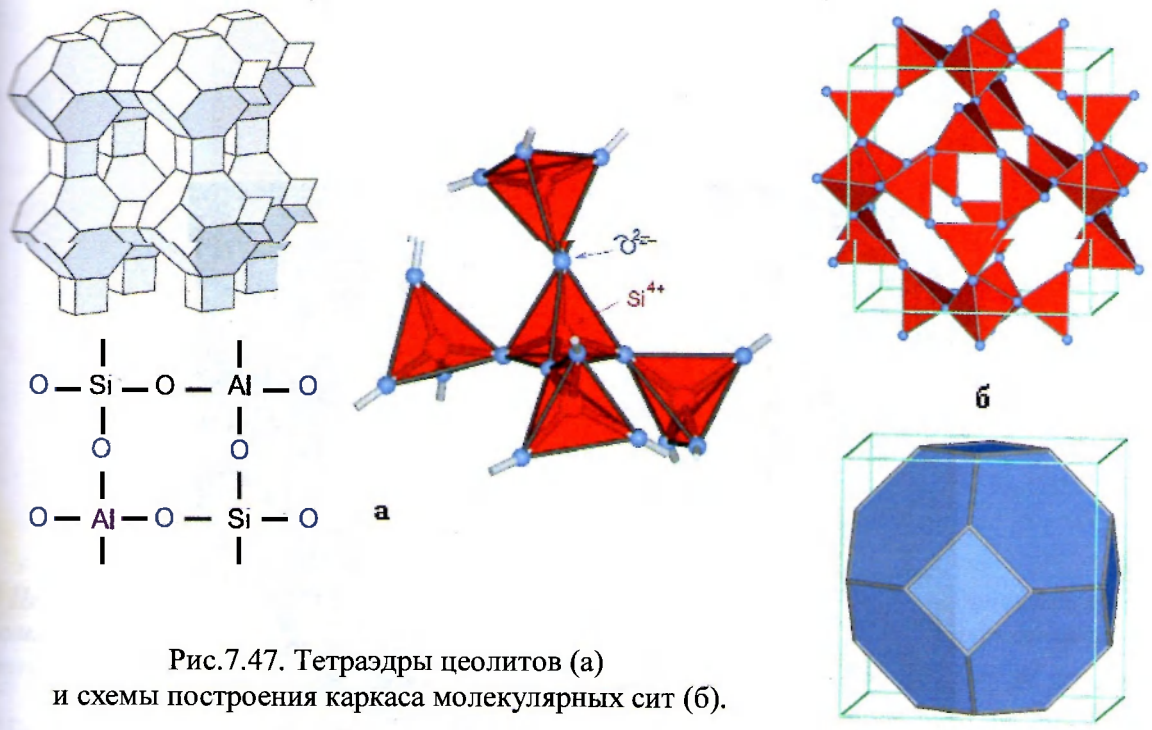


Рис.7.47. Тетраэдры цеолитов (а)
и схемы построения каркаса молекулярных сит (б).

** а также алюмофосфаты $AlPO_4$ (см. с.239), на основе которых в 1970 г. удалось синтезировать молекулярное сито, и в последствии создать целый класс искусственных цеолитов*

Натуральные цеолиты

Благодаря рыхлой кристаллической структуре и высокому содержанию воды натуральные цеолиты – мягкие и легкие минералы. При нагревании расщепляются и вспучиваются, выделяя воду («вскипают»). По внешнему виду различают «лучистые» – игольчатые и волокнистые, образующие шаровидные и сноповидные сростки (натролит, морденит и др.), листоватые или пластинчатые (стильбит, гейландит) и изометричные (шабазит, фожазит и др.). Для фожазитов характерны многогранники в виде кубооктаэдра.

Многие цеолиты (гейландит, натролит, морденит и др.) образуются в результате низкотемпературного или экзогенного изменения вулканических пород основного или среднего состава (базальтов и андезитов).

Шабазит (Chabazite), 1772 г.
$Ca\ Al_2 Si_4 O_{12} - 6H_2O$
Hydrated Calcium Aluminum Silicate



Гейландит (Heulandite), 1801 г.
$(Ca, Na_{2-3} Al_3 (Al, Si)_2 Si_{13} O_{36} - 12\ H_2O$
Hydrated Calcium Sodium Aluminum Silicate



Фожазит (Faujasite), 1842 г.
$(Ca, Na_2, Mg, K_2)\ [Al_2Si_{4,\ 1\text{-}4,\ 6}O_{12,\ 2\text{-}13,2}] - 4H_2O$
Hydrated Calcium Sodium Magnum Potassium Aluminum Silicate



Морденит (Mordenite), 1864г.
$(Ca, Na_2, K_2)\ Al_2Si_{10}O_{24} - 7H_2O$
Hydrated Calcium Sodium Potassium Aluminum Silicate

Цеолиты находят в трещинах и пустотах метаморфических пород, которые имеются в районах явления молодого вулканизма: США, Индия, Япония, Россия, Армения. Месторождения цеолитов ществуют и в Украине (Крым и Карпаты).

Благодаря особой кристаллической структуре с многочисленными полостями и каналами олиты используются как природные «молекулярные сита» для осушки и очистки газов (в т.ч. здуха), нефти и нефтепродуктов, как катализаторы, фильтры, ионообменники.

Впервые натуральный цеолит – дегидратированный природный шабазит был применен в естве молекулярного сита в 1945 г.

Используя тетраэдральные фрагменты как строительные блоки, можно легко построить с помощью «молекулярного» ЛЕГО, модели различных искусственных цеолитов (рис. 7.48).

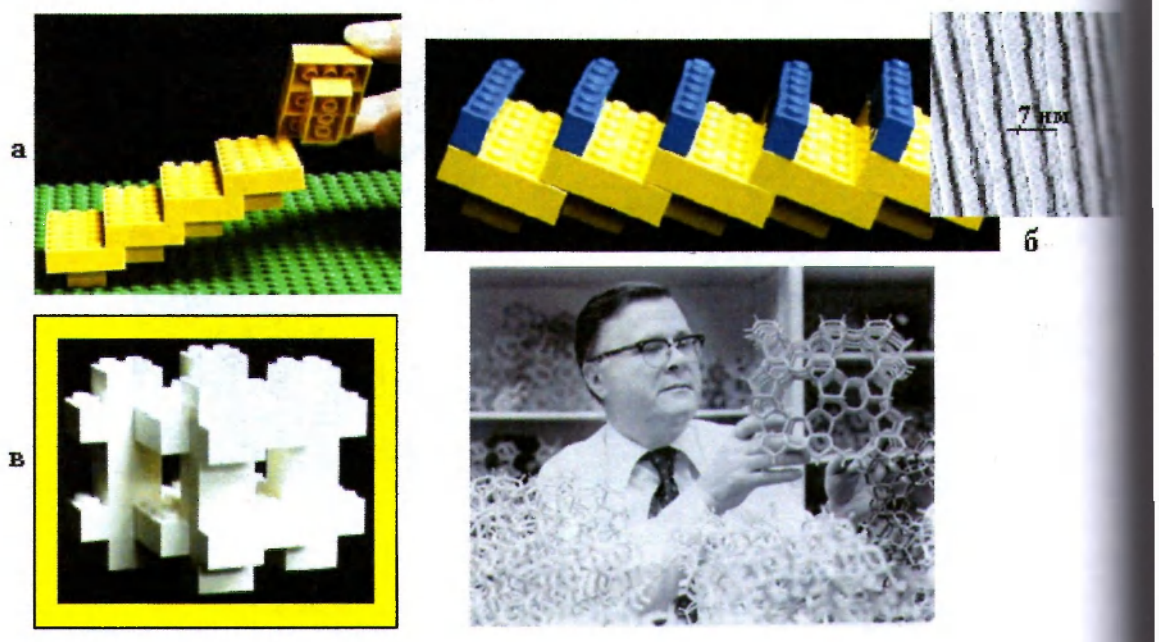


Рис.7.48. Моделирование цеолитов: а – элемент каркаса в виде террасы; б – модель наноструктуры фтористого кальция на кремниевой террасе и микрофотография реального образца; в – трехмерные каркасы.

на фото – известный ученый Джордж Кокотайло (George Kokotailo), создатель искусственного цеолита SZM-5

Наиболее полную информацию по структурам цеолитов можно получить на сайте IZ-Structure Commission: *www.iza-structure.org/databases*

Если в каркасе все четыре угла занимают атомы четырехвалентного кремния Si, то структура электрически нейтральна, как кварц SiO_2. В цеолитовых структурах некоторые вершины занимает трехвалентный Al, вызывая дефицит положительного заряда. Поскольку координационное число трехзарядного алюминия равно четырем, то алюмокислородному тетраэдру может быть приписан общий единичный отрицательный заряд [50].
Электронейтральность обеспечивают катионы Na^{+}, K^{+}, Ca_2^{+}, Mg_2^{+}, расположенные вблизи тетраэдров, (рис.7.49).

Химическая формула: Mx/n [(AlO2) x (SiO2)y] · z H2O, где M – катион металла с валентностью n.

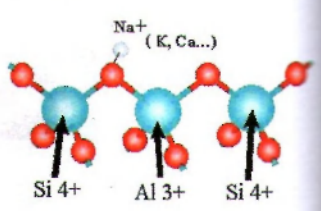


Рис.7.49. Катионные включения металлов в состав цеолитов.

Наличие сильного электрического дипольного момента в каркасе молекулярной решетки цеолитов предопределяет преимущественное поглощение молекул большей полярности, в связи с чем: молекулярные сита – идеальные десиканты, т.к. молекулы воды, во-первых, имеют малые размеры, а во-вторых, существенно полярны.

Цеолиты в состоянии адсорбировать водяные пары с очень низким парциальным давлением до уровня влагосодержания в одну миллионную часть $1 \cdot 10^{-6}$ кг/кг (0,001 г/кг), что на порядок превышает возможности алюмогеля. Соответствующее значение температуры точки росы[1] $\tau = -70$ °C. Поверхность пор: более 1000 $м^2$/г. Влагоемкость: до 30 % собственной массы, в связи с относительно небольшим объемом адсорбционных полостей.

[1]по данным компании Seibu Giken DST AB: $\tau = -80$ °C (роторно-сорбентный осушитель SZCR, см. последующий материал)

Синтетические цеолиты выпускаются в виде порошка либо гранул размером 2 мм. Температурный уровень регенерации 180…250 °С.

Молекулярные сита имеют множества внутренних полостей, связанных входными окнами строго одинакового размера. Именно по этим размерам в ангстремах (Å) их классифицируют: 3А (3Å), 4А (4Å), 5А (5Å), 13Х (10Å)* (табл.7.3).

*Первоначально размер входного окна цеолита 13Х ошибочно был определен как 13 Å (правильно 10Å), однако маркировка сохранилась [Å – внесистемная единица, 1Å =10^{-10} м, 1Å = 0,1 нм]

Все сита хорошо поглощают молекулы воды, кислорода, азота, оксида углерода. Сита 4А уже не способны поглощать молекулы аргона (3,8 Å), а сита 13Х – фреон, толуол, бензол и т.д. (табл.VIII.1, прил. VIII).

Размер входных окон, определяющие селективные свойства цеолитов зависит от размера катионов металла, входящего в состав, а также от числа атомов O_2 в кислородных кольцах и их расположения [41], рис.7.50.

Наиболее распространены цеолиты А (LTA), X, Y, Rho (FAU) и MFI топологии.

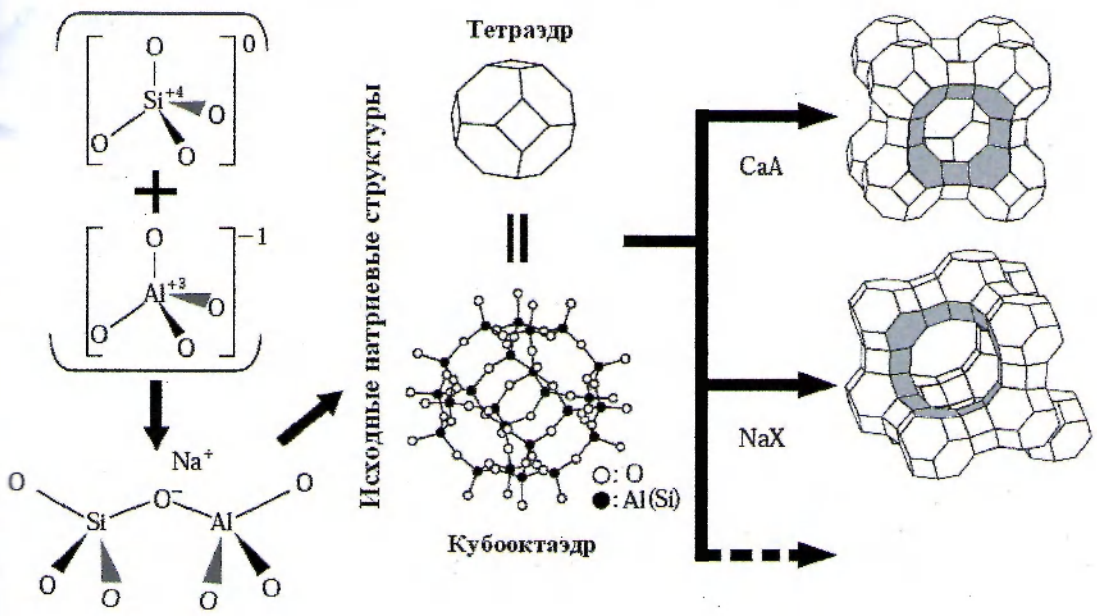
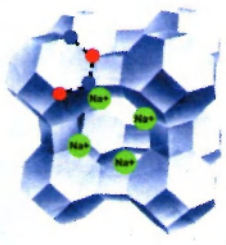


Рис.7.50. Стандартная (каноническая) схема синтеза искусственных цеолитов LTA и FAU [285].

Тип А. Базовый материал – алюмосиликат натрия с диаметром пор 4 Å, т.е. цеолит с коммерческой маркой 4А (NaA): $Na_x\ [(AlO_2)_x \cdot (SiO_2)_y] \cdot zH_2O$, x = y = 12, z = 27.



Замещение двух катионов натрия Na (1^+), имеющих ионный радиус 0,98 Å, катионом кальция Ca (2^+) с ионным радиусом 0,99 Å приводит к увеличению диаметра пор до 5Å – цеолит 5А (CaA). Если провести замещение катионами калия K (1^+) (ионный радиус 1,33 Å), то размер входных окон уменьшится до 3Å – цеолит 3А (КА).

Кристаллическая решетка цеолитов А – тетраэдр, входное окно характеризуется 8-членным кислородным кольцом, соотношение кремнеобразующих молекулярных групп Si/Al (SiO_2/Al_2O_3) = 1 (рис.7.51, 7.52, табл.7.3).

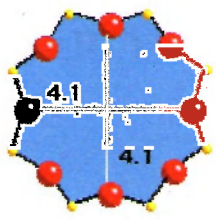


Рис.7.51. Цеолит 4А со схемой входного окна (8-членным кислородным кольцом).

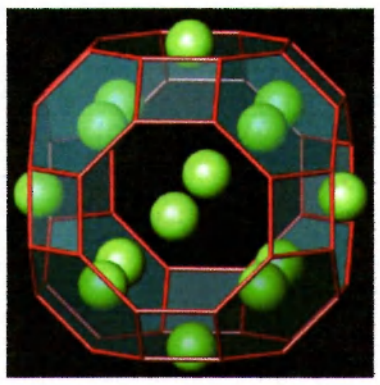


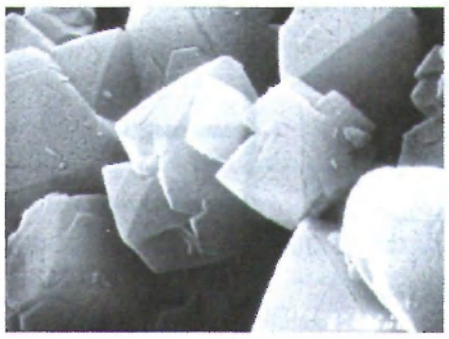


Рис.7.52. Тетраэдрическая структура и микрофотография цеолита А (LTA– Linde[1] Type A).

[1]компания Линде (США) – пионер производства синтетических цеолитов (1955 г.)

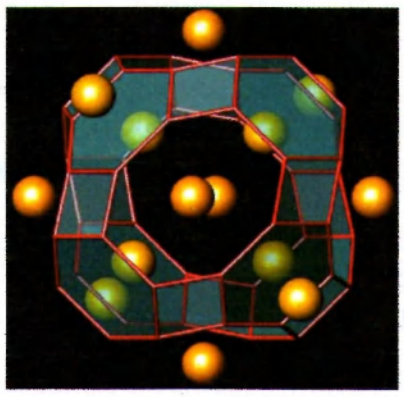


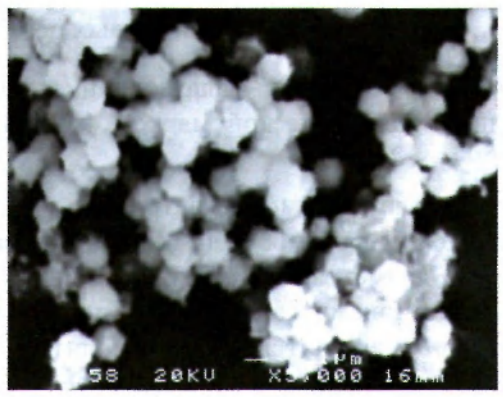
Тип X, Y, Rho (FAU). Исходная структура – натриевая форма с входным отверстием 10 Å: $Na_{86}[(AlO_2)_{86} \cdot (SiO_2)_{106}] \cdot H_2O$, – соответствует цеолиту 13X (NaX). Его кристаллическая решетка – кубооктаэдр (рис.7.53, VIII.2, прил. VIII). Модификации Y и Rho характеризуется большим соотношением Si/Al.





X Si/Al=1,2 Y Si/Al=2,4



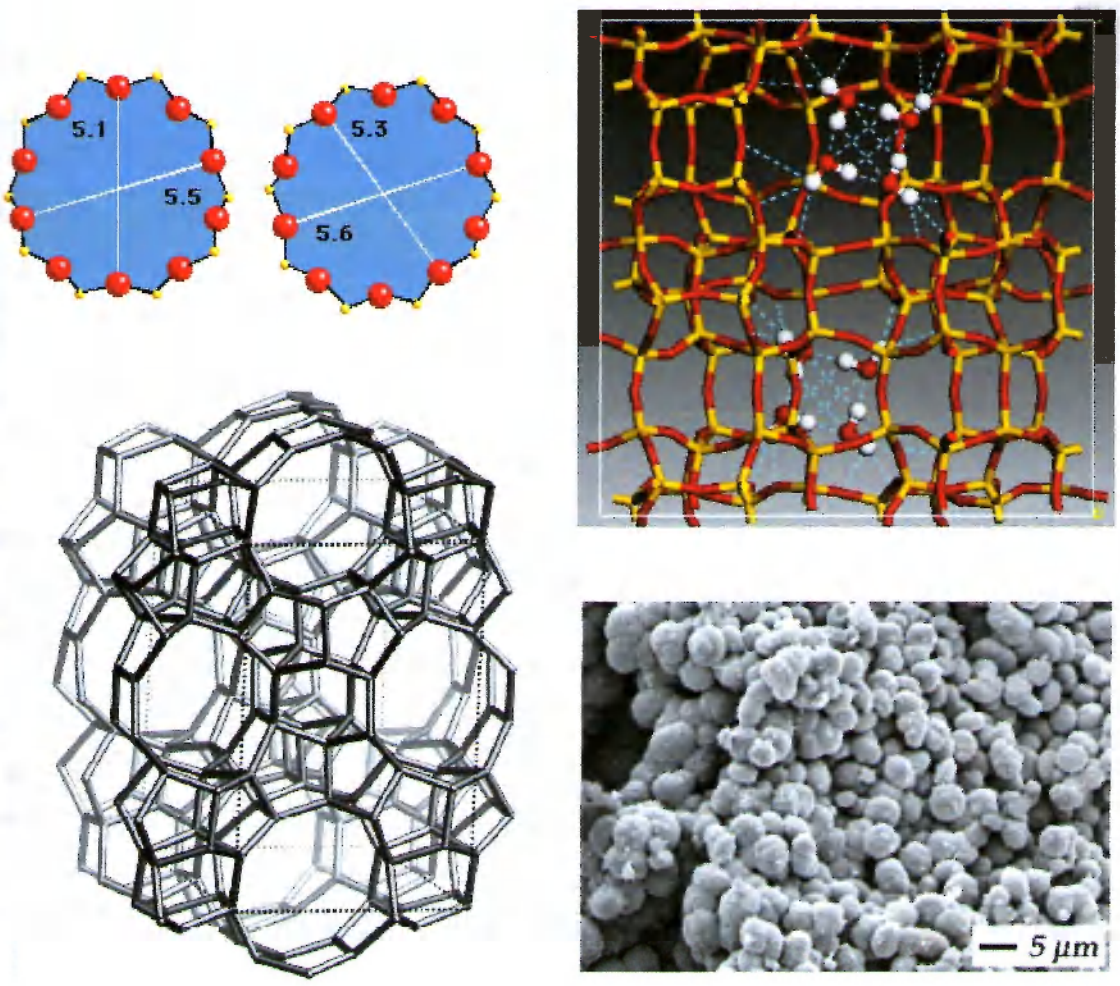


Rho Si/Al = 3,0

Рис.7.53. Кубооктаэдрическая структура и микрофотографии микропористых цеолитов FAU[2]: X, Y, Rho.

[2]аналог натурального цеолита – фожазита (Faujasite)

Тип MFI: $|Na^{+}_{n}(H_2O)_{16}|\,[Al_nSi_{96-n}O_{192}]$, $n < 27$. Трехмерный каркас содержит синусоидальные 10-членные кислородные кольца размером 5,1 х 5,5 Å и перпендикулярно расположенные к ним промежуточные кислородные кольца 5,3 х 5,6 Å. Каждое пересечение линий на схеме структуры цеолита соответствует атому Si или Al при размещении атома кислорода между ними – посередине, рис.7.54.



Si/Al=15

Рис.7.54. Орторомбическая структура, схема кислородных колец входного окна и микрофотография цеолита типа MFI (Mobil Five): ZSM-5 (Zeolite Socony Mobil*).

*разработка компании Mobil

Цеолиты также классифицируются по содержанию кремния, через величину соотношения Si/Al (SiO_2/Al_2O_3): <2 – низкое; 2…5 – среднее; 10…100 – высокое содержание. С увеличением числа Si/Al возрастают термическая стабильность, кислотоустойчивость и гидрофобность цеолитов. В предельном случае Si/Al = ∞ (Silicalite, табл.7.3) цеолит имеет полностью электронейтральный каркас и не обладает йоннообменной емкостью [247].

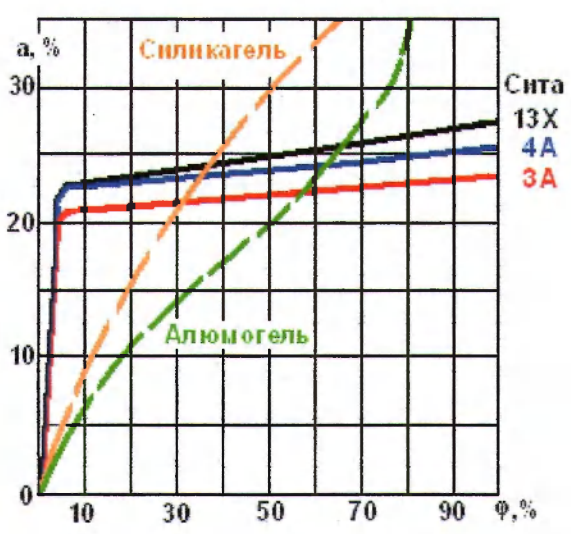
Данные по основным цеолитам приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3. Характеристики молекулярных сит [180].

Тип цеолита	Формула	$SiO_2 : Al_2O_3$	Входное окно	
			Кислородные кольца	Размер, Å
3A (KA)	$K_{12}[(AiO_2)_{12}(SiO_2)_{12}]$	1	8 - членные	3
4A (NaA)	$Na_{12}[(AiO_2)_{12}(SiO_2)_{12}]$	1	- - -	4
5A (CaA)	$Ca_5Na_2[(AiO_2)_{12}(SiO_2)_{12}]$	1	- - -	5
13X (NaX)	$Na_{86}[(AiO_2)_{86}(SiO_2)_{106}]$	1-1.5	12 - членные	10.0
10X (CaX)	$Ca_{40}Na_6[(AlO_2)_{86}(SiO_2)_{106}]$	1-1.5	- - -	8.4
NaY	$Na_{56}[(AiO_2)_{56}(SiO_2)_{136}]$	1.5-3.0	- - -	8.0
Mordenite	$H_8[(AiO_2)_8(SiO_2)_{40}]$	5	10 - членные	6.5x7.0
ZSM-5	$Na_8[(AlO_2)_8(SiO_2)_{40}]$	15	10 - членные	5.1x5.5 5.3x5.6
Silicalite	$(SiO_2)_{96}$	∞	- - -	5.3x5.6
Clinoptilolite	$Na_6[(AiO_2)_6(SiO_2)_{30}]$	5	10 - членные 8 - членные	4.4x7.2 4.1x4.7

Изотермы сорбции, приведенные на рис.7.55, показывают преимущество молекулярных сит в области $\varphi < 30$ %. В условиях высокой влажности с успехом применяют силикагель.

Из рис.7.55 видно, что величина адсорбции цеолитов (a) практически постоянна в диапазоне φ от 100 % до 5 % (асимптота к максимальному значению a), в то время как для силикагеля (и алюмогеля) зависимость $a = f(\varphi)$ характеризуются ниспадающей кривой и в указанном диапазоне φ величина a уменьшается на порядок.



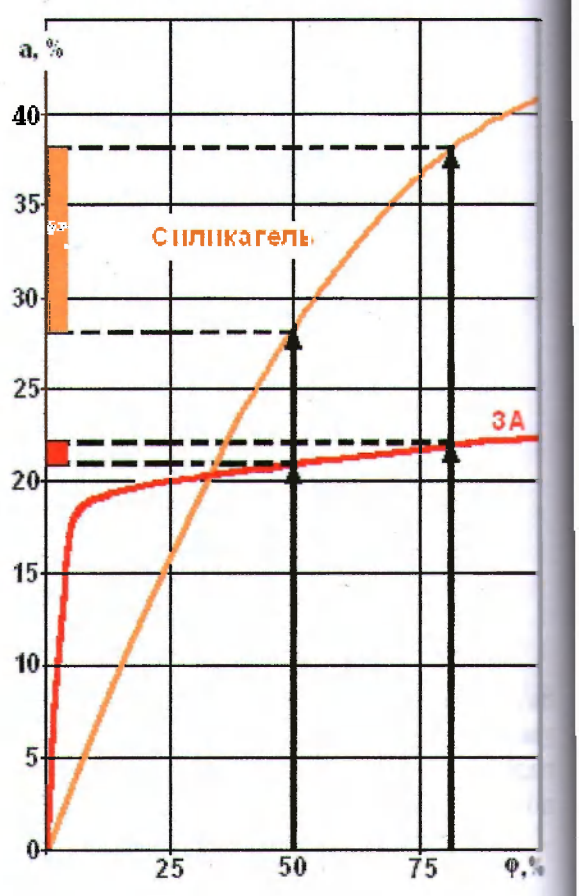


Рис.7.55. Зависимости величины адсорбции a водяного пара различных десикантов от относительной влажности φ при t = 25 °C.

Увеличение температуры воздуха снижает адсорбционные возможности материалов (рис.7.56). В случае силикагеля (алюмогеля) это проявляется особенно заметно. Цеолиты сохраняют способность адсорбировать водяные пары в значительно более широком диапазоне температур, чем другие десиканты.

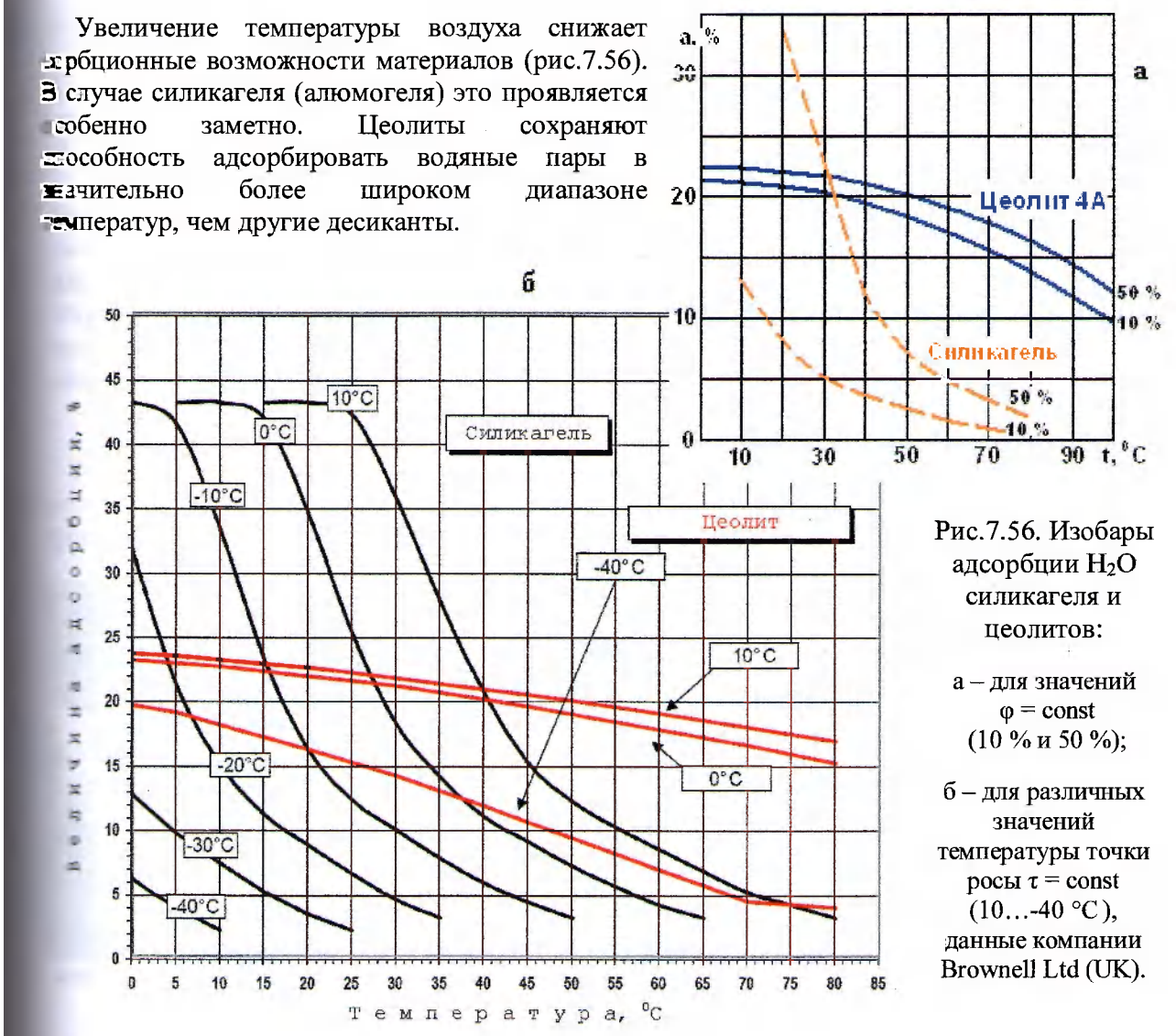


Рис.7.56. Изобары адсорбции H_2O силикагеля и цеолитов:

а – для значений φ = const (10 % и 50 %);

б – для различных значений температуры точки росы τ = const (10…-40 °C), данные компании Brownell Ltd (UK).

Величина адсорбции **a** приводится в справочной литературе [20, 41, 68] в виде сеток изобар (рис.7.56) или изотерм адсорбции (рис.7.57).

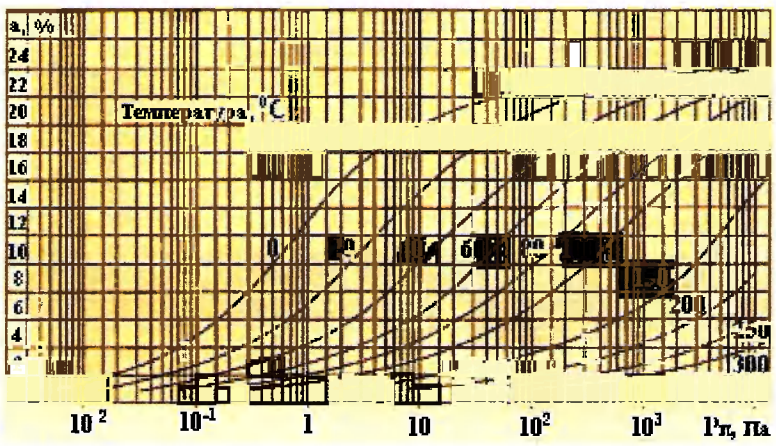


Рис.7.57. Изотермы адсорбции H_2O молекулярного сита 4А.

Данные, приведенные на рис.7.55, 7.56а, 7.57, отвечают молекулярным ситам Siliporite CECA (Paris, La Defense).

7.2.4.2. ОРГАНИЧЕСКИЕ СОРБЕНТЫ

Существует довольно большая группа органических адсорбентов для поглощения различных веществ, которые применяются в основном для очистки (воздуха, воды и пр.). В то же время, эти материалы могут использоваться в качестве десикантов.

Наиболее распространенный материал данной группы – активированный уголь с удельной поверхностью 800…1200 $м^2$/г. Активированный уголь – продукт сгорания угля, древесины, ореховой скорлупы или торфа при удалении смолистых веществ из его матрицы (рис.7.58). Активизация происходит при температуре 800…1000 °С с использованием пара, углекислого газа или за счет химической реакции с различными химикалиями: хлорид цинка, фосфорная или серная кислота. Активированный уголь может быть также получен на основе полимеров, таких как: искусственный шелк, полиакрилонитрил.

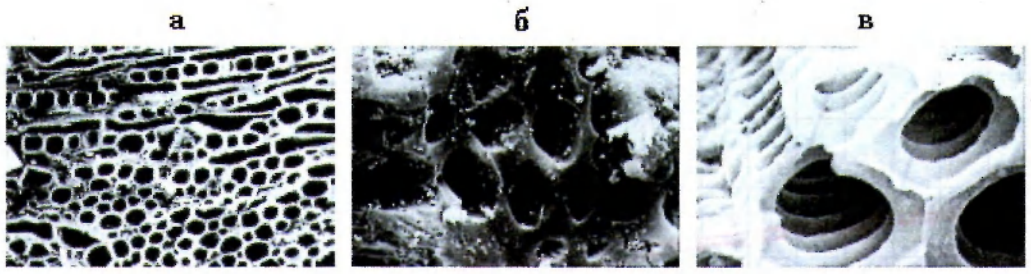


Рис.7.58. Пористая структура активированных углей: а – карбонизированная древесина; б – активированный каменный уголь; в – активированная скорлупа кокосов.

Поскольку поверхность углерода электронейтральна, адсорбция на углях определяется в основном дисперсионными силами, при этом для молекул воды эти силы весьма малы.

Внутренняя структура угля – преимущественно макропоры (рис.7.59). Насыщение угля влагой происходит очень медленно (в течение нескольких месяцев), в связи с чем активированный уголь в классическом варианте считается гидрофобным адсорбентом.

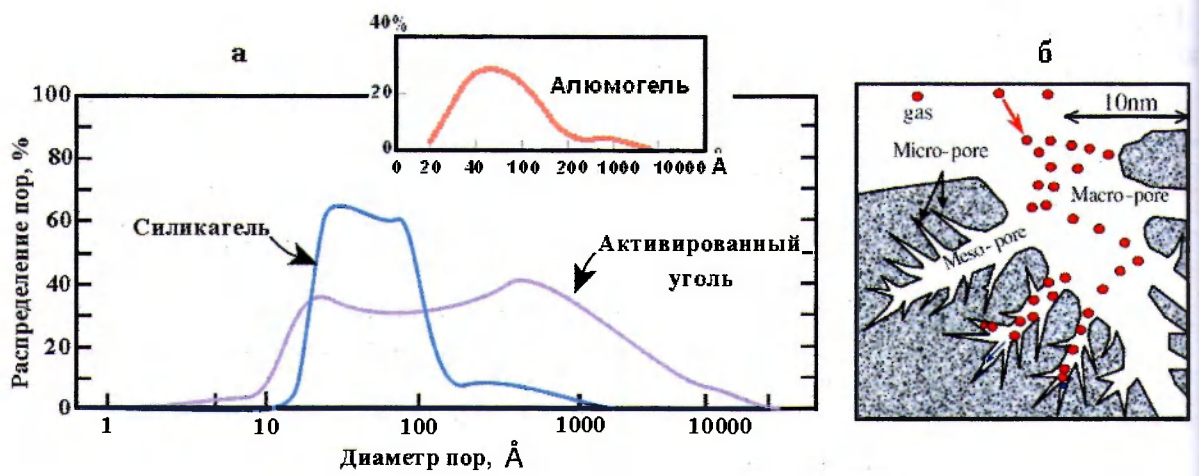


Рис.7.59. Распределение пор активированного угля, силикагеля и алюмогеля (а), и схема внутренней структуры активированного угля (б).

Адсорбционная способность углей по парам воды непосредственно связана с его пористостью (долей объема пор в общем объеме либо массе тела), с увеличением которой влагоемкость повышается [41]. В настоящее время созданы новые высокопористые

Углеродоволокнистые сорбенты с поверхностью 2000 $м^2/г$ и объемом сорбционных пор 0,35…0,8 $см^3/г$ (рис.7.60). По скорости сорбции и десорбции они превосходят обычные активированные угли в 10…100 раз.

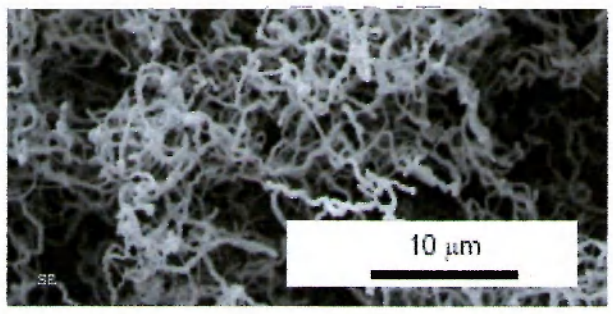
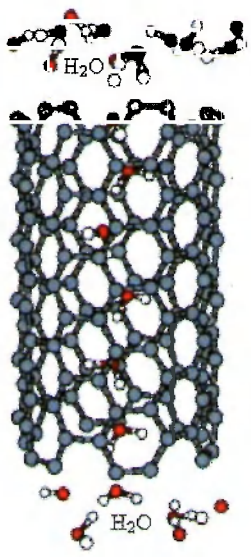


Рис.7.60. Углеродоволокнистый адсорбент.



Активированный уголь выпускается гранулированный, экструдированный, в виде порошка, а также используется в качестве пропитки тканевой основы.

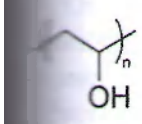


Известен также целый ряд полимеров, обладающих превосходными сорбционными свойствами:

полиакрилат (Polyacrylate), полиакриламид (Polyacrylamide), поливинил PVA (Polyvinyl alcohol, рис.7.61) и др.

Рабочие характеристики данных материалов представлены на рис.7.61 и в табл.7.4. Здесь же, для сравнения, приведены данные по другим десикантам: силикагелю, полиэтиленгликолю (Polyethylene Glycol) и сульфату кальция (Calcium Sulfate) [282].

Герман Штаудингер (Herman Staudinger) – лауреат Нобелевской премии по химии (10.12.1953), разработчик функционализированных полимеров



Polyvinyl alcohol – впервые получен в 1924 г. (Hermann и Haehnel), как продукт гидролиза поливинилацетата в этиловом спирте с гидроксидом калия. Ацетатные группы образуются в результате гидролиза и сложного обмена с этанолом в присутствии безводного метилата натрия или водного гидрооксида натрия. Физические свойства зависят от степени гидролиза и полимеризации.

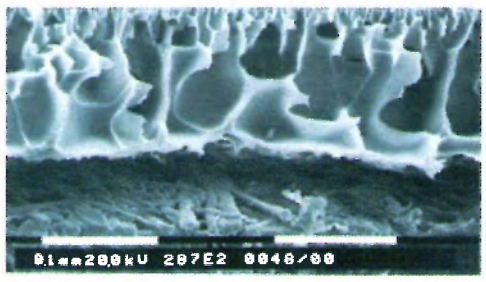


Рис.7.61. Структура полимера PVA.

Таблица 7.4. Данные о равновесном содержании влаги различных сорбентов.

Материал	Статическая емкость, %
Calcium Sulfate	20
Polyethylene Glycol	33
Silicagel	37
Polyvinyl alcohol foam	65
Polyacrylate	78
Polyacrylamide	90
Polyvinyl alcohol Pre-Fab Sheet	103

Как видно из табл.7.4 влагоемкость полимеров весьма значительна, а для листового Polyvinyl alcohol* Pre-Fab Shee приблизительно в 3 раза выше, чем в случае силикагеля.

Эти материалы отличает высокая стабильность характеристик в течение длительного срока эксплуатации: тысячи циклов сорбции – десорбции.

Полимерным адсорбентам свойственна довольно низкая температура регенерации ≤ 80°С.

Стоимость составляет 4,5 $/кг – на уровне цен цеолитов (см. с. 308).

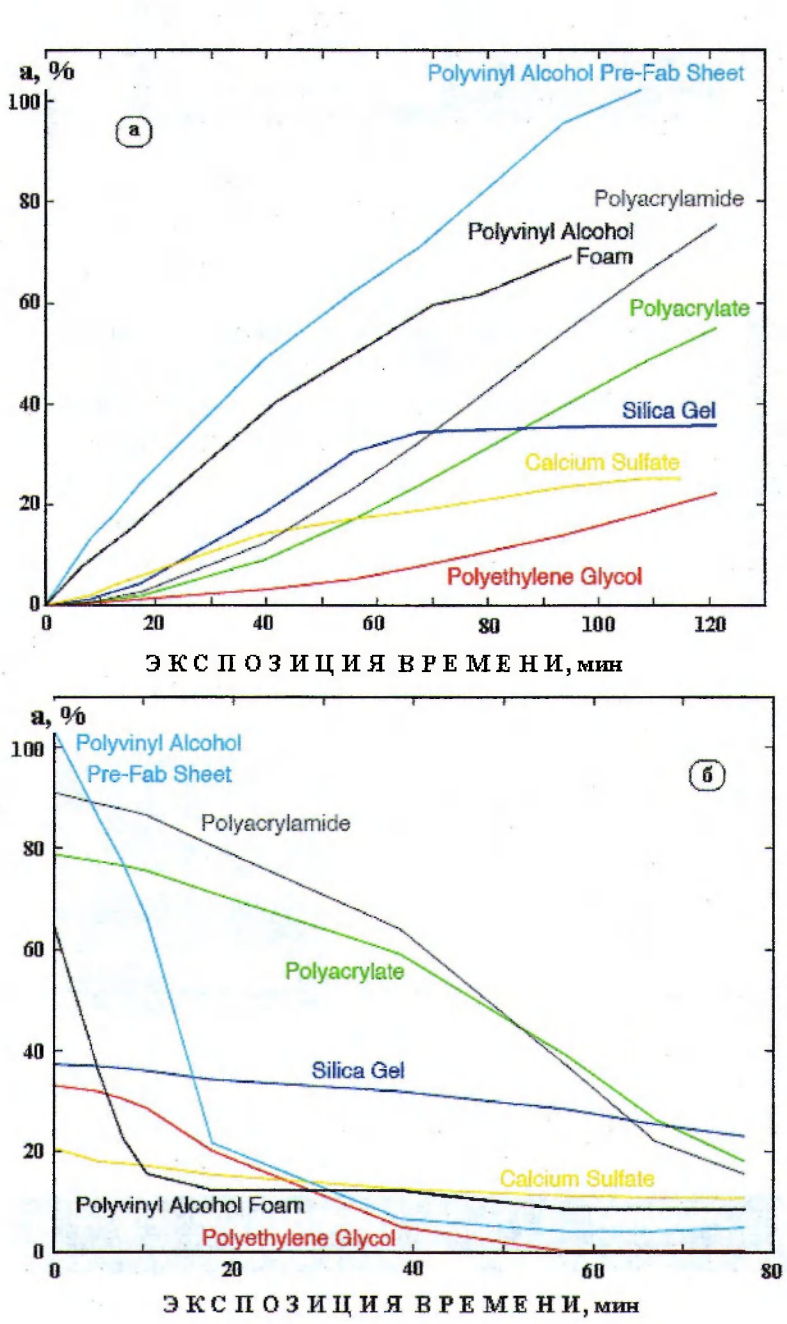


Рис.7.61. Характеристика процесса сорбции (а) и десорбции (б) влаги полимерными и другими сорбентами.

7.2.4.3. ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЕ СОРБЕНТЫ

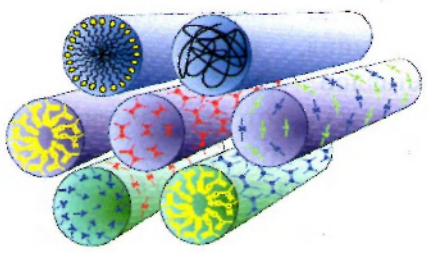
К этой категории сорбентов можно отнести новые модифицированные материалы, созданные, на основе неорганических, органических веществ и их комбинаций (двухкомпонентные системы – нанокомпозиты), под определенные задачи (осушение, охлаждение, теплоутилизация) либо диапазоны процесса адсорбции. Применительно к рассматриваемой теме «Осушение воздуха» функционализация проявляется в достижении таких целей, как:

- снижение теплоты адсорбции и, соответственно, энергетических затрат регенерации;
- повышение термогидростабильности рабочих характеристик десикантов, т.е. сохранение величины адсорбции в течение длительного срока эксплуатации;
- в случае двухкомпонентных систем «соль в твердой матрице»: использование высокой адсорбционной способности солей и сохранении их (без уноса) в процессе адсорбционно-десорбционного цикла.

В последние годы достигнут существенный прогресс в снижении температурного уровня регенерации цеолитов. По данным компаний Engelhard для восстановления потенциала искусственного цеолита ETS (Engelhard Titanium Silicate) достаточно температуры 120…140 °С, что ставит его по этому показателю в один ряд с силикагелем. При этом материал ETS обладает повышенной термогидростабильностью. Научно-исследовательский центр Mitsubishi Chemical Group Science and Technology Research Center, создав искусственные цеолиты FAM (Functional Adsorbent Material), решил эту задачу на уровне 60…90 °С [198]. Исследовательский центр Recearch Center for Advanced Science and Technology of Tokyo Institute of Technology и компания Fuji Silica Chemical Ltd. разработали термочувствительный полимерный материал NIPA Silica Gel, который скачкообразно изменяет свои сорбционные свойства при переходе температурной границы 33 °С [246]. Нанокомпозиты SWS – селективные сорбенты воды – разработка института катализа им. Г.К.Борескова СО РАН (Россия) обладают большой сорбционной емкостью и невысокой температурой регенерации 80…120 °С.

7.2.4.3.1. МЕЗОСТРУКТУКТУРИРОВАННЫЕ МЕЗОПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Отдельный класс адсорбентов — МММ — мезоструктурированный мезопористый материал создается (американской компанией Mobil, а также в Японии и России) на основе биомиметического синтеза (от био- и греческого mimos — подражать).



Биомиметический синтез осуществляется путем самоорганизованной сборки структуры из неорганического компонента на мицеллярной поверхности поверхностно-активного вещества (ПАВ, surfactant).

Размером пор (≤ 10 нм) можно управлять за счет изменения длины АТМА - алкил цепочки ПАВ (1,3,5-триметилбензол и др.).

В качестве классического примера МММ можно привести цеолит МСМ-41 (мезоструктурированный силикатный материал). Этот материал имеет гексагональную структуру типа пчелиных сот с толщиной стенок h_W = 0.6…0.8 нм и калиброванным размером каналов-пор d_{Me}, который можно целенаправленно изменять в диапазоне 3…10 нм. Удельная поверхность каналов МСМ-41: 1000…1200 м^2/г, объем — до 1 см^3/г. Форма каналов – цилиндрическая либо гексагональная (рис.7.62) [82, 100, 230, 313].

ПАВ, используемые для получения МСМ-41, описываются формулой $(C_3H_7)_3HNBr$. В воде такие молекулы диссоциируют с образованием алкиламмониевого катиона с гидрофильной "головой" $[N(CH_3)_3]^+$ и гидрофобным нейтральным "хвостом" $[CH_3(CH_2)_2]$. Уже при очень малых концентрациях в воде эти ионы ПАВ образуют цилиндрические мицеллы (рис.7.62а), поверхность которых образована положительно заряженными головами.

При введении в такой мицеллярный раствор противоположно заряженных неорганических комплексов, например, анионов $[SiO(CH)_3]^-$, эти анионы сорбируются на поверхности мицелл, вытесняя "собственные" противоионы ПАВ. Одновременно такие мицеллы самопроизвольно образуют регулярную гексагональную упаковку. Далее неорганические комплексы, сорбированные на поверхности мицеллы и в межмицеллярном объеме, полимеризуются (обычно при нагревании до 70…150 °С), взаимодействуя друг с другом за счет реакции дегидратации (рис. 7.62б).

В результате между мицеллами образуется каркас из аморфной фазы SiO_2. Органическая часть мицеллы после сушки выжигается прокалкой на воздухе при 400…700 °С или экстрагируется и в результате остается твердый МММ [100, 222] .

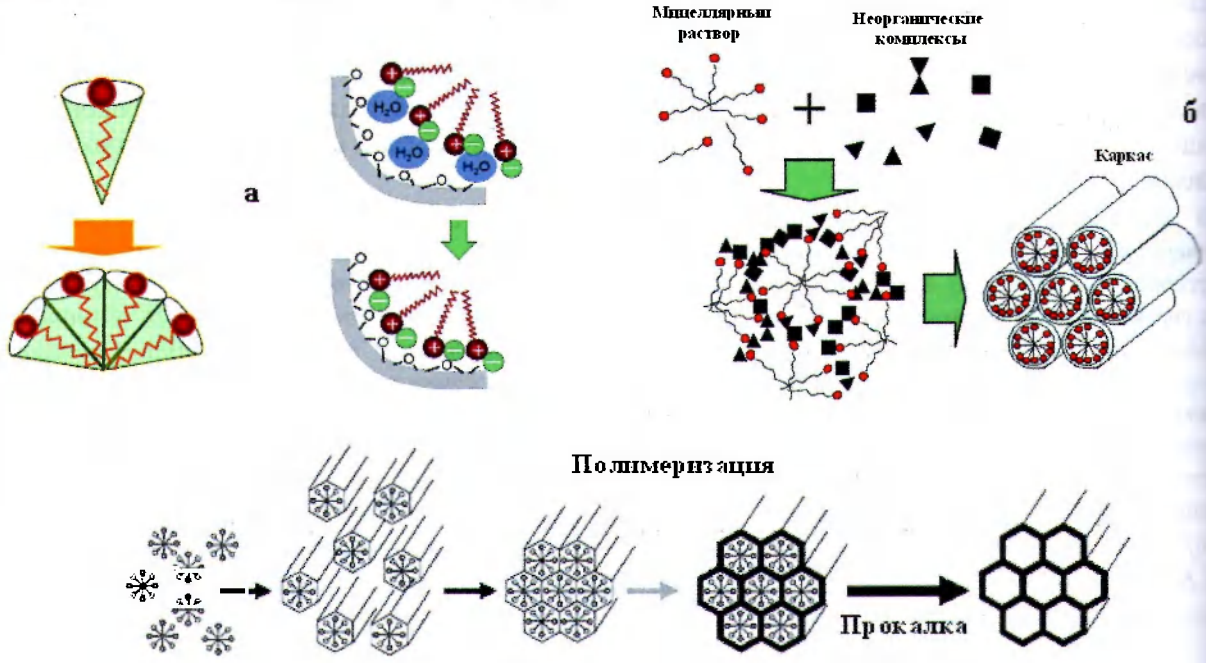


Рис.7.62. Схема синтеза МММ: а – образование мицелл; б – дегидратация материала.

В настоящее время синтезированы МММ на основе оксидов циркония, алюминия, титана, железа и др. металлов (MPS – мезопористый силикат), которые имеют высокую адсорбционную способность в диапазоне φ = 0,3…0,6 и, в отличие от МСМ-41, термогидростабильны (рис. 7.63).

Изотерма адсорбции МММ имеет S-образную форму, которая дает определенные преимущества при проведении адсорбционно-десорбционного цикла (рассмотрены ниже в описании цеолитов FAM).

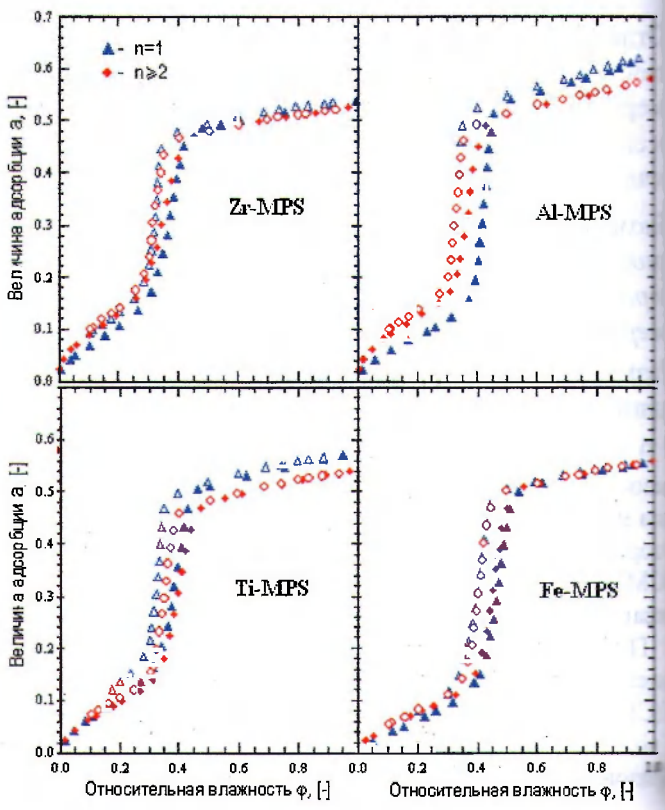


Рис.7.63. Изотермы адсорбции H_2O модифицированными цеолитами MPS: n – число циклов [116].

Эти сита, помимо осушения воздуха, успешно применяются для поглощения углекислого газа и др.

Цеолиты этого же класса MMM: FAM (Z01, Z02, Z05), – разработаны в Японии на основе [illegible]орфных алюмофосфатов $ALPO_4$ (рис 7.64), [197, 198, 273, 311, 312].

FAM-Z01 и FAM-Z05 – молекулярные сита (AFI Type) одномерной структуры с входными [illegible]ами 0,73 нм и каркасом из тетраэдров AlO_4, PO_4 и FeO_4 (атомы алюминия и фосфора [illegible]стично заменены атомами железа). FAM-Z01 получен в результате синтеза [illegible]роалюмофосфата FAPO-5 с 5 % мольным содержанием железа, а FAM-Z05 – FAPO-34.

FAM-Z02 – молекулярное сито (CHA Type) трехмерной структуры с входными окнами [illegible]8 нм и каркасом из тетраэдров AlO_4, PO_4 и SiO_4 (атомы алюминия и фосфора частично [illegible]енены атомами кремния). Образуется в результате синтеза силикоалюмофосфата SAPO-[illegible] с 7,2 % мольным содержанием кремния.

Операция синтеза данных искусственных цеолитов происходит в процессе [illegible]дротермальной обработки алюмофосфатов в присутствии органических аминов.

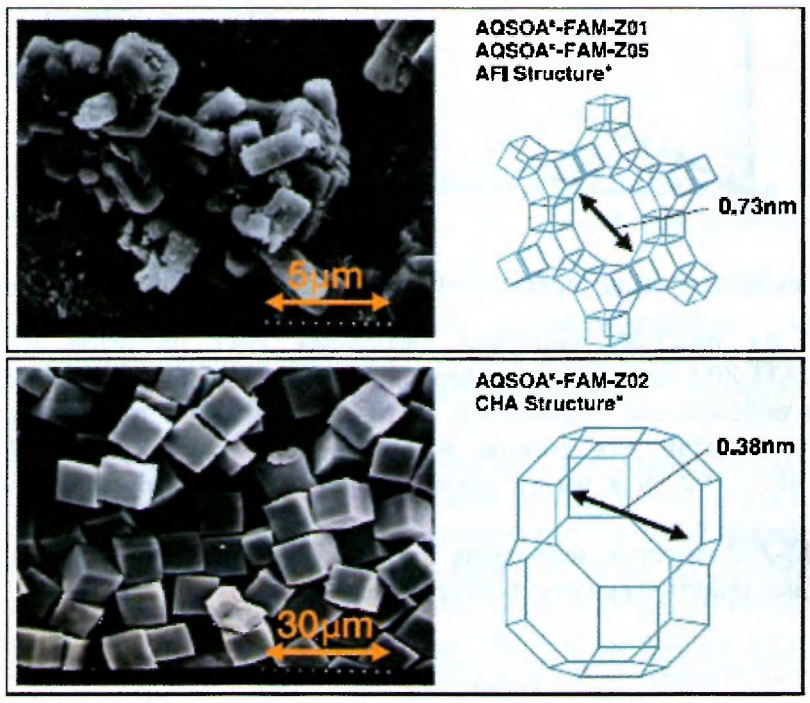


Рис.7.64. Микрофотографии структуры цеолитов FAM и строение их каркаса [311].

Рис.7.65 демонстрирует задание, [illegible]ставленное перед исследователями и [illegible]зработчиками материалов FAM: [illegible]лучить S-образную изотерму адсорбции [illegible] достаточно узком диапазоне [illegible]носительных давлений (φ) при величине [illegible]атической емкости адсорбента, [illegible]евышающей емкость цеолитов LTA. На [illegible]с.7.66 приведены результаты работы [illegible]97, 198].

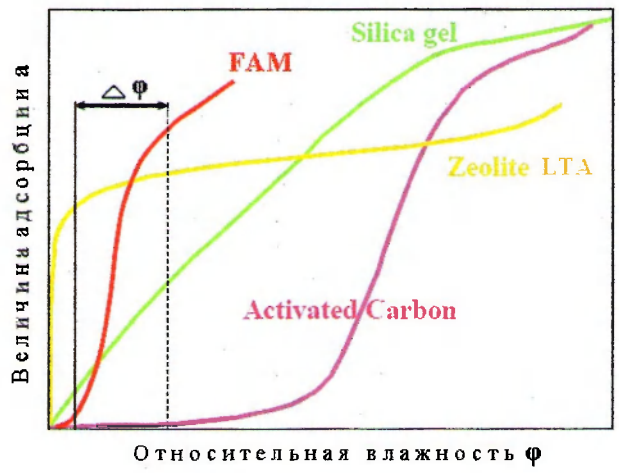


Рис.7.65. К постановке задачи получения искомой изотермы адсорбции FAM.

Изотермы адсорбции FAM имеют S-образную форму, за счет чего на начальном участке [illegible]ивой достигается существенная разность по величине адсорбции a. Этот участок резкого

подъема значений **a** несколько смещен по отношению к обычным цеолитам LTA и FAU и наблюдается в диапазоне φ = 10…20 %, что позволяет осуществлять процесс десорбции влаги при невысоких значениях температуры регенерации (рис.7.66).

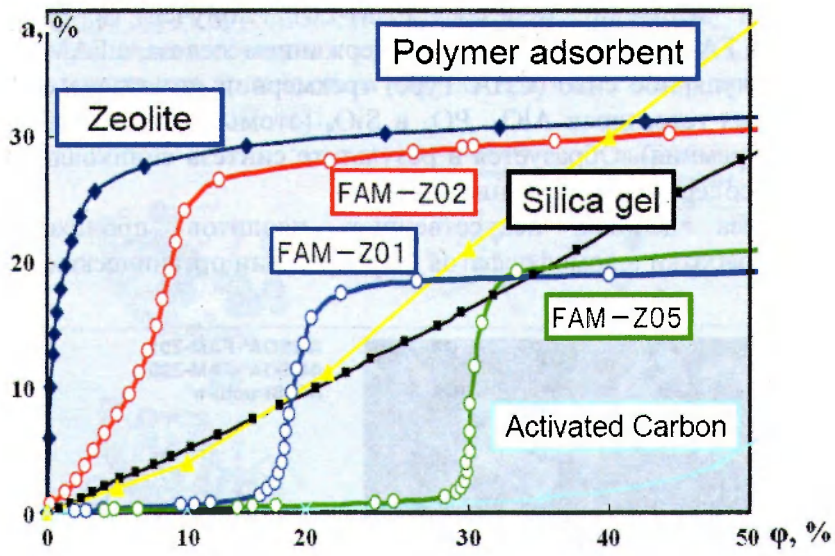


Рис.7.66. Изотермы адсорбции H_2O (t = 25 °C) FAM и других адсорбентов.

Приведенные на рис.7.66 изотермы адсорбции H_2O цеолитов FAM показывают преимущество FAM-Z02 по величине адсорбции, по сравнению с FAM-Z01 и FAM-Z05. Адсорбирующая способность FAM-Z01 и FAM-Z05 примерно одинакова (рис.7.74). При этом FAM-Z05 рассчитан для работы в диапазоне высоких значений относительной влажности φ = 30… 100 % и имеет самую низкую температуру регенерации 40…60 °C (рис.7.74).

В случае FAM-Z02 имеется небольшая петля гистерезиса при t = 90 °C, для FAM-Z01 явление гистерезиса практически отсутствует (рис.7.67).

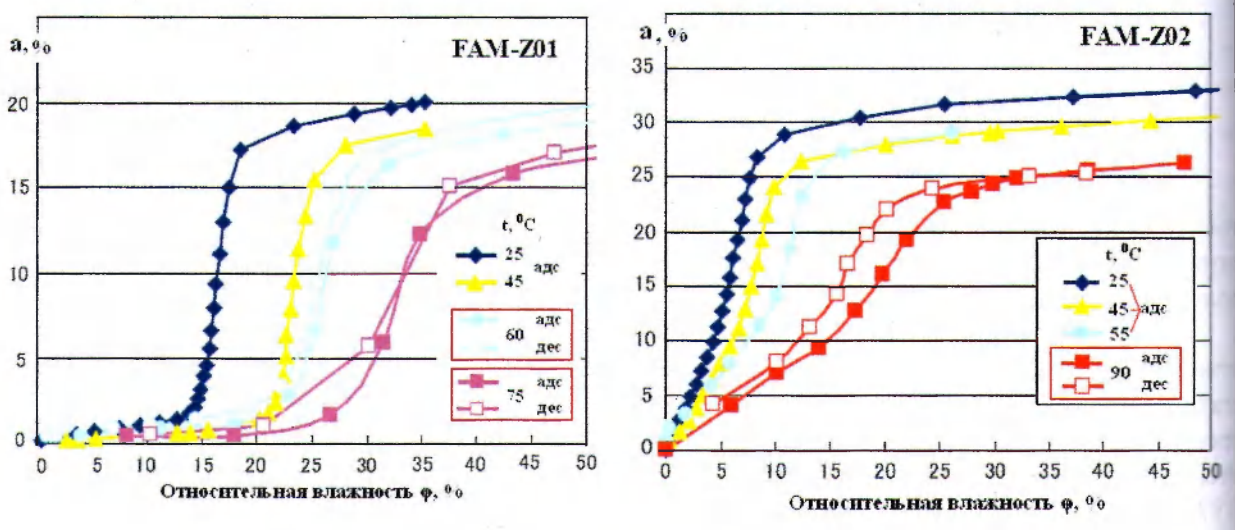


Рис.7.67. Изотермы адсорбции (десорбции) H_2O цеолитами FAM-Z01 и FAM-Z02.

Теплота адсорбции H_2O (при 25 °C) FAM-Z01 – 3110 кДж/кг (56 кДж/моль), FAM-Z02 – 3240 кДж/кг (58,3 кДж/моль). Эти величины приближены к теплоте адсорбции силикагеля, и меньше $q_{адс}$ цеолитов X(Y) типа (рис.7.68) [197].

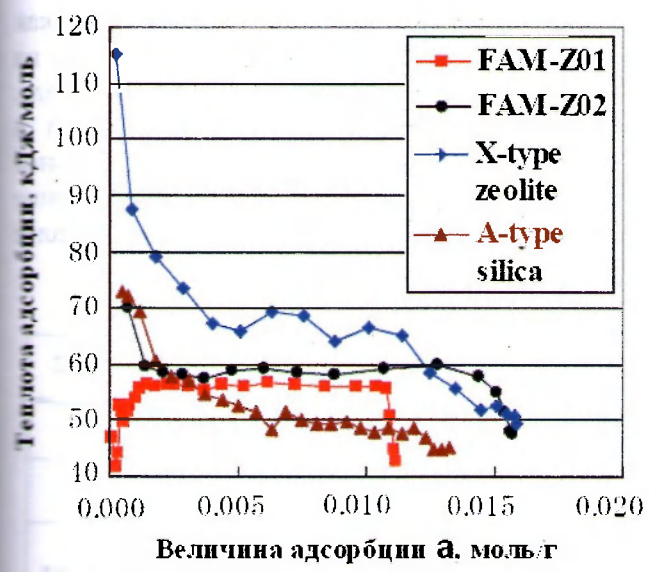
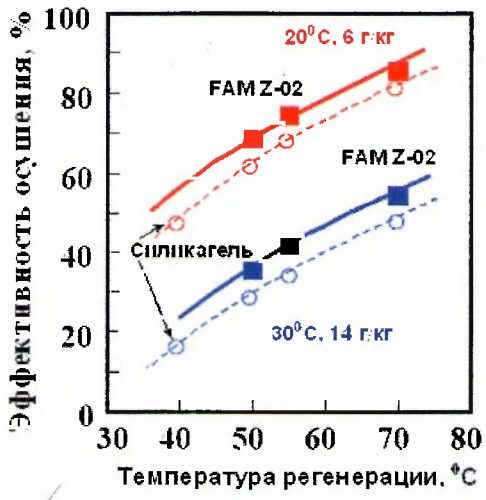


Рис.7.69. Эффективность FAM-Z02 и силикагеля при различных начальных параметрах осушаемого воздуха и температурах регенерации. →

← Рис.7.68. Зависимость теплоты адсорбции $q_{адс}$ различных адсорбентов* от величины адсорбции H_2O – a.

*A-type silica – микропористый силикагель



При близких значениях $q_{адс}$ силикагеля и FAM, синтезированный материал FAM обладает большей эффективностью в процессе осушения влажного воздуха. Установлено, что осушающая способность FAM-Z02 в составе FAM-ротора (см. § 7.2.5 – роторно-сорбентные технологии) на 11…22 % выше силикагелиевого ротора при температуре регенерации 50…70 °C (рис.7.69) [197].

Возможности цеолита FAM-Z02 по осушению воздуха в адсорбционном цикле показаны на рис.7.70. При контакте с влажным воздухом с параметрами t = 40 °C и φ = 11 % материал FAM-Z02 поглощает влагу в количестве 25 г/(г адсорбента): a = 25 %, что всего лишь на 3 % меньше величины адсорбции H_2O цеолитом X(Y)-типа (a = 28 %), но значительно выше, чем в случае применения силикагеля: a = 6 %. При этом, если, с целью регенерации адсорбента, температуру воздуха увеличить на 50 градусов ($t_{рег}$ = 90 °C), то глубина десорбции FAM-Z02 составит Δ a = 19 %, в то время, как для силикагеля Δ a = 5 %, цеолита X(Y) – Δ a = 4 %.

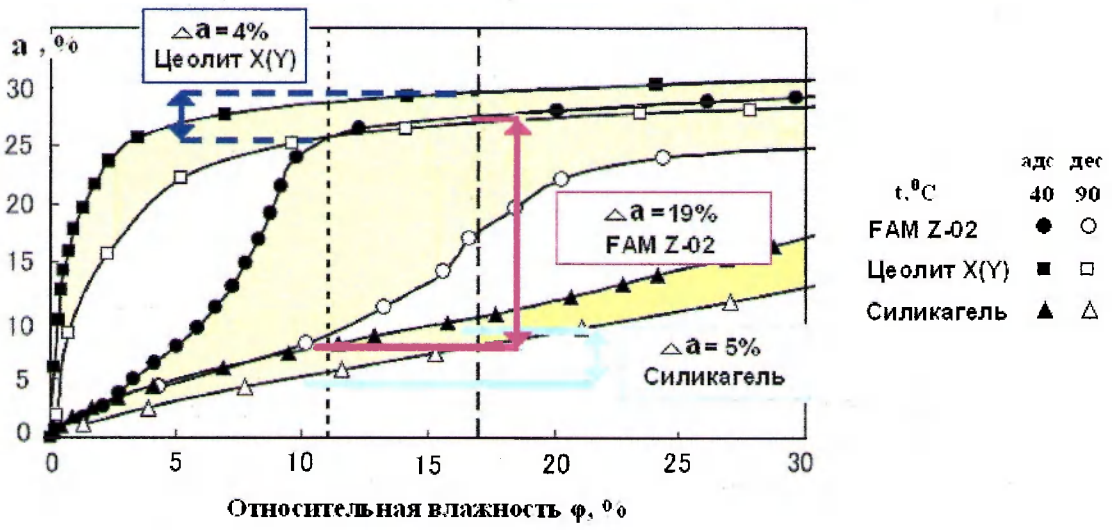


Рис.7.70. Сравнение FAM-Z02 с цеолитом X(Y) - FAU и силикагелем в адсорбционном цикле осушения воздуха при $t_{адс}$ = 40 °C и $t_{дес}$ = 90 °C.

Очень важной характеристикой адсорбентов является их стабильность во времени, как функция числа циклов адсорбция-десорбция. Известные молекулярные сита, полученные на основе алюмофосфатов, например AlPO-17 и AlPO-18, недолговечны во влажной среде. Длительные испытания цеолитов FAM показали практическое отсутствие различий в изотерме адсорбции H_2O для FAM-Z01 при числе циклов до 200 тыс. и незначительное отклонение изотермы для FAM-Z02. При чем, в последнем случае, изменения характеристики происходит только на начальной стадии эксплуатации материала, а далее после 20 тыс. наступает стабилизация (рис.7.71).

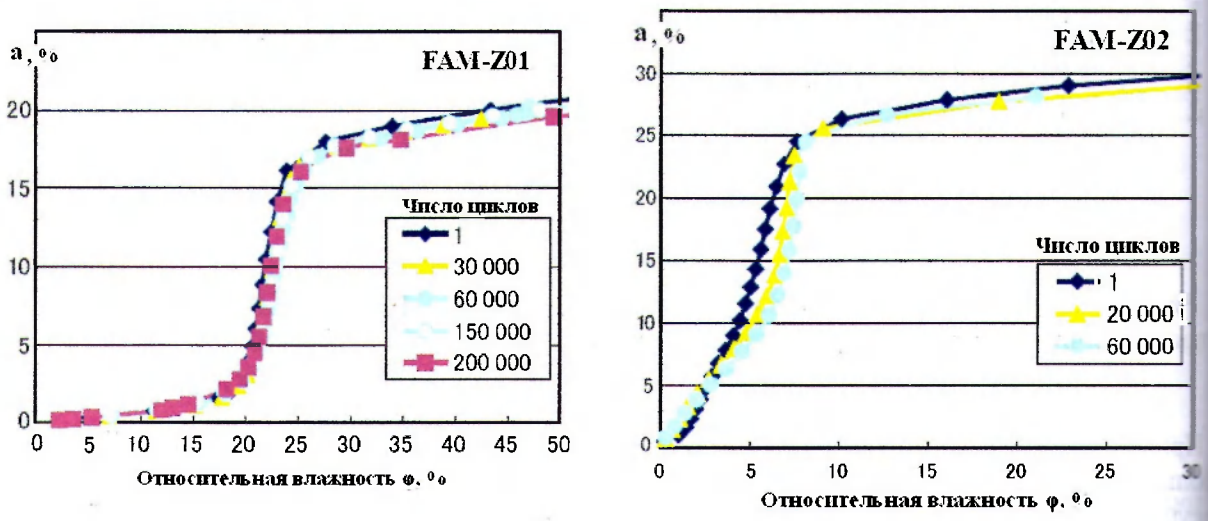


Рис.7.71. Изотермы адсорбции H_2O
цеолитами FAM-Z01 (t = 40 °C) и FAM-Z02 (t = 25 °C)
при различном числе рабочих циклов.

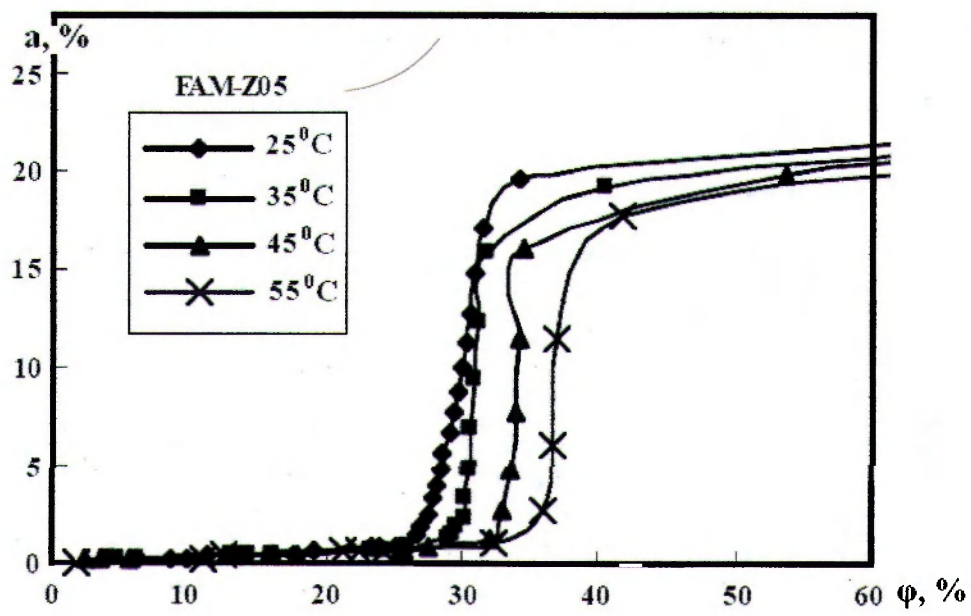


Рис.7.72. Изотермы адсорбции H_2O цеолитом FAM-Z05 [273].

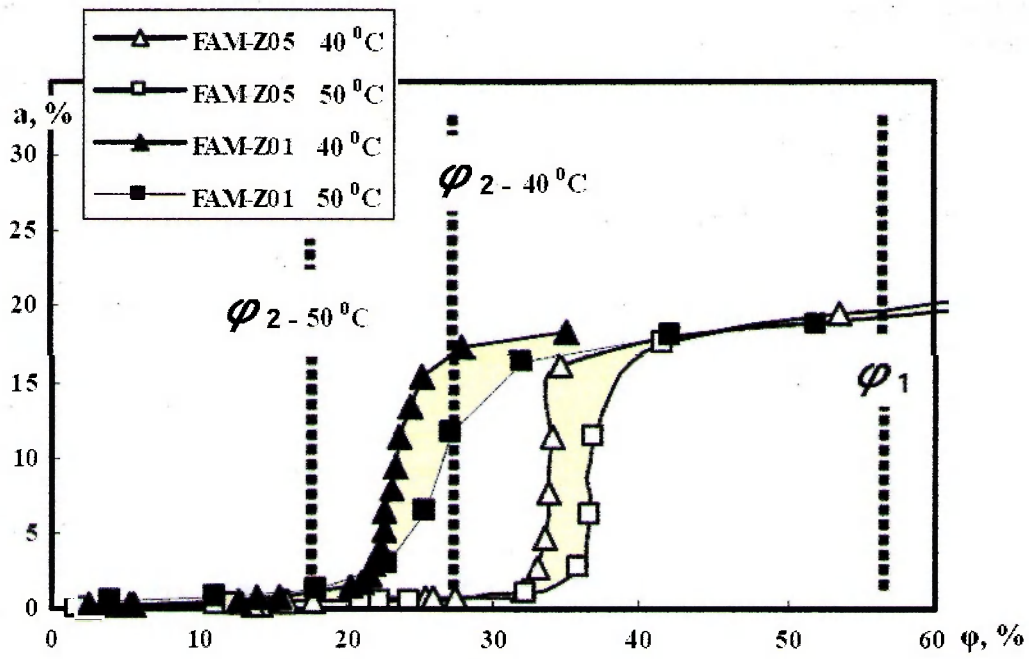


Рис.7.73. Изотермы адсорбции H_2O цеолитами FAM-Z01 и FAM-Z05 [269].

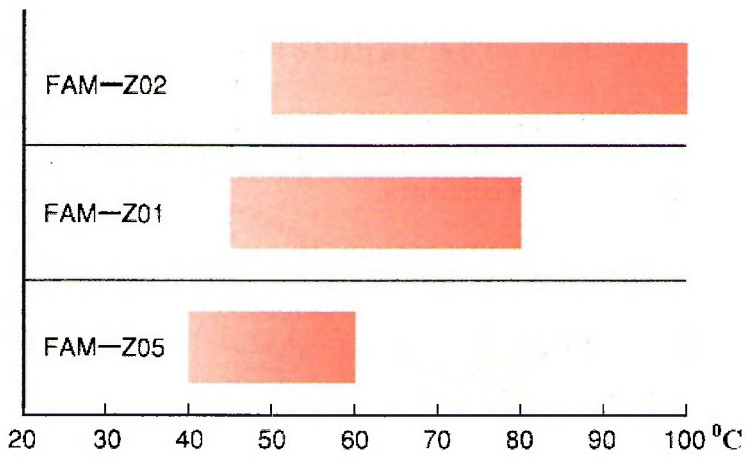


Рис.7.74. Температурные диапазоны регенерации цеолитов FAM-Z (01, 02, 05) [312].

7.2.4.3.2. ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПОЛИМЕРЫ

Последние разработки японских специалистов (Recearch Center for Advanced Science and Technology of Tokyo Institute of Technology, Fuji Silica Chemical Ltd.) позволили получить новый десикант – термочувствительный полимер NIPA Silica Gel (N-isopropylacrylamide). Применение этого материала в процессе сорбции-десорбции HSA (Humidity Swing Adsorption, рис.7.75, 7.76) создает возможность использовать для регенерации материала низкотемпературные вторичные источники теплоты [246].

На рис.7.75 представлены данные по NIPA Silica Gel. Материал реагирует на изменение температуры так, что при t < 33 °C проявляются его гидрофильные свойства, а при t > 33 °C NIPA Silica Gel становится гидрофобным.

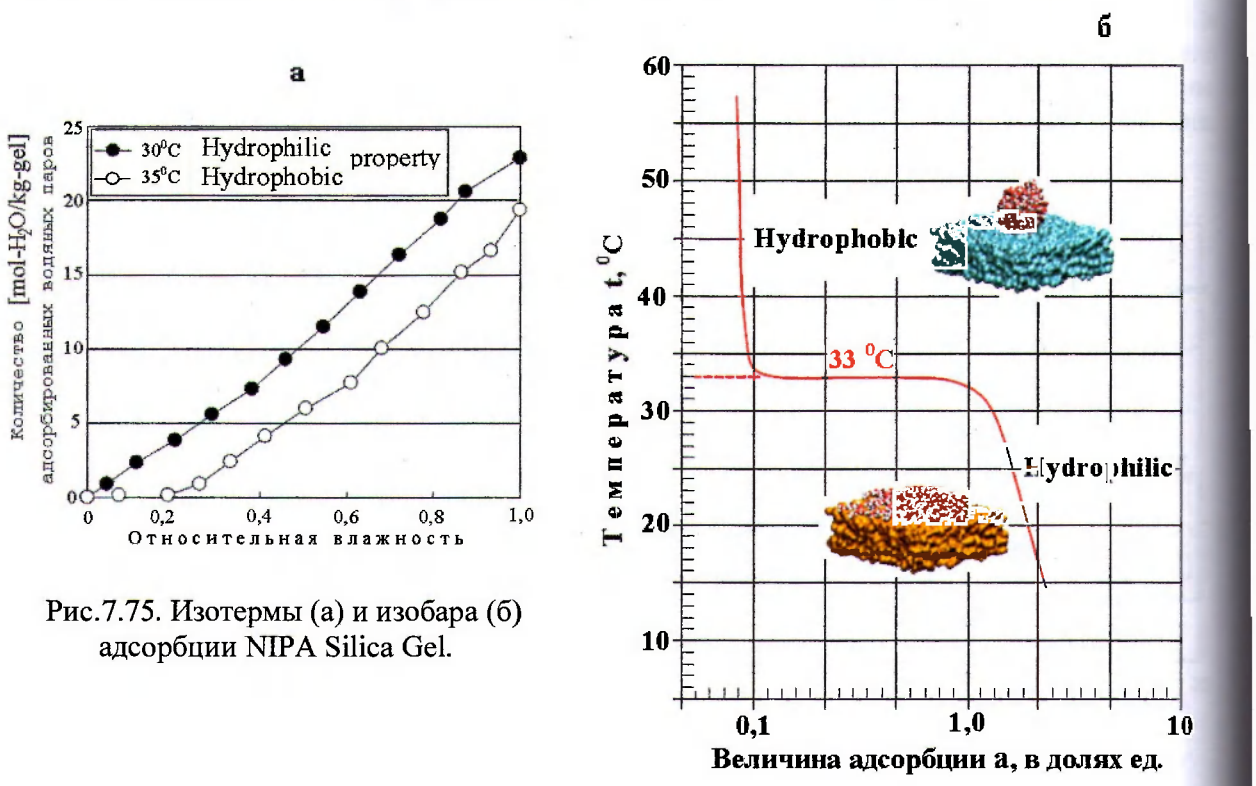


Рис.7.75. Изотермы (а) и изобара (б) адсорбции NIPA Silica Gel.

Технология осушения воздуха термочувствительным полимером (рис.7.76) соответствует обычному циклу работы адсорберов: чередование процессов сорбции-десорбции (см. § 7.2.2), при уникальном поведении сорбента.

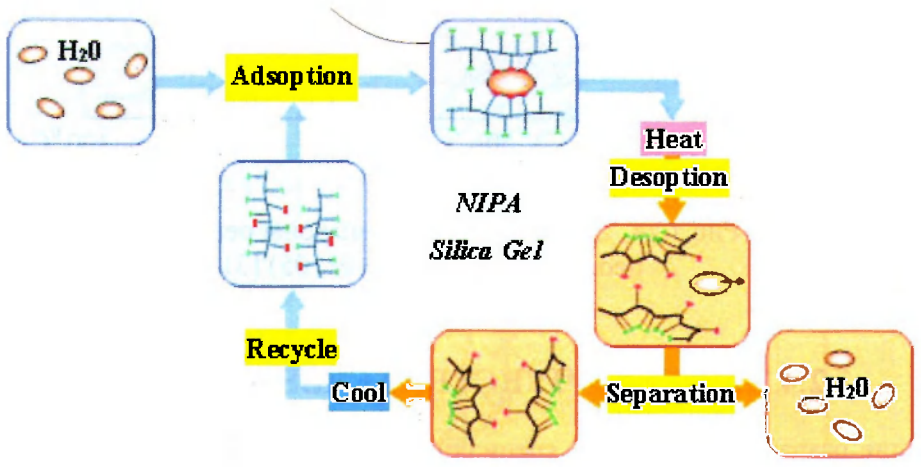
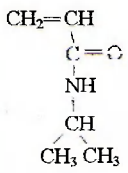
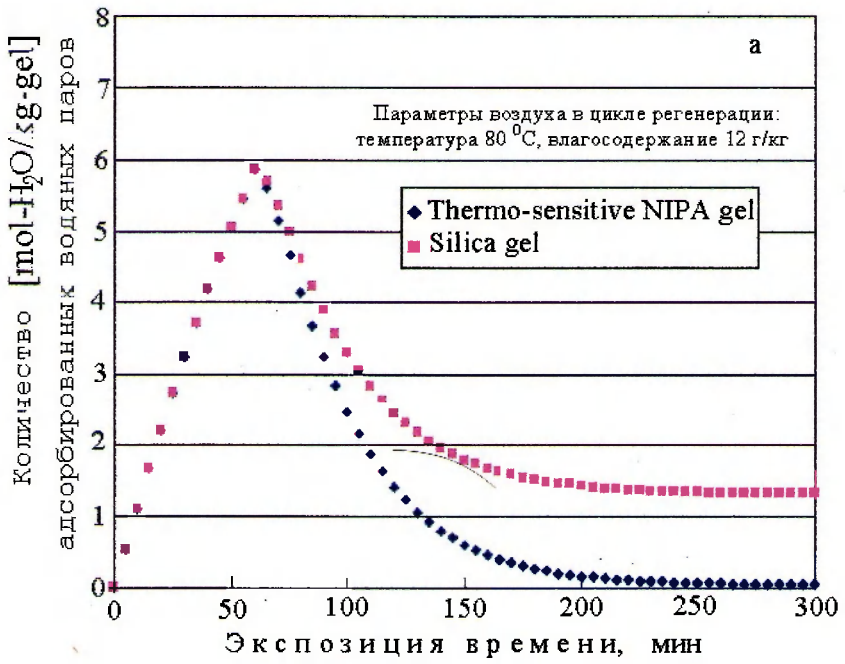


Рис.7.76. Схема работы NIPA Silica Gel в цикле Humidity Swing Adsorption.



Регенерация данного материала происходит значительно быстрее и глубже, чем в случае силикагеля (рис.7.77).



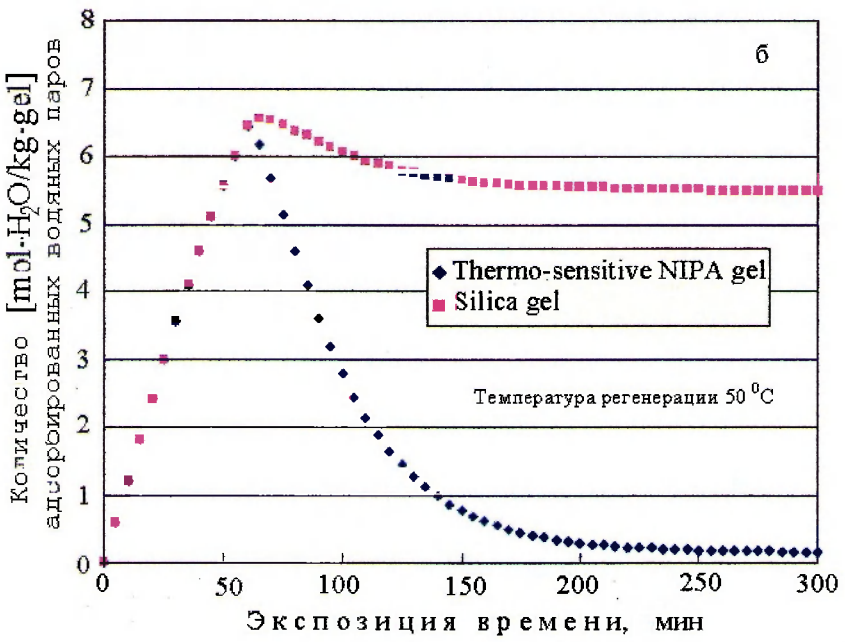


Рис.7.77. Режимы регенерации адсорбентов NIPA Silica Gel и силикагеля при различных температурах: 80 °С – а, 50 °С – б.

7.2.4.3.3. НАНОКОМПОЗИТЫ

Особый класс десикантов: «соль в пористой матрице», – представляет собой двухкомпонентные системы, которые состоят из гигроскопичных неорганических солей, диспергированных до наноразмеров путем помещения их в мезопоры матрицы гидрофильных материалов (силикагели, алюмогели, оксиды алюминия, цеолиты, нанокерамика) и гидрофобных пористых углей [4, 27, 84, 118, 196, 286, 307, 308]. Нанокомпозиты обладают большой сорбционной емкостью, существенно превышающей емкость промышленных адсорбентов (рис.7.87), и невысокой температурой регенерации 80…120 °С.

Основным сорбирующим элементом композитов является неорганическая соль. Свойства солей (рис.7.78) значительно изменяются при заключении в поры матрицы вследствие двух факторов: а) диспергирования до наноразмеров, или так называемого «размерного эффекта», и б) взаимодействия соли с поверхностью матрицы.

Рис.7.78. Абсорбция водяных паров различными неорганическими солями [118].

Химический, фазовый состав и сорбционные свойства нанокомпозитов можно варьировать в широких пределах, управляя: а) химической природой соли и матрицы; б) степенью диспергирования соли; в) пористой структурой матрицы; г) содержанием соли; д) условиями синтеза композитов.

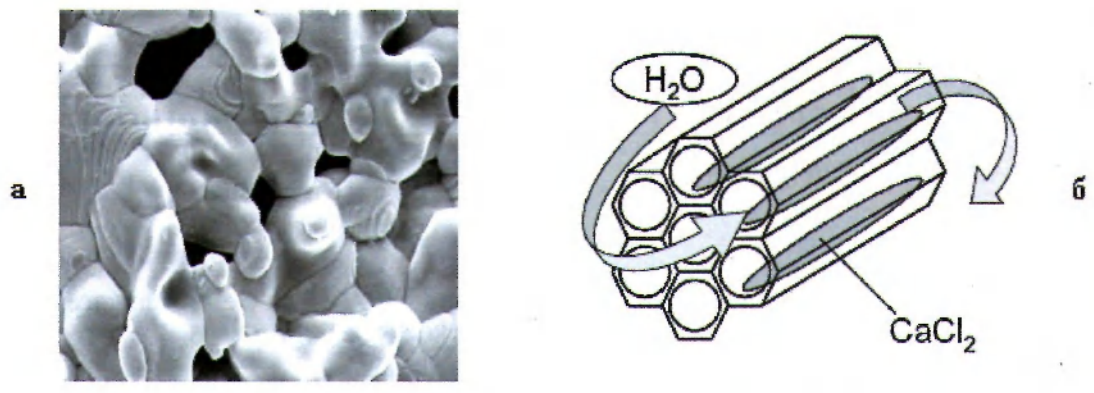


Рис.7.79. Структура нанокерамики REM (ZAE Bayern) – а,
и схема композитного сорбента ССВ-1К (Новосибирский институт катализа, РФ) – б.

Лидирующие позиции в создании нанокомпозитных десикантов принадлежат институту катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (Новосибирск, Россия) (д.х.н. Ю.И. Аристов, лаборатория энергоаккумулирующих процессов и материалов) [4, 27, 82, 122…125]. Здесь были проведены исследования сорбционных свойств более чем 40 новых сорбентов на базе: галогенидов ($CaCl_2$, LiBr, LiCl, $MgCl_2$), сульфатов (Na_2SO_4, $MgSO_4$, $CuSO_4$), нитратов щелочных и щелочно-земельных металлов ($Ca(NO_3)_2$, $LiNO_3$, $Mg(NO_3)_2$), импрегнированных солью различных адсорбентов.

В этом научном центре разработаны и созданы промышленные десиканты, получившие название «Селективные сорбенты воды» ССВ (SWS) [71, 72, 125], например, композитный сорбент ССВ-1К – мезопористый силикагель КСК, модифицированный хлоридом кальция.

Метод повышения сорбционной емкости и осушающей способности адсорбентов введением в их поры гигроскопических веществ известен достаточно давно с 1929 года (патент США № 1740351, 17.12.1929). Однако, системное изучение сорбентов класса «соль в пористой матрице» стало осуществляться только в последние 15 - 20 лет. Кроме института катализа СО РАН этим активно занимаются и другие научные центры.

В институте холодильной техники и криогеники и университете Jiao Tong (Шанхай, КНР), при поддержке японской компании Daikin Co., проведено исследование нанокомпозита, созданного на базе силикагеля, как матрицы, и хлорида лития в качестве соли. Получено увеличение величины сорбции на 20…30 % по отношению к возможностям силикагеля.

В королевских научных центрах Таиланда (Бангкок) осуществлен синтез двухкомпонентных десикантов, использующих в качестве матрицы искусственный цеолит JRC-Z-HY5.3, с различными солями [118]. Лучшие результаты получены при использовании $CaCl_2$.

В китайском технологическом университете (Nanjing) проведено комплексное исследование нанокомпозитов на основе силикагеля, алюмогеля и цеолита 13X с добавлением хлорида кальция [57].

Поглощение влаги ССВ характеризуется тремя механизмами: адсорбцией H_2O пористой матрицей; химической реакцией, возникающей между водой и солью с образованием кристаллогидрата $<S> + n\ H_2O \leftrightarrow <S \cdot n\ H_2O>$; абсорбцией влаги водным раствором соли в порах (рис.7.80).

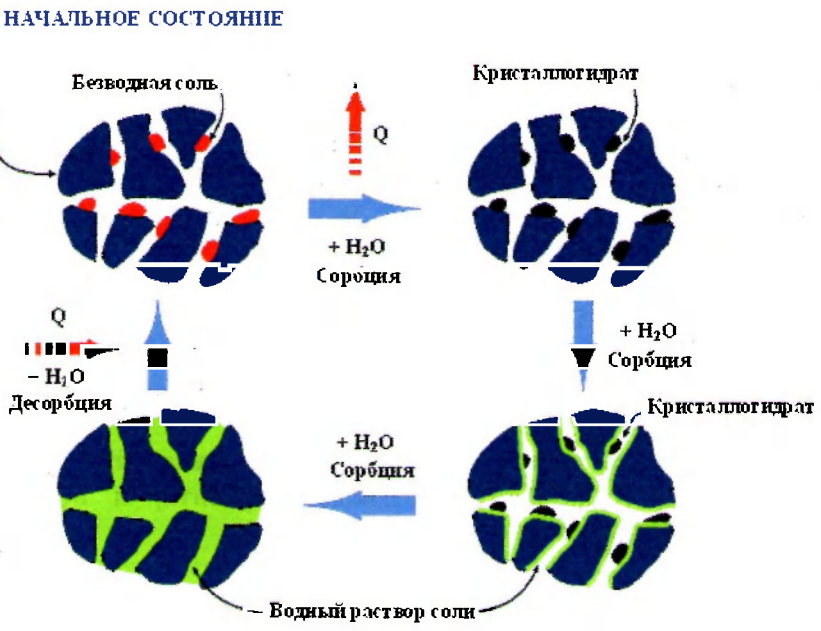


Рис.7.80. Рабочий цикл ССВ.

Влияние концентрации раствора ($c_р$) и показателя кислотности воды (pH) показано рис.7.81. При определенных значениях этих показателей: $\varsigma_р > 26$ % и pH = 5,5 изотер сорбции ССВ приобретают S-образную форму (аналогично FAM).

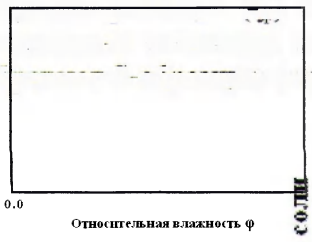
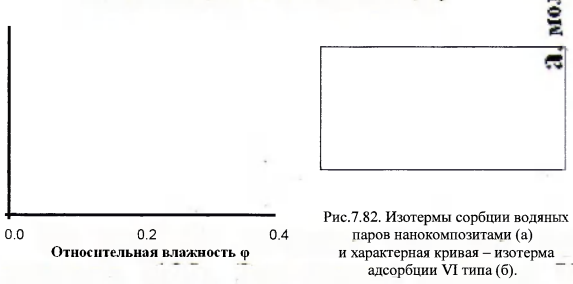


Рис.7.81. Изотермы сорбции нанокомпозита «силикагель – $CaCl_2$» [123].

На рис.7.82а показаны изотермы сорбции ряда нанокомпозитов «соль в пори матрице» [125]. Эти кривые отвечают VI типу изотерм адсорбции новой расширен классификации IUPAC, так называемые ступенчатые (пошаговые) изотермы (рис.7.8б В случае FAM – это наблюдается из-за структурного перехода от гидрофобного гидрофильного состояния. Для ССВ каждый шаг вызван химической реакцией м водяным паром и солью [124].



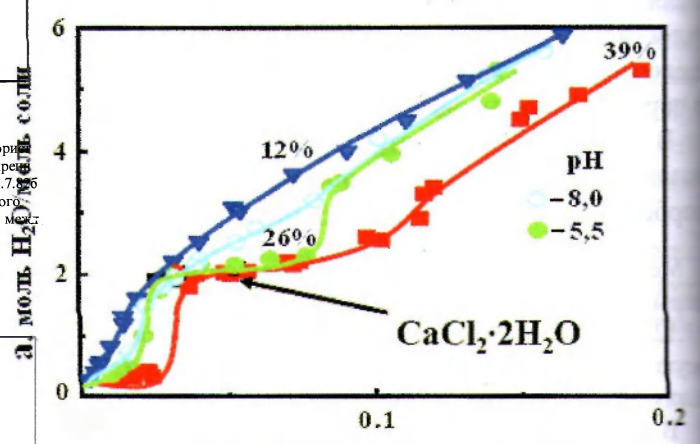
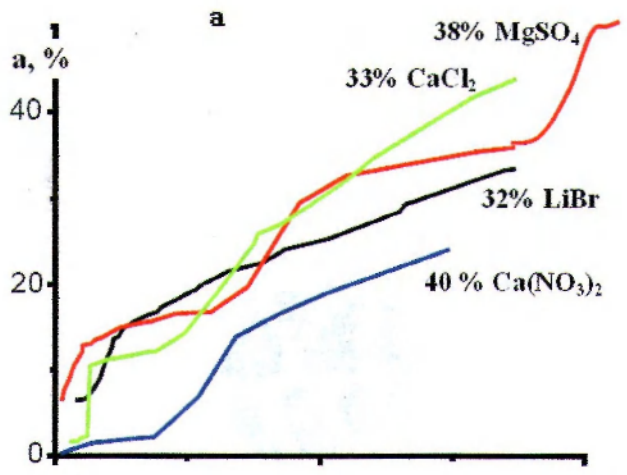


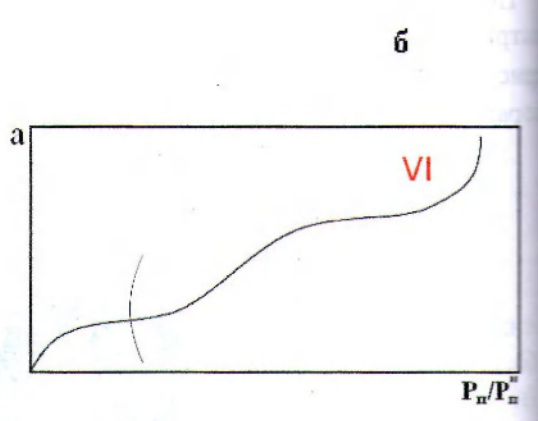
Рис.7.82. Изотермы сорбции водяных паров нанокомпозитами (а) и характерная кривая – изотерма адсорбции VI типа (б).

Селективные сорбенты воды обладают высокими значениями статической (а = 30…90 %) и динамической емкости (0,25…0,35 г воды/г сорбента) и незначительными потерями емкости (за 500 циклов работы не превышают 2,0 %).

Высокая динамическая емкость сорбента позволяет осуществить регулируемый обмен влаги между приточным и вытяжным воздухом со степенью регенерации до 90 – 95 %.

Ниже, на рис.7.83…7.85 приведены данные работы [308] по изотермам адсорбции нанокомпозитов, образованных на основе силикагеля, алюмогеля и цеолита 13Х, с использованием соли $CaCl_2$, а также по стабильности их рабочих характеристик за n циклов эксплуатации (рис.7.86).





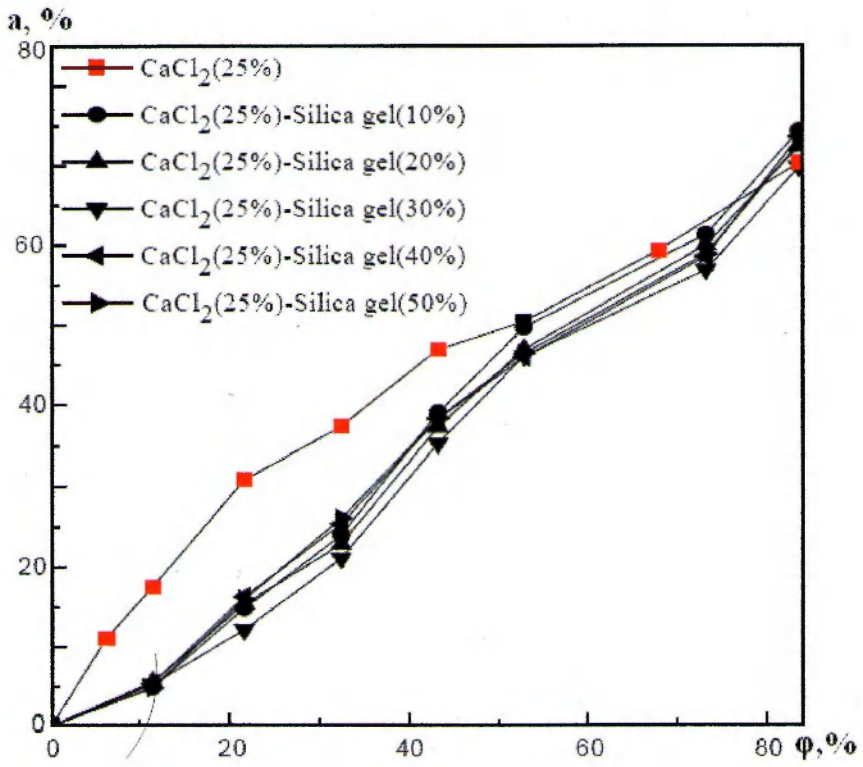


Рис.7.83. Изотермы сорбции нанокомпозита «силикагель – $CaCl_2$».

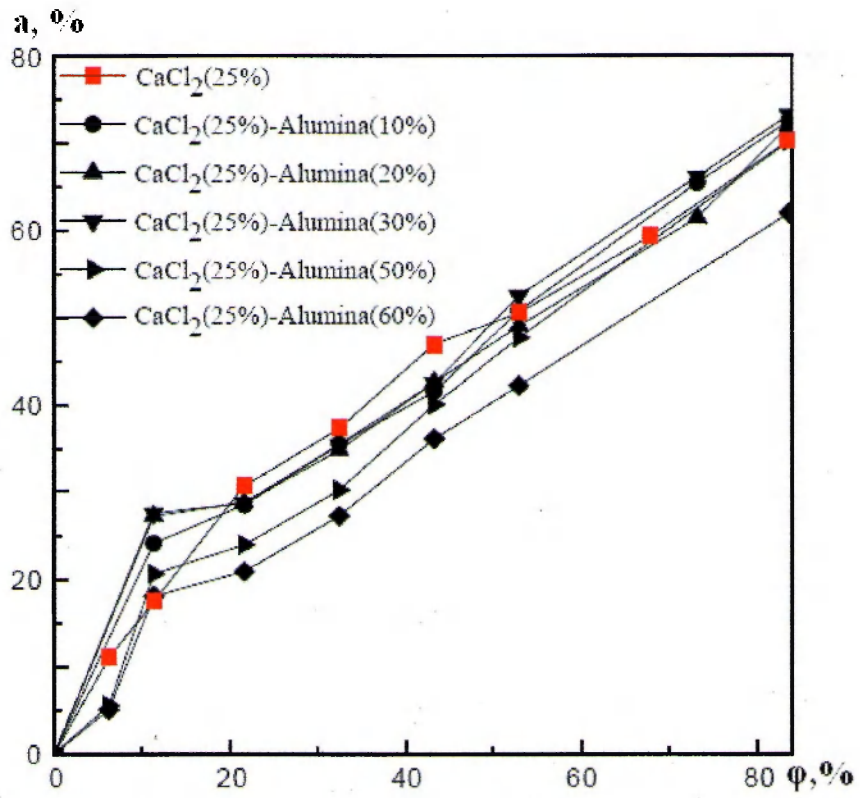


Рис.7.84. Изотермы сорбции нанокомпозита «алюмогель – $CaCl_2$».

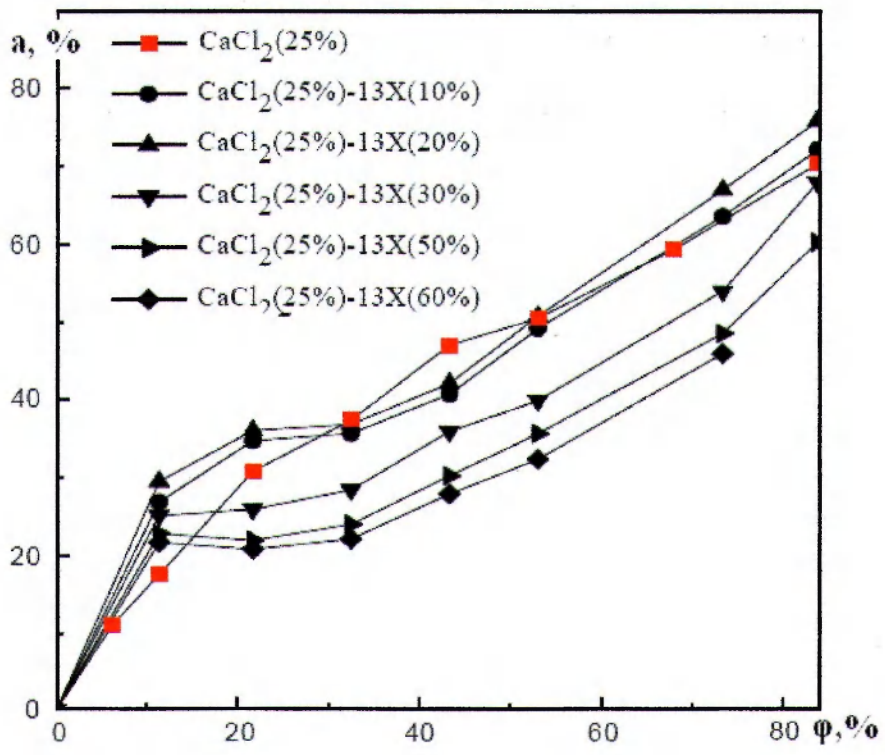


Рис.7.85. Изотермы сорбции нанокомпозита «цеолит 13 X– $CaCl_2$».

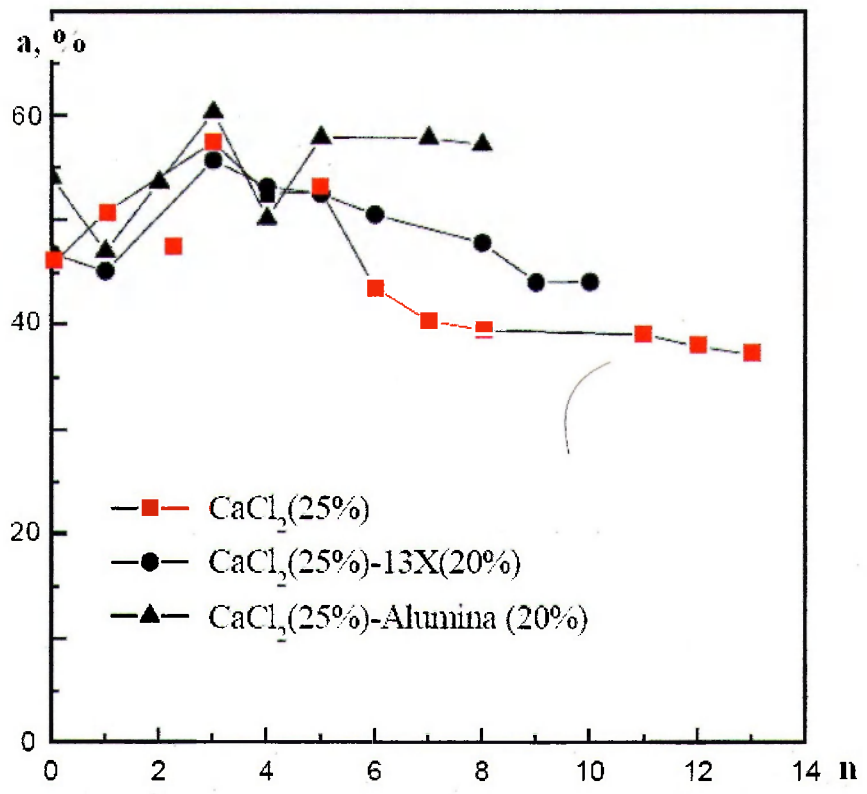


Рис.7.86. Данные по величине статической емкости а нанокомпозитов с включением 25 % $CaCl_2$ при многократном использовании (n – число циклов эксплуатации) [308].

На рис.7.87 проведено сопоставление различных адсорбентов по величине и теплоте сорбции. Совершенно очевидным является преимущество новых материалов SWS и FAM.

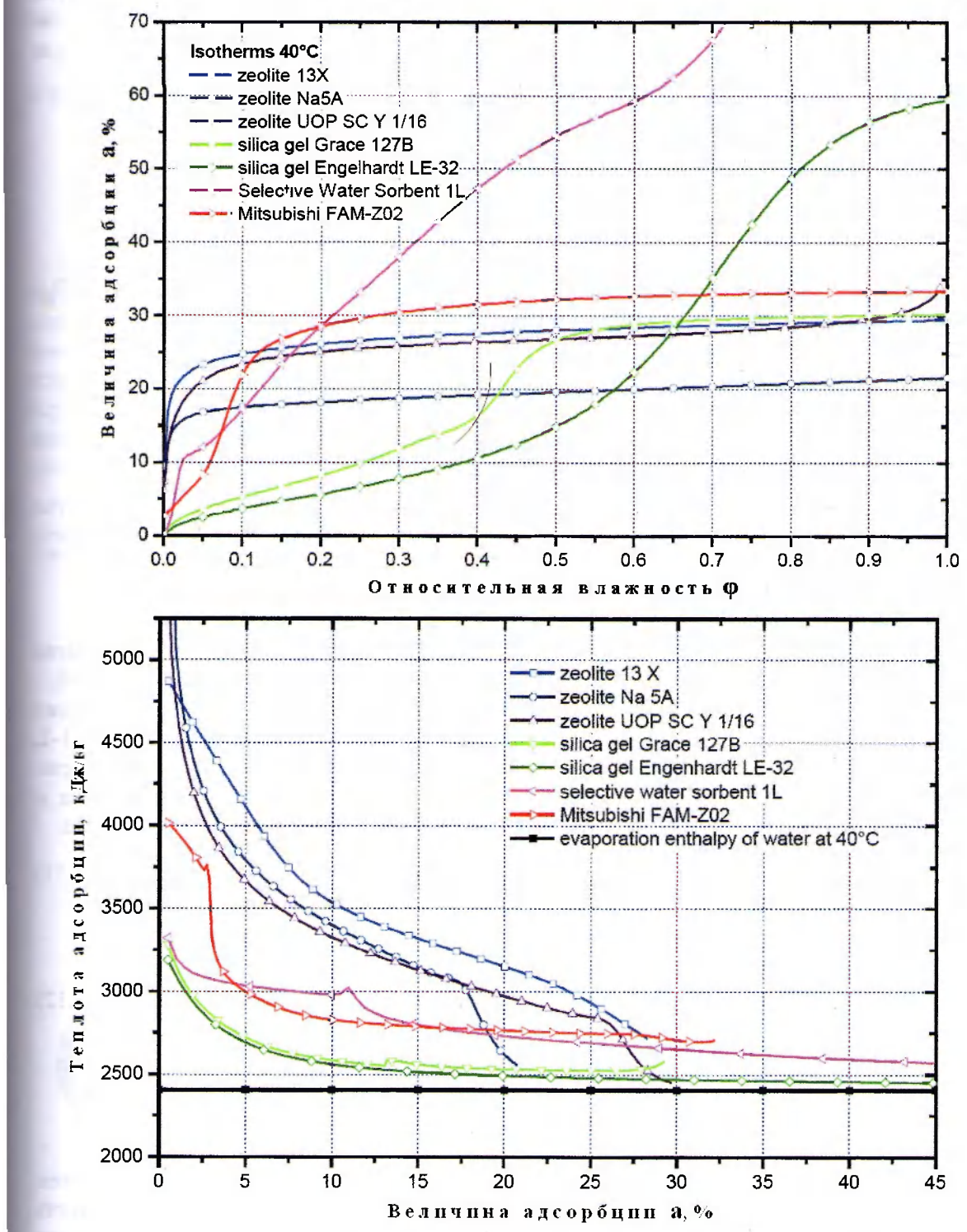


Рис.7.87. Сопоставление различных сорбентов ведущих мировых производителей по изотермам сорбции и величинам теплоты адсорбции (t = 40 °C) [131]:

цеолиты: 13X и Na5A (Bayern), SC Y 1/16 – типа Y (UOP), FAM-Z02 (Mitsubishi Chemicals Corporation); силикагели: 127 B – микропористый (Grace Davison), LE-32 – макропористый (Engelhard); селективный сорбент воды SWS 1L – мезопористый силикагель, импрегнированный солью $CaCl_2$ (институт катализа им. Г.К. Борескова)

7.2.5. АДСОРБЕРЫ

Независимо от особенностей инженерных решений задачи осушения воздуха (рассмотрены ниже), все они построены на одном и том же принципе: *последовательном проведении процессов сорбции и десорбции.* В d,$P_п$- диаграмме (рис.7.88) показано как изменяется влагосодержание десиканта в этом цикле [252].

В процессе сорбции влаги из воздуха (1-2) его влагосодержание увеличивается. В связи с выделением теплоты адсорбции соответственно растет температура и величина парциального давления водяных паров у поверхности десиканта $P_д$. Процесс заканчивается при достижении равенства $P_д = P_п$ (где $P_п$ – парциальное давление паров в осушаемом воздухе).

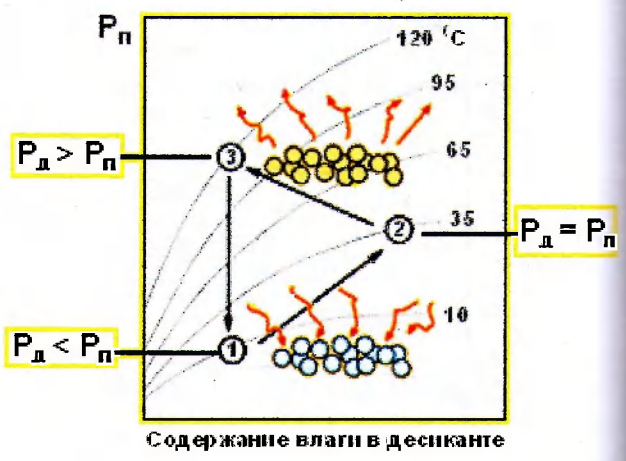
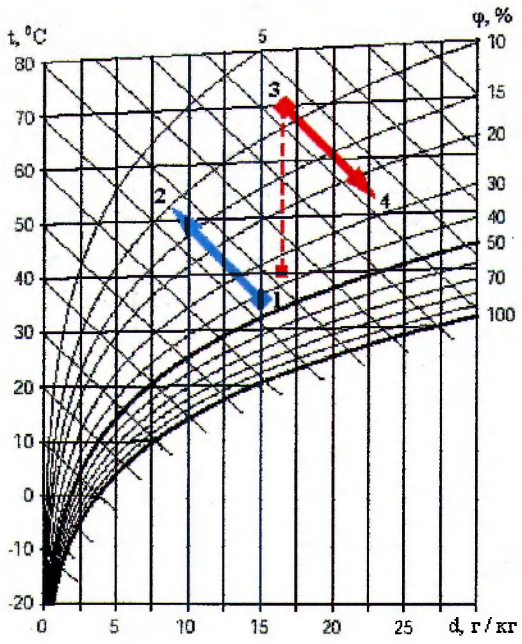


Рис.7.88. Осушительный цикл.

В процессе десорбции (2-3) за счет нагревания десиканта потоком горячего воздуха обеспечивается условие $P_д > P_п$, и влага покидает осушитель. Таким образом, в десиканте восстанавливается первоначальный уровень d_1.



В процессе охлаждения (3-1) достигается условие $P_д = P_1 < P_п$, и цикл может быть повторен.

В d,h- диаграмме (рис.7.89) процесс осушения воздуха адсорбентами изображается линией 1-2, незначительно отклоняющейся от изоэнтальпы. Если в начале процесса температуры воздуха и сорбента равны, то уравнение теплового баланса:

$$G_в \Delta h = W C_w t_2, \qquad (7.11)$$

где $W = G_в \Delta d$.

Тепловлажностное отношение

$$\varepsilon_{адс} = \Delta h / \Delta d = C_w t_2. \qquad (7.12)$$

Рис.7.89. Изображение в d,h- диаграмме процесса адсорбции влаги 1-2 и десорбции 3-4.

Выделяющаяся в процессе теплота $q_{адс}$ нагревает сорбент, а затем явным путем передается в обрабатываемый воздух и в окружающую среду через наружную поверхность аппарата. При этом можно считать, что осушаемый воздух воспринимает количество теплоты, примерно равное скрытой теплоте конденсации **r** (теплота смачивания идет на нагрев десиканта и в среду). Тогда:

$$t_2 = t_1 + r \Delta d / C_в, \qquad (7.13)$$

где $r = 2510 - 2{,}3\, t_1$. Величина t_2 обычно достигает 40…50 °С, и, соответственно, действительный луч процесса отклоняется от изоэнтальпы ($\varepsilon = 0$ кДж/кг) на 160…200 кДж/кг (на рис.7.89 не показано).

Необходимое количество десиканта можно определить с помощью балансового уравнения по влаге:

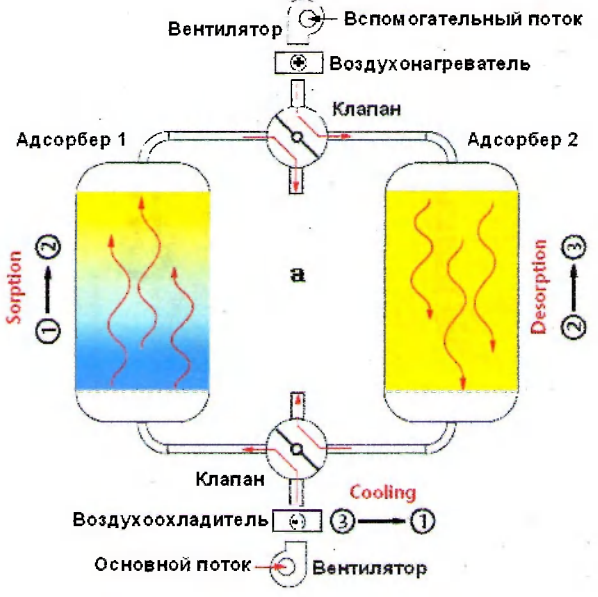
$$W = G_в \, \Delta d = a \cdot V_{адс} \cdot \rho_{адс} / z \,, \qquad (7.14)$$

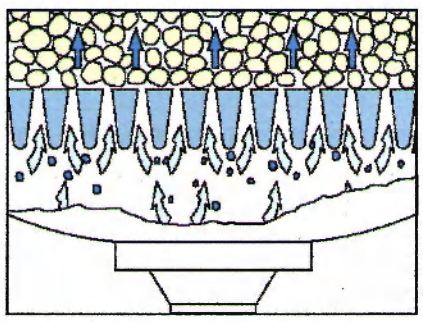
где z – время работы.

На практике осушение воздуха осуществляется по двум основным схемам: с неподвижным слоем (batch type) либо с непрерывно вращающимся ротором.

7.2.5.1. УСТАНОВКИ С ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМИСЯ АДСОРБЕРАМИ

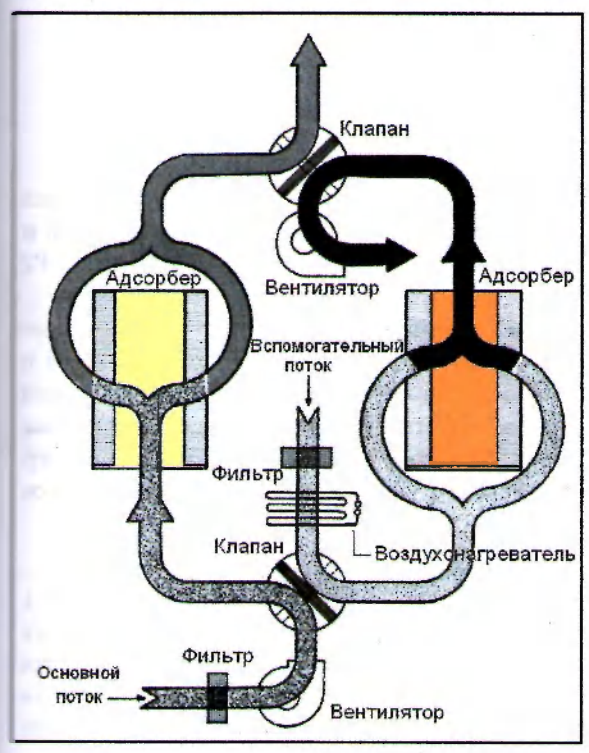
Первая схема предусматривает двухсекционный адсорбер либо два одинаковых стационарных аппарата (рис.7.90, 7.91). Каждый из них попеременно работает в режиме осушения, переключаясь на реактивацию при достижении состояния, близкого к полному насыщению.





б

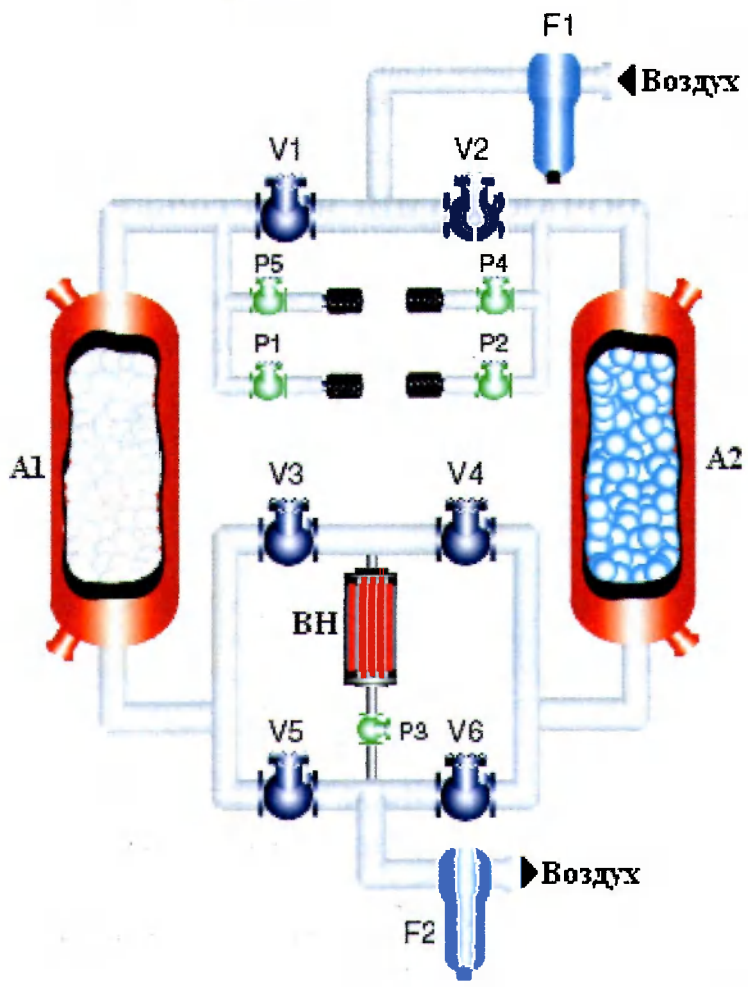
Рис.7.90. Принципиальная схема установки с переключающимися адсорберами Multi-tower (batch-type) (обозначение процессов по рис.7.88) – а и внутреннее устройство адсорбера – б.



Воздух в процессе сорбции (десорбции) проходит через слой гранулированного десиканта, который заполняет сплошным слоем объем аппарата (рис.7.90б) либо (с целью уменьшения величины аэродинамического сопротивления) засыпается в специальные кассеты-патроны (рис.7.91). Для осушения воздуха за один проход глубина десиканта должна быть не менее 250 мм.

Рис.7.91. Схема адсорбционной осушительной установки Multi-tower (batch-type) с цилиндрическими патронами.

В настоящее время установки с переключающимися адсорберами используются, в основном, для осушения сжатого воздуха. Ниже на рис.7.92…7.96 приведены различные схемы и фотографии установок с двумя адсорберами компаний Donaldson и Atlas.





AEHD-150

Рис.7.92. Установки Donaldson
серии AEHD (Externally Heated Series): A1, A2 – адсорберы;
F1, F2 – фильтры; ВН – воздухонагреватель; V1…V6 и P1…5 – клапаны.

Воздух поступает в установку к адсорберу A1 через фильтр F1, клапан V1 и осушеный выводится через клапан V5 и концевой фильтр F2. Часть сухого воздуха направляется в воздухонагреватель и аппарат A2 (в данном случае, десорбер) для его реактивации, по цепочке: P3 – ВН – V4 – A2 – P2 (P4).

Работа установки осуществляется автоматически по программе, которую поддерживает логический контроллер (PLC). Продолжительность полного цикла – стандартного режима сушки и регенерации – 8 часов. В то время как один аппарат (адсорбер), например A1, сушит поступающий воздух в течение 4 часов, другой аппарат (десорбер) A2 регенерируется: в течение 3 часов проводится режим десорбции при нагревании сухого воздуха на входе в A2, затем в течение 50 минут десорбер охлаждается, и наконец в течение 10 минут осуществляется подготовка к переключению аппаратов (режим герметизации) (рис.7.93).

Производительность установок AEHD 250…5000 м^3/ч.

Установки осушения сжатого воздуха серий HRE (рис.7.94) и HRS-L (рис.7.95) производительностью 1000…17000 м^3/ч, для реактивации десорбера используют атмосферный воздух окружающей среды. В случае HRE только небольшая часть (2%) осушенного сжатого воздуха отбирается для режима герметизации системы после регенерации и охлаждения десорбера, а в случае HRS-L ценный осушенный воздух не отбирается вовсе, для этих целей применен водяной воздухоохладитель.

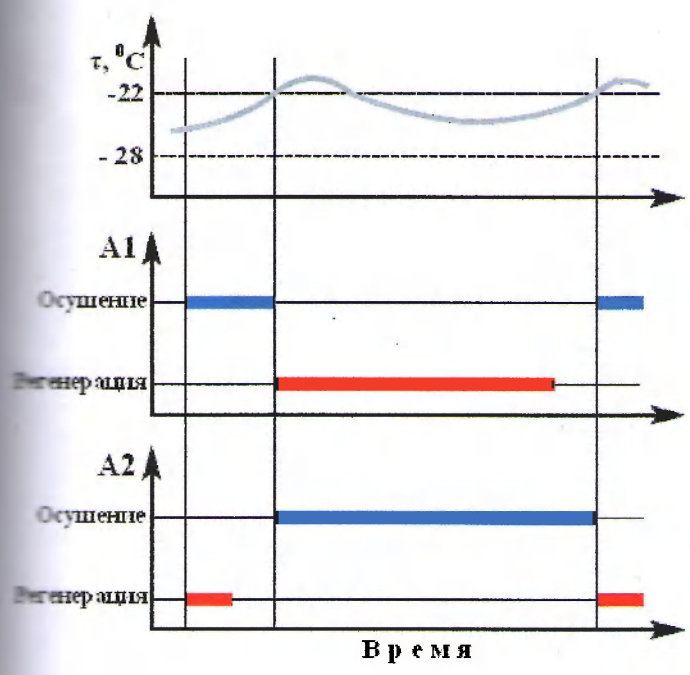


Рис.7.93. Динамика рабочего цикла установки осушения воздуха, состоящей из двух аппаратов А1 и А2.



HRE-5000

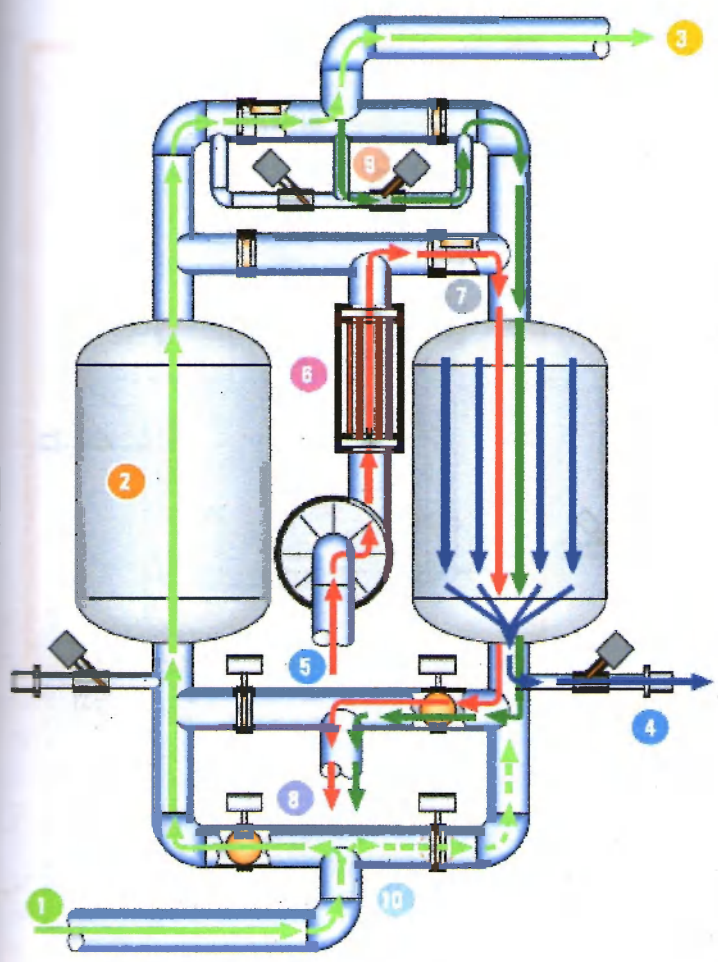


Рис.7.94. Установки Donaldson серии HRE (Blower Purge Series):

1 – подача воздуха на осушение;
2 – адсорбер;
3 – выход сухого воздуха;
4 – клапан выравнивания давления;
5 – вентилятор подачи атмосферного воздуха;
6 – воздухонагреватель;
7 – подача горячего воздуха в десорбер;
8 – выпуск воздуха после десорбера в атмосферу через дроссельный клапан;
9 – клапан перепуска осушенного воздуха в десорбер для герметизации системы;
10 – клапан, обеспечивающий прокачку обоих аппаратов влажным сжатым воздухом в течение 10 минут для охлаждения десорбера и минимизации отбора осушенного воздуха для этих целей (осуществляется перед режимом герметизации).



HRS-L-3000

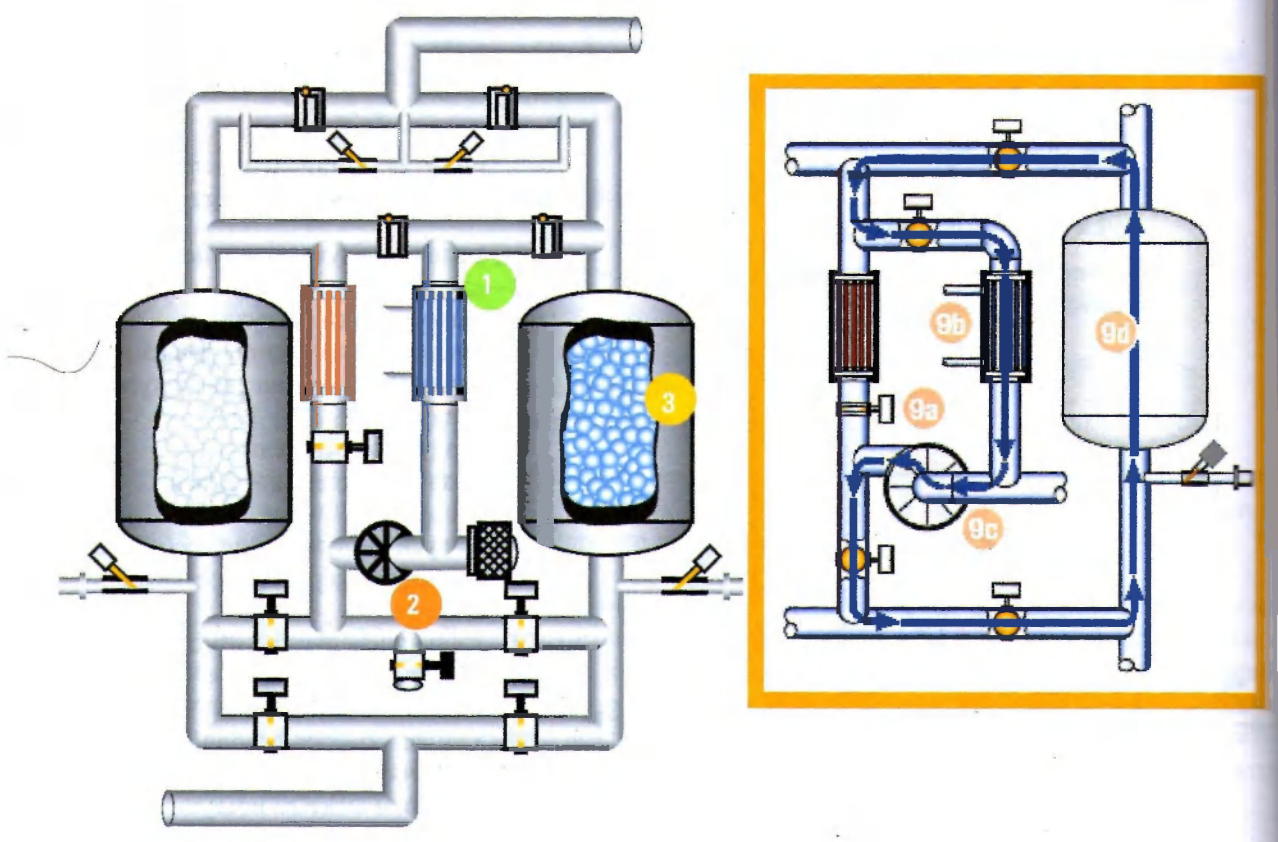


Рис.7.95. Установки Donaldson серии HRS-L (Zero Purge Series):

1 – байпасная линия для охлаждения десорбера
(выделена отдельным фрагментом (справа)): позиции 9a,9b, 9c, 9d):
2 – вентилятор подачи атмосферного воздуха; 3 – десорбер.

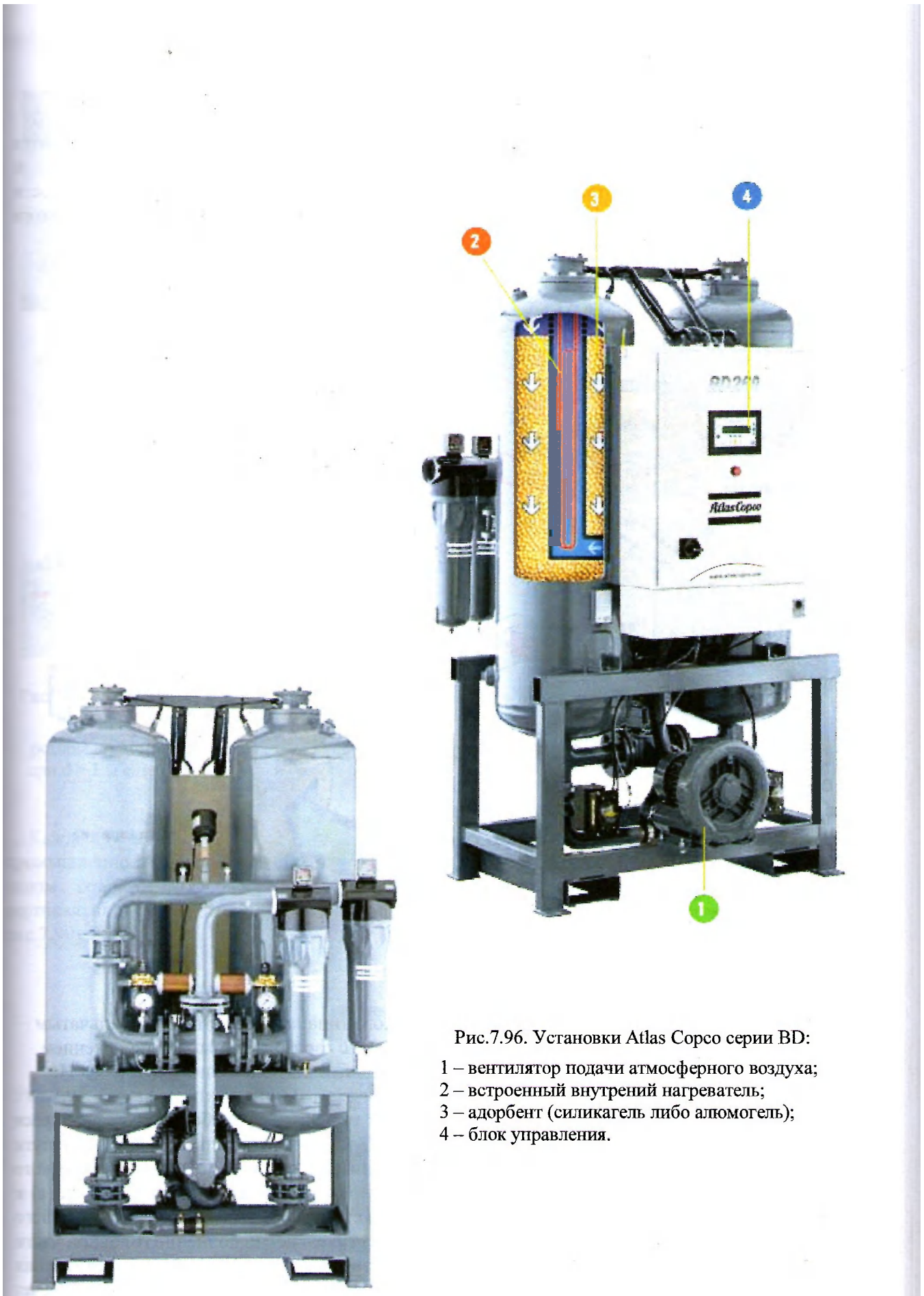


Рис.7.96. Установки Atlas Copco серии BD:
1 – вентилятор подачи атмосферного воздуха;
2 – встроенный внутрений нагреватель;
3 – адорбент (силикагель либо алюмогель);
4 – блок управления.

7.2.5.2. РОТОРНО-СОРБЕНТНЫЕ УСТАНОВКИ

Вторая схема – с вращающимся ротором, – реализуется в четырех вариантах конструктивного оформления аппаратов: кассетные с использованием слоя гранул и насадочные адсорберы “Honeyvent” с импрегнированным слоем десиканта на поверхности элементов регулярной насадки, при горизонтальном или вертикальном расположении ротора “Sorption wheel”, рис.7.97 [290].

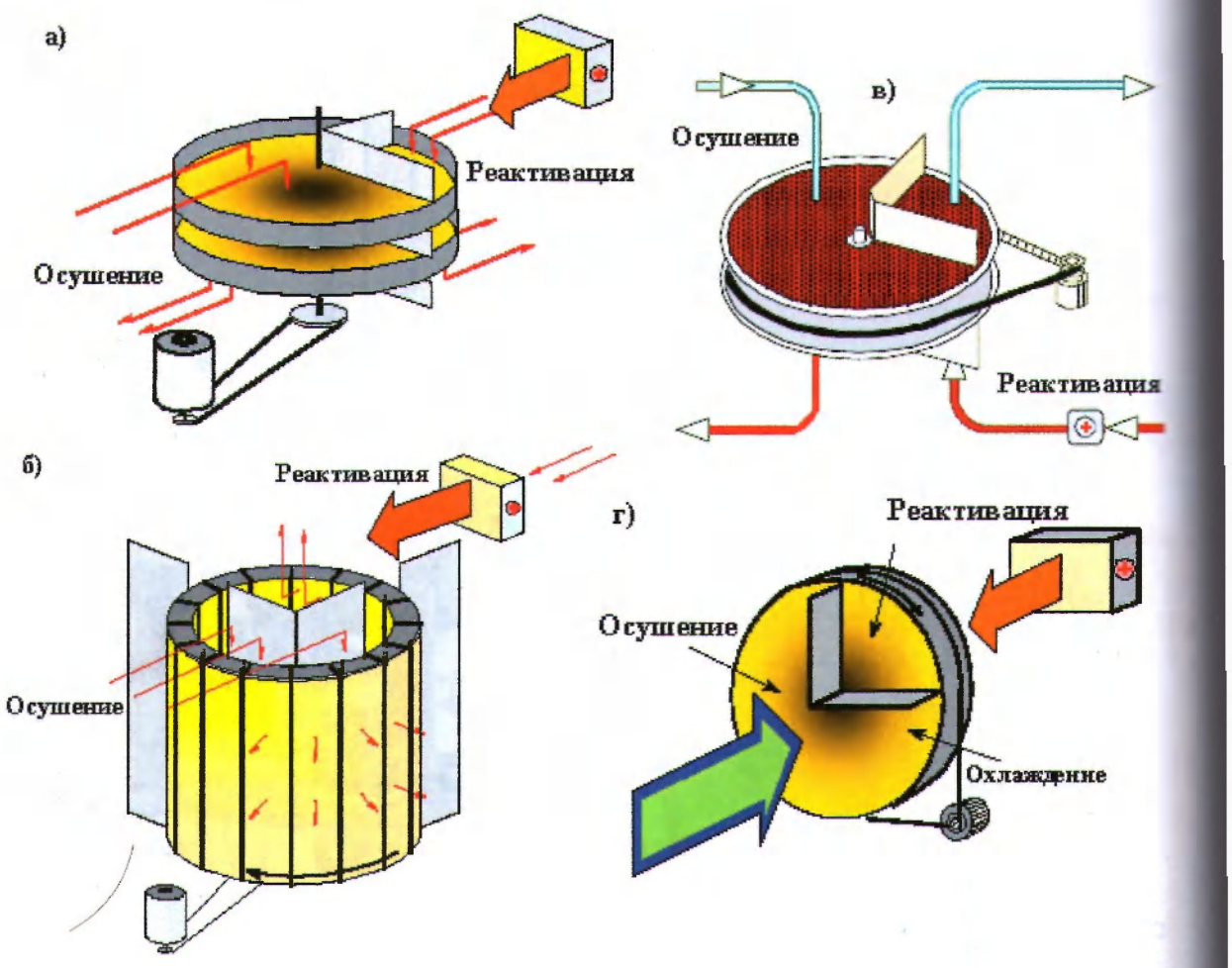


Рис.7.97. Инженерные решения установок роторного типа: а) – кассетные с тарельчатым ротором; б) – кассетные с барабанным ротором; в) – с горизонтальным расположением ротора с регулярной насадкой РН; г) – с вертикальным расположением ротора с РН.

Последовательность размещения конструктивных вариантов адсорберов с вращающейся головной частью на рис.7.97 соответствует этапам их совершенствования. На этом пути решались вопросы увеличения производительности аппаратов, снижения аэродинамического сопротивления, технические проблемы привода и др. Например, переход от варианта (а) к варианту (б) повысил воздухопроизводительность за счет размещения в кассетах большого количества гранулированного десиканта. При этом вертикальное исполнение головной части в виде барабана позволило минимизировать затраты энергии на преодоление сопротивления слоя, однако потребовало усиления узла опорного подшипника, что было решено за счет применения карусельного привода (рис.7.98).

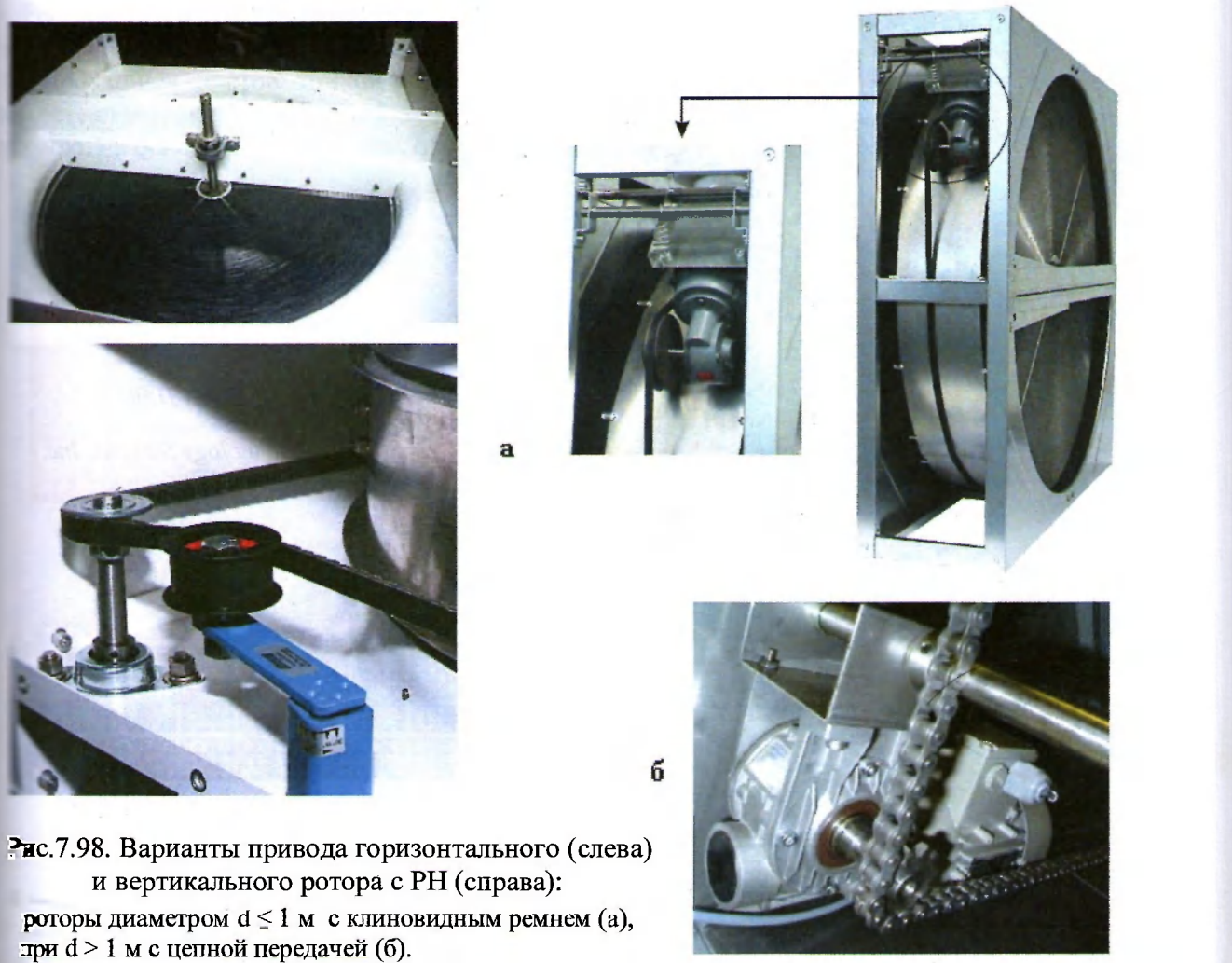


Рис.7.98. Варианты привода горизонтального (слева) и вертикального ротора с РН (справа):
роторы диаметром d ≤ 1 м с клиновидным ремнем (а), при d > 1 м с цепной передачей (б).

Каждый вариант имеет свои преимущества (и недостатки), выпускается промышленностью и находит своих потребителей. И все же следует отметить, что основным типом современных адсорберов является аппараты “Honeyvent” (“Honeycombe”) с вертикальным расположением ротора и использованием слоя регулярной насадки (рис.7.97г, рис.7.99).

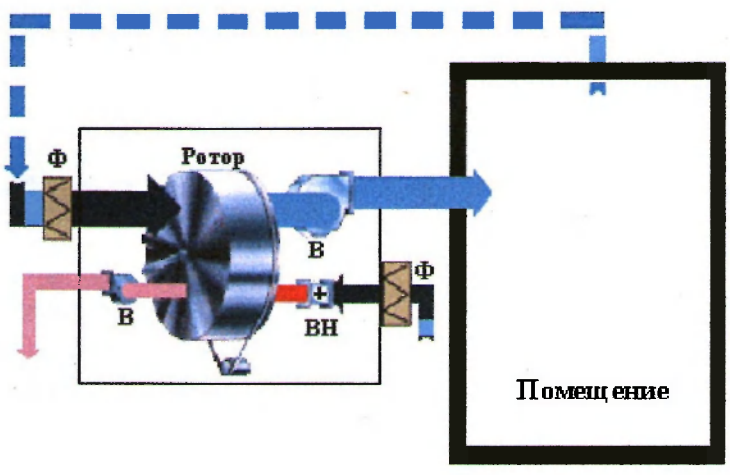
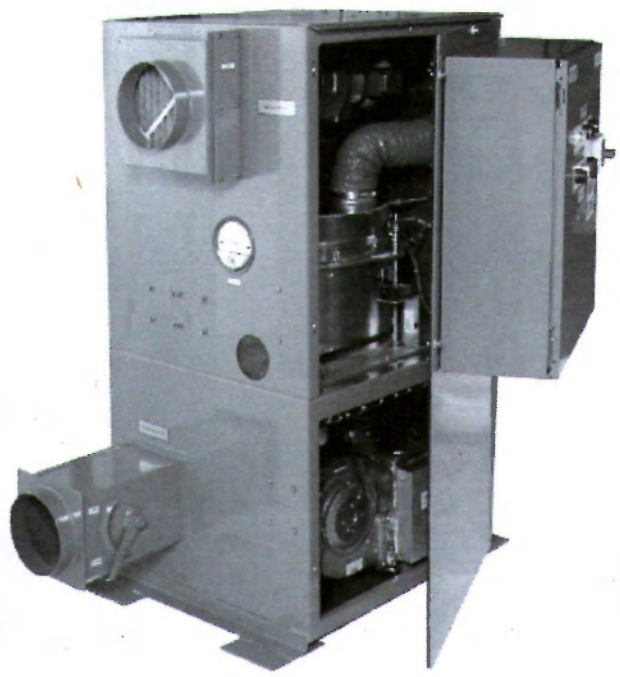


Рис.7.99. Схема осушительной установки Honeyvent (Munters):

Ф – фильтр,
В – вентилятор,
ВН – воздухонагреватель.



DESICAIR–1000

Stulz Air Technology Systems, Inc. (SATS)

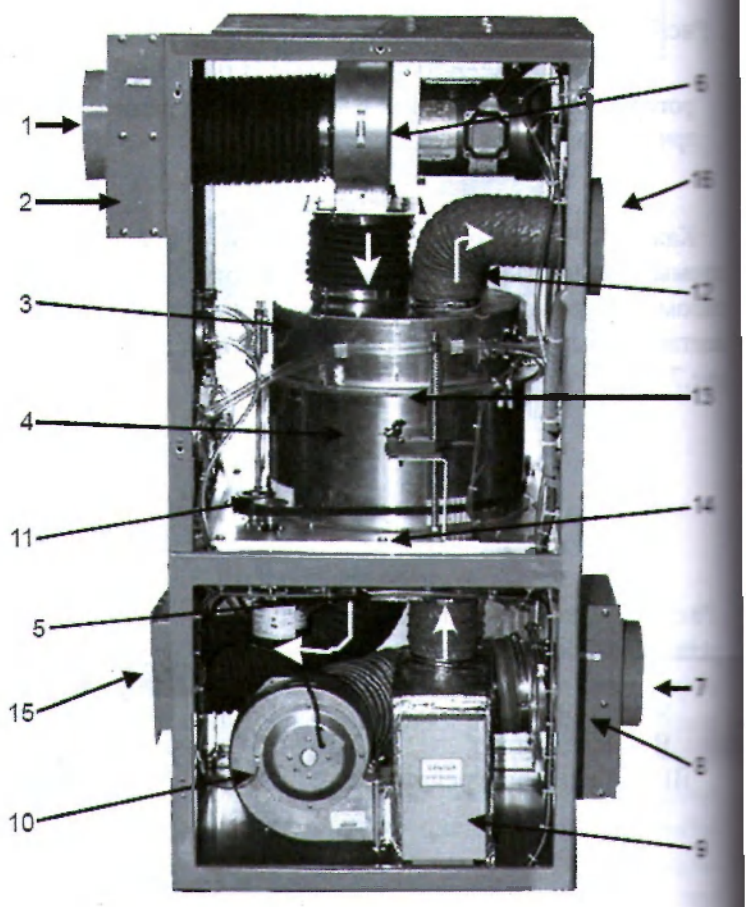
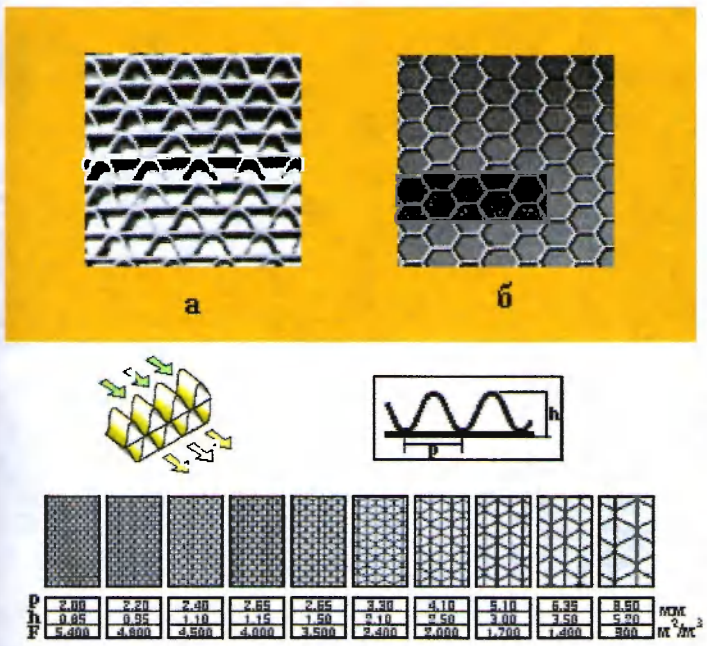


Рис.7.100. Конструкция осушителя с горизонтальным ротором:

1 – вход основного потока воздуха;
2 – фильтр;
3 – верхняя камера;
4 – ротор-осушитель;
5 – нижняя камера;
6 – вентилятор основного потока воздуха;
7 – вход вспомогательного потока воздуха на реактивацию ротора;
8 – фильтр;
9 – воздухонагреватель;
10 – вентилятор вспомогательного потока;
11 – ременной привод ротора;
12 – патрубок вспомогательного потока;
13 – торцевое уплотнение;
14 – уплотнительная пластина;
15 – выход осушенного воздуха;
16 – выход вспомогательного потока воздуха после реактивации.

Регулярная насадка (РН), являющаяся основой ротора, выполняется чередованием плоских и гофрированных листов тонкой алюминиевой фольги либо стекловолокна (рис.7.101а), а также в виде сот, как правило, на основе керамики (рис.7.101б).



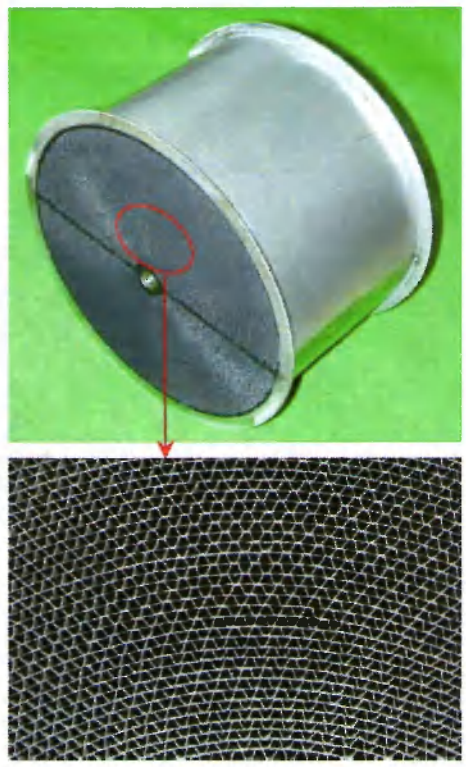
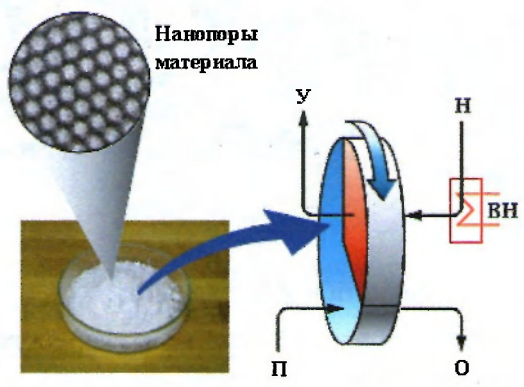


Рис.7.101. Геометрия каналов регулярной насадки (РН):
синусоидальной (а) и гексагональной формы (б).

В нижней части рис.7.101 приведены различные варианты набора РН, отличающиеся шагом p и высотой гофра h и, соответственно, величиной поверхности F.

Образованная таким образом система каналов позволяет при значительном развитии адсорбирующей (для десиканта) поверхности (до 6000 $м^2/м^3$) существенно уменьшить аэродинамическое сопротивление РН движению воздушного потока (100…200 Па). На всю поверхность каналов равномерным слоем, по специальной технологии химической кристаллизации, наносится (импрегнируется) слой десиканта: силикагель, синтетические цеолиты, гигроскопическая соль LiCl, (рис.7.102, 7.103).



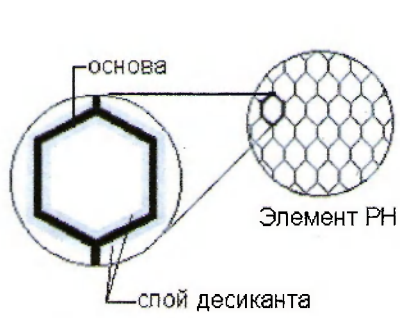


Рис.7.102. Элемент РН с нанесенным слоем десиканта.

На схеме ротора: ВН – воздухонагреватель Н, У, П, О – наружный, удаляемый из помещения, осушенный воздух, соответственно.

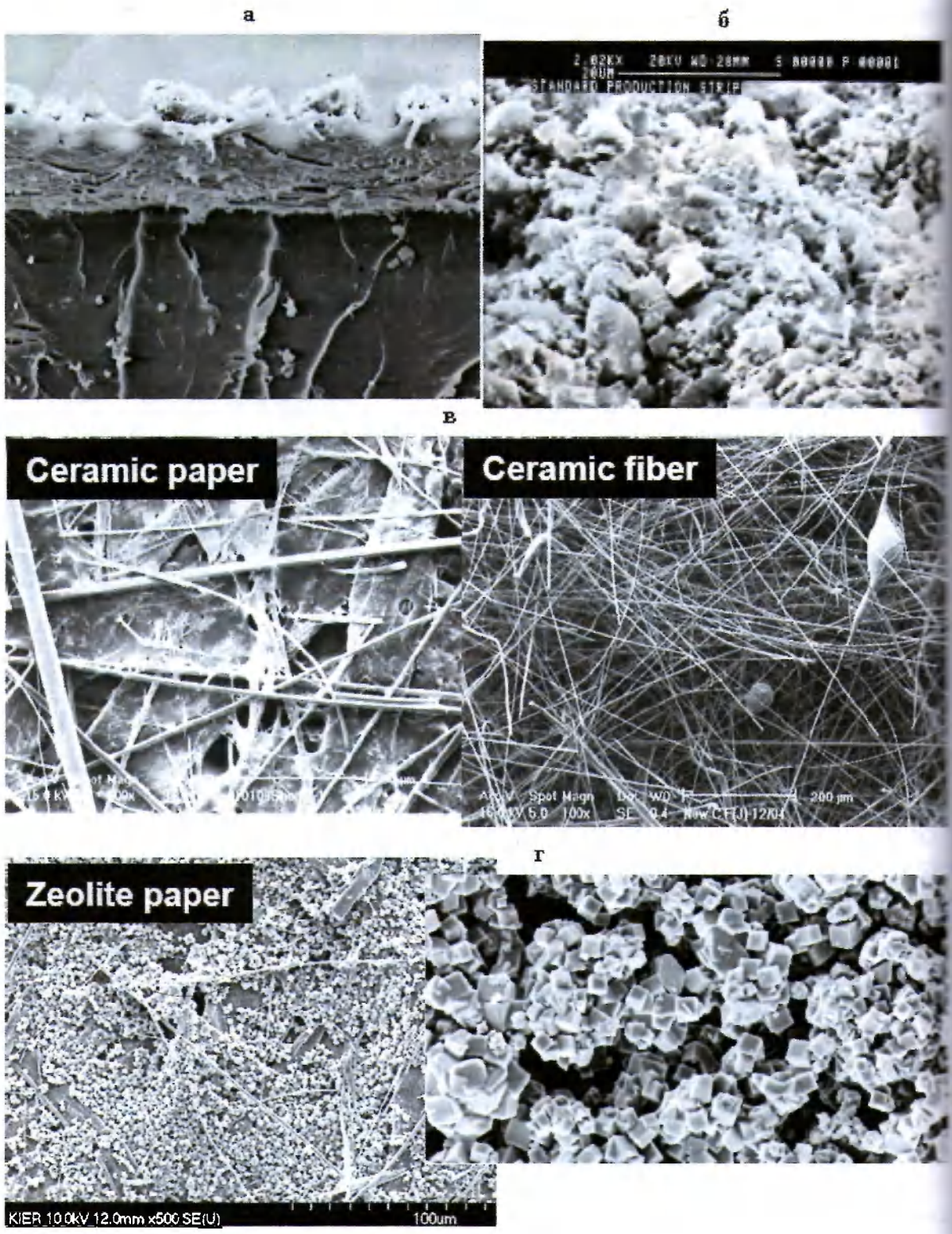


Рис.7.103. Микрофотографии слоя десиканта и материала РН:
силикагель (а – срез слоя с подложкой, б – рабочая поверхность), Airxchange Inc. [261];
в – подложка из стекловолокна (ceramic fiber)и керамики (ceramic paper);
г – цеолит 3А (SEMCO Ltd) на керамической основе.

Начиная с 50-х годов прошлого столетия, роторы с солью LiCl успешно используются в диапазоне φ = 40…80 %, однако, они малопригодны для осушения воздуха с более высокой относительной влажностью, поскольку соль переходит в состояние гидрата и уносится с потоком воздуха. По этой причине, в настоящее время (с 1992 г.) основным типом роторов-осушителей для коммерческих целей является ротор со слоем силикагеля HPS (High Performance Silica gel, компания Munters и др.): силикагель – 82 %, основа – стекловолокно – 16 %, акриловая подложка – 2 %.

Для работы в условиях загрязненных сред можно рекомендовать Desiccant Hygienic rotors: изделия шведско-японского концерна "Seibu Giken DST AB" с оригинальным антибактериальным слоем на поверхности десиканта (рис.7.104), либо шведской компании "ProFlute AB" – PPH*,- с добавкой соли LiCl (силикагель – 81 %, LiCl – 2 %, стекловолокно – 15 %, акриловая подложка – 2 %). Применение данных ингредиентов предотвращает микробиологический рост в каналах роторов.

Цеолиты А и Х (либо их комбинация с силикагелем) используется для специальных приложений, когда требуется глубокое осушение, например, в роторах Canecycle (Munters): MS-A, MS-X, GX-7, SZCR (Seibu Giken DST).

* PPH- High Performance ProFlute desiccant rotors

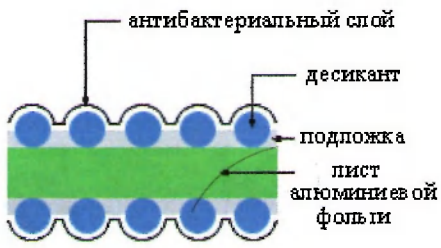


Рис.7.104. Способ размещения десиканта на поверхности листов (Seibu Giken DST).

Конструктивно насадка РН оформляется в виде ротора, который образуется простым скручиванием листов (рис.7.105а, при значительных размерах набирается сегментами) либо спеканием керамических блоков (рис.7.105б).

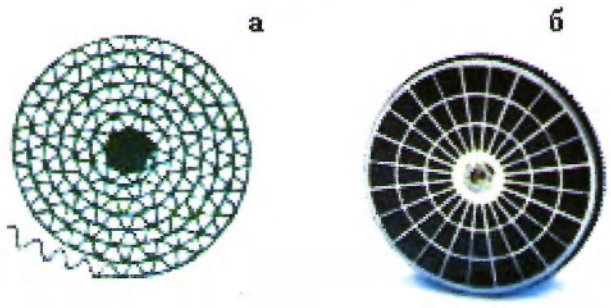
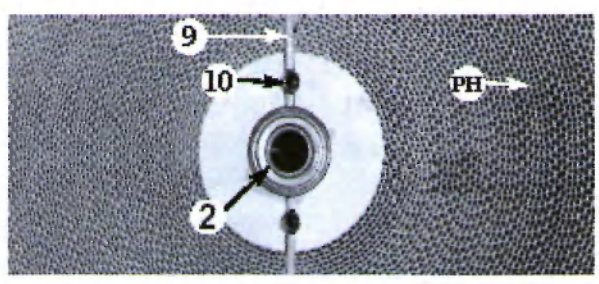


Рис.7.105. Матрица ротора: а – металлическая (РА), б – керамическая (РС).



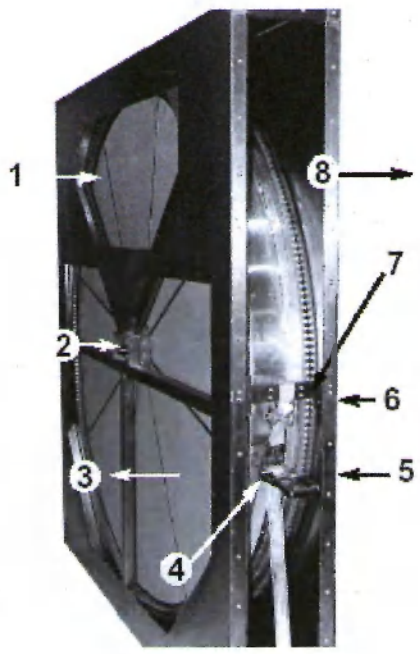


Рис.7.106. Конструкция ротора-осушителя Sorption wheel (NovelAire Technologies):

1 – вход вспомогательного потока (на реактивацию); 2 – местоположение вала и подшипника; 3 – выход осушенного воздуха; 4 – приводящий ремень; 5 – корпус с окнами для основного и вспомогательного потоков; 6 – вход основного потока (на осушение); 7 – стабилизатор движения; 8 – выход вспомогательного потока; 9 – спица колеса; 10 – фиксаторы; РН – регулярная насадка.

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

Для производительности по воздуху 600…332000 м^3/ч (при скорости потока до 3 м/с роторы выпускаются диаметром от 0,5 м до 4 м (рис.7.107). Толщина: 2, 4, 8 и 16 дюймов (50, 100, 200, 400 мм). Конструкции ротора и адсорбера приведены на рис.7.105…7.108.

Приведенный типоразмерный ряд является стандартом большинства компаний (номенклатура Seibu Giken шире: 0,1…6 м, – роторы SSCR-M (SSCR – Synthesized Silica Ceramic Rotor)).

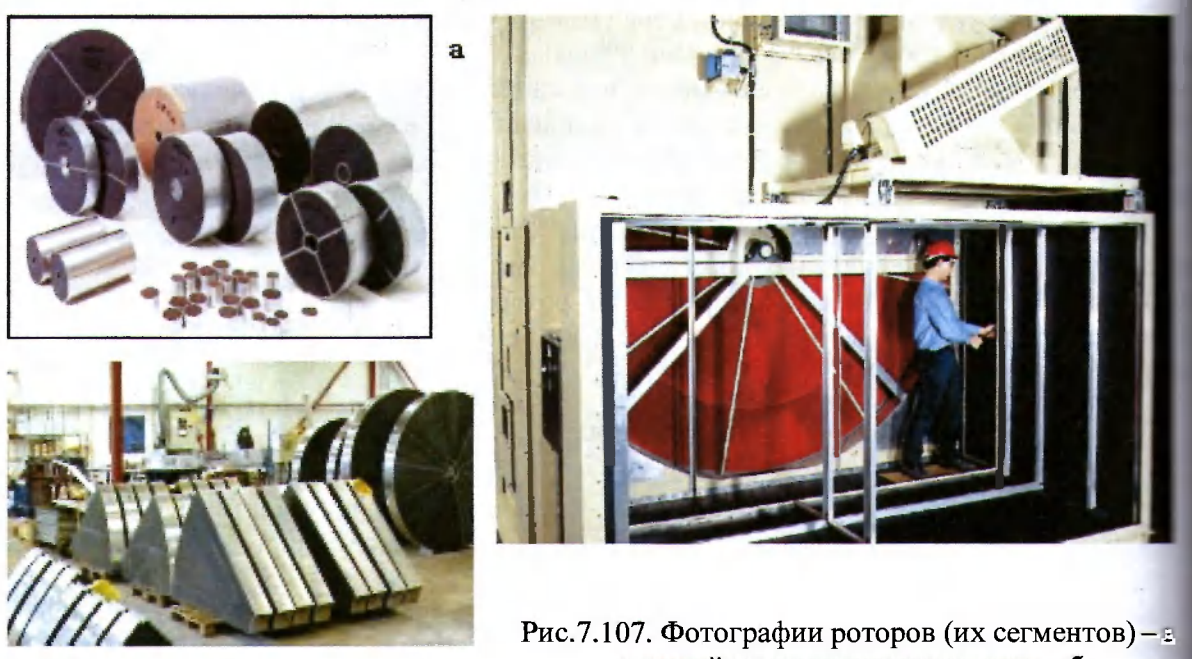


Рис.7.107. Фотографии роторов (их сегментов) – а и линейка типоразмерного ряда – б.

В процесс сорбции вовлечено примерно три четверти ротора, при этом ¼ часть реактивируется. Скорость вращения ротора n = 8…20 об/ч. Срок службы – 10…15 лет.

Основные фирмы-разработчики и изготовители "Honeyvent"– Munters, Seibu Giken DST AB, DehuTech, ProFlute AB, Bry-Air, NovelAire, HB Cotes A.S.

Производительность роторов-осушителей Munters по влаге 0,18…2000 кг/ч при удельной поверхности насадки 2500 м^2/м^3. Увеличением плотности насадки можно добиться большей производительности.

Рассмотренные роторы-осушители во многом имеют идентичные (унифицированные) конструктивные решения, заложенные также и в роторах-регенераторах – теплоутилизаторах (ТУ), см. раздел 11.4. Это касается, например, фиксации листов в насадочном слое, уплотнения ротора по периферийной окружности в квадратной матрице устройства, в разделительном секторе по потокам воздуха и др. Поскольку иллюстративный материал по этим узлам наиболее полно представлен для ТУ, постольку их описание приведено в соответствующем разделе. Поэтому настоятельно рекомендую составить общую картину конструктивных особенностей вращающихся роторных устройств по прочтению всех предоставленных Вашему вниманию материалов.

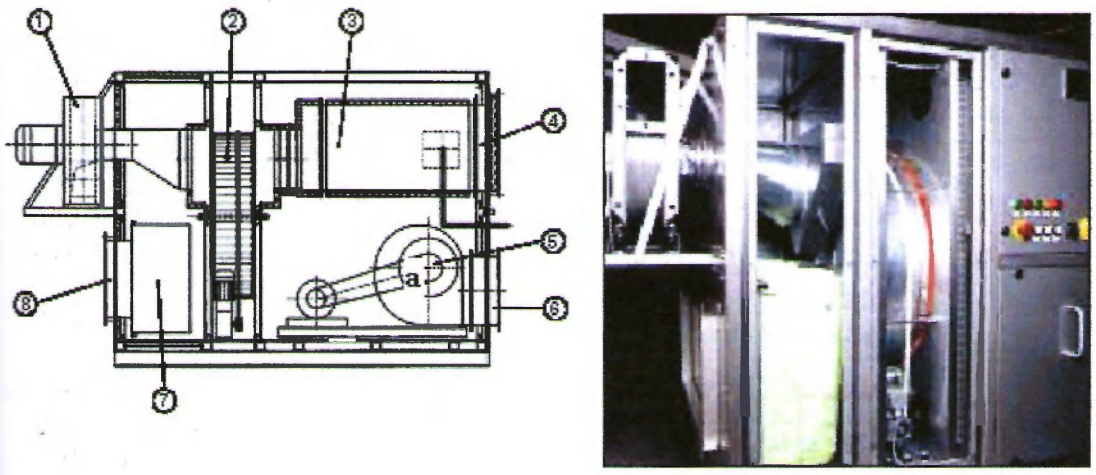


Рис.7.108. Конструкция установки Honeyvent (HB Cotes A.S):

1 – вентилятор вспомогательного потока; 2 – ротор; 3 – воздухонагреватель;
4 – вход вспомогательного потока; 5 – вентилятор основного потока;
6 – выход осушенного воздуха; 7 – фильтр; 8 – вход основного потока.

В d,h-диаграмме процесс осушения роторно-сорбентной технологии Honeyvent может быть определен по величине AHR (adsorption heat ratio):

$$AHR = (t_{2.ад.} - t_1) / (t_2 - t_1), \qquad (7.15)$$

где $t_{2.ад.}$ – условная конечная температура воздуха на выходе из ротора, определенная по линии h = const, t_1 и t_2 – реальные температуры начала и конца процесса.

Допущение равенства температур воздуха t_1 и сорбента $t_{адс}$ в начале адсорбции, принятое при определении луча процесса $\varepsilon_{адс}$ (7.12), выполняется только для "batch-type" технологии. В условиях непрерывно вращающегося ротора $t_{адс} > t_1$ (рис.7.109, 7.110), и поэтому теплота адсорбции приводит к отклонению луча процесса в сторону увеличения энтальпии воздуха (рис.7.111…7.115).

Режимные характеристики "Honeyvent" обусловливают протекание процесса при AHR ≈ 0,7 [276] (рис.7.111). Значение $\varepsilon_{1\text{-}2} \approx$ - 1000 кДж/кг, что не позволяет считать процесс в адсорбере изоэнтальпийным (AHR = 1).

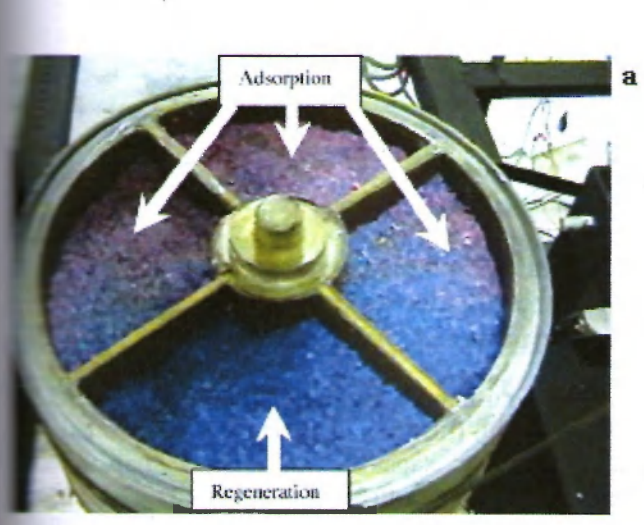


Рис.7.109. Фотография, иллюстрирующая изменение цвета силикагеля в адсорбционно-десорбционном цикле осушения воздуха (а) и термограмма ротора в рабочем режиме (б).

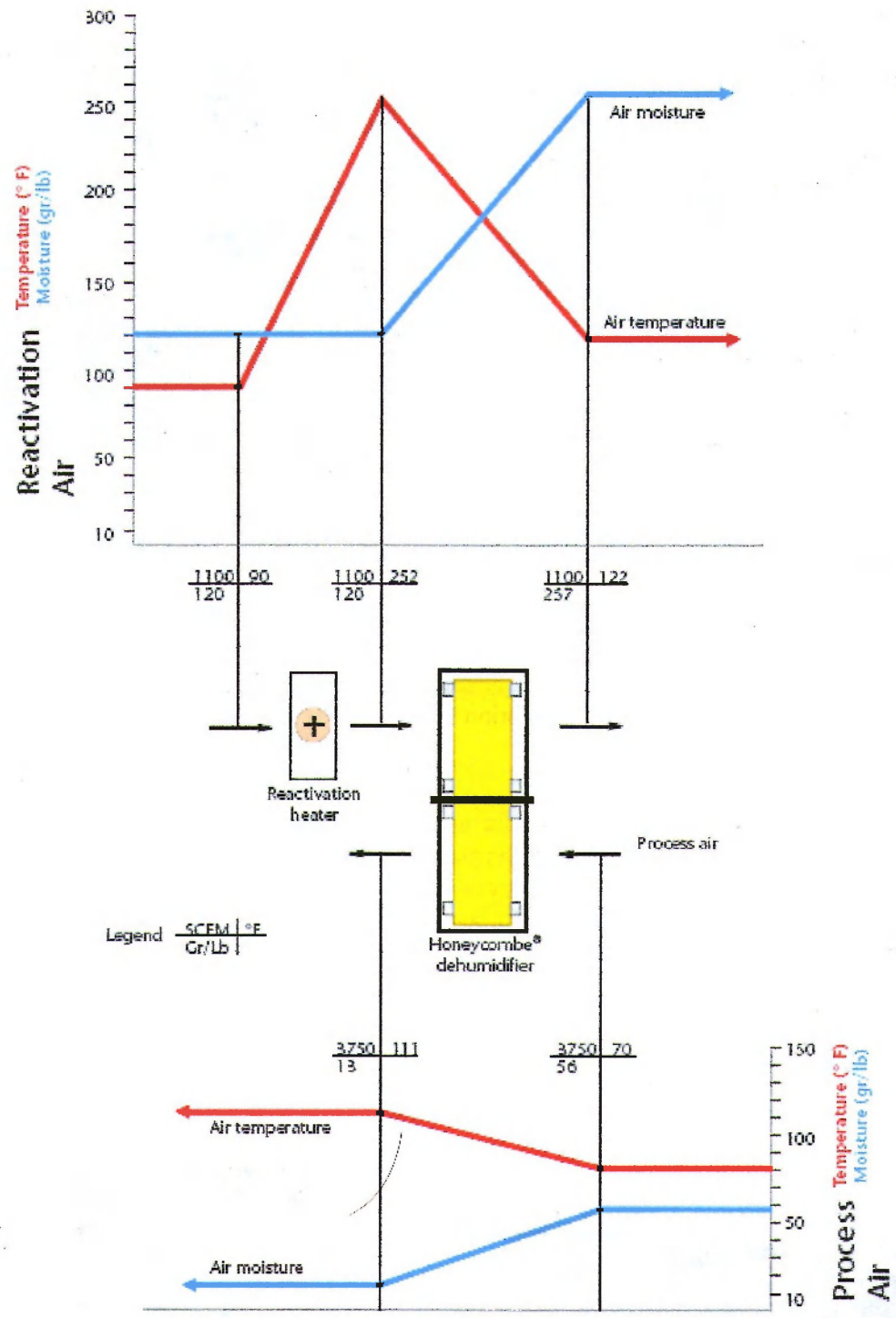


Рис.7.110. Типичное распределение* температур и влагосодержаний основного (process air) и вспомогательного (reactivation air) потоков воздуха во вращающемся роторе-осушителе [290].

*представлен оригинальный рисунок из справочника компании Мунтерс [290] с данными в американских единицах измерения величин (t [^{0}F], d [gr/lb], [SCFM]), поскольку в данном случае преследовалась цель продемонстрировать качественный характер изменения параметров воздушных потоков в роторе. При желании оценить приведенные численные значения в единицах системы СИ это несложно сделать самостоятельно…

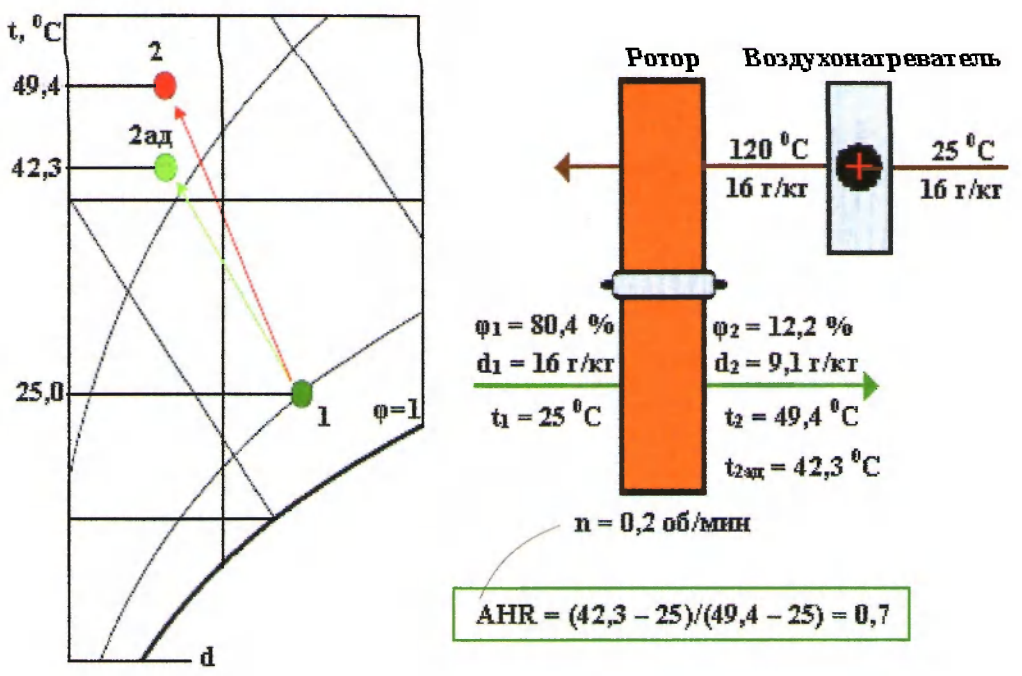


Рис.7.111. Линия процесса осушения воздуха
в роторном аппарате “Honeyvent” в d,h-диаграмме: 1-2.

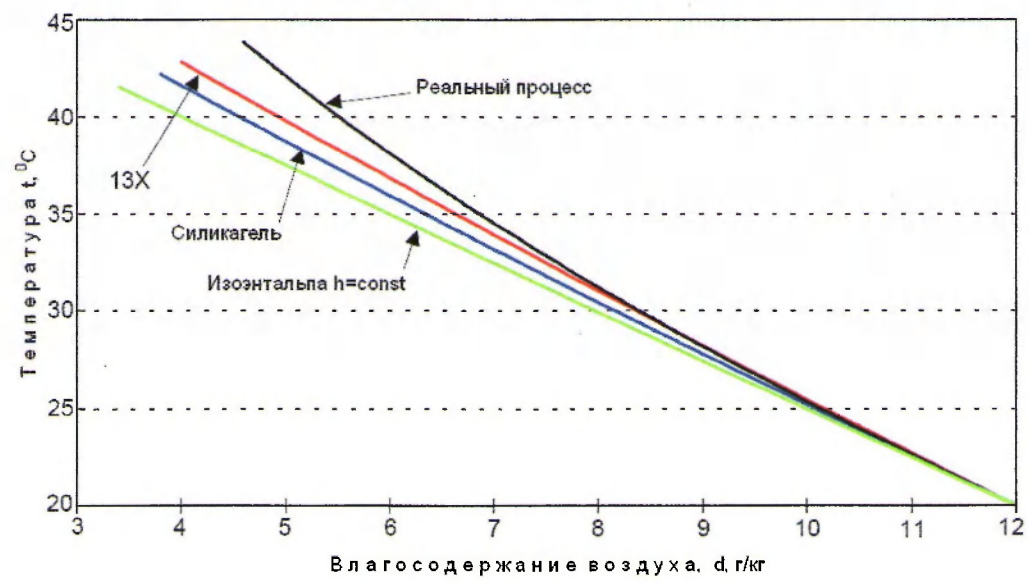


Рис.7.112. Отклонение процесса адсорбции влаги от изоэнтальпы в расчетном
(для силикагеля и цеолита 13X) и реальном режиме работы ротора-осушителя [164].

Существенное влияние на процесс осушения оказывают скорость вращения ротора n и температура регенерации $t_{рег}$. С увеличением n и $t_{рег}$ линия процесса в d,h- диаграмме отклоняется от изоэнтальпы ($\varepsilon = 0$) в сторону больших значений энтальпии выходящего воздуха при тепловлажностном отношении $\varepsilon < 0$ (рис.7.113, 7.114).

На рис.7.113, 7.114 приведены линии процесса осушения воздуха в роторах, использующих силикагель, титаносиликагель и материал FAM-Z2, при изменении температуры регенерации. При значениях $t_{рег} \leq 60$ °C функционализированный сорбент FAM-Z2 дает лучшее приближение процесса к изоэнтальпийному.

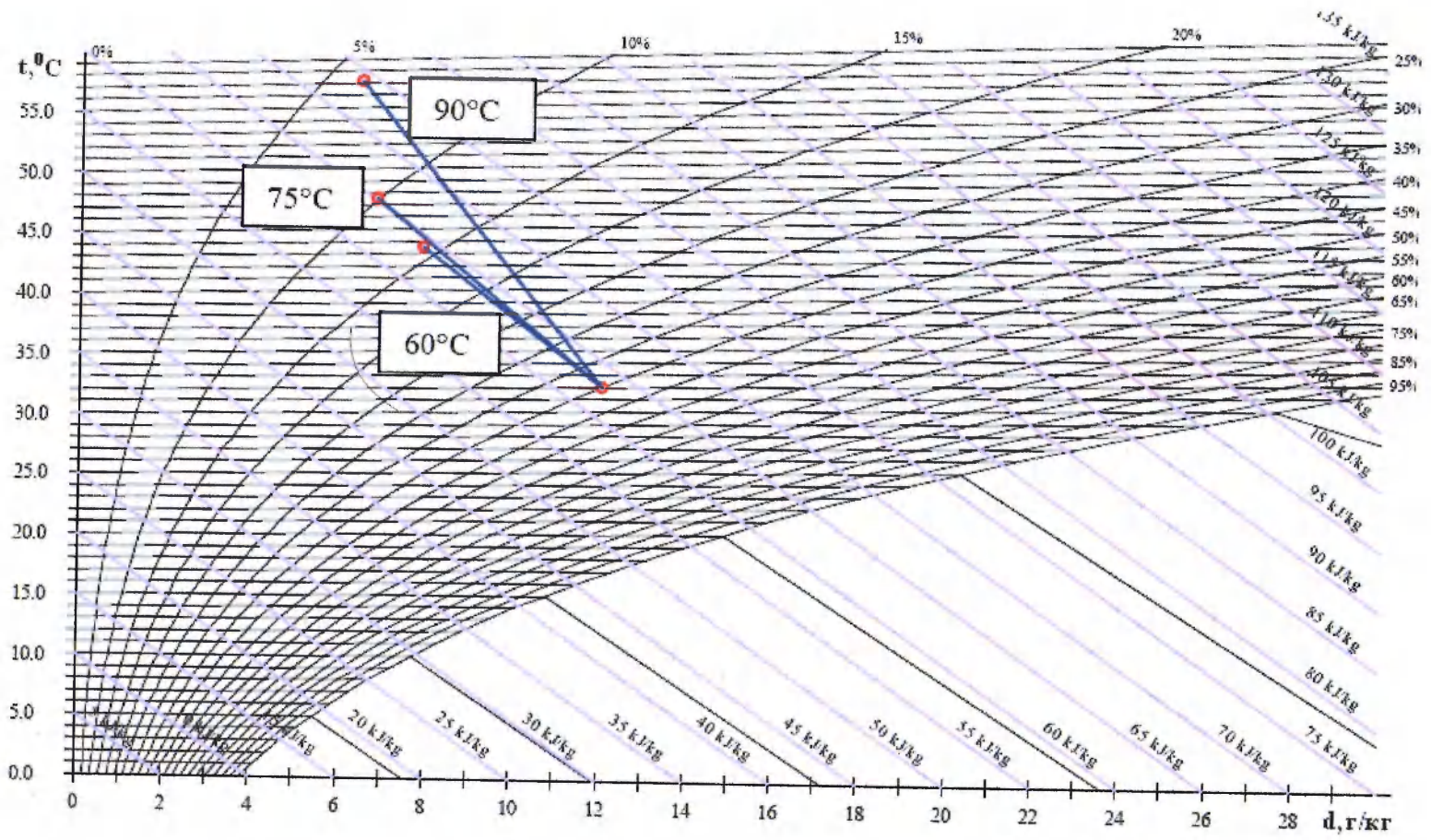


Рис.7.113. Положение в d̄,h̄- диаграмме линии процесса осушения, осуществляемого в керамическом роторе со слоем десиканта ETS (Titanium Silicate) при различных t_{per} [162].

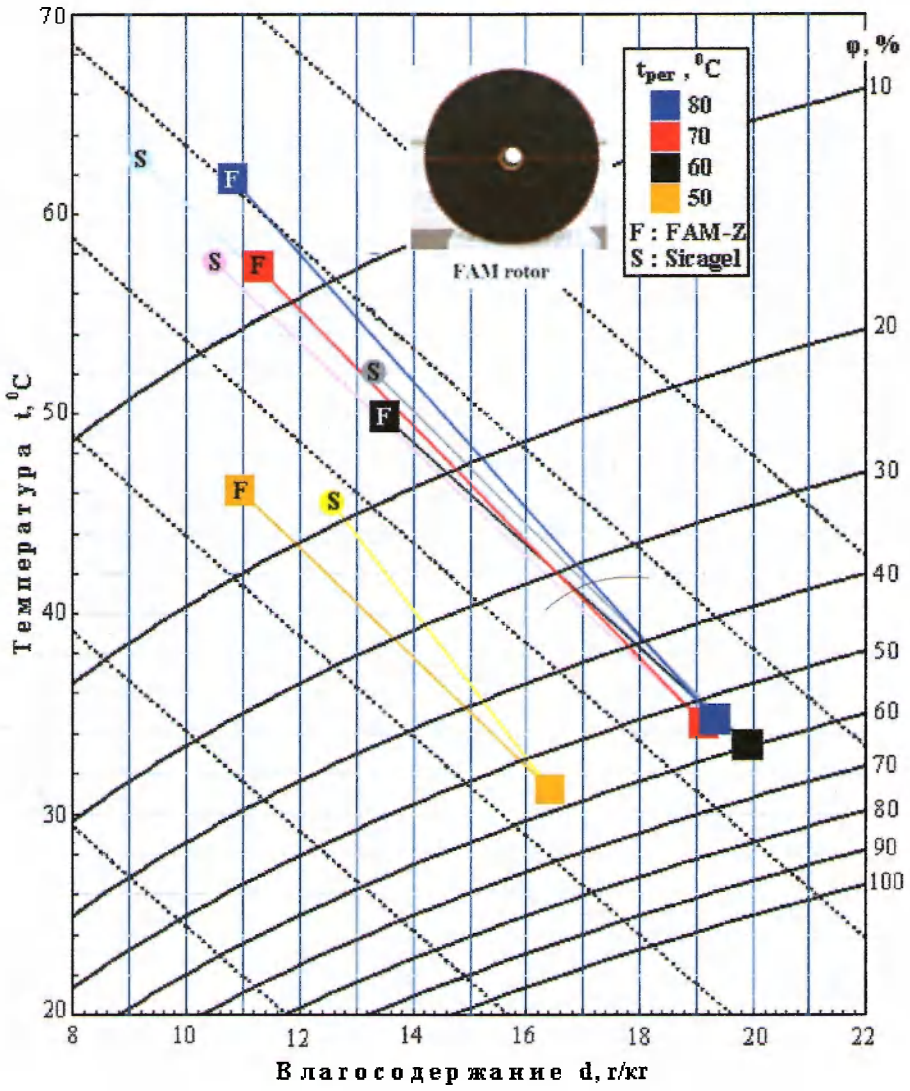


Рис.7.114. Положение в d,h- диаграмме линии процесса осушения, осуществляемого в силикагелиевом и FAM-Z роторах Honeyvent при различных n (а) и t_{per} (б).

Скорость вращения ротора является [illegible]правляющим воздействием. Указанные выше значения n = 8…20 об/ч (0,1..0,3 об/мин) [illegible]твечают номинальной производительности [illegible]. адсорбционных осушителей. Увеличением n > 0,3 об/мин достигается уменьшение величины G_w (рис.7.115).

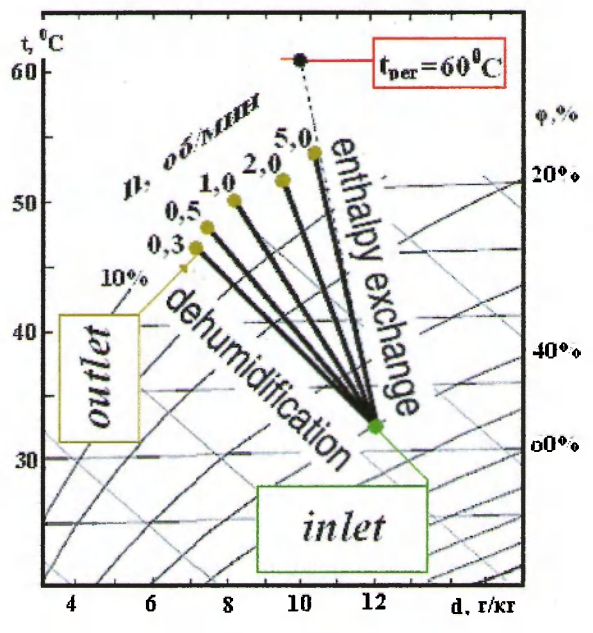
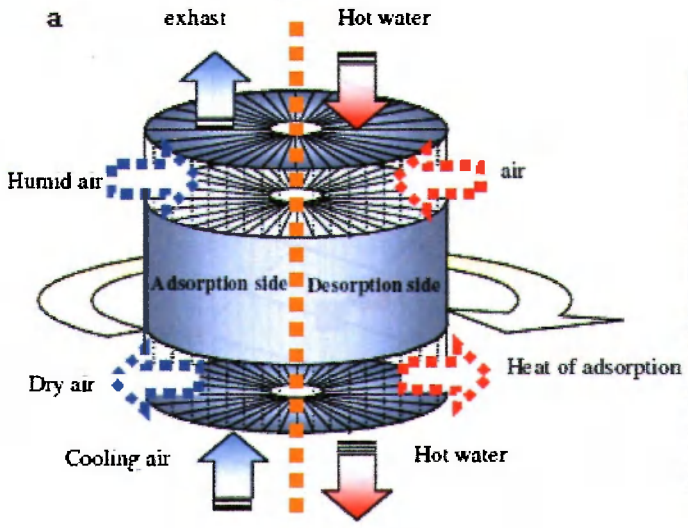


Рис.7.115. Влияние скорости вращения адсорбционного ротора n на процесс осушения.

Рабочие характеристики роторов-осушителей, [illegible]олненных на основе целлюлозы с [illegible]исталлическим LiCl (Klingenburg), а также [illegible]амических роторов со слоем ETS (Titanium [illegible]cate. Munters) приведены в работе [162].

Значительно большими возможностями управления процессом осушения обладает многоходовой сотовый ротор (multi-pass honeycomb rotary adsorber), разработанный в Каназавском университете (Япония, проф. Акио Кодама) [114, 115]. Это устройство представляет собой горизонтальный цилиндрический ротор с регулярной адсорбционной насадкой, пронизанный по высоте алюминиевыми галетами. Галеты разбивают ротор на секторы и выступают сверху и снизу на определенное расстояние, необходимое для прохода основного воздушного потока, идущего на осушения. В галеты – щелевые каналы подается горячая вода (либо воздух) на стороне десорбции (регенерации) и холодный воздух на стороне сорбции влаги из основного потока воздуха, проходящего через насадку (рис.7.116, 7.117).



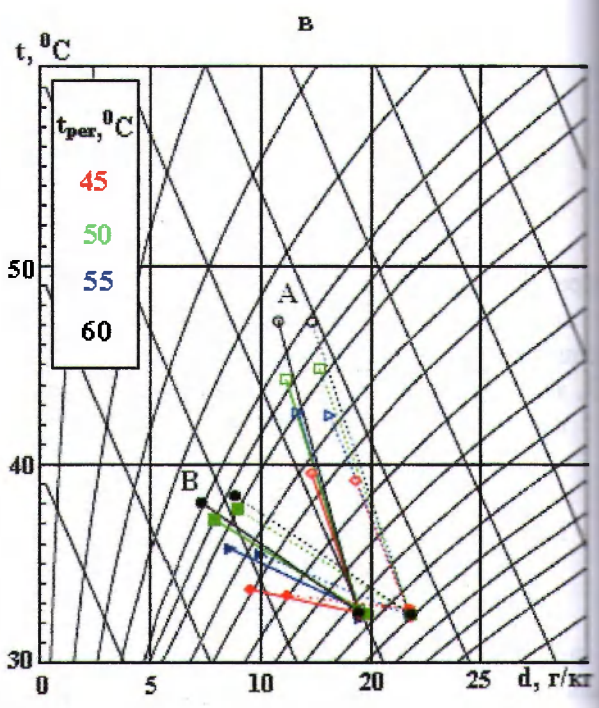
б



Такой многоступенчатый отвод теплоты адсорбции (подвод теплоты регенерации) позволяет осуществлять процесс осушения с понижением энтальпии осушенного воздуха, т.е. с положительным значением $\varepsilon > 0$. Причем, при $t_{per} = 50$ °C возможен полуизотермический процесс (линия процесса занимает промежуточное положение между изоэнтальпой и изотермой, рис.7.116в), при $t_{per} = 45$ °C (FAM ротор) – практически изотермический процесс осушения.

Рис.7.116. Схема многоходового ротора (а), фотография элемента (б), d,h- диаграмма с линиями процессов осушения в обычном (А) и многоходовом роторе (В) при различных значениях температуры регенерации (в).

в



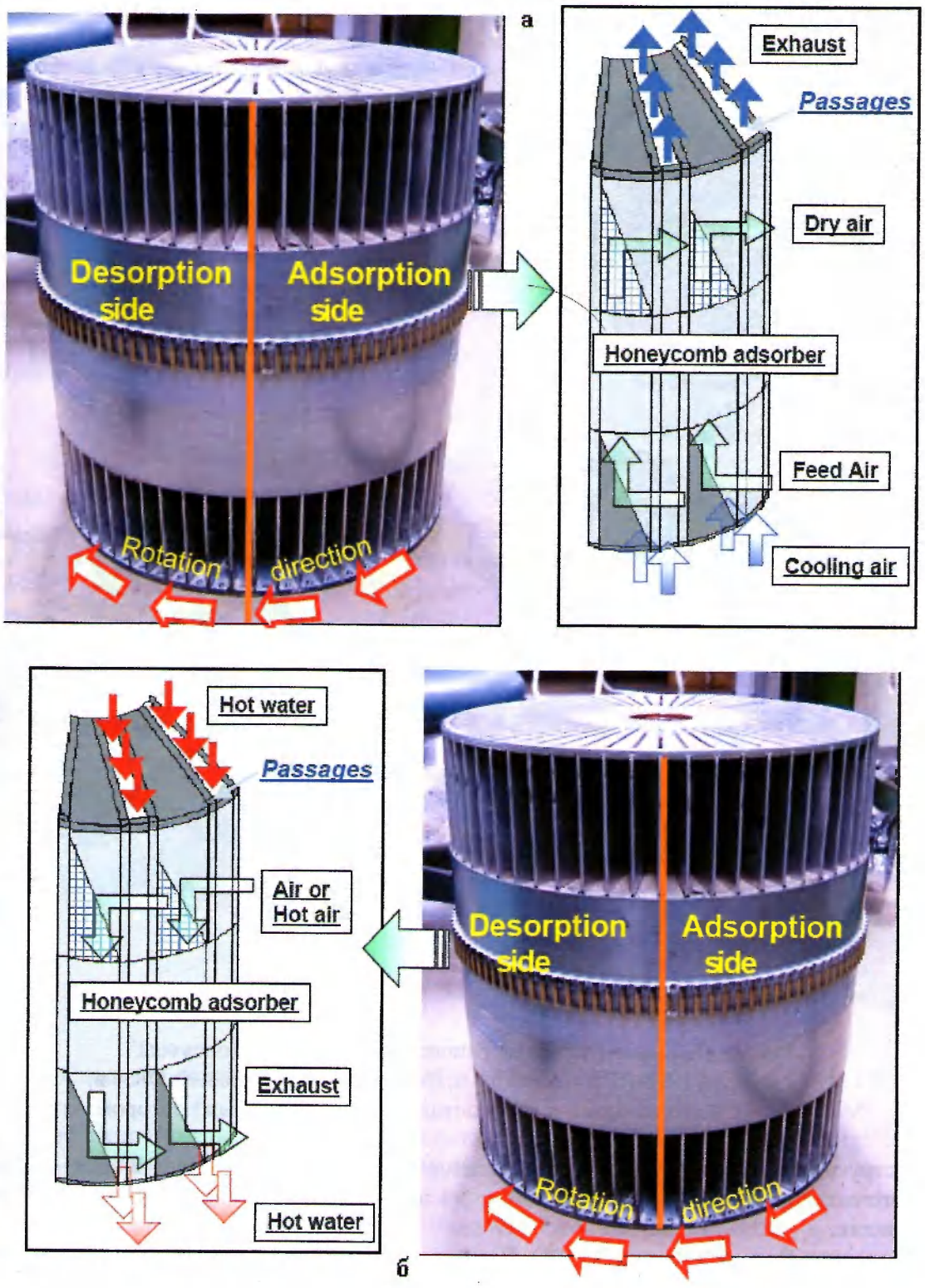


Рис.7.117. Фотографии и схемы организации потоков воздуха (основного и вспомогательного) и воды на стороне сорбции (а) и десорбции (б).

7.2.5.2.1. СХЕМЫ РОТОРНО-СОРБЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

На рис.7.118, 7.119 показаны различные схемы роторно-сорбентной технологии на баз аппаратов“Honeyvent”.

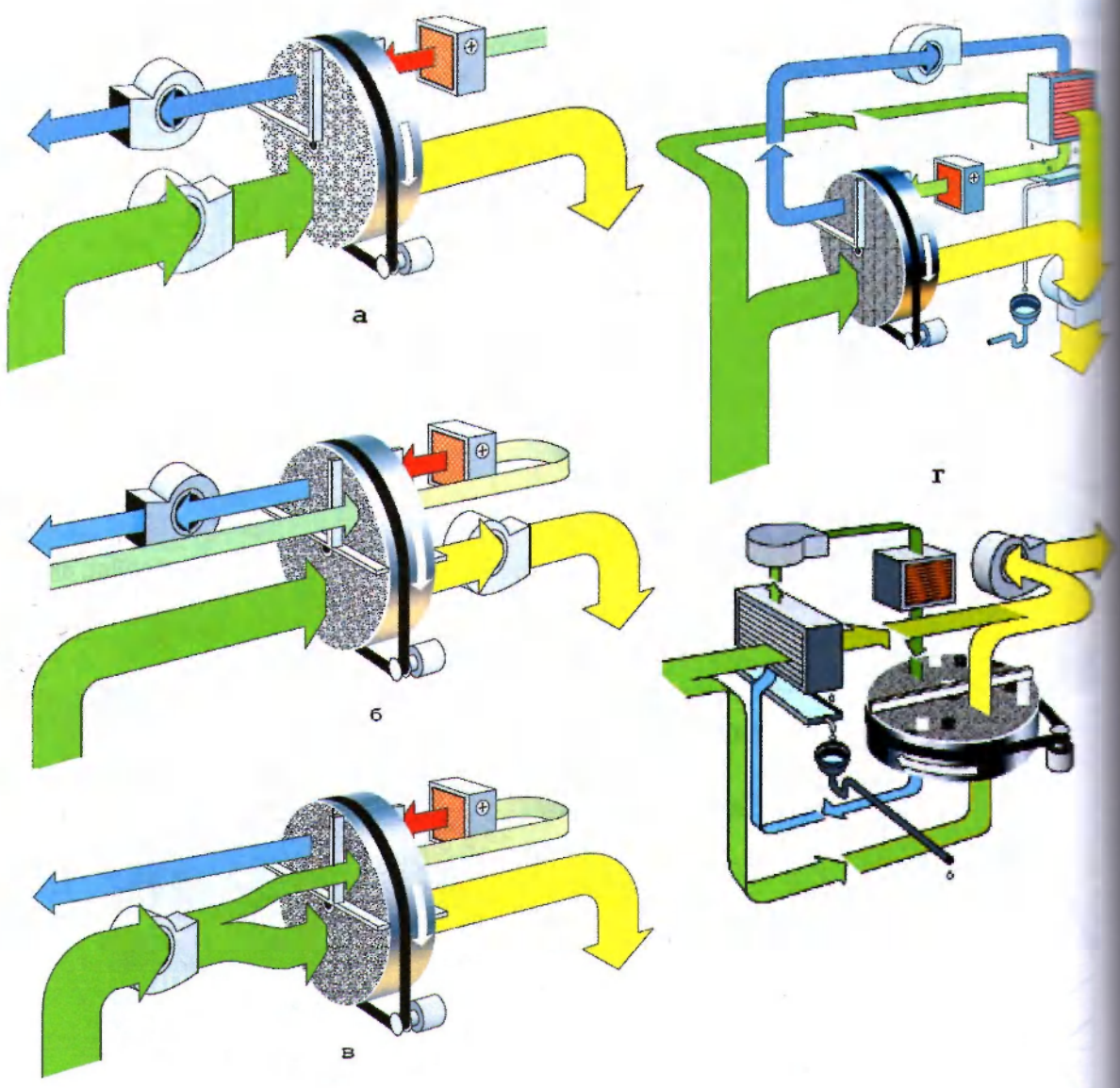


Рис.7.118. Конструктивные решения адсорберов “Honeyvent”
(Seibu Giken DST AB): Consorb – а; Recusorb R – б; Recusorb DR – в;
"Aquasorb" с вертикальным и горизонтальным (карусельным) ротором – г.

Конструкция Consorb (рис.7.118а) является базовой и применяется для осушения влажного воздуха в состоянии, близком к насыщению, и, при невысоких температурах регенерации.

В вариантах Recusorb R (рис.7.118б), Recusorb DR (рис.7.118в) достигается более низкая температура точки росы осушенного воздуха за счет выделения специального сектора (на рисунке – правая верхняя 1/4 часть ротора). Этот сектор выполняет функцию охладителя десиканта перед основным процессом осушения, а также, выступает в качестве предварительного теплообменника-регенератора, что позволяет уменьшить затраты энергии на реактивацию ротора. Адсорбер Recusorb R – двухвентиляторный, а Recusorb DR – одновентиляторный, – используется в мобильных установках.

Схема Aquasorb (рис.7.118г) разработана для адсорберов стационарного и мобильного исполнения, применяемых в случаях, когда затруднен (или невозможен) выброс влажного воздуха из осушаемого помещения. Линия реактивации построена в виде замкнутого воздушного кольца. Адсорбированная в основном секторе ротора влага передается в процессе десорбции вспомогательному потоку воздуха, а затем конденсируется в воздушном теплообменнике и отводится в специальную емкость.

Компания Munters запантентовала вариант ротора-осушителя PowerPurge™ (рис.7.119), в котором участок реактивации имеет смежные секторы (до и после участка), через которые пропускается рециркуляционный воздушный поток. Этот контур выполняет те же задачи, что специальный сектор ротора Recusorb, а именно: теплоутилизацию и предварительное охлаждение.

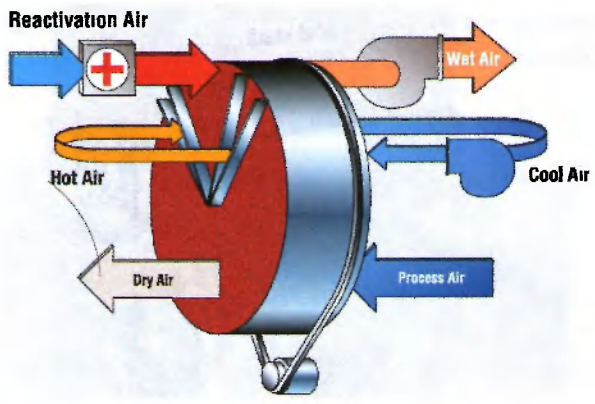


Рис.7.119. Ротор-осушитель PowerPurge™ (Munters).

Стоимость установок роторно-сорбентной технологии выше на 10 %, чем установок DX, однако энергетические затраты ниже на 20 %.

В ряде случаев, особенно при кондиционировании воздуха, энергетически выгодно применение комбинированных схем DX-Honeyvent, например, “Econosorb” или “Frigosorb” (“Coolsorb”) (рис.7.120).

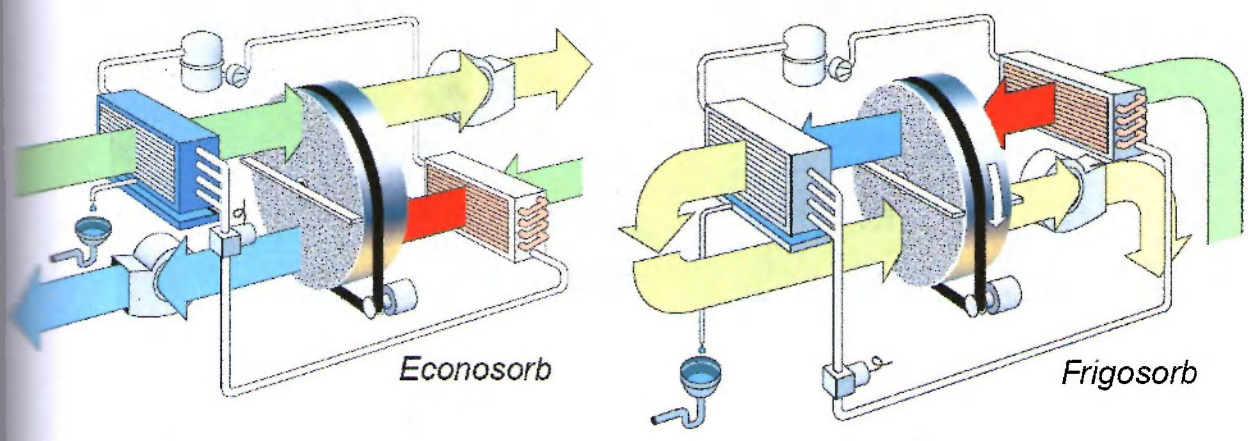


Рис.7.120. Схемы осушительных установок “Econosorb” и “Frigosorb” (Seibu Giken DST AB).

По схеме Econosorb воздух последовательно проходит две ступени осушения: сначала испаритель холодильной машины ХМ, а затем ротор с десикантом. При этом воздух на выходе имеет примерно ту же температуру, что и на входе установки. Процесс десорбции обеспечивается за счет нагревания вспомогательного потока воздуха в воздушном конденсаторе ХМ.

Схема Frigosorb разработана (аналогично Aquasorb) для объектов, из которых затруднен отвод влажного воздуха. Поскольку холодильная машина здесь работает в режиме теплового насоса, данная схема более энергоэффективна.

Энергозатраты установок Econosorb (Frigosorb) при $t = 20$ °C и $\varphi = 60$ % составляют: 50 (60) % от “DX” либо 25 (33) % от “Honeyvent”. Данные комбинированные схемы обеспечивают осушение воздуха на уровне $\tau = -10$ °C.



а б в г

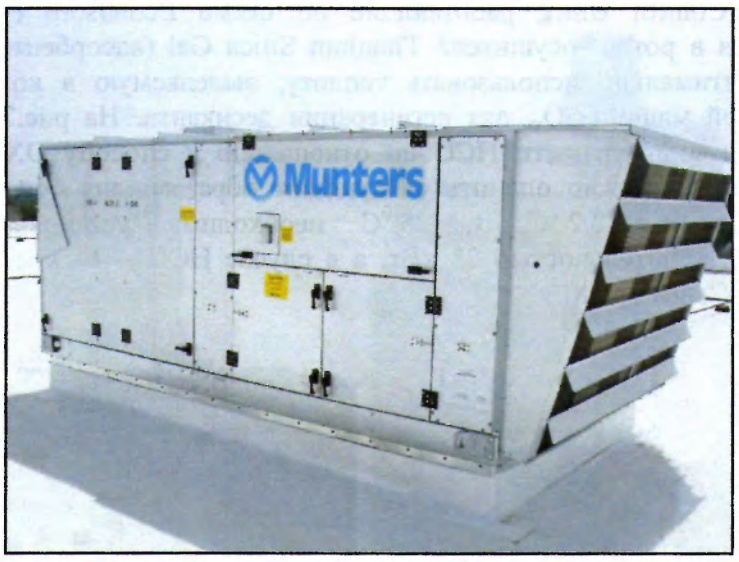
Рис. 7.121. Некоторые модели осушителей Seibu Giken DST AB*:
Recusorb R-061(1450 м^3/ч, 10 кг/ч) – а; Recusorb R-060BR (1000 м^3/ч, 4,6 кг/ч) – б;
Conscrb DC-031B (300 м^3/ч, 1,4 кг/ч) – в; Recusorb DR-010B (190 м^3/ч, 0,5 кг/ч) – г.

* здесь в круглых скобках указаны производительности по воздуху (м^3/ч)
и по влаге (кг/ч) при $t_{вх}$ = 20 °С и $\varphi_{вх}$ = 60 %

Компания Munters производит агрегатированные установки воздухоподготовки серии HCU (Humidity Control Unit), работающие по схеме Econosorb (рис.7.122, 7.123). За счет применения в роторе-осушителе Titanium Silica Gel (адсорбент класса MPS, см. § 7.2.4.3) удалось оптимально использовать теплоту, выделяемую в конденсаторе и компрессоре холодильной машины Q_1, для регенерации десиканта. На рис.7.124 показано сокращение холодопроизводительности HCU по отношению к способу DX ($\Delta Q_0 = Q_{1,}$). В численном выражении это можно оценить следующим образом: для обработки 1700 м^3/ч воздуха с параметрами $t_c = 32{,}2$ °C, $t_м = 25\ ^0$C необходима установка DX с компрессором холодопроизводительностью 23 кВт, а в случае HCU – 14 кВт. Величина COP установок HCU на 65 % выше DX.



Рис.7.122. Установка HCU-6000:
1 – вход основного потока; 2 – воздухоохладитель; 3 – ротор-осушитель; 4 – выход основного потока; 5 – компрессоры; 6 – конденсатор; 7 – вентиляторы конденсатора; 8 – вентилятор линии реактивации; 9 – вспомогательный поток.



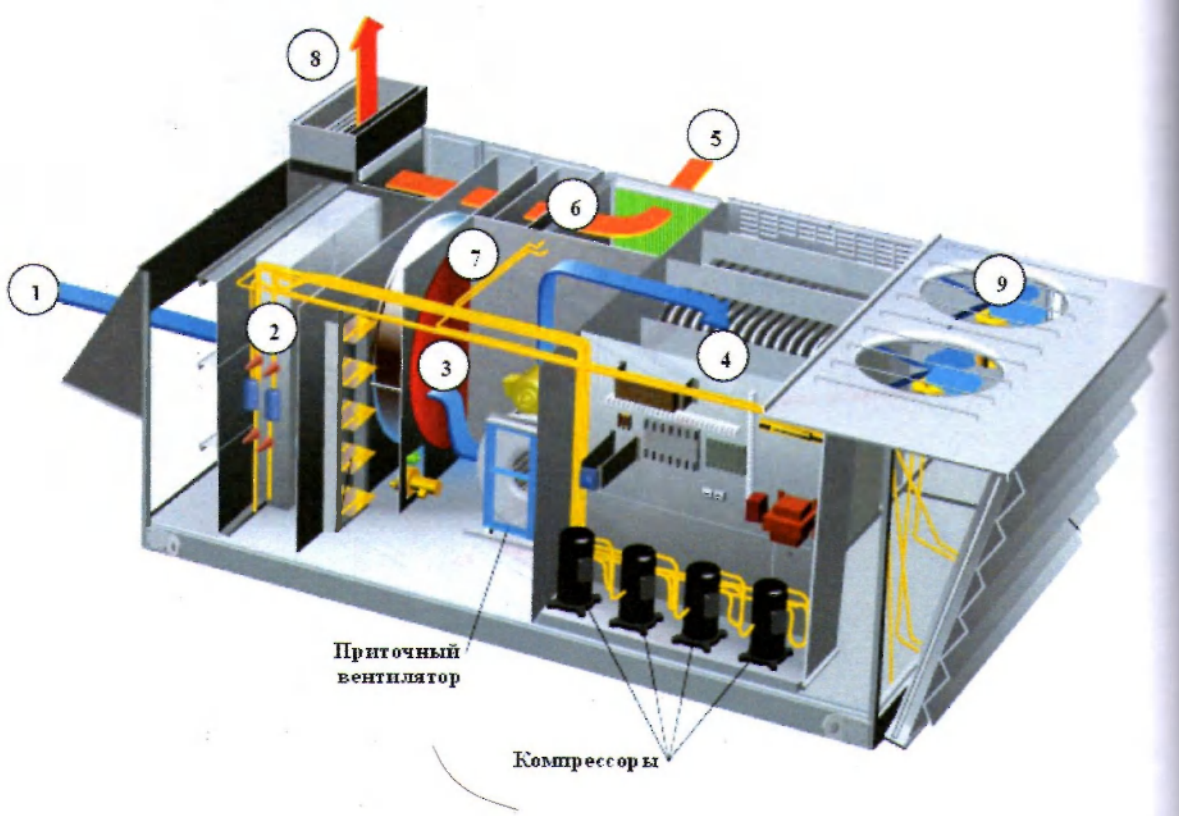


Рис.7.123. Установка HCU-16000:
1 – вход основного потока; 2 – воздухоохладитель; 3 – ротор-осушитель;
4 – выход основного потока; 5 – вспомогательный поток; 6 – теплообменник;
7 – фильтр; 8 – вентилятор вспомогательного потока; 9 – воздушный конденсатор.

Воздухопроизводительность установок HCU: 1000…16000 cfm (1700…27000 м^3/ч).

Номинальная скорость вращения ротора-осушителя 8 об/ч. В холодильной машине HCU использованы спиральные компрессоры, работающие на R410A.

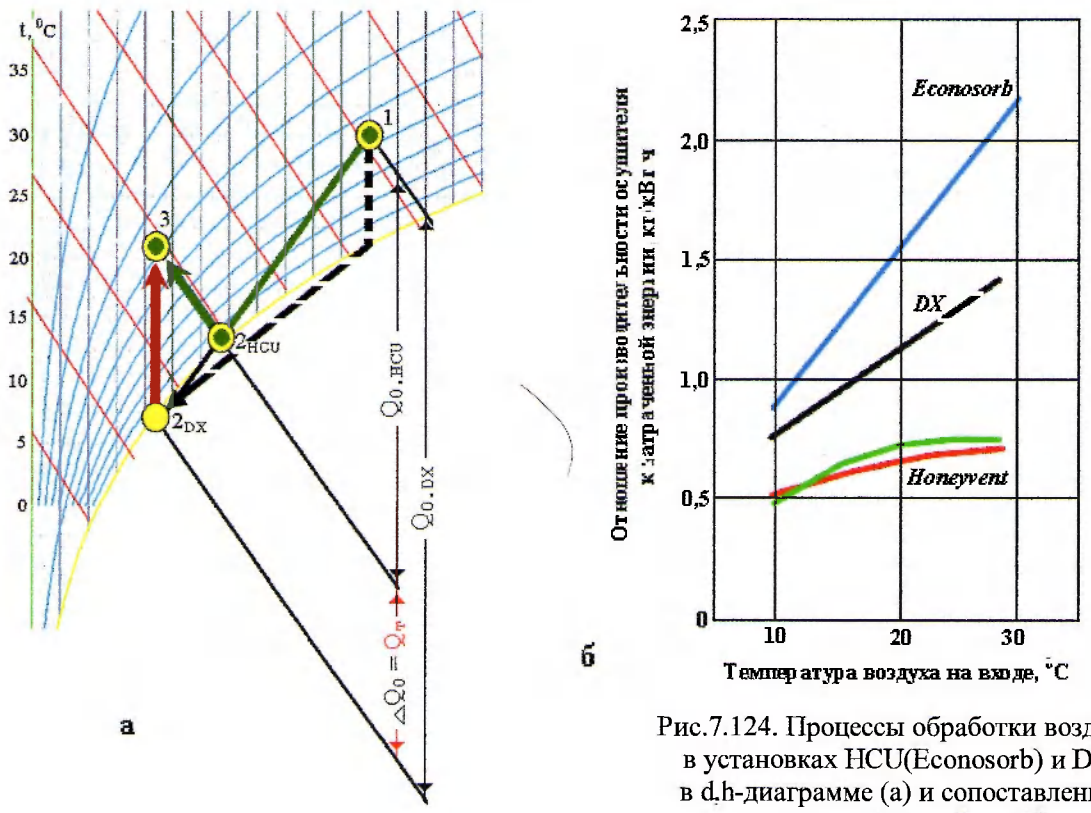


Рис.7.124. Процессы обработки воздуха в установках HCU(Econosorb) и DX в d,h-диаграмме (а) и сопоставление показателей их работы (б).

На рис.7.125, в качестве примера, приведена номограмма (для схемы Frigosorb) со значениями корректирующего фактора К, выложенная в d,h-диаграмме влажного воздуха. С помощью таких номограмм, разработанных для каждой схемы установок осушения компании Seibu Giken DST AB (приведены в соответствующих каталогах), можно легко определить значение температуры осушенного воздуха. Корректирующий фактор (поправочный коэффициент) К=1 при $t_{вх}$ = 20 °С и $\varphi_{вх}$ = 60 %.

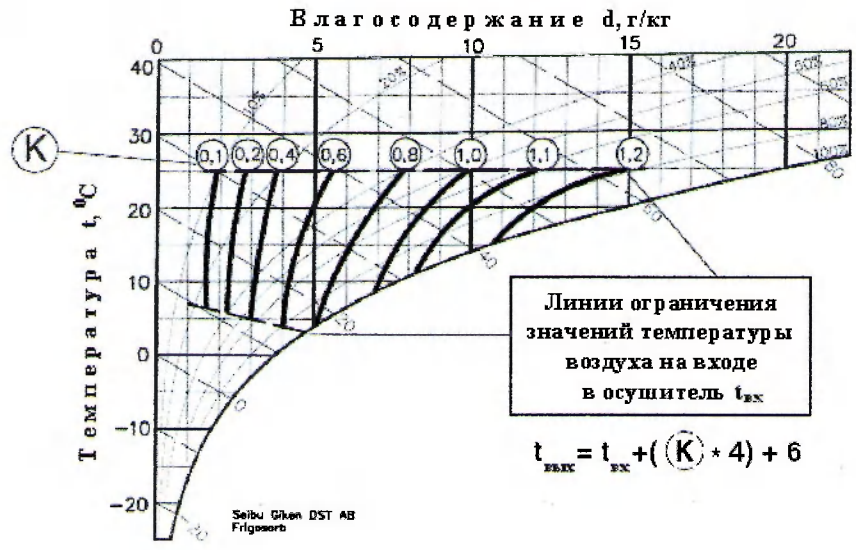
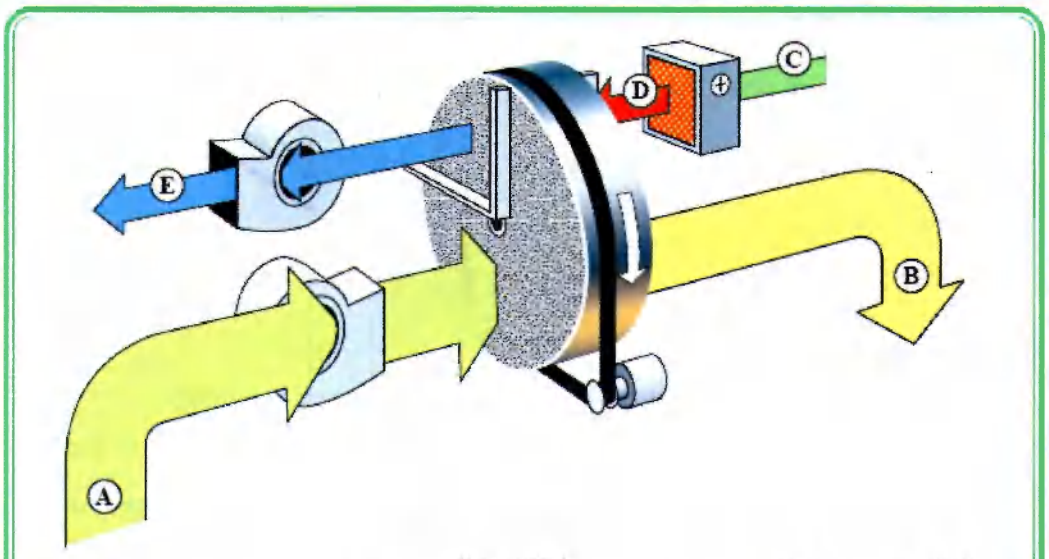


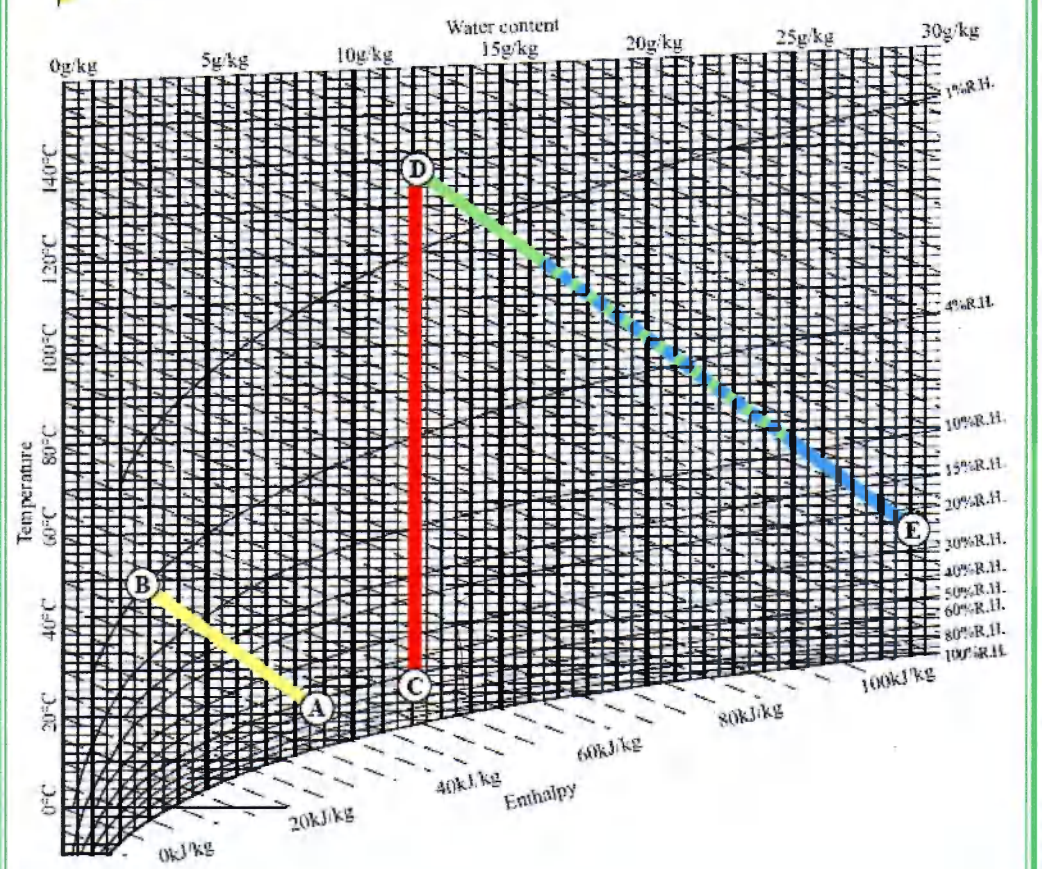
Рис.7.125. Номограмма для расчета процесса осушения воздуха в установке Frigosorb.

Ниже, на вкладке (с. 278…283), даны оригинальные материалы Seibu Giken DST AB по всем схемам осушения, совмещенные с интепретацией процессов в d,h- диаграмме. На рис.7.125 представлено сопоставление комбинированных роторно-сорбентных установок осушения и механического осушителя.

CONSORB

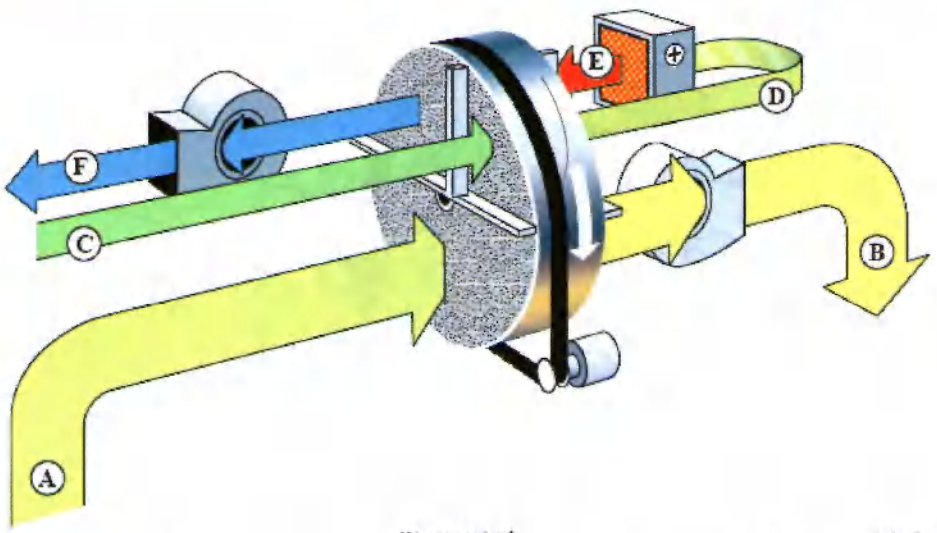
DST Seibu Giken

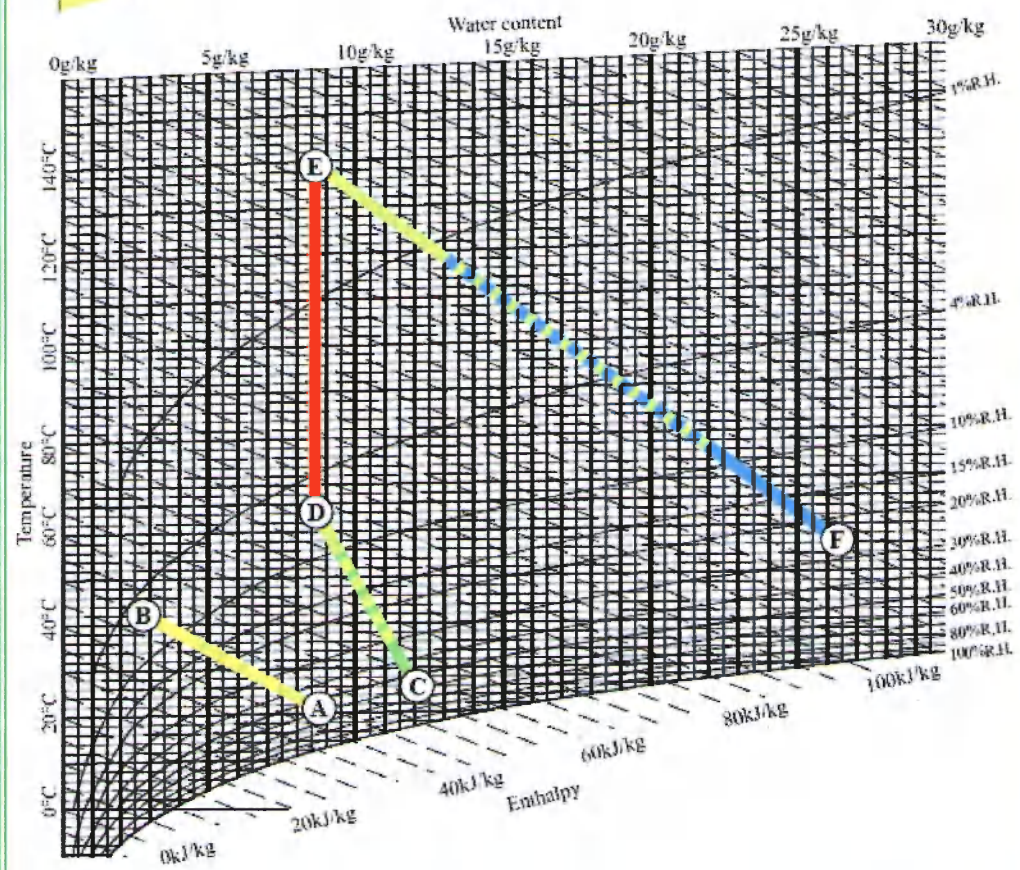




RECUSORB R

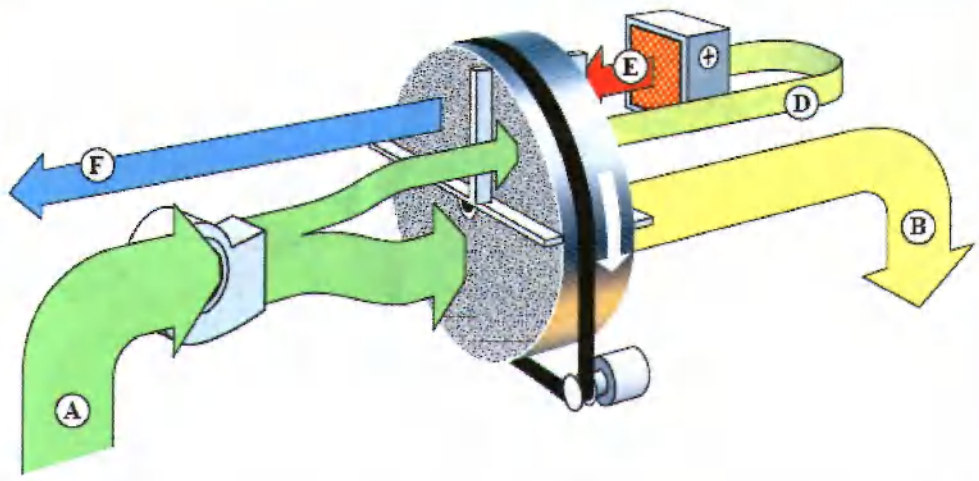
DST Seibu Giken

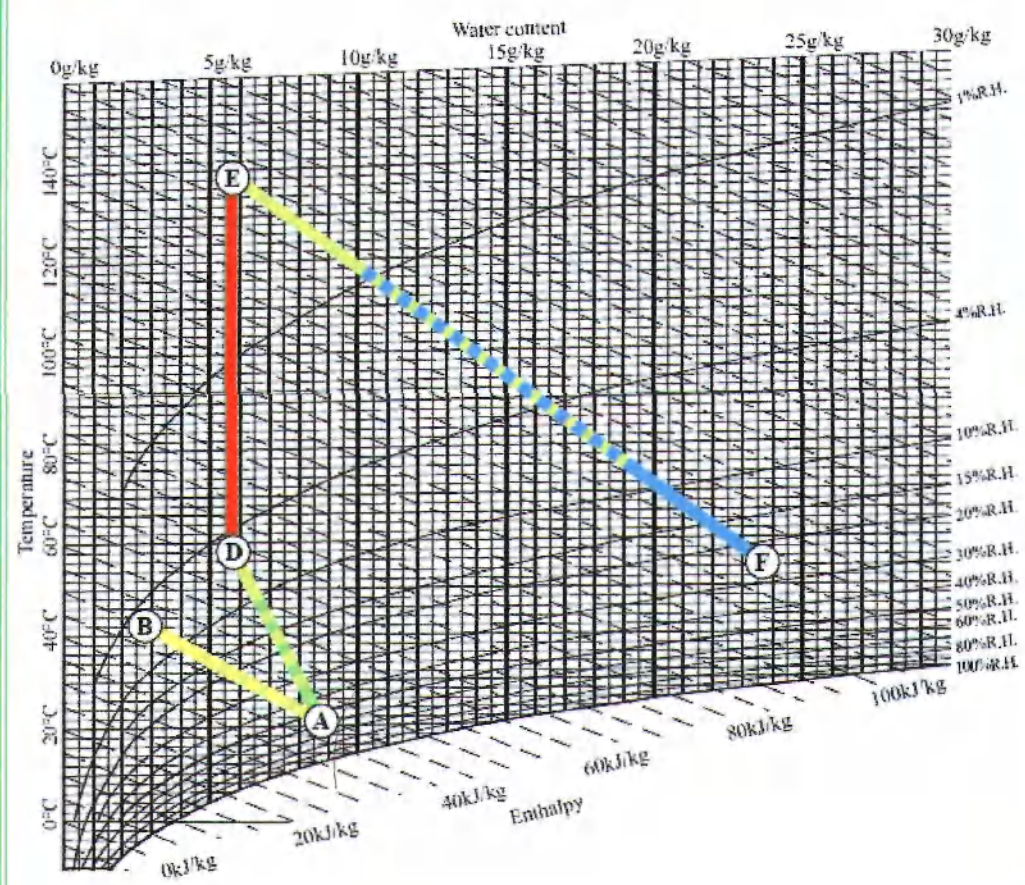




RECUSORB DR

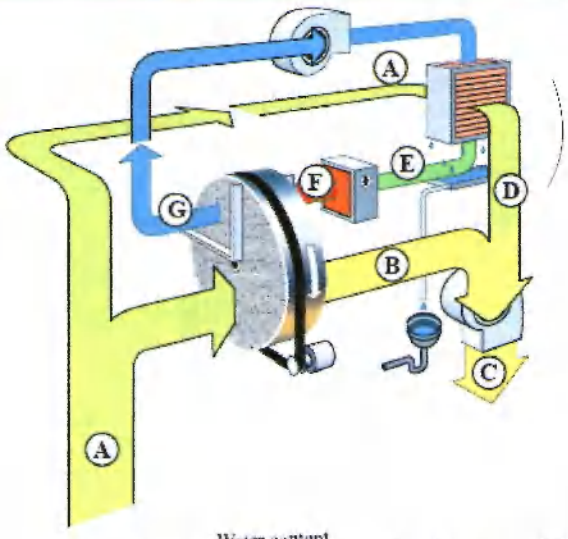
DST Seibu Giken

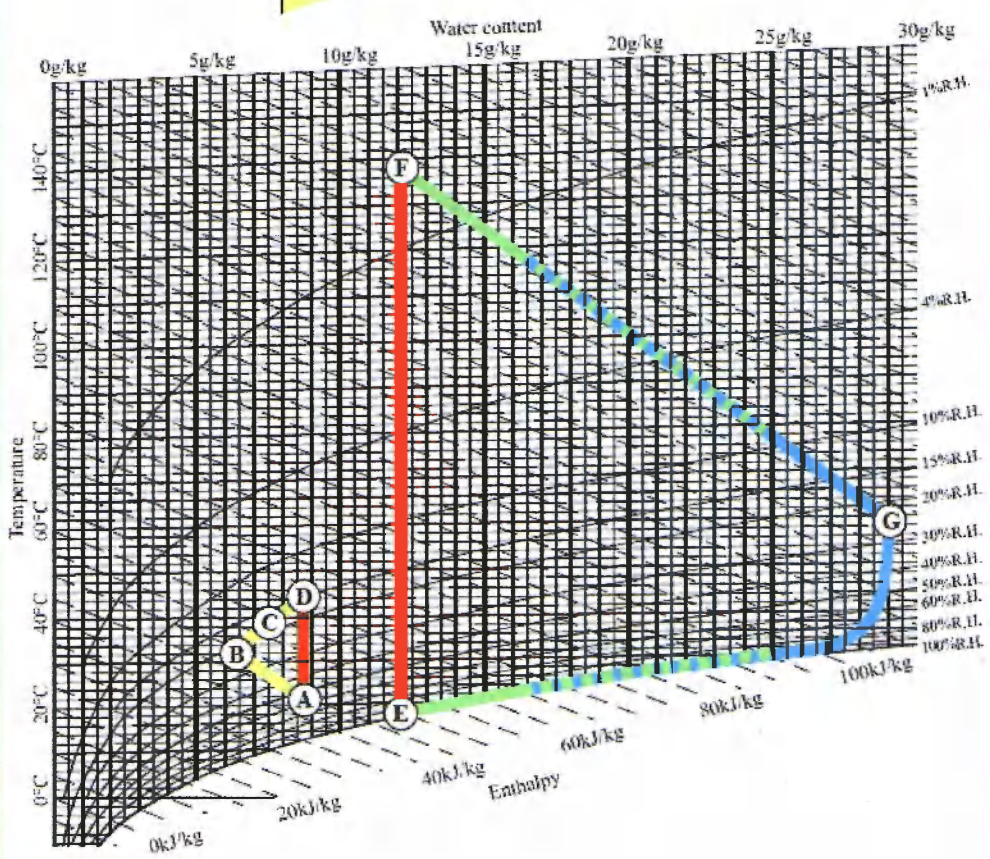




AQUASORB

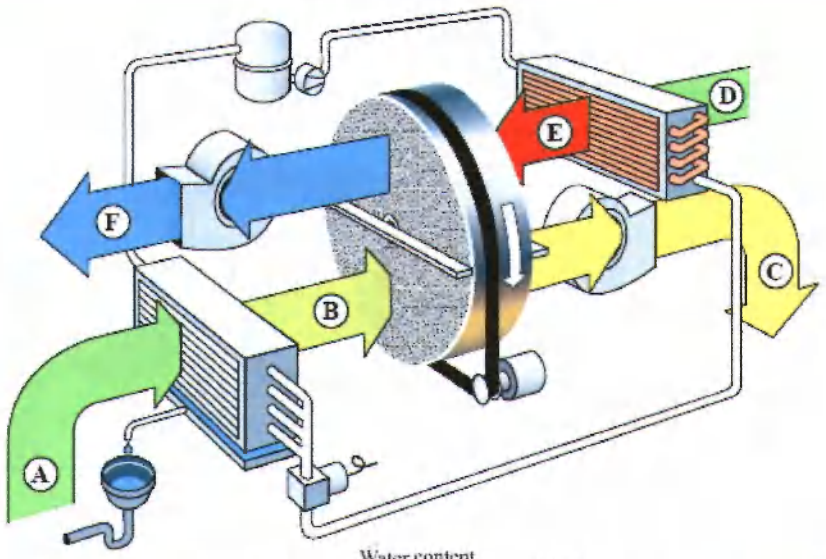
DST Seibu Giken

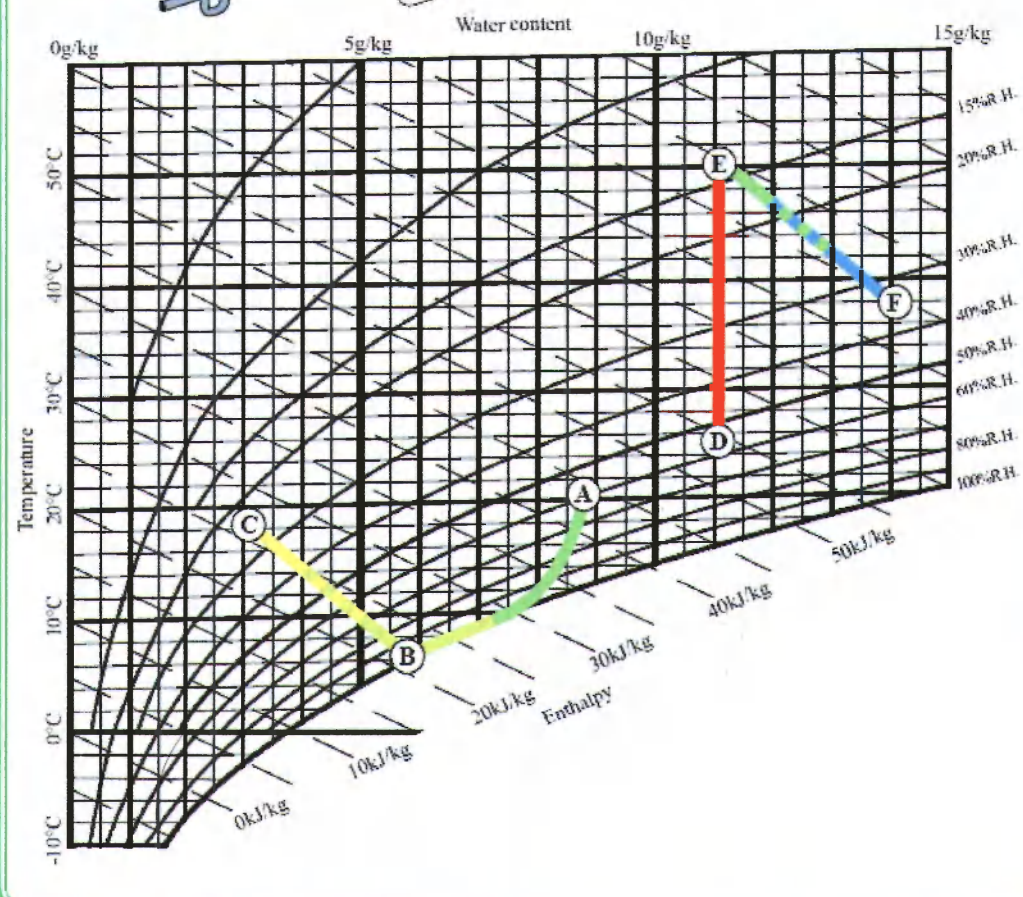




ECONOSORB

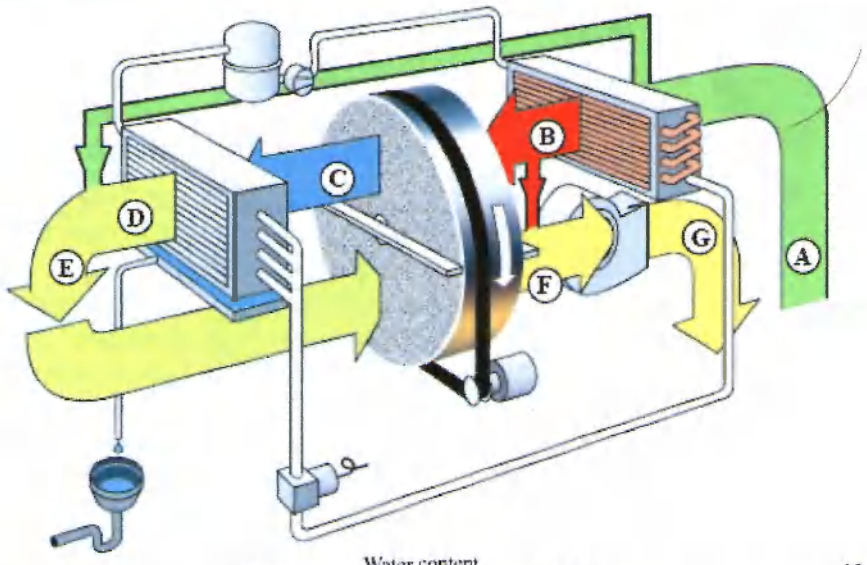
DST Seibu Giken

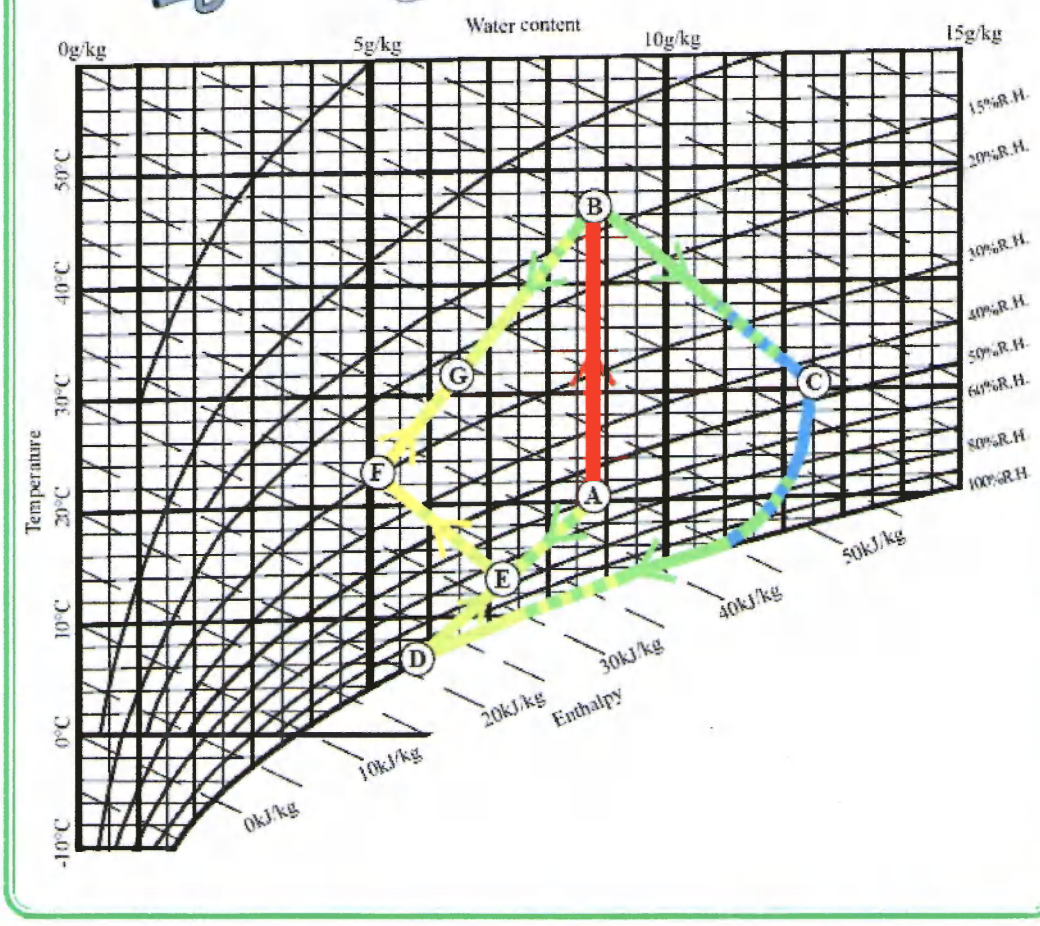


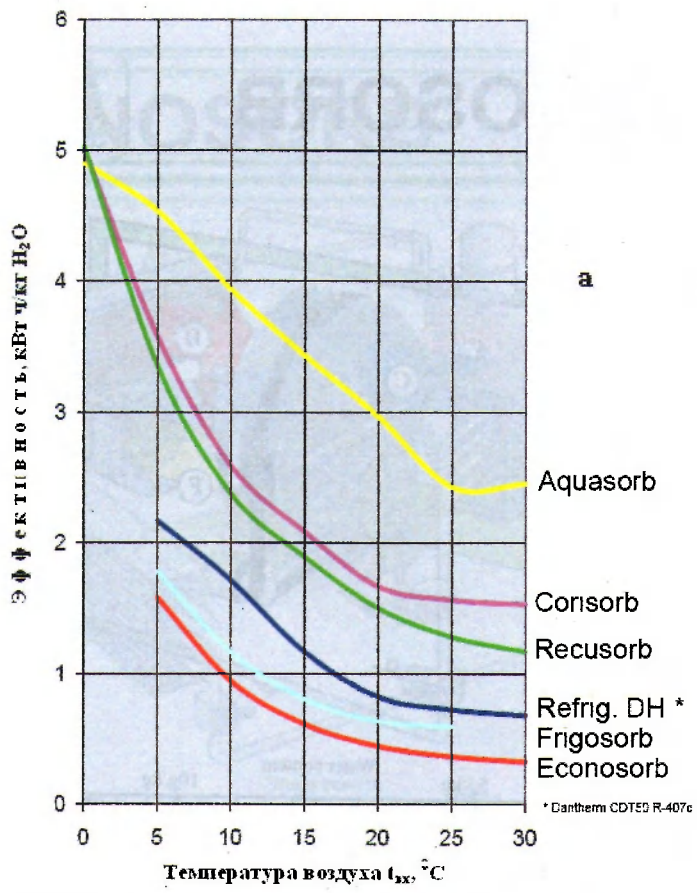


FRIGOSORB

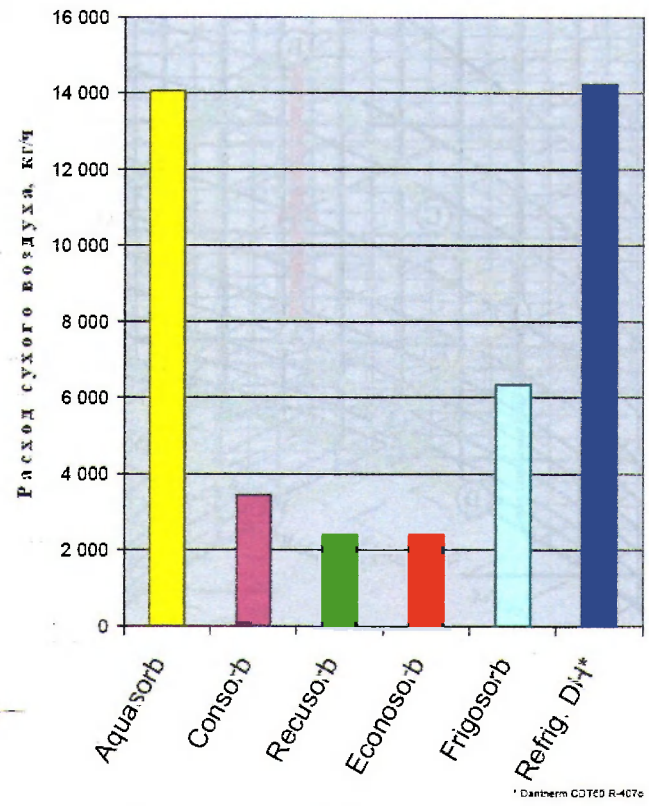
DST Seibu Giken







а



б

Рис.7.126. Сопоставление комбинированных схем осушения и DX: по суммарным затратам электроэнергии, отнесенным к массе удаляемой влаги при φ = 50 % – а; по расходу воздуха, необходимого для получения 10 кг/ч расхода влаги при t = 20 °С и φ = 50 % – б.

7.2.5.2.2. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

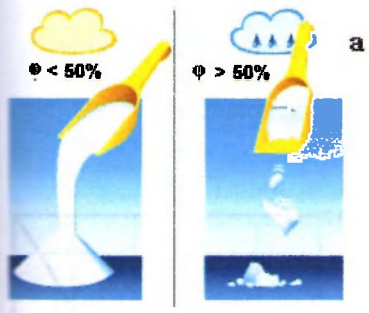
При большом числе промышленных технологий и различных объектов (в т.ч. комфортного назначения), для которых сегодня успешно применяются осушители на основе сорбентов (упомянуты в § 7.3), имеет смысл привести несколько примеров, демонстрирующих широту использования.

Сушка теплочувствительных изделий:

продукция фармацевтической и пищевой промышленности,
смолы термореактивного пластика, промышленные ферменты,
большинство белков и пр.



Из-за гигроскопичности, как исходных компонентов, так и готовой продукции необходимо строго выдерживать ограничения по относительной влажности воздуха (в фармацевтике $\varphi < 15\ \%$), рис.7.127. В пищевой промышленности роторные установки осушения воздуха используются при доведении до кондиции кондитерских изделий: печенья, шоколадных, карамельных конфет. Требования к участкам расфасовки сахара, кофе и другой гигроскопической продукции: $\varphi < 30\ \%$.



а

б

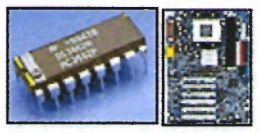


Рис.7.127. Изменение сыпучести гигроскопичных веществ (а) и разложение таблетированных лекарственных порошков при высоких значениях φ (б).

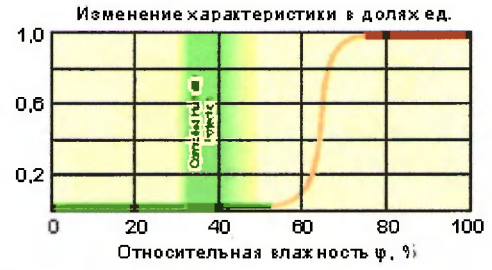
Поддержание режима стабильной и безопасной работы электронной техники

При повышенной влажности:

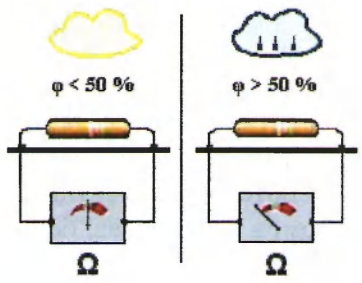
– изменяются ("плывут") характеристики полупроводниковых приборов (рис.7.128а);



а



– уменьшается электрическое сопротивление изоляции токонесущих проводов (рис.7.128б), что может привести к пожару.



б

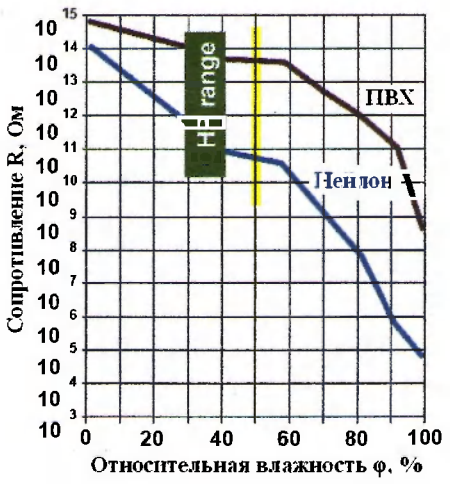


Рис.7.128. Влияние φ на стабильность рабочих характеристик полупроводников – а и сопротивление R электроизоляционных материалов – б.

На рис.7.129 приведена статистика отказов электронной аппаратуры системы вооружения Торнадо в самолетах-истребителях вооруженных сил Германии (данные компании Munters). Понижение относительной влажности воздуха с 80 % до 45 % уменьшает число отказов вдвое.

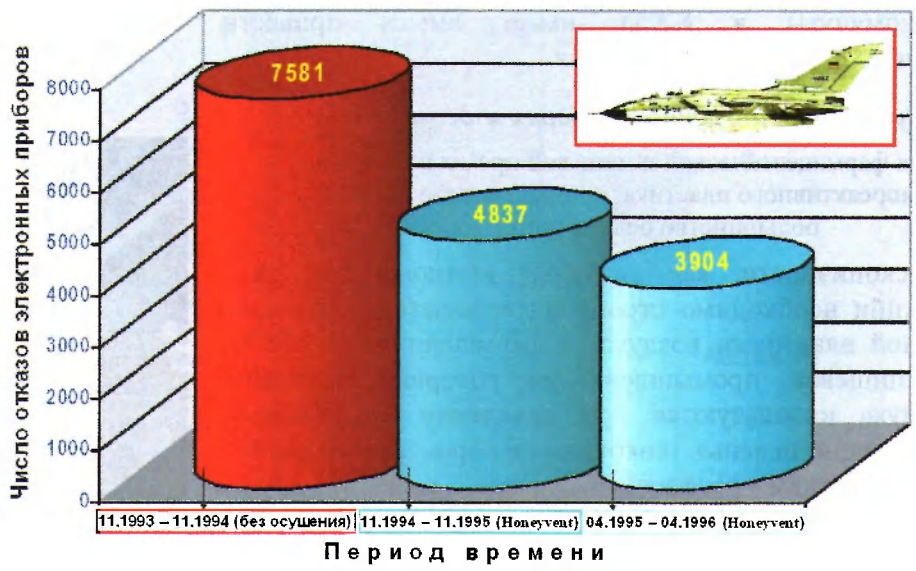


Рис.7.129. Число отказов электроники без использования осушения и с применением мобильных установок Honeyvent.

Предупреждение коррозии металлов

Общеизвестно, что во влажной среде скорость коррозии увеличивается, причем при $\varphi > 50\ \%$ – по экспоненциальной зависимости (рис.7.130).

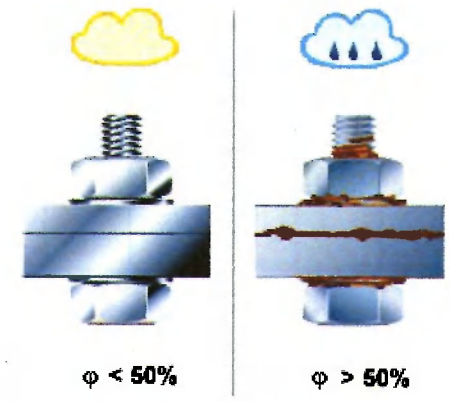
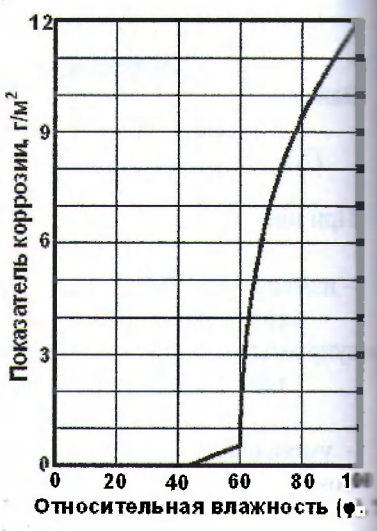


Рис.7.130. Влияние φ воздуха на уровень коррозии стали за 55 дней.



Атмосферный воздух с $\varphi \geq 50\ \%$ соответствует климату большинства стран мира (например, в США эти значения φ наблюдаются в течение 90 % годового времени).



Коррозия металлов значительно усиливается в условиях моря, когда к влаге присоединяется соль, что приводит к электролитическим реакциям. По этой причине военно-морские силы НАТО (с 1960 года) взяли на "вооружение" роторно-сорбентные технологии осушения воздуха трюмов авианосцев, береговых ангаров военной техники (самолеты, вертолеты, танки и пр.) для поддержания ее в состоянии полной боевой готовности (рис.7.131…7.136).

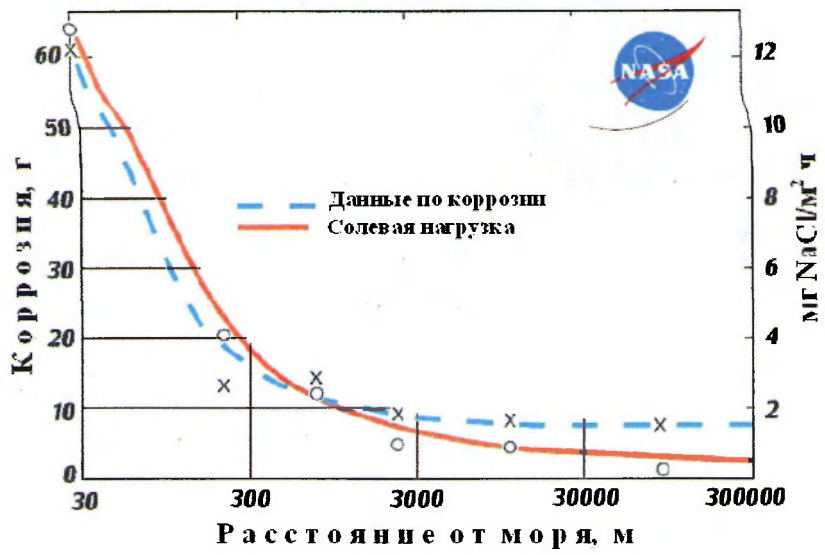


Рис.7.131. Зависимость величины коррозии и солевой нагрузки (выпадение солей на 1 м^2 площади в час) от расстояния от береговой линии (данные NASA).

Рекомендуемые уровни φ, % для военной техники и вооружения:

Самолеты, вертолеты, корабли-	40…45
Танки, ракеты, стрелковое оружие и боеприпасы-	35…40
Запасные части и оборудование-	30…35



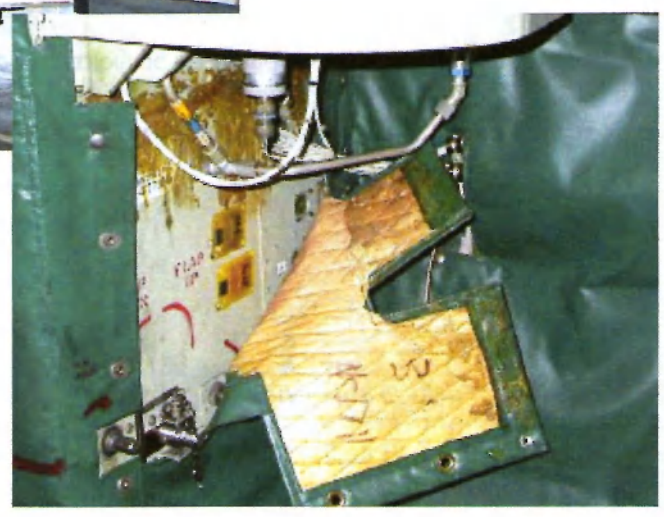
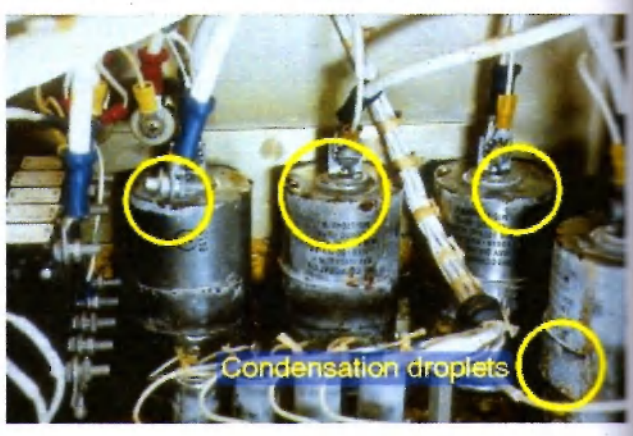


Рис.7.132. Коррозия наружной и внутренней обшивки вертолета береговой охраны США (U.S. Coast Guard).



Рис.7.133. Коррозия коммутационных пар электронного оборудования (вверху – фотоматериалы U.S. Army Corrosion Summit 2007, справа – фотография блока управления ракеты Patriot, по материалам компании Munters).



Армейские исследования показали, что антикоррозионная защита оборудования за счет применения установок Honeyvent дает существенную экономию основных средств: к 2011 году 8…9 $ на каждый вложенный доллар (рис.7.134).

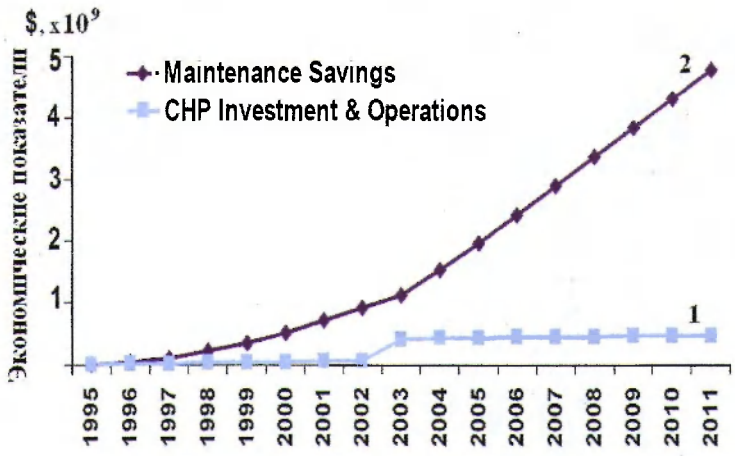


Рис.7.134. Экономические расчеты эффективности применения технологии Honeyvent в армии США: 1 – капитальные вложения и эксплуатационные расходы на осушение; 2 – экономия основных средств.

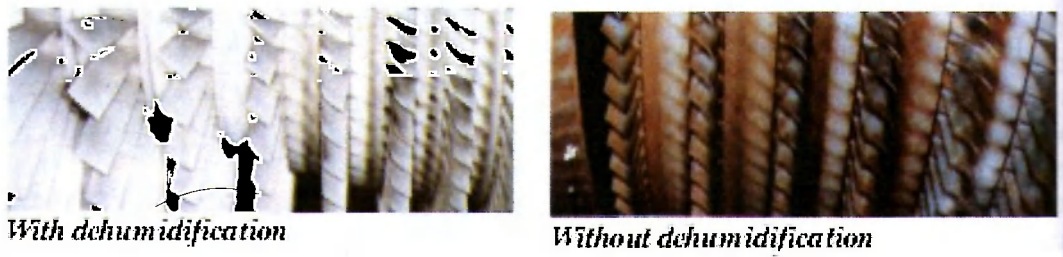


Рис.7.135. Фотографии лопаток турбины самолета с применением осушения (слева) и без него (справа).

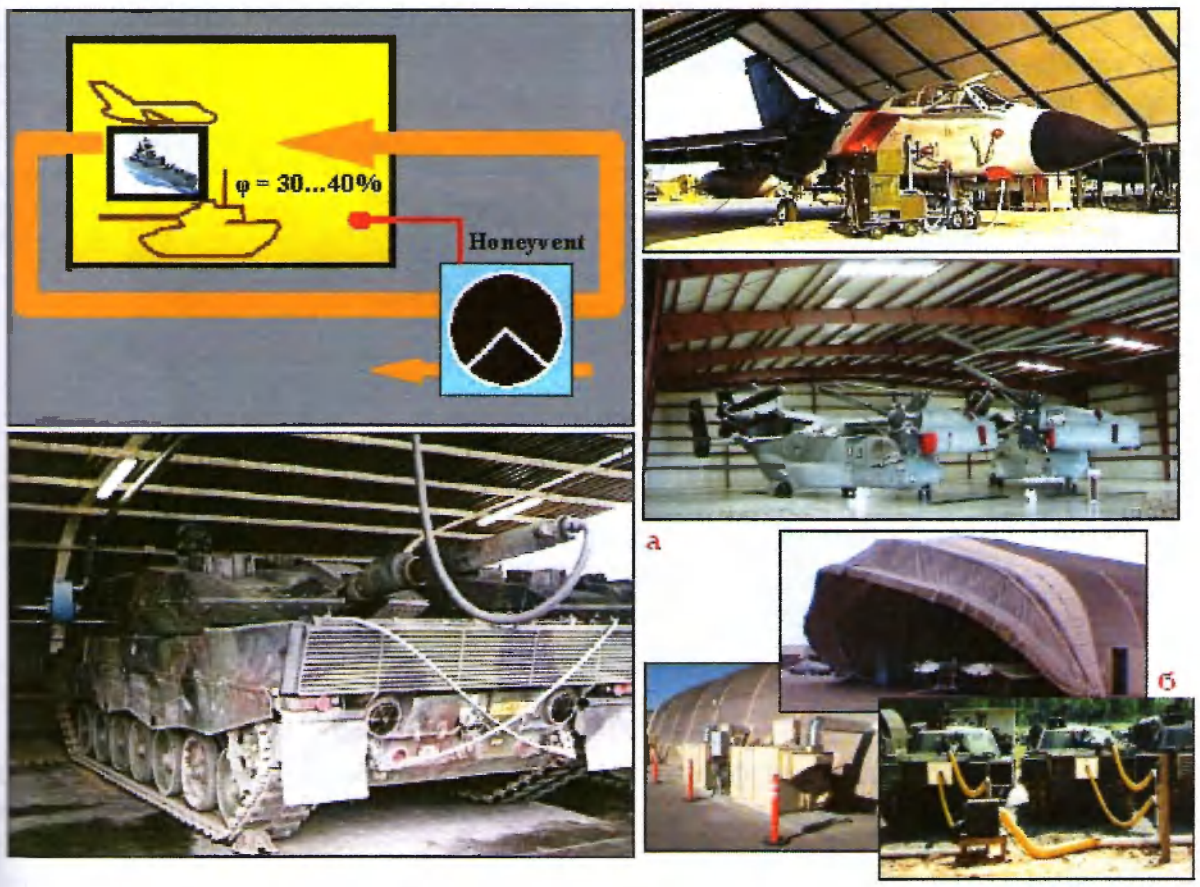


Рис.7.136. Установки Honeyvent на службе вооруженных сил (ВС) НАТО*:
а – военно-морской флот (авианосцы), б – береговые ангары.

* в т.ч. ВС Великобритании, Италии, Франции, Германии, Бельгии, Норвегии, Финляндии, Швеции, Швейцарии, а также Таиланда (установки Munters и Seibu Giken DST AB).

Аналогичным образом решается сегодня задача сохранности дорогостоящей техники и на гражданских объектах: морские нефтяные платформы, перевозка автомобилей морским путем, осушение танков (трюмных емкостей) специализированных торговых судов, предназначенных для перевозки химических продуктов (после их очистки и промывки), предполетная подготовка авиалайнеров, поддержание нормальных условий функционирования мостов, гидроэлектростанций и др., рис.7.137, 7.138.





Рис.7.137. Объекты Honeyvent-технологии: морские платформы (слева) и танкер (справа).



Рис.7.138. Перевозка автомобилей в трюмах морских судов типа Ro/Ro.

На рис.7.139, 7.146 приведены фотографии некоторых наиболее известных подвесных мостов. Подобные сооружения (в т.ч. вантового типа) – прогрессивные конструкции мостов большой протяженности – объекты защиты от коррозии с помощью систем осушения. В сферу действия этих систем вовлечены ответственные конструктивные элементы мостов: стальные коробчатые балки центрального пролета; подвесные кабели (ванты) и места их крепления [19].

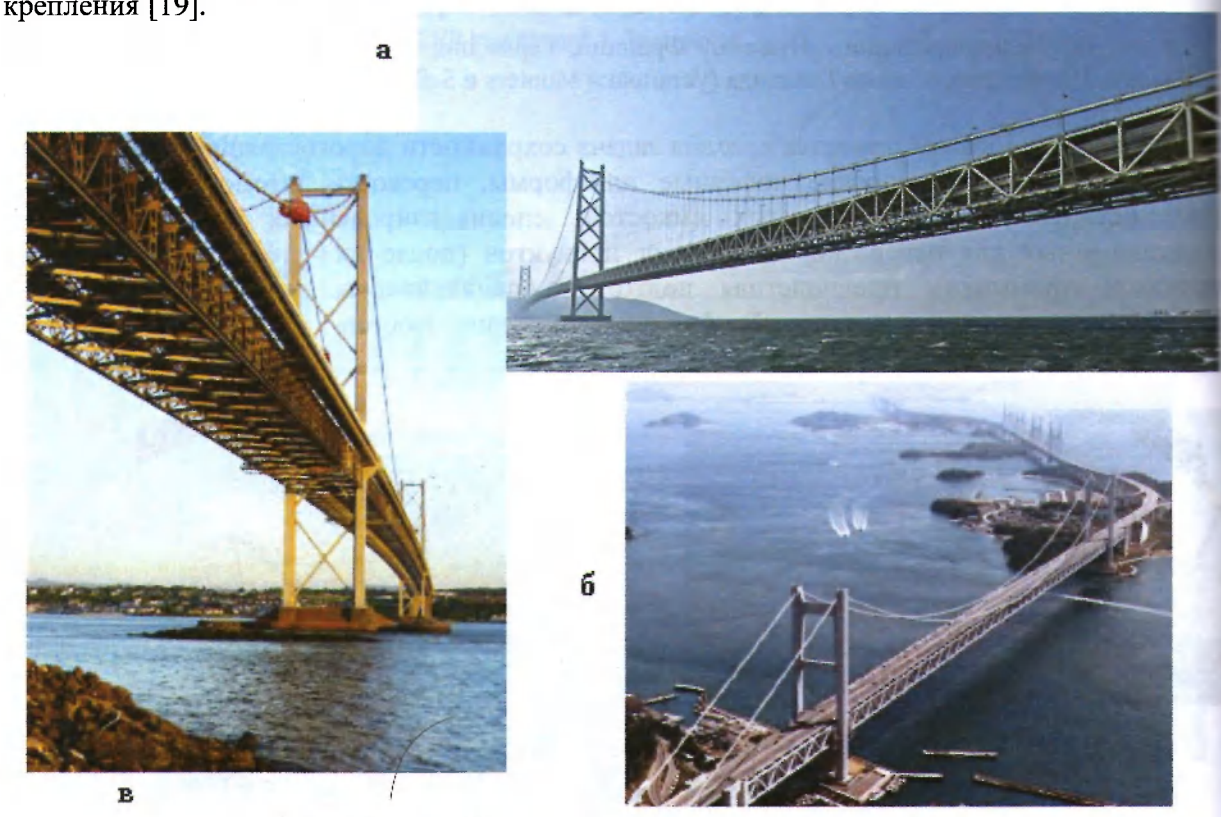


Рис.7.139. Мосты Akashi Kaikyo Bridge (а), Seto Ohashi (б) (Japan) и Forth Road Bridge (Scotland) (в).

Сложная геометрия, множество граней и большие открытые поверхности стальной конструкции центрального пролета моста располагают к воздействию коррозии. Поэтому, предпочтительны решения с минимумом внешнего воздействия, например, закрытая балка коробчатого типа [179]. Наружная поверхность такой конструкции гладкая и легко обслуживается. Внутренняя часть с различного рода перемычками составляет около 80 % полной поверхности и может быть защищена от коррозии осушением (без окрашивания) при поддержании относительной влажности воздуха внутри камеры ниже 40 %, что обеспечивается установкой осушителя с полной рециркуляцией воздуха (рис.7.140).

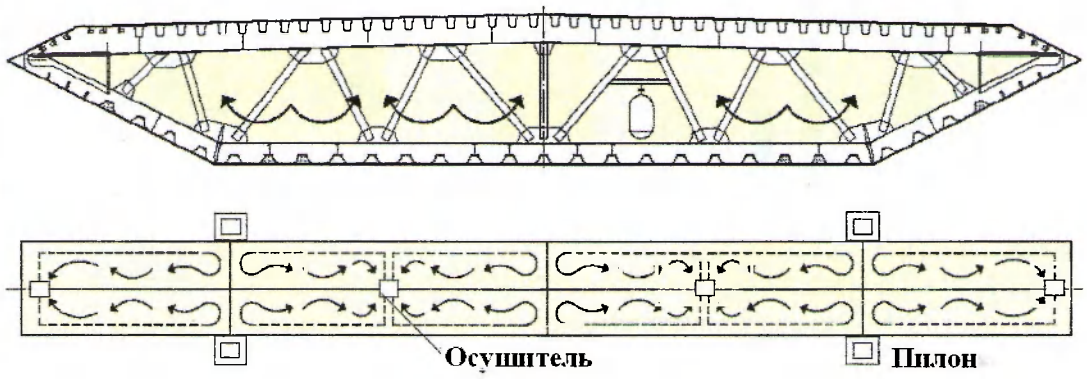


Рис.7.140. Разрез и план центрального пролета подвесного моста с внутренними контурами осушения [179].

Главный несущий кабель моста представляет собой набор множества волокон (8300…11600) стальной проволоки диаметром 5 мм (рис.7.141). Этот ответственный элемент конструкции подлежит периодической ревизии и замене волокон, подверженных коррозии.



Рис.7.141. Инсталляция главного кабеля (а) и его упаковка (б) [302].

На рис.7.142 показаны типичные стадии коррозии волокон несущего кабеля, а рис.7.143: этапы регламентных работ (выполняются на мосту Forth Road Bridge, заверша работ в 2010 г.) [225, 289].

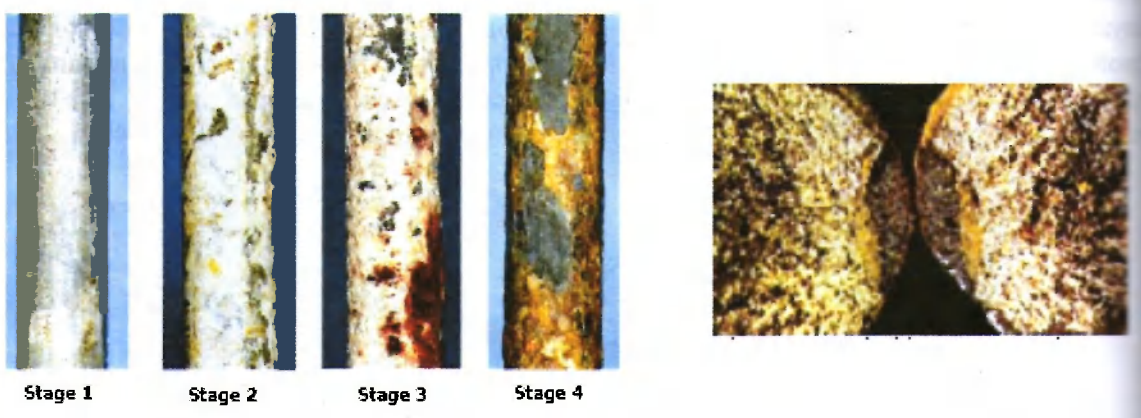


Рис.7.142. Выделение четырех стадий коррозии (справа поперечный разрез волокон): появление пятен окисления оцинкованной поверхности проволоки кабеля – Stage 1; окисление всей поверхности – Stage 2; появление коричневых пятен ржавчины – Stage 3; ржавчина на участках длиной более 75…150 мм – Stage 4.

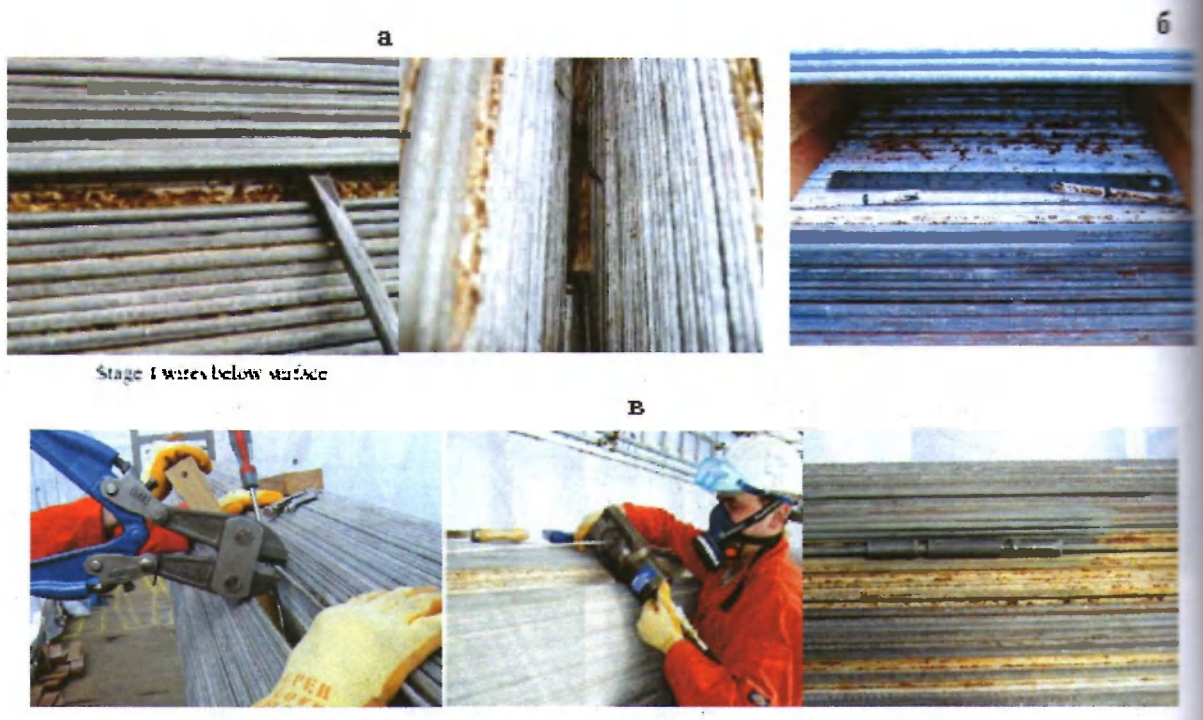


Рис.7.143. Этапы ревизии главного кабеля:
а – вскрытие кабеля; б – обнаружение разрыва проволоки; в – обрезка поврежденных участков и соединение проволоки натяжным устройством.

Для защиты главных несущих кабелей подвесных мостов применяется система осушения, которая предусматривает подачу сухого воздуха в защитную оболочку кабеля с определенным интервалом (через каждые 130…145 м) [248], а также к месту закрепления кабеля (рис.7.144). В отличие от системы осушения закрытых балок, система защита кабелей – прямоточная.

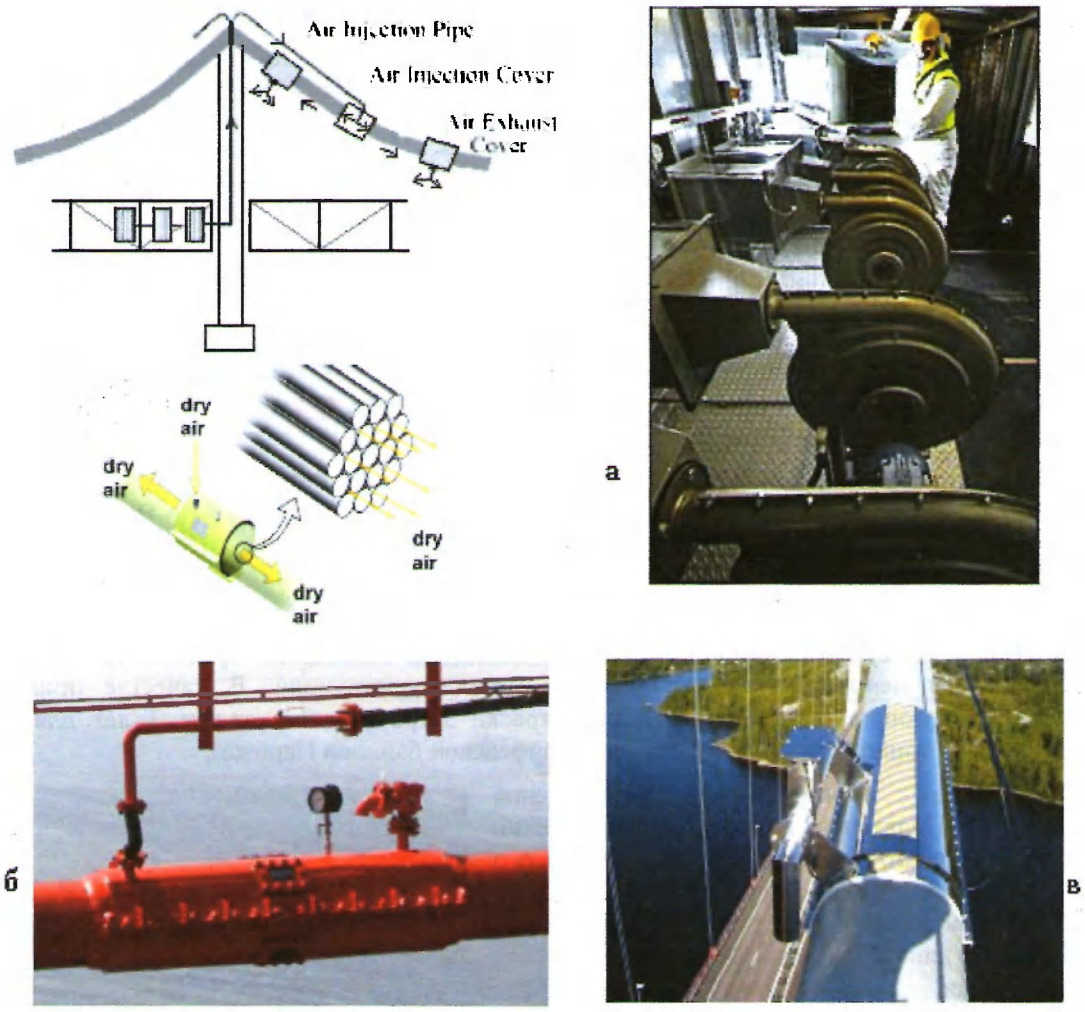


Рис.7.144. Схема и элементы системы осушения главных кабелей подвесных мостов [137, 249, 302]: воздуходувки подачи сухого воздуха к несущим кабелям – а; камеры ввода (б) сухого воздуха в защитную оболочку кабеля и вывода (в); узел осушения места закрепления кабеля – г.

Длина участка главного кабеля между точками входа и выхода воздуха системы осушения определялась экспериментальным путем. Для подвесного моста Seto Ohashi (Japan) с центральным пролетом в 1100 м, построенного в 1988 году, адсорбционная система осушения была введена в действие в 2002 году. Ввод сухого воздуха в оболочку кабелей осуществлялся в трех точках: в верхних точках (на пилонах) и в центре провисания кабеля. При этом длина участка осушения составила 240…270 м. Через несколько лет эксплуатации в период с сентября 2004 г. по май 2005 г. были проведены исследования влажностного режима кабеля и выявлены участки с $\varphi \geq 60\,\%$ (рис.7.145). После увеличения точек ввода/вывода сухого воздуха и сокращения длины участка осушения кабеля до 130…145 м (практически вдвое) последующие через год исследования показали полное отсутствие коррозионно-опасных условий.

В настоящее время крупнейшая мостостроительная компания Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited обеспечила все подвесные мосты Японии осушительными установками.

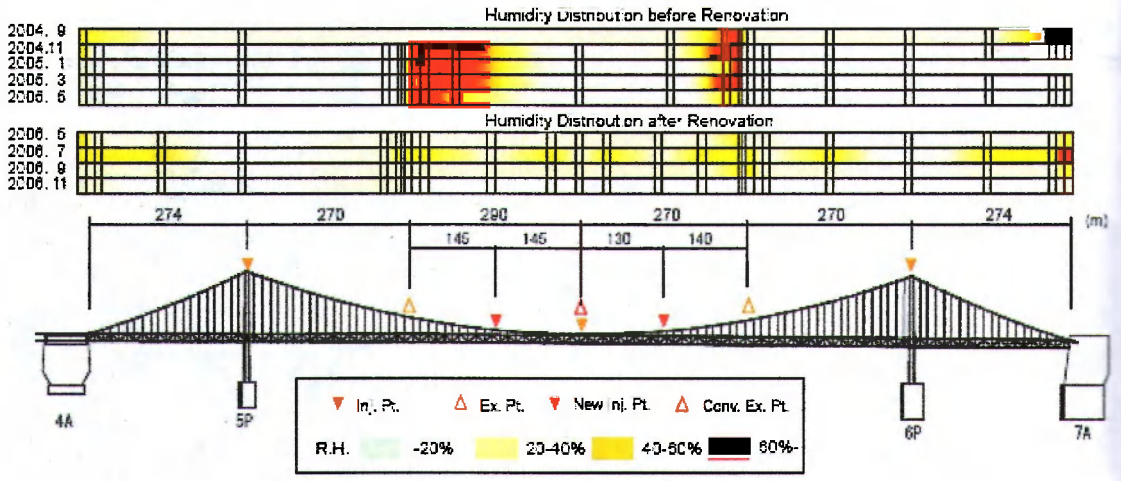


Рис.7.145. Результаты исследований по совершенствованию системы осушения главного несущего кабеля моста Seto Ohashi (East cable on the Minami Bisan-Seto Bridge, Japan) [24]

Закрытые окна стальных ферм и роторно-сорбентная технология осушения призна основным способом защиты от коррозии подвесных мостов.

Применение осушения приводит к значительной экономии средств за счет отказа от необходимости перманентного окрашивания металлоконструкций. В качестве примера мож привести следующие цифры: 50…60 тонн краски затрачивается каждые 7 лет для защиты от коррозии 7000 тонной стальной конструкции Эйфелевой башни в Париже.

Современная концепция мостостроения определяет «Подвесной мост» как единственно реальный вариант конструкции сверхдлинного моста. На сегодняшний день мост Akashi Kaikyo Bridge, построенный в 1998 году в Японии, имеет наибольшую длину центрального пролета (1991 м). На очереди строительство мостов через Мессинский пролив (Италия, континентальная часть с островом Сицилия, центральный пролет – 3300 м) и Гибралтарский пролив, который свяжет Европу (Испанию) с Африканским континентом (Марокко) (2 х 5000 м (либо 3 х 3500 м)).



Рис.7.146. Подвесной мост* Nelson Mandella Bridge(ЮАР

*оборудован роторно-сорбентной системой осушения Seibu Giken DST AB (в 2003 г.

Предотвращение туманообразования и конденсации влаги (типичные объекты: ледовые арены, камеры промышленных холодильников различного назначения)

Для ледовых арен в весенний и летний периоды года характерна избыточная влажностная нагрузка. Кроме влагопритоков от людей и периодической зачистки поверхности льда, влага проникает в здание с теплым и влажным наружным воздухом (через систему приточной вентиляции, а также за счет инфильтрации). В этих условиях надо льдом формируется туман с последующей конденсацией влаги, как на поверхности льда, так и внутри здания. Если не используется технология осушения воздуха, описанная выше картина приводит к негативным последствиям в отношении условий проведения спортивных состязаний, дискомфорту зрителей, долговечности строительной конструкции здания, а также к необходимости увеличить производительность холодильной установки на 20…50 % (на замораживание конденсата). В подтверждение сказанному, ниже, привожу фотодокумент самой позорной игры НХЛ (так считают сами американцы) – финала кубка Стенли 197 года между "Буффало Сэйберс" и "Филадельфией Флайерс", получившей название "Fog Bowl" (пир тумана).



Из-за тумана надо льдом (и как следствие плохой видимости) игра прерывалась 12 раз. В течение этих вынужденных остановок матча игроки катались по льду с развернутыми полотенцами, разгоняя туман.

Установка сорбентных осушителей в залах Северной Америки (особенно в Ванкувере, в районе с повышенной влажностью) явилась эффективным решением проблемы. Такая СКВ (рис.7.147) с производительностью 50 000 м^3/ч по воздуху удаляет более 300 л/ч воды.

Современный стандарт НХЛ для ледовых арен: температура льда 22 °F (-5,6 °C), параметры воздуха: t = 60 °F (15,6 °C), φ = 40 %. При этом температура точки росы τ = 2 °C.

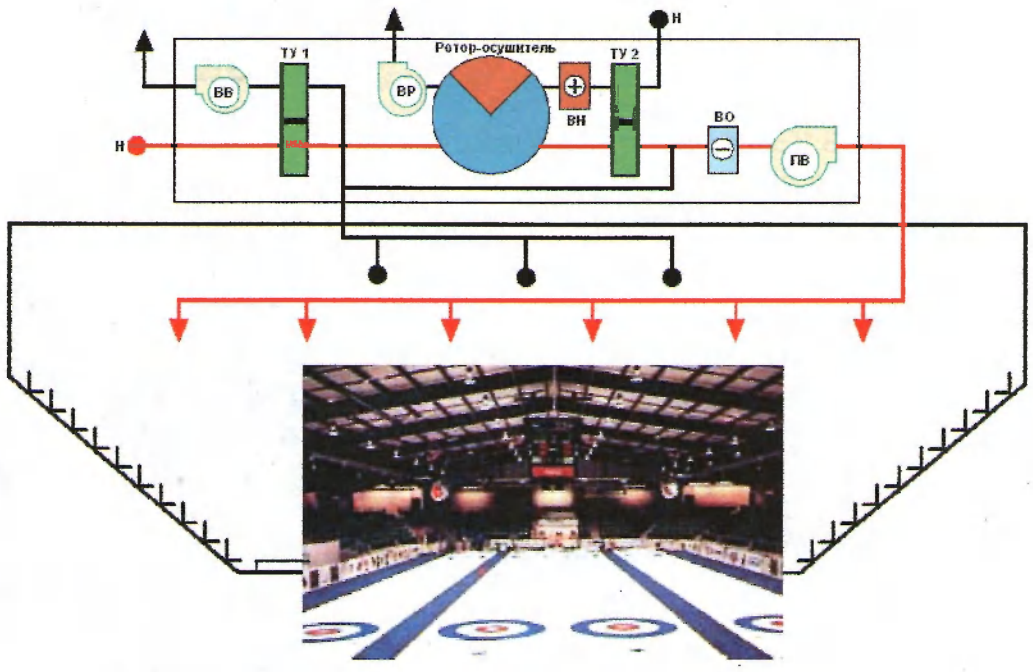
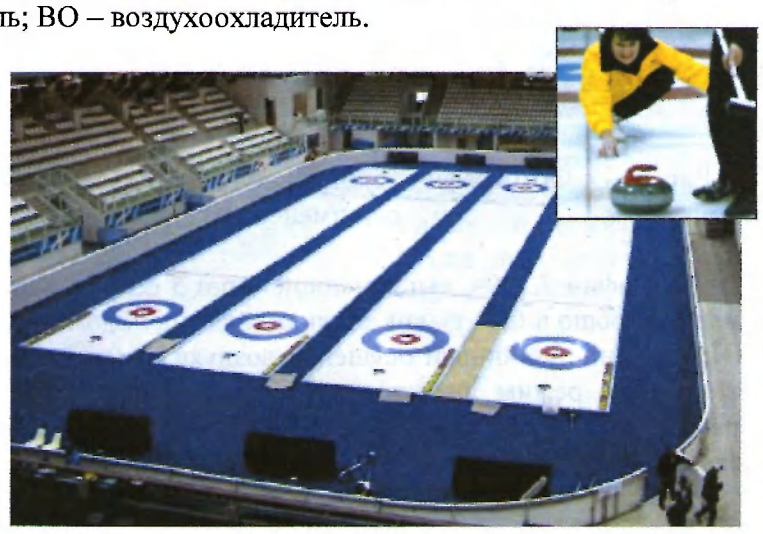


Рис.7.147. Схема СКВ ледовой арены с применением ротора-осушителя:
Н – наружный воздух; ПВ – приточный вентилятор; ВВ – вытяжной вентилятор;
ВР – вентилятор линии реактивации; ТУ1 – ротор-теплоутилизатор; ТУ2 – тепловая труба;
ВН – воздухонагреватель; ВО – воздухоохладитель.

Справа приведена фотография олимпийского зала (Турин, 2006) для проведения соревнований по керлингу. Этот вид спорта предъявляет наиболее высокие требования к качеству льда, которое существенным образом зависит от параметров воздуха. Поддержание требуемой температуры росы воздуха за счет его осушения осуществлялось установками Seibu Giken DST AB.



В производственном цикле холодильников, фабрик мороженого на стадии загрузки и выгрузки продукции из-за инфильтрации воздуха может возникнуть такая же картина: туман с последующими за этим конденсацией, инее- и льдообразованием (рис.7.148, 7.149).

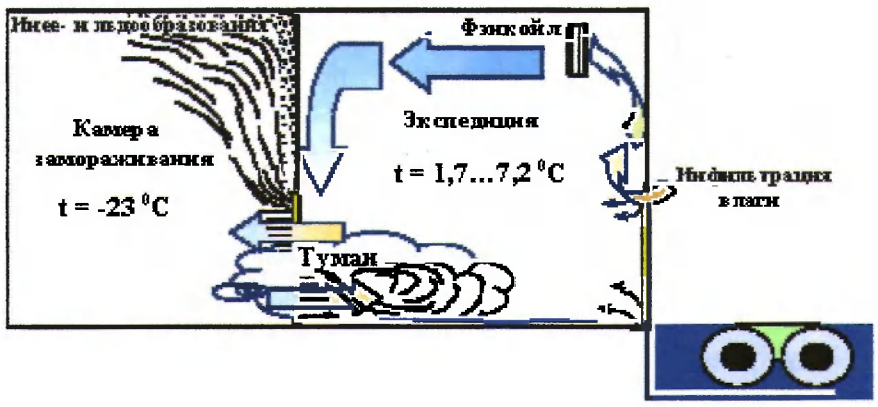


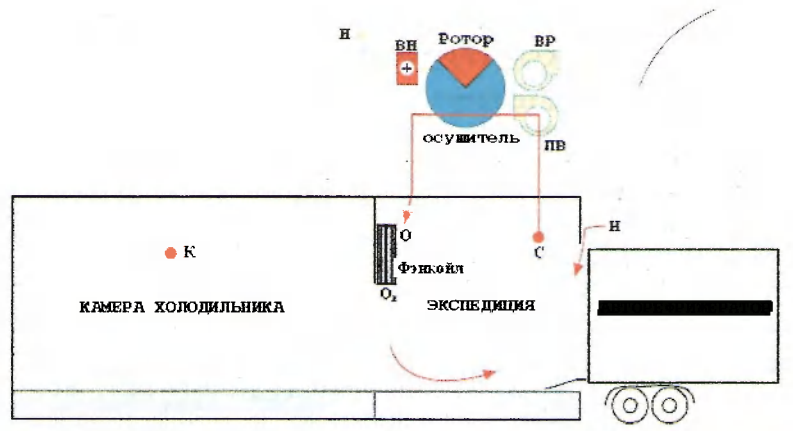
Рис.7.148. Температурно-влажностные условия в помещениях холодильника, приводящие к образованию тумана, инея и льда.



Рис.7.149. Фотографии холодильной камеры (а – работают только приборы охлаждения, б – с применением Honeyvent) и экспедиции (в).

На фотографии 7.149в, выполненной через 5 секунд после открывания дверей холодильной камеры, хорошо виден туман, стелющийся над полом экспедиции.

Применение установки осушения воздуха с выведением влаги в атмосферу обеспечивает нормальный режим работы холодильников (рис.7.149б) без негативных последствий обрастания "шубой" охлаждающих приборов в камерах (рис.7.149а) и мокрого пола в экспедиционном зале.





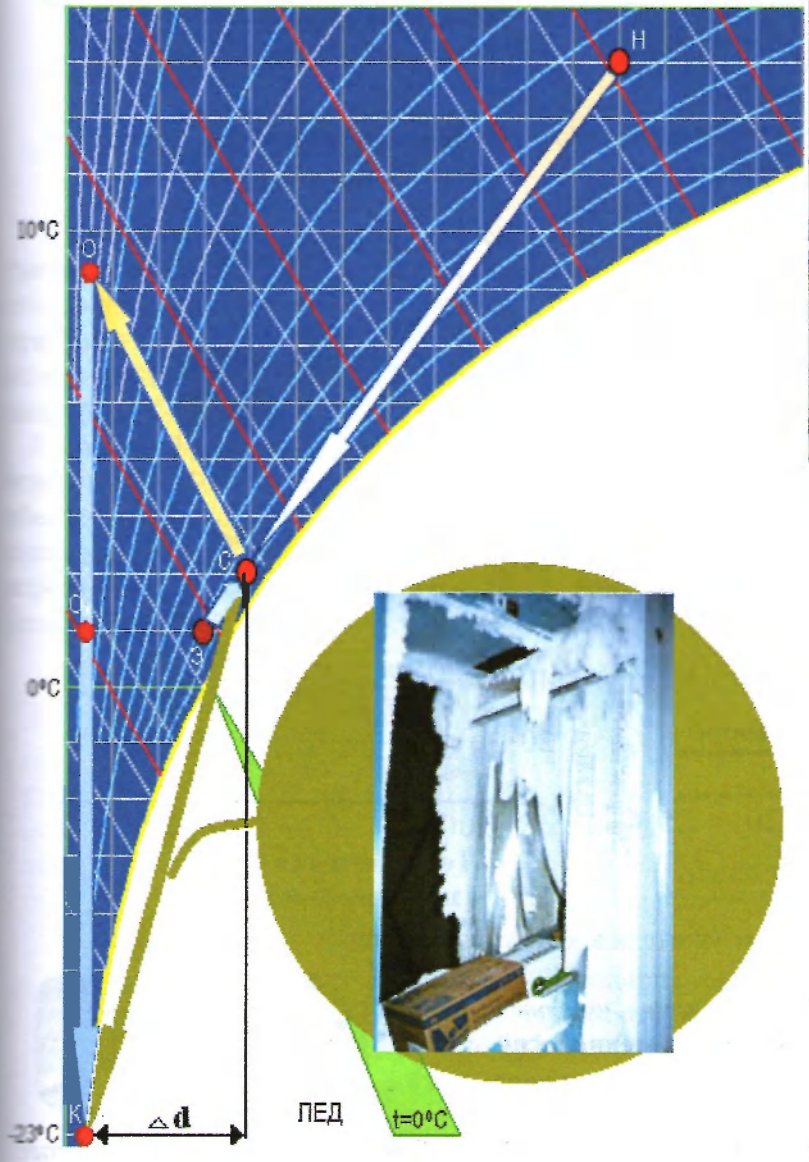


Рис.7.150. Установка Honeyvent (HCU) для промышленного холодильника. Схема и процессы в d,h-диаграмме:

обозначения элементов по рис.7.147;

обозначения состояний воздуха:

- наружного – Н,
- в помещении экспедиции – Э,
- смеси – С,
- осушенного в адсорбере – О,
- охлажденного до температуры воздуха в экспедиции – $О_х$,
- в камере – К.

Установка воздухопроизводительностью 7500 м^3/ч удаляет более 30 кг влаги в час из воздуха.

Создание и поддержание атмосферы
"Dry Clean Room"
(чистых сухих помещений)

на низком уровне температуры точки росы
при минимальном содержании химических вредностей



Компания Hitachi применила для этих целей установку с ротором-осушителем типа HPX (рис.7.151), который обеспечил уровень τ = -60 °C в случае единичного ротора и τ = -100 °C при использовании трехступенчатой схемы [293]. Одновременно с этим десикант улавливает до 99 % органических компонентов.

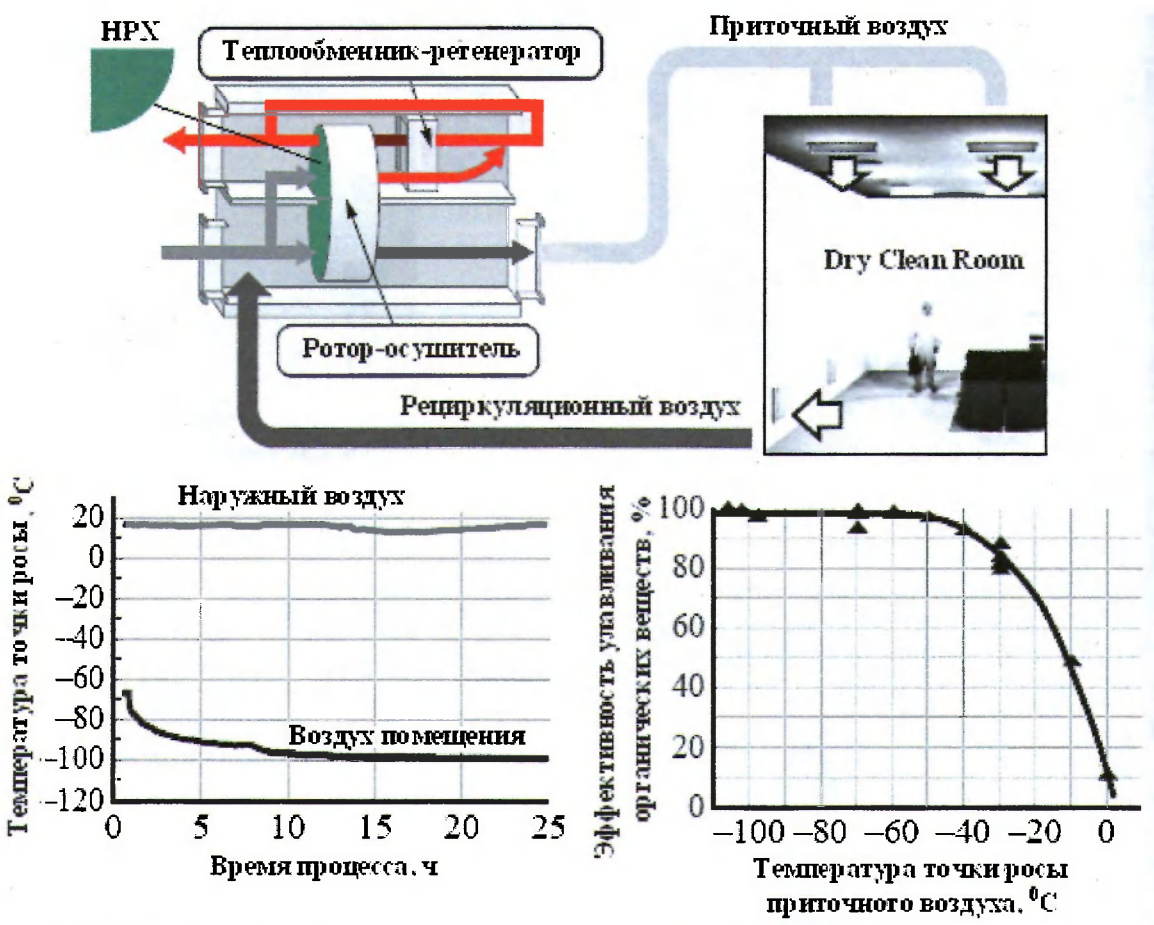


Рис.7.151. Применение ротора-осушителя в «Dry Clean Room».



В качестве примера использования «*чистых сухих помещений*» в обеспечении современных технологий можно упомянуть производство химических источников тока: ионно-литиевых (Li-Ion) и полимерно-литиевых (Li-Polymer) электрических батарей-аккумуляторов, – для электронной техники (мобильные телефоны, фото- видеотехника, портативные компьютеры, системы глобального позиционирования GPS, медицинская аппаратура и пр.). Высокая активность лития предъявляет жесточайшие требования к герметичности источника тока и условиям его изготовления. Значения температуры точки росы в приточном и рециркуляционном воздухе производственного помещения, соответственно, для батарей: *PolyStor (Ion)* – (-48 °C/-29 °C); *Sony (Ion)* – (-56 °C/-36 °C); *LG (Ion)* – (-60 °C/-34 °C).

Обеспечение технологических процессов пищевой промышленности:

сушка сырокопченых колбас, экзотических плодов (манго, папайя, бананов), переработка куриного мяса и пр.

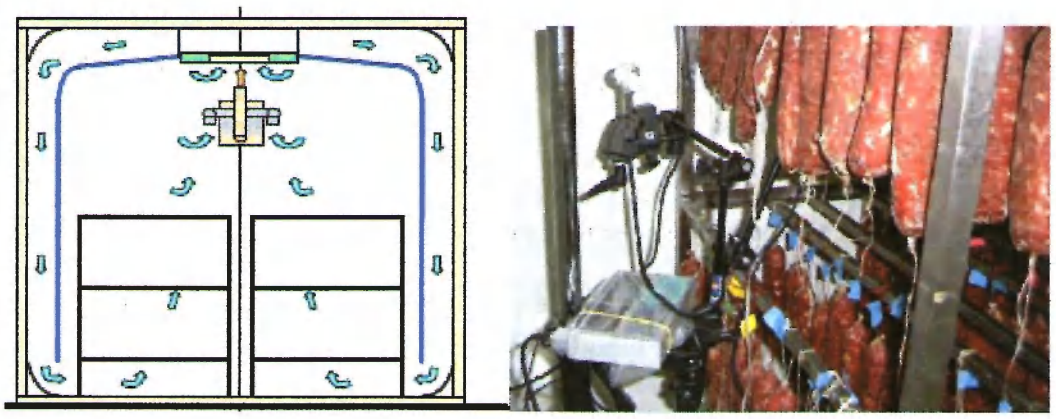


Рис.7.152. Камеры сушки сырокопченых колбас: 30 суток при t =12 °С и φ = 75 %.



Плоды манго высушивают в специальном туннеле в течение 30 часов до 5-кратного снижения массы (загрузка 7,5 т , выход 1,5 т) при оптимальном уровне φ и t = 35 °С, без потерь вкусовых качеств и изменения цвета плодов.

Компания Landman Dried Produce, используя установки Honeyvent - MX7600 (Munters AB), обеспечивает непрерывные поставки в Европу сушеных плодов манго (начиная с середины апреля) и затрачивает на технологический процесс сушки на 40 % меньше энергии.



Бройлерное производство

Предприятия Townsends в США осуществляют переработку более 5 тыс. тонн кур в неделю: до применения установок Honeyvent были вынуждены использовать дополнительный труд 20 человек, которые занимались санитарной обработкой производственных помещений в ночное время. Предприятия имели простой 2 часа в неделю.

Обеспечение биоклиматических технологий:

поддержание требуемого уровня **φ**
в фитотронах, зоотронах, инкубаторах.



В качестве примера можно привести требования температурно-влажностного режима страусиных ферм: t = 36...37 °С, φ = 25 ± 5 % (при норме наружного воздуха 72 м^3/ч на 100 яиц и емкости инкубатора 1000 шт.), в течение 44 дней. В данном случае применение технологии Honeyvent позволяет осуществлять воспроизводство страусиных бройлеров без потерь, в то время, как традиционные D-установки не обеспечивают необходимый контроль относительной влажности.

Страусиные фермы – доходный бизнес (развивается во многих странах: Австралия, Кения, ЮАР, США, Малайзия). Для сведения, рыночная цена яйца страуса – 1000…1500 $, бройлера – 15000…20000 $.

Высушивание зданий, пострадавших от стихийных бедствий (паводковые разливы рек, тропические циклоны), а также от работы противопожарных систем

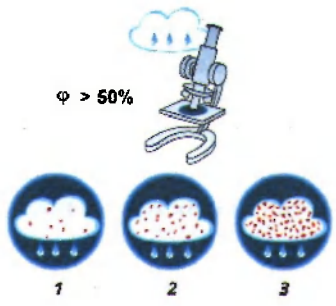






Установки "Honeyvent" (Munters) большой производительности с 19-дюймовыми присоединительными рукавами-воздуховодами были использованы по осушению 9-ти этажей высотного здания "Тихоокеанская башня" в Гонолулу (Гавайи, США), полностью залитых водой в результате работы пожарных. Задача была выполнена без вспышки бактериального роста. При φ > 50 % возникает благоприятная среда для образования различных бактерий и вирусов, рис.7.153.





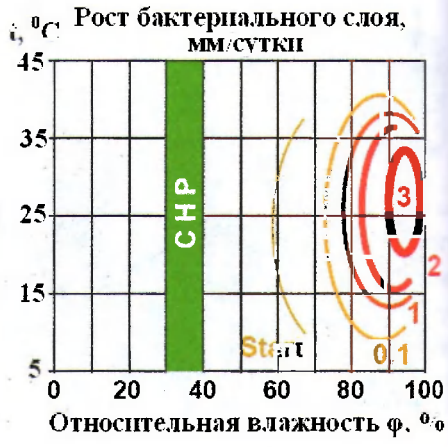
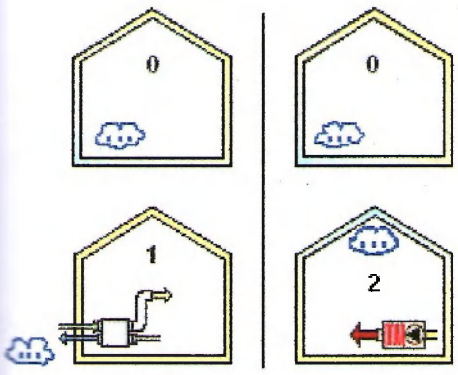


Рис.7.153. Явление роста бактерий во влажной среде.



Примечательно то, что технология осушения воздуха отводит влагу из здания, в отличие от воздухонагревательных установок, при работе которых влага просто мигрирует в верхнюю зону помещений (рис.7.154).



Рис.7.154. Схема перемещения влаги в помещении:
0 – исходное состояние;
1 – при работе осушителя;
2 – при нагревании,
и фотография воздухонагревательной установки.

Последний пример (высушивание зданий) весьма актуален в связи с глобальным потеплением климата и увеличением атмосферных осадков. Показательно массовое затопление городов Европы в 2002 году, в том числе таких культурно-исторических центров, как Дрезден, Прага, Зальцбург. В 2005 г. пострадали населенные пункты Румынии, Германии (Бавария). Чаще стали возникать тропические циклоны. Тайфуны в Тихом океане наносят ущерб прибрежным странам: наводнение 2000 г. в Японии (Кобэ, Осака), 2002 г. в Южной Корее, 2005 г. в США. Климатологи уверенно говорят о возвращении тайфунов на побережье США (цикл большой временной протяженности в 21 год).

Кондиционирование воздуха в объектах общественного назначения

www.gri.org/desiccant

(в приведенных ниже схемах основные обозначения по рис.7.147)

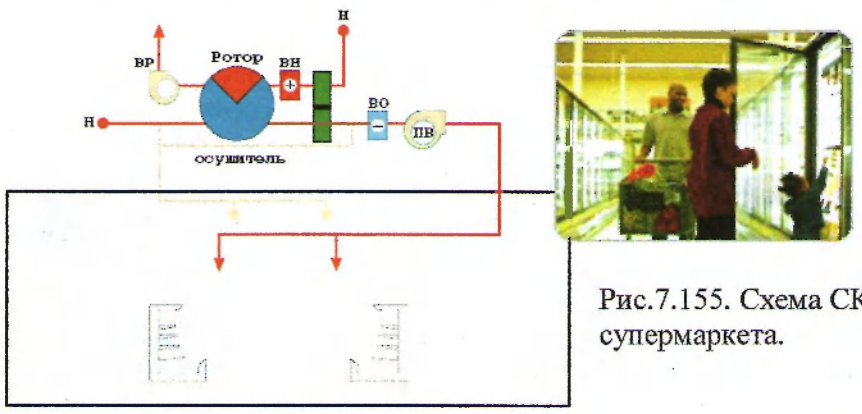


Рис.7.155. Схема СКВ супермаркета.

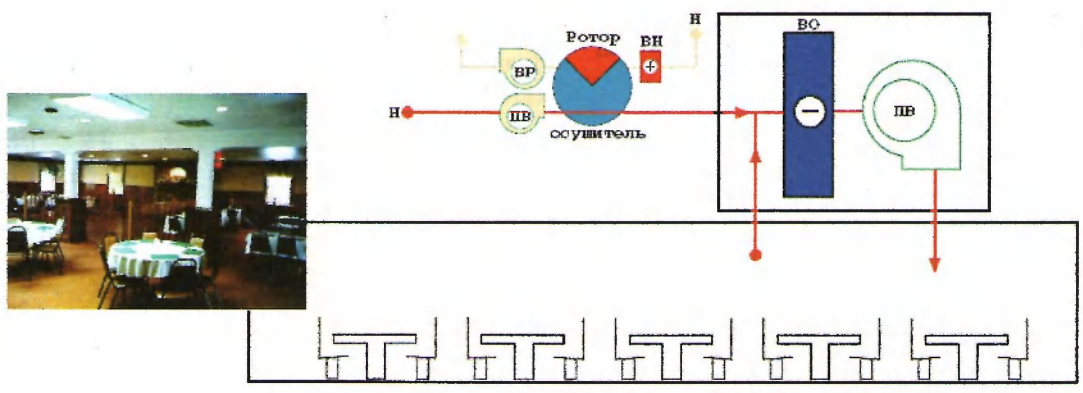


Рис.7.156. Схема СКВ предприятий общественного питания быстрого обслуживания “Quick-Service”, ресторанов.

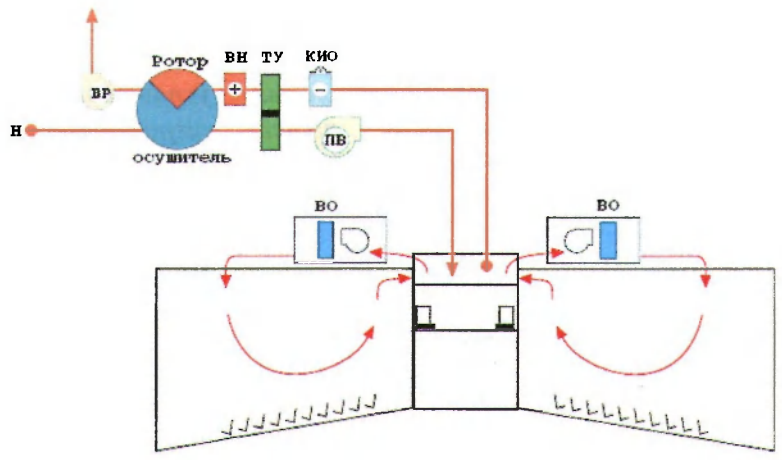


Рис.7.157. Схема СКВ передвижного театра (“Movie Theater”)
(КИО – косвенно-испарительный воздухоохладитель).

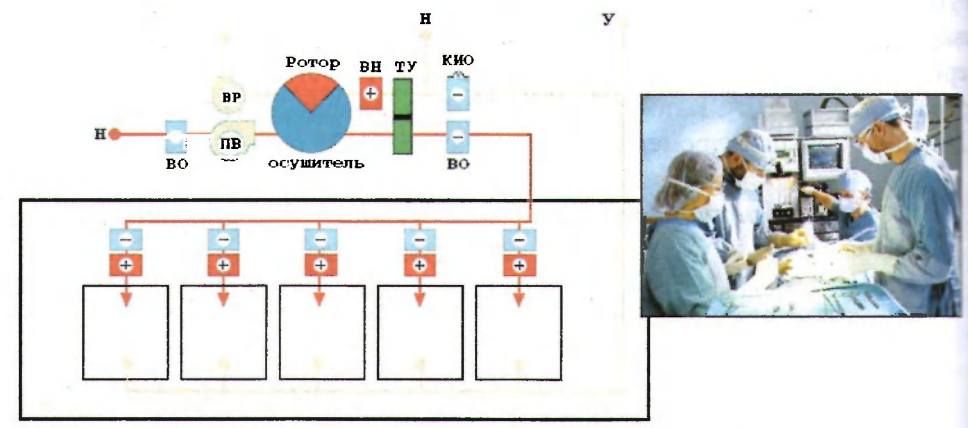


Рис.7.158. Схема СКВ больницы (операционных).

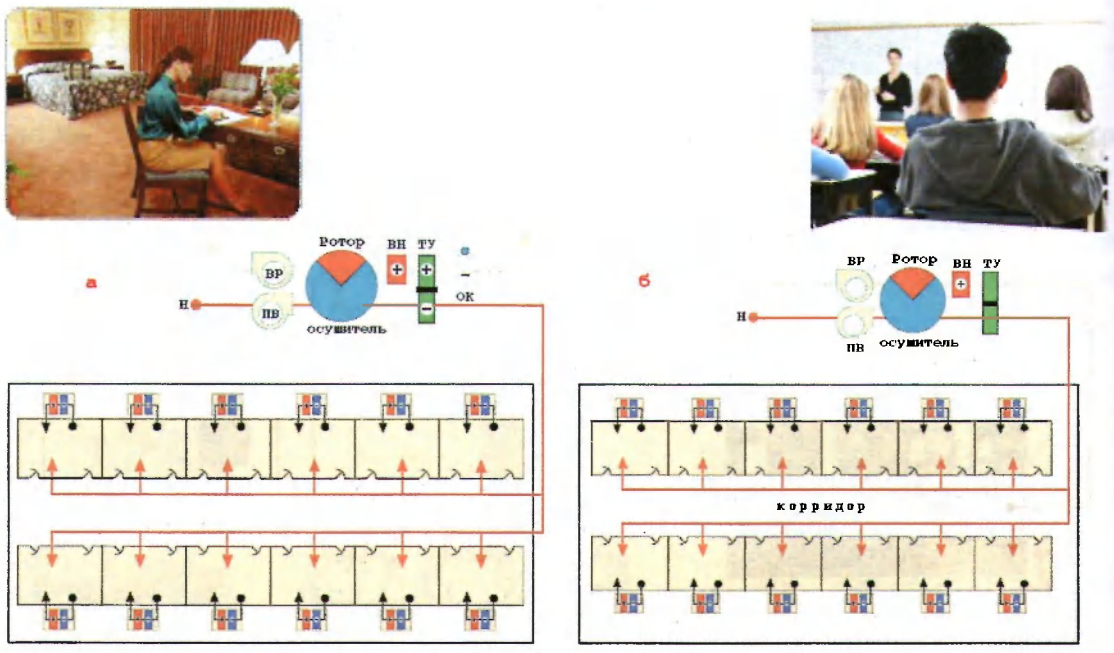


Рис.7.159. Схемы СКВ гостиницы (а) и учебного заведения (б)
(ОК – камера орошения – в режиме испарительного охлаждения).

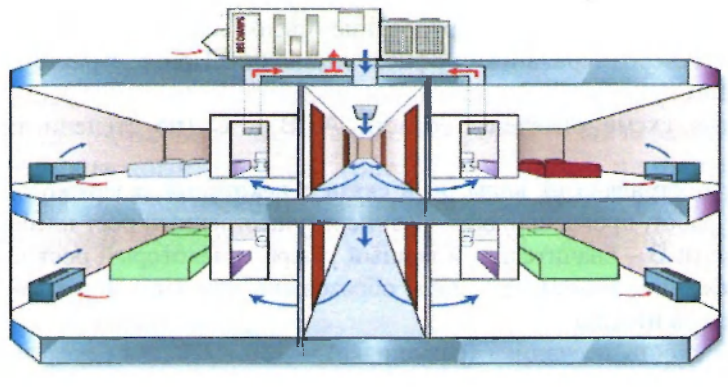
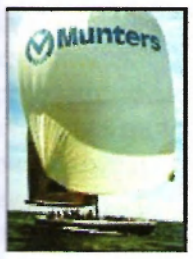


Рис.7.160. СКВ гостиницы в разрезе здания.

В течение ряда лет всего три страны определяли техническую политику в продвижении сорбционно-сорбентной технологии осушения воздуха: США, Япония и Швеция. Затем со своими разработками роторов-осушителей в рынок вошли и другие страны мира.

Учитывая важность развития данного направления, позволяющего решить множество проблем энергосбережения, управления, экологии, IAQ, создан Всемирный центр изучения сорбентных технологий при государственном университете Миссисипи (США).

В США в программе фундаментальных и прикладных научных исследований десикантов приняты две национальные лаборатории: National Renewable Energy Lab (Golden, Colorado) – NREL и Oak Ridge National Lab (Oak Ridge, Tennessee) – ORNL.



Одним из мировых лидеров в области осушения воздуха является компания "Munters", которая почти 50 лет присутствует на рынке этой техники, имеет филиалы в 28 странах, в 12-ти размещено промышленное производство.



Основатель фирмы – шведский инженер Карл Мунтерс внес весомый вклад в развитие тепломассообменных аппаратов холодильной техники кондиционирования воздуха, технологий осушения и увлажнения воздуха (об этом можно прочитать в прил. [1]).

Компания Munters участвовала в ликвидации последствий трагедии 11 сентября 2001года в Нью-Йорке, когда в результате террористических актов были разрушены «башни-близнецы» Всемирного торгового центра и взорвана часть здания штаб-квартиры Пентагона.

От взрыва врезавшегося в здание Пентагона авиалайнера пострадало более 15 тыс. м^2 на 5-ти этажах сектора 1. Диаметр огненного шара при взрыве составил 18м. Еще большая площадь была залита водой при работе пожарных: 230 тыс. м^2. В некоторых местах сектора уровень воды достигал 1,5 м.

Компания Munters использовала около 600 единиц установок сорбентной технологии осушени общей воздухопроизводительностью 2,5 млн. м^3/ч сухого воздуха. Протяженность воздуховод составляла более мили. Необходимое оборудование было собрано и доставлено на мест кратчайшие сроки из 30 североамериканских офисов компании. При контракте в 1 млн. $ компан Munters сохранила Пентагону около 40 млн. $ на восстановление здания.

На приведенной ниже схеме отмечены области A, B и C (по степени тяжести состоян подлежащие осушению.

Область A наиболее пострадала от воды, и, в связи с некоторой задержкой допуска компан Munters к производству работ, произошло образование и существенный рост плесени.

Характеристика области B – значительный водный ущерб и некоторый рост плесени, области C некоторое водное повреждение и незначительное образование плесени. Помещения области C бы восстановлены менее чем за неделю.

Для сведения: влагоемкость песчаника (ракушняка) – 180…270 л/м^3; железобетона – 140… л/м^3; кирпича – 90…190 л/м^3.





Работы в районе торгового центра были направлены на очистку воздуха близлежащих офисных помещений от пыли (фильтры HEPA) и устранение запаха дыма: установки сухого и влажного водяного пара (тумана). С установками, производящими туман, можно познакомиться в следующих разделах 8 и 9.

7.3. УСЛОВИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЫБОР СПОСОБА ОСУШЕНИЯ ВОЗДУХА

Область возможных начальных параметров влажного воздуха в d,h- диаграмме для проведения процесса осушения на основе сорбции значительно шире, чем для традиционного механического способа (рис.7.161б). Она не имеет ограничения по температуре, как для механического осушителя ($t_f > 0$ °C, в сложившийся практике конденсационный способ осушения используется до значений температуры воздуха 5...10 °C).

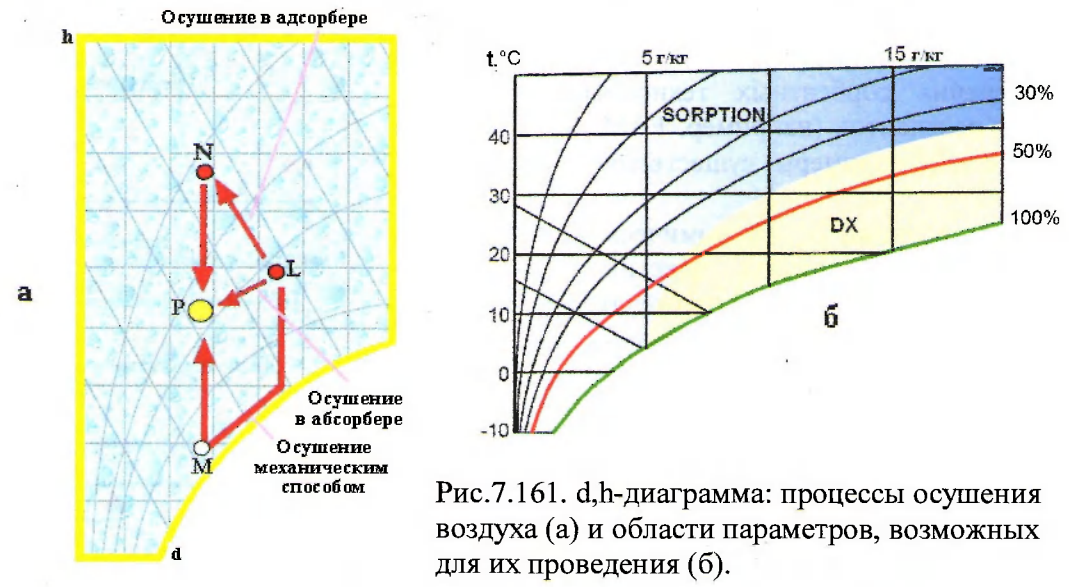


Рис.7.161. d,h-диаграмма: процессы осушения воздуха (а) и области параметров, возможных для их проведения (б).

Области преимущественного использования двух данных принципиально разных способов осушения показаны на рис.7.162. При повышении температуры осушаемого воздуха эффективность конденсационного способа увеличивается, а сорбционного уменьшается. Каждому значению относительной влажности φ воздуха отвечает определенное значение температуры t*, при которой рассматриваемые способы осушения равноэффективны, например, при φ = 30 % → t* = 28 0C. Точки равной удельной производительности для осушителей обоих типов для одинаковых значений φ = idem смещаются с ростом φ в область более низких температур: φ = 40 % → t* = 25 °C; φ = 50 % → t* = 22 °C; φ = 60 % → t* = 18 °C.

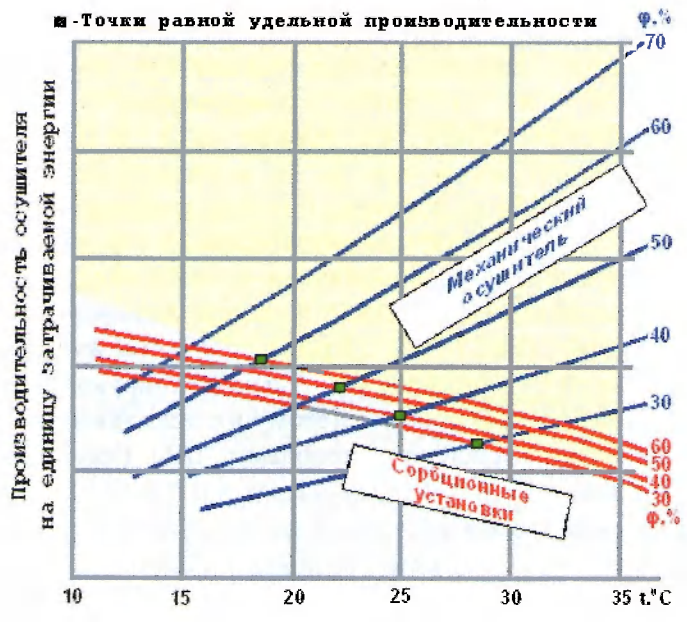


Рис.7.162. Зависимость* рабочих характеристик осушительных установок от температуры при различных значениях относительной влажности воздуха.

На рис.7.162 ось ординат не имеет шкалы в связи с тем, что в численном выражении эти данные существенно различаются для установок различных производителей, однако качественная картина сохраняется.

*www.way-technovation.com/Dehumifier/comperis.htm

Таким образом, конденсационный способ осушения (DX) предпочтителен при высоких значениях относительной влажности и температуры (при $t > t^*$).

Следует заметить, что разграничение областей использования способов осушения на рис.7.162. выполнено по данным силикагелиевых роторов, и не может быть распространено на другие современные адсорбционные материалы. Полезность рис.7.162 в выявлении качественных закономерностей. Количественные оценки должны быть подвержены коррекции в каждом отдельном случае, однако совершенно очевидно, что область применения сорбентных технологий на основе новых десикантов (например, FAM, SWS, Titanium Silicate либо полимеры) существенно расширяется.



Рис.7.163. К выбору способа осушения: СУ – сорбционные установки; МО – механический осушитель [189].

С позиций экономического анализа, учитывающего затраты энергии, сорбционные методы осушения должны применяться (рис.7.163):

- для достижения низкой влажности воздуха ($\tau < 10$ °C);
- когда скрытая нагрузка превышает 20 % общей тепловой нагрузки помещения (SHR < 0,8);
- при обработке большого расхода воздуха, а также во влажном климате, когда доля наружного воздуха более 15 %.

Сравнение сорбционных материалов проведено на рис.7.164 и в табл.7.5. Влагоемкость твердых десикантов существенно ниже емкости жидких сорбентов. Например, при параметрах воздуха $t = 22$ °C и $\varphi = 30$ % молекулярные сита адсорбируют влагу на уровне 0,22 кг H_2O/кг собственной массы или 22 %, а гидрат хлорида лития – 200 % (в условиях близких к насыщению $a = 1000$ %). По этой причине абсорберы с водными растворами солей применяются (с 1920 года) для промышленных объектов с большой влажностной нагрузкой (рис.7.165). Кроме того, жидкие десиканты обладают дезинфицирующими свойствами (рис.7.166), а потому их использование способствует решению проблемы IAQ (качества воздуха).

Таблица 7.5. Влагоемкость различных десикантов a, %.

Десикант	Относительная влажность, %		
	30	50	90
Силикагель	17	30	41
Алюмогель	10	18	33
Цеолит 3А	22	22	22
Триэтиленгликоль	4	18	98
Хлорид лития	200	300	1000

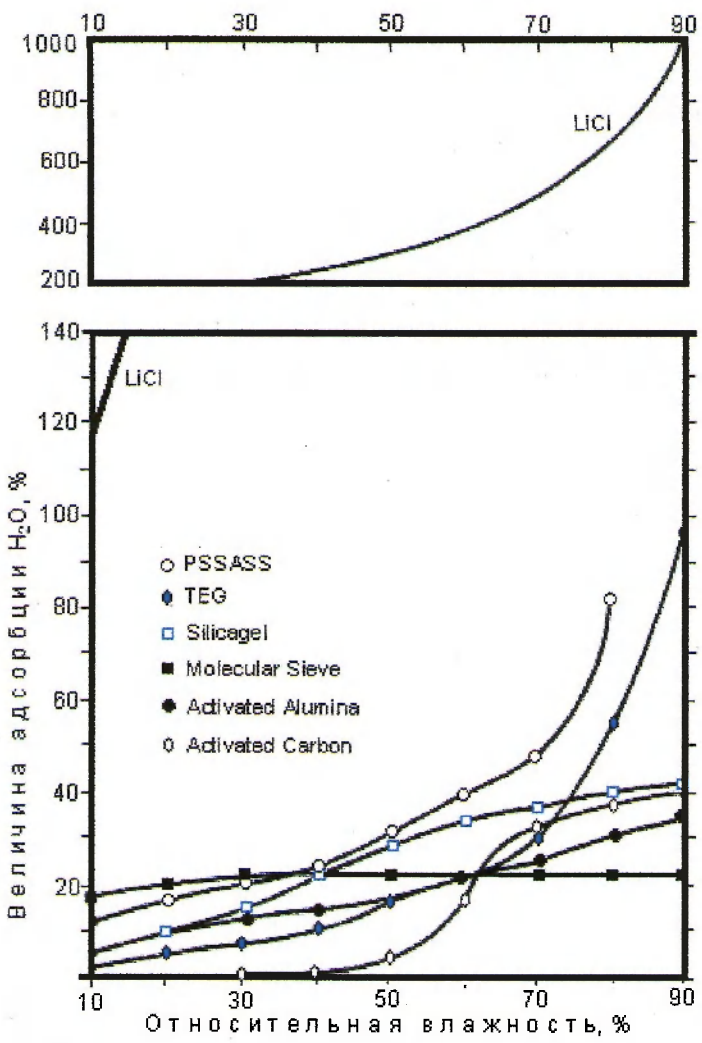


Рис.7.164. Изотермы адсорбции твердых и жидких десикантов при t = 22 °C [189]:
PSSASS – polystyrene sulphonic acid sodium salt solutions – растворы натриевой соли полистироловой сульфокислоты.

Рис.7.165. Абсорбционная установка (TEG) для промышленного объекта.



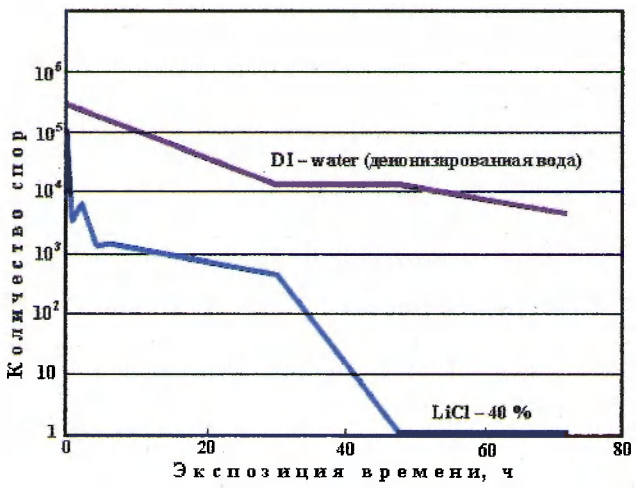


Рис.7.166. Количество спор в водном растворе LiCl и деионизированной воде (данные ORNL).

К числу недостатков абсорберов, можно отнести частичный унос с потоком воздуха капель дорогостоящего раствора, его коррозионное воздействие на металлы, а также высокую стоимость установок при больших нагрузках по воздуху, с учетом значительного роста энергетических затрат на регенерацию сорбента (рис.7.167).

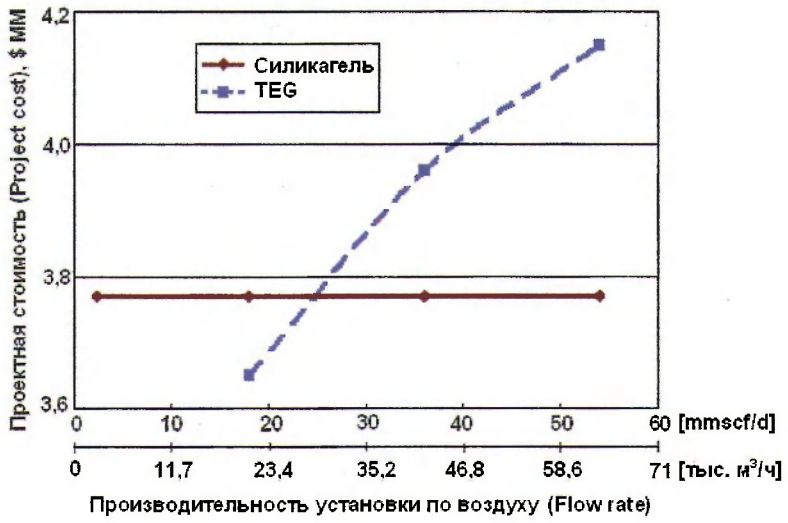


Рис.7.167. Сравнение стоимости сорбционных установок [153].

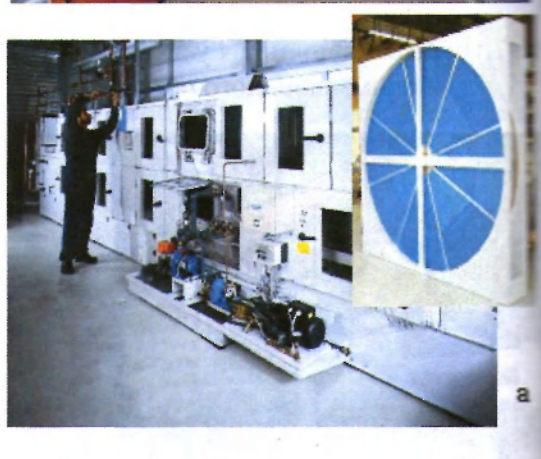
В настоящее время для различных коммерческих объектов: супермаркетов, складов, подземных станций метрополитена, ледовых арен, ресторанов “Fast Food” (“Quick-Service”), отелей, передвижных театров (“Movie Theaters”), школ, больниц и др., требующих осушения воздуха широко применяются адсорберы “Honeyvent”. Они, по сравнению с абсорберами (рис.7.165, 7.168), обладают значительно лучшими массогабаритными характеристиками.

Стоимость этих аппаратов в последние годы существенно уменьшилась за счет снижения цен на твердые десиканты, в т.ч. и молекулярные сита (более чем на 50 % по отношению к уровню 1986 г.) [189]. Для искусственных цеолитов она составляет 0,5…5 $ (в зависимости от марки) за 1 кг.



б





а

Рис.7.168. Установки кондиционирования воздуха для коммерческих объектов с ротором-осушителем (а) и абсорбером (б).

Роторы установок Honeyvent обладают большим сроком эксплуатации Live-time: 10…15 лет. Эффективность 10-летнего ротора составляет 90 % от номинального значения. При этом, работая во влажной среде, они свободны от бактерий. Это подтвердили испытания Seibu Giken, проведенные в атмосфере предприятий по переработке сточных вод.

Существенным преимуществом роторно-сорбентных установок является непрерывность технологии, что обеспечивает требуемые конечные значения параметров воздуха практически на постоянном уровне без пульсаций, присущих альтернативной “batch-type” (рис.7.169).

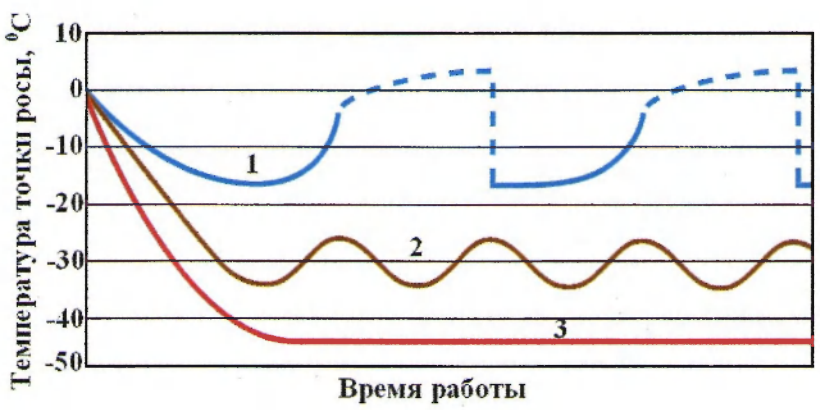


Рис.7.169. Динамические характеристики процесса осушения воздуха в адсорбционных установках: “batch-type” (1 – одиночная башня, 2 – два переключающихся аппарата) и “Honeyvent” – 3.

На рис.7.170, в качестве примера, приведены кривые адсорбции и десорбции двух переключающихся аппаратов с силикагелем, работающих в системе кондиционирования воздуха с регенерацией адсорбента за счет применения солнечной энергии.

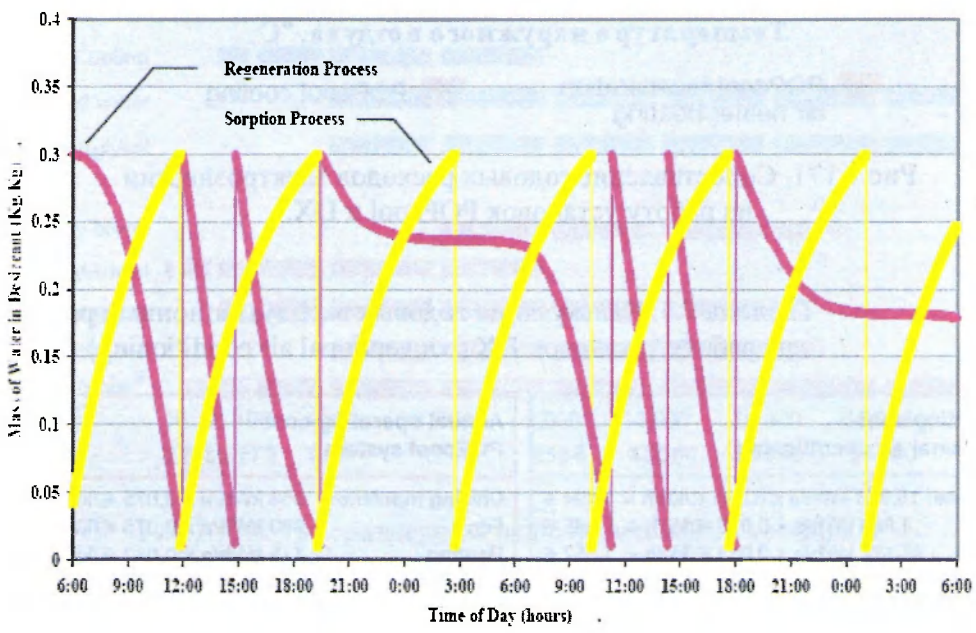
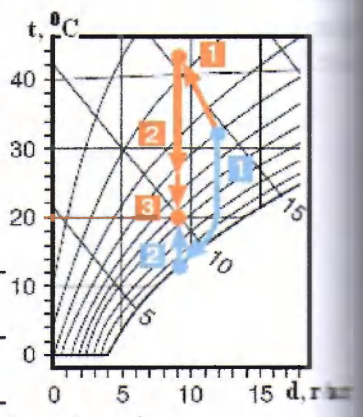


Рис.7.170. Динамика цикла работы установки осушения воздуха с двумя стационарными переключающимися адсорберами [309].

В завершении темы, и в дополнение к материалам сопоставления различных способов осушения, приведенных на с. 284 (рис.7.126), имеет смысл обратиться к данным компании Мунтерс, которая провела детальное сопоставление эксплуатационных затрат на осушение воздуха до уровня d = 9 г/кг для роторной установки “POPcool” (Honeyvent) и холодильной машины DX в круглогодичной СКВ для офисного здания производительностью 10 тыс. м³ [258]: рис.7.171, табл.7.5.

Эти данные не только подтверждают преимущество роторно-сорбентных технологий, но также дают представление о фактическом поэлементном сокращении затрат на организацию процесса в части расходов на холодильную машину, нагревание воздуха (в т.ч. на регенерацию сорбента) и работу вентилятора.



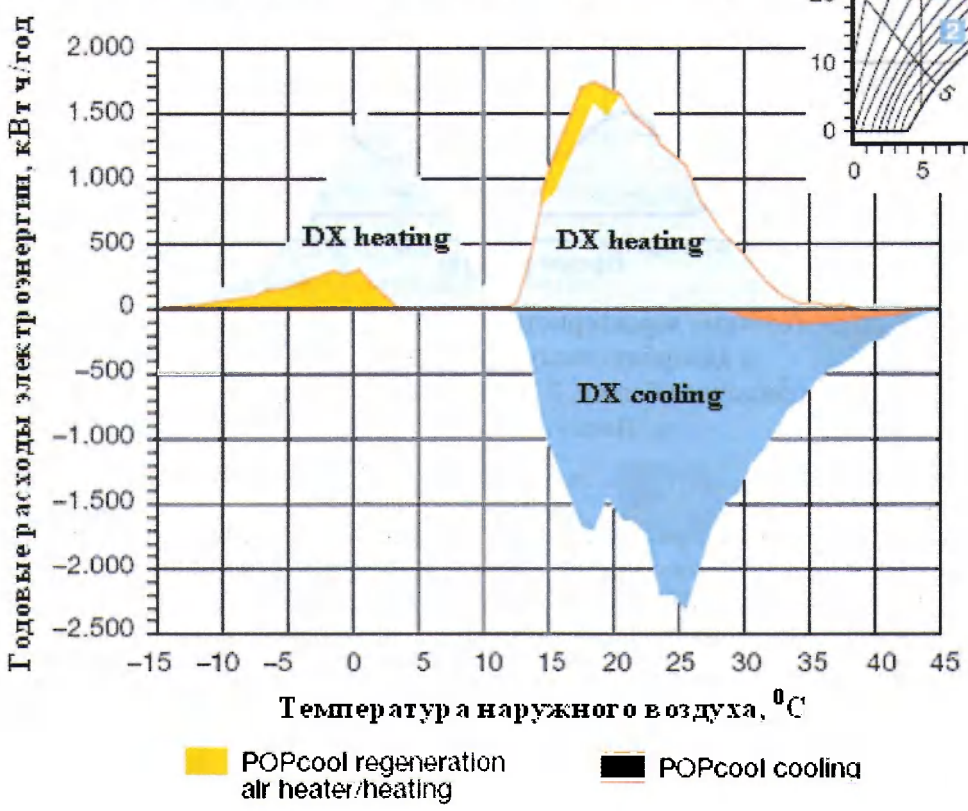


Рис.7.171. Сопоставление годовых расходов электроэнергии на работу установок POPcool и DX.

Таблица 7.5. Калькуляция годовых эксплуатационных расходов (€) на работу установок DX (conventional air conditioning) и POPcool.

Annual operating cost of a conventional air conditioning			Annual operating cost POPcool system		
Chilling machine:	15.913 kWh/a x 0,075 €/kWh =	1.194 €	Chilling machine:	563 kWh/a x 0,075 €/kWh =	43 €
Fan:	4.866 kWh/a x 0,075 €/kWh =	365 €	Fan:	1.980 kWh/a x 0,075 €/kWh =	148 €
Heating:	47.177 kWh/a x 0,033 €/kWh =	1.557 €	Heating :	12.415 kWh/a x 0,033 €/kWh =	410 €
Post heating:	27.761 kWh/a x 0,015 €/kWh =	417 €	Regeneration energy:	22.474 kWh/a x 0,015 €/kWh =	337 €
Total	95.717 kWh/a	3.533 €	Total	37.432 kWh/a	938 €

Справочник компании Мунтерс [290] приводит обобщенные данные для рассмотренных установок осушения конденсационного типа, абсорберов и адсорберов по глубине осушения, в соответствии с достижимым значением температуры точки росы (рис.7.172), и по воздухопроизводительности (рис.7.173). Как отмечалось в главах 6 и 7, наиболее глубокое осушение обеспечивают адсорбционные установки.

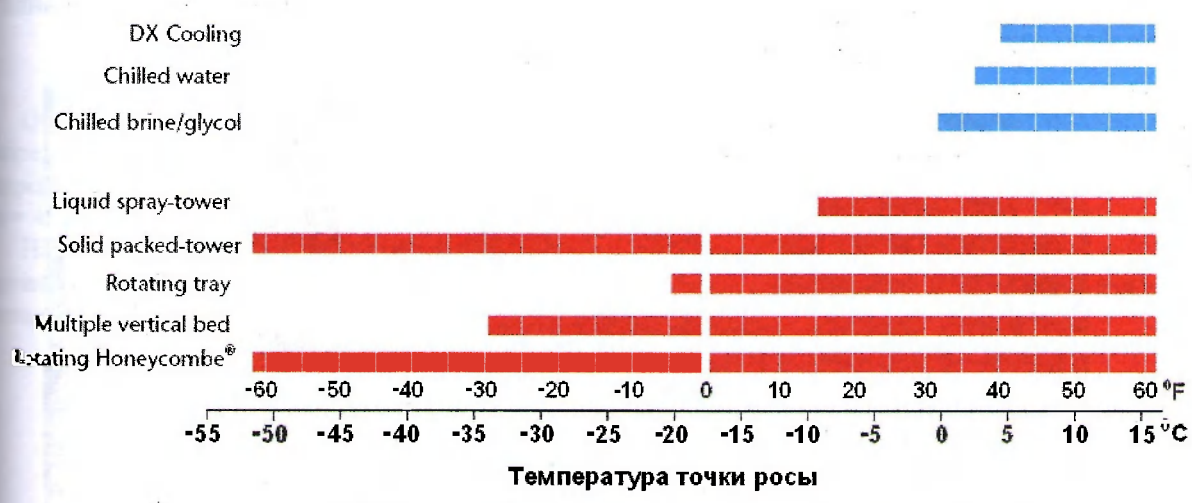


Рис.7.172. Диапазоны рабочих значений температуры точки росы осушенного воздуха в различных установках:

DX Cooling – воздухоохладители непосредственного кипения хладагента; Chilled water – водяные воздухоохладители; Chilled brine/glycol – воздухоохладители с незамерзающей жидкостью (гликолиевые); Liquid spray-tower – абсорберы; Solid packed-tower – переключающиеся стационарные адсорберы с насыпным слоем десиканта; Rotating tray – кассетные адсорберы с тарельчатым ротором; Multiple vertical bed – кассетные адсорберы с барабанным ротором; Rotating Honeycombe – адсорберы с вертикальным ротором с регулярной насадкой.

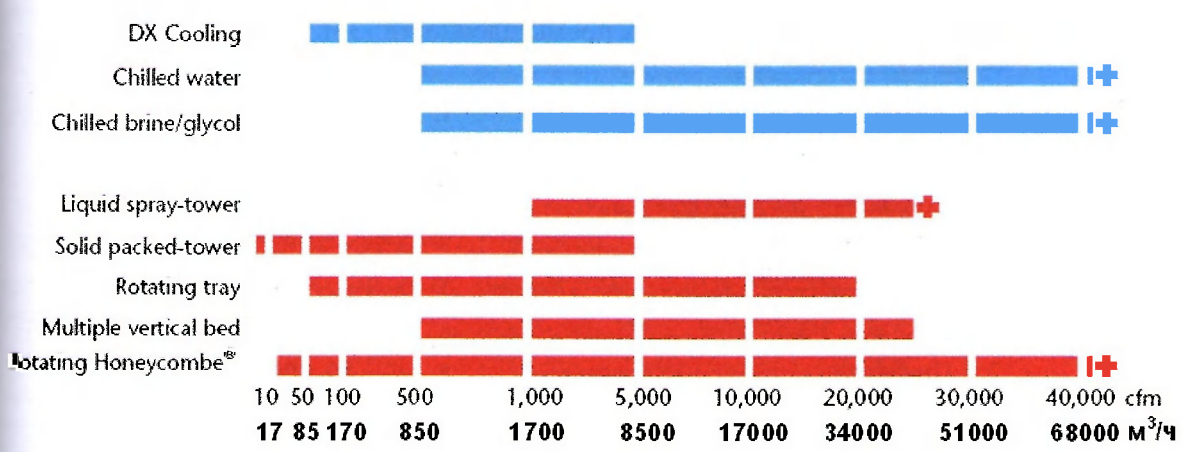


Рис.7.173. Типоразмерный ряд осушительных установок по их воздухопроизводительности* (обозначения по рис.7.172).

*Знаком (+) отмечены установки, производительность которых может быть увеличена за счет набора модулями меньшей единичной производительности

8. УВЛАЖНЕНИЕ ВОЗДУХА

Увлажнение воздуха (приточного воздуха СКВ либо непосредственно в помещение) необходимо по требованиям различных технологий промышленного производства (текстильная, кожевенная, пищевая, табачная, целлюлозно-бумажная промышленность, полиграфия; выращивание и хранение грибов, оранжереи, фрукто- и овощехранилища, птицефабрики; лакокрасочные участки и др.), а также при комфортном кондиционировании воздуха в холодном климате (зимнем периоде года) [36, 210].



Таблица 8.1. Рекомендуемые значения t и φ воздуха в различных отраслях промышленности [36].

Вид производства	t, ^{0}C	φ, %
Бумажный склад	18…20	60…65
Кожевенно-обувной комбинат	10…20	65…70
Цех кожаных изделий	20…23	55…65
Ткачество хлопка	22…25	70…85
Ткачество льняного полотна	20…25	70…75
Кручение нити искусственного шелка	20…22	70…80
Прядение искусственного шелка	20…22	80…90
Склад для хранения яблок	1…4	90…95
Хранение цитрусовых	3…5	95
Склад для яиц	8…10	70…80
Холодильная камера для мяса	0…3	80…85
Созревание мягких сыров	2…15	85…95
Твердые сыры	2…15	75…85
Картофелехранилище	5	85
Камера созревания колбас	15	80…95
Склад табачного сырья	22…25	70…80
Цех покровного листа сигар	25…30	95

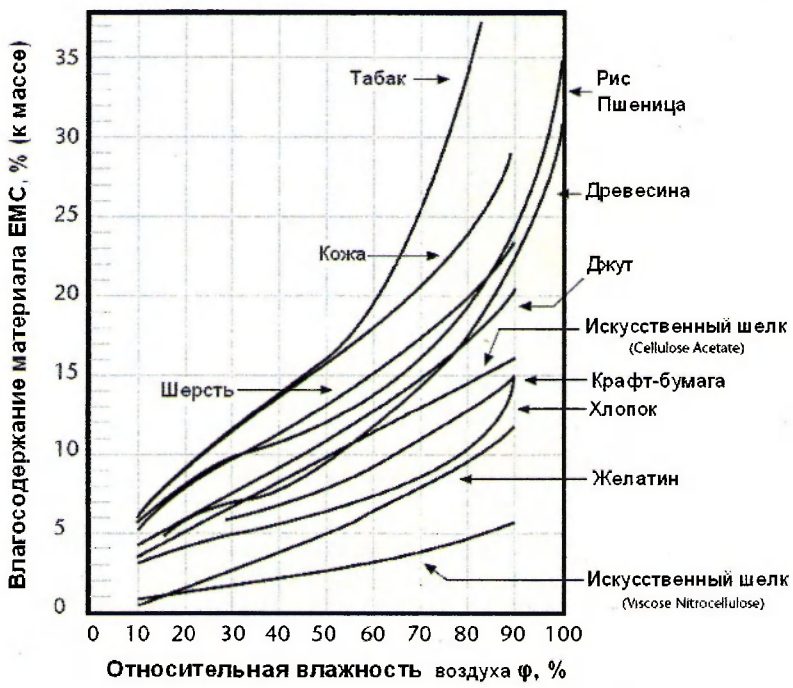
В табл. 8.1 приведены данные по температурно-влажностному режиму ряда производств, которые дают представление о важности организации процесса увлажнения воздуха для выпуска и хранения качественной продукции. Следует иметь в виду, что каждая технология производства определяет свои требования к микроклимату. При выполнении проекта СКВ необходимо учитывать все особенности производственного процесса, уметь трансформировать допустимые отклонения выпускаемых изделий в допустимые отклонения воздушной среды.

Ниже, в расширение данных табл. 8.1, на примере нескольких типичных технологий, приведена дополнительная полезная информация:

Обработка и хранение гигроскопичных материалов, во избежание усушки, требует поддержания определенной относительной влажности воздуха. Например, норма влагосодержания для деревянных изделий 12…18 % обеспечивается в интервале φ = 55…75 %, для бумаги 5…8 % при φ = 40…55 % (рис.8.1б).

На рис.8.1 приведены данные по равновесным значениям влагосодержания EMC (equivalent moisture content) различных материалов при температуре 24 ^{0}C в широком диапазоне значений относительной влажности воздуха.

а



б

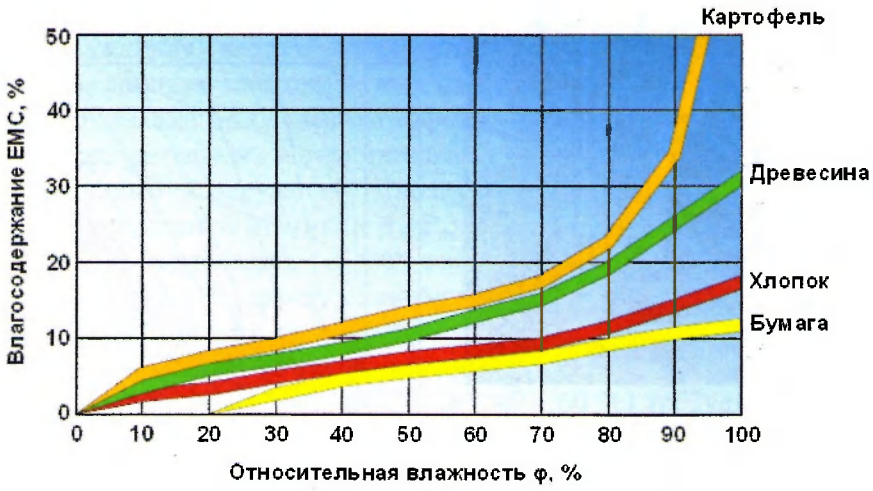


Рис.8.1. Зависимость влагосодержания EMC гигроскопичных материалов от φ при t = 24 ^{0}C: а – [290], б – данные Axair Ltd.

Типографская печать газет, на одном из этапов, предполагает подачу бумаги с влагосодержанием 8 % и температурой 45 ^{0}C, на рис.8.2: состояние т.а. В условиях окружающей воздушной среды, имеющей t = 25 ^{0}C, бумага будет быстро терять влагу (процесс а-в), что может привести к обрыву полосы. Для восстановления влагосодержания бумаги необходимо проводить процесс увлажнения воздуха до параметров: d = 10 г/кг, φ = 55 %, t = 25 ^{0}C, при этом процесс, характеризующий изменение влагосодержания бумаги будет отвечать линии а-с.

Humidification of winder area

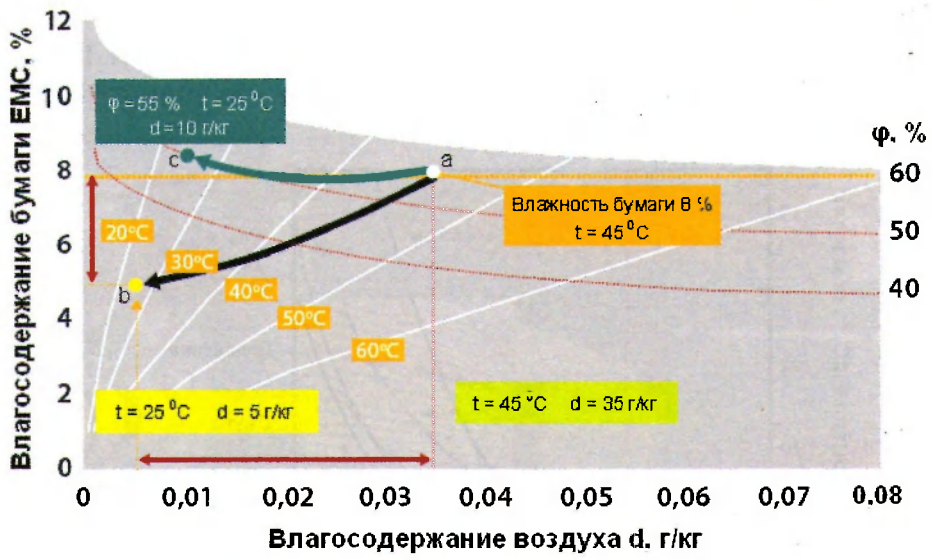


Рис.8.2. ЕМС, d –диаграмма, связывающая влагосодержания бумаги и воздуха.

Температурно-влажностный режим, оптимальный для процесса покраски автомобилей (optimum constant drying line) соответствует диапазону параметров воздуха: 21°C/62 %…29 °C/68 % [262], рис.8.3, и требует увлажнения воздуха.

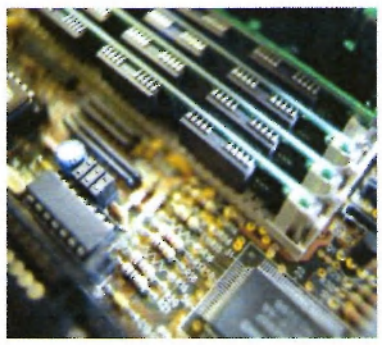
Рис.8.3. Зона параметров воздуха в d,h-диаграмме, необходимых для процесса покраски автомобилей.

Увлажнение воздуха должно применяться в помещениях информационных центров, в центрах связи, АТС, типографиях, участках оперативной полиграфии (ризография, ксерокопирование), офисных помещениях с различного рода оргтехникой (принтеры и пр.), – снимая избыточное статическое электричество. Сухой воздух способен формировать большой статический заряд, который может привести к негативным последствиям, в т.ч. и пожару.

Современное электронное оборудование характеризуется очень плотной компоновкой модулей, элементы которых изготавливаются из сверхтонких материалов. Накопление электрического статического заряда и, соответственно, его разряд может привести к разрушение электроники. При относительной влажности воздуха $\varphi > 40\ \%$ статическое электричество не накапливается, при $\varphi < 30\ \%$ этот процесс имеет место. В воздухе с относительной влажностью 20 % возможно накопление статического заряда в 35000 В, при $\varphi = 70\ \%$ только 1500 В (табл.8.2 [168]).



Foto: Kokomo Tribune, Tim Bath/AP



электронные платы

Таблица 8.2. Данные по статическому электричеству.

Условия	*Статический заряд, В при φ*	
	65…90 %	10…20 %
Ходьба по полу с виниловым покрытием	250	12000
Ходьба по ковровому покрытию	1500	35000
Работа у станка	100	6000
Рабочее место на пенополиуретане	1500	18000

В процессе увлажнения воздух дополнительно очищается от аэрозольных частиц, освобождается от различных запахов и, в некоторой степени, от избыточного количества углекислого газа CO_2, за счет разбавления (эффект мокрого скруббера), а также ионизируется (возрастает число положительных и отрицательных ионов, как тяжелых, так и легких).

Подогрев холодного наружного воздуха с малым содержанием влаги, характеризующемся низкими значениями $\rho_п$, $P_п$, d, – приводит к понижению относительной влажности воздуха в помещении φ за счет роста $P_п''(t)$. В случае комфортного кондиционирования значение φ может оказаться ниже диапазона рекомендуемых значений относительной влажности (рис.8.5).

Для среднестатистического европейского года задача поддержания комфортных параметров воздуха в помещении ($t = 20\ °C$ и $\varphi = 40…60\ \%$) требует увлажнения в течение 4742 часов или 54 % годового времени (рис.8.5). Эти данные были проверены расчетным путем [54], в соответствии с термодинамической моделью СКВ по методу проф. А.А. Рымкевича [81] для климатических условий города Киева. Получен такой же результат: использование процесса увлажнения необходимо в течение 4690 часов (это зоны

1, 5, 6 и 8 данной модели, рис.8.6). Причем, при параметрах наружного воздуха, отвечающих зонам 5, 6, 8 (а это 50 % годового времени) обработка приточного воздуха заключается только в его увлажнении без затрат теплоты или холода. Аналогичная картина складывается и для других городов Украины.

Проведенные расчеты основываются на данных ГОСТ 1635-80 по температурно-влажностному комплексу параметров воздуха городов СССР, для которых в координатах t – φ определены области наружного климата. Известно также распределение годового времени, т.е. количество часов стояния определенных сочетаний параметров, соответствующих элементарным площадкам этих областей. Термодинамическая модель СКВ предполагает разбиение области наружного климата в d,h-диаграмме на зоны, характеризующимися оптимальными (рациональными) режимами работы СКВ. Количество зон зависит от класса тепловлажностных нагрузок. На рис.8.6б показаны только зоны, для котоых необходимо увлажнение воздуха (W).

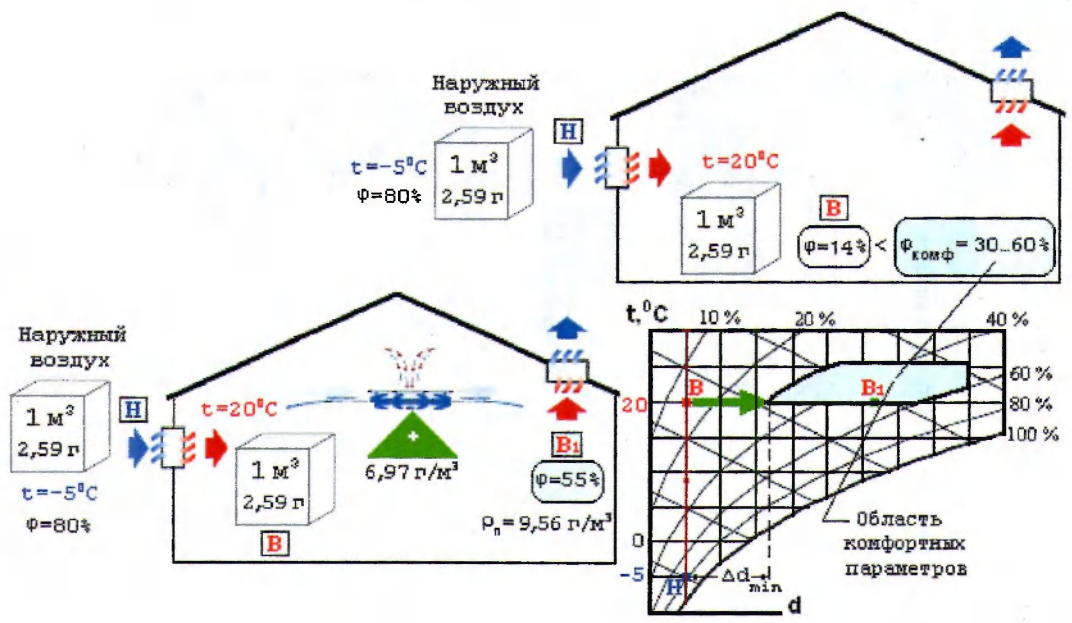


Рис.8.4. К обоснованию необходимости увлажнения воздуха в помещении в зимнее время.

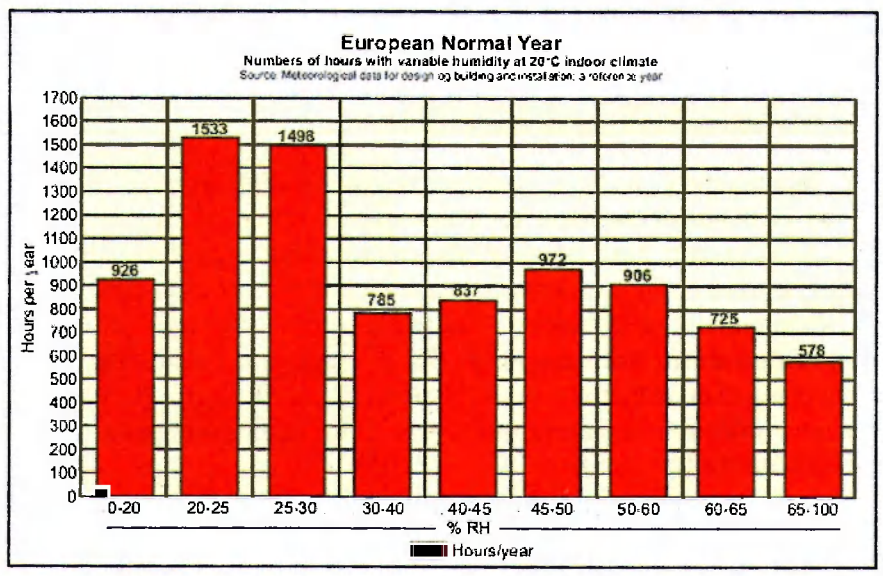


Рис.8.5. Данные по повторяемости значений относительной влажности воздуха в помещении при t = 20 °C для европейской климатической зоны.

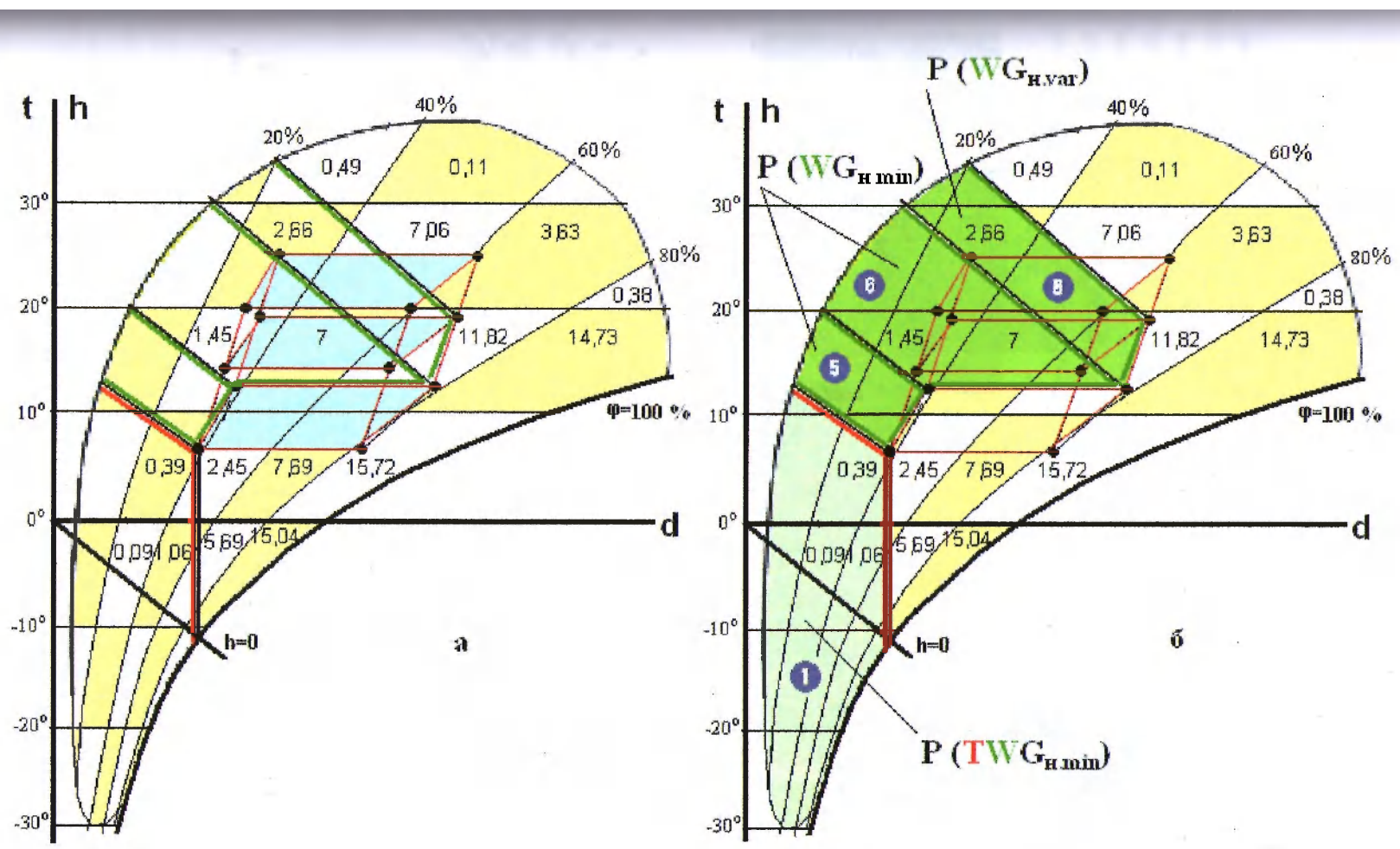


Рис.8.6. Термодинамическая модель СКВ для офисного помещения в условиях климата г. Киева в случае I класса тепловлажностных нагрузок: а – исходная расчетная схема; б – фрагмент модели с зонами 1, 5, 6 и 8, требующими увлажнения приточного воздуха.

Увлажнение осуществляется при непосредственном контакте воздуха с водой либо добавлением в него пара различными способами (рис.8.7):

1. Распылением воды (*atomization*):
   – форсунками в полом пространстве камер орошения, секций приточных воздуховодов, а также непосредственно в помещениях;
   – в аппаратах ультразвукового типа с псевдокипением воды;
   – механическими устройствами центробежного типа.
2. В аппаратах с пленочным режимом течения воды (насадочные, дисковые, барабанные), а также с использованием гигроскопичных материалов.
3. За счет работы парогенераторов (электрические, водяные, паровые, газовые).

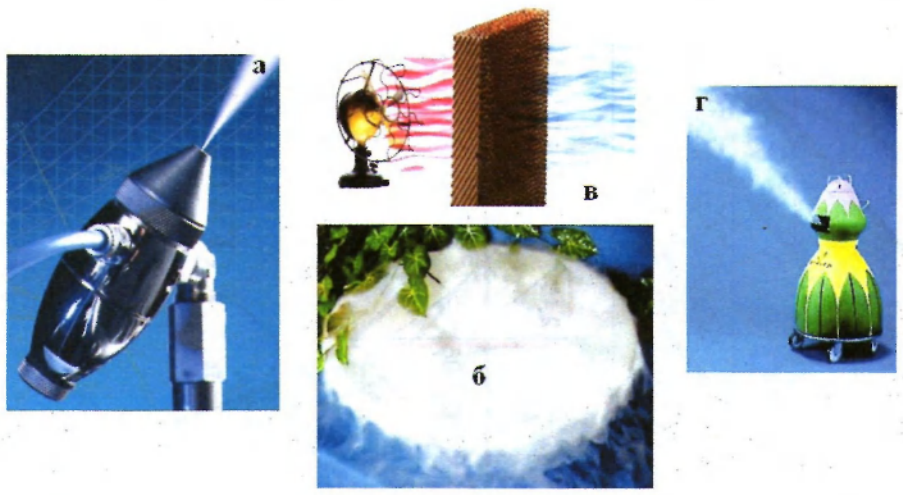


Рис.8.7. Увлажняющие устройства: а – форсунка; б – ультразвуковой аппарат; в – регулярная насадка; г – парогенератор.

Первые два способа относятся к случаю контактирования воды и воздуха (см. § 5.3)*. Процесс увлажнения обычно проводится в адиабатном режиме и интерпретируется в диаграмме влажного воздуха *изоэнтальпой* (рис.5.8, 8.8). Температура воздуха при этом снижается (в пределе до $t_м$) за счет эффекта испарительного охлаждения.

Увлажнение воздуха паром – политропический процесс с незначительным ростом температуры (подробно рассмотрен в § 8.3). В инженерных расчетах линия процесса в d,h-диаграмме, как правило, заменяется *изотермой* (рис.8.4, 8.8).

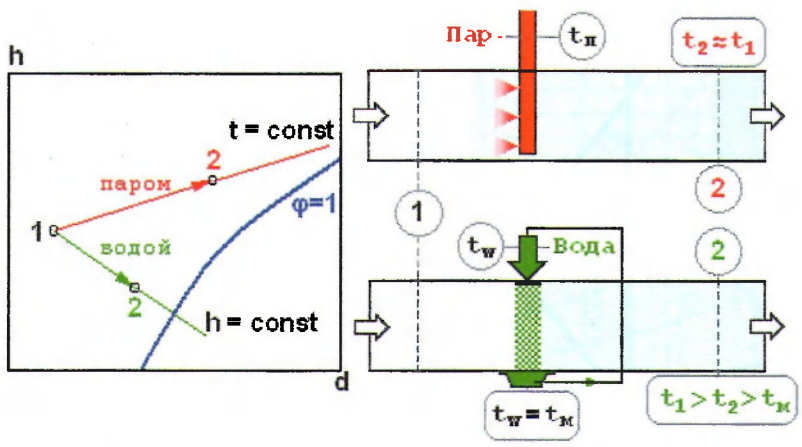


Рис.8.8. Изображение в d,h- диаграмме процессов увлажнения воздуха водой (оборотной) и паром.

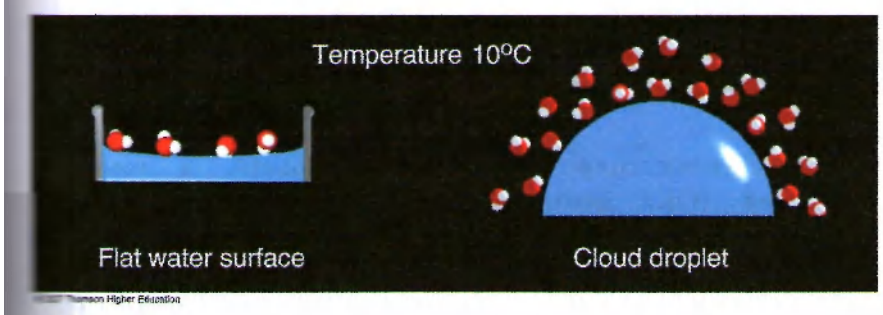
*В общей постановке вопросы обработки воздуха водой в форсуночных камерах и в пленочных контактных аппаратах обсуждены в § 4.2. Однако в контексте задачи увлажнения имеет смысл более детальное изложение. Особый интерес представляет ультразвуковой способ с применением пьезоэлектрических преобразователей.

8.1. УВЛАЖНИТЕЛИ-АТОМАЙЗЕРЫ

Работа атомайзеров (распылителей жидкости) направлена на разрыв сил поверхностного натяжения воды и образование множества капель, составляющих суммарную массообменную поверхность (табл.8.3). При этом в дисперсной среде интенсивность увлажнения увеличивается (рис.8.9). Капля за счет капиллярных сил приобретает форму сферы, а парциальное давление водяных паров над выпуклой поверхностью капли $P_{п}"_{.г}$ выше, чем над плоской поверхностью $P"_{п.о}$ (7.9).



б



а

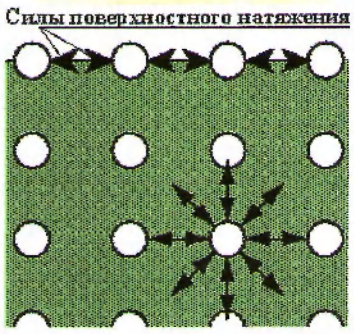


Рис.8.9. Иллюстрации увеличения количества испаряющихся молекул с выпуклой поверхности капли по отношению к плоской поверхности воды (а) и проявления сил поверхностного натяжения (б).

Испарение с выпуклой поверхности капли настолько значительно, что может происходить в влажной атмосфере тумана, соседствуя с явлением конденсации. На рис.8.10. показано превышение значений $\varphi > 100$ % при уменьшении диаметра капли. Поэтому при увлажнении воздуха стремятся к мелкодисперсному распылению воды (в отличие от процесса охлаждения, где нужны крупные капли 1...2 мм).

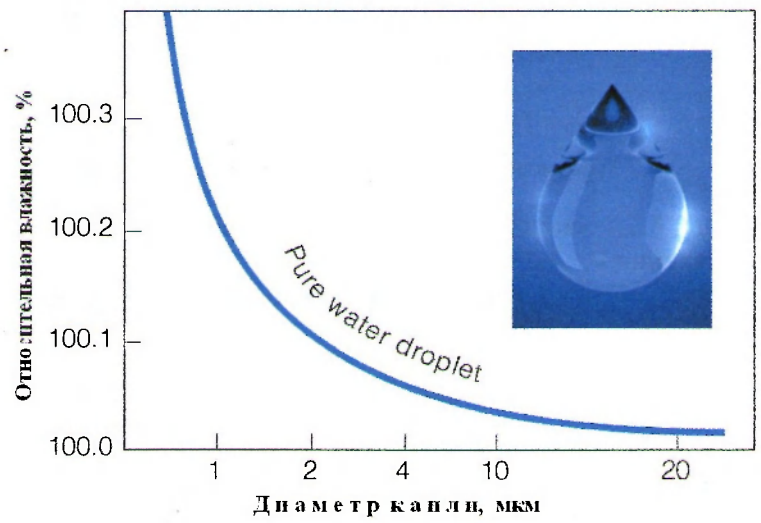
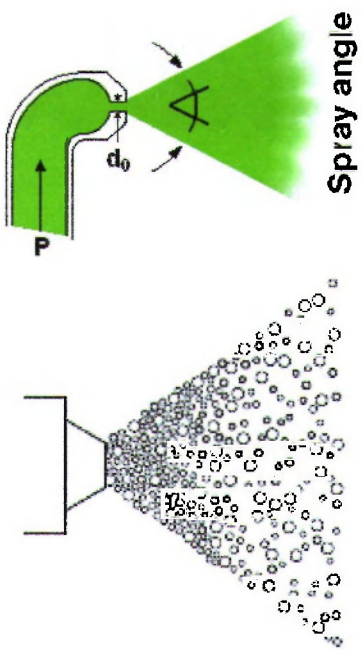


Рис.8.10. Влияние размера капли на относительную влажность воздуха в состоянии тумана.

Таблица 8.3. Соотношение площади поверхности и объема капли (суммарных показателей в 1 л) в зависимости от ее диаметра [304].

Диаметр капли, мкм	*Площадь поверхности одной капли, мм²*	*Объем одной капли, мм³*	*Количество капель в одном литре*	*Общая поверхность капель в одном литре, м²*
2000	12,6	4,19	239 000	3
1000	3,14	0,524	1 910 000	6
500	0,785	0,0655	15 300 000	12
250	0,196	0,00819	122 000 000	24
125	0,0491	0,00102	977 000 000	48
60	0,0113	0,000113	8 840 000 000	100
30	0,00283	0,0000141	70 700 000 000	200
15	0,000707	0,00000177	565 000 000 000	400

8.1.1. ФОРСУНОЧНЫЕ КАМЕРЫ И УСТРОЙСТВА



Для увлажнения воздуха, в частности, в камерах орошения (ОК) центральных кондиционеров, наиболее распространены *гидравлические* форсунки. Поток жидкости поступает в форсунку под избыточным давлением P и пропускается через выходное отверстие с меньшим (по отношению к входному каналу) диаметром d_0. За счет этого увеличивается скорость истечения воды, с которой она «влетает» в воздушный поток и на определенной дистанции распадается на капли (рис.8.11).

Размер капли зависит от многих факторов: он прямопропорционален диаметру выходного отверстия форсунки d_0, коэффициенту поверхностного натяжения σ, плотности распыливаемой жидкости ρ, коэффициенту динамической вязкости μ и обратнопропорционален давлению потока P. Влияние этих факторов на медианный диаметр капли D_{50}, в первом приближении можно оценить по следующей эмпирической зависимости:

$$D_{50} = f(d_0^{0,5} / P^{0,375}) \cdot \sigma^{0,25} \cdot \mu^{0,25} \cdot \rho^{0,125}, \text{ мм} \qquad (8.1)$$

(размерности величин: d_0, мм; P, кг/см²; σ, н/м; μ, Па· с; ρ, кг/м³).

Как видно из формулы 8.1, основное влияние на размер капли оказывает значение диаметра d_0 и величина давления P.

Таким образом, мелкодисперсного распыления можно добиться путем снижения d_0 и увеличения P.

По величине P существует следующая градация гидравлических форсунок:

- низкого давления 0,5…4 бар, D_{50} = 50..100 мкм;
- среднего давления 7…30 бар, D_{50} = 25…50 мкм;
- высокого давления 35…200 бар, D_{50} = 10…15 мкм.

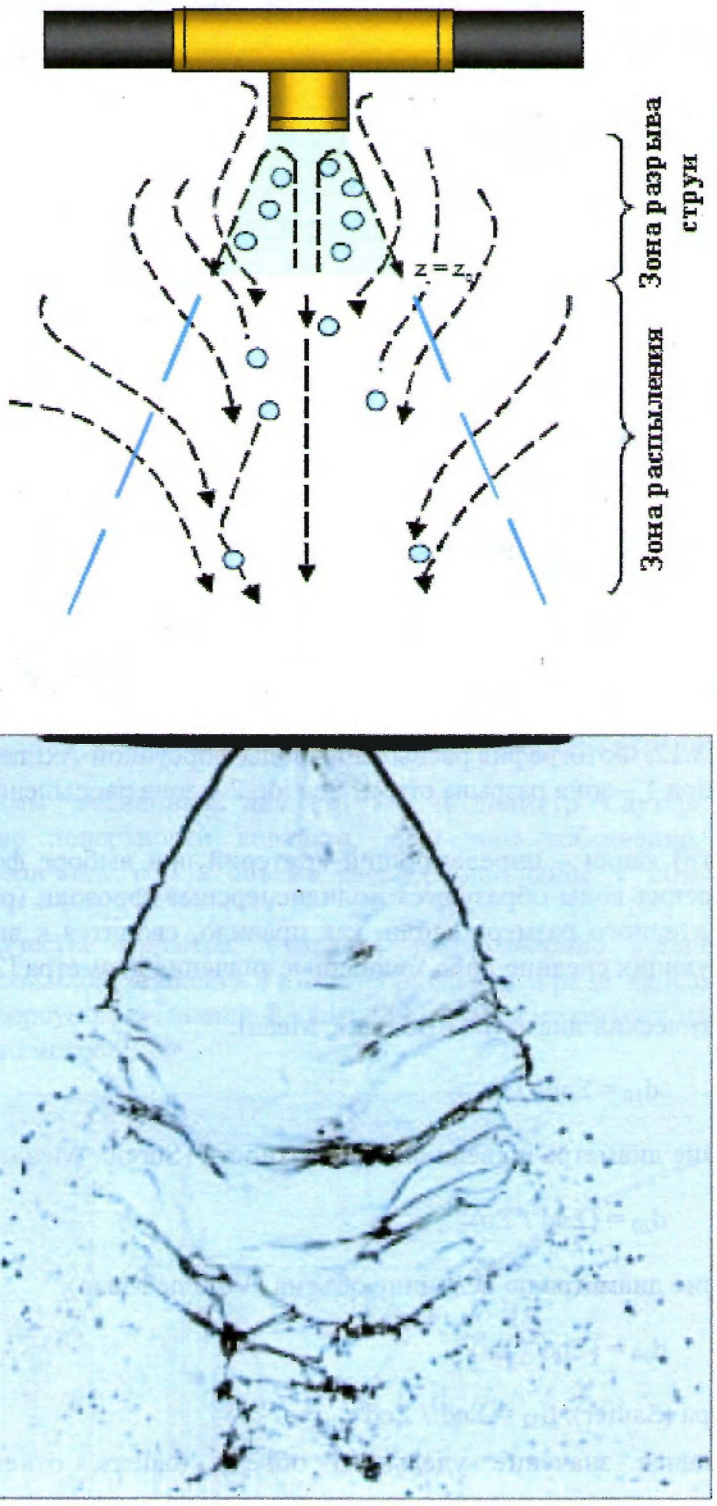


Рис.8.11. Схема образования капель
при работе гидравлической форсунки [120, 251].

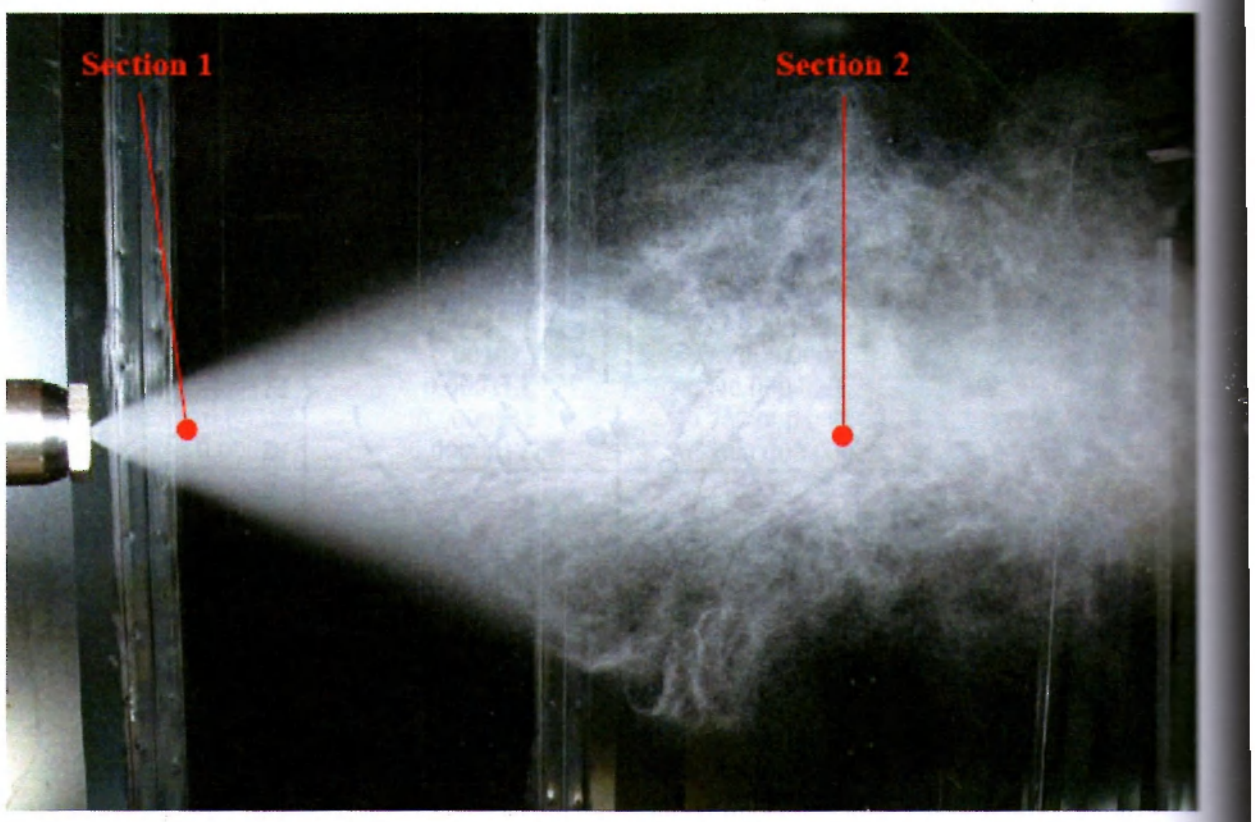


Рис.8.12. Фотография распыления воды форсункой AxEnergy Ltd.:
Section 1 – зона разрыва струи; Section 2 – зона распыления [270].

Размер (диаметр) капли – определяющий критерий при выборе форсунок. Поскольку в результате распыления воды образуются полидисперсные аэрозоли (рис.8.13…8.16), задача определения характерного размера капли, как правило, сводится к вычислению одного из чисел, характеризующих средние либо медианные значения диаметра [291]:

Среднеарифметический диаметр (Arithmetic Mean):

$$d_{10} = \Sigma nd / \Sigma n. \quad (8.2)$$

Среднее значение диаметра по величине поверхности (Surface Mean):

$$d_{20} = (\Sigma nd^2 / \Sigma n)^{1/2}. \quad (8.3)$$

Среднее значение диаметра по величине объема (Volume Mean):

$$d_{30} = (\Sigma nd^3 / \Sigma n)^{1/3}. \quad (8.4)$$

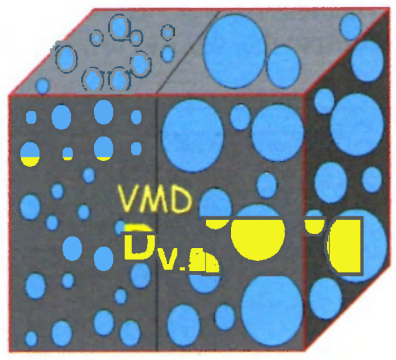
Диаметр Саутера (Sauter): $d_{32} = \Sigma nd^3 / \Sigma nd^2$, (8.5)

выражающий среднее значение удельного объема капель, отнесенного к величине поверхности.

Медианный счетный диаметр DN.5 определяется путем записи диаметров всех частиц в порядке их возрастания и нахождения такого значения, которое делит полученный ряд пополам [78].

Объемный (массовый) медианный диаметр VMD (Volume Median Diameter) или диаметр медианы объема DV.5 (D_{50}) находится из условия:

$$\int_{0}^{DV.5} d/v = \int_{DV.5}^{\infty} d/v = 50\,\%. \qquad (8.6)$$



Это означает, что значение DV.5 является границей между группами мелких и крупных капель, совокупный объем каждой из которых равен половине общего объема.

Объемные диаметры DV.1 (D_{10}) и DV.9 (D_{90}) соответствуют 10 % и 90 % общего объема. Значения DV.1 используются для оценки мелких капель, достигающих сепараторов влаги, DV.9 – для крупных капель, работающих на испарительное охлаждение.

DMAX – максимальное значение диаметра.

В приведенных выражениях (8.2…8.6):
n, d, v – количество, диаметр и объем капель, соответственно.

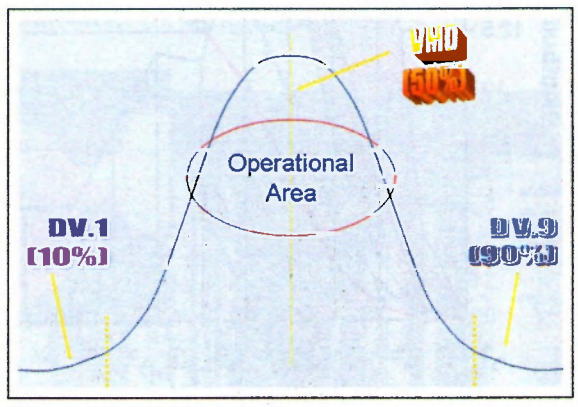


Рис.8.13. К определению медианных значений диаметров DV.5, DV.1 и DV.9 (иллюстрации Robert E. Wolf).

Наиболее употребимы медианный диаметр D_{50} и диаметр Саутера d_{32}, последний характеризует развитие поверхности контакта, ради чего собственно и производится распыление. Знание величины d_{32} и объема распыляемой воды V позволяет рассчитать величину поверхности $F = V/d_{32}$.

На рис.8.14, в качестве примера, показано распределение количества капель и совокупного объема воды, содержащейся в них, для размерного ряда капель, образующегося при работе одной из форсунок компании Lechler [304]. Обработка этих данных определяет следующие значения диаметров:

d_{10} = 46 мкм;
d_{32} = 65 мкм;
DV.5 = 75 мкм;
DV.1 = 38 мкм;
DV.9 = 142 мкм;
DMAX = 180 мкм.

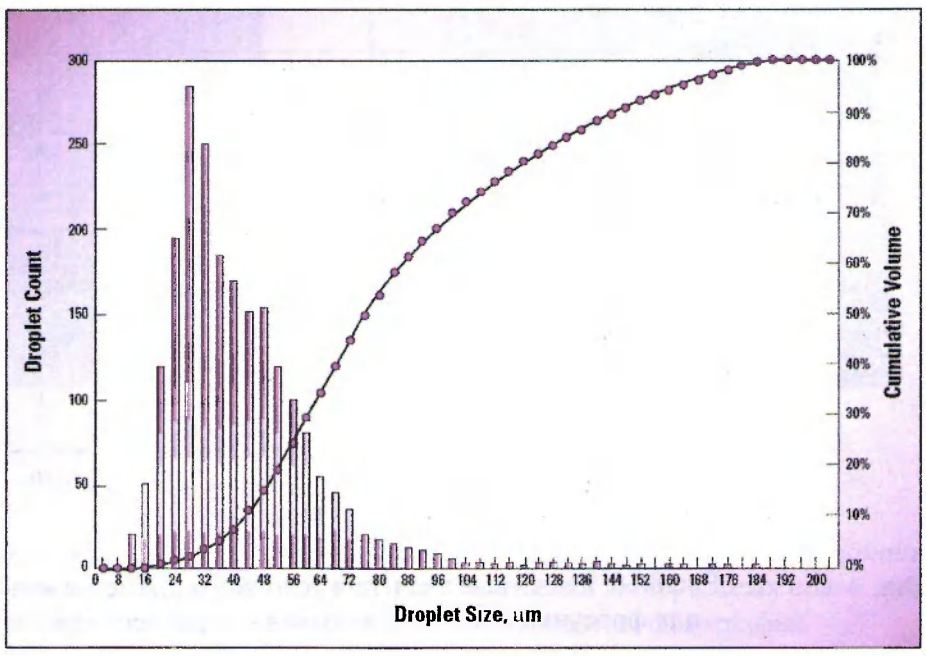


Рис.8.14. Гистограмма распределения капель при работе гидравлической форсунки.

На рис.8.15 и 8.16 представлены данные по распределению капель и расчетным значениям диаметра: d_{10}, d_{20}, d_{30}, d_{32}, D_{50}, полученные для форсунки ASI-8R (Atomizing Systems Inc.).

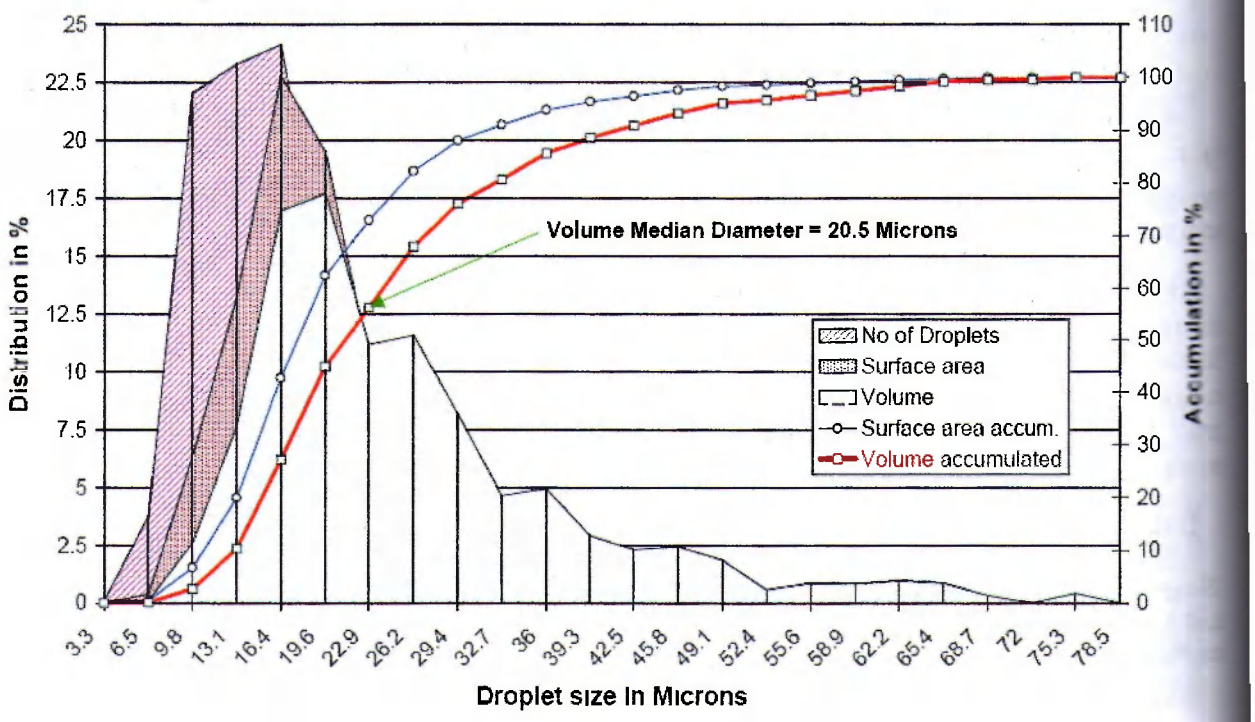


Рис.8.15. Картина распределения капель при распылении воды гидравлическими форсунками ASI-8R при P = 70 бар.

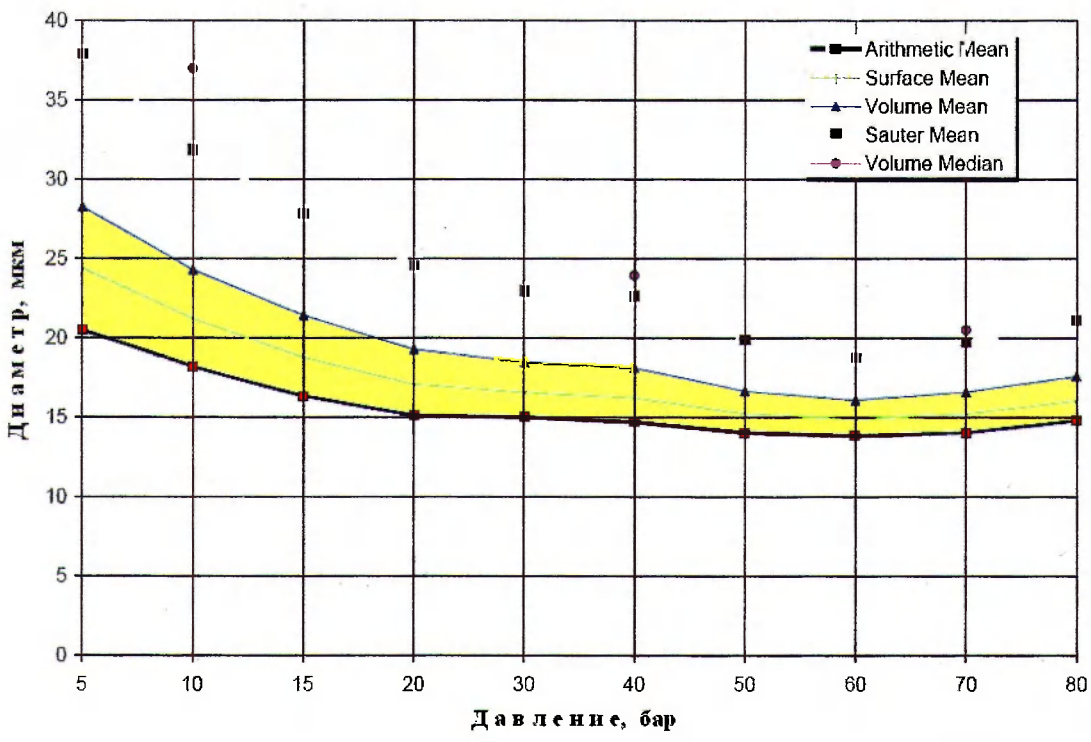


Рис.8.16. Расчетные значения условного диаметра капель для форсунки ASI-8R при различных давлениях воды.

8.1.1.1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Форсунки низкого и среднего давления до 20 бар, как правило, применяют в камерах орошения ОК (STAW)* (рис.8.17…8.19, 8.25, 8.26). Гидравлические форсунки ОК являются устройствами центробежного типа [12, 69].

**STAW – Spray Type Air Washer (Luftwasche, нем.)*

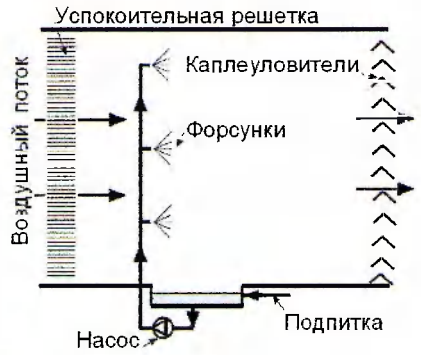
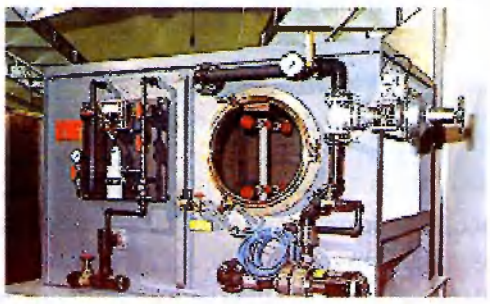
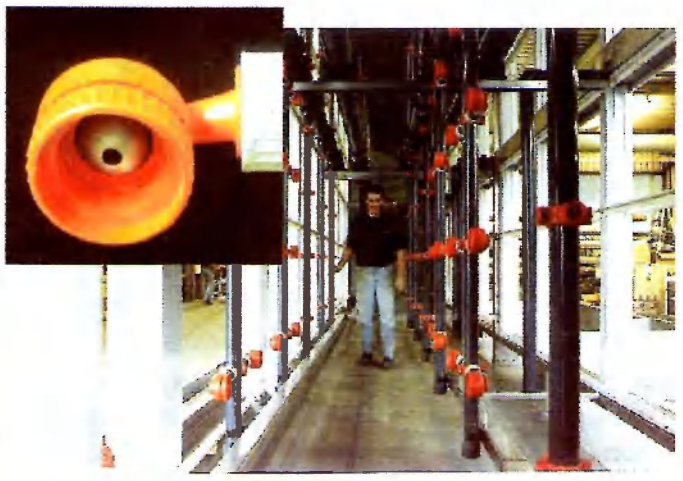


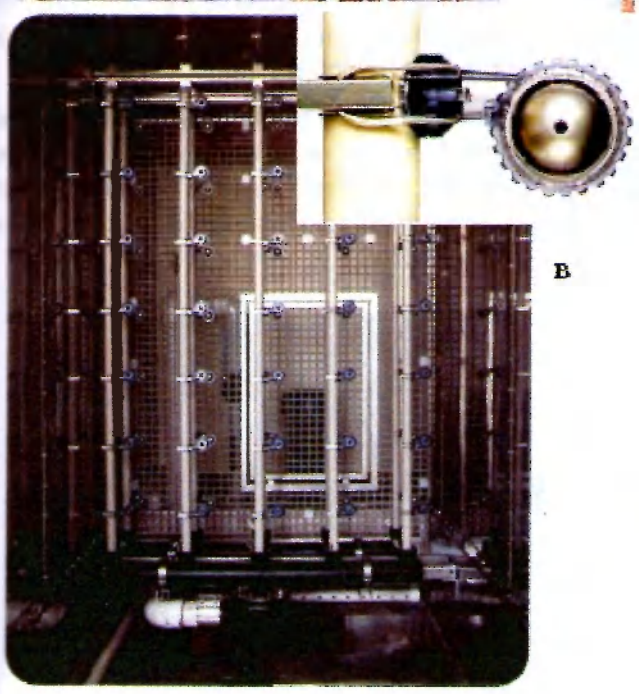
Рис.8.17. Схема однорядной камеры орошения.

На рис.8.18 приведены камеры орошения ведущих производителей.

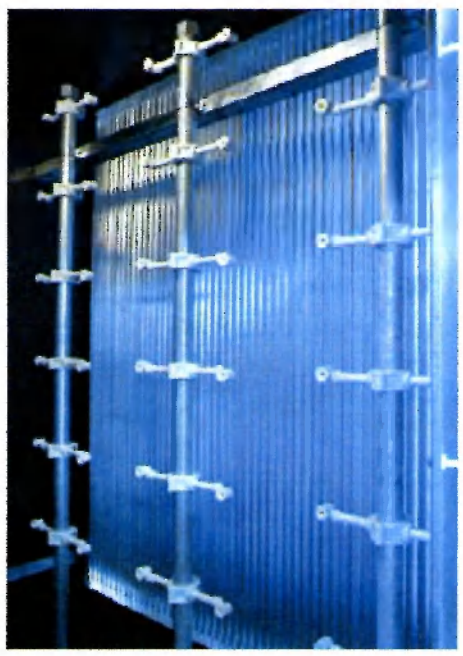


а





в



б

Рис.8.18. Камеры орошения с центробежными форсунками компаний:
Unitech – а, Sital Klima (CTS series) – б, Luwa – в.

Качество распыления воды напрямую связано с состоянием внутренней полости форсунки, которая со временем может зарастать за счет отложений минеральных солей либо изменять свою геометрию из-за коррозии. Ниже на рис.8.19 приведены фотографии

работающей системы форсунок камеры орошения. Здесь хорошо видно различие в качестве распыления форсункой нормального рабочего состояния (рис.8.19б) и в случае засорения или повреждения коррозией (рис.8.19в) – увеличение размера капель. В связи с этим необходима периодическая (не менее одного раза в 6 месяцев) ревизия форсунок.

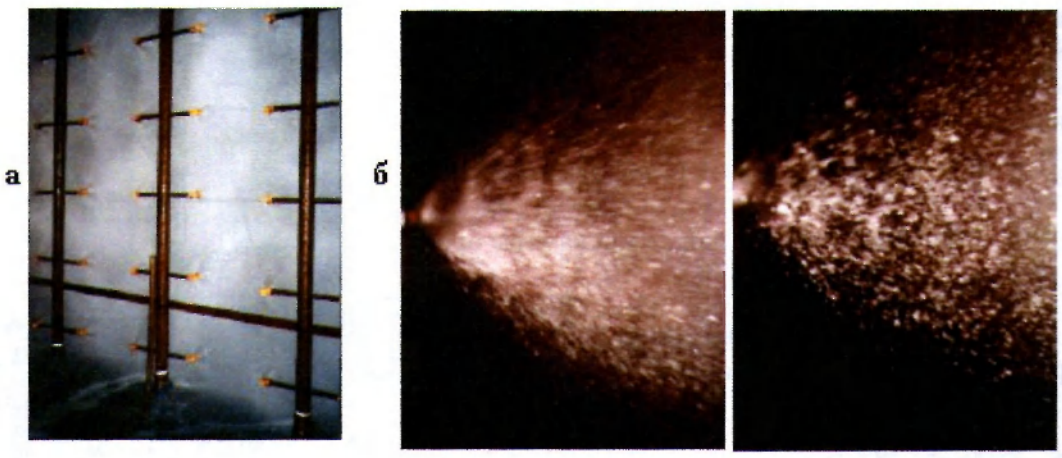


Рис.8.19. Фотоматериалы Nalco Chemical Company:
а – распыление воды в форсуночной камере орошения; б – факел распыла кондиционной форсунки; в – факел распыла дефектной форсунки.

Распыление воды в гидравлических центробежных форсунках обеспечивается за счет:

- эксцентричного подвода жидкости при смещении осей водяного канала и распылительной камеры, – угловые тангенциальные форсунки (*Tangential flow*), рис.8.20, 8.23;
- осевого ввода жидкости (*Axial flow*) с применением специальных вкладышей, закручивающих поток: форсунки с завихрителем-шнеком (имеют внутреннюю винтовую нарезку) (рис.8.21, 8.23) либо эвольвентные форсунки (специальные спирали) (рис.8.24).

Факел распыла на выходе форсунок может быть полным (Full Cone), полым (Hollow Cone) либо в виде узкого сектора (щелевое распыление (Flat)), с различным углом раскрытия (Spray Angle). Полый факел водяной пленки с воздушным вихрем внутри способствует интенсивности увлажнения. При этом распределение капель характеризуется наименьшим значением диаметра, например, диаметра Саутера d_{32} (рис.8.22).



Рис.8.20. Схема и фотография
тангенциальной центробежной форсунки с полым факелом.
* полный факел предпочтительнее для режима испарительного охлаждения (см. главу 9)

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

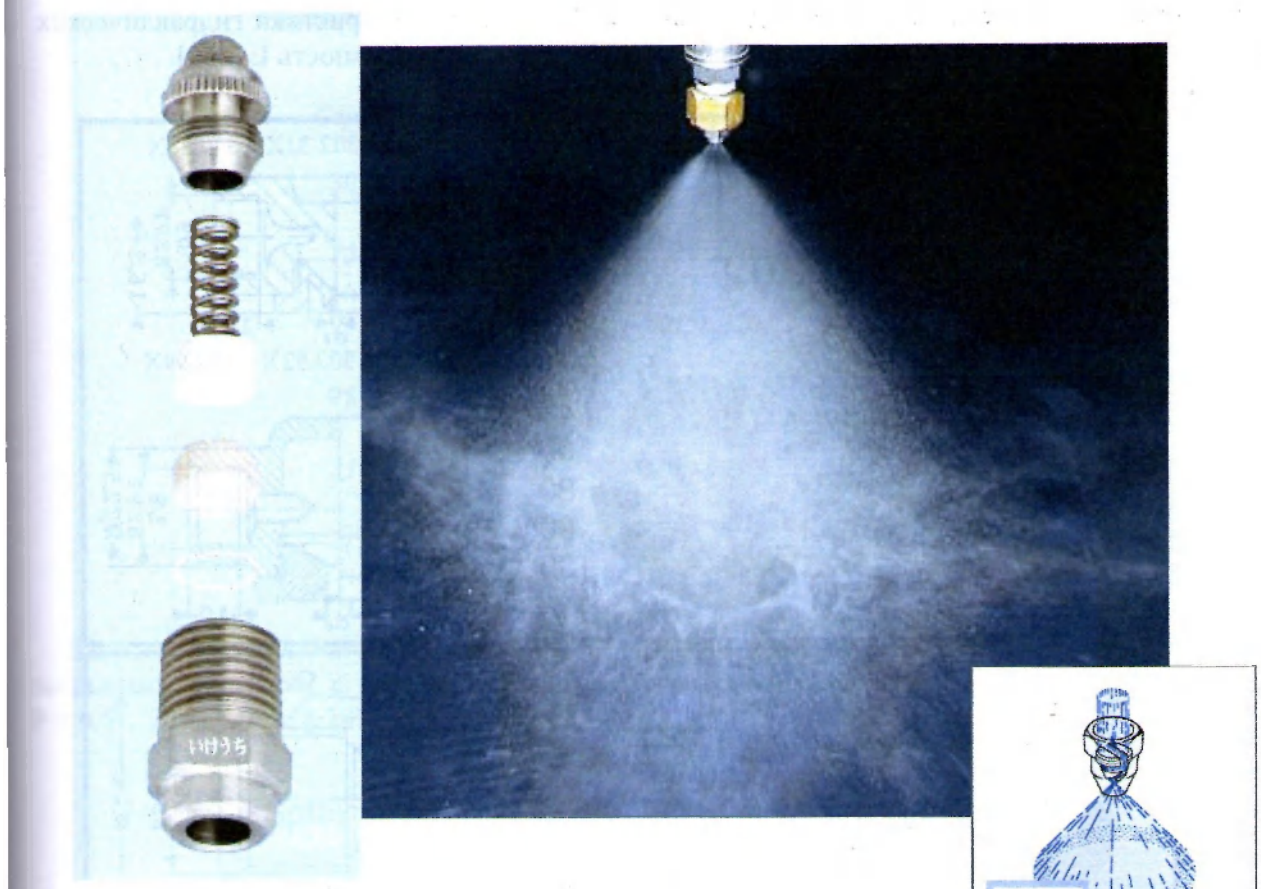
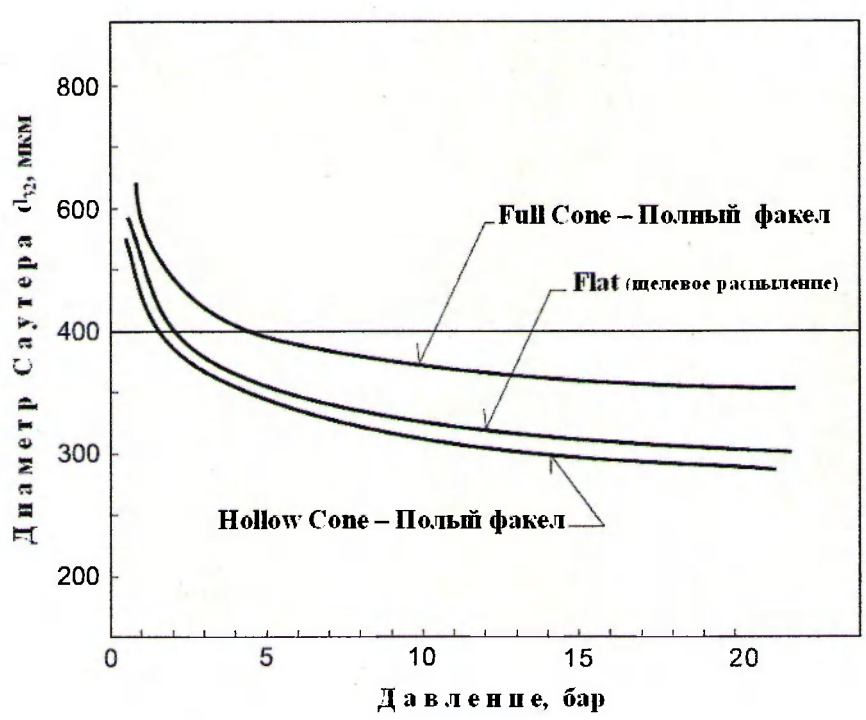


Рис.8.21. Схема, устройство и фотография центробежной форсунки* с осевым вводом жидкости и полым факелом.

*форсунки типа K (KB) компании H. Ikeuchi & Co., Ltd (Japan)





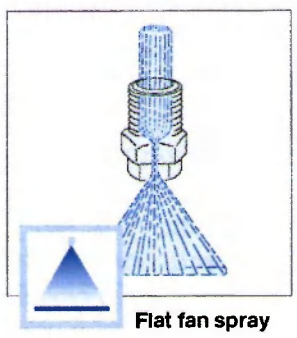


Рис.8.22. Зависимость величины d_{32} от типа факела распыла и давления воды.

На рис.8.23 и в табл.8.4 представлены основные рабочие характеристики гидравлических форсунок с полым факелом компании Lechler , в т.ч. и производительность L [259].

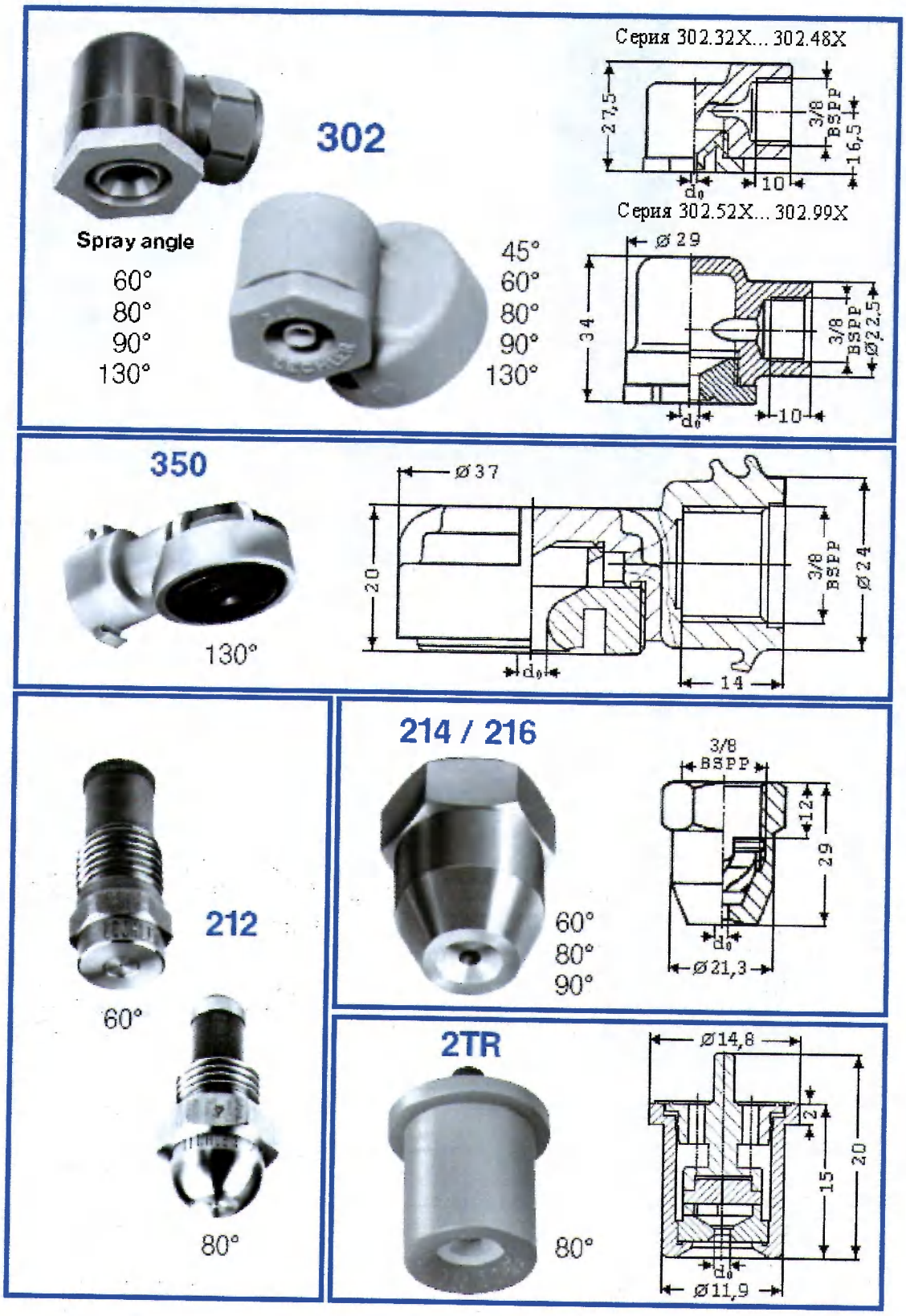


Рис.8.23. Форсунки Lechler: угловые тангенциальные – серии 302 и 350; осевые с завихрителями – серии 212, 214/216 и 2TR.

Таблица 8.4. Основные характеристики форсунок Lechler.

Серия	*d_0, мм*	*P, бар*	*L, л/мин при P = 2 бар*
302	*1,5…11*	*0,5…10*	*0,4…3,15*
350	*1,55…5*	*0,5…10*	*0,63…3,15*
212	*0,015…0,46*	*2(5)…20*	*0,015…0,46 (при P = 7 бар)*
214	*0,5…1,8*	*1(2)…20*	*0,08…0,32*
216	*1…6*	*0,5…20*	*0,4…10,4*
2TR	*0,65…2,2*	*1…20*	*0,16…1,57*

Широкой номенклатурой форсунок обладает компания BETE, включая устройства эвольвентного типа с полым факелом производительностью 2,26…10700 л/мин при P = 0,5…20 бар (рис.8.24).

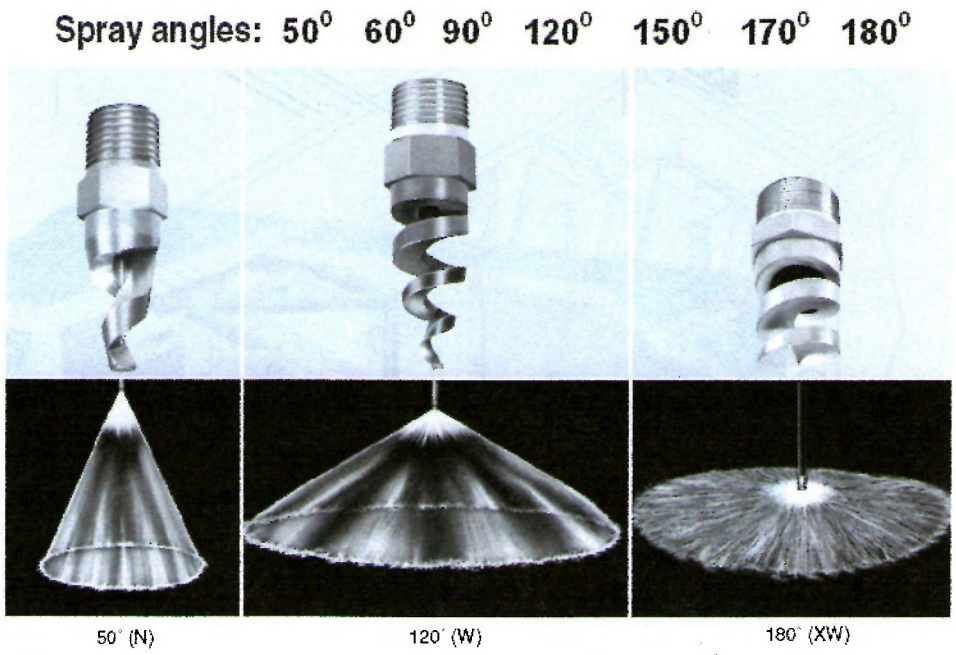
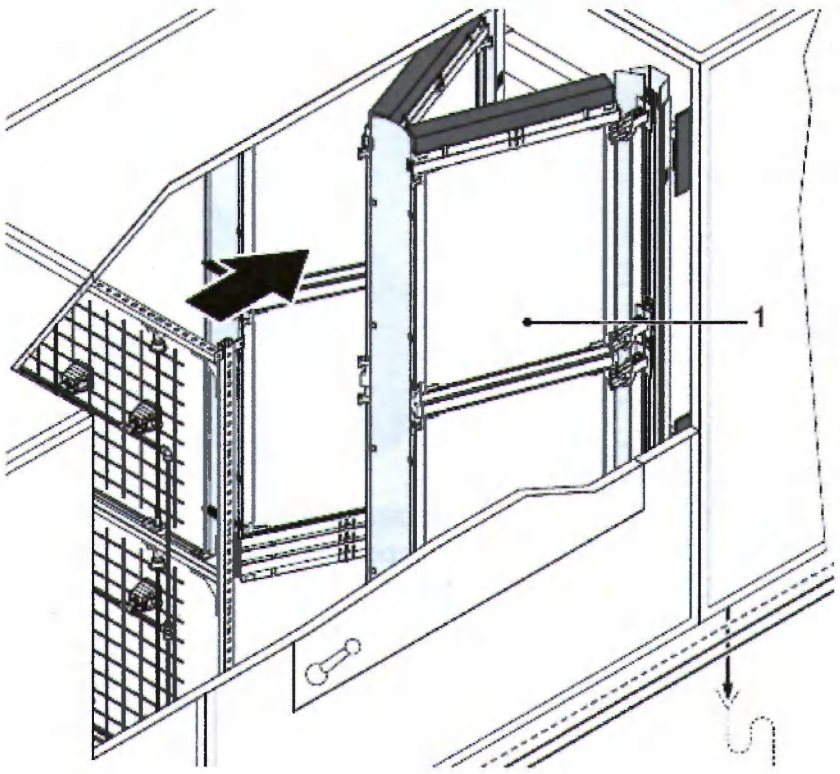


Рис.8.24. Эвольвентные форсунки TF (BETE) и создаваемый ими факел распыла.

Компания AxAir выпускает камеры орошения Condair Dual (рис.8.25) и Condair Dual 2 (рис.8.26) с форсунками низкого/среднего давления 4…8 бар, в которых для повышения эффективности процесса увлажнения воздуха (до 95 %) встроены пористые керамические пластины. Эти пластины располагаются в хвостовой части камеры (по ходу движения воздушного потока) и используются в качестве сепараторов капельной влаги, при этом развитая микропористая поверхность пластин работает на доувлажнение. Камеры орошения Condair Dual (2) различаются схемой расположения пластин: в случае Condair Dual – однорядная с V-образным расположением, в Condair Dual 2 – двухрядная со ступенчатым расположением пластин «одна под другой».



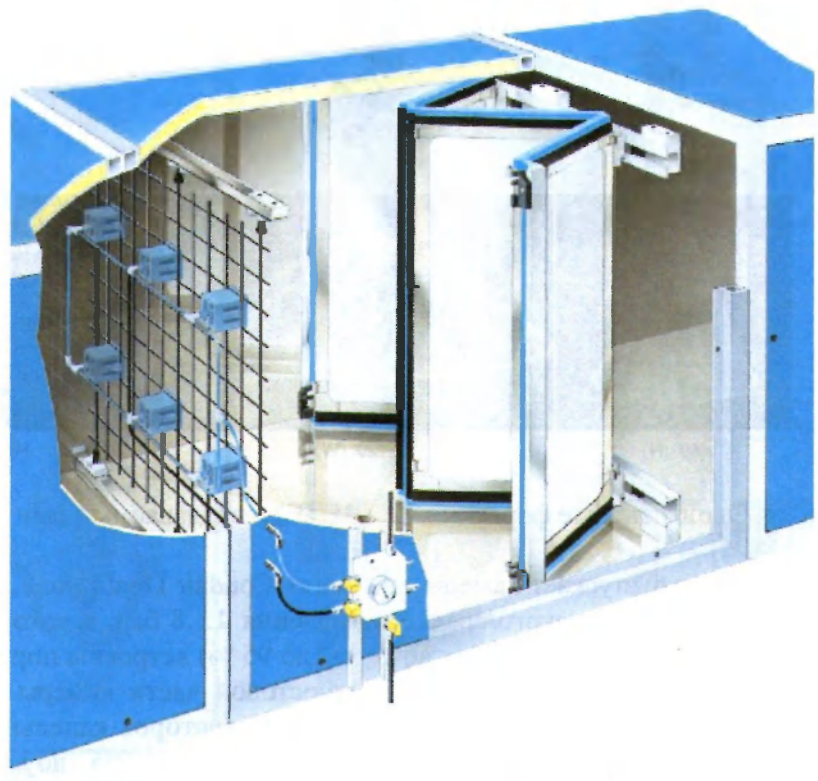
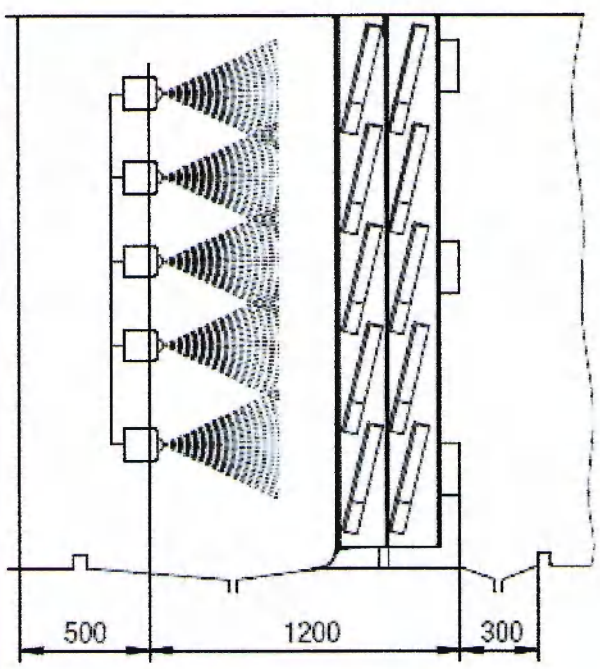


Рис.8.25. Камера орошения Condair Dual.





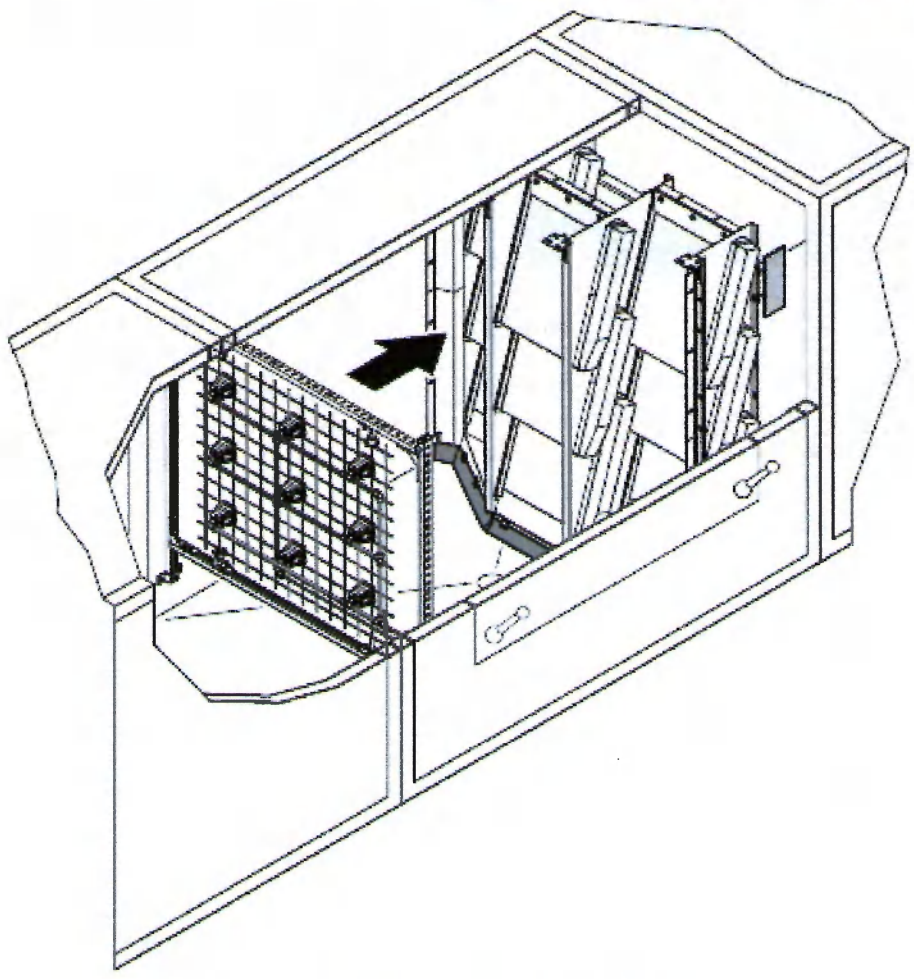


Рис.8.26. Камера орошения Condair Dual 2.

8.1.1.2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ

Для целого ряда объектов текстильной промышленности, полиграфии, тепличных хозяйств и др., где сорбция влаги материалами, растениями является определяющим фактором технологии производства, увлажнение воздуха организуется за счет распыления воды непосредственно в помещении – так называемое ***местное доувлажнение*** (DDF - Direct Area Dischange Fogging System) [16, 20, 290]. Для этого используются *пневматические* (по типу сопла Вентури) и *пневмоакустические* (ультразвуковые) форсунки (рис.8.27) [3]. Благодаря своей конструкции и энергии потока сжатого воздуха, эти устройства способны дать сверхтонкое распыление воды на уровне частиц тумана: 10…50 мкм – «Вентури», 0,5...5 мкм – ультразвуковые.

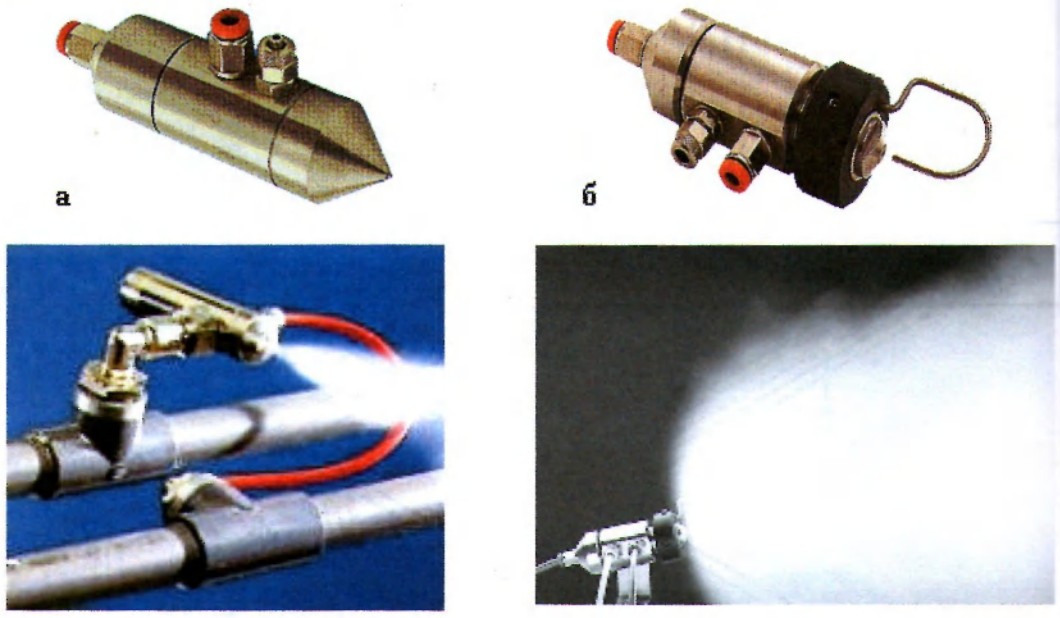


Рис.8.27. Форсунки систем доувлажнения: а – Вентури; б – ультразвуковые (Walton).

В пневматических форсунках поток сжатого воздуха создает разрежение в камере смешения относительно давления в водяном канале, за счет чего вода эжектируется (подсасывается) в камеру и далее распыляется (рис.8.28). Существуют две схемы организации потоков: внутренняя (internal) и внешняя (external). Первая схема позволяет получить более тонкое распыление.

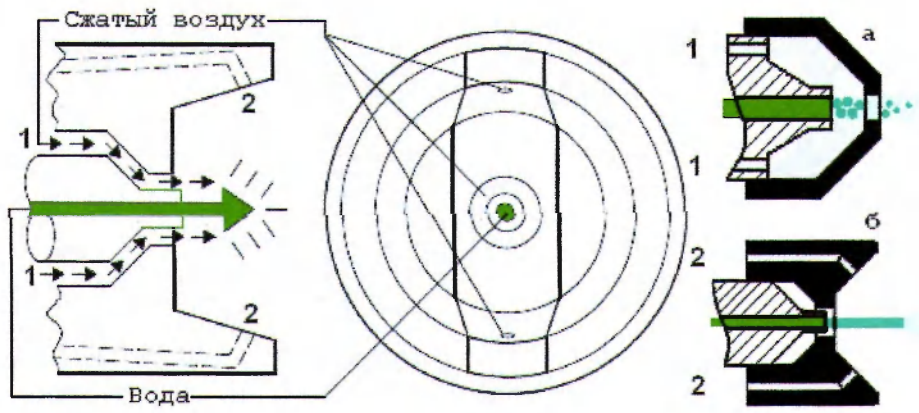


Рис.8.28. Эскиз пневматической форсунки с трассировкой воздушных каналов для двух схем распыления: internal – а; external – б.

Расход воздуха невелик и составляет в среднем 0,56 м^3/ч на литр распыляемой воды. Следует иметь в виду, что, изменяя соотношение J расходов воздуха и жидкости через соответствующие выходные отверстия, можно воздействовать на размер распыляемых частиц:

$$D_{50} = (1410 / v_в) (\sigma/P)^{0,5} + 191 [\mu/ (\sigma \cdot \rho_w)]^{0,45} \cdot (1000/J)^{1,5}, \text{ мкм} \qquad (8.7)$$

где $v_в$ – скорость воздуха относительно жидкости в выходном отверстии, фут/с (ft/sec); σ – коэффициент поверхностного натяжения, дин/см; ρ_w – плотность жидкости, фунт/куб. фут (lbs/ft^3); μ – коэффициент динамической вязкости, мПа · с (сантипуаз-centipoise); P, фунт/кв.дюйм (psi).



Форсунки сверхтонкого распыла изготавливаются, как правило, из нержавеющей стали и снабжены автоматическими иглами-пробойниками (рис.8.29, 8.31).

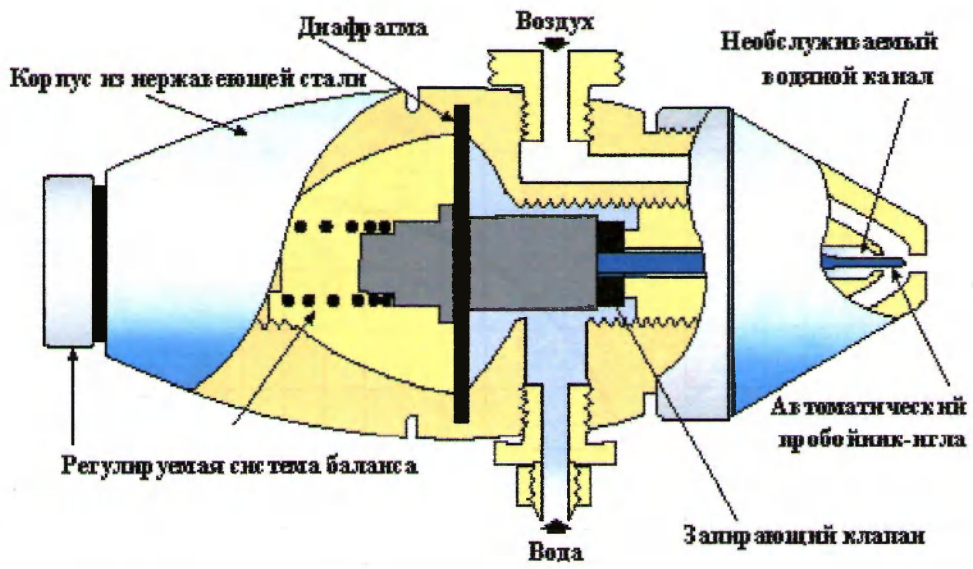
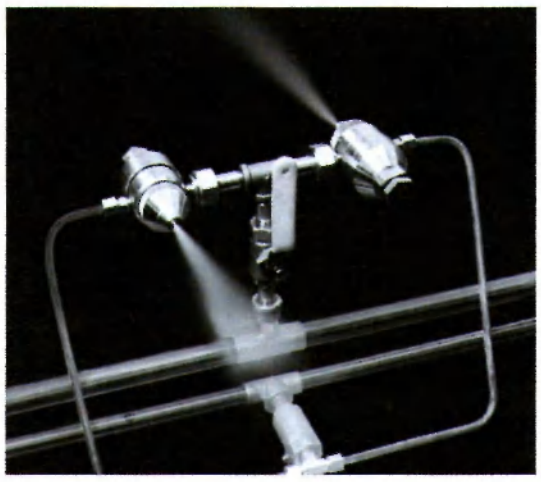


Рис.8.29. Конструкция пневматической форсунки (схема internal) с самоочищаемым водяным каналом.

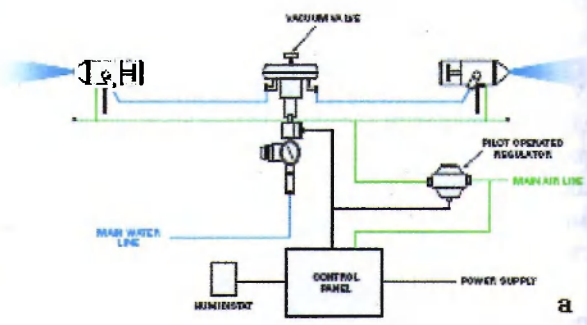


Рис.8.30. Размещение форсунок JS- Jet Spray^{TM} (в количестве 116 ед.) в деревообрабатывающем цеху мебельной фабрики Pinetum (UK).

Аналогичные форсунки AF (AF – air fog) выпускает компания Axair Ltd с балансированием их парного включения по схеме AFE (AIRFOG Economical).



б



а

Рис.8.31. Размещение форсунок AF по системе AFE (Axair Ltd) – а и форсунок Herrmidifier – б.

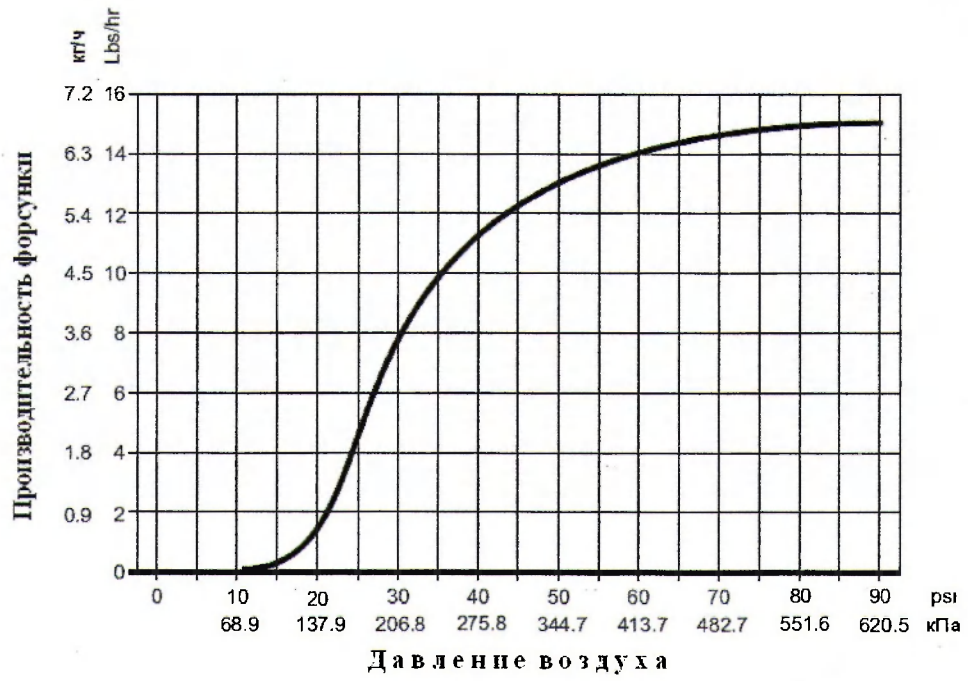


Рис.8.32. Производительность форсунки AF (AFE) от давления сжатого воздуха.

В пневмоакустических форсунках используется кинетическая энергия потока воздуха с генерированием в воздушной среде акустических колебаний, что создает дополнительное распыление воды. В данных устройствах потоки воды и воздуха организованы иначе, чем в пневматических форсунках. Воздух подается по продольной оси, а вода в кольцевое пространство между воздушным каналом и корпусом. В торцевой части форсунки воздушный канал сужается, скорость воздуха резко возрастает и вода эжектируется через систему водяных каналов. Здесь происходит первый разрыв жидкости. Затем воздушный поток, выходящий из сопла в промежутке между торцом форсунки и резонатором, создает мощное акустическое поле, энергия которого усиливает дробление жидкостной струи на мельчайшие частицы (рис.8.33).

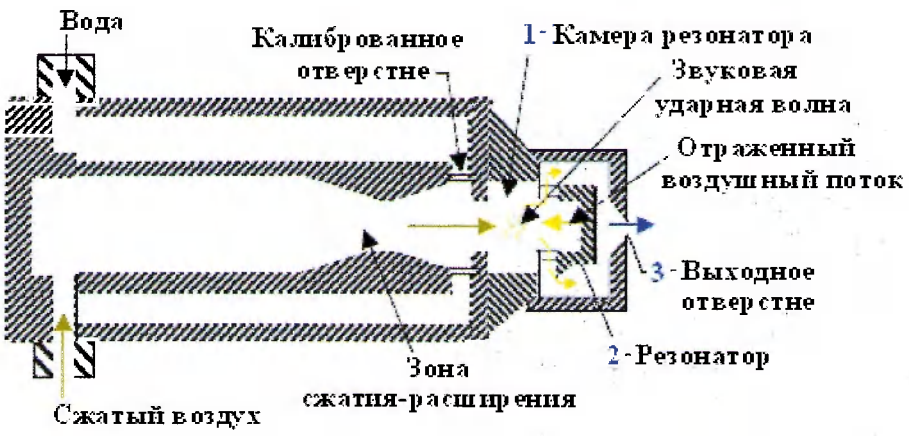
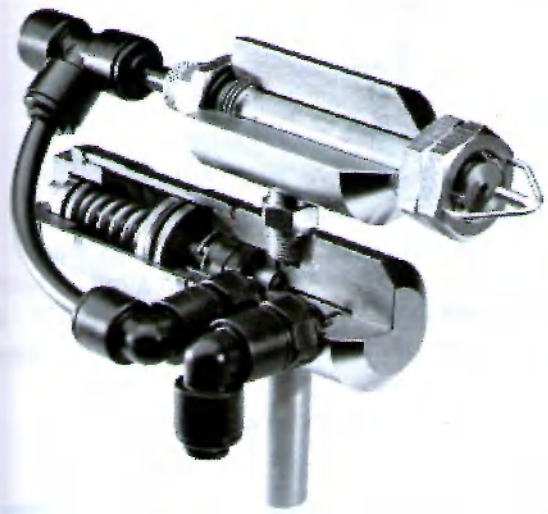
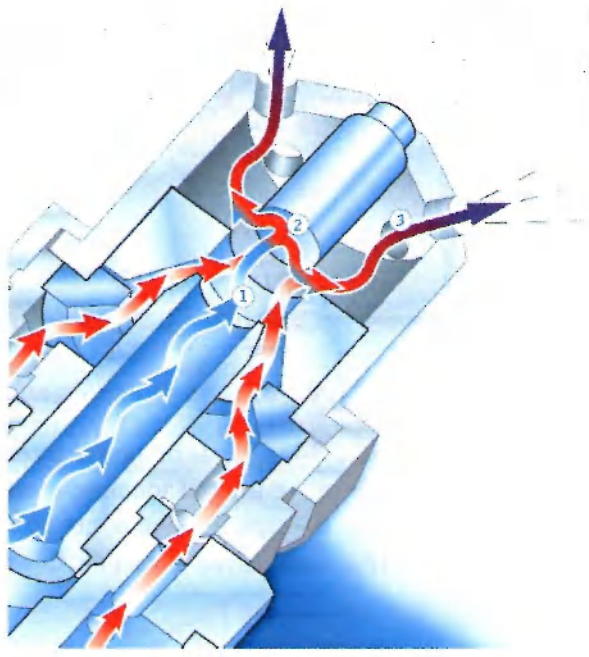


Рис.8.33. Конструкция и принцип работы ультразвуковой форсунки AF-US (Axair Ltd).





AF-US - air fog ultrasonic

Вода на распыление должна быть питьевого качества и может подаваться из водопровода под давлением 3…10 бар либо из отдельной емкости-бака посредством сифона (рис.8.34). Давление в воздушной линии 7…10 бар. Максимальная производительность форсунки AF-US – 11 л/ч (при давлении воздуха 5 бар), установки доувлажнения с 8 форсунками – 88 л/ч.

Для нормальной работы форсунок пневматического типа необходима система подготовки воздуха и воды. Сжатый воздух должен быть очищен от паров масла. Вода, в зависимости от ее состояния [18], может подвергаться деминерализации – умягчаться (соли кальция и магния – основной источник известковых отложений «белый налет» при распылении воды) на уровне ионообмена DI, обеззараживаться ультрафиолетовым излучением UV-ламп. При необходимости вода обрабатывается в установках обратного осмоса RO (рис.8.35).

Умягчение (снижение жесткости) воды производится в аппаратах-ионообменниках DI со специальными экологически чистыми смолами.

В камере UV-обеззараживания вода протекает в кольцевом пространстве между стенками камеры (из нержавеющей стали) и кварцевой трубкой, внутри которой находится бактерицидная UV- лампа (длина волны излучения 254 нм, срок службы 8000 часов). Производительность 50…600 л/ч. Степень обеззараживания 90...99,9 % [16].

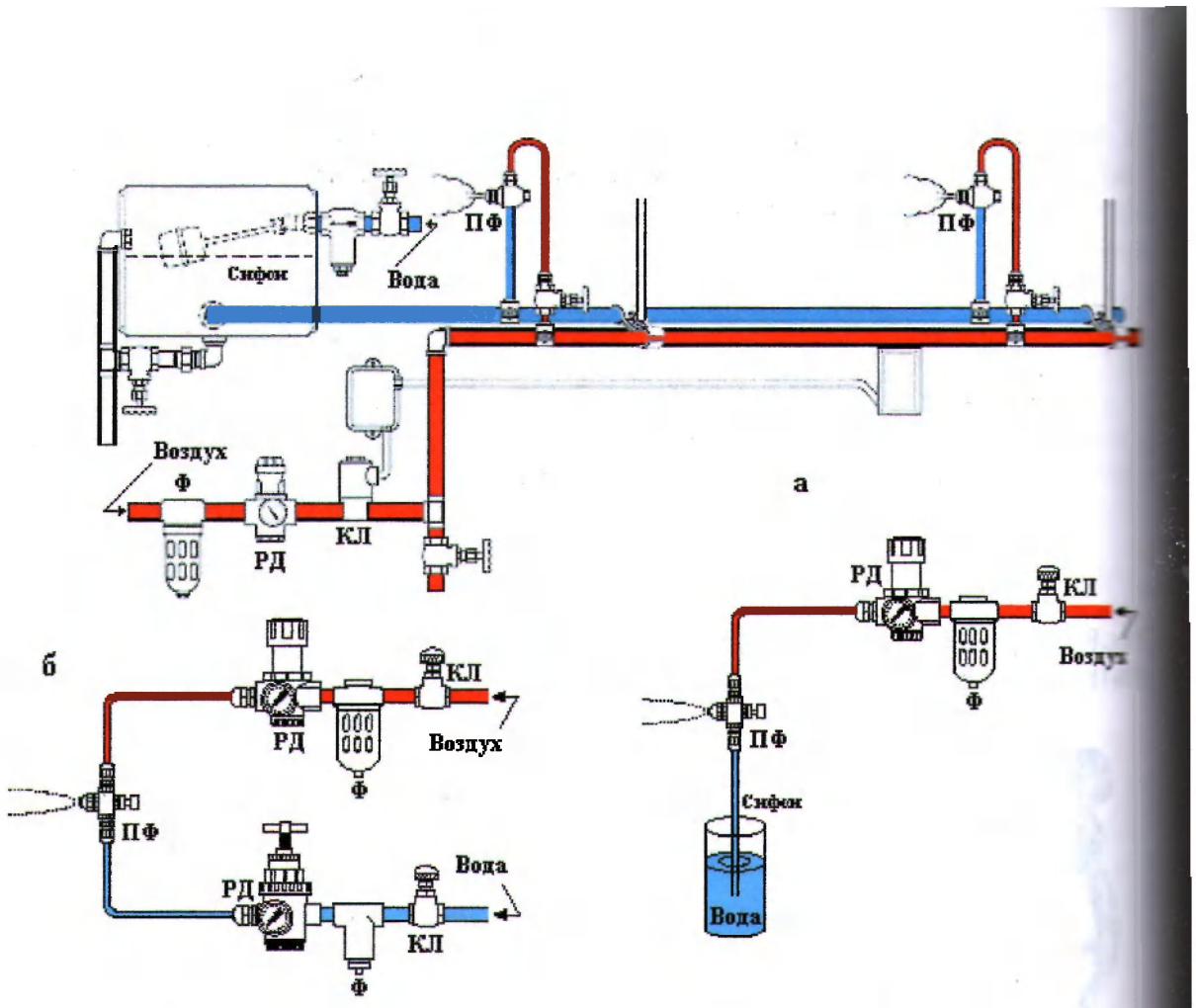


Рис.8.34. Схемы обвязки пневматической форсунки (ПФ):
а – с использованием сифонного устройства;
б – при подаче воды под давлением.
(РД – регулятор давления, Ф – фильтр, КЛ – запорный клапан)

В установках обратного осмоса RO производительностью до 4000 л/ч используются полупроницаемые мембраны, с помощью которых удаляется 98 % солей и тяжелых металлов, 99,99 % вирусов и бактерий. В состав данных установок обязательно входят ионообменники и камеры с ультрафиолетовыми лампами.

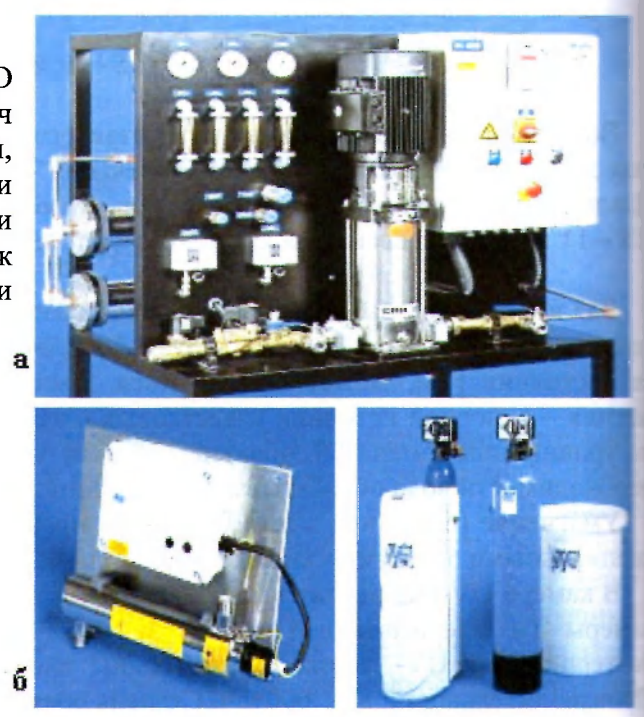


Рис.8.35. Система подготовки воды "PureFlo^{TM}" (компания JS):
а – установка обратного осмоса RO;
б – камера UV-обеззараживания;
в – ионообменники (умягчители) DI.

Поскольку в системах доувлажнения используется свежая (необоротная) вода, то следует иметь в виду, что процесс обработки воздуха в d,h-диаграмме интерпретируется линией с тепловлажностным отношением

$$\varepsilon = C_w t_w. \qquad (8.8)$$

Однако эта линия лишь незначительно отклоняется от изоэнтальпы (строго по h = const только при t_w = 0 °C). Так как величина t_w определяется температурным уровнем воды в системе холодного водоснабжения, то значение ε < 100 кДж/кг.

Форсунки доувлажнения располагают над основными проходами цехов с учетом того, что факел распыла должен заканчиваться на расстоянии 0,7…1,2 м до стен и оборудования, а высота установки от пола H ≥ 2 м [20] (рис.8.36).

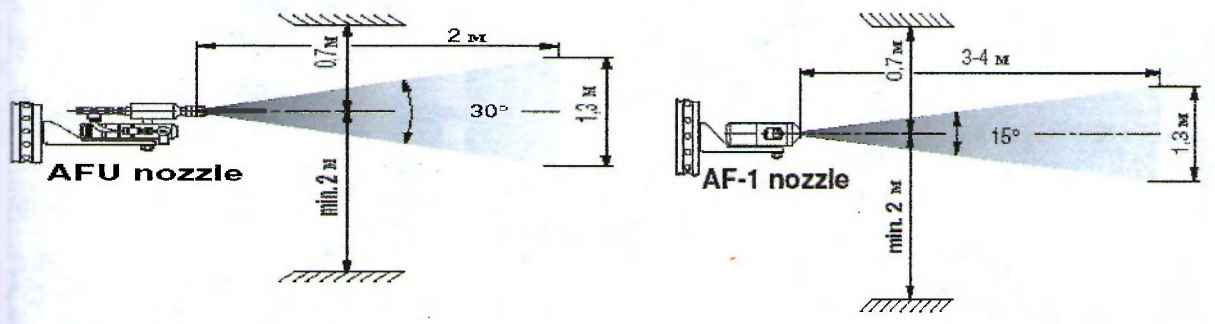


Рис.8.36. Установка форсунок в производственных помещениях.

При оппозитной установке форсунок друг напротив друга (рис.8.37) дистанция между ними должна быть не менее 10 м для AF-1 и 8 м для AFU. Если рекомендованное расстояние не будет выдержано, то произойдет наложение факелов распыла и, как следствие, конденсация.

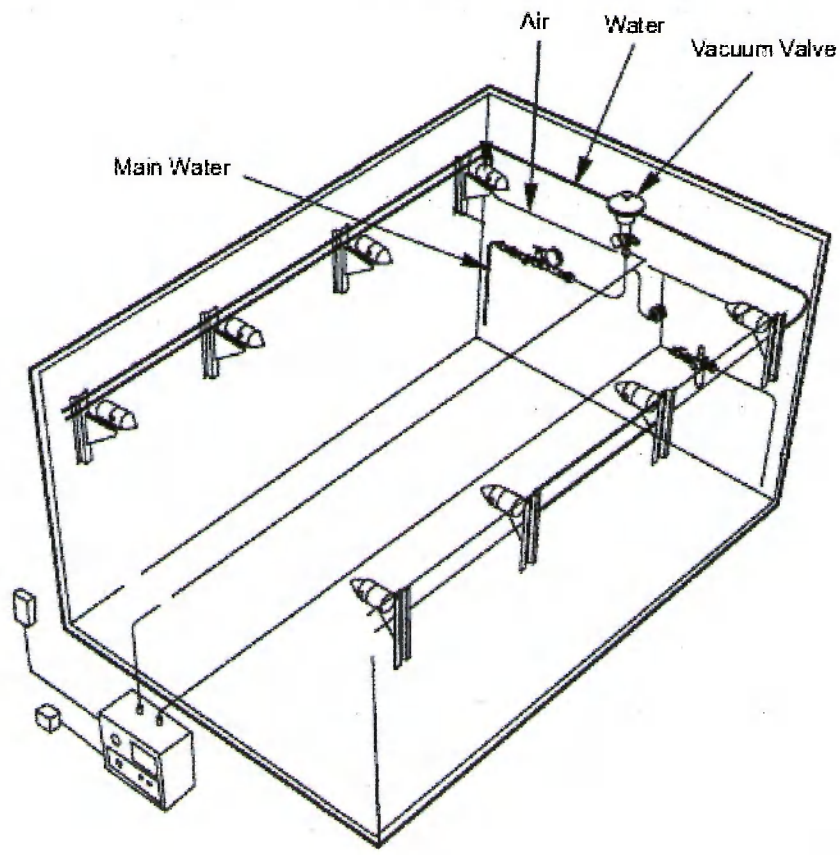


Рис.8.37. Система DDF, Nortec (Axair Ltd).

Специально для условий текстильной промышленности разработана систем доувлажнения AkiMist “D” Dry Fog Humidifying System компании H. Ikeuchi & Co., L (рис.8.38). Для производственных участков обработки шелка применяют установки AkiM “D” серии S с пневматическими форсунками единичной производительности $g_{.ф}$ = 2 л/ч качеством распыления d_{32} = 7,5 мкм, для обработки хлопка – AkiMist “D” серии D ($g_ф$ = 3 л d_{32} = 12 мкм). Эти номинальные значения $g_{.ф}$ соответствуют давлению воздуха 0,3 МПа расходу воздуха 36 л/мин.



Рис.8.38. Установки AkiMist “D”: стационарная – а; мобильная – б, и фотографии их использования в текстильной промышленности.

Кроме установок доувлажнения, пневматические форсунки применяются:

• в составе камер обработки воздуха Fog Chamber центральных кондиционеров, доводчиков-увлажнителей – отдельных секций приточной сети воздуховодов (при скорости воздуха не более 3,8 м/с) (рис.8.39);

• в небольших объектах – камерах, где требуется поддержание строго определенных уровней влажности (без переувлажнения), например, охлаждаемые прилавки-витрины продуктовых магазинов (рис.8.40).

Дозированное распыление воды по сигналу датчика влажности позволяет стабилизировать φ воздуха с высокой точностью, на уровне требований прецизионных систем.

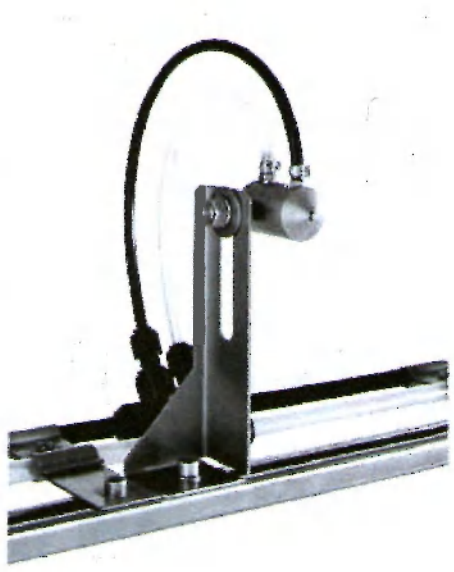


Рис.8.39. Увлажнители-доводчики с пневматическими форсунками.

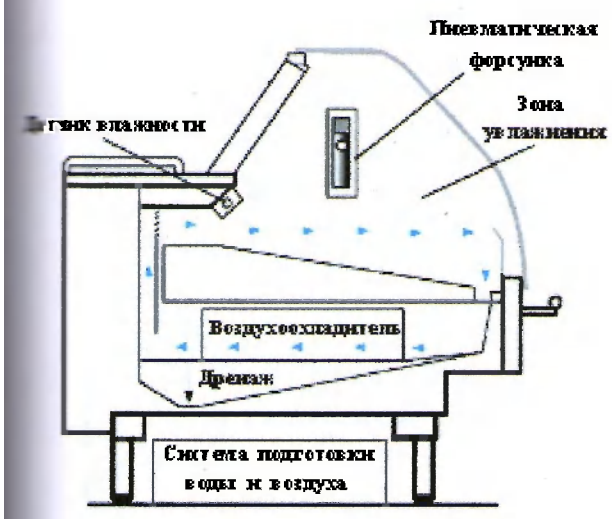


Рис.8.40. Система увлажнения воздуха в торговом прилавке.

по материалам компаний Pendred и KES, Science & Technology, Inc.





Помещаемые в охлаждаемые прилавки пищевые товары (мясо, морепродукты и др.) без увлажнения могут терять от 4 до 12 % первоначальной массы в течение первых 6 часов.

Все форсунки пневматического типа при прекращении распыления (закрытии воздушного клапана) автоматически отсекают водяную линию (рис.8.41), тем самым устраняется возможность образования застойных зон, в которых могли бы развиваться различные микроорганизмы. Применение холодной воды также не способствует их развитию. Например, благоприятный диапазон температур для роста бактерий типа Легионелла $t_в$ = 35...46 ^{0}C (см. § 10.2).

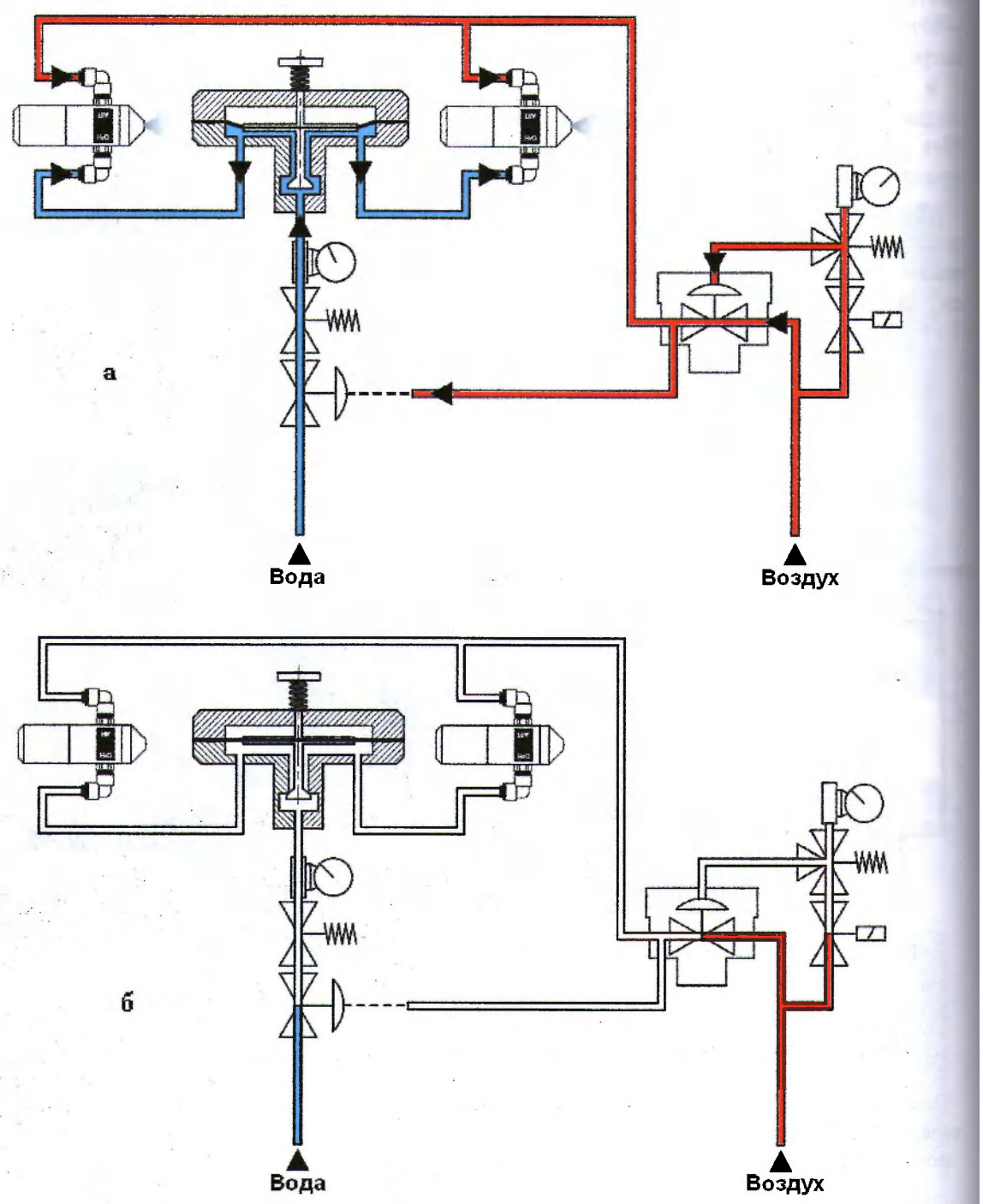


Рис.8.41. Схема управления работой пневматических форсунок:
рабочее (а) и “stand-by” (б) состояния.

8.1.1.3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ФОРСУНКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Мелкодисперсного распыления можно добиться и без использования энергии сжатого воздуха: за счет уменьшения d_0 и повышения Р.

На рис.8.42, 8.43 приведены гидравлические форсунки высокого давления Swirl-Jet («вихревая струя») с малым выходным отверстием $d_0 = 0{,}15$ мм (стандартное значение). Размер капель 10…15 мкм.





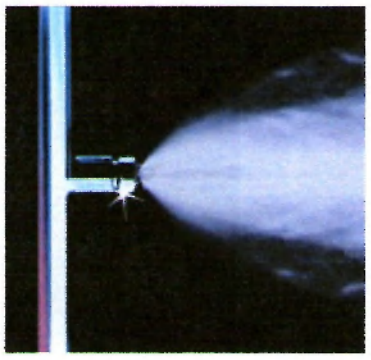


Рис.8.42. Форсунки высокого давления Swirl-Jet.

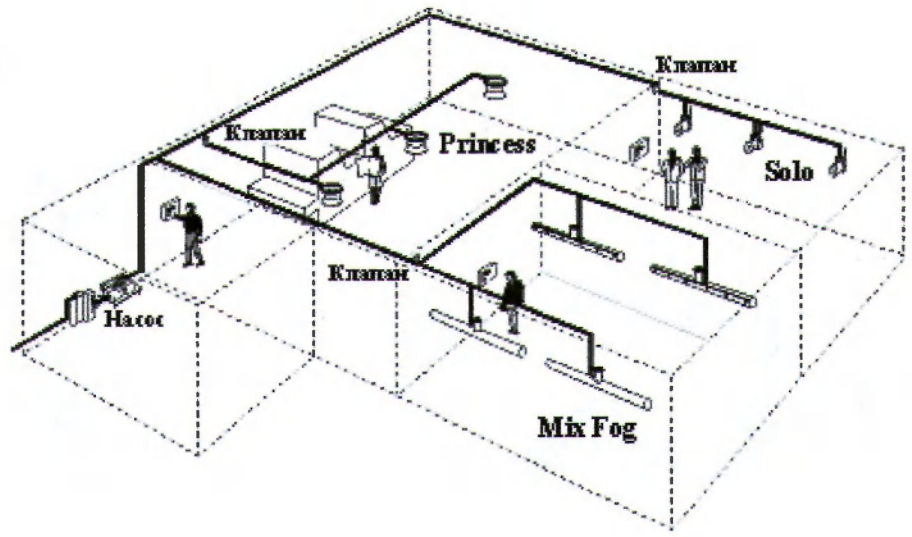




Компании Cosmotech, AB Sibe разработали идентичные по принципу действия системы увлажнения воздуха, в которых распыление воды осуществляется гидравлическими форсунками высокого давления Swirl-Jet 55…70 бар в воздушный поток, организуемый осевым вентилятором (рис.8.43, 8.44).

Производительность форсунки 2,5…5 л/ч.

Уровень шума 37…55 дБ, что значительно ниже аналогичного показателя пневмоакустических форсунок (79 дБ).



а

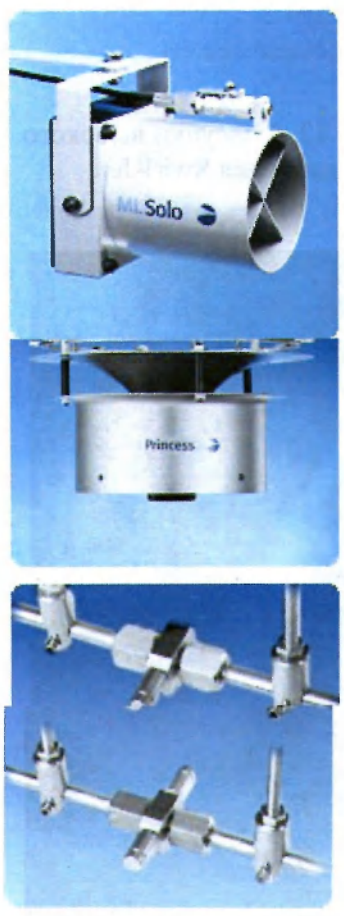
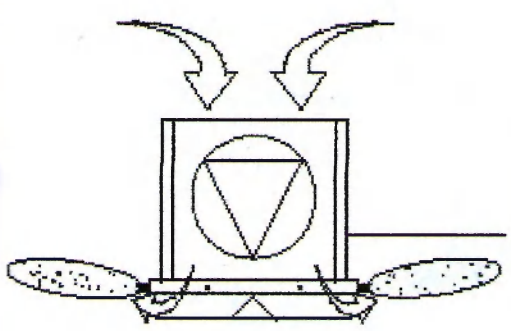
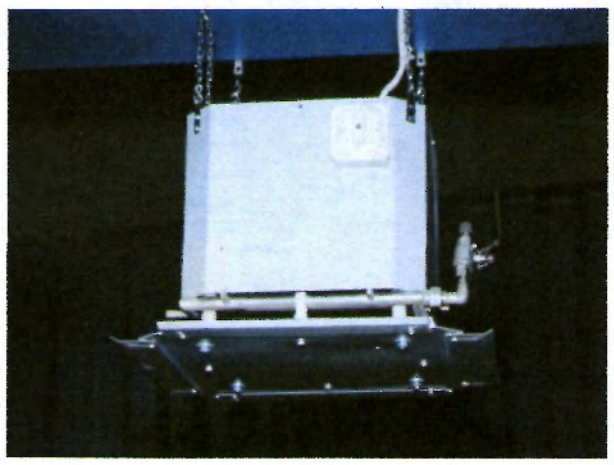


Рис.8.43. Устройства систем доувлажнения ML-system (Cosmotech) и их размещение в помещениях различного назначения: а – "Solo" с одной форсункой; б – "Princess" с 8 форсунками, расположенными на кольце; в – "Mix Fog".

б







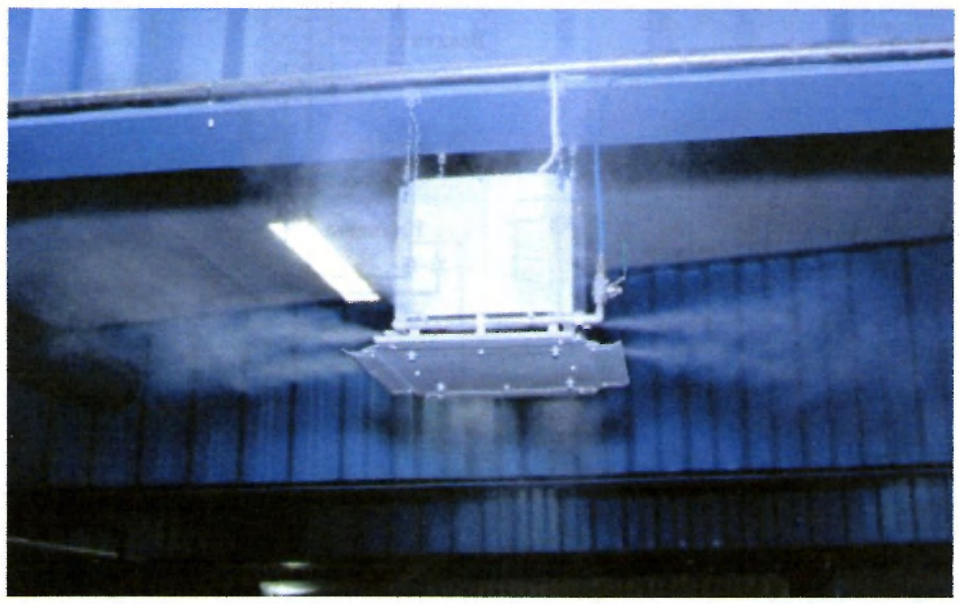


Рис.8.44. Система доувлажнения SWED-FOG HP компании AB SIBE.

Вариант системы увлажнения приточного воздуха в СКВ с использованием гидравлических форсунок высокого давления типа Impaction-pin (с уплотнением выходного отверстия внешним конусом), устанавливаемых непосредственно в воздуховодах (при скорости воздуха до 3,8 м/с), предлагает компания Mee Industries Inc. При P_w = 70 бар и d_0 = 0,15 мм достигается распыление на уровне 10 мкм. Для распыления 450 л/ч расходуется всего лишь 1,1 кВт, что составляет 3 % затрат энергии установок с пневматическими форсунками. В то же время нужно учитывать, что при таком малом значении d_0 требуется предварительная обработка воды и контроль ее качества. Форсунка содержит встроенный фильтр (рис.8.45).

Размер капель распыла форсунки Impaction-pin в сравнении с каплями обычной гидравлической форсунки Swirl-Jet значительно меньше, при P_w = 138 бар: d_{32} = 6,5/15 мкм, D_{90} = 14/38 мкм – по центру факела, и d_{32} = 8/28 мкм, D_{90} = 24/50 мкм – на периферийной части факела. В приведенных данных значения диаметров над чертой относятся к форсунке Impaction-pin, а под чертой – к форсунке Swirl-Jet.

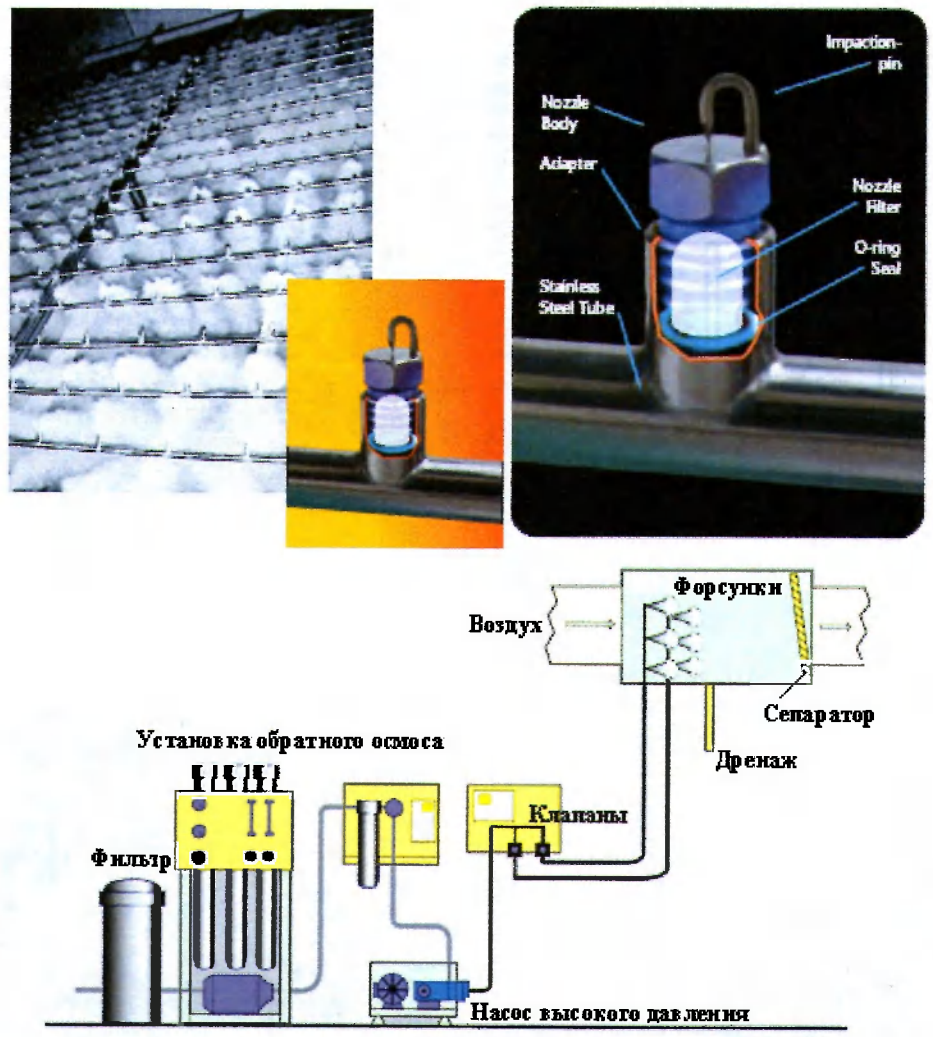


Рис.8.45. Система увлажнения MeeFog™ с форсунками Impaction-pin.

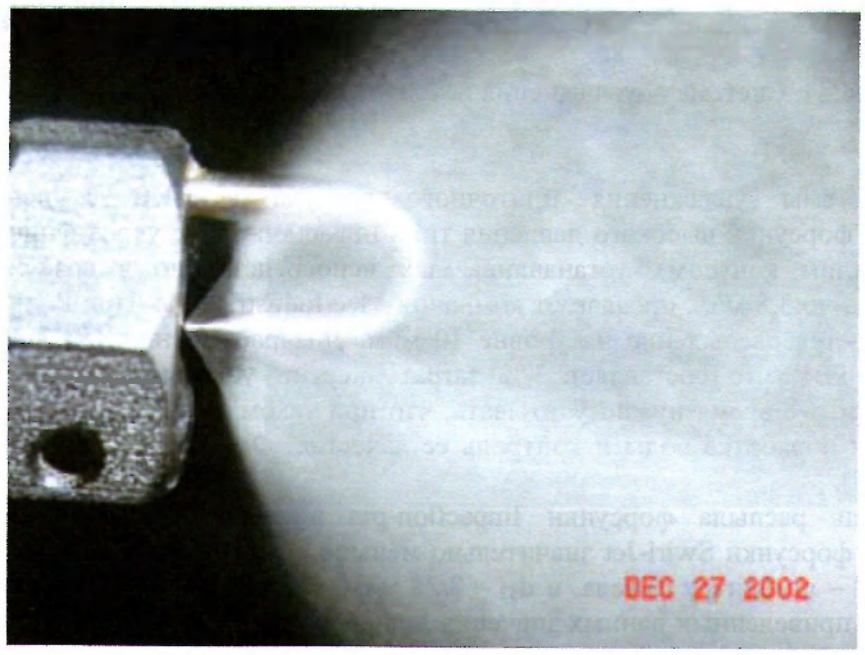


Рис.8.46. Факел распыления форсунок Impaction-pin.

Аналогичные гидравлические форсунки высокого давления применяют компании NCA, Luwa, AxAir, Klingenburg (рис.8.47…8.51). При этом за счет специальных завихрителей воздушного потока достигается интенсивное продольное перемешивание водной аэрозоли и более полное использование объема камеры увлажнения, что приводит к сокращению длины участка ассимиляции капельной влаги.

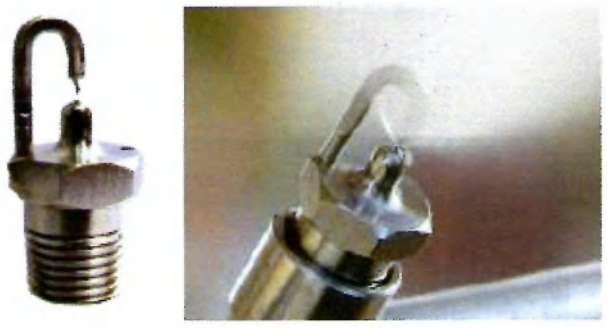


Рис.8.47. Форсунки Cumulus Fog Nozzle (Impaction-pin), NCA.

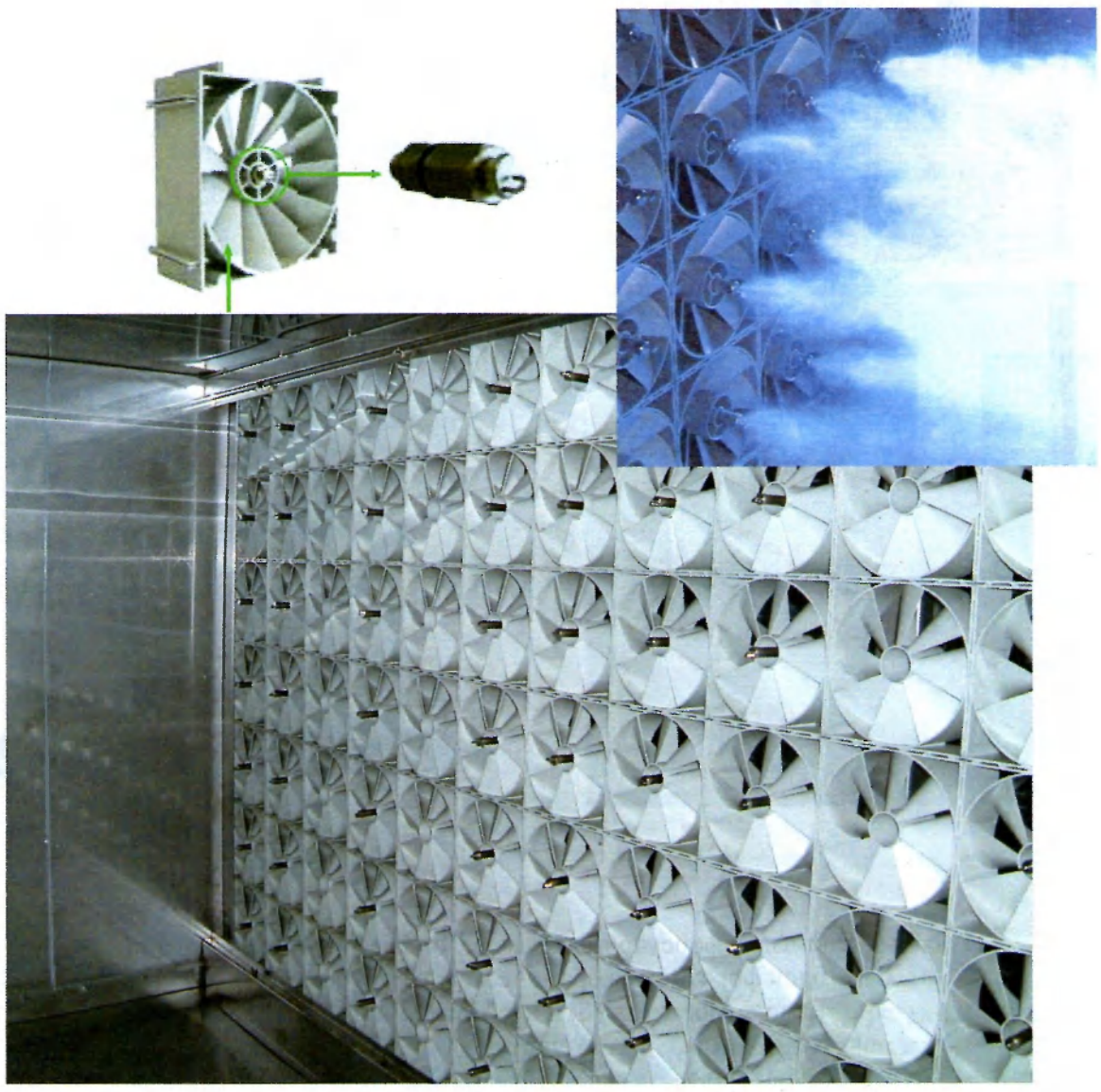
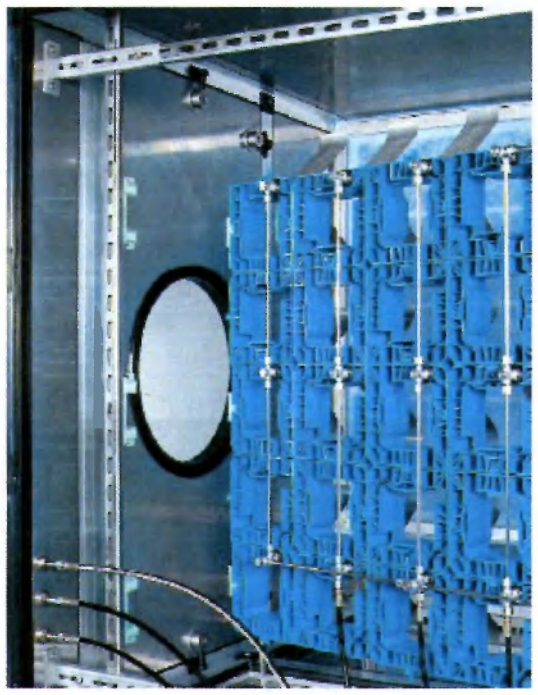
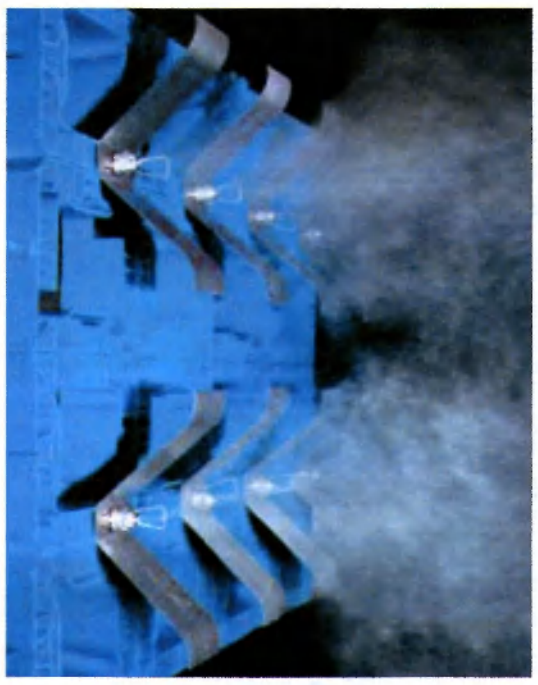


Рис.8.48. Форсуночные камеры TexFog (Luwa).

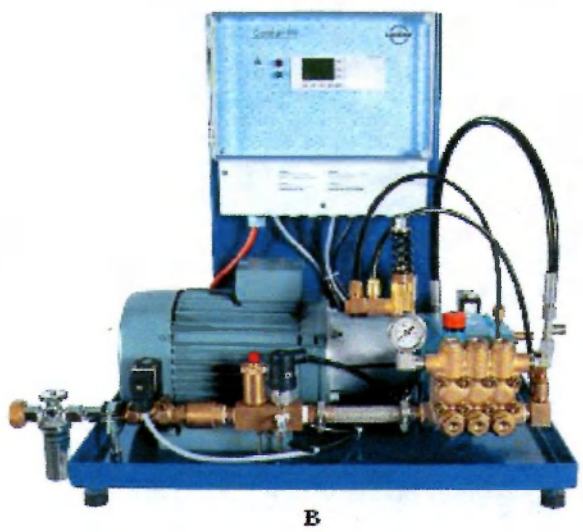


а





б



в

Рис.8.49. Элементы форсуночных камер Condair Fast Fog (AxAir Ltd):
блок форсунок с керамическим раструбом (а),
каплеуловитель (б) и насосная станция (в).

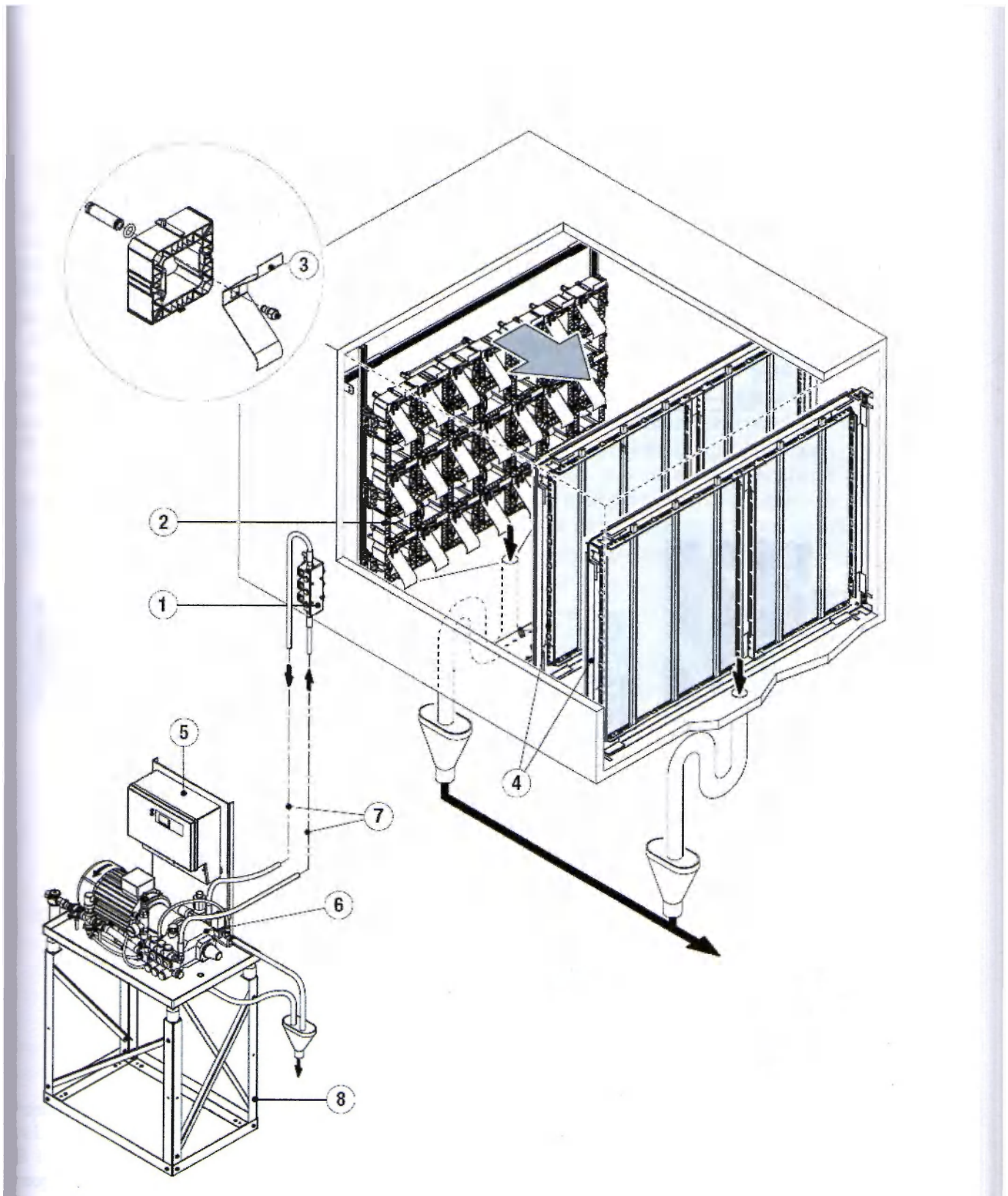


Рис.8.50. Увлажнитель Condair Fast Fog: 1 – клапаны ступенчатой регулировки; 2 – форсуночная система; 3 – керамический раструб форсунки; 4 – каплеуловители; 5 – пульт управления насосом; 6 – насос высокого давления; 7 – трубопроводы; 8 – каркас насосной станции.

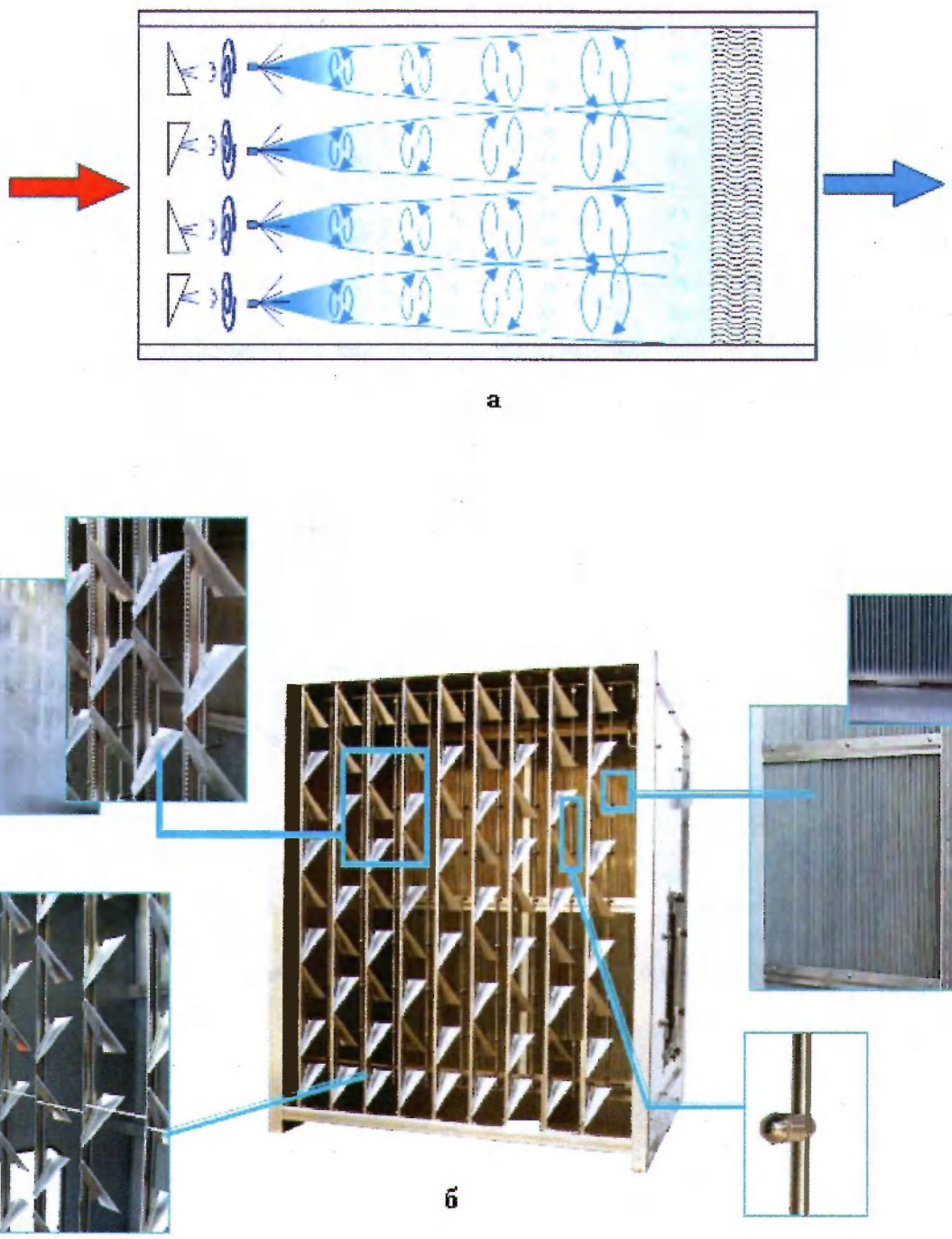


Рис.8.51. Увлажнитель KB (Klingenburg) с форсунками Swirl-Jet
и вихревой решеткой: схема организации процесса (а) и устройство (б).

В данном устройстве KB воздушный поток проходит через вихревую решетку. Допустимая скорость воздуха до 4,5 м/с. Вода подается под давлением 5…140 бар.

8.1.2. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ УВЛАЖНИТЕЛИ

"water smoke makers"

В данных устройствах использован принцип[1] генерирования и распространения в жидкости акустических ультразвуковых[2] волн, приводящих к интенсивному образованию кавитационных[3] зон с псевдокипением воды [7, 48]. Явление кавитации связано с инерцией жидкостей, не успевающих следовать за высокой частотой акустических волн, а также с большой чувствительностью жидкостей к растягивающим усилиям. При прохождении акустической волны чередуются фазы разрежения и сжатия. В фазе разрежения в жидкости образуется множество каверн - кавитационных пузырьков, которые затем вырастают до определенного резонансного размера (до 100 мкм в диаметре) и резко захлопываются в стадии сжатия. При этом, в течение микросекунд в микрообъемах жидкости возникает давление до 500 атм и повышение температуры до 5000 ^{0}C (при темпе ее изменения 109 K/c). Пар, сжатый в полости каверны, стремительно расширяется и в жидкости возникает ударная волна, подобно точечному взрыву (рис.8.52). Амплитуда ударной волны вызывает сильное вертикальное смещение слоя жидкости, при этом на поверхности возбуждаются стоячие капиллярные волны [69]. За счет этого преодолеваются силы поверхностного натяжения и, над водой образуется туман, состоящий из мельчайших аэрозольных частиц (рис.8.74).

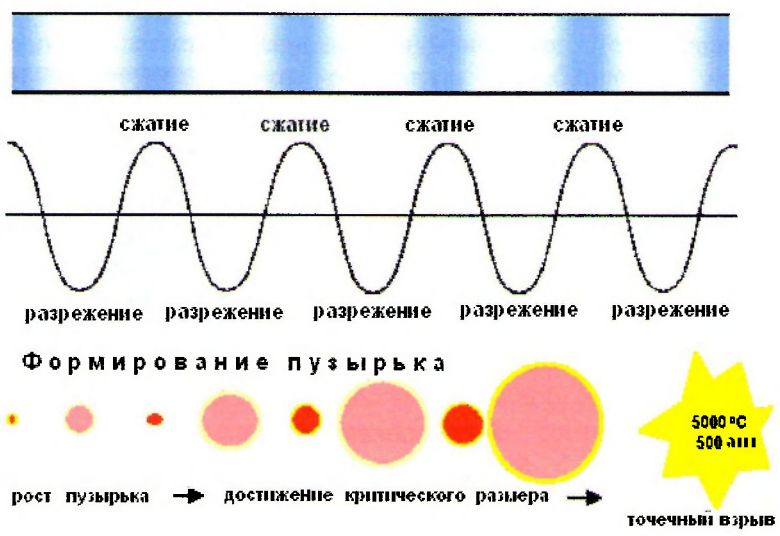


Рис.8.52. Схема ультразвукового распыления с образованием кавитационных пузырей и поверхностных капиллярных волн.

Принцип ультразвукового распыления жидкостей впервые был предложен в 1927 году W.R. Woods и A.L. Loonis. Исследования K. Sollner (1936 г.) выявили в качестве главного механизма – кавитацию. В 1945 г. J.W.S. Rayloeigh предложил описание данного явления на основе капиллярной волновой теории.

Ухо человека воспринимает звук в пределах частоты f = 16 Гц…18 кГц. Волны с f ≥ 20 кГц – ультразвук.В настоящее время предлагается новая классификация: ультразвук: 20…1000 кГц, более 1000 кГц (1 МГц) – мегазвук (рис.8.53).

[3] кавитация – от лат. "cavitas" – пустота

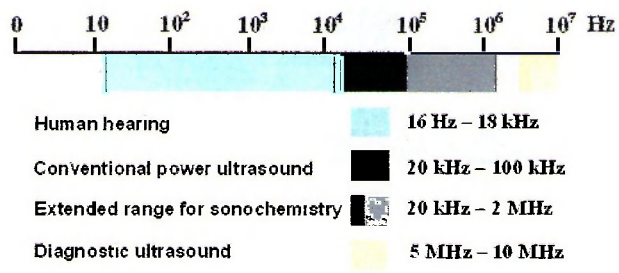


Рис.8.53. Классификационные диапазоны звуковых волн.

Явление кавитации типично проявляется в определенных форсированных режимах работы гребных винтов плавательных средств (рис.8.54), что зачастую приводит к их разрушению.





Рис.8.54. Фотографии кавитационного пузыря, образующегося в режиме ультразвуковой кавитации (а) и гребного винта в режиме гидродинамической кавитации (б).

Фотография кавитационного пузыря (рис.854б), размером 1 мм, выполнена Lawrence Crum, Ph.D., (Вашингтонский университет). Фотографии ультразвукового распыления воды см. также на с.359.

Создание акустических волн в жидкости возможно с помощью электрострикционных (пьезоэлектрических) и магнитострикционных преобразователей.

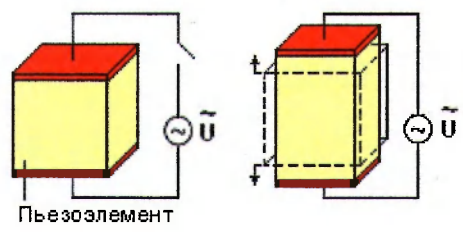
8.1.2.1. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

пьезо – (от греческого "piezo") – давлю

пьезоэлектрический эффект обнаружен братьями Кюри в 1880 г.



Paul Jaques Curie *Pierre Curie*



В пьезоэлементах, на основе: монокристаллов кварца SiO_2, сегнетовой соли $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, ниобата лития $LiNbO_3$; синтетической поликристаллической керамики, полимеров и пр. (табл.8.1) – использован обратный пьезоэлектрический эффект, состоящий в деформации (сжатии и растяжении) кристаллов, не имеющих центра симметрии, под действием электрического поля (рис.8.55, 8.56).

Рис.8.55. Принцип обратного пьезоэлектрического эффекта.

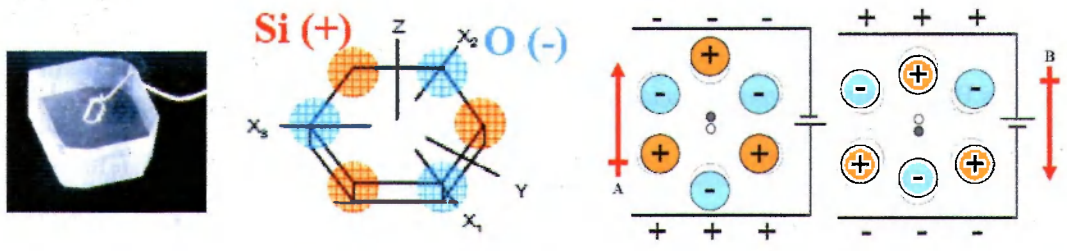
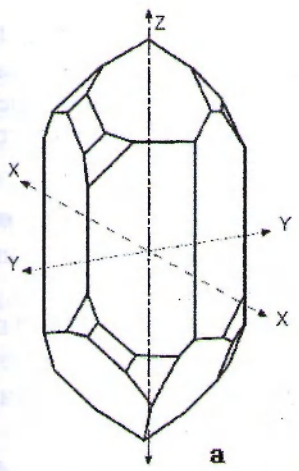


Рис.8.56. Пластина кварца (оси: z – оптическая, x_1, x_2, x_3 – электрические, y – механическая) и его трансформация в электрическом поле: A – растяжение; B – сжатие.



Монокристаллы (натуральные и искусственно выращенные) представляют собой строго симметричные тела, близкие по форме к шестигранной призме, ограниченной двумя пирамидами, и имеют ряд дополнительных граней (рис.8.57). Такие кристаллы характеризуются тремя главными кристаллическими осями. Ось *Z* соединяет вершины пирамид, ось *X* перпендикулярна оси *Z* и соединяет противолежащие ребра призмы (таких осей 3), ось *Y* перпендикулярна оси *X* и *Z* (их тоже 3). Пластина, разрезанная перпендикулярно оси *X* (*X* – срез) способна работать на максимальное растяжение.



кристалл сегнетовой соли (Seignette либо Rochelle salt) был впервые получен в 1675 г. Pierre Seignette аптекарем из La Rochelle (France)

Рис.8.57. Кристалл кварца (а) и пластина сегнетовой соли (б).

Плоскопараллельные пластины данных монокристаллов (с наложенными электродами) представляют собой пьезоэлектрические резонаторы (колебательный контур с определенной резонансной частотой колебаний). В качестве примера использования монокристаллов кварца для трансформации электрической энергии в механическую можно привести электромеханические кварцевые часы (обратный пьезоэффект). Пример прямого пьзоэффекта – пьезозажигалка.

Пьезокерамика – современный поликристаллический сегнетоэлектрический материал: твердые растворы (порошки) на основе титаната бария $BaTiO_3$, цирконата-титаната свинца (PZT) $PbTiO_3$-$PbZrO_3$ и др., – обладает после поляризации в электрическом поле устойчивыми и сильными пьезоэлектрическими свойствами. Его структура скачкообразно изменяется (рис.8.58) без изменения химического состава вещества (фазовый переход второго рода).

Пьезокерамика представляет собой твердый, химически инертный материал, совершенно нечувствительный к влажности и другим атмосферным воздействиям. По механическим качествам она подобна керамическим изоляторам. Технологии изготовления: полусухое прессование, шликерное литье, горячее литье под давлением, экструзия либо изостатическое прессование с последующим обжигом на воздухе при температуре 1000…1400 °С.

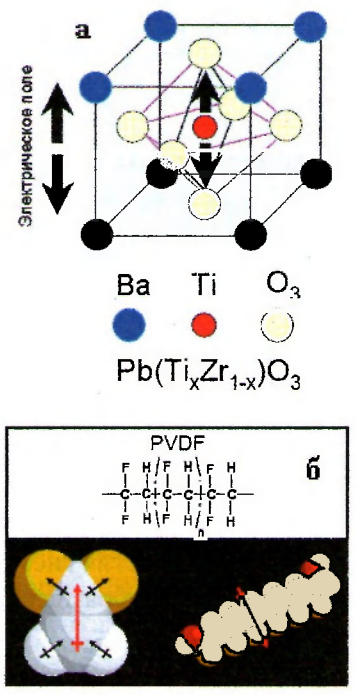


Рис.8.58. Структура сегнетоэлектриков: а – поликерамика; б – полимер PVDF.

Пьезоэлектрические полимеры (прежде всего PVDF – polyvinylidene difluoride– поливинилиденфторид) более дешевые и гибкие материалы по отношению к керамике, позволяют изготавливать излучатели различной формы, характеризуются меньшим значением рабочего напряжения.

Термин «сегнетоэлектричество» происходит от названия кристалла «сегнетова соль», в котором Joseph Valasek, американец (чешского происхождения), впервые в 1921 году обнаружил нелинейные электрические свойства, подобные ферромагнетикам (§ 8.1.2.2). Сам термин ввел в 30-е годы

прошлого столетия академик И.В. Курчатов, он же разработал теорию сегнетоэлектричества. В 1945 году советские ученые Б.М. Вул и И.М. Гольдман открытием аномальных свойств титаната бария основали новый класс сегнетоэлектриков – пьезокерамику [29] (в настоящее время известно более 340 материалов). Пионером в разработке пьезоэлектрических полимеров является японец Hikaru Kawai (1969 г. – PVDF).

Поликристаллы в нормальном состоянии не имеют пьезоэффекта, в связи с хаотическим распределением полярных осей отдельных областей (доменов), рис.8.59а. При отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрические кристаллы разбиваются на домены – области, внутри которых векторы спонтанной (самопроизвольной) поляризации отдельных частиц имеют одинаковое направление. В свою очередь, взаимная ориентация доменов такова, что кристалл оказывается электрически нейтральным. Поэтому для получения пьезоэффекта необходима поляризация материала.

Структуру сегнетоэлектриков можно представить в виде простой кубической решетки, в центре граней которой размещаются ионы O^{2-}, а в центре куба – ионы Ti^{4+} с однородным зазором. Под воздействием сильного электрического поля (несколько тысяч вольт на сантиметр) ион Ti^{4+} перемещается в пустоте кислородного октаэдра и прилипает к ионам кислорода (рис.8.58), что приводит к нарушению симметрии решетки кристалла. При этом возникает мощное внутреннее поле, которое воздействует на соседние области кристалла, поляризуя их. Таким образом, создается поляризация пьезоэлемента, ориентированная в определенном направлении (полярной оси, рис.8.59б).

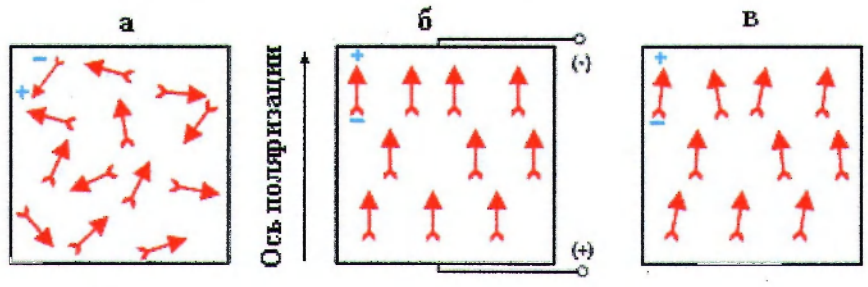


Рис.8.59. Картина поляризации в пьезокерамике [256]:

а – дезориентация полярных доменов; б – поляризация в электрическом поле постоянного тока; в – остаточная поляризация после отключения электрического поля.

Сегнетоэлектрики относятся к нелинейным диэлектрикам, для которых характерны нелинейная зависимость поляризации P от напряженности электрического поля E. Нелинейная зависимость приводит в переменных электрических полях к гистерезису, т.е. несовпадению по фазе поляризации P и электрического поля E. Площадь петли гистерезиса $S = \int E\, dP$ характеризует потери энергии на переполяризацию материала. При достижении поляризации насыщения P_s материал становится монодоменным. Для снятия спонтанной поляризации необходимо приложить к диэлектрику поле напряженностью E_c (коэрцитивная сила) (рис.8.60).

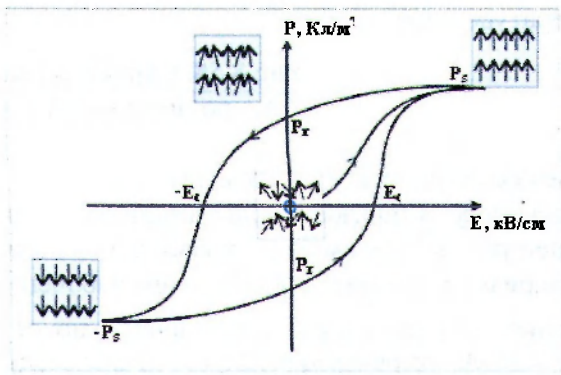


Рис.8.60. Петля гистерезиса для полидоменного образца сегнетоэлектрика.

$0\text{-}P_s$ – линия первоначальной поляризации

P_r – остаточная поляризация при $E = 0$

Спонтанная поляризация сегнетоэлектриков существует только в определенном температурном диапазоне, на границах которого происходят фазовые превращения второго рода.

Температура фазового перехода – температура точки Кюри $T_к$ (одна или две (например, сегнетова соль: –15 °С и +22,5 °С)) – определяется свойствами материала (табл.8.4). Вне температурного интервала, ограниченного точками Кюри, либо при температурах < $T_к$ в случае одной точки, сегнетоэлектрик ведет себя как обычный линейный диэлектрик $P = \alpha E$. Вблизи точки Кюри (рис.8.61) эта зависимость описывается законом Кюри-Вейсса:

$$\alpha = C /(T - T_к), \qquad (8.9)$$

где C – константа, α – коэффициент поляризуемости.

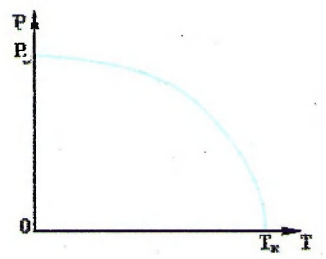


Рис.8.61. Влияние температуры на спонтанную поляризацию [29].

При поляризации материал нагревается до температуры, превышающей точку Кюри, затем его охлаждают в электрическом поле, после чего пьезокерамика может быть использована в качестве электромеханического преобразователя.

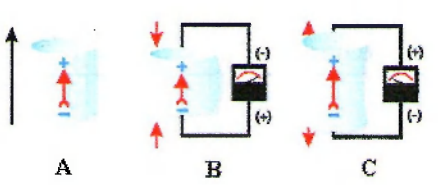
Математическое описание управляемой деформации пьезоэлементов осуществляется с помощью пьезоэлектрических коэффициентов d_{ij} (i = 1…3, j = i…3), где i и j – индексы направления электрического поля и деформации, соответственно. Если направление поляризации обозначать индексом i = 3, то параметры продольной деформации будут иметь индекс 33, а радиальной – 31 (рис.8.62, 8.63). Например:

– изменение толщины элемента $\Delta L = d_{33} U$, м, (8.10)

– изменение диаметра (в случае цилиндрического образца) $\Delta D = d_{31} U$, м, (8.11)

где U – электрическое напряжение, приложенное к электродам, расположенным по торцам образца, В. Значения пьезоэлектрического коэффициента (модуля) d_{33} для различных материалов приведены в табл.8.5.

В случае совпадения полярности U с полярностью элемента (после поляризации) его толщина увеличится, а диаметр уменьшится. И, наоборот, в противофазе элемент станет тоньше и шире.



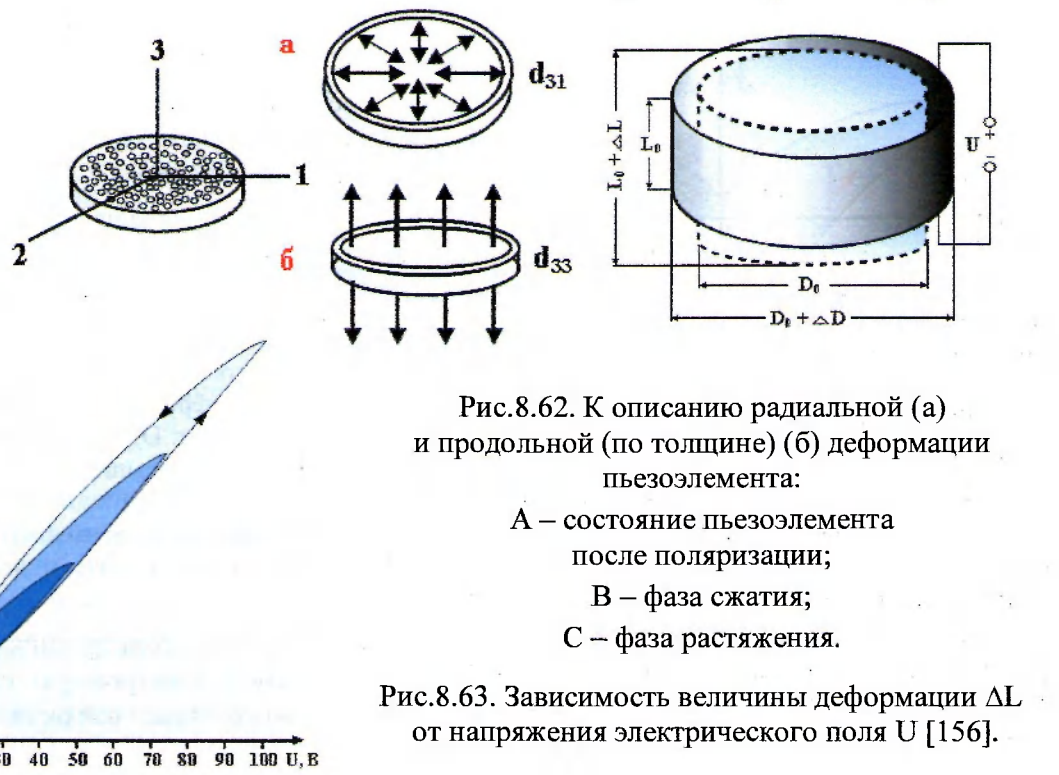


Рис.8.62. К описанию радиальной (а) и продольной (по толщине) (б) деформации пьезоэлемента:

A – состояние пьезоэлемента после поляризации;

B – фаза сжатия;

C – фаза растяжения.

Рис.8.63. Зависимость величины деформации ΔL от напряжения электрического поля U [156].

Таблица 8.5. Характеристики пьезоэлектрических материалов* [77].

Параметр	Единица измерения	Цирконатт титанат свинца (PZT)	Титанат бария	Метаниобат свинца	Сульфатеобат лития	Ниобат лития	PVDF	Кварц
Плотность, **ρ**	10^3 кг/м^3	7,8	5,3	6,2	2,06	4,64	1,3…1,8	2,65
Акустический импеданс, **Z**	10^6 кг/м^2 с	32,8	27,6	20,5	11,2	34	2,1…4,7	15,2
Пьезоэлектрический модуль для колебаний по толщине, d_{33}	10^{-12} м/В	360	125	85	15	6	25	2,3
Коэффициент электромеханической связи для колебаний по толщине, K_t	–	0,35	0,33	0,38	0,38	0,47	0,1…0,14	0,1
Механическая добротность, **Q**	–	400	350	15	>1000	>1000	<15	> 10^4
Диэлектрическая проницаемость, ε_r	–	480	960	300	10,3	30	11,5	4,5
Температура точки Кюри	^{0}C	345	120	> 400	130	1210	165…180	574
Эффективность излучателя, $\sum_т$	–	65 (70)	8,4	32	6,9	2,8	6,9	1

* лучшие показатели отмечены маркером

Как видно из табл.8.5., пьезокерамические излучатели из PZT-материала наиболее эффективны.

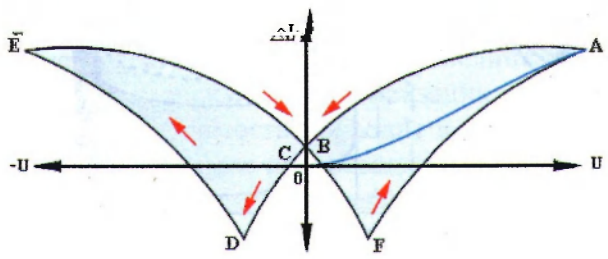


Рис.8.64. Картина электромеханических колебаний, характерных для пьезокерамики:

A и E – состояния насыщения;
D и F – изменение поляризации;
B – состояние остаточной поляризации;
OC – коэрцитивная сила.

Увеличение напряжения электрического поля U вызывает растяжение (удлинение) материала вплоть до т. A (U_{max}). При уменьшении U (от U_{max} до 0) происходит переход характеристики в т. B. Изменение знака U приводит к сжатию (сокращению) материала до т. D, где происходит реверс поляризации диполей, а затем вновь к удлинению до второй точки насыщения E. Аналогичная картина возникает в обратном направлении (E-B-F-A).

Нормальная (штатная) работа пьезоэлемента – режим униполярного напряжения, вне областей насыщения (во избежание опасности механического разрушения материала) и зон изменения поляризации [105].

Ультразвуковой увлажнитель имеет достаточно простую конструкцию (рис.8.65). Пьезоэлектрический ультразвуковой увлажнитель использует электронную схему малой мощности, которая состоит из генератора электрического тока высокой частоты и электроакустического преобразователя (пьезодиска). Генератор размещается в блоке

управления, преобразователь - в водном резервуаре со свободной поверхностью. Угол наклона диска к поверхности – 7° (влияние угла наклона весьма существенно [158]). Для защиты от коррозии пьезодиск окантован листовой сталью либо имеет покрытие из полимерной смолы. Диск преобразователя вибрирует в ответ на электрический сигнал генератора. Образующая в результате действия кавитации и капиллярных волн аэрозоль подхватывается воздушным потоком от вентилятора и поступает в объект, где она поглощает теплоту от окружающего воздуха, вызывая испарение водных капелек и увеличение относительной влажности воздуха.

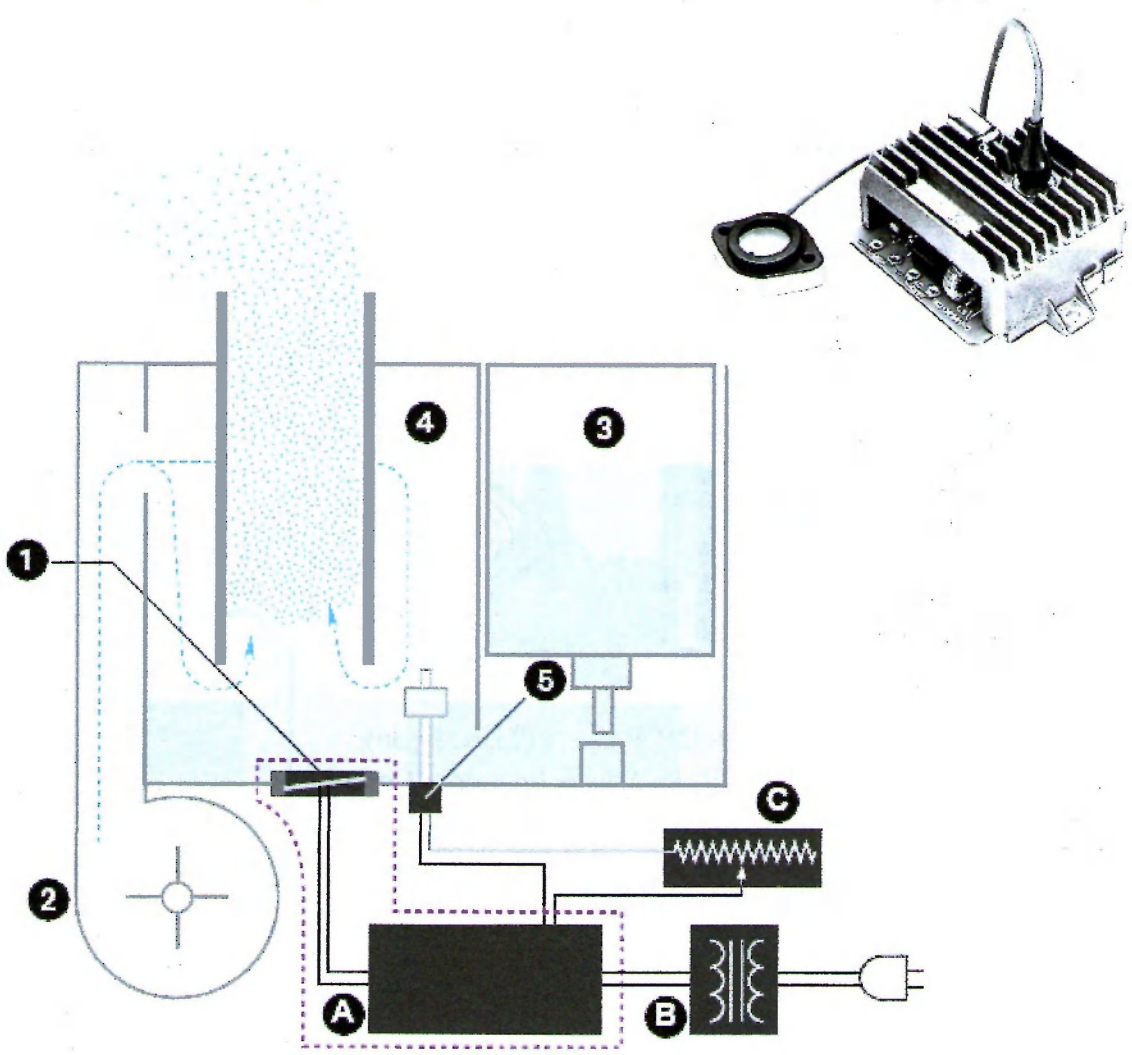


Рис.8.65. Схема ультразвукового увлажнителя (NB Series: TDK, Japan):
A – генератор; B – трансформатор; C – потенциометр; 1 – пьезоэлемент; 2 – вентилятор; 3 – резервуар с водой; 4 – камера распыления; 5 – поплавковый регулятор уровня [253].

Качество распыления определяется размером аэрозольных частиц d и зависит от частоты колебаний f . В соответствии с уравнением Лэнга (Lang R.G.) [208]:

$$d_{32} = 0{,}34\ \lambda,\ м, \qquad (8.12),$$

где длина волны $\lambda = (8\ \pi\ \sigma/\rho_w f^2)^{1/3}$ – формула Кельвина, (8.13),

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; ρ_w – плотность жидкости, кг/м^3;
f – частота колебаний, Гц.

Влияние частоты существенно до значений f < 1 МГц (рис.8.66).

Операционная частота:
1,65 ± 0,05 МГц,
диаметр капелек d_{32} ≈ 2 мкм.

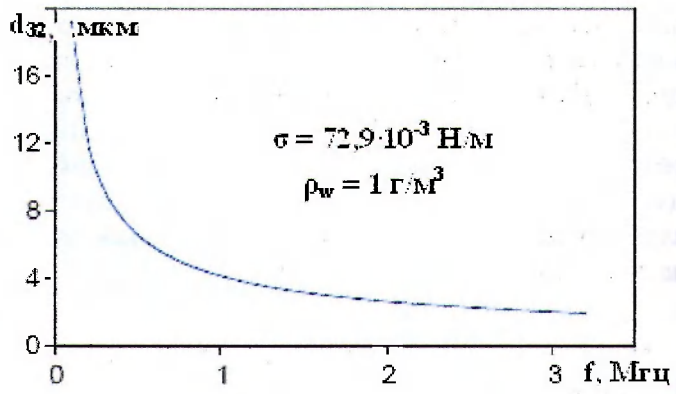


Рис.8.66. Зависимость диаметра капель d_{32} от частоты колебаний f.

Следует иметь в виду, что каждый пьезоэлемент имеет собственную резонансную частоту, значение которой определяется его композицией, размером и формой [237]. Пьезоэлектрические преобразователи изготавливаются под указанное значение операционной частоты в пределах 1,6...1,75 МГц (в медицинских ингаляторах f = 2,5...2,6 МГц), диаметр дисков 15...25 мм, толщина 1,2 мм (рис.8.67).

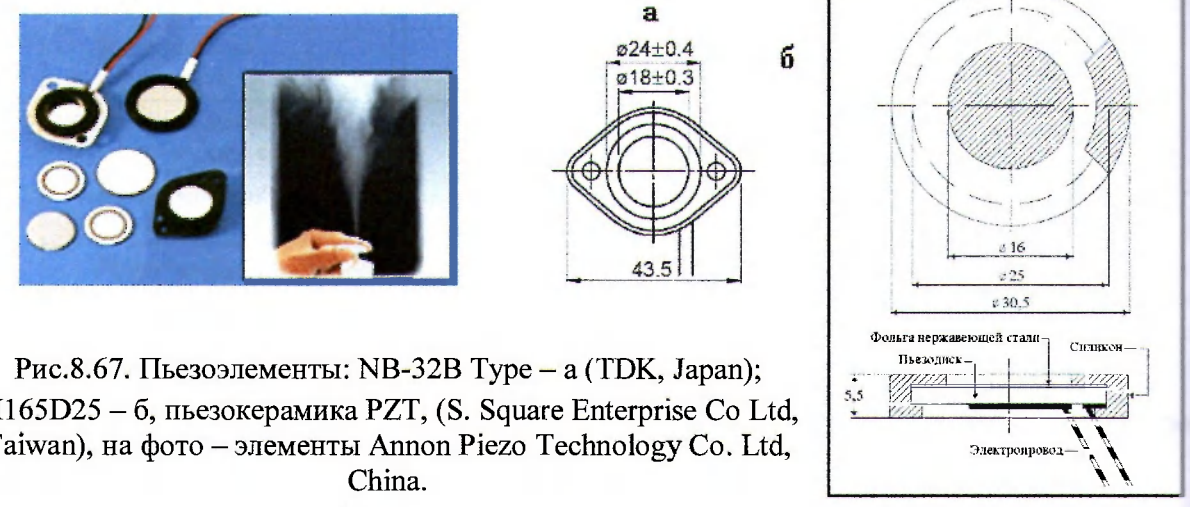


Рис.8.67. Пьезоэлементы: NB-32B Type – а (TDK, Japan); M165D25 – б, пьезокерамика PZT, (S. Square Enterprise Co Ltd, Taiwan), на фото – элементы Annon Piezo Technology Co. Ltd, China.

Производительность ультразвукового увлажнителя L зависит от величины рабочего напряжения U, толщины слоя воды, а также от температуры воды t_w.

Оптимальное расстояние между пластиной вибратора и поверхностью воды X = 35…45 мм [141, 257] (рис.8.68). Уровень воды в резервуаре увлажнителя конструкции TDK автоматически поддерживается поплавковым регулятором (рис.8.70).

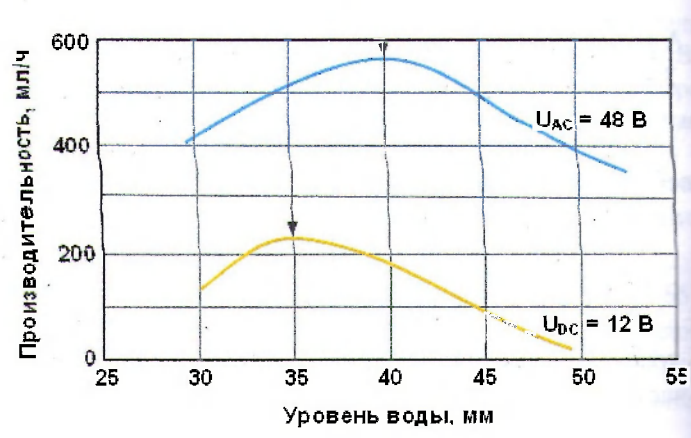


Рис.8.68. Зависимость производительности от уровня воды при различных значениях U.

Оптимальное значение толщины слоя воды X над резонатором с определенной геометрией и частотой колебаний соответствует величине акустического давления P, при которой достигается распыление воды требуемого качества (рис.8.69б):

$$P = \rho\, c\, \pi a^2\, V_1 / \lambda\, X, \qquad (8.14)$$

где ρ – плотность жидкости; c – скорость распространения волн в среде; ρ·c – акустический импеданс воды; a, πa^2 – радиус и площадь поверхности резонатора (пьезодиска), соответственно; V_1 – скорость волнового импульса; λ – длина волны [141].

Как следует из уравнения 8.14, акустическое давление увеличивается с уменьшением толщины слоя воды над резонатором X. Однако, превышение оптимального значения P приводит к увеличению размера частиц распыления, и, таким образом, ухудшается качество распыления (рис.8.69в). С увеличением X акустическое давление уменьшается, и распыление сводится на «нет» (рис.8.69а).

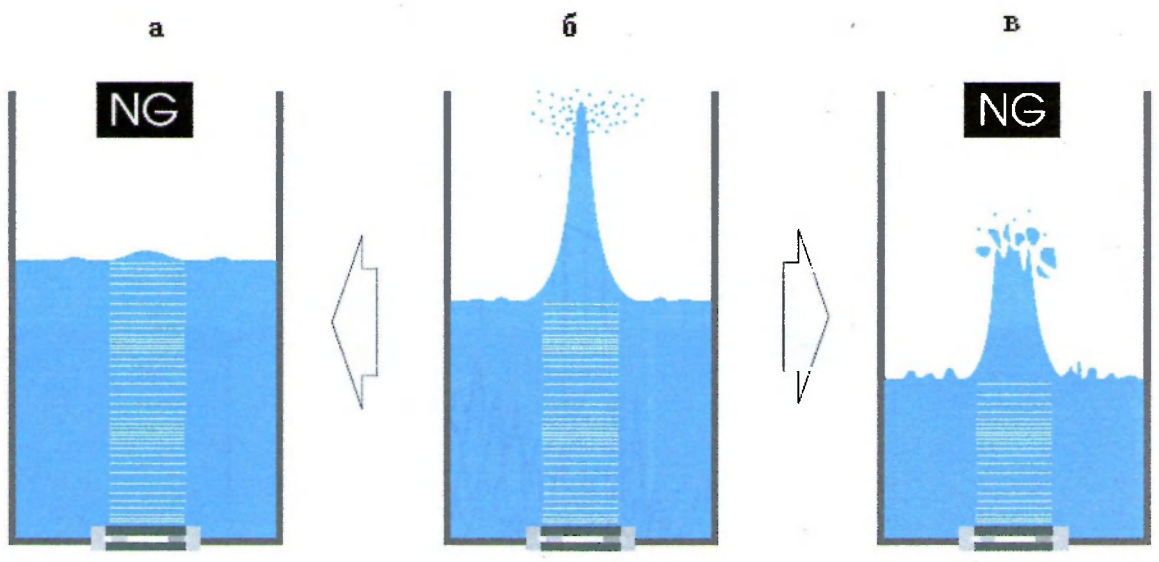


Рис.8.69. Картина распыления воды при различном уровне (толщине слоя) воды над ультразвуковым преобразователем [141]:
а – высокий; б – оптимальный; в – низкий.

Компания Mainland Mart разработала способ автоматического дистанцирования преобразователя от водной поверхности на оптимальное расстояние за счет плавающего кольца с фиксированным погружением пьезоэлемента (рис.8.70). Это позволяет обеспечивать ультразвуковое распыление в водоемах, а также использовать глубокие контейнеры с большим запасом воды (минимальное расстояние до дна отслеживается сенсором).

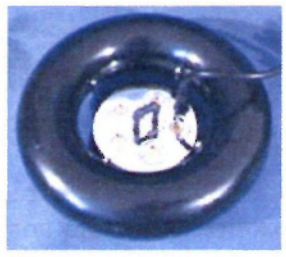
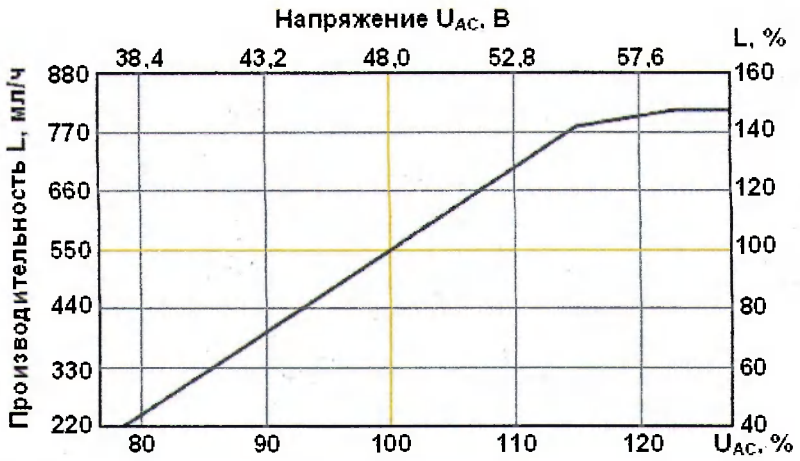


Рис.8.70. Плавающий пьезоэлемент.

Величина рабочего напряжения является основным параметром, регулирующим производительность увлажнителя. Как видно из рис.8.71, 8.72 с увеличением напряжения производительность возрастает и при U = 48 В производительность одного элемента составляет L = 500…550 мл/ч. На рис.8.71 показано приращение производительности ΔL от 500 мл/ч при изменении U в диапазоне 33,6…62,4 В [141, 257].



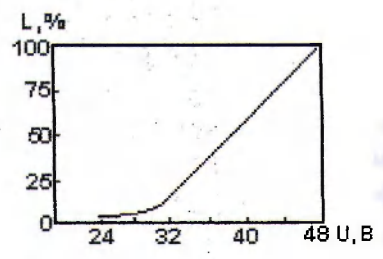


Рис.8.71. Влияние рабочего напряжения U на величину L.

По данным испанского национального центра микроэлектроники (Сарагоса) при напряжении менее 10 В распыление воды не происходит. На рис. 8.74а зафиксирована начальная стадия процесса – формирование конуса на поверхности воды при U = 10 В [220].

В рабочем диапазоне значений U распределение аэрозольных частиц практически одинаково (рис.8.72), т.е. не зависит от U, что подтверждает зависимость $d_{32}(f)$ (8.12).

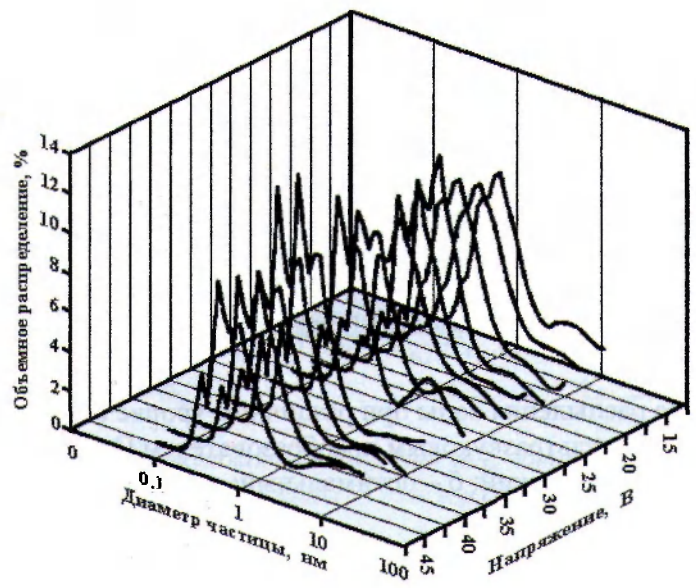


Рис.8.72. Зависимость объемного распределения капель от величины U [220].

Производительность ультразвукового увлажнителя можно повысить за счет подогрева воды (рис.8.73). Кавитация наиболее сильно проявляется при 70 °С. При приближении к точке кипения, вода начинает закипать в кавитационных зонах (областях разряжения), что снижает эффект кавитации или даже вовсе устраняет это явление.

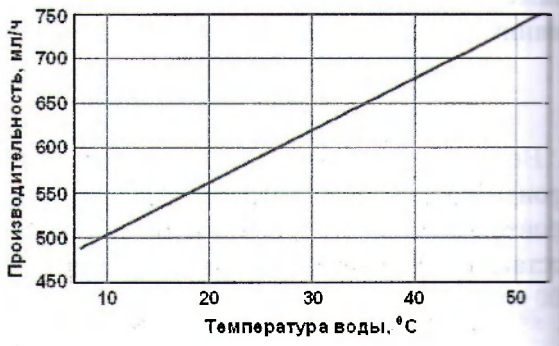


Рис.8.73. Зависимость производительности от температуры воды при U = 48 В [141, 257].

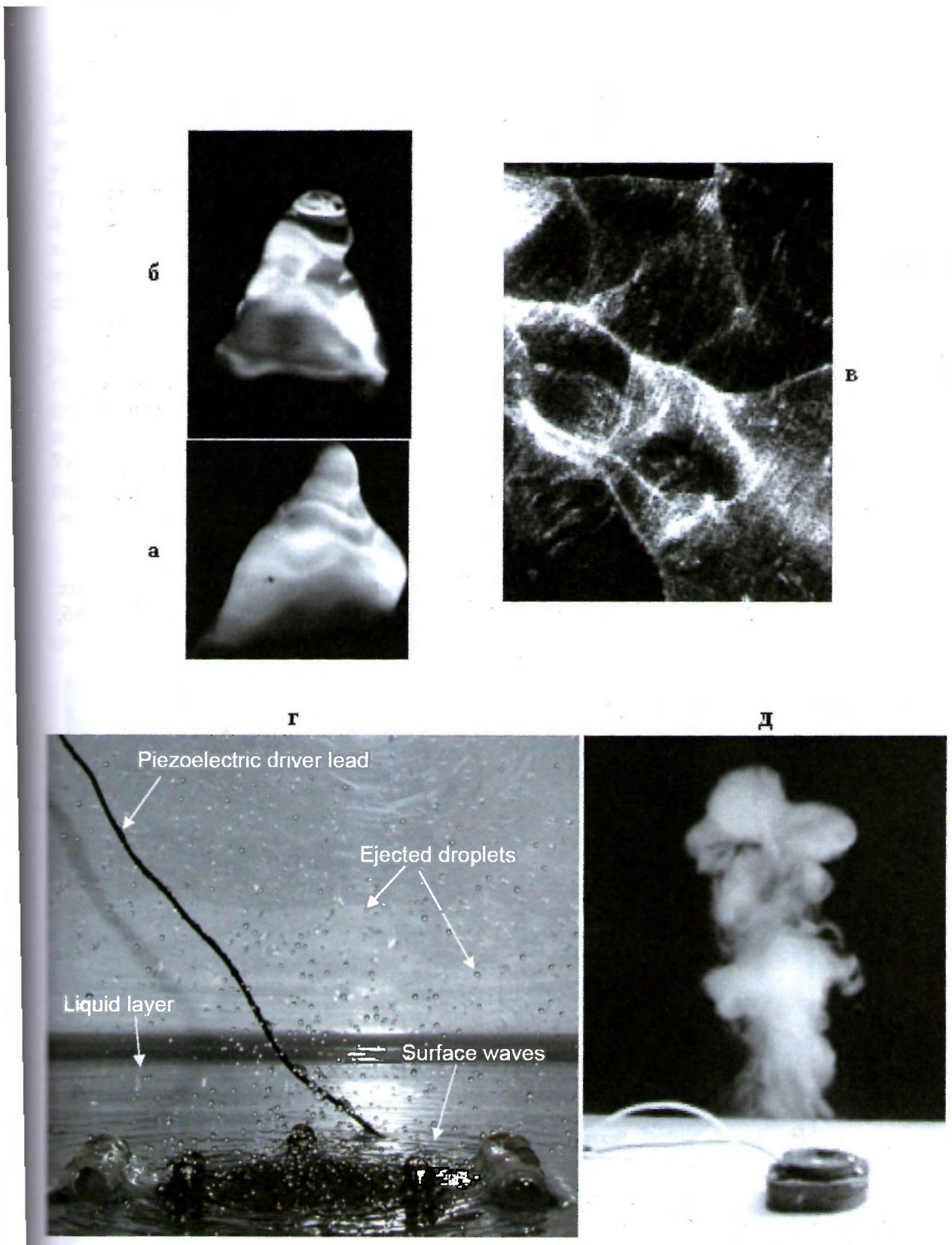


Рис.8.74. Фотографические материалы* ультразвукового распыления воды:
а, б – образование конуса над водной поверхностью при U = 10 В и U = 33 В, соответственно;
в – фрагмент водной поверхности (4,6x3,5 мм) при U = 15 В; г – поверхностные капиллярные волны; д – аэрозольное облако над пьезоэлектрическим преобразователем [133, 220, 260].

*разрешение макрофотографий 12 мкм/пиксель

Рабочий диапазон температур должен быть ограничен значением $t_w \leq 50$ °С. Это связано с влиянием температуры на продолжительность работы пьезопреобразователя: при выполнении данного требования составляет 10 000…15000 часов непрерывной работы, по данным TDK и Humidifirst.

Уровень шума устройства NB-58S (TDK) при указанной операционной частоте 1,6…1,75 МГц – на уровне 45 дБ (рис.8.75) [257].

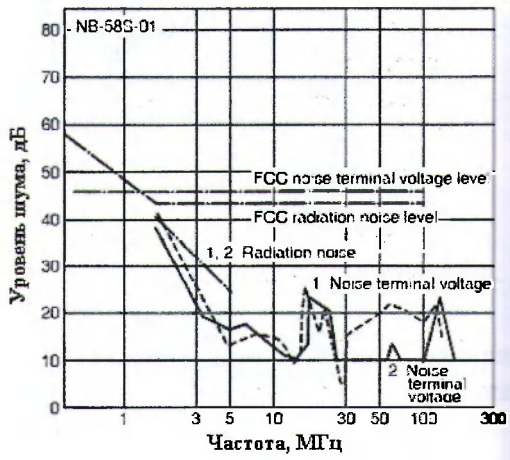
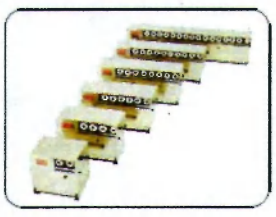


Рис.8.75. Шумовые характеристики.

Производительность увлажнителя L – n L_1 достигается за счет набора необходимого числа преобразователей (n =2...30) (рис.8.75, 8.77, 8.78).



В настоящее время ультразвуковые атомайзеры выпускаются в двух основных исполнениях: дефлекторный вариант (рис.8.76а) и со встроенным вентилятором (8.76б. 8.76в).

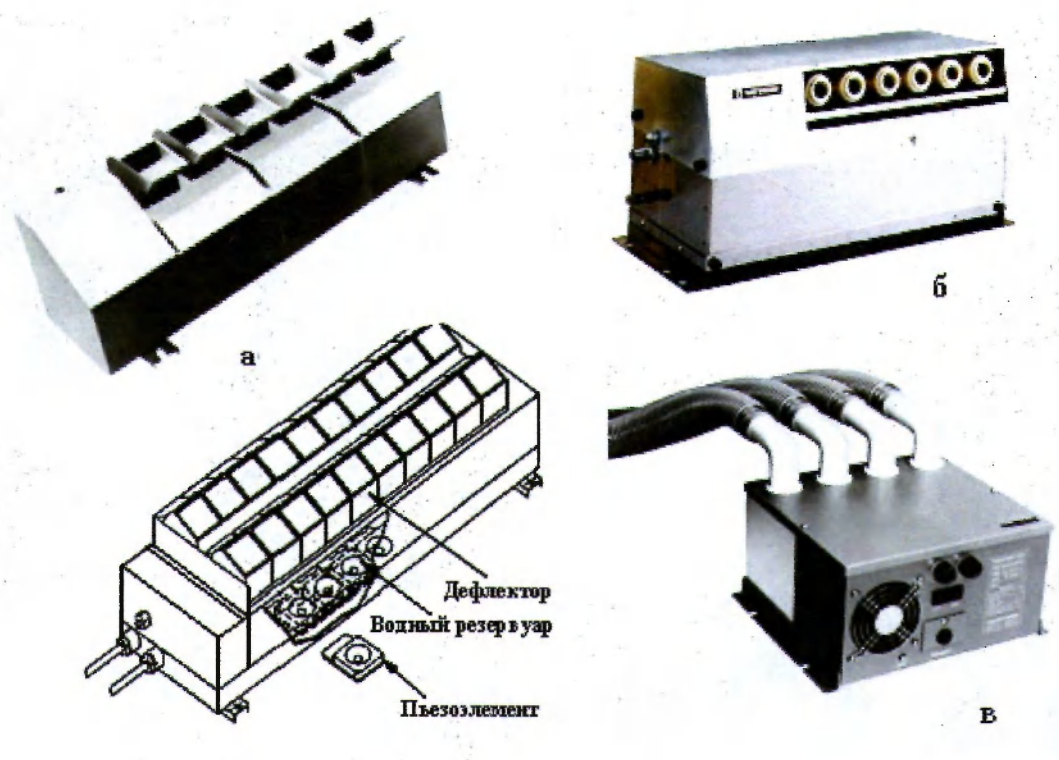


Рис.8.76. Основные типы ультразвуковых увлажнителей:
с дефлектором – ENS-type – (а); вентиляторные: BNB-type – (б) и SCA-type – (в).

Они применяются в секциях увлажнения СКВ (ENS), непосредственно в объекте (BNB – на весь объем, ENS – для локального действия), а также в качестве увлажнителей-доводчиков (SCA) для отдельных помещений (в т.ч. камер промышленных холодильников) (рис.8.78, 8.79). При использовании SCA сам прибор с водным резервуаром находится с внешней стороны, а аэрозоль подается по трубкам во внутреннюю область (рис.8.78г).

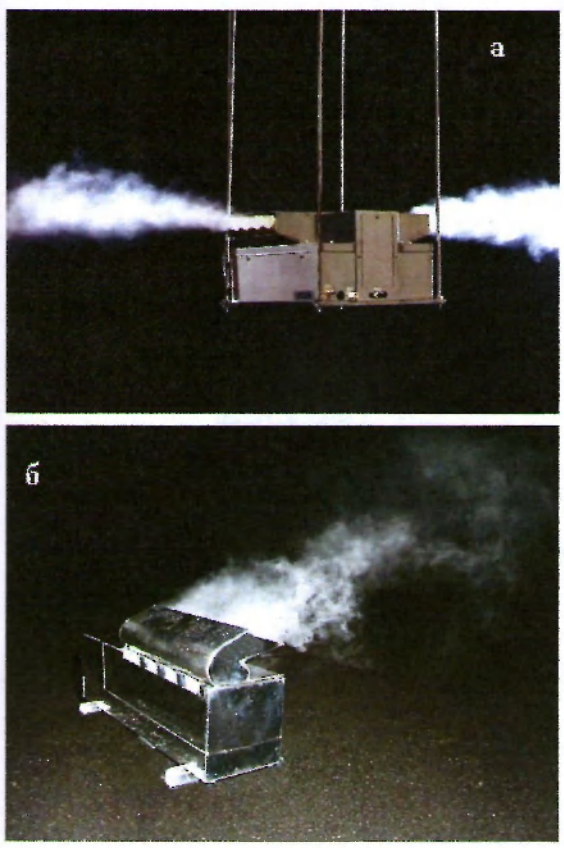
Ультразвуковые увлажнители хорошо зарекомендовали себя при обеспечении нормальной работы коммуникационной аппаратуры в помещениях станций автоматической телефонной связи АТС, – для снятия избыточного статического электричества. Очень удобны для круглосуточного увлажнения в объектах выращивания различных ферментов, грибов, растений. Применяются в торговых прилавках для плодов, овощей, свежей рыбы, в шкафах-витринах с сигарной продукцией. Для сведения: сохранение потребительских качеств сигар при их хранении обеспечивается в условиях t = 20…25 °С и φ = 70…80 %. С этим справляется увлажнитель с подачей водного аэрозоля 1 кг/ч в шкафы-витрины специализированных магазинов.

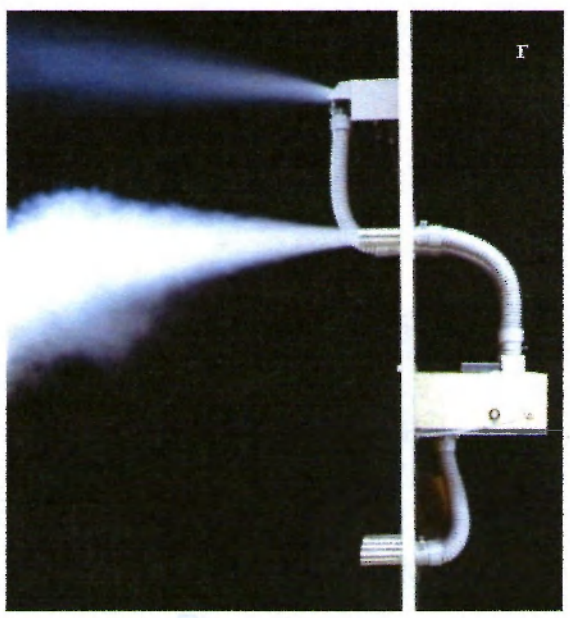
К числу наиболее типичных объектов ультразвуковых увлажнителей (в связи с небольшой производительностью) следует также отнести жилые и офисные помещения, автомобили (рис.8.77). Аппарат МН-1 удобно коммутируется в электросеть автомобиля 12 В через гнездо прикуривателя, производительность 50 мл/ч, потребляет 3 Вт, автоматически отключается при недостатке воды (емкость 140 мл).



Рис.8.77. Персональный увлажнитель МН-1.

Существуют стационарные и мобильные аппараты (рис.8.77).





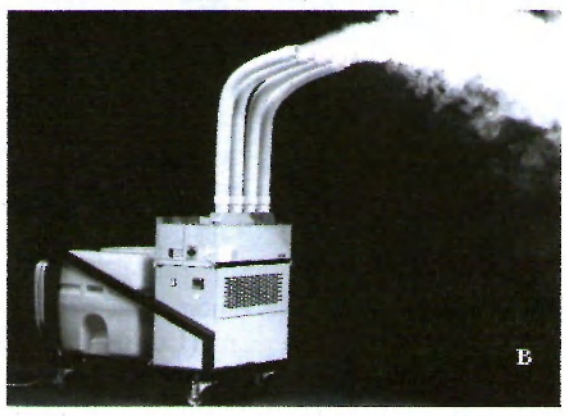


Рис.8.78. Размещение ультразвукового увлажнителя в помещениях: подвесной (а), напольный (б) и мобильный вариант (в); на стенке холодильной камеры (г).



Рис.8.79. Использование ультразвуковых увлажнителей (UCAN Co., Ltd., AIRWIN):
в торговых прилавках для овощей – а;
в цветочных магазинах (мобильное устройство) – б.

При использовании аппаратов ENS-type в объектах с распределенной нагрузкой (например, станции АТС), а также в секциях увлажнения кондиционеров и приточных камер их располагают ступенчато на специальных стеллажах (рис.8.80, 8.81).



Рис.8.80. Стеллажное размещение увлажнителей в помещениях (Humidifirst, Inc.).



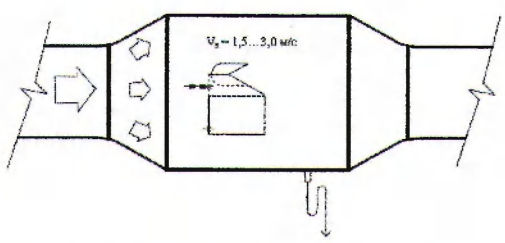




Рис.8.81. Схема и фотографии секций кондиционера с увлажнителем ENS-type (Humidifirst, Inc.).



Важной расчетной величиной, знание которой необходимо для правильной инсталляции и эксплуатации кондиционеров с ультразвуковыми увлажнителями ENS, либо в случае установки ENS непосредственно в воздуховоды, является длина участка ассимиляции мелкодисперсной капельной влаги L_{AD} (AD – absorption distance). Расстояние от увлажнителя до вентилятора, аппарата, фильтра или поворота воздуховода, во избежание выпадения конденсата, должно быть не менее L_{AD} (рис.8.82).

На рис.8.83 приведена номограмма определения L_{AD} для необходимого уровня увлажнения (φ) при различных значениях скорости воздушного потока $v_в$ [113]. Номограмма действительна для значений температуры воздуха 18…24 °С.

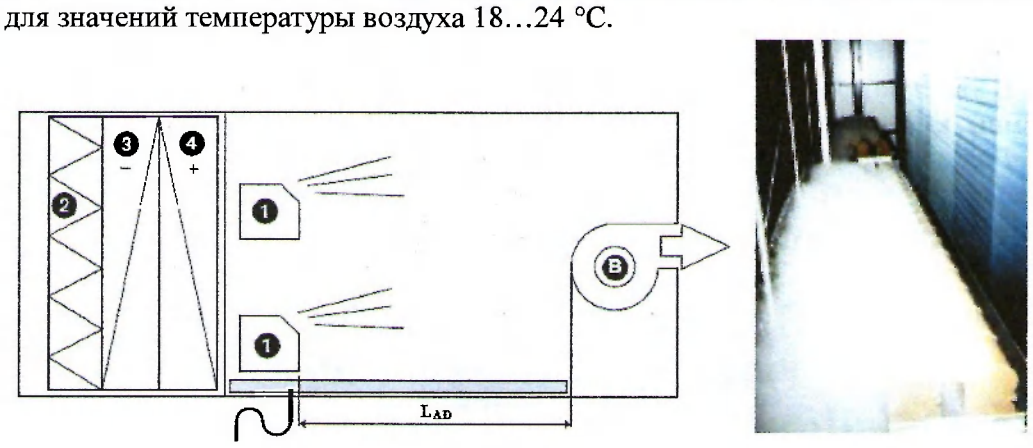


Рис.8.82. Схема правильной установки увлажнителей ENS:
1 – увлажнители; 2 – фильтр; 3 – воздухоохладитель;
4 – воздухонагреватель; В – вентилятор.

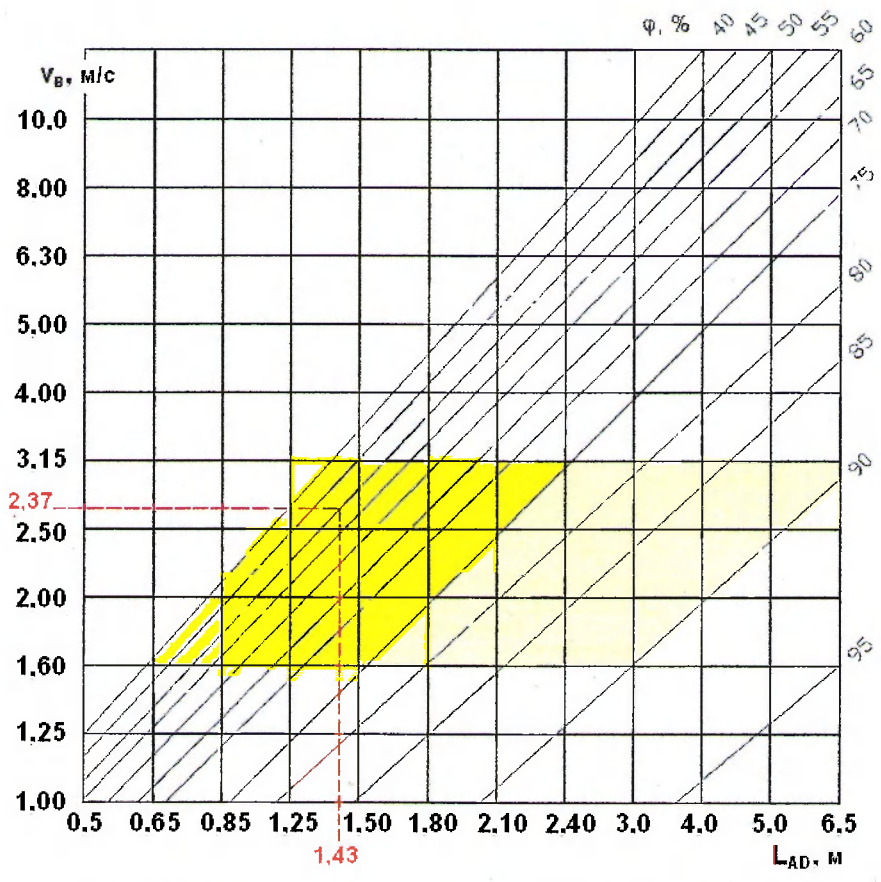


Рис.8.83. Номограмма определения L_{AD} (Stulz GmbH).

Кавитационный принцип действия ультразвуковых увлажнителей обладает стерилизующим эффектом и практически исключает возможность бактериального заражения воздуха, поскольку большинство микроорганизмов, содержащихся в воде, погибают при воздействии волн частотой f > 500 кГц.

В некоторых моделях аппаратов бытового назначения дополнительно используются серебряные антибактериальные патроны ISS (Ionic Silver Stick), рис.8.84, обладающие большой ионообменной наноструктурированной поверхностью. Образующие, при контакте с водой, ионы Ag разрушают ферменты, поддерживающие жизнедеятельность бактерий. вирусов и грибков. Серебро в состоянии эффективно и быстро, в течение нескольких минут. нейтрализовать более чем 650 видов бактерий.

В увлажнителях японской фирмы UCAN применяются стерилизующие ультрафиолетовые лампы, которые расположены в водном резервуаре (см. § 10.2).

Для обеззараживания, в частности от бактерий Legionella (§ 10.2), может использоваться предварительный подогрев воды в отдельной секции до 80 °С (в ряде конструкций предлагается в качестве опции).

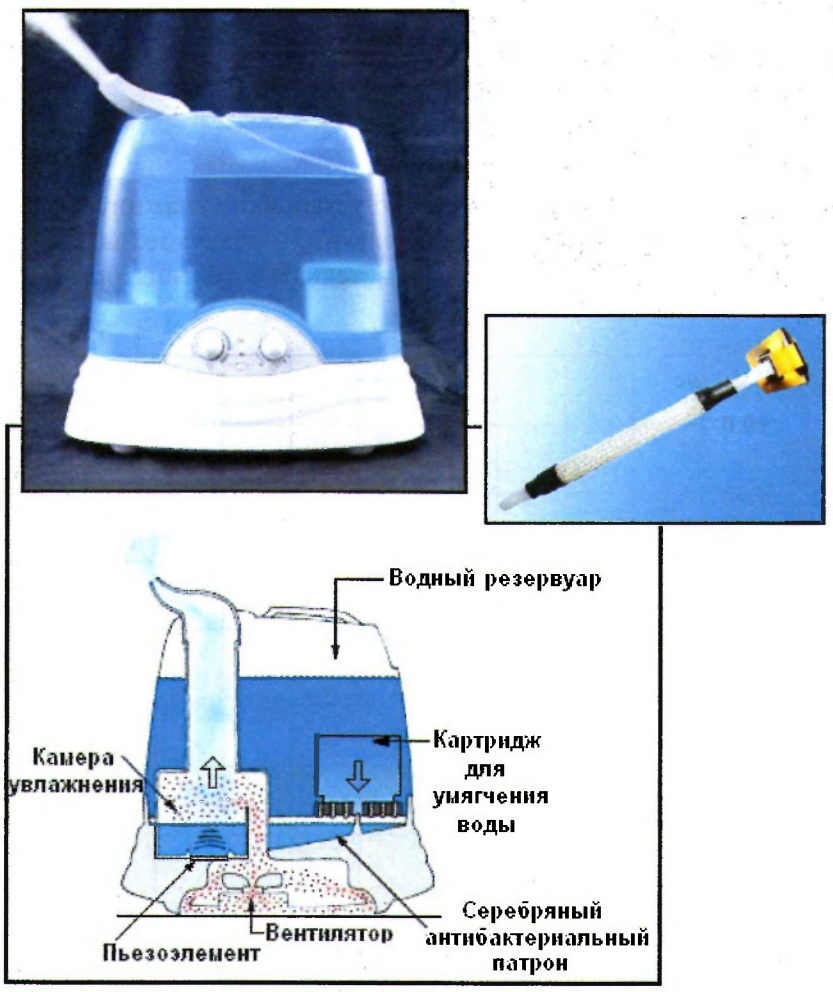


Рис.8.84.Бытовой увлажнитель AOS-7133 (Air-O-Swiss) с антибактериальным патроном ISS.

К разряду бытовых приборов также относятся ультразвуковые увлажнители-лампы – торшеры “Mist of Dreams” (рис.8.85) с непрозрачным водяным облаком и непрерывно изменяющимся цветом (красным, белым, синим и фиолетовым). В воду могут добавляться различные ароматизирующие вещества.



Рис.8.85. Ультразвуковые увлажнители-лампы.

Ультразвуковые увлажнители, также как и форсуночные распылители, как правило, работают на полностью деминерализованной воде (проводимость менее 5 мкСм/см, до 20 мкСм/см - кратковременно). В качестве конструкционных материалов применяются только нержавеющая сталь и высококачественная «абсолютная» пластмасса ABS Plastic, за счет чего предотвращается проблема загрязнения воздуха продуктами металло- и биокоррозии. В связи с этим ультразвуковые увлажнители получили преимущественное право на включение их в состав СКВ «чистых комнат».

В специальных приложениях, например, в фитотехнологиях для выращивания и культивирования растений по принципу аэропоники, задействована обычная вода с

сохранением всех содержащихся в ней минералов. Для этого используются генераторы тумана UFG (Ultrasonic Fog Generator) (рис.8.86). Создание однородного тумана с диаметром капелек воды менее 5 мкм (при добавлении в нее различных питательных веществ) позволяет влаге глубоко проникать в корневую систему растения, обеспечивая питание каждого волоска. Поддержание необходимых условий воздушной среды (t = 24 °C, φ = 85 %) за счет работы электронного блока управления, обеспечивает полное усвоение влаги при отсутствии «свободной воды», что исключает проявления корневой гнили.

Туман с медианным размером капель $d_{50} \leq 5$ мкм зачастую именуется «сухой водой». В природных условиях атмосферный туман характеризуется $d_{50} = 12…15$ мкм.

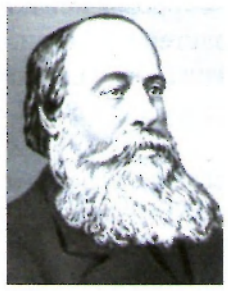


Рис.8.86. Генераторы тумана UFG (MDFD-6 – Micro Drops Fog Dispenser).

Ультразвуковые увлажнители с пьезоэлектрическими преобразователями отличаются низким энергопотреблением – около 50…75 Вт на 1 кг вырабатываемой влаги в час (это составляет 80 % от энергозатрат аппаратов с пневмоакустическими форсунками и всего 7 % от затрат увлажнителей парового типа, см. § 8.3). Увлажнители малошумны (около 45 db).

Максимальная производительность существующих моделей: 18 кг/ч (аппарат ENS-18. n = 30). Рекомендуемый диапазон температур воды 5…50 °C. В случае стальной окантовки пьзоэлемента рекомендуется выдерживать диапазон значений показателя кислотности воды pH = 5…8 (при смоляном покрытии данное ограничение снимается).

8.1.2.2. МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА



Магнитострикцию (от магнит и лат. strictio – сжатие) открыл Джеймс Прескотт Джоуль в 1842 г.

Магнитострикционные преобразователи изготавливаются из ферромагнетиков – веществ, обладающих атомным магнитным порядком в отсутствие внешнего поля. К этой группе материалов относятся: никель; сплавы Fe –Al (*алфер*), Fe – Ni (*пермаллой*), Co – Ni, Fe – Co, Co – Fe – V (*пермендюр*); терфенол, ряд *ферритов* $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$ и др., которые изменяют свою геометрию под действием магнитного поля – эффект магнитострикции [6, 83].

Магнитострикционный эффект объясняется существованием в ферромагнетиках магнитных диполей, образующихся за счет доменов элементарных кристаллов, в которых атомные магнитные моменты ориентированы в одном направлении. Это направление соответствует направлению наилегчайшего намагничивания и определяется минимумом потенциальной энергии, складывающейся из энергии кристалла и энергии упругих напряжений.

Под действием внешнего магнитного поля домены ферромагнетиков ориентируются в направлениях, образующих наименьший угол к направлению указанного поля, при этом, с изменением ориентации магнитных моментов отдельных доменов изменяется и кристаллическая решетка материала. Большое число микроскопических деформаций материала, направленных в одну сторону, приводит к изменению его длины (рис.8.87а).

Магнитострикция характеризуется относительным изменением длины образца $\lambda = \Delta L/L$, которое при намагничивании достигает значений порядка $10^{-6}…10^{-2}$ (L – длина, ΔL – приращение длины, рис.8.87, 8.88). Уже в относительно слабых магнитных полях величина λ достигает определенного предельного значения насыщения λ_s, которое практически не меняется при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля H (рис.8.87). При комнатных температурах величина λ_s для никеля равна $-35\cdot10^{-6}$, кобальта $-50\cdot10^{-6}$, железа $8\cdot10^{-6}$. С ростом температуры магнитострикция уменьшается и в точке Кюри равна нулю.

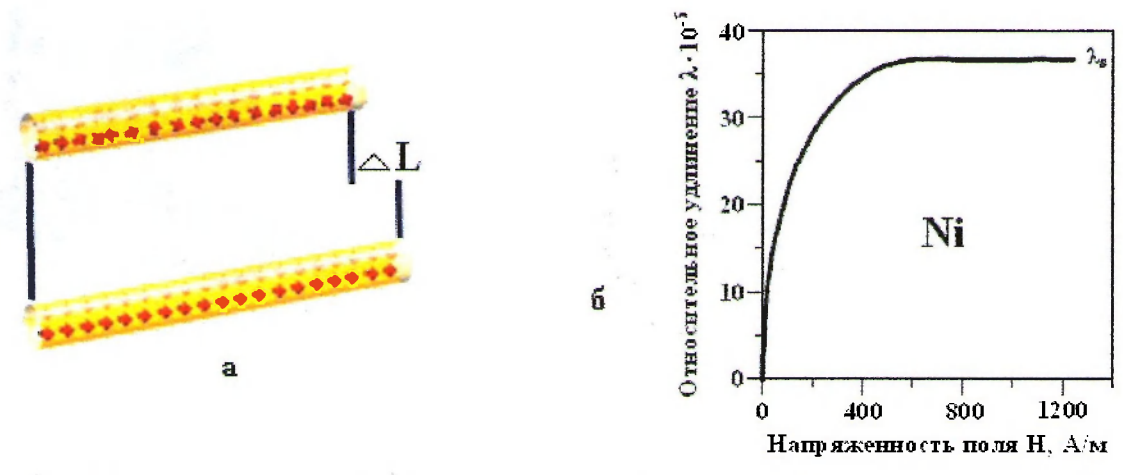


Рис.8.87. К проявлению магнитострикции на уровне доменов (а) и зависимость линейной магнитострикции поликристалла никеля от напряженности магнитного поля (б).

Магнитные свойства материала характеризуются магнитной восприимчивостью $\chi = M/H$, где M – магнитный момент единицы объема вещества или намагниченность в магнитном поле напряженностью H. Полная магнитная индукция составляет:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M, \qquad (8.14)$$

где слагаемые правой части представляют собой составляющие внешнего и внутреннего поля, соответственно (μ_0 – магнитная постоянная).

Ферромагнетики, как и сегнетоэлектрики (см. § 8.1.2.1) – материалы с нелинейными характеристиками. Для них свойственны нелинейные зависимости намагниченности M и магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H, типично проявление гистерезиса (рис.8.88).

Если первоначально ненамагнпченный ферромагнетик поместить в магнитное поле и, при этом, увеличить напряженность поля H до состояния насыщения (т. A, рис.8.88), а затем уменьшить H, то проявится петля магнитного гистерезиса. Первоначальный ход кривой OA_1A (основная кривая намагничивания) изменится на ACKD, и далее, при повторном увеличении H, на DFEA. При H = 0 материал будет иметь остаточную индукцию B_0 (отрезок OC). Для размагничивания материала потребуется приложить к нему магнитное поле H_c – коэрцитивную силу (отрезок OK).

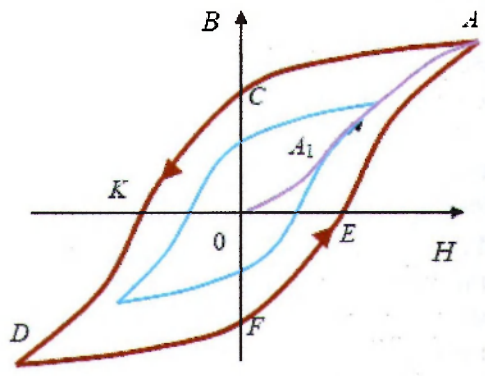


Рис.8.88. Петля магнитного гистерезиса ферромагнетика.

Преобразователь (излучатель) представляет собой сердечник из магнитострикционного материала с соленоидной обмоткой (рис.8.89, 8.90). На магнитострикцию не влияет знак магнитного поля. Она, как правило, носит анизотропный характер, т.е. зависит от направления и величины намагниченности и проявляется в изменении формы (линейных размеров) кристалла без изменения его объема. При пропускании переменного электрического тока через обмотку излучателя его сердечник деформируется в одном направлении при любом направлении магнитного поля. Поэтому частота механических колебаний излучателя вдвое больше частоты электрического тока (правило четности).

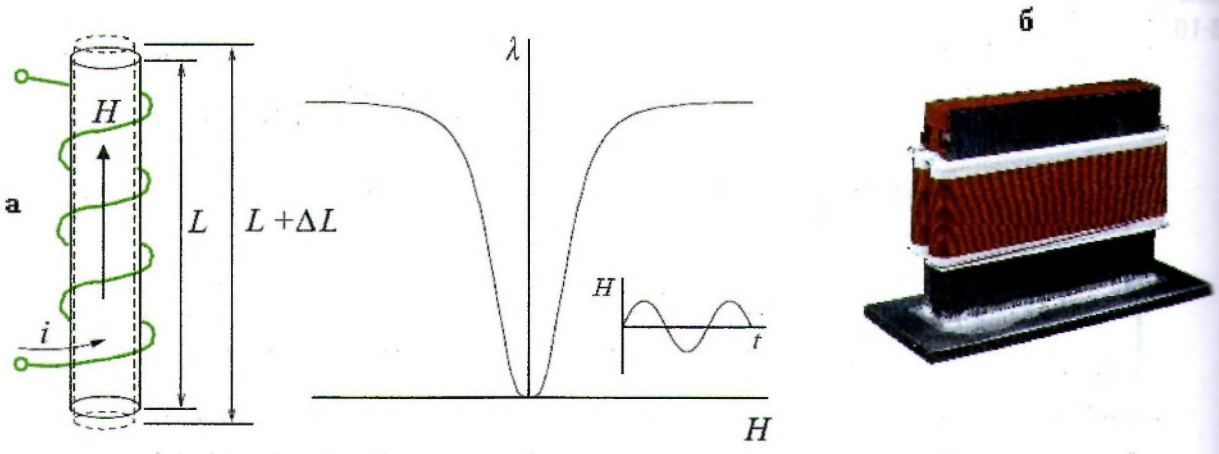


Рис.8.89. Магнитострикционный эффект (а) и образец преобразователя (б) [154].

Для совпадения частоты колебаний сердечника с частотой тока в обмотке следует использовать постоянное подмагничивание, что достигается с помощью постоянного магнита либо дополнительной обмотки с постоянным током. При их использовании переменное магнитное поле соленоида преобразуется в пульсирующее поле (т.н. нечетный эффект) [6], при этом увеличивается амплитуда переменной магнитной индукции и, соответственно, деформация сердечника излучателя (рис.8.90).

В качестве примера поляризованного магнитострикционного излучателя можно привести широко известный телефонный капсюль телефонных аппаратов.

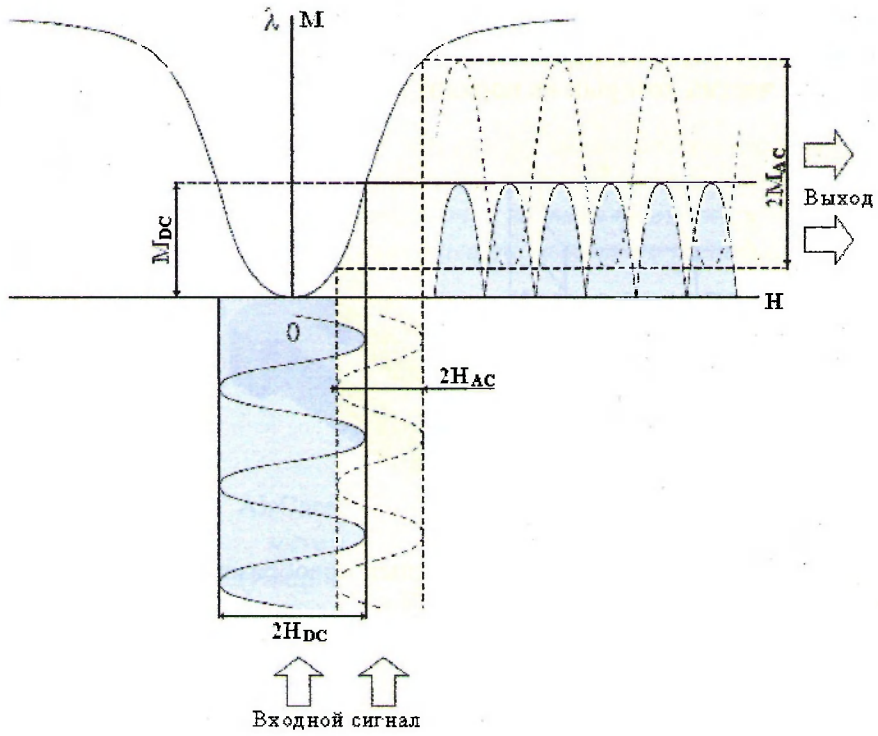


Рис.8.90. Влияние постоянного подмагничивания на магнитное поле магнитострикционного преобразователя [154].

Магнитострикционные системы работают на основе двойного преобразования энергии: электричество создает магнитное поле, которое, в свою очередь, генерирует механические колебания высокой частоты в магнитострикционном материале, а значит и в контактируемой с ним среде.

При использовании магнитострикционных металлов, вследствие больших энергетических потерь на нагревание обмотки и перемагничивание, эффективность систем составляет около 50 %. С учетом того, что к.п.д. генераторов не превышает 70 %, общая эффективность преобразования составляет 30…40 %.

Ферриты отличаются от других магнитострикционных металлов высоким электрическим сопротивлением, которое в 10^2…10^3 раз выше, чем у металлов, и, в связи с этим, чрезвычайно малыми потерями на вихревые токи. Последнее обстоятельство ставит ферриты, по эффективности трансформации энергии, в один ряд с пьезоэлектрическими преобразователями, для которых потери в материале составляют всего лишь 5 %, а общая эффективность 80 % (табл.8.6).

Таблица 8.6. Эффективность преобразователей [169].

Тип вибратора	Магнитострикционный		Пьезоэлектрический	Электрострикционный
Материал	Никель	Феррит –V2	Кварц	Титанат бария
Частота	50 кГц (макс.)	100 кГц (макс.)	1 МГц (мин.)	200 кГц…2 Мгц
Эффективность	30…40 %	80 %	80 %	80 %

Компания TDK (Japan), на основе ферромагнетика V2 [169, 170], обладающего эффективностью 80…95 %, разработала магнитострикционные устройства для увлажнения воздуха и для ультразвуковой очистки поверхностей жидкостных резервуаров. В этих устройствах применяется преобразователь π-формы (форма напоминает написание числа π) со встроенным в его основание постоянным магнитом (рис.8.91).

Как уже отмечалось в § 8.1.2.1, обеспечение качественного распыления воды требует применения операционной частоты f > 1 МГц. Поскольку собственная частота резонансного вибратора обратно пропорциональна геометрическим размерам его излучающей поверхности *e* x *f* (рис.8.91, табл.8.7), то использование современных магнитострицонных

ферромагнитных материалов ограниченно частотой в 100 кГц. А это, к сожалению, не позволяет получать аэрозоли на уровне электрострикционных увлажнителей (рис.8.66). размеры частиц которых на порядок меньше.

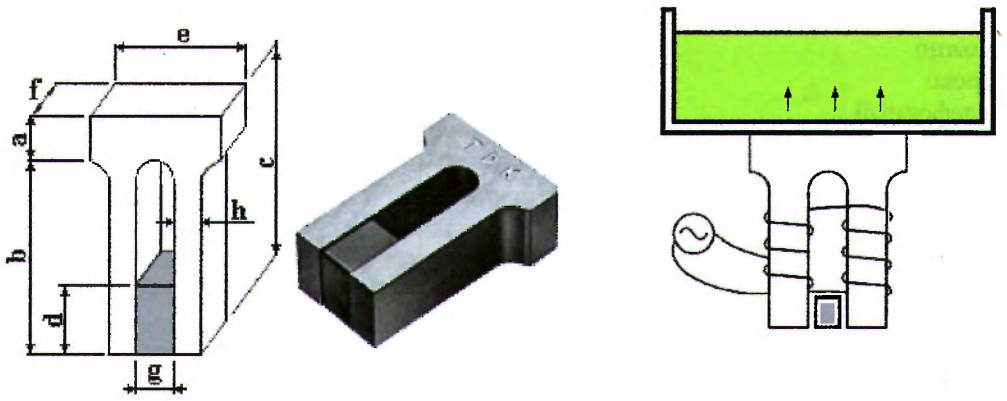


Рис.8.91. Магнитострикционный преобразователь (а) и схема увлажнителя (б).

Таблица 8.7. Геометрические размеры преобразователей TDK.

Вибратор	Операционная частота, кГц	Размеры, мм							
		a	b	c	d	e	f	g	h
V2Xπ20	19.5±0.4	18	114	132±3	26	51±1	25±0.5	14	13
V2Xπ28	28.5±0.4	14	74	88±3	18	40±1	20±0.5	11	9
V2Xπ44	40.5±0.8	12	50	62±2	18	40±1	20±0.5	11	9
V2Xπ50	50.5±0.8	12	37	49±2	18	40±1	20±0.5	11	9
V2Xπ75	75±1.6	6.5	26	32.5±2	12	27±1	13±0.5	7.7	6
V2Xπ100	100±1.6	5	20	25±2	9	21±1	10±0.5	5.5	4.5

В связи с малой операционной частотой f < 100 кГц, магнитострикционные преобразователи, в основном, используются в устройствах ультразвуковой очистки поверхностей жидкостных резервуаров, для которых оптимальны частоты в 28 кГц и 40 кГц.

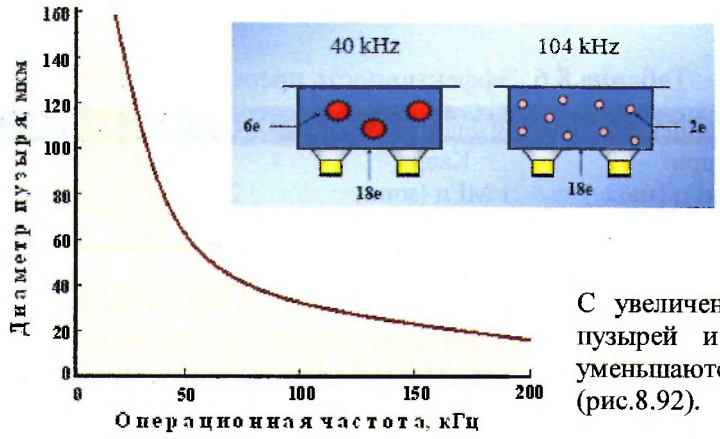


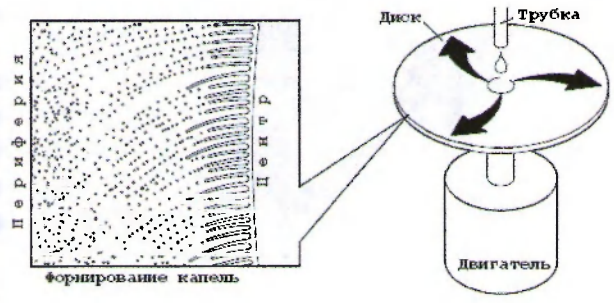
Рис.8.92. Влияние операционной частоты на некоторые рабочие характеристики магнитострикционного преобразователя [172].

С увеличением частоты размеры кавитационных пузырей и мощность передаваемых колебаний уменьшаются, что снижает эффект очистки (рис.8.92).

Главное преимущество магнитострикционных систем – стабильность рабочих характеристик и практически неограниченный ресурс времени эксплуатации, в связи с чем поиск новых материалов, на основе которых можно было бы увеличить операционную частоту и тем самым улучшить качество распыления воды продолжается…

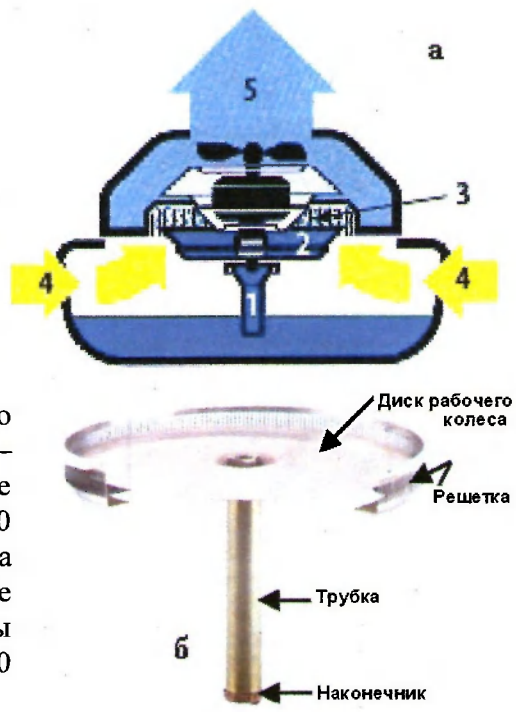
8.1.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСПЫЛИТЕЛИ ЦЕТРОБЕЖНОГО ТИПА

Centrifugal Humidifiers



В эту группу атомайзеров входят устройства, в которых распыление воды достигается за счет центробежных сил – дисковые распылители (центрифуги).

В аппаратах компаний Walton, Trion, AirCare, Carel, Axair Ltd. (рис.8.93…8.96) метод центрифугирования реализован следующим образом. При вращении рабочего колеса центрифуги (рис.8.93, позиция 2) вода поднимается из поддона через всасывающий канал - трубку (1) во внутреннюю область, где она отбрасывается центробежными силами к периферии. Здесь колесо имеет боковое ограждение в виде решетки – перфорированной пластины (3), разбивающее водяную пленку на мелкие частицы размером 5…10 мкм. Воздух поступает в аппарат через боковые окна (4), увлажняется и направляется в помещение вентилятором (5), лопасти которого также размещены на едином валу. Число оборотов рабочего колеса 3250 об/мин.



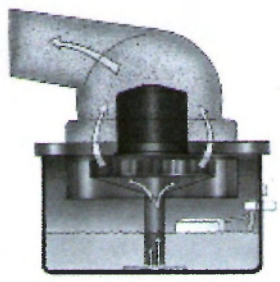


Рис.8.93. Увлажнитель с центрифугированием воды: а – схема работы; б – оригинальное рабочее колесо Walton; в – устройство.

Walton выпускает увлажнители:

SF10 (SW10) производительностью до 4,5 кг/ч распыляемой воды, предназначенные для установки непосредственно в помещении (SF – с встроенным фильтром, для работы в запыленных промышленных зонах; SW – без фильтра), рис.8.94а.

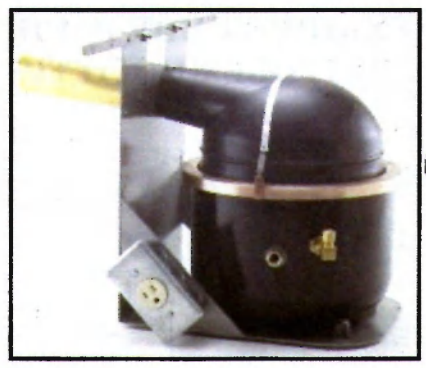
SW2 (WF-HH-229) – производительностью 0,9 кг/ч, для местного увлажнения в объектах небольшого объема: климатические камеры, шкафы с табачной продукцией и др. Аппарат снабжен поворотным куполом, рис.8.94б;

WF-HP-226 – производительностью 1,35 кг/ч, для обработки приточного воздуха, имеет патрубок отбора воздуха из воздуховода, рис.8.94в;

WT, WJ-228 (рис.8.94г) – для установки непосредственно в приточном воздуховоде (в горизонтальной плоскости у основания воздуховода). При этом увлажнители могут работать без собственных вентиляторов при номинальных расходах воздуха в воздуховоде: WJ-228 – 2000 м^3/ч, WT – 3400 м^3/ч. Производительность по воде 5,5 и 10,9 кг/ч.



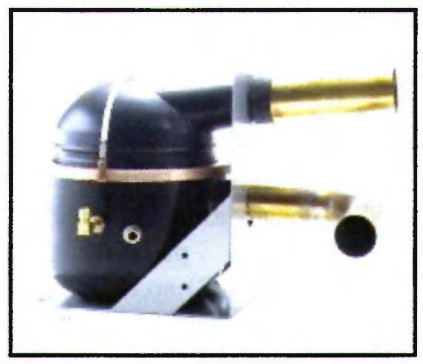
а



б

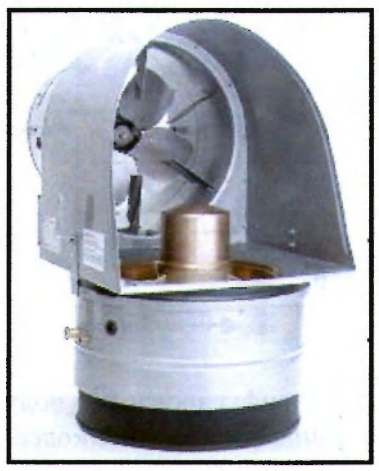


г



в

Компания Walton имеет 60-летний опыт производства атомайзеров центробежного типа.



д

Рис.8.94. Исполнение аппаратов Walton:
SW10 – а; SW2 (WF-HH-229) – б;
WF-HP-226 – в; WT, WJ-228 – г; SF – д.

На рис.8.94д представлена модель Walton серии SF, в которой центрифуга и вентилятор имеют собственные приводы, а их оси вращения расположены взаимоперпендикулярно (двигатель вентилятора при этом конструктивно защищен от потока влажного воздуха). Частицы воды от центрифуги непосредственно выбрасываются в набегающий поток воздуха. Данная конструкция универсальна по отношению к вариантам размещения. Производительность 10,9 кг/ч.

Компания Axair Ltd. выпускает центробежные увлажнители Defensor бытового (рис.8.95) и промышленного назначения (рис.8.96).



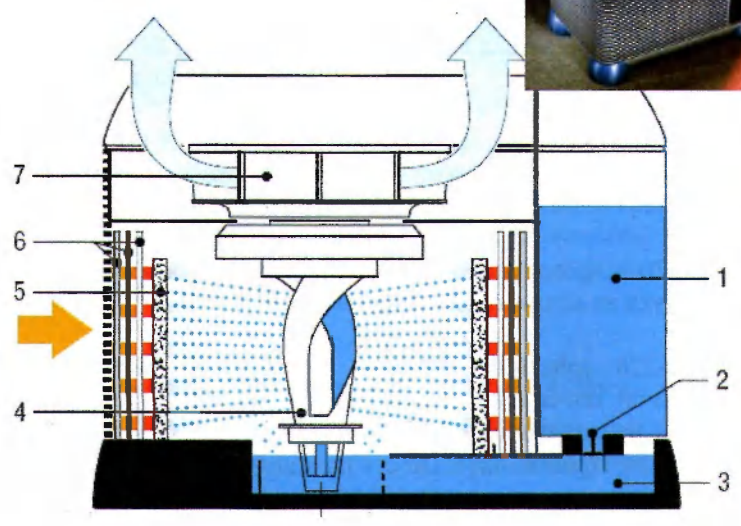


Рис.8.95. Увлажнители Defensor PH5 с центрифугой:
1 – водный резервуар;
2 – клапан реле контроля уровня;
3 – поддон; 4 – центрифуга;
5 – насадка из активированного угля; 6 – тройной воздушный фильтр (грубой и тонкой очистки от пыли и слой активированного угля); 7 – вентилятор.

Серия аппаратов Defensor PH5…26 обладает производительностью по влаге 0,6…2,7 кг/ч, по воздуху: 100…750 $м^3$/ч.

На рис.8.95 видно, что в аппарате Defensor PH5 вода разбрызгивается центрифугой в дождевое кольцевое пространство, окруженное насадкой из микропористого активированного угля, которая выполняет функцию каплеуловителя и одновременно увеличивает рабочую поверхность контакта между водой и воздухом.

Аппараты промышленной серии Defensor ABS2-35 – ABS2-35-180 (рис.8.96) устроены в соответствии со схемой, приведенной на рис.8.93. В данных увлажнителях предусмотрено использование вентилятора двустороннего всасывания с последующим смешением потоков увлажненного (60 %) и рециркуляционного (40 %) воздуха. Водяная линия подключается к водопроводной сети давлением 1…6 бар. Производительность по воде 3,5…18 кг/ч, расход воздуха 300…1600 м^3/ч. Размер капель 5…15 мкм.

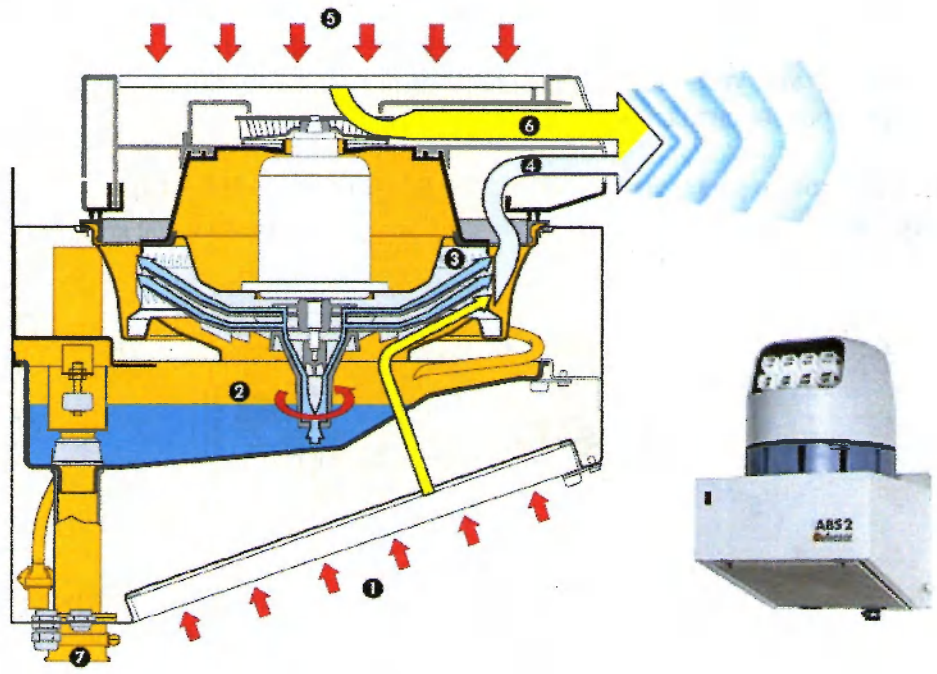


Рис.8.96. Увлажнители Defensor ABS2: 1, 5 – воздушные фильтры;
2 – водный резервуар; 3 – решетка атомайзера; 4 – увлажненный поток воздуха;
6 – рециркуляционный поток воздуха; 7 – система подпитки воды.

Важной характеристикой является длина участка ассимиляции влаги, которая зависит как от производительности атомайзера, так и от температурно-влажностного режима помещения, рис.8.97.

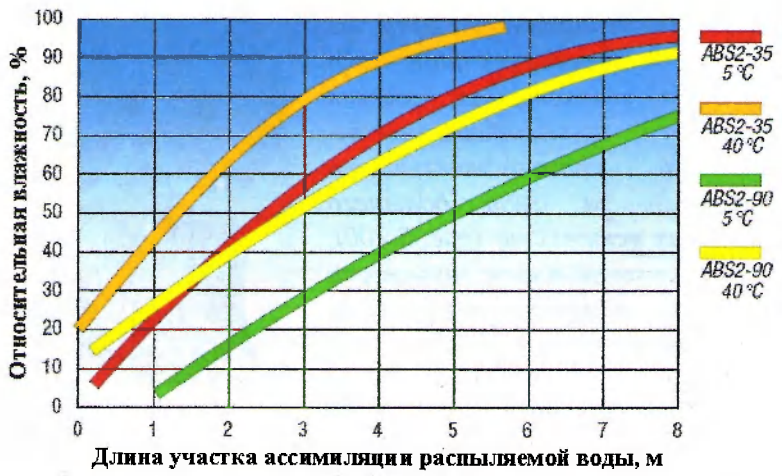


Рис.8.97. Зависимость длины участка ассимиляции влаги
для атомайзеров Defensor ABS2.

Для целого ряда центробежных увлажнителей промышленного типа характерно использование специальных дисков, вращающихся в вертикальной плоскости с большой скоростью (10000…20000 об/мин). Вода от насоса подается по подводящей трубке в центр диска. Затем она под действием центробежных сил растягивается в виде пленки по концентрическим кругам к краю диска, имеющему дробящее кольцо рис.8.98…8.104.

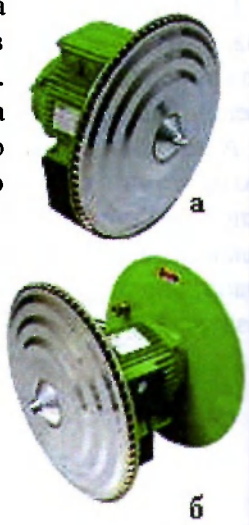


Рис.8.98. Дисковые распылители АС[1]: АС1-80 – (а); АС2 -160 – (б).
[1]разработка компании Guoghi Luigi, производительность по воде 80 и 160 кг/ч.

Центробежные атомайзеры серии АС устанавливаются в приточных воздуховодах предприятий текстильной промышленности.

Для увлажнения воздуха непосредственно в помещении устройства (Spot-type humidifier*) с дисковыми распылителями дополнительно комплектуются осевыми вентиляторами (рис.8.99, 8.102…8.108). На рис.8.99 показаны эти устройства серии UCV (расход воздуха 3400, 6100, 7600 м^3/ч, производительность 35 кг/ч).

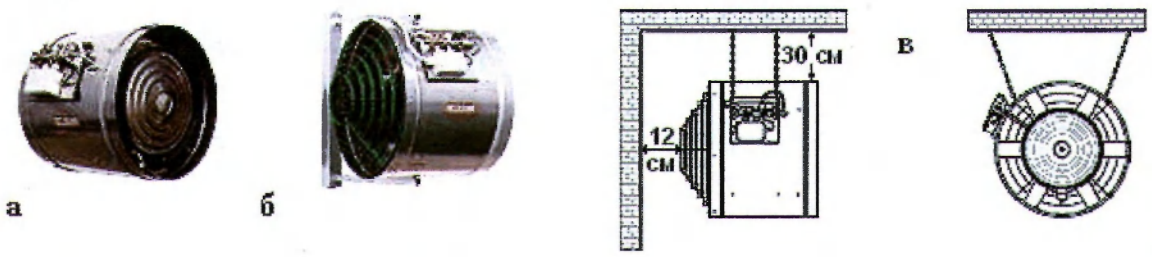


Рис.8.99. Атомайзеры серии UCV (Guoghi Luigi). Внешний вид (со стороны диска – а, со стороны вентилятора – б) и варианты крепления: настенное – б, потолочное – в.

* Spot-type humidifier – местный увлажнитель (spot – место

Существуют варианты атомайзеров с рециркуляцией воды (рис.8.100…8.104). Для этого в нижней точке обечайки, окружающей диск, устроен желоб, по которому часть воды поступает на подбирающую тарелку.

Центробежные атомайзеры – простые, надежные и недорогие устройства, не требуют какой-либо предварительной обработки воды, не подвержены засорению (в отличие от форсунок). Как и ультразвуковые увлажнители, имеют невысокую единичную производительность. Достижение большей производительности также осуществляется за счет большего количества применяемых устройств (рис. 8.100). Обладают несколько повышенными шумовыми характеристиками, что и предопределяет их преимущественно промышленное назначение либо использование на открытых площадках (в условиях жаркого и сухого климата применяются для создания эффекта испарительного охлаждения).

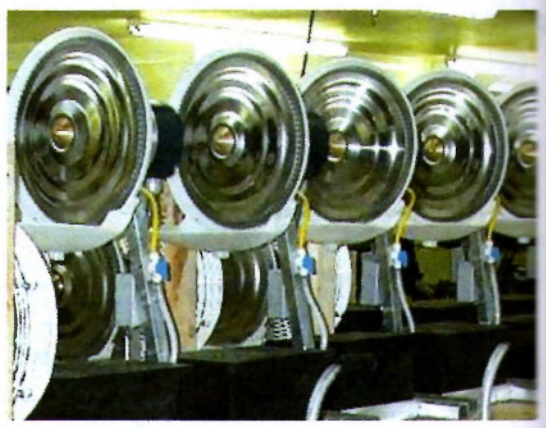


Рис.8.100. Набор дисковых атомайзеров.



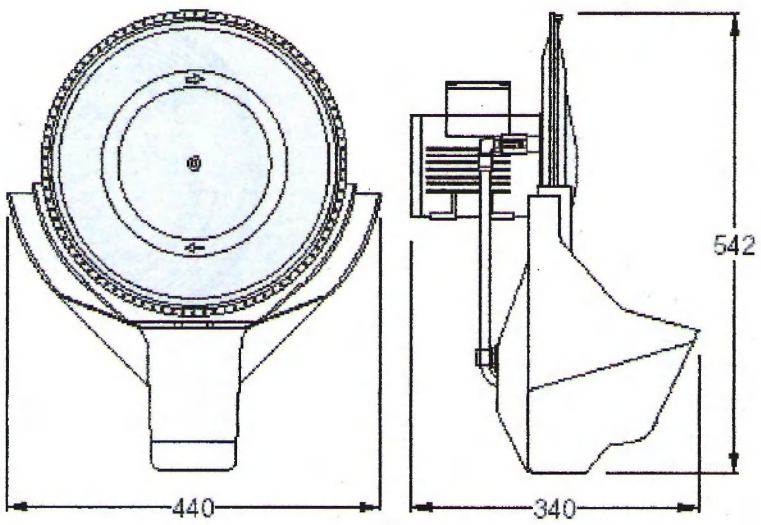


Рис.8.101. Атомайзеры UCP (Franco srl).

производительность по воде 30 кг/ч

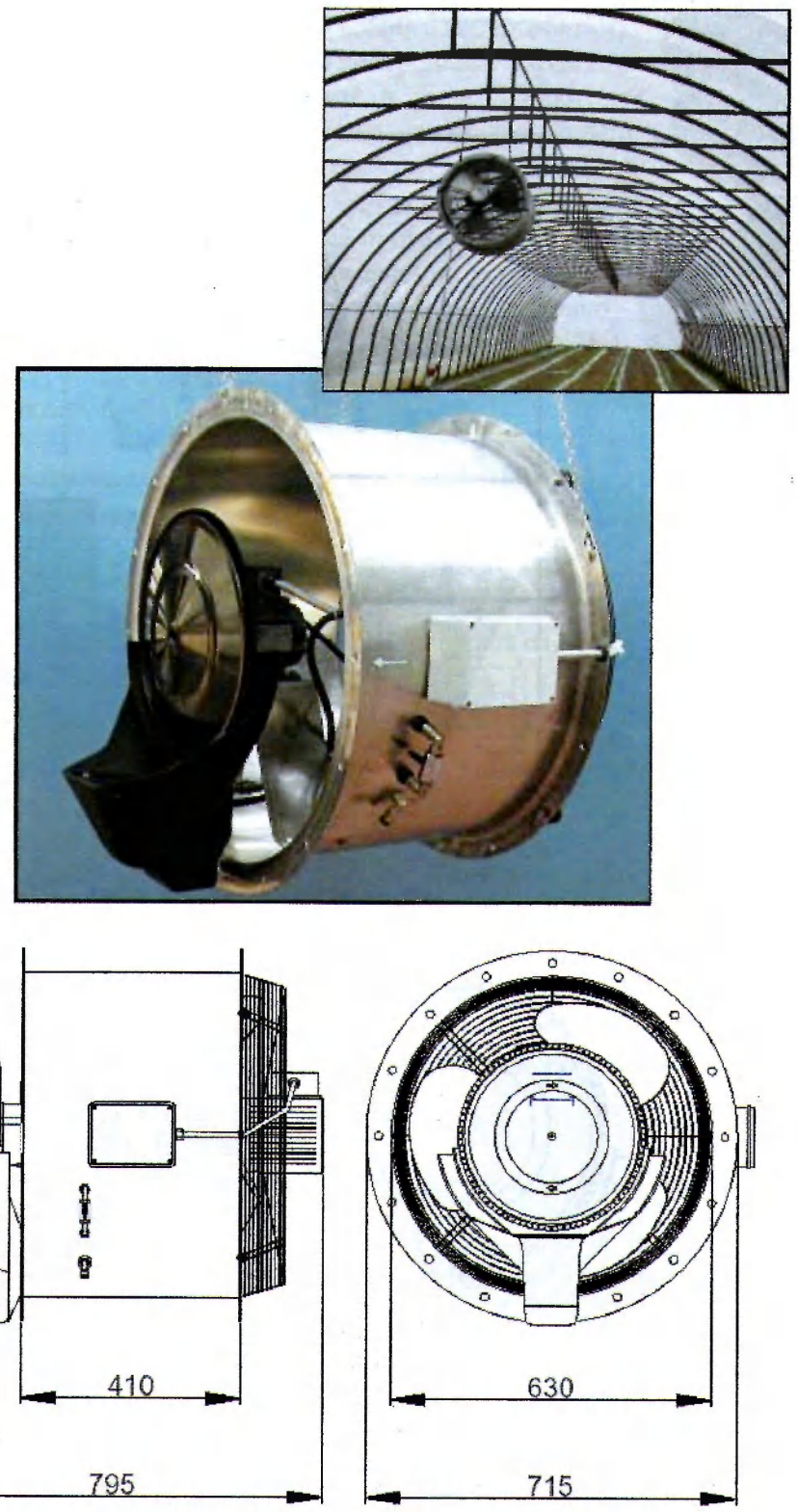


Рис.8.102. Атомайзеры UX63 (Franco srl).

производительность по воде 30 кг/ч, воздуху 6500 м^3/ч

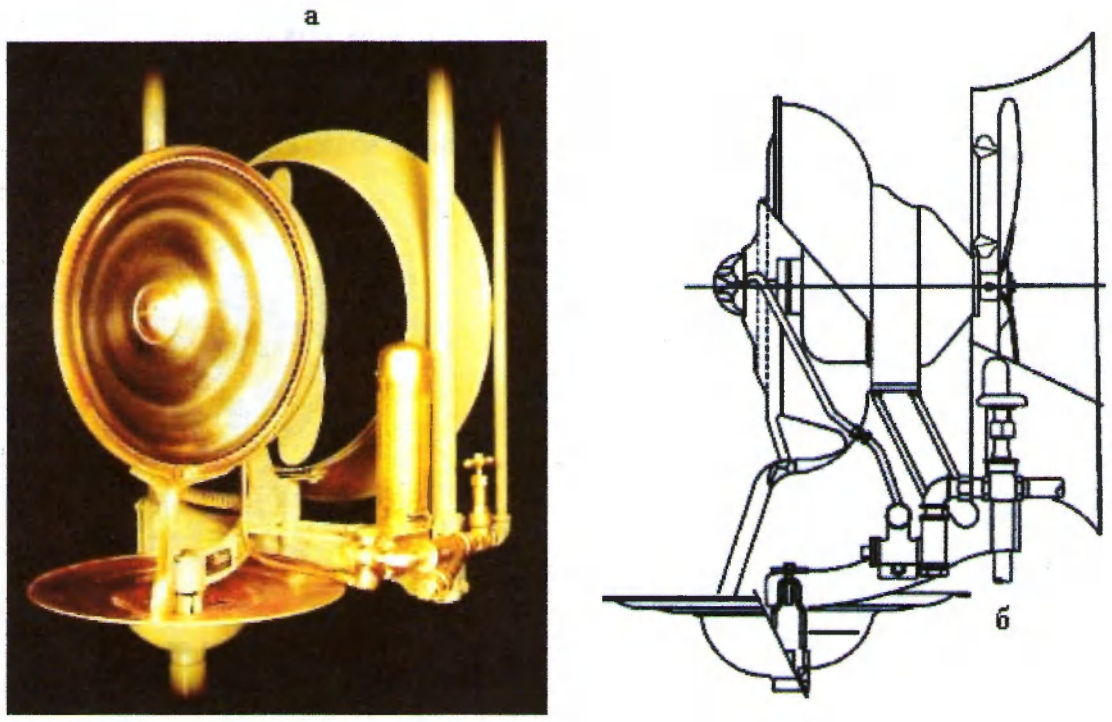


Рис.8.103. Атомайзеры Spot-type (Bahnson Models, Gellert Humidi-Pak^{TM}):
а – фотография устройства; б – чертеж.

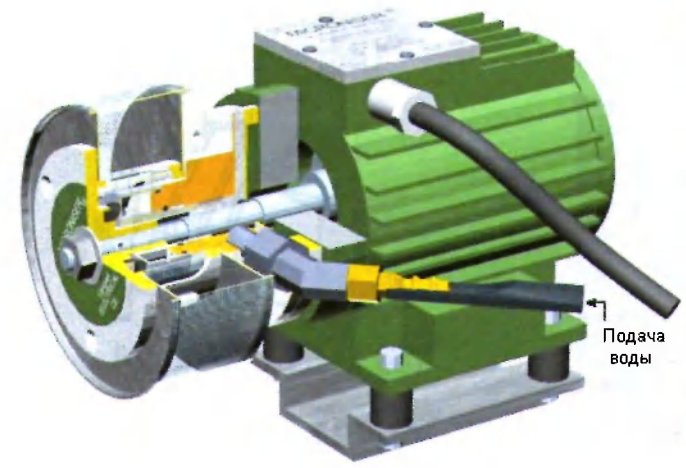
Выпускаются стационарные и мобильные модели (рис.8.104).



Рис.8.104. Дисковые атомайзеры
стационарного (а) и мобильного исполнения (б).

Применяются: в оранжереях; во фрукто- и картофелехранилищах; для поддержания процесса созревания плода цитрусовых, бананов, томатов; при производстве бумаги; в текстильной промышленности; при деревообработке и др.

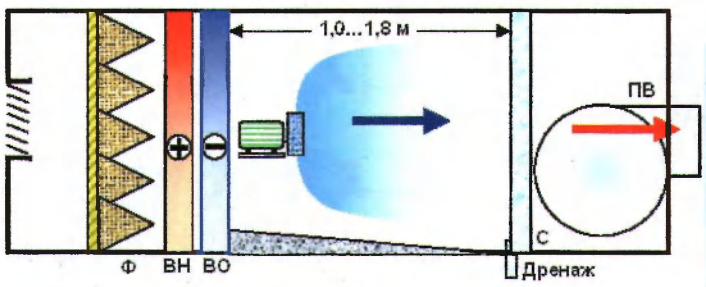
В аппаратах Microniser (Belgium), Proptec™ и R-Tech (UK) использованы барабаны с сеткой (рис.8.105), вращающиеся со скоростью 11800 об/мин (номинальное значение), регулируемой с помощью инвертора частоты 50…193 Гц. Диапазон производительности: 0…150 л/ч. Распылению подвергается водопроводная вода. Размер распыляемых капелек воды D_{50} = 10…30 мкм.











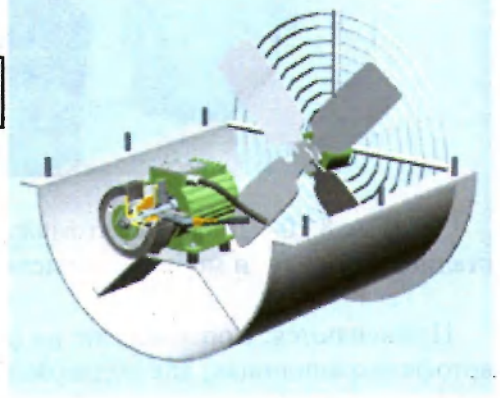
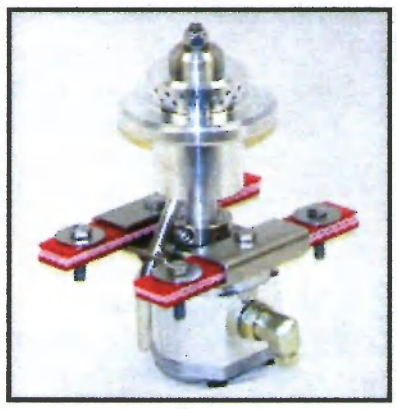
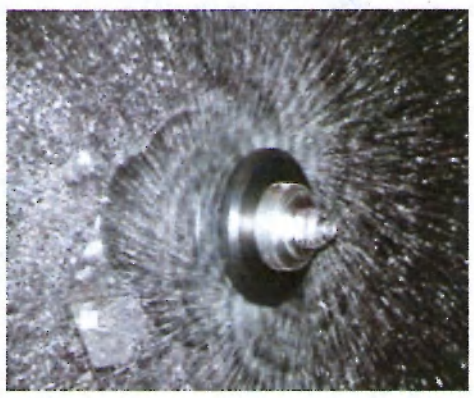
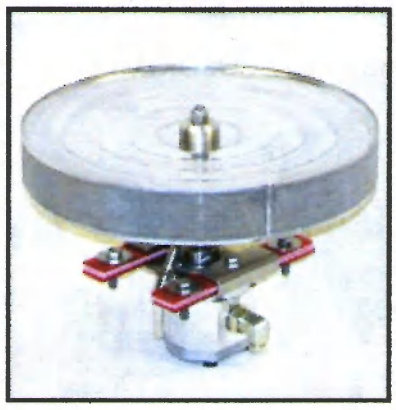


Рис.8.105. Атомайзеры Microniser и R-Tech: устройство и размещение.



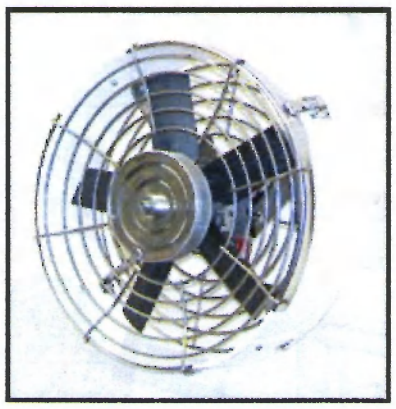
а





б





в



Рис.8.106. Центробежные атомайзеры Proptec™ компании Ledebuhr Ind.: однодисковые (Single-Stage) – а; двухдисковые (Dual-Stage) – б; совмещенные с осевым вентилятором – в.

Принцип центробежного распыления воды также используется в современных устройствах увлажнения компании AquaFog (технология ECOSORB) (рис.8.107, 8.108). В данном случае применен минитурбодиск, расположенный на одном валу с рабочим колесом вентилятора и перед ним. Распыление происходит непосредственно в конфузоре вентилятора. Подача воды на диск осуществляется во фронтальной части посредством трубки (рис.8.108а).



Рис.8.107. Распыление воды по технологии ECOSORB.



Рис.8.108. Установка AquaFog Turbo XE Fan:

головная часть (а – фронтальный вид, б – вид сзади); осциллятор – в;
водяной клапан с регулятором – г, и варианты ее исполнения:
1– на штативе (возможно крепление на стене);
2 – модель HRSM с автономной емкостью для воды.

Осциллятор колебаний обеспечивает возвратно-поступательные движения атомайзера в пределах любого угла поворота от 4° до 360° (период колебаний 2 мин). Изменение направления распыла приводит к расширению площади увлажнения, а также к некоторому увеличению эффективности процесса за счет дополнительного дробления капель, возникающего при их столкновении.

Технические данные и динамическую картинку распыления по данной технологии можно получить в Интернете по адресу: *www.cloudtops.com/aquafog.htm*

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

8.2. УВЛАЖНИТЕЛИ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТИПА
8.2.1. ПЛЕНОЧНЫЕ АППАРАТЫ

В пленочных увлажнителях HumEvap испарительного типа, как правило, с регулярной насадкой (CTAW – Cell* Type Air Washer) не требуется распыление воды форсунками. Вода подается с помощью циркуляционного насоса на верхний торец насадки через простые водораспределительные устройства (как правило, лоткового типа), по существу, струйками воды (рис.8.109, 8.111в). Объем циркулирующей воды составляет только 10…15 объемов воды, усваиваемой воздухом, в то время как в обычных форсуночных камерах STAW (см. § 8.1.1) эта цифра в 10 раз больше (100…150 объемов). В связи с отсутствием энергетических затрат на распыление и значительно меньшими расходами воды аппараты CTAW потребляют на 90 % меньше энергии, чем STAW. Для достижения коэффициента эффективности $E_a = 0{,}93$ камерами обоих типов с одинаковой производительностью по воздуху 100 тыс. $м^3/ч$ мощность насоса STAW – 12 кВт, CTAW – 1,3 кВт.

Аппараты выпускаются для бытового и промышленного применения, различной производительности.

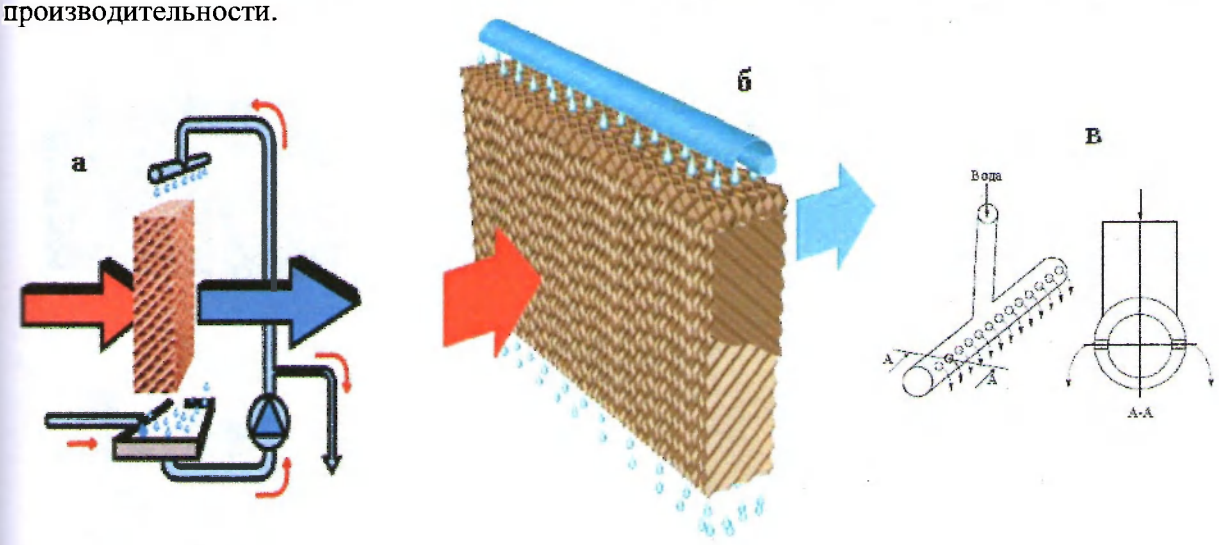


Рис.8.109. Принципиальная схема аппарата CTAW (а), работающего в режиме оборотного цикла по воде, оросительная часть (б) и эскиз водораспределителя (в).

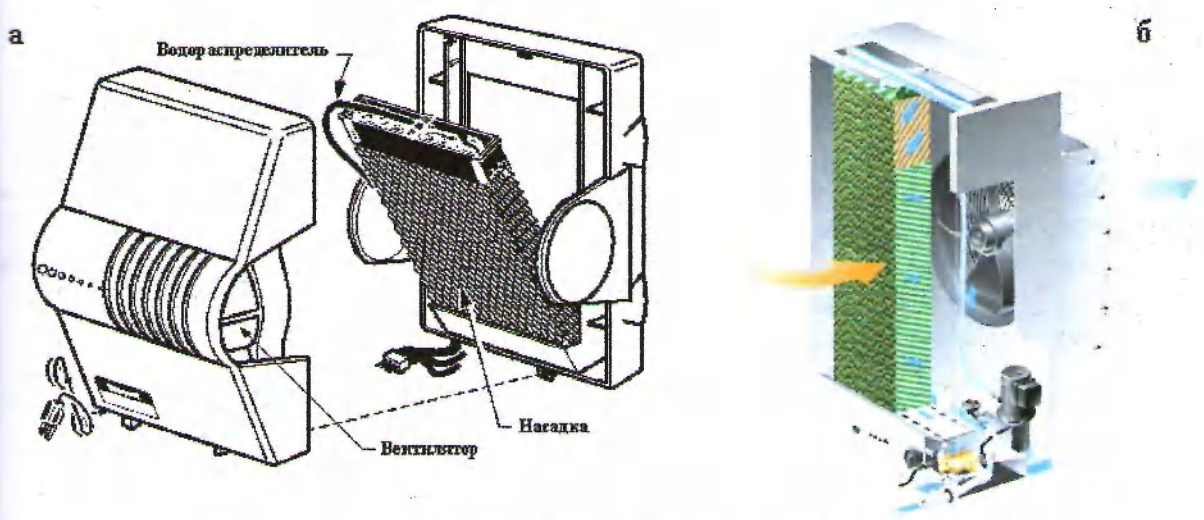
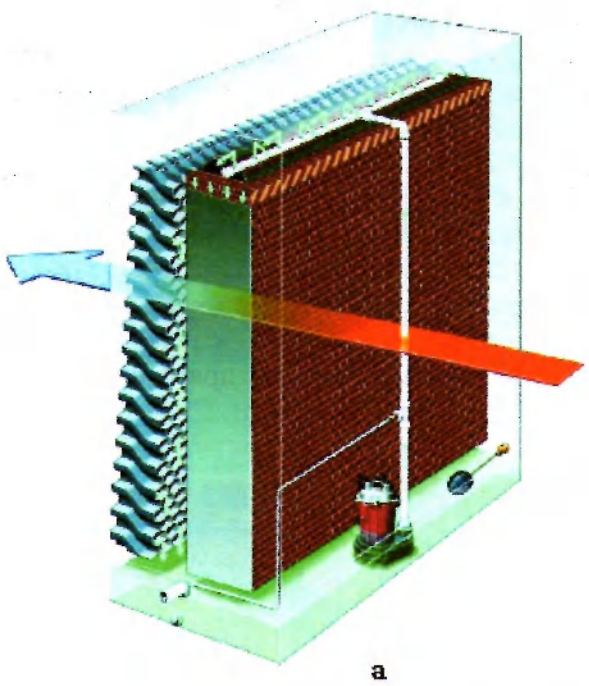


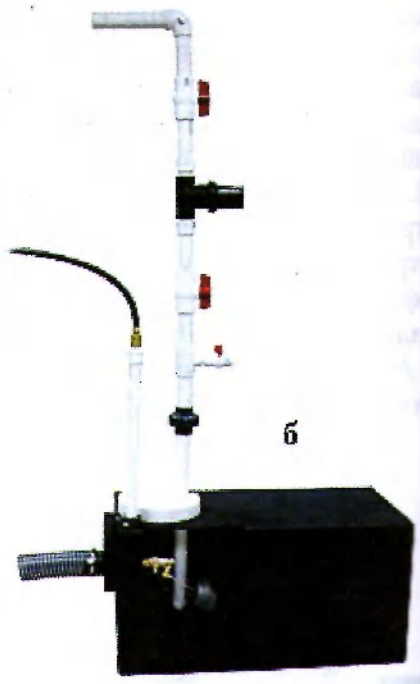
Рис.8.110. Увлажнители бытового назначения Honeywell – а и полупромышленной серии Humimax (Munters) – б.

*cell – ячейка

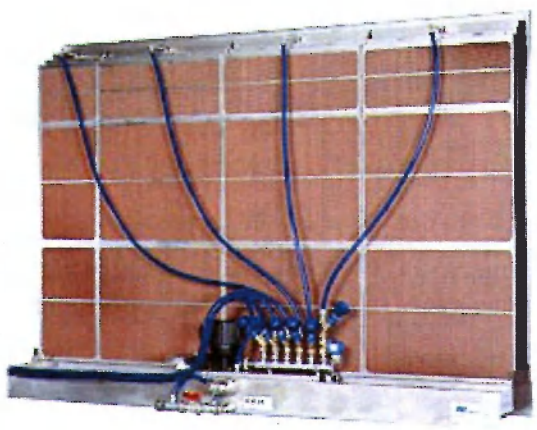
В промышленных аппаратах для увеличения рабочей поверхности используется принцип пакетирования (рис. 8.111а, 8.112). Как правило, предусматривается сепаратор капельной влаги (каплеуловитель), рис.8.111д.

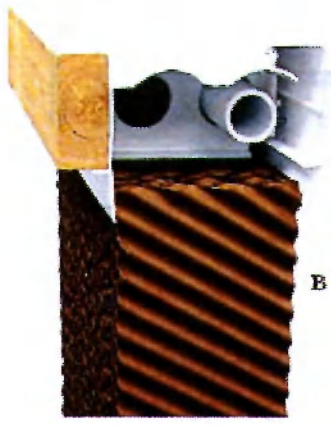


а

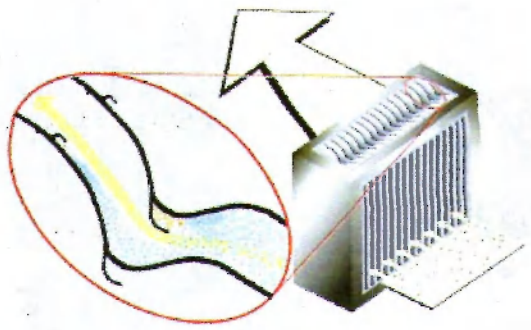


б





в



д



г

Рис.8.111. Аппараты промышленной серии: а – насадочные модули (РН); б – система подачи воды с резервуаром, насосом и поплавковым регулятором уровня; в – верхний торец РН с лотковым водораспределителем; г – нижний торец РН; д – сепаратор капель.

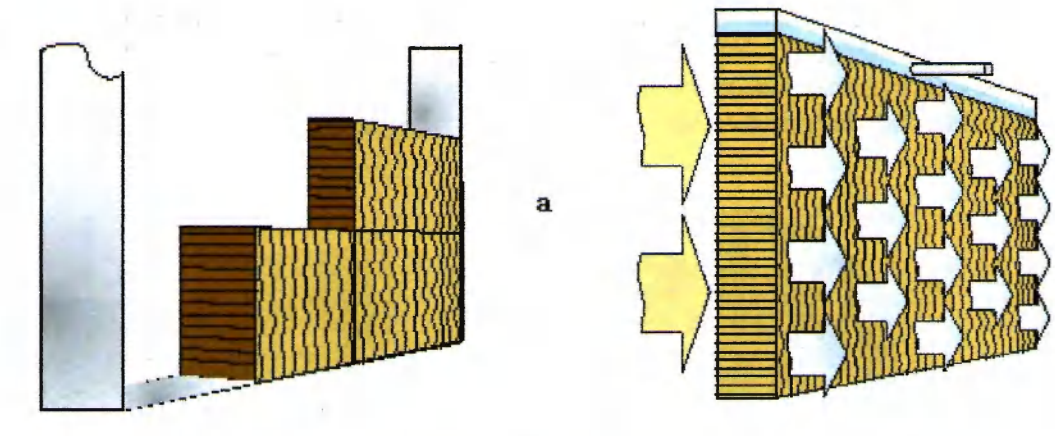


Рис.8.112. Пакетный принцип набора модулей – а, и фотография насадочного модуля для осуществления увлажнения и испарительного охлаждения воздуха в оранжереи – б.

фотография New Jersey Agricultural Experiment Station

В качестве рабочей поверхности пленочных аппаратов (увлажнителей, воздухоохладителей испарительного типа, градирен) используются регулярные насадки РН (Rigid Cooling Media), изготавливаемые из различных материалов: тонкой алюминиевой фольги, целлюлозы, стекловолокна и др. (рис. 8.113, 8.114).

Основные требования, предъявляемые к материалам:

- *прочность и эластичность*, позволяющие создавать гофрированные поверхности либо сотовую структуру;
- *долговечность* (алюминий самопассивируется, т.е. образует защитную оксидную пленку, бумажные целлюлозные листы пропитываются эпоксидными смолами, стекловолокно в отношении данного требования самодостаточно);
- *хорошая смачиваемость* поверхности.

Компания Munters предлагает два основных типа РН (рис.8.113): CELdek – бумажные (cellulose medium) и GLASdek – из стекловолокна (fire-resistant glass fiber medium). Для

защиты поверхности насадок от обрастания водорослями они химически обрабатываются по специальной технологии.

Компания Carrier выпускает РН сотовой структуры Hucell на основе поливинилхлорида (PVC) и стекловолокна (рис.8.113в).

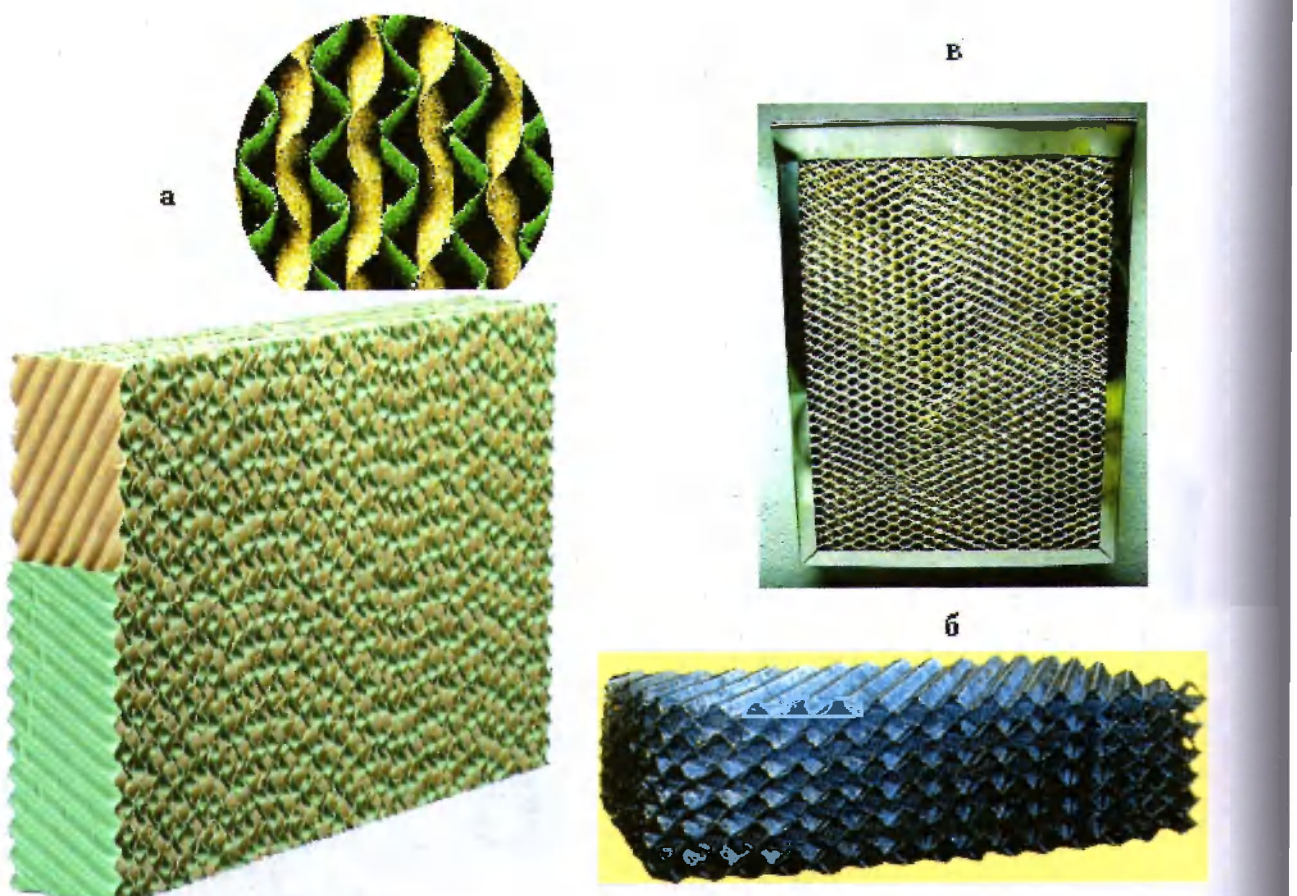


Рис.8.113. Насадки из гофрированных листов CELdek (а), GLASdek (б), (в) и сотовой структуры Hucell (в).

Насадки Munters собираются в виде пакетов со склеенными между собой гофрированными листами РН различных геометрических размеров:

- высота (длина) H: 1000, 1500, 1800 и 2000 мм;
- ширина W: 600 мм;
- толщина D: 100, 150, 200 и 300 мм.

Высота гофра – 7 мм.



Этот типоразмерный ряд позволяет набрать требуемую величину рабочей поверхности аппарата (один кубический метр насадки эквивалентен 440…660 м^2 поверхности воды).

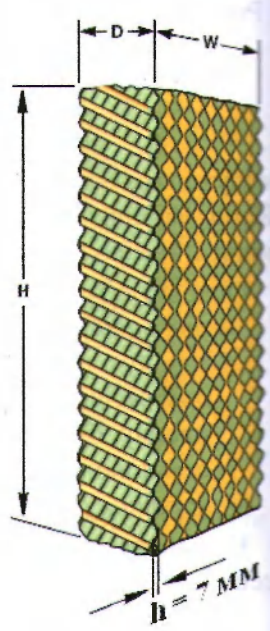


Рис.8.114. Геометрия пакетов насадок Munters.

За счет оптимизации углов наклона воздушных (15°/30°) и водяных каналов (45°/60°) насадки обладают малым аэродинамическим сопротивлением (< 200 Па) и могут работать без каплеуловителя до скорости воздуха 3 м/с. Вода направлена навстречу движению воздуха (рис.8.115), что предотвращает ее дрейф. Плотность орошения 2,4 $м^3/м^2$ ч.

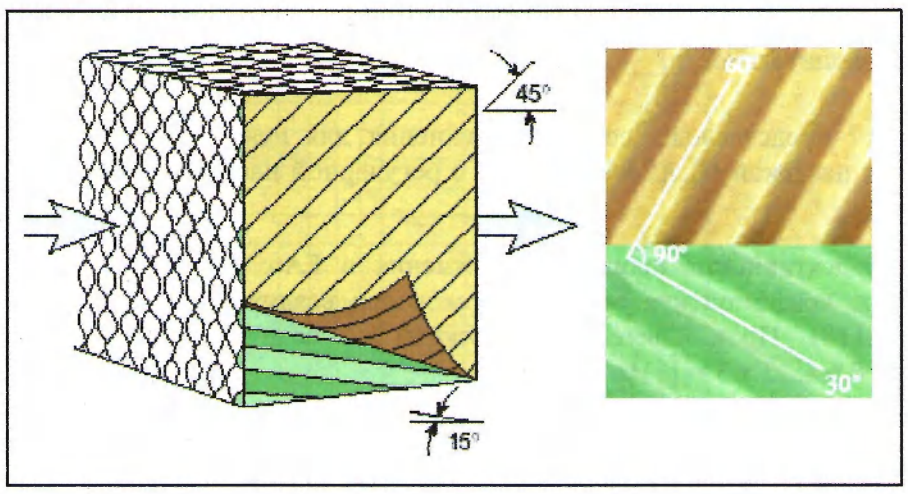


Рис.8.115. Каналы перекрестноточной регулярной насадки
из гофрированных листов с различными углами наклона.

В прежних конструкциях (все еще выпускаются промышленностью) применялись насадки нерегулярной структуры, например, Aspendek из волокон (стружки) натуральной осины. Эти волокна упаковываются в пористые капроновые мешочки (толщина слоя 2" (5 см)) и размещаются между панелями, имеющими окна для прохода воздушного потока (рис.8.116).

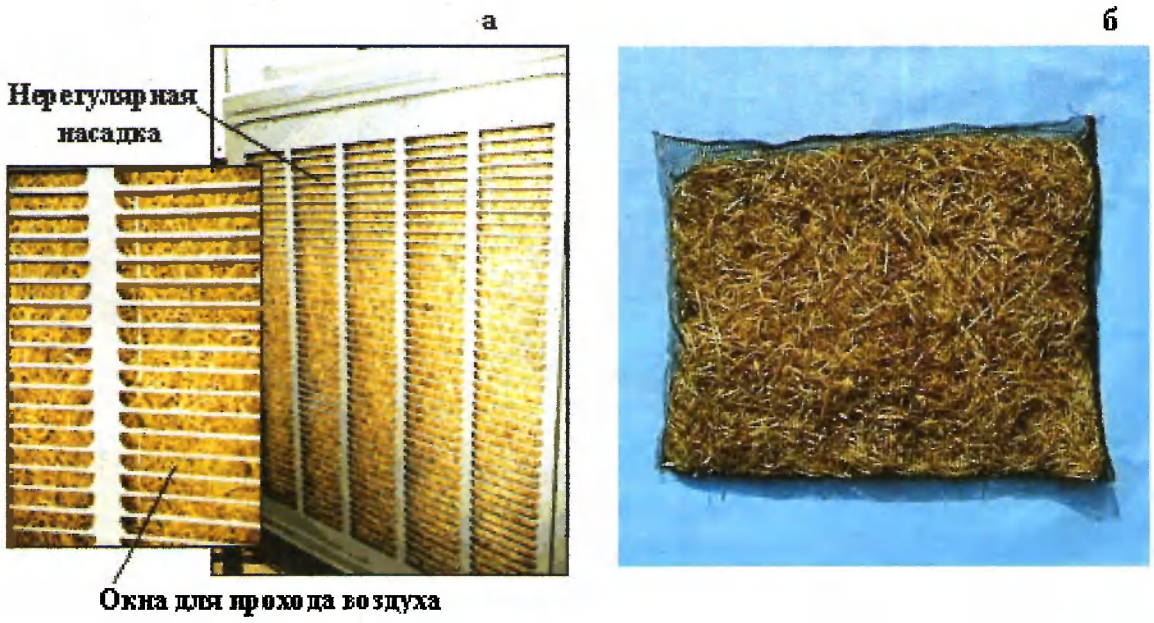


Рис.8.116. Увлажнитель с нерегулярной насадкой (а) и насадка Aspendek (б).

Насадки, подобные Aspendek, из натуральных материалов дешевле и легко заменяются в бытовых условиях, что позволяет им находиться на потребительском рынке. Однако эффективность процесса обработки воздуха невысока – 50 %, при этом их аэродинамическое сопротивление, в связи с нерегулярной структурой насадок, значительно выше, чем у РН (при скорости воздуха 1 м/с значение ΔР в 4 раза больше). По этой причине, а также из-за низкой долговечности (требуют замены через каждые 2 сезона), такие насадки бесперспективны для широкого использования, особенно для промышленных аппаратов большой производительности.

На рис.8.117 представлены секции увлажнения для центрального кондиционера: FA6 (Munters AB) с насадкой GLASdek и ВСНА с регулярной насадкой[1] компании Swegon (PM-Luft AB).

Степень эффективности процесса увлажнения в FA6: Ed = 0,95, 0,85 либо 0,65, в зависимости от коэффициента орошения (скорости воздуха) и геометрических размеров пакета (рис.8.118). Производительность секций по воздуху 30…1800 м^3/ч, габаритные размеры: 0,6 х 0,6м…3 х 3 м [61].

Расчетная эффективность процесса: $E_d = (d_к - d_н)/(d^* - d_н)$, (8.15)

где $d_н$, $d_к$ – начальное и конечное значения влагосодержания воздуха, d^* – предельное значение d, определяемое пересечением линией процесса h=const с кривой насыщения φ = 1.

Аппараты работают как на оборотной, так и проточной (однократно используемой воде). Срок службы насадок CELdek, GLASdek и их аналогов от 3 до 5 лет при орошении водой с ph = 6...8.

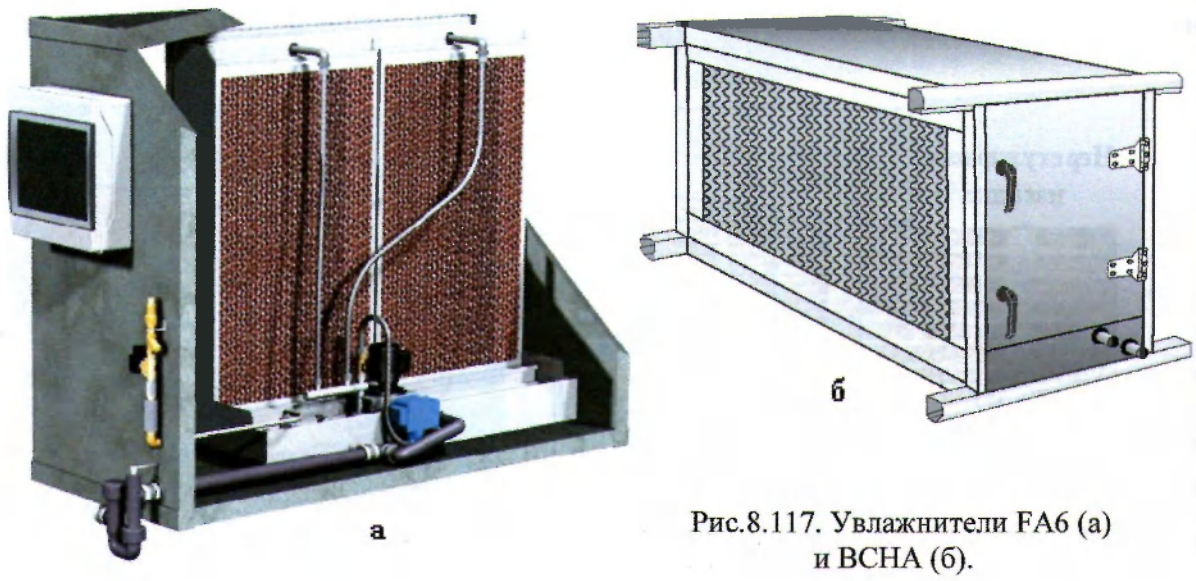


Рис.8.117. Увлажнители FA6 (а) и ВСНА (б).

[1]гофрированные листы насадки изготавливаются из стекловолокна тканым способом по специальной технологии. Поры между волокнами позволяют очень эффективно использовать всю геометрическую поверхность листов для увлажнения. Расчетная эффективность процесса E_d = 0,85 (либо 0,65)

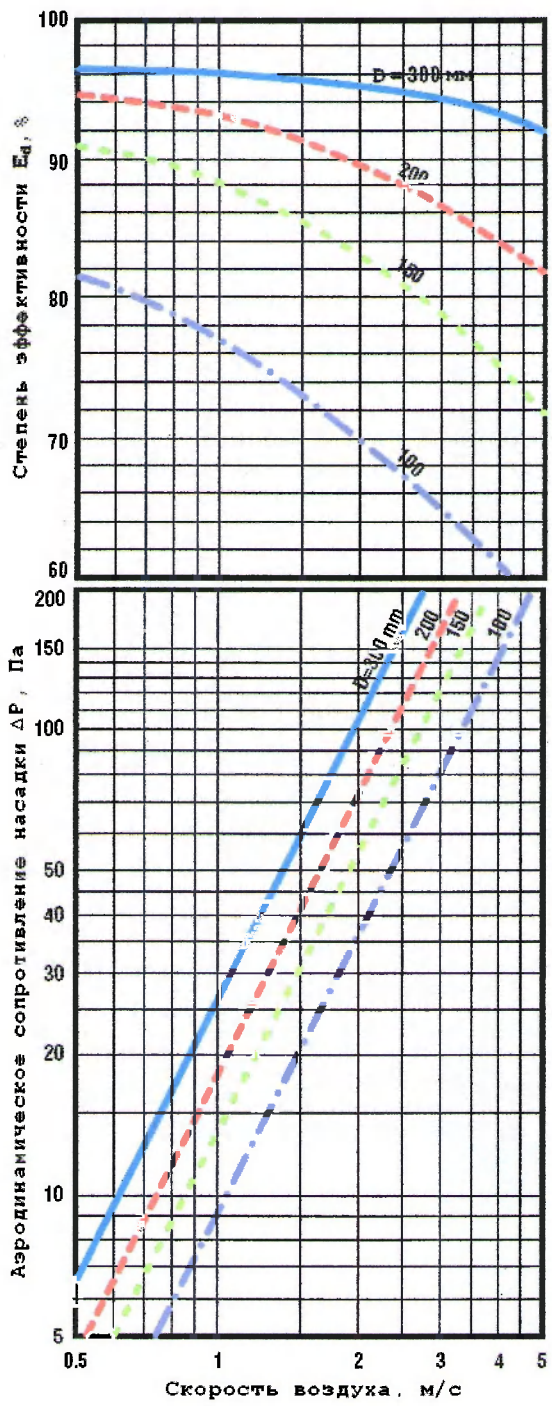


Рис.8.118. Зависимости степени эффективности E_d
и аэродинамического сопротивления ΔP^1
насадки CELdek 7090-15 (углы наклона каналов 30°/60°)
от скорости воздуха[2] и различной ширины пакета D.

[1] значения ΔP приведены для рабочего режима (орошаемая насадка),
в сухом состоянии величина сопротивления меньше приблизительно на 10 %

[2]при скорости воздуха более 3 м/с существует вероятность каплеуноса,
в этих режимах необходима установка каплеуловителя

Поскольку в процессе увлажнения воздуха минеральные соли, содержащиеся в воде, не испаряются, то они будут накапливаться в оборотной воде, и, если не осуществлять необходимой для их растворения добавки свежей воды, произойдет выпадение солей на рабочей поверхности насадки. Неконтролируемый процесс может привести к «зарастанию» каналов насадки.

Компании Munters и Swegon (PM-Luft) используют номограмму качества воды, с помощью которой, в зависимости от начальных концентраций солей кальция и бикарбоната, а также показателя кислотности ph, определяется фактор отвода воды $f_в$ [61] (рис.8.119). При значениях $f_в > 2$ не рекомендуется схема с оборотным циклом. Для этого существует модель FA6 без циркуляционного насоса, работающая на проточной воде (рис.8.120).

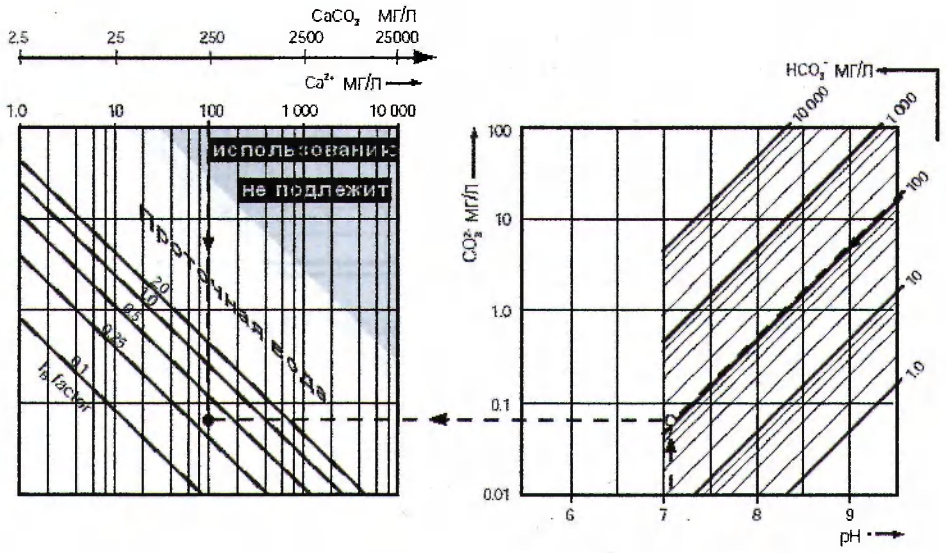


Рис.8.119. Номограмма качества воды с определением фактора $f_в$.

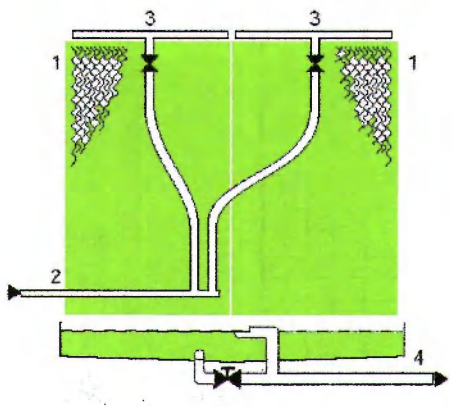


Рис.8.120. Схема работы увлажнителя на проточной воде: 1 – РН, 2 – подвод свежей воды, 3 – водораспределители, 4 – отвод воды в канализацию.

Аппараты ряда компаний Aprilaire, Trion, Honeywell, Thermolec, российской «Климако» [46] и др. построены на принципе дозированного питания (с помощью соленоидного клапана), обеспечивающего полное безостаточное испарение воды в пределах насадочного модуля (рис.8.121…8.123). Временной цикл: 4 сек – орошение, 30 сек – испарение воды. Рекомендован режим работы с промывкой насадки небольшим количеством воды с последующим выводом ее в дренаж. Экономия воды составляет 80 %.

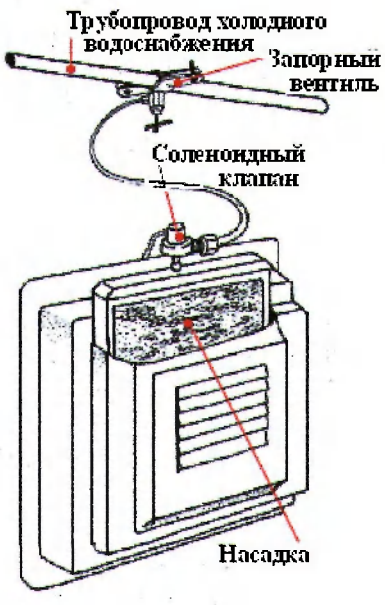


Рис.8.121. Схема дозированного питания.

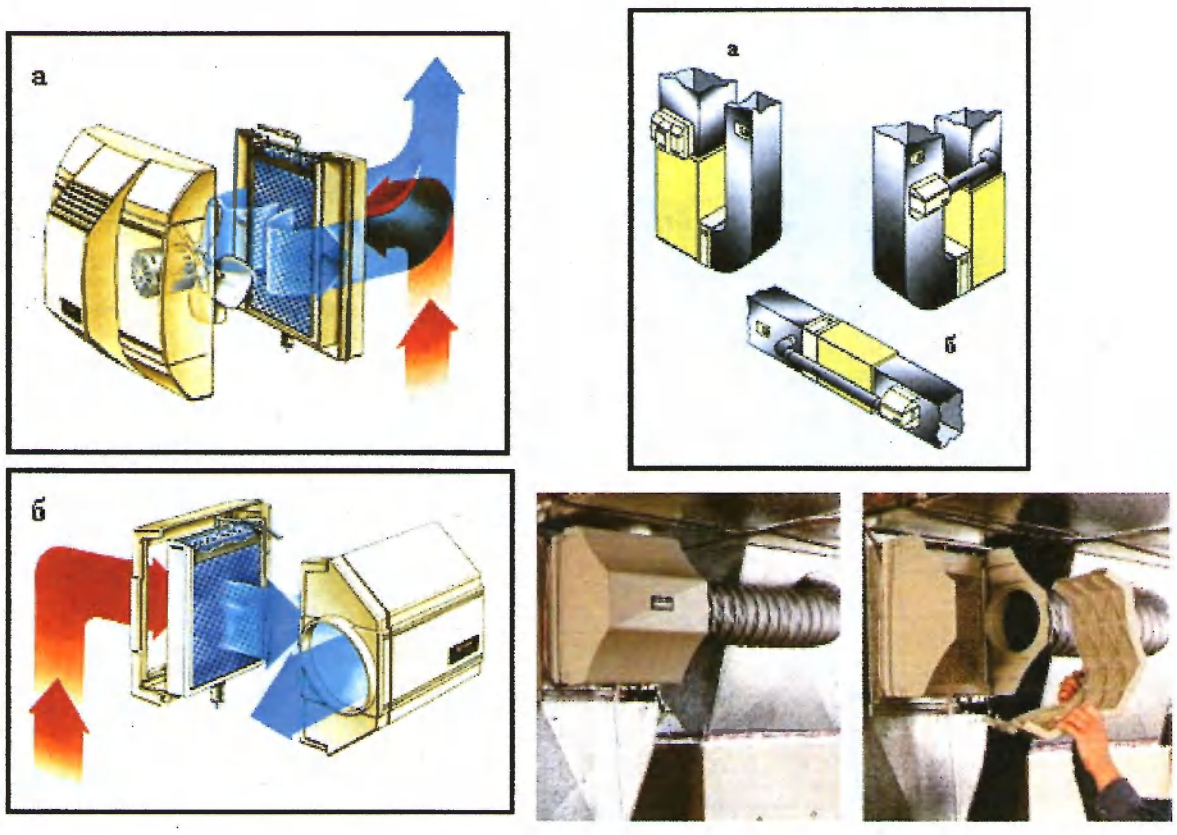


Рис.8.122. Конструкция насадочных увлажнителей Aprilaire и Herrmidifier (Trion), орошаемых свежей водой (слева) и схемы их использования в СКВ (справа):
а – увлажнение приточного воздуха (Power Humidifier Operation);
б – аппарат, устанавливаемый на байпасной линии.

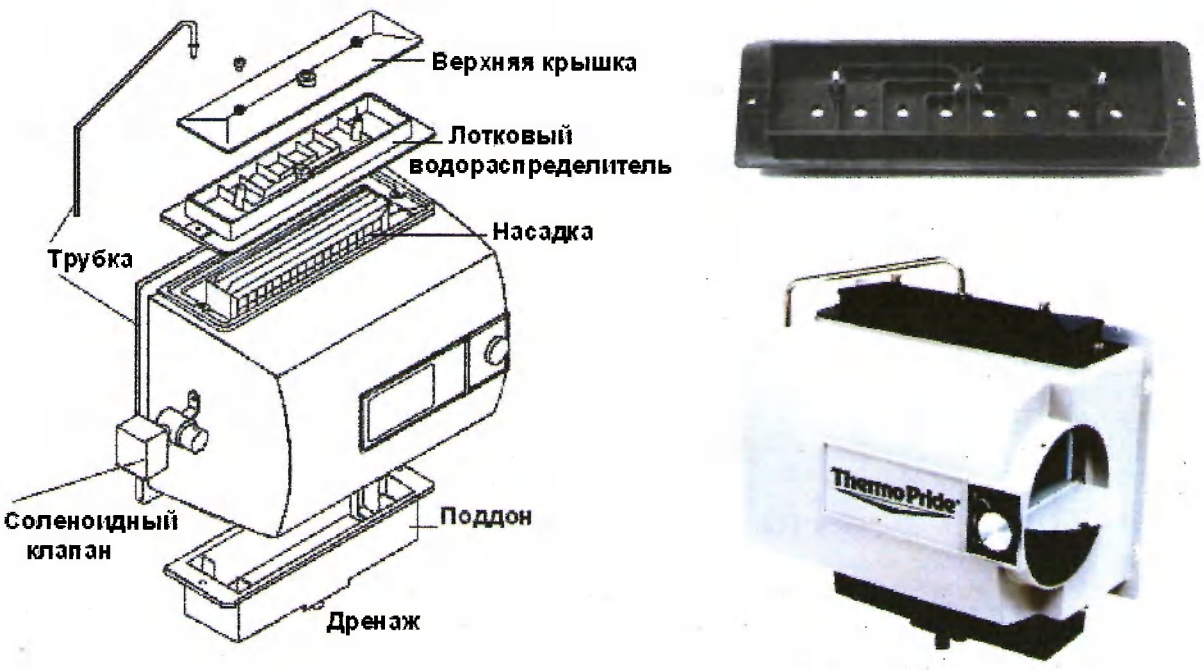
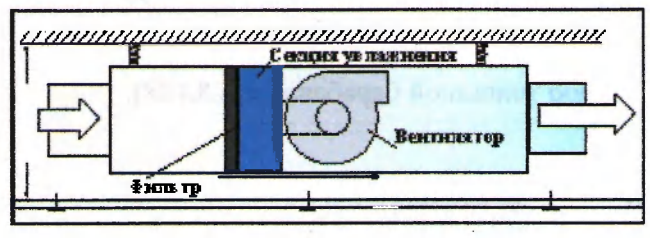


Рис.8.123. Увлажнитель ThermoPride HA1042 с соленоидным клапаном и 8-канальным водораспределителем лоткового типа (схема и фотографии).



Рис.8.124. Увлажнитель Honeywell – HE 360.

На этом же принципе построены современные канальные кондиционеры, которые так же. как и в случае накладного способа размещения оборудования (рис.8.122), легко доступны и удобны в эксплуатации (рис.8.125).





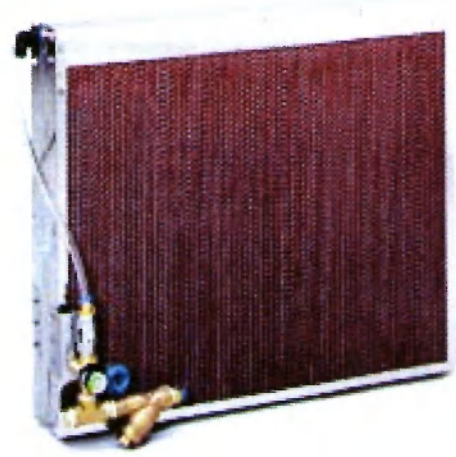


Рис.8.125. Канальный кондиционер JS HumiPac^{TM}.

Кроме насадочных аппаратов, являющихся основным типом пленочных увлажнителей, также выпускаются барабанные (drum-type) устройства, рис.8.126…8.130, и дисковые (disk-type), рис.8.131…8.133.

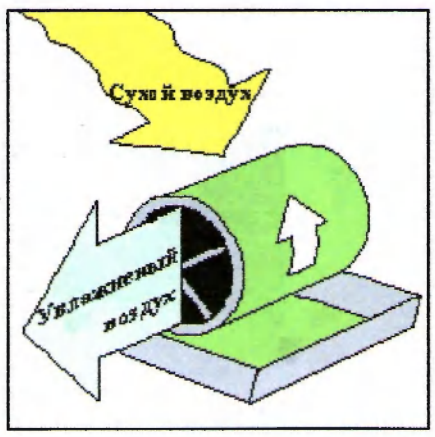
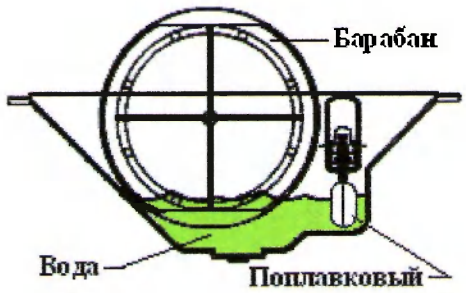
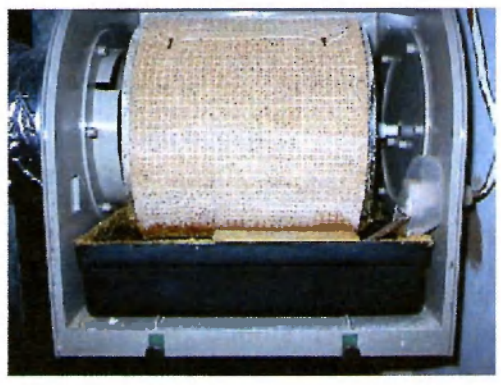


Рис.8.126. Барабанные увлажнители (схема и устройство).





Поверхность барабана обтянута гигроскопичным материалом, который постоянно смочен за счет того, что барабан частично погружен в поддон с водой и при этом вращается электродвигателем. Поток воздуха обдувает выступающую часть барабана и увлажняется.

Соотношение диаметра и линейного размера барабана может быть различным. В зависимости от требуемой инсталляции и дизайнерских подходов производителей линейный размер является длиной (рис.8.127) либо толщиной барабана (рис.8.128).





Рис.8.127. Увлажнители барабанного типа, устанавливаемые с внешней стороны воздуховодов.

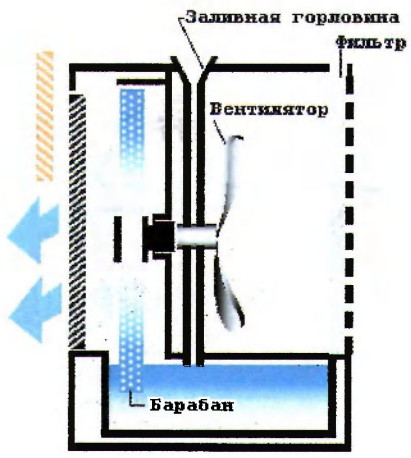




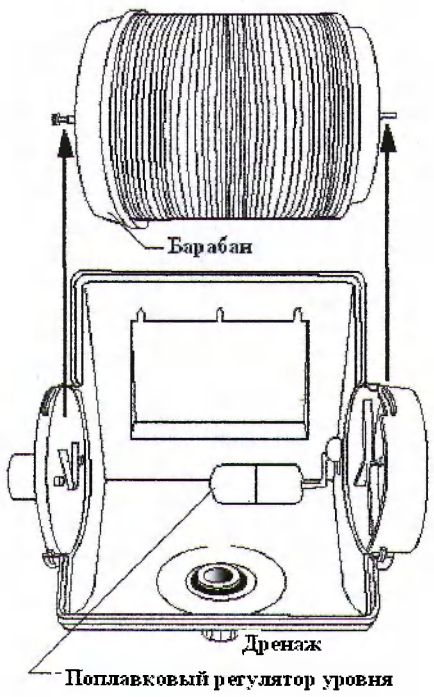
Рис.8.128. Увлажнитель B250 - Electronic с барабаном из гигроскопичного материала для использования в помещении (console type).

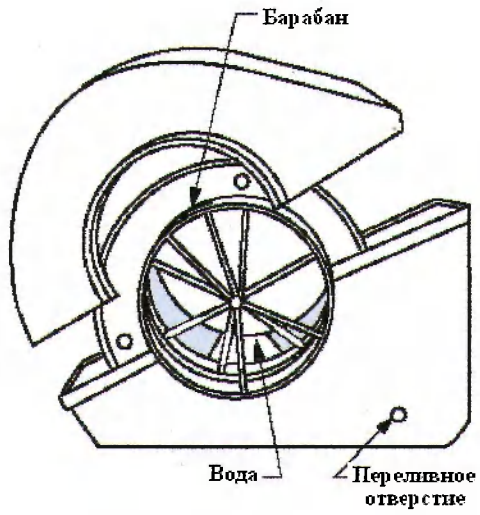
Площадь поверхности барабана увлажнителя B250 – 3 м^2, производительность 1,2 л/ч при t = 23 °C и φ = 45 %.

Компания Honeywell выпускает аппараты drum-type с барабанами традиционного исполнения – HE 120 (рис.8.129), а также нового типа “Reinvented the Whell™ ”, который выполняется из винила и имеет гофрированную поверхность синусоидальной формы (рис.8.130). Такое исполнение барабана, подобно дисковым устройствам (см. ниже), обеспечивает улучшенные эксплуатационные характеристики.

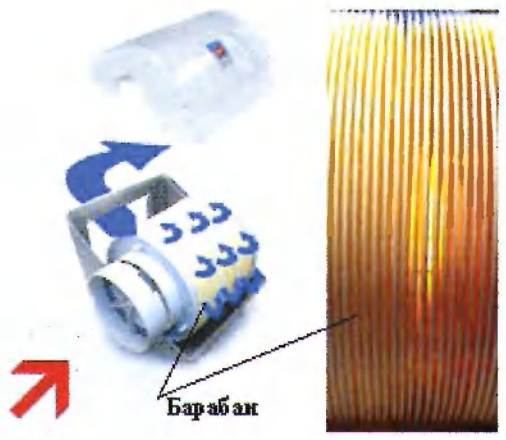


Рис.8.129. Увлажнитель HE 120 (Honeywell).









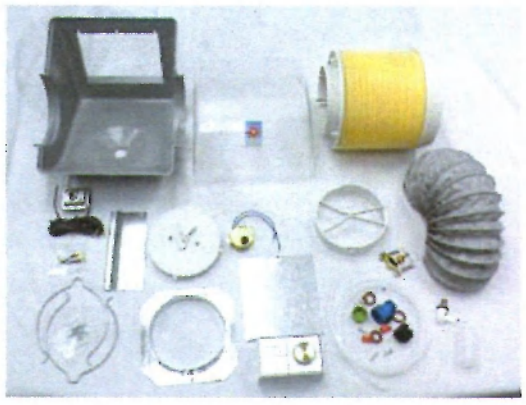


Рис.8.130. Устройство увлажнителя HE 160A (Honeywell) с пластмассовым (виниловым) барабаном “Reinvented the Whell^{TM}”.

Дисковые аппараты устроены аналогично барабанным увлажнителям. Отличие состоит лишь в том, что поверхность контакта оформлена в виде полного круга множества дисков (а не по окружности барабана), за счет чего достигается большая величина геометрической поверхности. Для обеспечения производительности 10…30 кг/ч увлажнители выпускаются с одним или двумя наборами дисков (рис.8.131, 8.133). Регулирование осуществляется за счет изменения частоты вращения рабочего колеса.

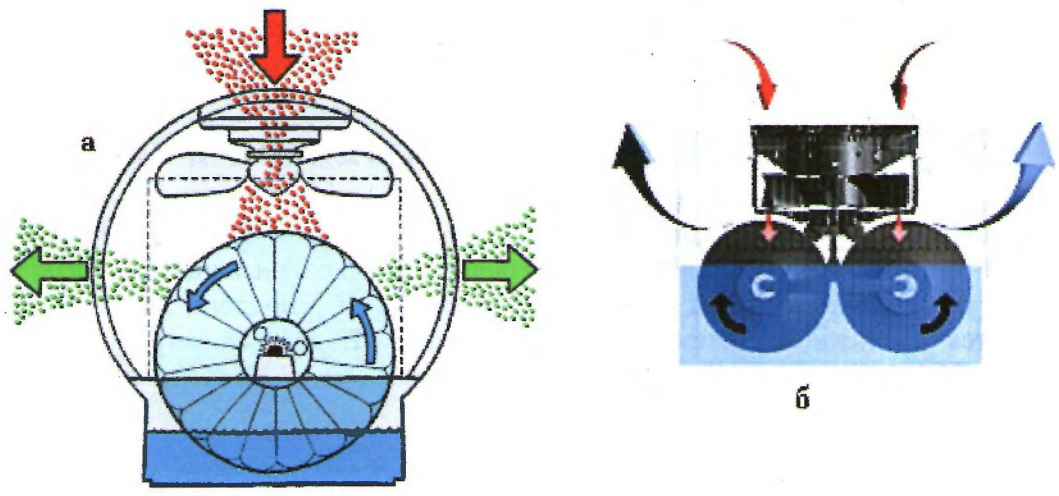


Рис.8.131. Схема работы дисковых увлажнителей
(с одним набором – (а) и двумя – (б)).

Диски изготавливаются из алюминия либо пластмассы (рис.8.132). При использовании пластмассовых дисков в воду добавляют специальные ингредиенты (для увеличения смачиваемости рабочей поверхности).

Поскольку дисковые аппараты свободны от минеральных отложений, их обслуживание значительно проще (в барабанных устройствах отложение минералов на гигроскопичной прокладке приводит к необходимости частой замены материала, а неравномерность отложений вызывает разбалансировку подвижной части).

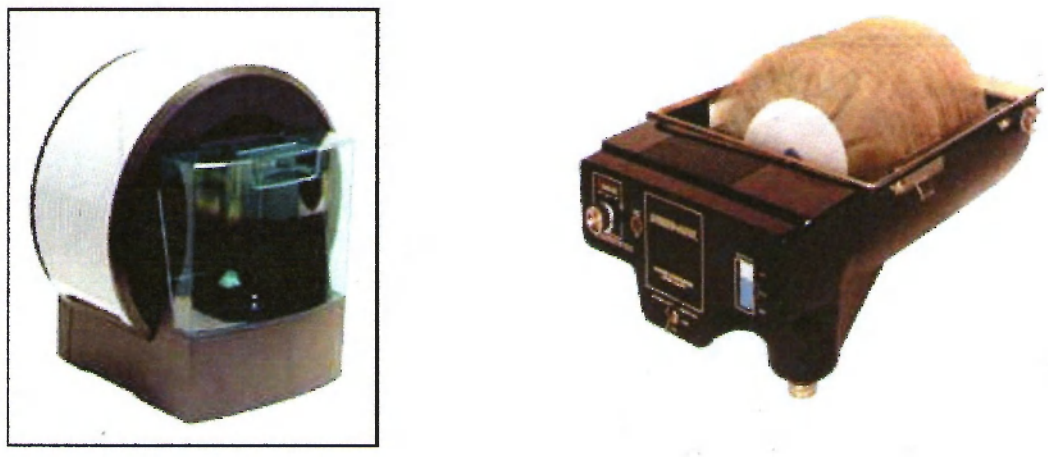


Рис.8.132. Дисковые увлажнители Boneco 1355 (Plaston) и FH 400 (HumidAire).

В данных моделях увлажнение обеспечивают 22 медленновращающихся диска. Применяется для помещений площадью до 150 м^2. Дополнительная функция – возможность ионизации воды в собственном резервуаре с помощью электродов.



Рис.8.133. Двухнаборные дисковые увлажнители компании Venta.

Выпускаются 8 типоразмеров: поверхность дисков 1,4…9,7 м^2, емкость водного резервуара 4,5…18,5 л, расход воздуха 90…780 м^3/ч.

8.2.2. УВЛАЖНИТЕЛИ С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМИ НАСАДКАМИ

В ряде конструкций используются капиллярно-пористые насадки (рис.8.134…8.136). Насадки из пористого синтетического материала (плоские панельные элементы, либо в виде муфты) за счет капиллярных сил подтягивают воду из поддона и, в связи с этим, не нуждаются в сложной системе водораспределения. В данных устройствах применяется простейший лотковый распределитель.

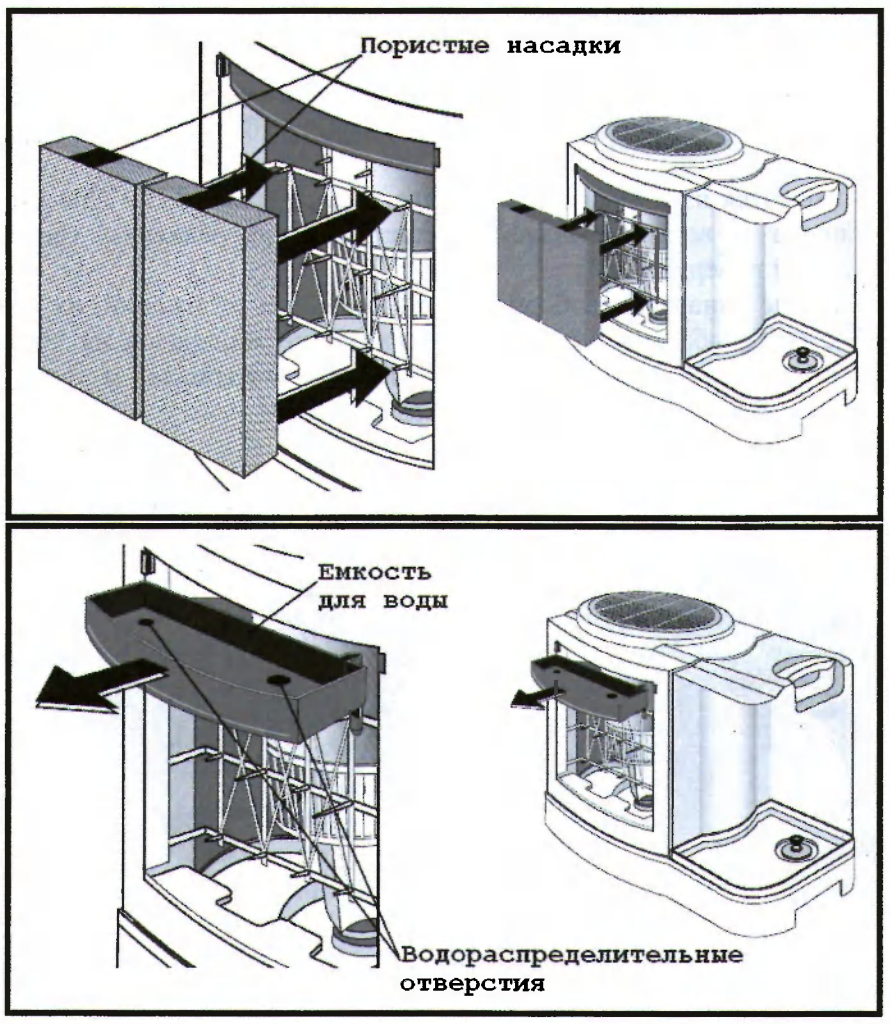


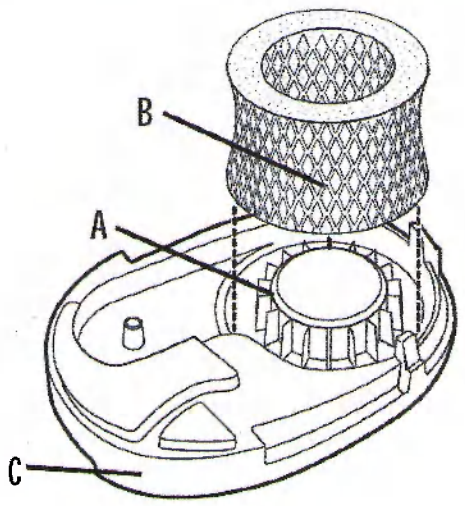
Рис.8.134. Устройство увлажнителей бытовой серии 1120 (LASKO^{TM}) с капиллярно-пористыми насадками.





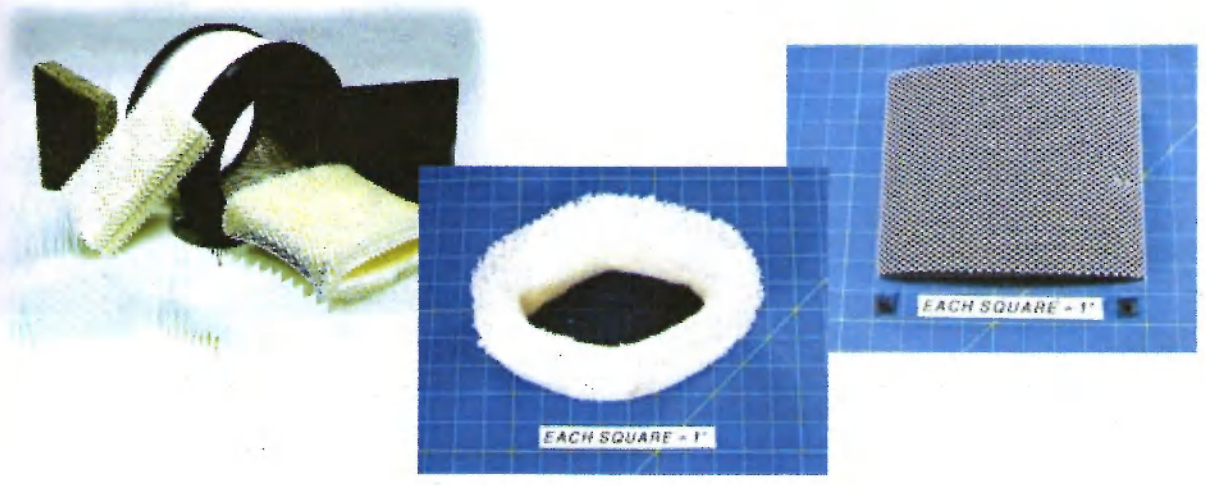
Рис.8.135. Увлажнители компаний Holmes Group, Inc. и Hamilton:

В –пористая насадка в виде муфты;
А – поддерживающий элемент;
С – основание увлажнителя.



TRION

Сведения о насадочных элементах и другие детали устройств различных увлажнителей можно найти на сайте: *www.ontimemall.com*



К данной категории увлажнителей можно также отнести неэлектрические увлажнители (Non-electric humidifiers) – простейшие устройства, используемые в холодное время года. Они служат дополнением к конвекторам, батареям отопления, регистрам стен либо «теплого пола», плинтусным нагревателям (рис.8.136, 8.137).





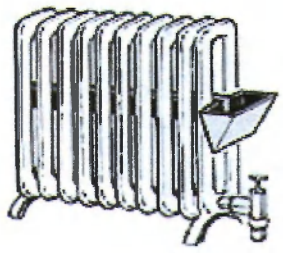


Рис.8.136. Батарейные увлажнители.

Батарейные увлажнители представляют собой пористые керамические сосуды (либо из пластмассы), выпускаемые под различную форму батарей (плоские, конические). Напольные и настенные увлажнители – кассеты, как правило, с капиллярно-пористой насадкой.

Увлажнение (испарение воды) происходит за счет восходящих конвективных токов теплового воздуха.



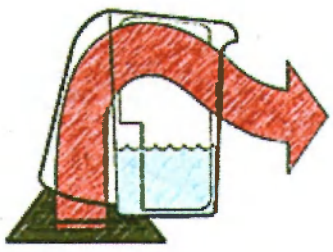






Рис.8.137. Напольные и настенные увлажнители.

8.2.3. УВЛАЖНИТЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОМАТЕРИАЛОВ

В Штутгартском университете (ФРГ) разработан способ увлажнения воздуха посредством капиллярно-пористых насадок, питаемых водой, прошедшей дополнительную очистку в трубчатых мембранах. Мембраны заделаны в пористые гидрофильные насадки. Насадки обдуваются потоком воздуха и отдают ему чистую влагу (рис.8.138). Технология запатентована в Германии (патент DE19919441).

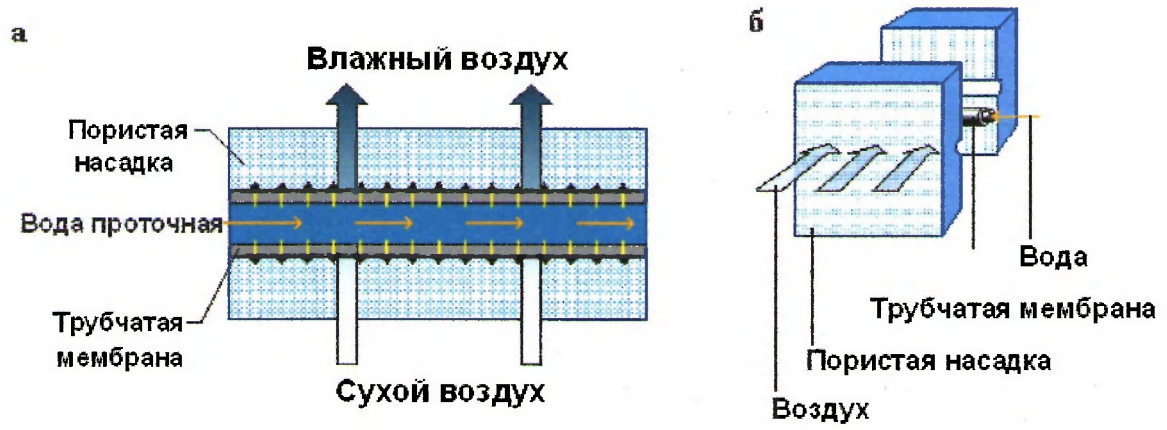


Рис.8.138. Схема работы технологии увлажнения воздуха водой, очищаемой мембранным способом, (а) и компоновка насадочного модуля (б).

Предполагается использование данного метода для увлажнения воздуха в СКВ с достижением требуемой производительности за счет наращивания насадочного модуля поэлементно (рис.8.138б). Сообщается о возможности периодической очистки (регенерации) мембраны.

Таким образом, технология решает вопрос очистки питающей воды непосредственно в увлажнителе. После последующей инженерной проработки с определением эксплуатационных характеристик и экономических показателей можно будет судить о ее конкурентоспособности.

Компания Mitsubishi Heavy Ind. (MHI) выпускает увлажнители Nanomist [287], рис.8.139, в которых использована нанополимерная пленка, представляющая собой молекулярное сито с размером ячейки 0.35 нм. Этот материал пропускает молекулы воды 0,28 нм и задерживает бактерии, типичный размер которых 200 нм (рис.8.140). Производительность по влаге 550 мл/ч, емкость водяного бака 4 л.

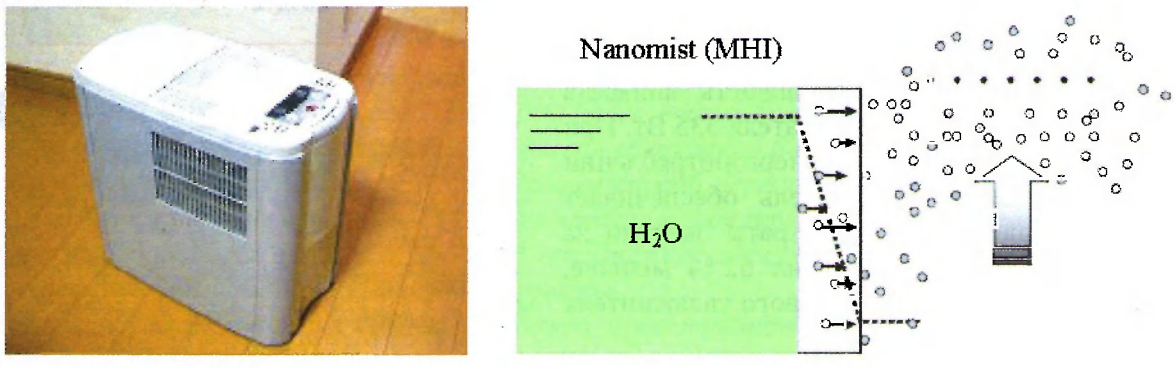


Рис.8.139. Увлажнитель Nanomist (MHI): а – внешний вид; б – механизм увлажнения воздуха.

Конструкция аппарата представлена на рис.8.140. Вода на увлажнение поступает из водяного бака (1) через фильтр (2) в рабочую емкость (3b), в которой расположены нанотрубки (3). Трубки дистанцируются одна от другой с помощью трубной решетки (3а) и омываются по наружной стороне водой. Внутри трубок проходит воздушный поток, организуемый вентилятором (4). Трубная решетка обеспечивает герметичное разделение водяной и воздушной полостей увлажнителя.

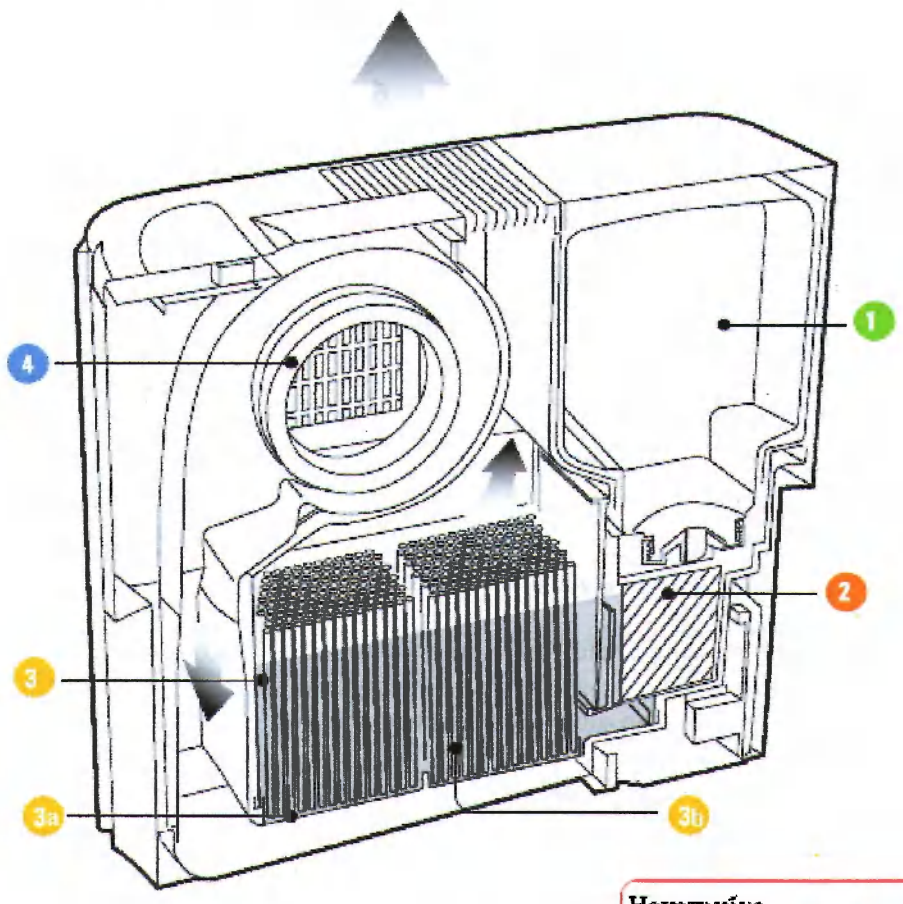
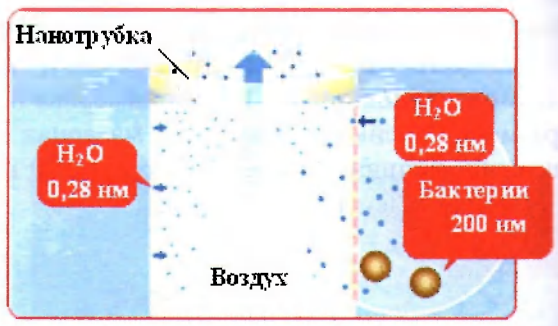


Рис.8.140. Увлажнитель Nanomist:

1 – водный бак;
2 – фильтр;
3 – нанотрубки;
3а – трубная решетка;
3b– рабочая емкость для воды;
4 – вентилятор.

Подогрев воды в баке увлажнителя Nanomist и, соотвественно, повышение температуры полимерного материала приводит к изменению конфигурации его молекулярной решетки (рис.8.141), что работает на увеличение производительности аппарата (рис.8.142). При этом способность задержки бактерий сохраняется.

Номинальная производительность аппарата 550 мл/ч при мощности нагревателя 335 Вт. При отключенном нагревателе и энергопотреблении всего лишь 22 Вт увлажнитель обеспечивает 65 % производительности. Затраты энергии за годовой цикл эксплуатации на 62 % меньше, чем в случае применения парового увлажнителя MHI [287].



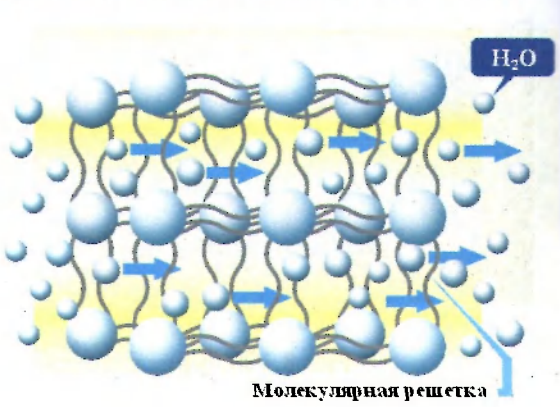


Рис.8.141. Молекулярная решетка нанополимера.

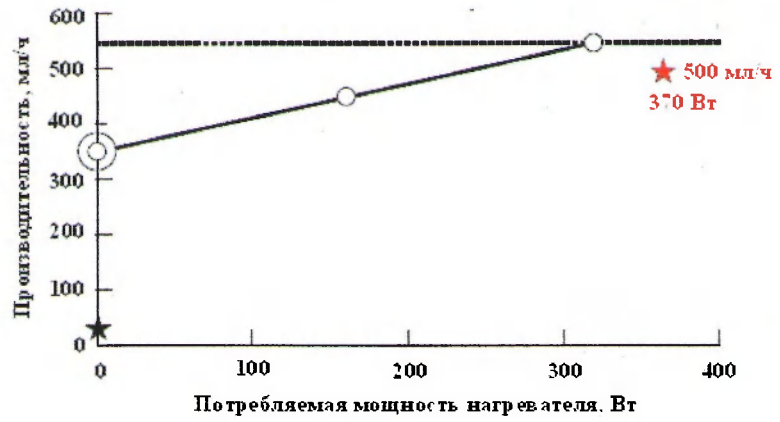


Рис.8.142. Зависимость производительности по влаге аппарата Nanomist от потребляемой мощности нагревателя (* - данные по пароувлажнителю).

Сплит-система FTXR компании Daikin снабжена функцией увлажнения и осушения "Ururu-Sarara" внутреннего воздуха помещения за счет применения специального адсорбента[1] в наружном блоке (рис.8.143). Здесь, в режиме увлажнения, атмосферная влага отбирается и передается в помещение по воздуховоду, связывающему наружный и внутренний блоки. Производительность по влаге 400…450 мл/ч.

[1]данные не раскрываются

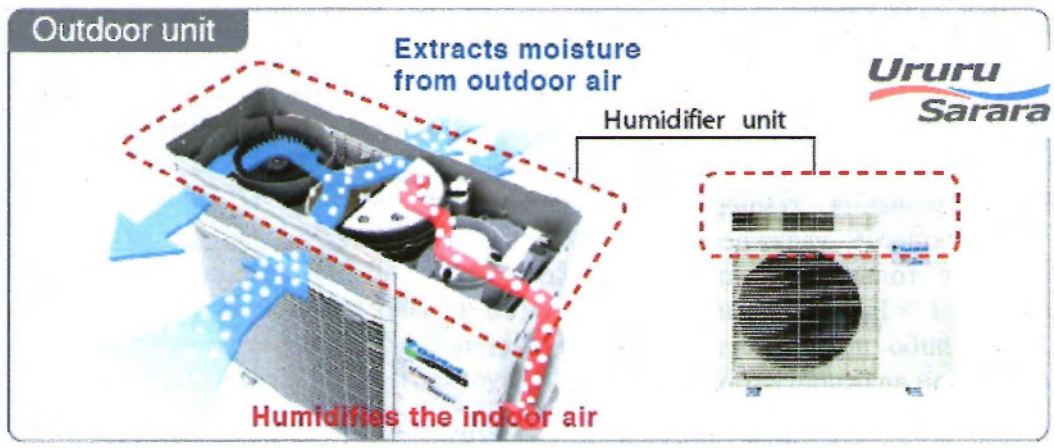


Рис.8.143. Система "Ururu-Sarara" Daikin Co.

В заключение раздела можно отметить тот факт, что схемы работы увлажнителей на проточной воде, дозированного питания, более востребованы сегодня, чем оборотный цикл, по соображениям безопасности, учитывая возможное бактериологическое заражение воды Легионеллой и пр., см. § 10.2. Однако сам способ передачи водяного пара в воздух за счет его испарения является в своей основе натуральным природным процессом, как и весь процесс кругооборота воды в природе. В отсутствие капельной влаги оборотные схемы насадочных увлажнителей абсолютно безопасны.

Приведенная информация свидетельствует о постоянном поиске новых технологий и технических решений, направленных на повышение качества приточного воздуха, в рамках решения проблемы IAQ, и напоминает нам об огромном интересе в мире к данной проблеме, что, по моему мнению, должно стимулировать научных работников, аспирантов и студентов к подключению их творческого потенциала.



8.3. ПАРОВЫЕ УВЛАЖНИТЕЛИ

8.3.1. ОСОБЕННОСТИ И БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УВЛАЖНЕНИЯ ВОЗДУХА ПАРОМ

Увлажнение воздуха паром – политропический процесс, протекающий с повышением влагосодержания и энтальпии (рис.8.8). Линия процесса в d,h- диаграмме определяется тепловлажностным отношением $\varepsilon_п$:

$$\varepsilon_п = Q/W = h_п G_п / G_п, \text{ т.е.}$$

$$\varepsilon_п = h_п = r_0 + c_п t_п,, \qquad (8.16)$$

здесь $h_п$, $G_п$ – энтальпия и расход пара ($G_п = G_в \Delta d$).

Полученное уравнение 8.16 совпадает с выражением 4.1 для углового коэффициента изотермы ε_t: $\varepsilon_t = r_0 + c_п t_в$. Поэтому при равенстве температур $t_п = t_в$ процесс увлажнения паром идет строго по изотерме. Это частный случай, обычно $t_п > t_в$. Однако, при значениях $t_п \leq 100$ °С линия увлажнения незначительно отклоняется от изотермы, поскольку определяющей величиной в приведенных выражениях $\varepsilon_п$ и ε_t является r_0, а влияние слагаемых $c_п t_п$ и $c_п t_в$ несущественно (например, при температуре воздуха в помещении $t_в = 25$ °С: $\varepsilon_t = 2546$ кДж/кг). Добавление в воздух пара от кипящей воды при $t_п = 100$ °С при $P = P_б$ дает значение $\varepsilon_п = 2686$ кДж/кг (отклонение луча процесса от изотермы 5 %). Увеличение конечного значения температуры воздуха на 1…2 ° в процессе увлажнения воздуха паром наблюдается только при паре с избыточным давлением $P > P_б$ и температурой $t > 100$ °С (рис.8.144) либо при существенном увеличении относительной влажности (более чем на 50 %).

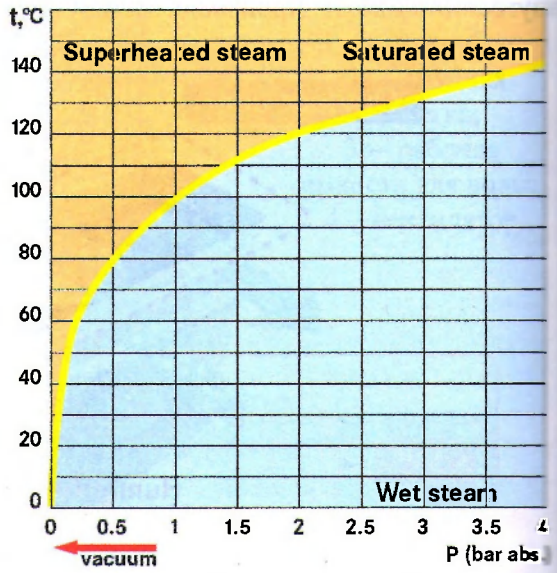


Рис.8.144. Зависимость t (P) для водяного пара.

Чтобы развеять все сомнения относительно правомочности представлений об изотермичности увлажнения паром, имеющим температуру в 4…7 раз большую, чем температура воздуха, полезно проанализировать физическую картину процесса. Добавление насыщенного водяного пара с $t_п = 100$ °С в поток воздуха, имеющий более низкую температуру, приводит к конденсации пара с образованием видимого шлейфа капелек воды диаметром 2…40 мкм. При этом выделяется скрытая теплота конденсации, и температура воздуха на этом участке, увеличивается на 20…30°. Однако, затем они повторно испаряются, отобрав от воздуха скрытую теплоту парообразования, и температура воздуха возвращается к прежнему уровню (рис.8.145).

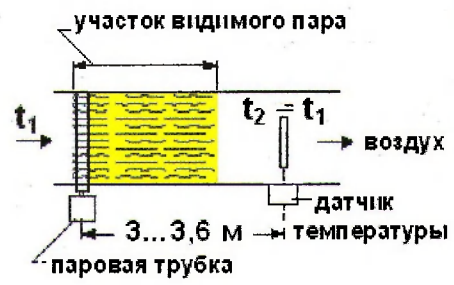


Рис. 8.145. К анализу физической картины увлажнения воздуха паром.

На длину видимого шлейфа пара (сконденсировавшихся капель) влияет скорость воздушного потока, его температура, схема выпуска пара (по ходу потока либо против него), геометрический фактор воздуховода (отношение высоты к ширине). Длину участка воздуховода, в пределах которого происходят фазовые превращения, а по существу абсорбция пара, – Steam Absorption Distance (SAD), желательно минимизировать. Участок укорачивается с понижением скорости воздуха, увеличением его температуры, размещением паровой трубки выпускными отверстиями навстречу потоку воздуха, уменьшением геометрического фактора. Перечисленные факторы входят в *базовые принципы организации процесса увлажнения воздуха паром*, разработанные компанией Armstrong (рис.8.146).

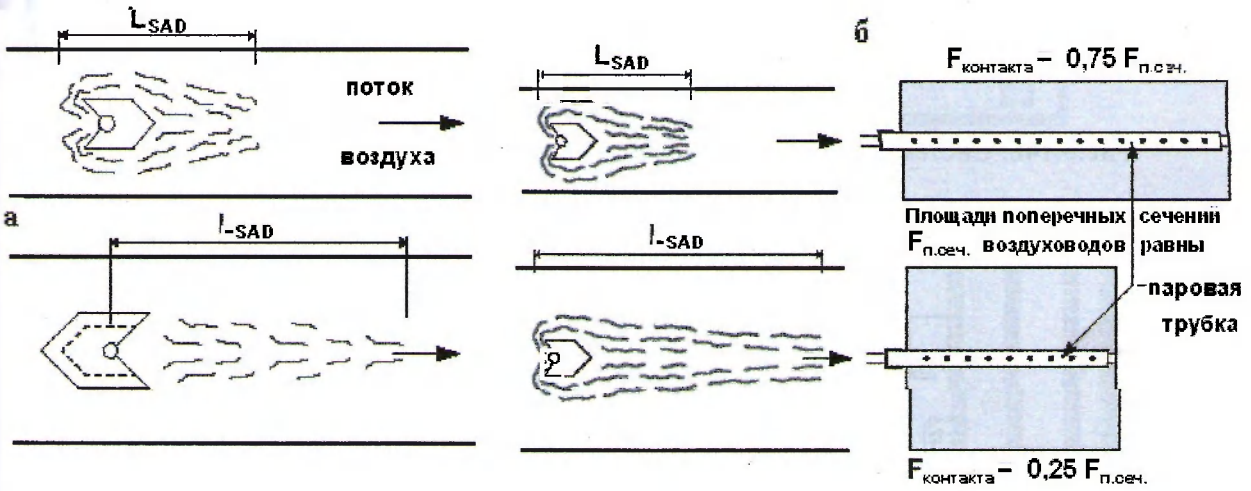


Рис.8.146. Влияние схемы размещения паровой трубки (а), геометрического фактора воздуховода (б), а также количества трубок на длину участка абсорбции пара (в).

Применение одиночной паровой трубки ограничено высотой воздуховода h = 36" (0,9 м), скоростью воздушного потока 4 м/с, температурой воздуха 12,8 °С и φ = 80 %.

Для ускорения ассимиляции пара воздушным потоком и уменьшения длины участка SAD рекомендовано использование MultiPipe System: двух-, трехтрубных (и более) паровых распределителей (рис.8.146в, 8.147…8.150, 8.152). Число труб при: 0,9 м ≤ h < 1,5 м – 2; 1,5 м ≤ h < 2 м – 3; 2 м ≤ h < 2,5 м – 4; h ≥ 2,5 м – 5 (и более).

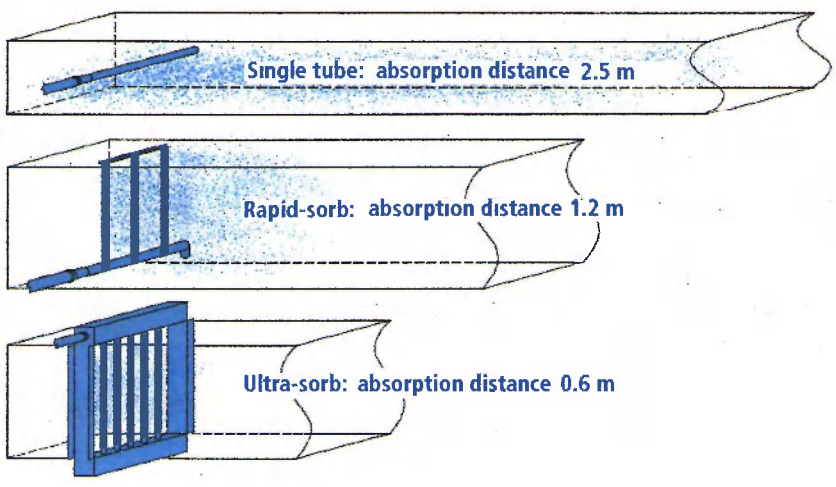


Рис.8.147. Участки ассимиляции пара для одиночной трубки (Single tube) и мультитрубных систем Rapid-sorb и Ultra-sorb (DRIISTEEM).

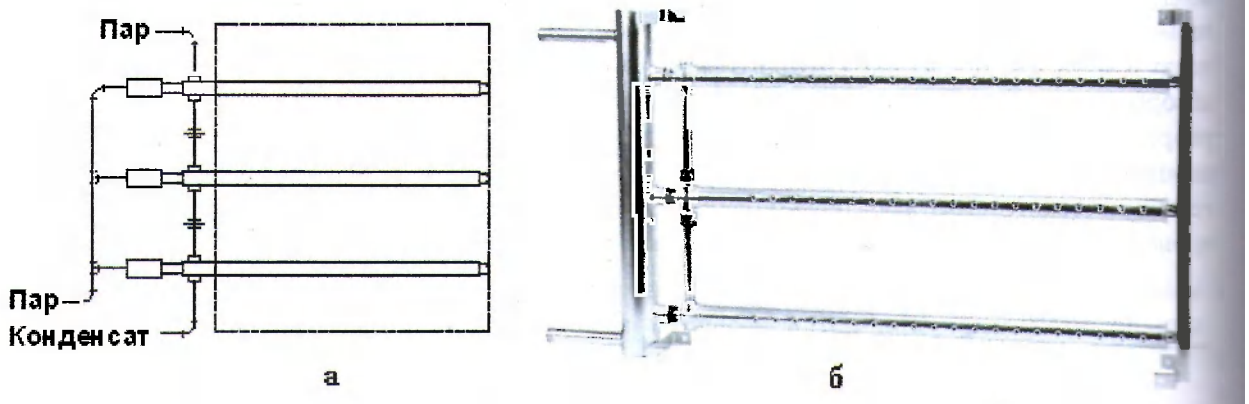
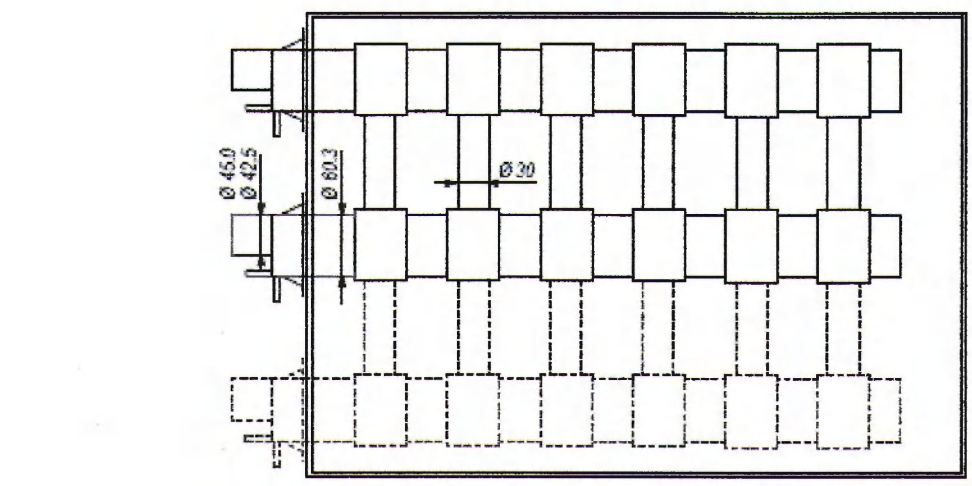


Рис.8.148. Система MultiPipe: а – схема, б – фотография (трубка Armstrong).



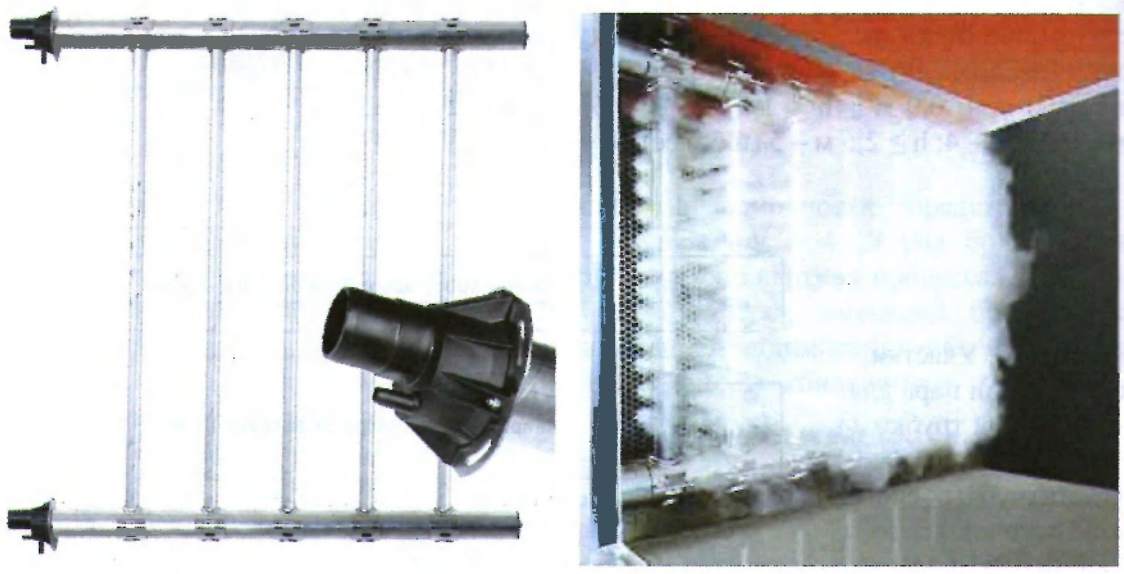


Рис.8.149. Схема и фотографии системы OptiSorb (Axair Ltd)

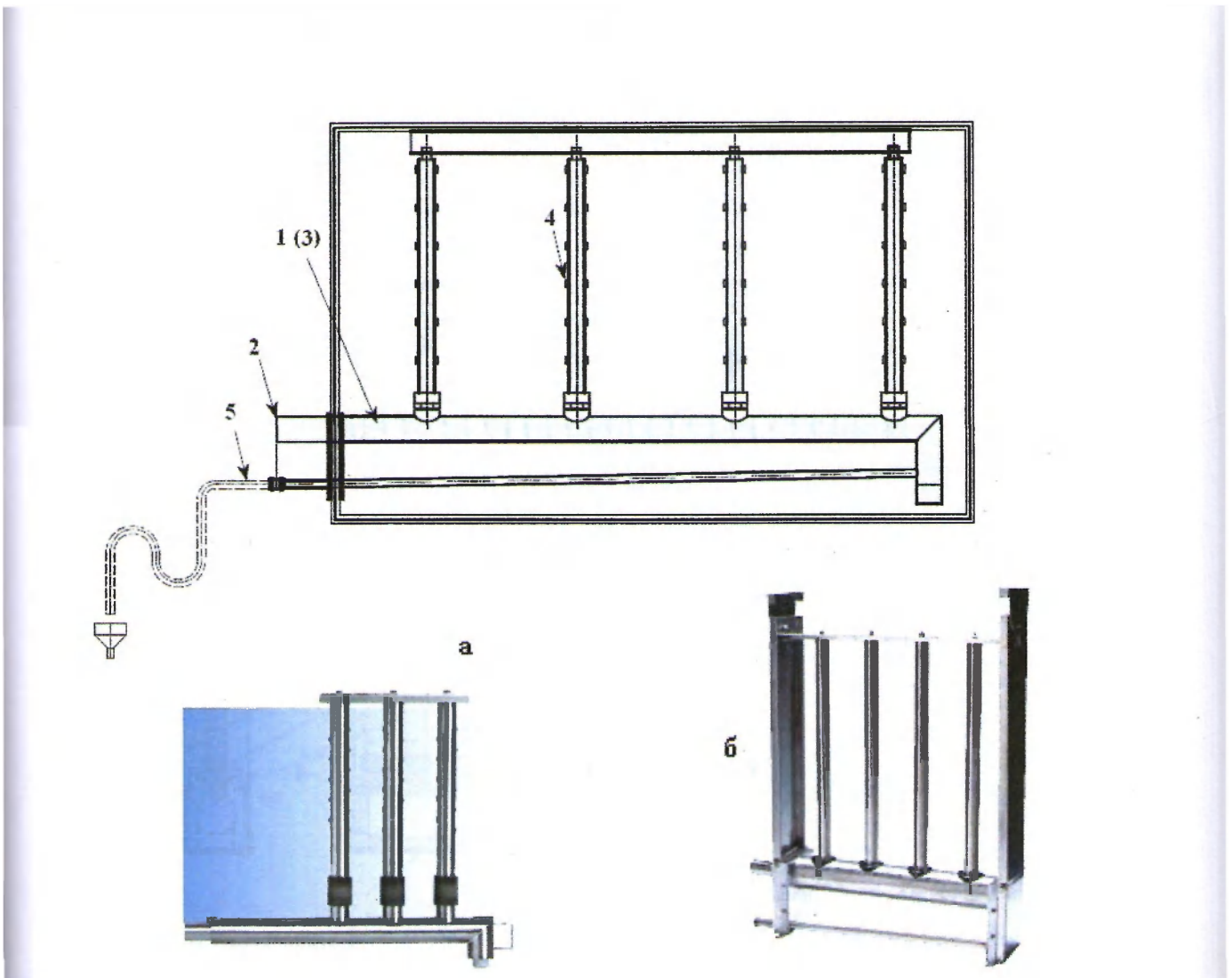


Рис.8.150. Увлажнительная система Rapid-sorb, DRIISTEEM (а) и SAM (Short Absorption Manifold), Axair Ltd., (б): 1 – паровой коллектор; 2 – ввод пара; 3 – коллектор сбора конденсата; 4 – пароraспределительные трубки; 5 – дренаж.

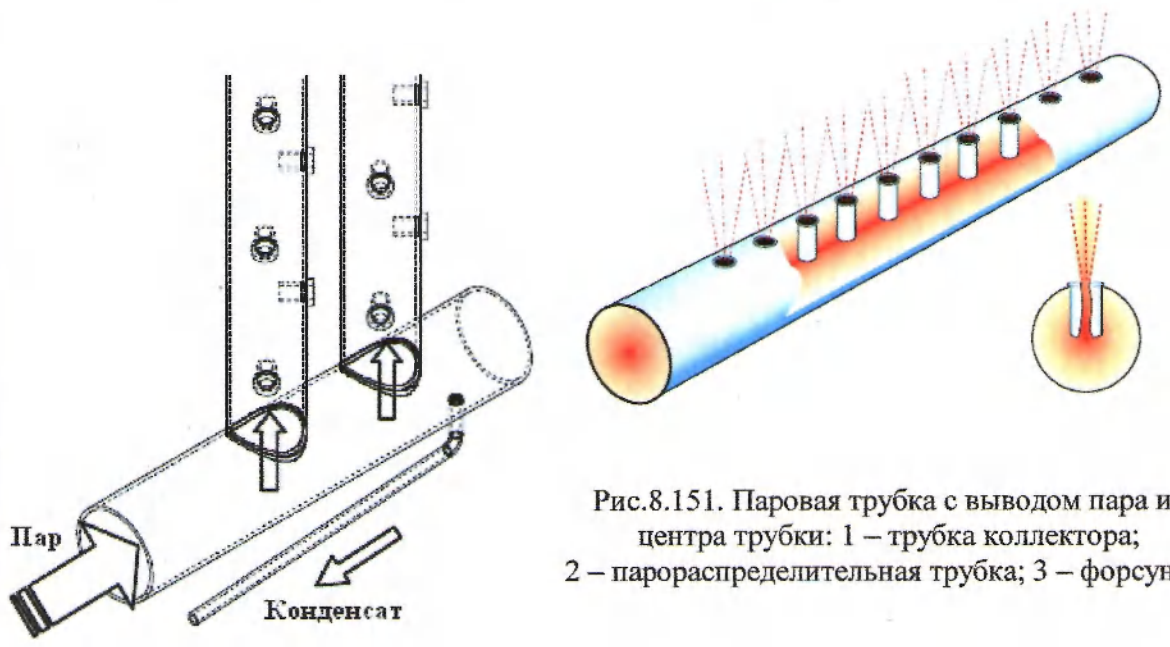
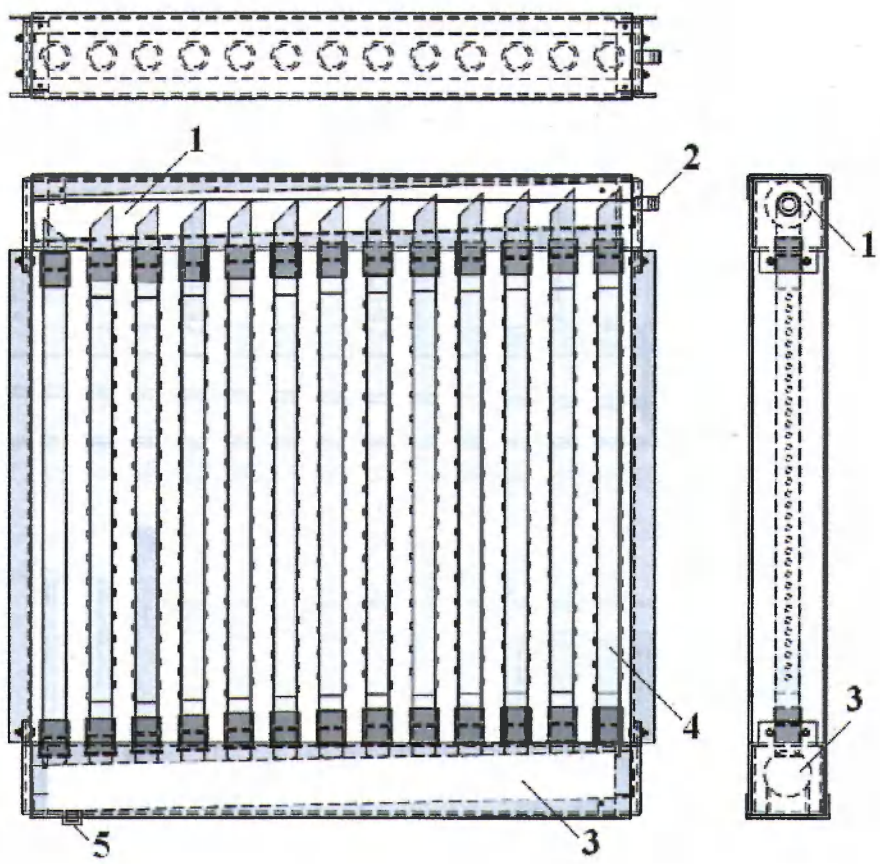
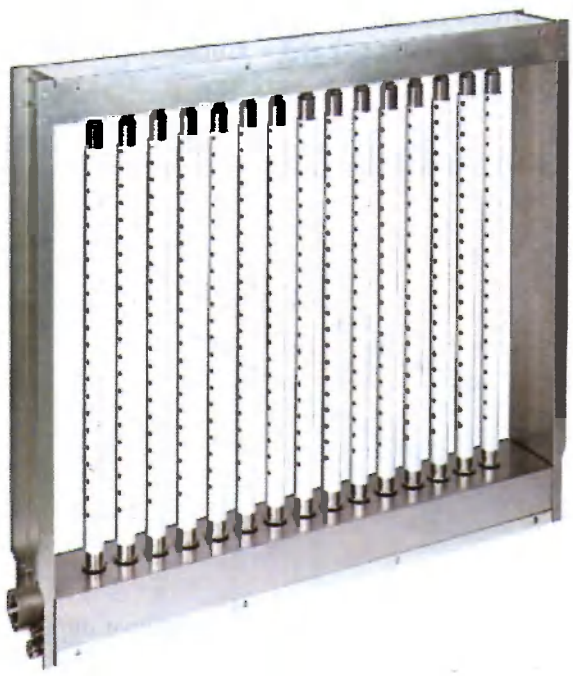


Рис.8.151. Паровая трубка с выводом пара из центра трубки: 1 – трубка коллектора; 2 – пароraспределительная трубка; 3 – форсунка.





Ultra-sorb

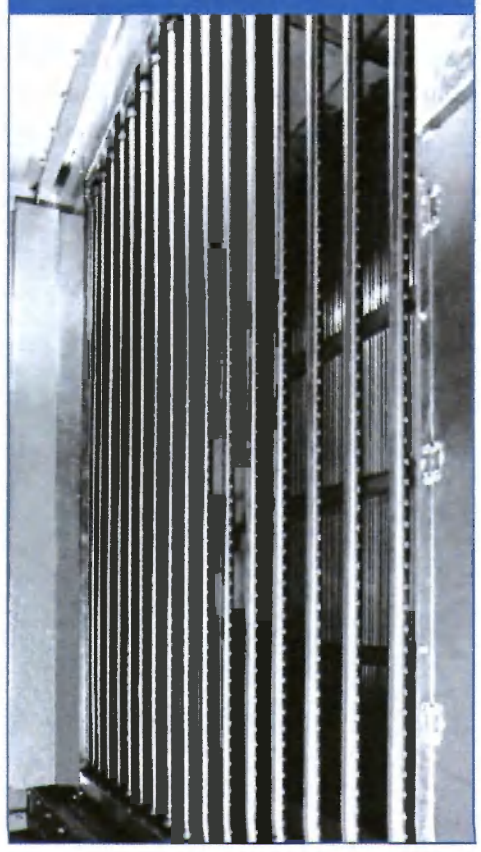
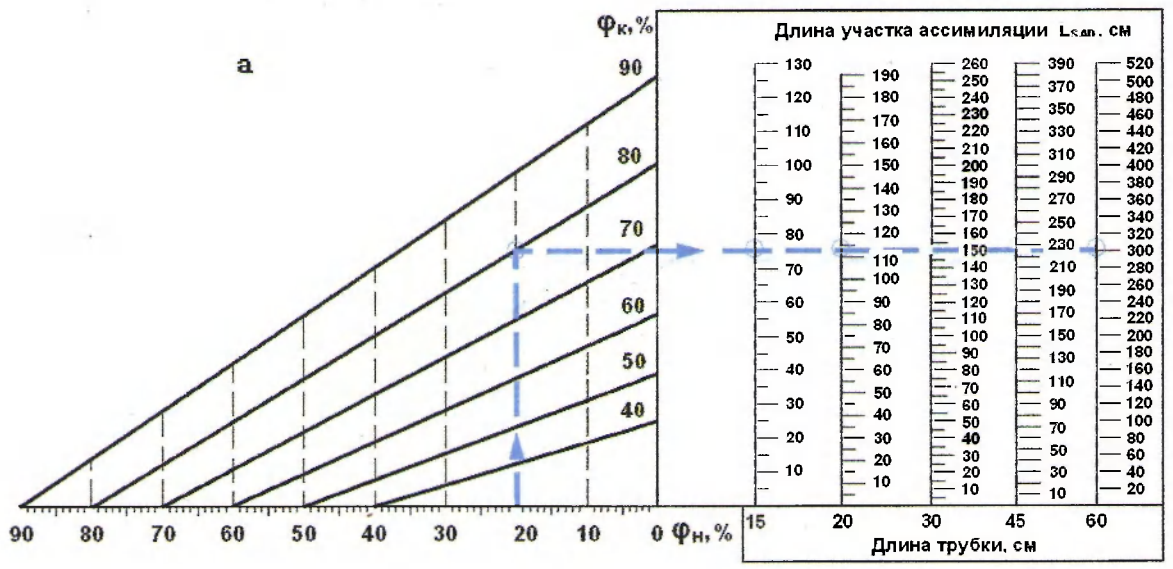


Рис.8.152. Конструкция системы Ultra-sorb (обозначения по рис.8.149).

На рис.8.153, 8.154 приведены номограммы для расчета длины участка ассимиляции пара L_{SAD} для одиночной (single tube) трубки и многотрубных (MultiPipe) паровых систем Rapid-sorb и Ultra-sorb компании DRISTEEM [299].



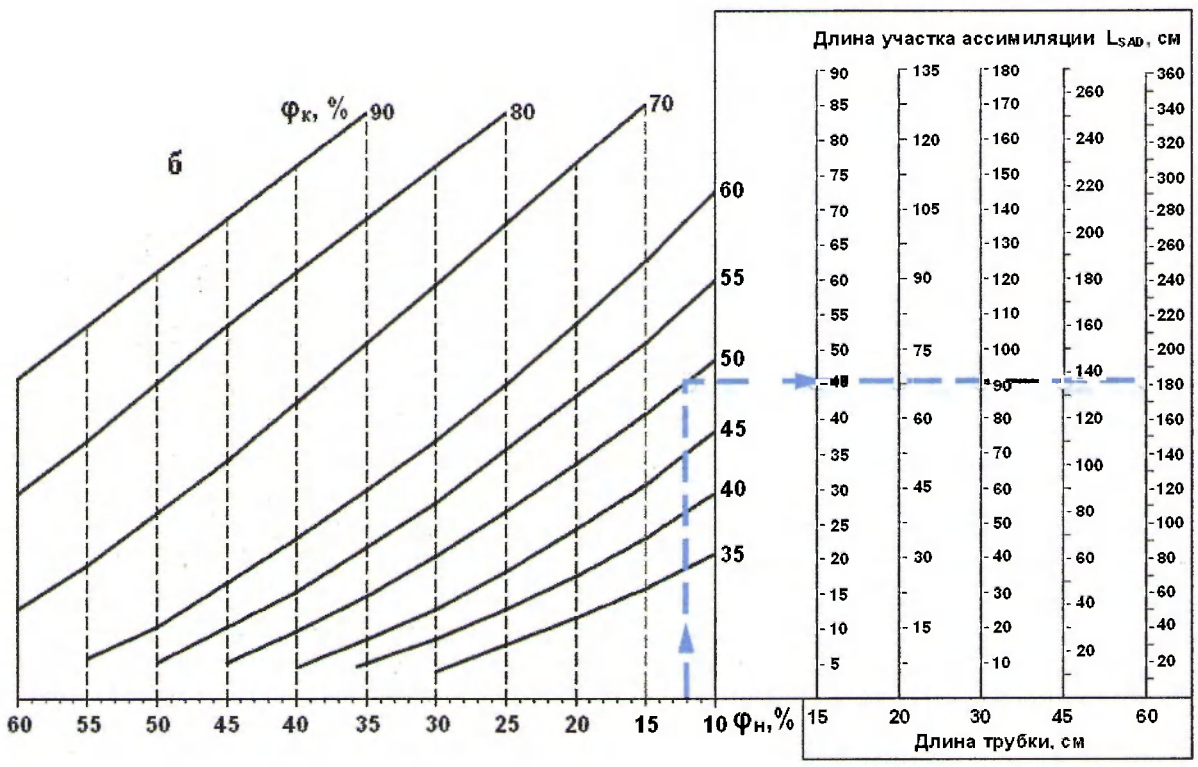


Рис.8.153. Участки ассимиляции пара, характерные для системы Rapid-sorb при скорости воздуха $v \leq 10$ м/с и значениях температуры t: 14 °С (а) и 22 °С (б).

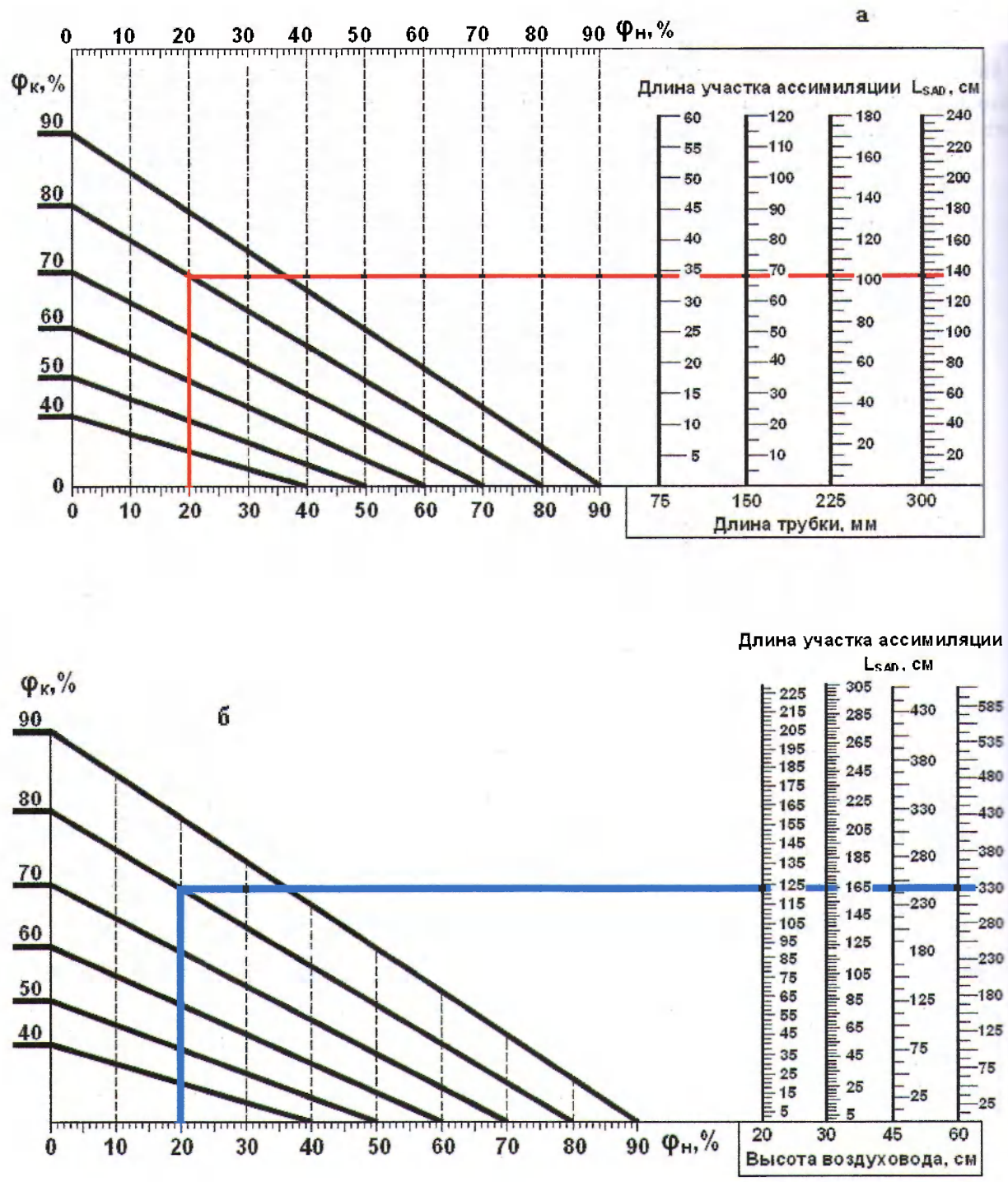


Рис.8.154. Участки ассимиляции пара для системы Ultra-sorb – а и одиночной трубки – б (v = 6 м/с, t = 13 °С).

В поле номограмм на рис.8.153 и 8.154, в качестве примера, проведены необходимые построения для случая увлажнения воздуха от $\varphi_н$ = 20 % до $\varphi_к$ = 80 %. Легко заметить, что замена одиночной трубки, для которой L_{SAD} – 165 см, на более совершенные пароraспределительные системы позволяет сократить длину участка ассимиляции пара на 9…18 %. В случае Rapid-sorb L_{SAD} = 150 см, а для Ultra-sorb значение L_{SAD} еще меньше – 135 см.

Длину участка абсорбции пара также можно сократить, используя схему HumidiPack (Armstrong) (рис.8.154, 8.167). Перед рабочими паровыми трубками по ходу движения воздушного потока устанавливаются трубки-дефлекторы, изменяющие структуру потока и его скорость в области выпуска пара. Эта схема обеспечивает более равномерное распределение пара и ускоряет его поглощение воздухом.

Расстояние между секцией парового увлажнителя и другими аппаратами должно превышать длину участка SAD, в противном случае в смежной секции будет наблюдаться выпадение капельной влаги, что негативно скажется на режимных и эксплуатационных характеристиках оборудования. Поэтому, как правило, паровые увлажнители располагают в конце цепи аппаратов обработки воздуха либо непосредственно в приточном воздуховоде (рис.8.155).

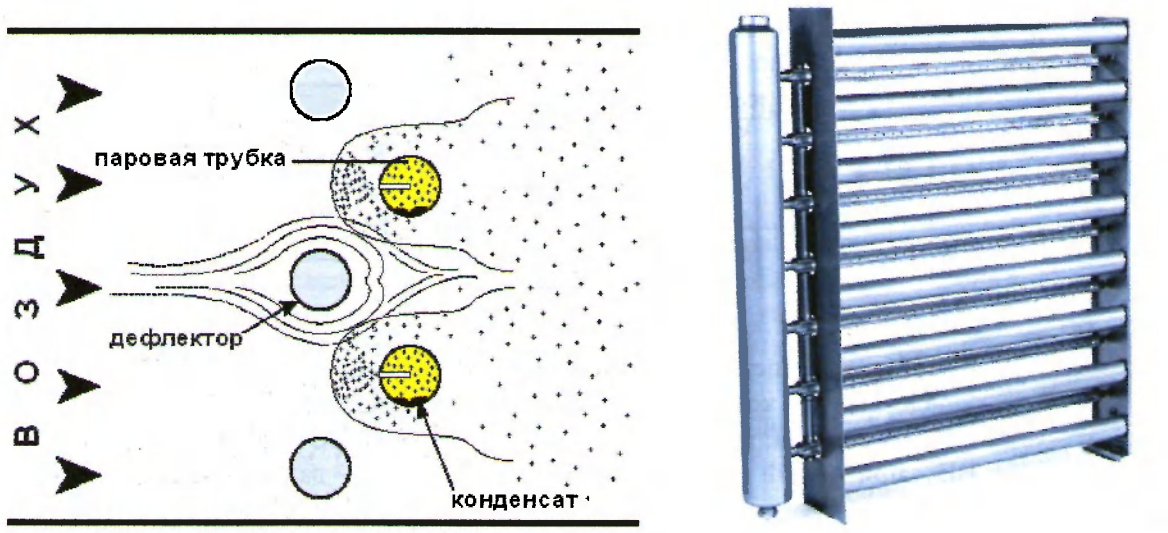


Рис.8.154. Паровой увлажнитель HumidiPack (схема и устройство).

Следует иметь в виду, что в современных системах кондиционирования могут использоваться так называемые конечные фильтры, размещаемые после всех аппаратов обработки воздуха. Эффективность таких фильтров - 99,97 % (класс абсолютных фильтров), что предполагает 99,97- процентное улавливание частиц диаметром 0,3 мкм и 100 % – частиц больших по размеру. Это означает, что если паровой увлажнитель находится перед фильтром и длина участка SAD совпадает или больше расстояния до фильтра, то произойдет улавливание капелек воды. В результате фильтрующий материал будет расширяться (набухать), что приведет к скачкообразному росту аэродинамического сопротивления системы. Таким образом, длина участка абсорбции пара – важнейший фактор, определяющий инсталляцию паровых увлажнителей.

Ниже приведена расчетная процедура нахождения величины L_{SAD}, разработанная компанией “Nordmann Engineering”:

$$L_{SAD} = K\,(G_п / L\text{трубки})^{0,5}, \text{ м}, \qquad (8.17)$$

где $G_п$ – производительность увлажнителя (выход пара), кг/ч; $L_{трубки}$ – длина паровой трубки, см; K-фактор – коэффициент, определяемый по номограмме (рис.8.155), в зависимости от начальных параметров воздуха (t, d), требуемого приращения Δd и скорости воздушного потока $w_в$.

На рис.8.156 приведен пример определения K- фактора для условий: $t_1 = 20^0$ C, $d_1 = 4$ г/кг (точка P_1), $\Delta d = 4{,}5$ г/кг (точка P_2), $w_в = 2$ м/с (K = 2,5).

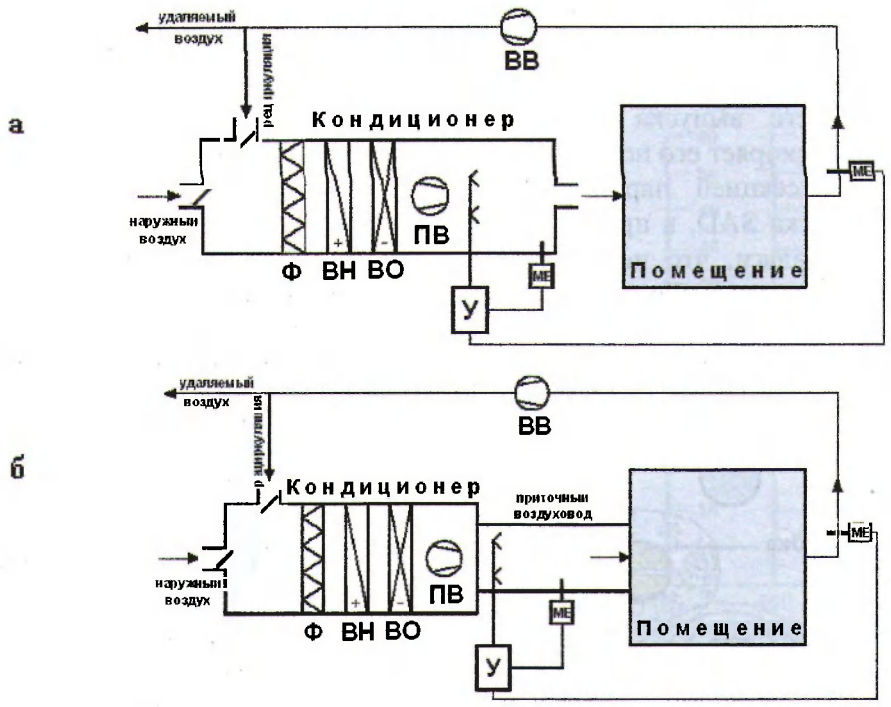


Рис.8.155. Размещение паровых увлажнителей в центральной СКВ:
непосредственно в кондиционере (а) или в приточном воздуховоде (б):
У – увлажнитель, Ф – фильтр, ВН – воздухонагреватель, ВО – воздухоохладитель,
ПВ и ВВ – приточный и вытяжной вентиляторы, МЕ – датчики влажности.

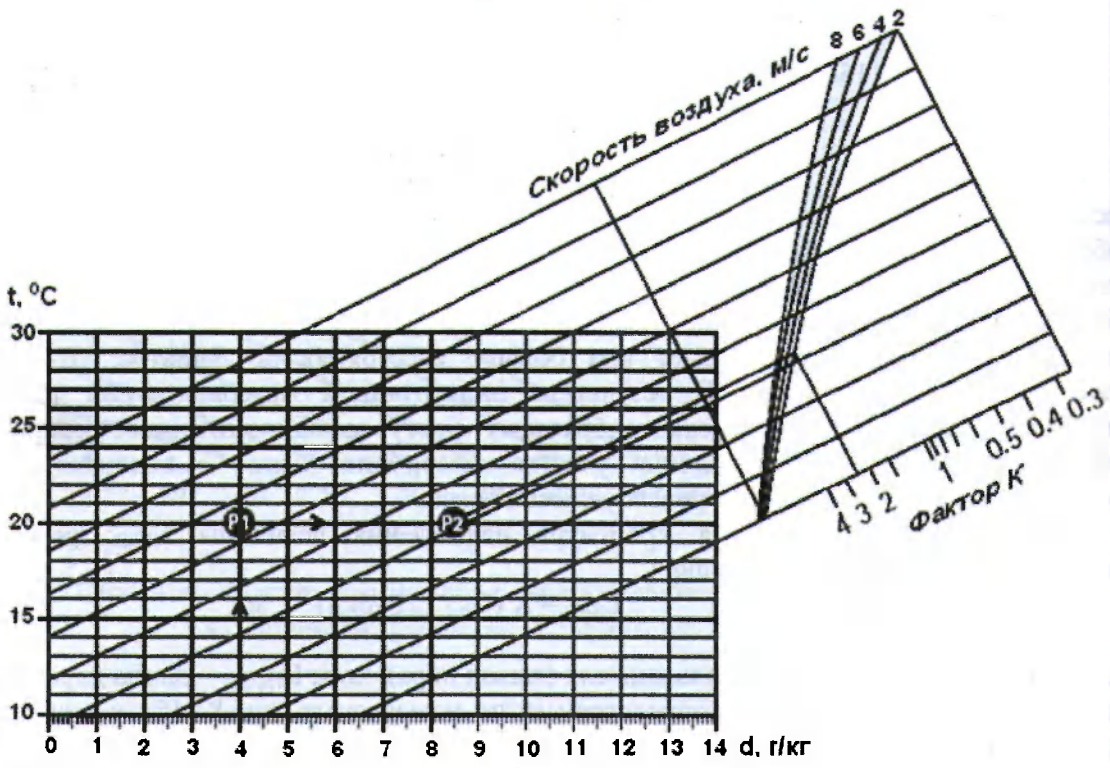


Рис.8.156. Номограмма “Nordmann Engineering” для нахождения K- фактора.

Для увлажнения воздуха в СКВ используют пар “Live Steam” избыточного давления, доставляемый по паропроводам от бойлерной установки, либо пар атмосферного давления от автономных парогенераторов открытого типа (рис.8.157).

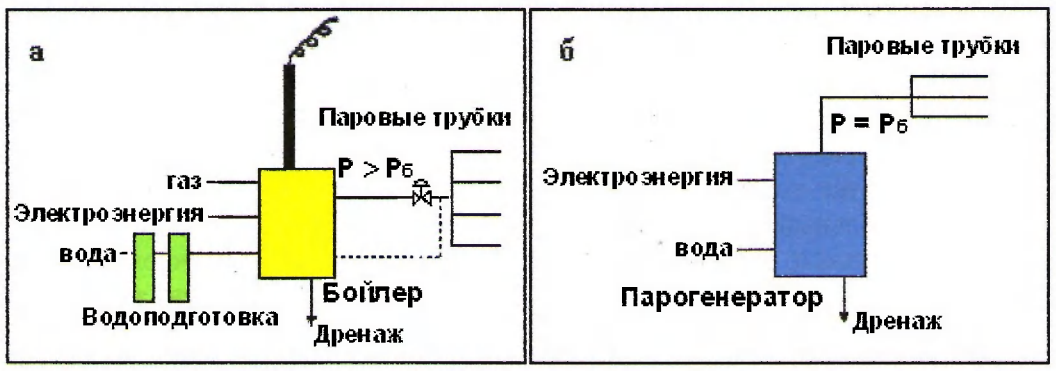


Рис.8.157. Паровые системы увлажнения,
питаемые от бойлера (а) и парогенератора (б).

8.3.2. УВЛАЖНИТЕЛИ, РАБОТАЮЩИЕ НА СЕТЕВОМ ПАРЕ



Увлажнители Direct Injection Steam Humidifiers (DISH), работающие на паре с избыточным давлением, предназначены для обеспечения любой требуемой производительности. Выпускаются газовые и электрические паровые бойлеры (котлы) мощностью 12…1000 кВт и давлением до 300 psi (2000 кПа), фото справа.

Увлажнители DISH обычно применяются в составе центральных СКВ с широким типоразмерным рядом паровых трубок (P = 14…345 кПа, $G_п$ = 129…1456 кг/ч) вертикального и горизонтального исполнения (рис.8.158), а также для паровых систем доувлажнения Area-type (аналогичны DDF, § 8.1.1).

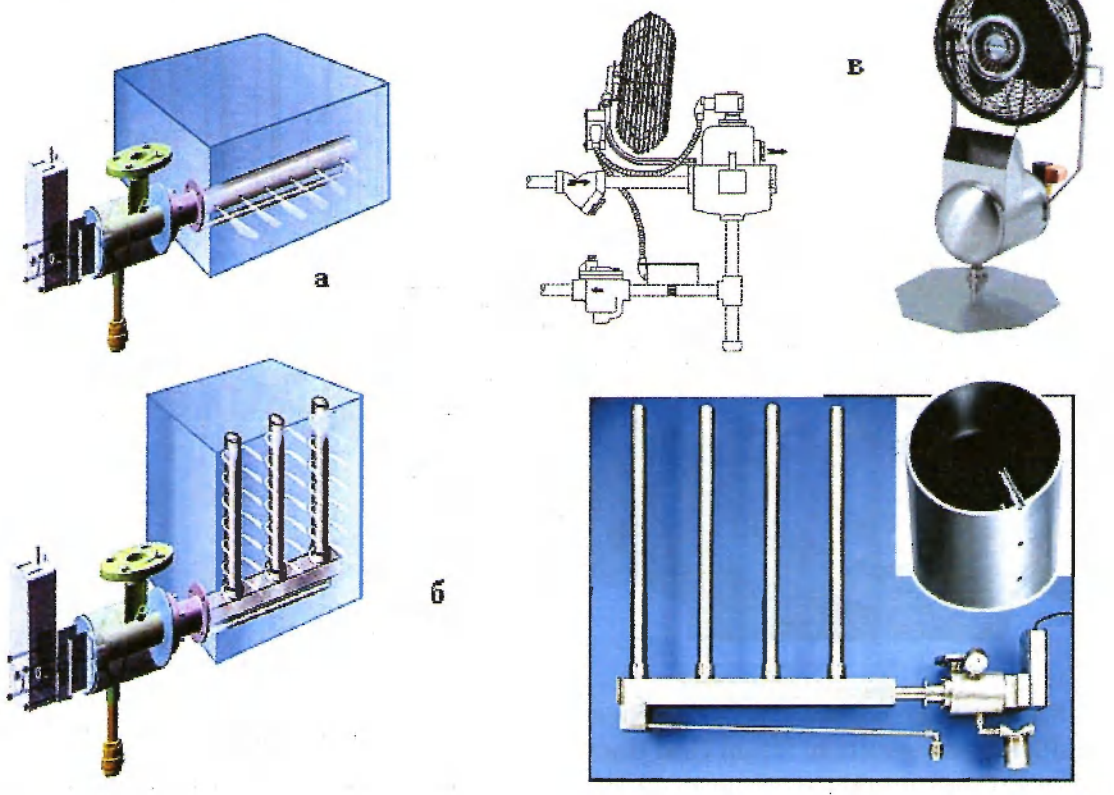


Рис.8.158. Паровые увлажнители DISH с трубками MultiPipe горизонтального (а),
вертикального (б) исполнения и вариант Area-type с осевым вентилятором (в).

Все паровые трубки, использующие Live Steam, комплектуются обеспечивающим устройством, в котором предусмотрен дроссельный клапан, регулирующий рабочее давление выхода пара, а также паровой трап и дренаж конденсата (рис.8.157а, 8.158, 8.159). В ряде конструкций Steam Separate Type Humidifier (рис.8.157) имеются камеры сепарирования и шумоглушения. Для предотвращения конденсации пара в трубке предусмотрена тепловая рубашка, через которую первичный пар поступает от бойлера. За счет этого в трубке поддерживается нормальный температурный уровень выше точки росы.

Регулирующие клапаны изготавливаются по системе «седло-плунжер» (стандартный вариант) либо с дроссельной диафрагмой Esco (рис.8.159б), с пневматическим либо электрическим приводом. Клапан Esco работает абсолютно бесшумно при переключениях за счет вращения керамического (из карбида кремния SiC) диска. Он надежно запирает паровую линию без перетечек, тем самым устраняется возможность конденсации пара в нерабочем режиме. Обладает линейной регулировочной характеристикой.

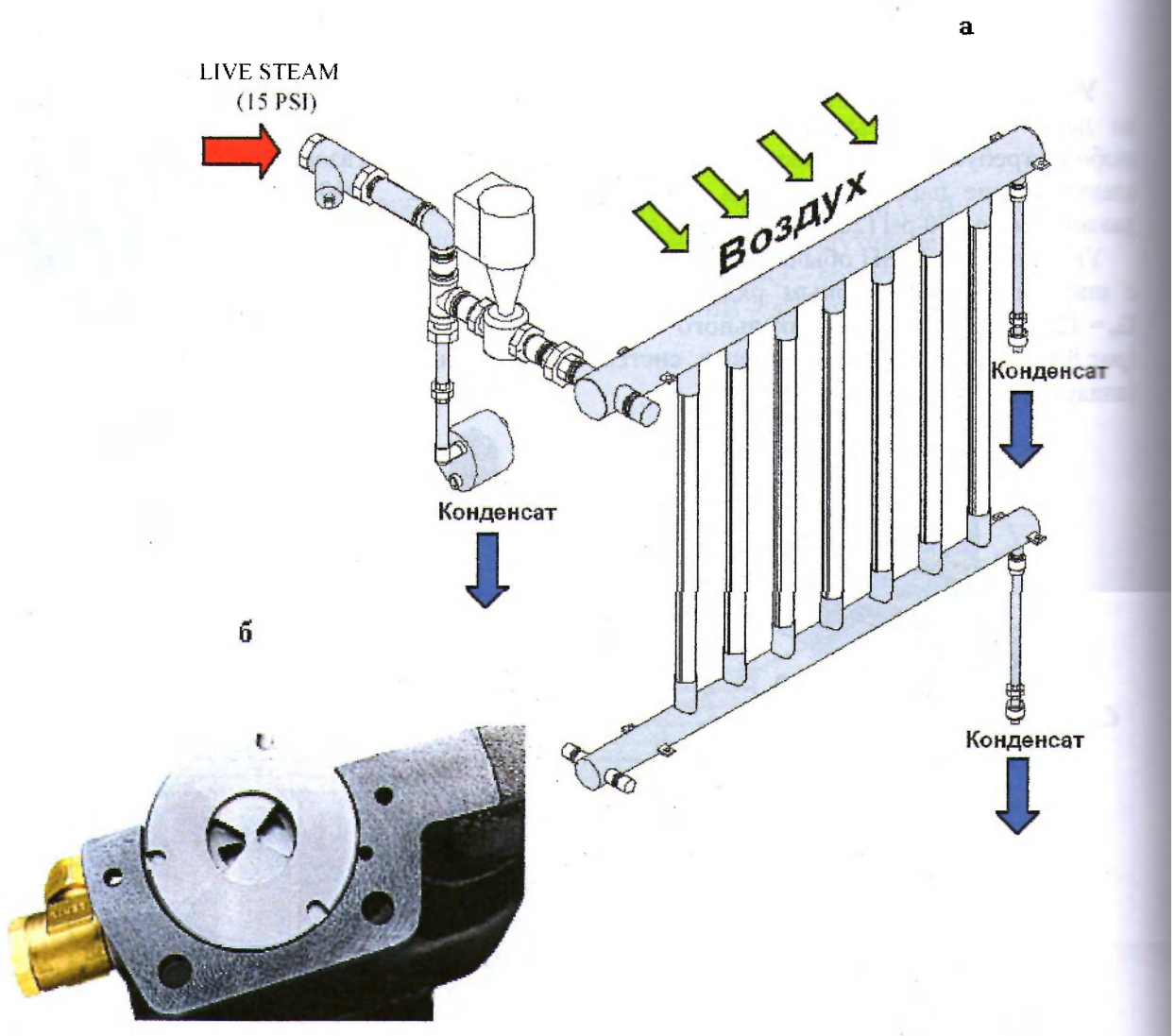


Рис.8.159. Схема подвода пара Live Steam и дренажа конденсата в паровых трубках MultiPipe – увлажнитель Steam Grid Humidifier (по материалам компании Carel) – (а) и современный дроссельный клапан Esco (разработка компании JS) – (б).

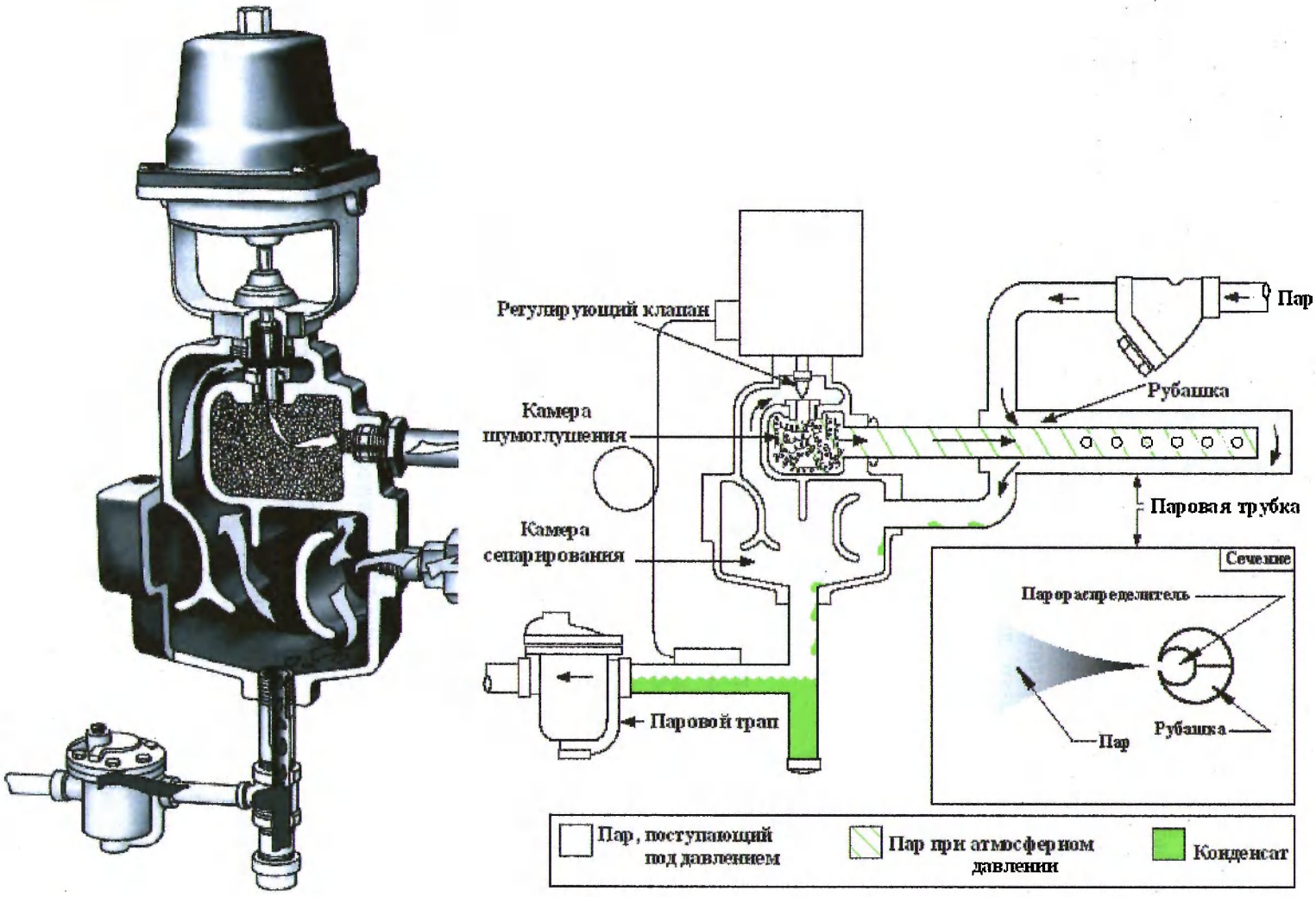


Рис.8.160. Паровой увлажнитель “Steam Separator Type Humidifier”с тепловой рубашкой.

Системы увлажнения Live Steam прямым инжектированием пара, получаемого от парового котла, применяются с 1930 года. К числу достоинств метода можно отнести: возможность значительного дистанцирования собственно увлажнителей от источника пара; низкие экономические затраты при наличии работающей паровой сети; высокую мобильность системы, мгновенно реагирующую на любое изменение влажности в контролируемом объекте, с высокой точностью поддержания φ. Однако при использовании в процессе эксплуатации, различных антикоррозийных химических веществ в качестве добавки в бойлерную воду (в частности, диэтиламинэтанола DEAE и циклогексиламина) данный метод может привести к негативным последствиям. Исследования NIOSH национального института охраны труда и здоровья США подтвердили перенос указанных реагентов в воздух вместе с паром и ответственность данных веществ (аминов) за раздражение глаз человека, образование кожных заболеваний (дерматитов), обострение хронических заболеваний дыхательной системы (особенно заметное при астме). Кроме того, ускоряется старение гигроскопичных материалов, таких как бумага, дерево и др. Сегодня данный метод не рекомендован для применения в печатном деле, музеях. Заверения компаний – производителей Direct Injection steam humidifiers и химических компаний, разрабатывающих ингибиторы коррозии, – о безвредности этих устройств и препаратов не могут служить гарантией безопасности. *Нужен жесткий контроль за качеством бойлерной воды и пара.*

8.3.3. АВТОНОМНЫЕ ПАРОУВЛАЖНИТЕЛИ

Чистый пар Clean Steam получают при атмосферном давлении в автономных увлажнителях с собственным парогенератором, в котором пар образуется при кипении чистой воды (зачастую деионизированной и обработанной в установке обратного осмоса) за счет энергии греющего источника (рис.8.161).



Рис.8.161. Принцип работы автономных парогенераторов.

Простейшим устройством для ввода пара Clean Steam в воздуховод является «паровая чашка» – Cup Type Steam Humidifier (рис.8.162). Предполагается, что образующийся конденсат попадает в чашку и отводится через дренажную трубку. Однако, на практике, капельная влага также переносится в воздуховод, а пароораспределение неравномерное. Лучших результатов можно добиться с помощью: пароораспределительных трубок, сопла (рис.8.163, 8.165), либо вентиляторных доводчиков (рис.8.163б, 8.164) в случае системы увлажнения воздуха непосредственно в помещении Area-type (так же, как и для Live Steam, рис.8.158). Эффективна конструкция с выводом пара из центра трубки для гарантированного получения сухого пара (рис.8.150).

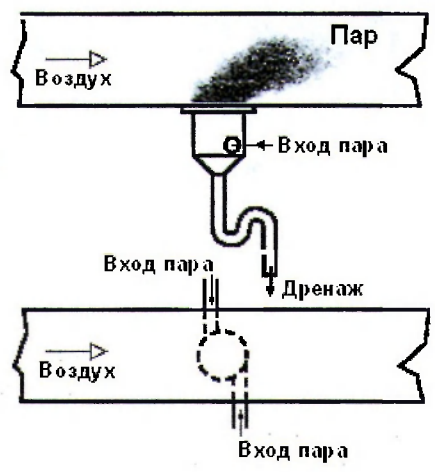


Рис.8.162. Увлажнительное устройство Cup Type Steam Humidifier.

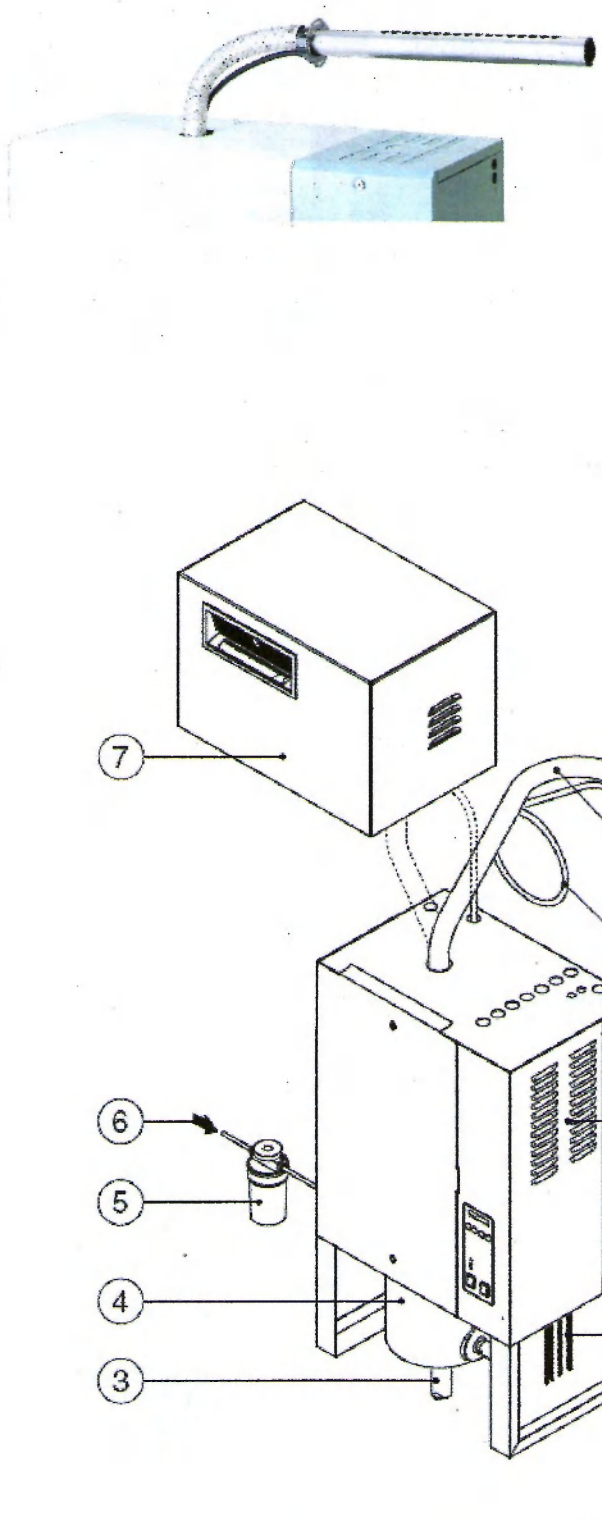
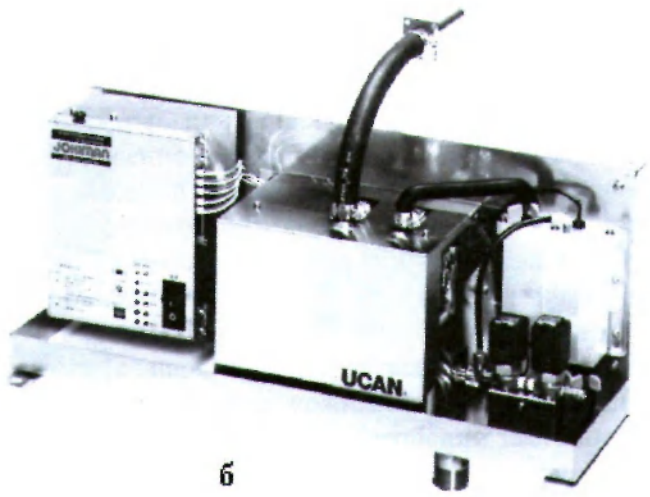
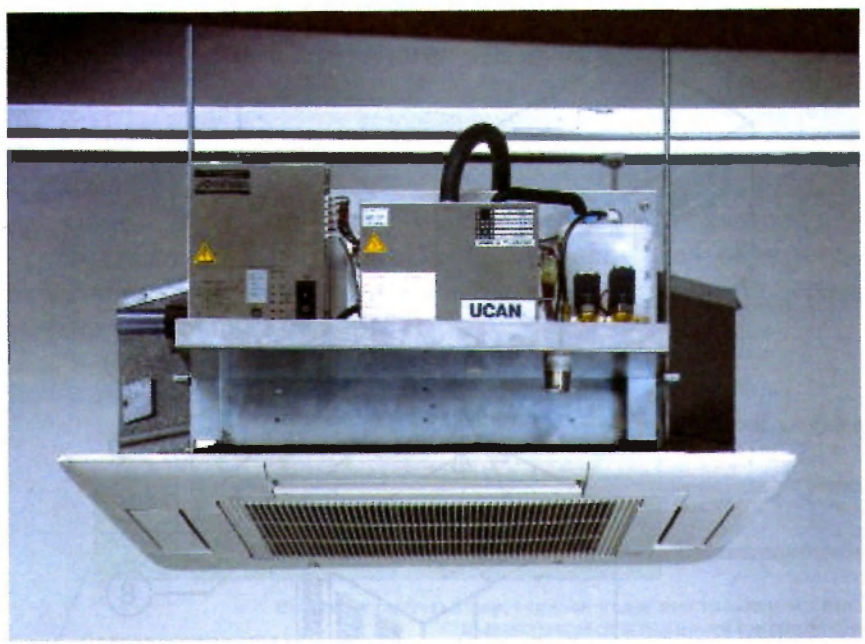


Рис.8.163. Парогенератор Condair CP2 (AxAir)
с трубкой либо с вентиляторным увлажнителем-доводчиком:

1– парогенератор; 2 – ввод электропитания; дренаж конденсата; 4 – емкость для сбора солевых отложений; 5 – водяной фильтр; 6 – подвод воды; 7 – вентиляторный пароraспределитель; 8 – трубка отвода конденсата; 9 – паровые трубки; 10 – пароraспределительная трубка.



б



а

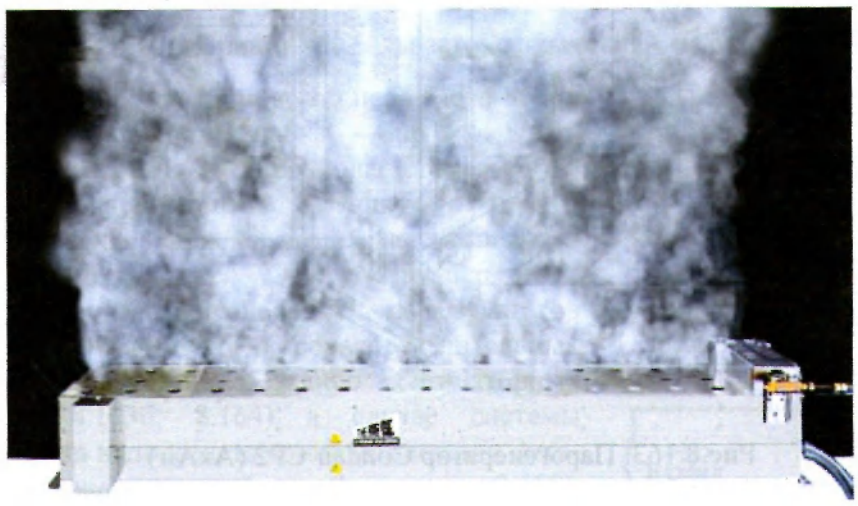


Рис.8.164. Паровые увлажнители UCAN, встраиваемые
в местные кондиционеры (Air Handling Units) – а, и кассетного типа – б.

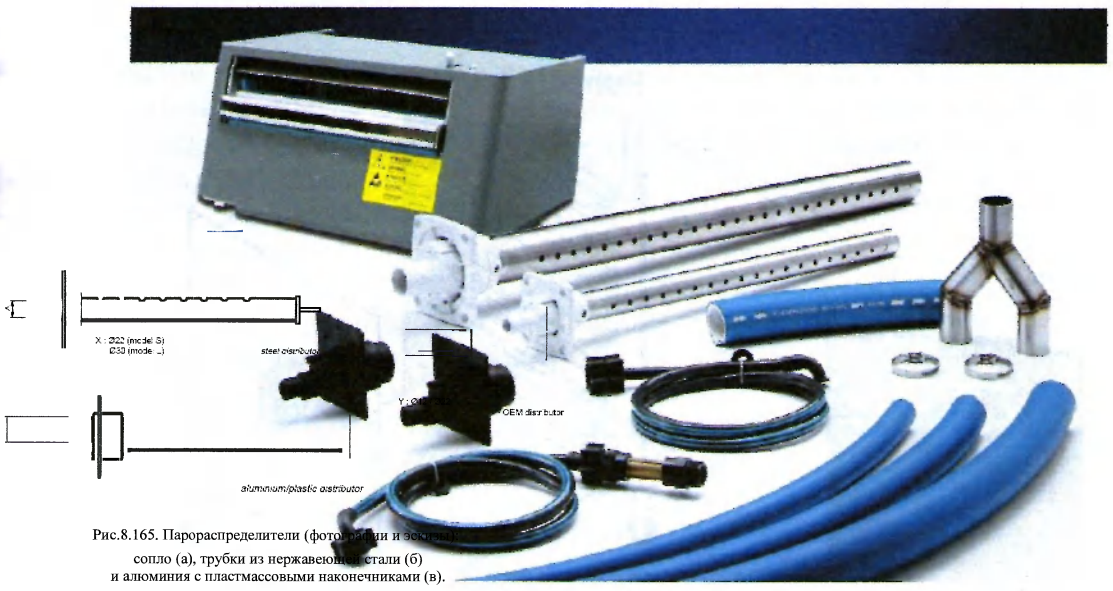


Рис.8.165. Пораспределители (фотографии и эскизы):
сопло (а), трубки из нержавеющей стали (б)
и алюминия с пластмассовыми наконечниками (в).

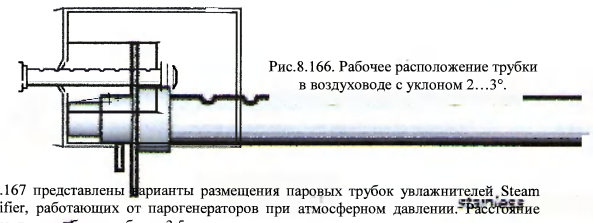
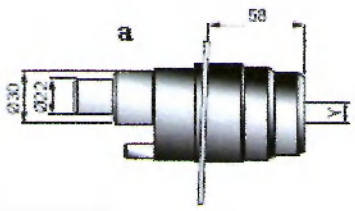
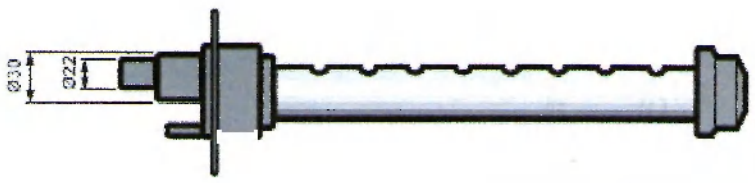


Рис.8.166. Рабочее расположение трубки
в воздуховоде с уклоном 2…3°.

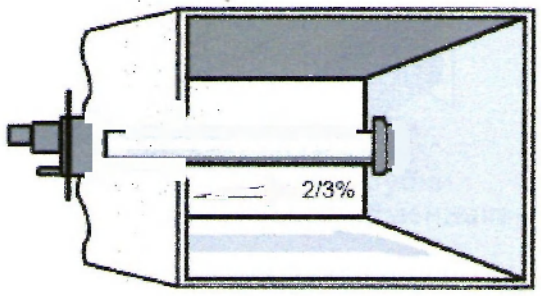
На рис.8.167 представлены варианты размещения паровых трубок увлажнителей Steam Grid Humidifier, работающих от парогенераторов при атмосферном давлении. Расстояние паропроводов должно быть не более 3,5 м.





б

в



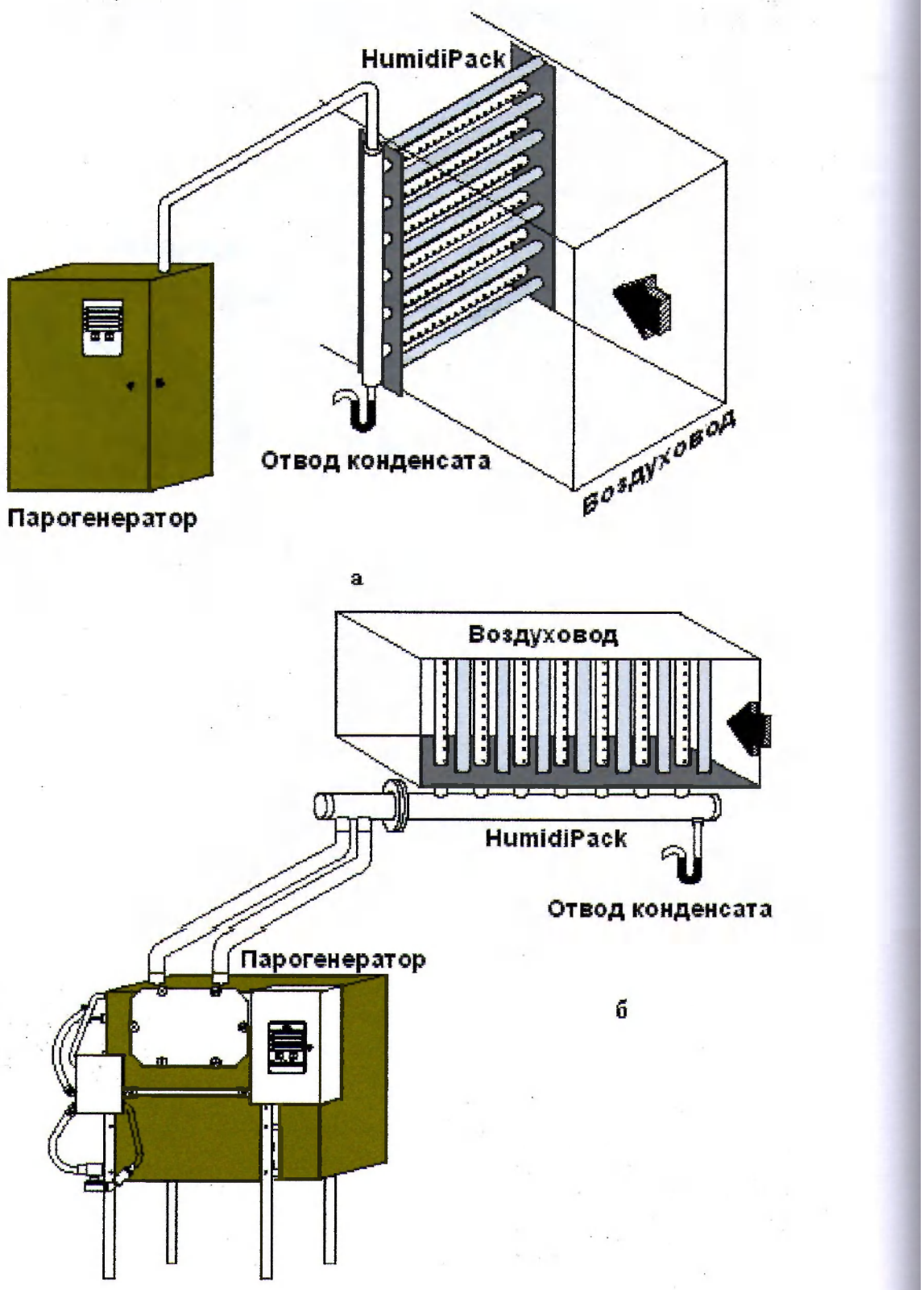


Рис.8.167. Автономные увлажнители с паровыми трубками HumidiPack при вертикальном (а) либо горизонтальном (б) расположении трубок в приточном воздуховоде.

В зависимости от греющего источника парогенераторы классифицируются следующим образом (рис.8.168):

- LTS (liquid to steam), работают на воде системы горячего водоснабжения (t_w = 116 °C), рис.8.168а. Производительность единичного модуля 4…245 кг/ч (для блока из 4-х модулей – 980 кг/ч). Теплообменная поверхность – змеевик (трубка нержавеющей стали) или спираль (медная трубка). Регулирование φ с точностью ± 5 %.
- STS (steam to steam), используют пар от сети (бойлера), рис.8.168в, 8.169. Производительность единичного модуля от 6,8 кг/ч (при давлении пара 5 psi (33,3 кПа)) до 925 кг/ч (15 psi (100 кПа)). В случае блока – 3700 кг/ч. Точность регулирования φ: ± 3 %.
- GTS (gas to steam), работают за счет горения природного газа, пропана либо бутана, рис.8.168б, 8.170. Производительность до 818 кг/ч. Точность регулирования φ: ± 3 %.
- Electric Steam - электрические: с нагревательными элементами ТЭНами (рис.8.168 г), а также с погружными электродами Electrode Steam (при этом их выделяют особо, как электронные увлажнители Electronic Steam). Эта группа увлажнителей рассмотрена ниже более подробно.

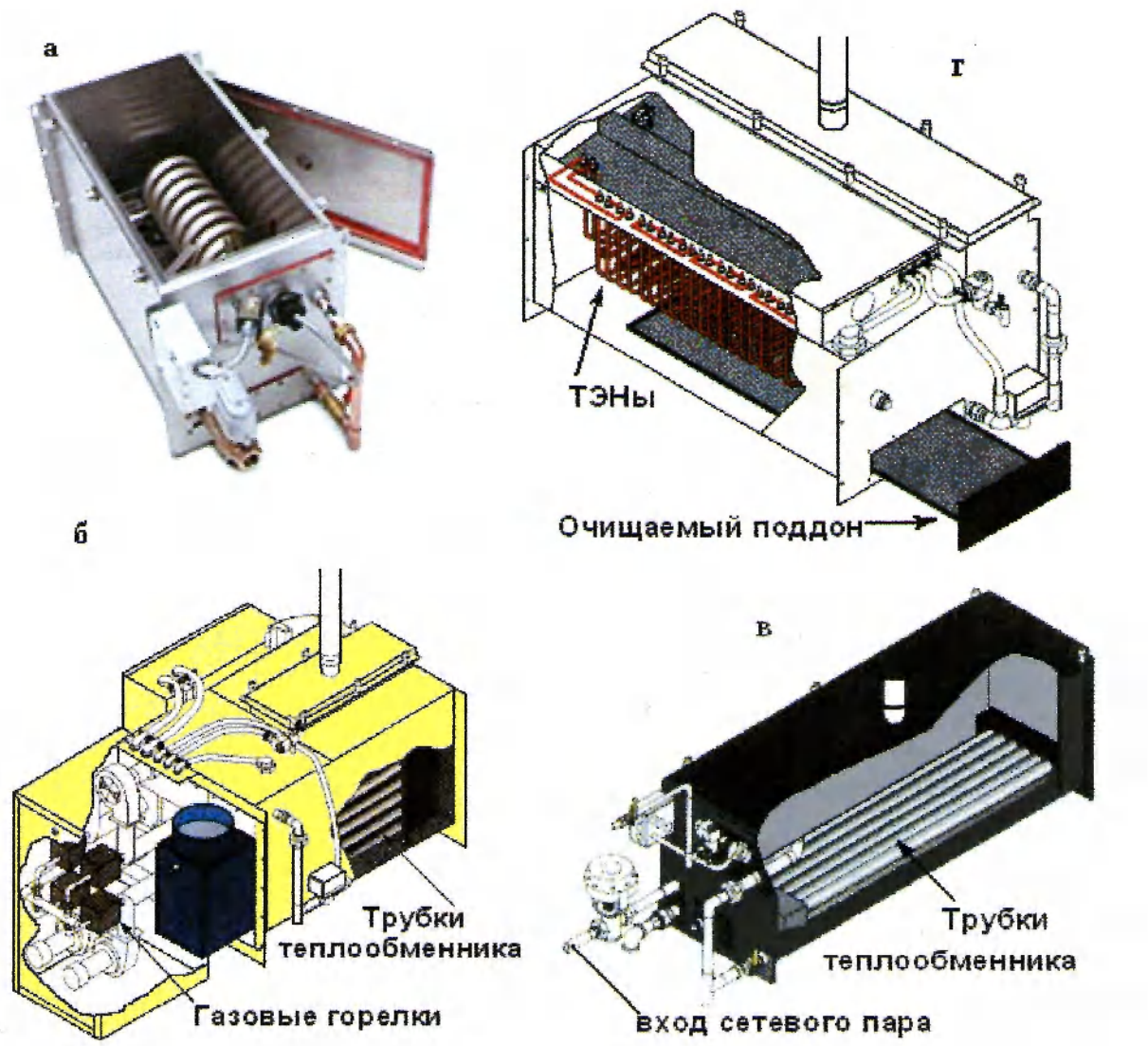
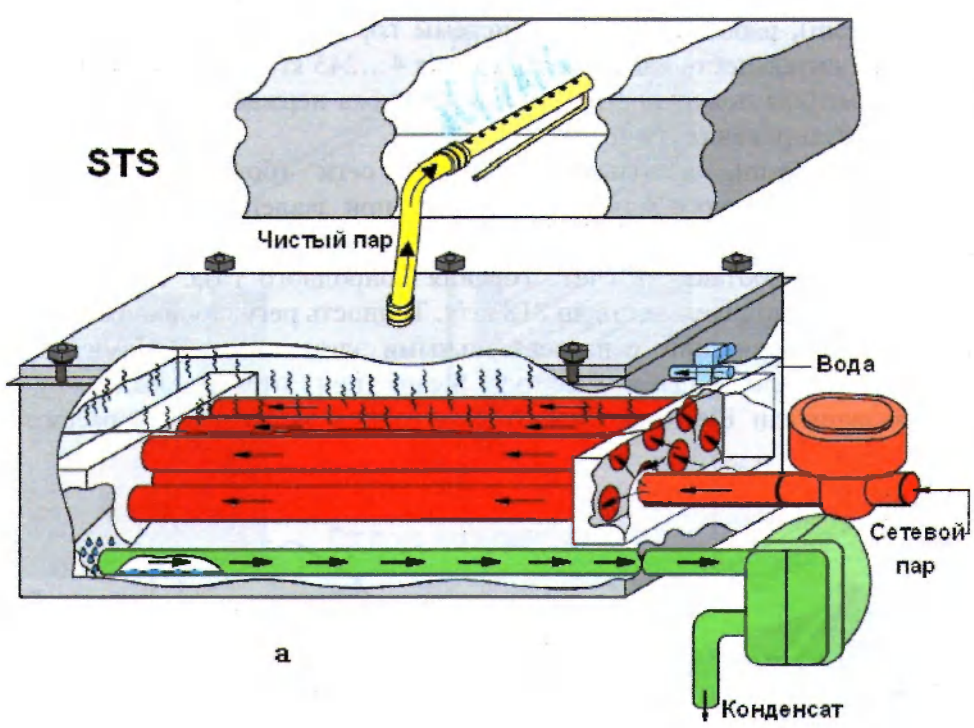
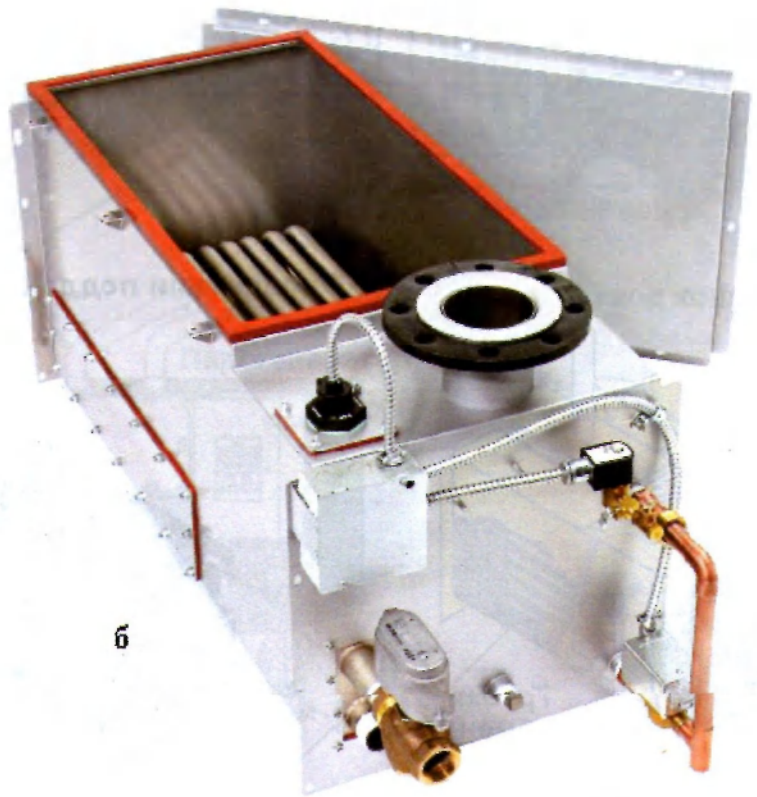


Рис.8.168. Парогенераторы автономных увлажнителей:
LTS – а, GTS – б, STS – в, Electric Steam – г.



а



б

Рис.8.169. Увлажнитель STS (DriSteem): схема (а) и устройство (б).

На рис.8.170 показан газовый увлажнитель GTS компании Nortec (производительность 23…181 кг/ч, мощность 35…140 кВт). Теплообменник выполнен в виде набора пластинчатых галет из нержавеющей стали (поверхность развита по высоте). Газовоздушная смесь для процесса горения создается с помощью воздуходувки и газового клапана. Горелки керамические.

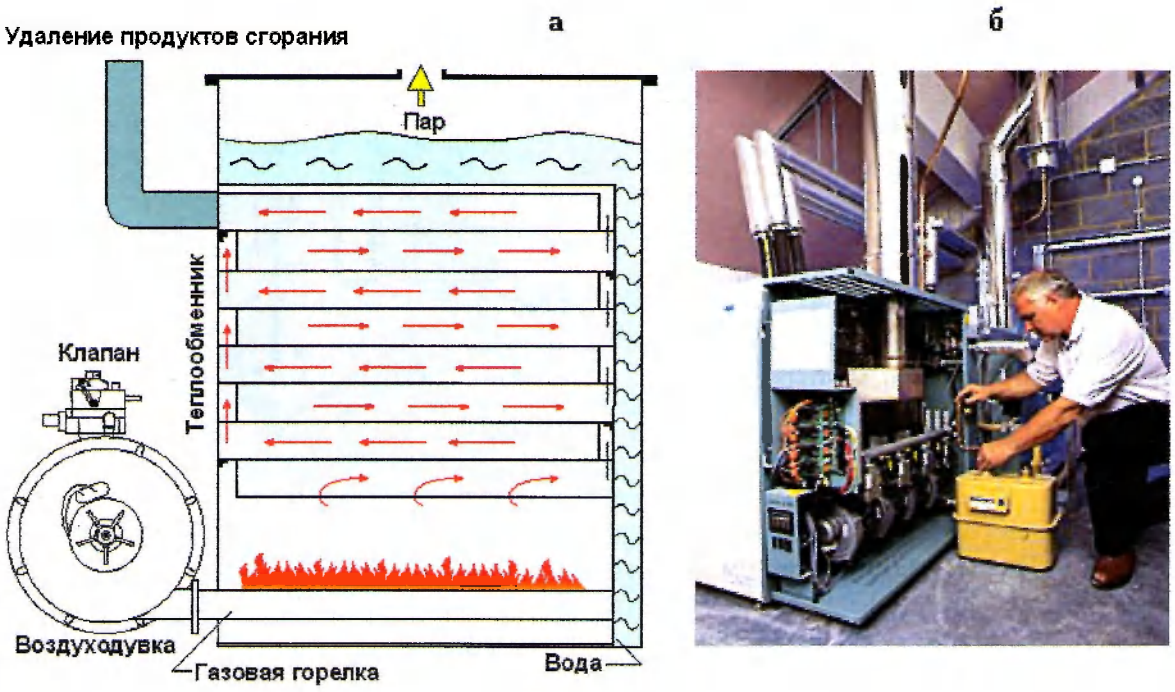


Рис.8.170. Увлажнитель GTS: а – схема работы, б – фотография, выполненная в момент проведения регламентных работ по сервисному обслуживанию.

8.3.3.1. УВЛАЖНИТЕЛИ С ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Электрические увлажнители применяются тогда, когда другие источники энергии недоступны (стоимость электроэнергии наиболее высока), либо когда требуется прецизионная стабилизация φ. Основные преимущества: простота конструкции, безинерционность при регулировании производительности (что дает высокую точность поддержания φ: ± 1 % при деминерализованной воде). Выпускаются различные модели от бытовых приборов (рис.8.171) до мощных промышленных аппаратов (рис.8.172).



Рис.8.171. Увлажнители бытовой серии.



Электрические увлажнители серии SK (Neptronic) – U-образные ТЭНы (трубки из сплава инколой) в алюминиевой емкости (рис.8.172). Производительность 2,7…82 кг/ч (мощность 2…60 кВт). В увлажнителях SK использована оригинальная система антивспенивания AFS (Anti-Foaming Energy Conservation System) (патент США № 6078729), которая с помощью микропроцессора получает информацию от датчиков температуры и объема (емкостного типа), анализирует состояние в емкости и корректирует циклы наполнения и дренажа. При этом обеспечивается безопасный режим работы увлажнителя. Трубка отбора проб, с датчиком температуры внутри, выполняется из нержавеющей стали с тефлоновым антинакипным покрытием.

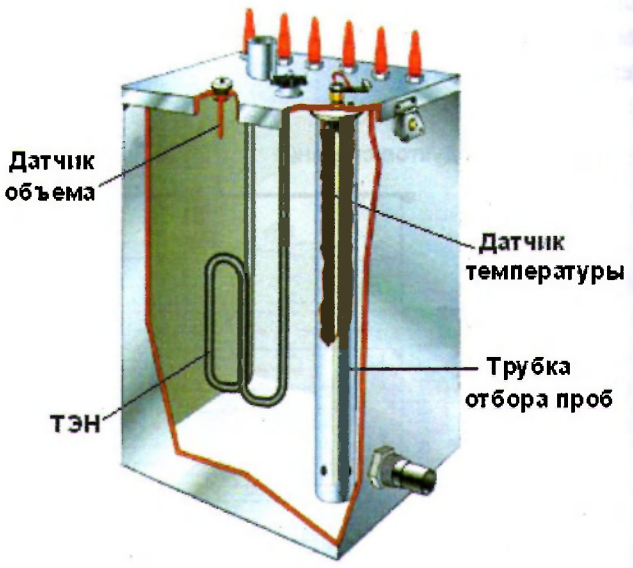


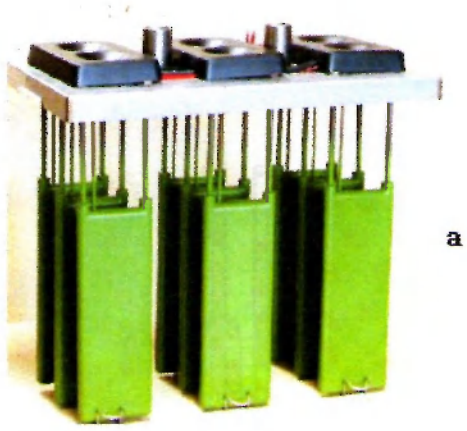
Рис.8.172. Устройство увлажнителей SK.

CAREL heaterSteam

Компания Carel выпускает увлажнители HeaterSteam широкого типоразмерного ряда, производительностью: 2, 4, 6 и 10 кг/ч (мощность 1,8…7,5 кВт, в цилиндрическом корпусе) и 20, 27, 40 и 60 кг/ч (15…22,5 кВт, в прямоугольном корпусе), рис.8.173, 8.174. Водяная емкость (танк) изготовлена из нержавеющей стали. Электрические нагревательные элементы, запрессованные в алюминиевую оболочку, имеют форму кольца либо пластин. В нижней части увлажнителя имеется пластиковый вкладыш для сбора и удаления при чистке солевых отложений, а также съемный водяной фильтр. В некоторых моделях небольшой производительности используется сменный пластиковый вкладыш, предохраняющий от накипи внутреннюю поверхность рабочего цилиндра (рис.8.173). Электронная схема управления позволяет отслеживать образование накипи на поверхности нагревательных элементов и отключать прибор для последующей очистки при достижении определенной толщины слоя. Кроме этого, предусмотрена система предварительного прогрева воды в режиме ожидания “stand-by”. Имеется система AFS. В ряде моделей (full option) внутренняя поверхность водяного танка, а также оболочка нагревательных элементов покрываются тефлоном. В аппаратах большой производительности заложены от 6 до 9 элементов (рис.8.174, 8.175).



Рис.8.173. Увлажнитель HeaterSteam в цилиндрическом корпусе:
1 – электронагревательные пластины; 2 – антинакипный вкладыш;
3 – внешний теплоизолированный цилиндр.



а

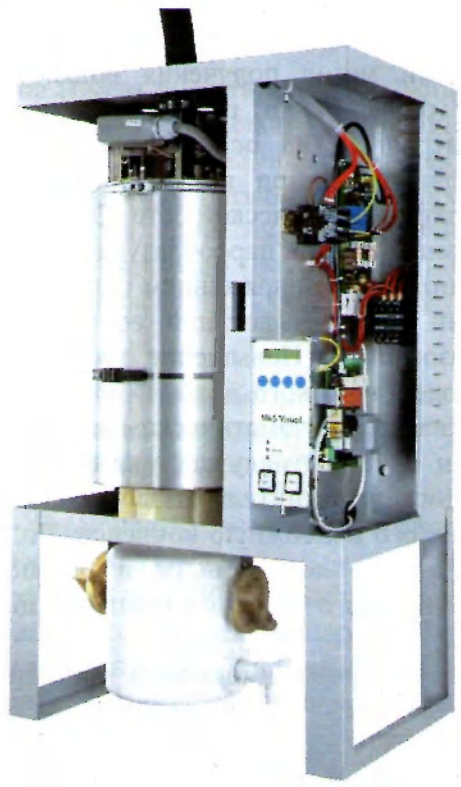


б

Рис.8.174. Блок электронагревательных пластин под прямоугольный корпус, до (а) и после эксплуатации (б).

На рис.8.174б приведена фотография нагревательных пластин после 720 часов эксплуатации с использованием жесткой воды (проводимость 500 мкСм/см), на которой хорошо видно, что алюминиевая оболочка практически не пострадала, а образовавшаяся накипь носит локальный характер.

Цилиндрическая форма водяного танка – используется также в случае больших значений производительности, характерных для центральных СКВ. Компания JS предлагает типоразмерный ряд (11 единиц) увлажнителей Mk5 с выходом пара 5…80 кг/ч (рис.8.175). Основной рабочий цилиндр из нержавеющей стали. Внутренняя поверхность футерована (имеет защитную облицовку) (рис.8.176а), за счет чего солевые отложения не укрупняются, а мелкие камни выпадают вниз в съемную пластмассовую емкость (рис.8.176в). Оболочка ТЭНов, в связи с покрытием части поверхности титановым сплавом (рис.8.176б), приобретает свойства биметалла и самоочищается в цикле нагревание – охлаждение (при отключении аппарата).



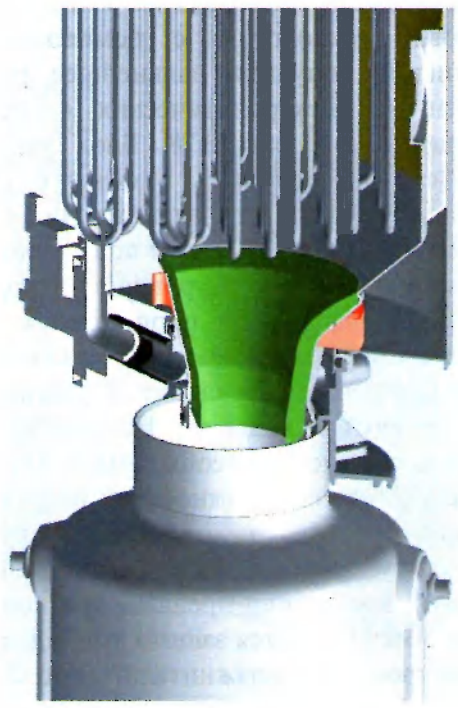
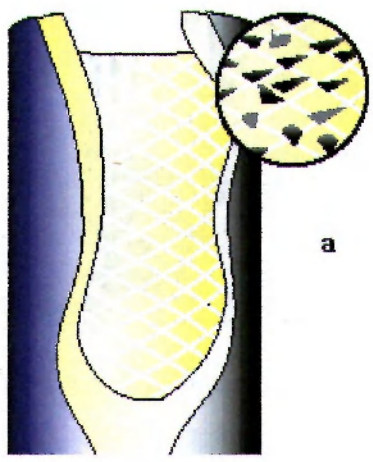


Рис.8.175. Конструкция увлажнителей Mk5.



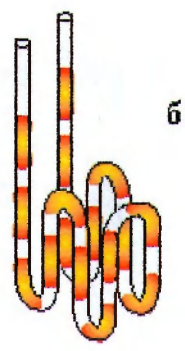




Рис.8.176. Особенности элементов увлажнителей Mk5:
а – рабочий цилиндр с футерованной внутренней поверхностью, б – самоочищающиеся ТЭНы, в – съемная нижняя пластмассовая емкость – сборник минеральных солей.

8.3.3.2. ЭЛЕКТРОДНЫЕ ПАРОУВЛАЖНИТЕЛИ

Электронные аппараты с погружными электродами Electronic Steam Humidifers – передовая технология, с помощью которой преимущества электрического способа увлажнения получили дальнейшее развитие. Данный метод получения водяного пара основан на электролитических свойствах воды (рис.8.177) и реализуется по схеме, приведенной на рис.8.178. Блок управления (контроллер) на основе микропроцессора контролирует влажность в объекте кондиционирования и, при получении сигнала об отклонении заданного значения φ, подключает аппарат к электрической сети. Одновременно с этим в аппарат запускается вода через наполнительный сосуд в парообразующую емкость, пока вода не достигнет уровня электродов, находящихся под напряжением сети. Возникает контакт, и через воду пропускается электрический ток, вызывающий ее нагревание с последующим кипением и интенсивным парообразованием. Повышение уровня воды в электродной части приводит к увеличению силы электрического тока, и соответственно увеличивается выход пара. Подъем уровня осуществляется автоматически до обеспечения производительности, необходимой для стабилизации φ. По сигналу датчика влажности (в случае увеличения влажностной нагрузки в помещении) увлажнитель отключается от сети. Это предотвращает выход пара в воздушный канал и его возможную конденсацию. Схема контролирует концентрацию минеральных солей в рабочем цилиндре и обеспечивает автоматический цикл дренажа при достижении критического значения концентрации, тем самым обеспечивается защита цилиндра от выпадения солей.

Электронные увлажнители способны работать с водой в широком диапазоне ее проводимости: 50…1250 мкСм/см – электроды EN/EL (EN – сменные, EL – очищаемые), 6...50 мкСм/см (деминерализованная вода) – электроды EV.

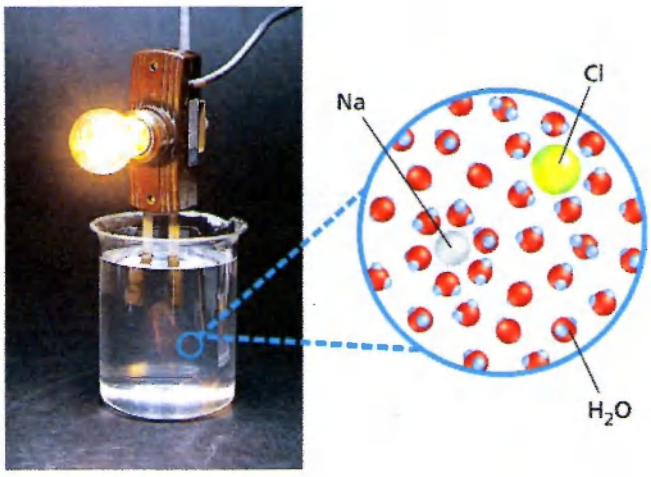


Рис.8.177. Иллюстрация электролитических свойств воды.

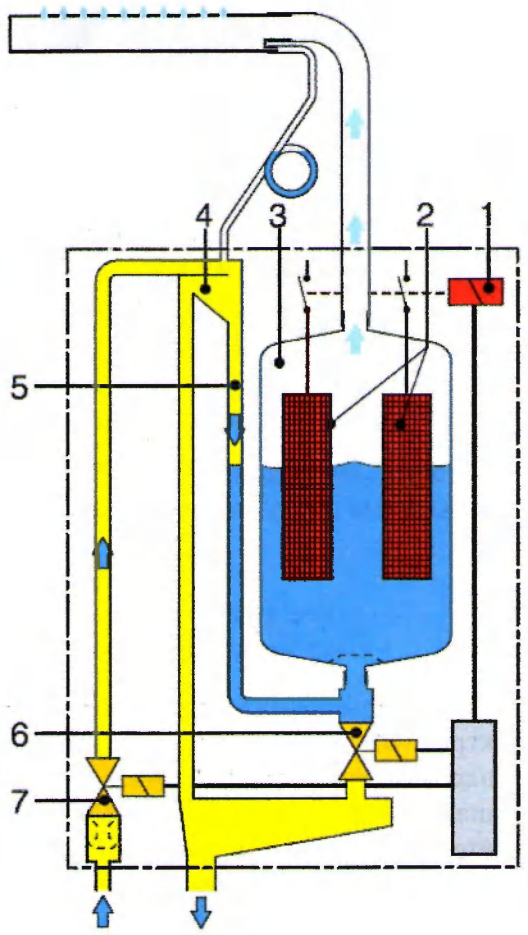


Рис.8.178. Схема электронного увлажнителя:

1 – контактор блока управления;
2 – электроды;
3 – рабочий паровой цилиндр;
4 – чаша контроля уровня;
5 – питательная линия;
6 – клапан и реле дренажа;
7 – клапан и реле подачи воды.

Технология увлажнения воздуха разработана компаниями:

Armstrong (имеет 60-летний опыт), Nortec, JS, Carel и др. В аппаратах серии HumiSteam (Carel) (рис.8.179) применены оцинкованные электроды оригинальной объемной формы с увеличенной поверхностью. В цилиндре размещаются три таких электрода, при их симметричном расположении, аналогично HeaterSteam (см. рис.8.173). Округленная форма уменьшает опасность образования дуги короткого замыкания.



Рис.8.179. Электронный увлажнитель HumiSteam (а) с электродами объемного типа (б).

Для увеличения производительности увлажнители могут набираться из ряда цилиндров (рис.8.180). Максимальную производительность имеют аппараты Vapac (JS), составленные из 7 цилиндров – 420 кг/ч (минимальный выход пара – 4 кг/ч).

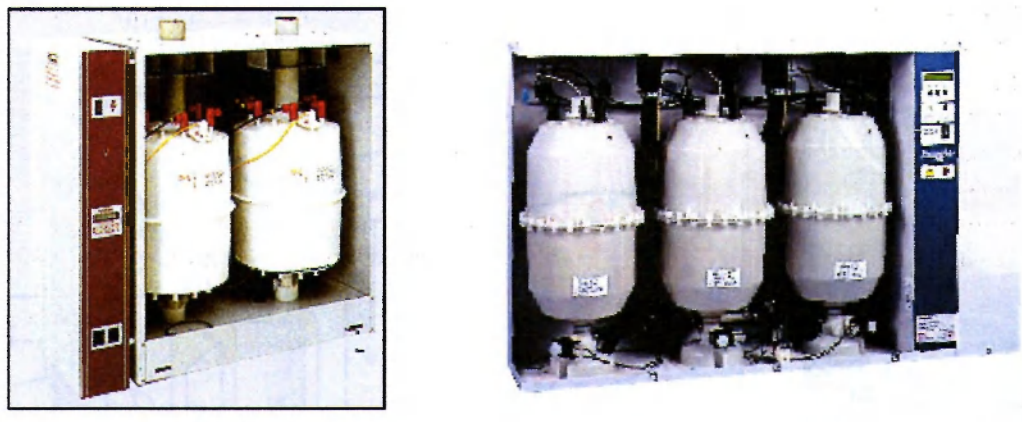


Рис.8.180. Двух- и трехцилиндровые аппараты Vapac.

Паровые цилиндры выпускаются как одноразовыми неразборными (рис.8.180), так и подлежащими обслуживанию в плане периодической очистки, рис.8.181.

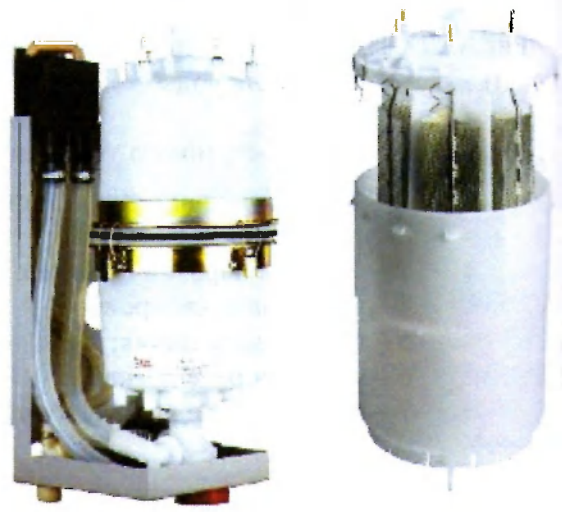


Рис.8.181. Очищаемые (cleanable) многоразовые паровые цилиндры.

Задача повышения ресурса работы цилиндров электродных пароувлажнителей Nortec Ind. Inc. (аппараты серии NH и AT) решена инженерной компанией Nordmann Engineering на уровне запатентованных технологий: автоматической системы контроля содержания солей в воде, содержащейся в рабочем цилиндре Auto-Adaptive Water Control System и системы самоочистки SC-System (Self-cleaning system).

Система Auto-Adaptive Water Control System обеспечивает непрерывный контроль электропроводности воды, являющейся функцией содержания солей, и настроена на рабочий диапазон 112…90 % паропроизводительности аппарата с периодом времени t_o для минимально-необходимого уровня погружения электродов. Величина t_o отвечает оптимальному значению электропроводности и, соответственно, жесткости воды. В случае, когда водопроводная вода, поступающая в паровой цилиндр, имеет меньшую жесткость время выпаривания t_a увеличивается $t_a > t_o$. В процессе работы происходит накопление солей и время цикла уменьшается $t_a < t_o$. Окончание каждого цикла характеризуется понижением уровня воды и сопровождается дренажом, а затем наполнением свежей водой до уровня 112 % производительности (рис.8.182).

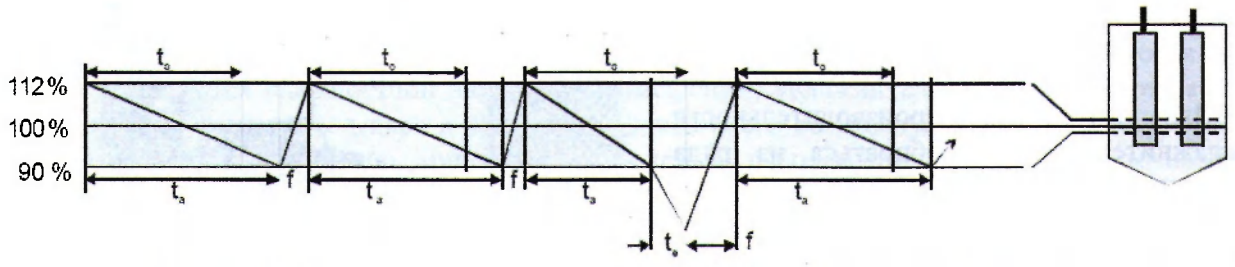


Рис.8.182. Рабочий цикл системы Auto-Adaptive Water Control System.

Со временем поверхность электродов на рабочем участке может зарастать солями. В этом случае уровень воды повышают для перехода на другой вышерасположенный участок электродов.

В качестве опции увлажнителей Nortec (в аппаратах AT 3000 предусмотрена) может быть включена система самоочистки SC-System, по которой организуется ввод воздуха в нижнюю часть парового цилиндра. За счет этого солевые фракции в цилиндре подвижны и, пребывая в состоянии суспензии, легко удаляются при дренаже. На рис.8.183 показано увеличение практически в 2 раза времени жизненного цикла паровых цилиндров при использовании данной системы. Система SC-System эффективна при жесткости воды более 10° DH.

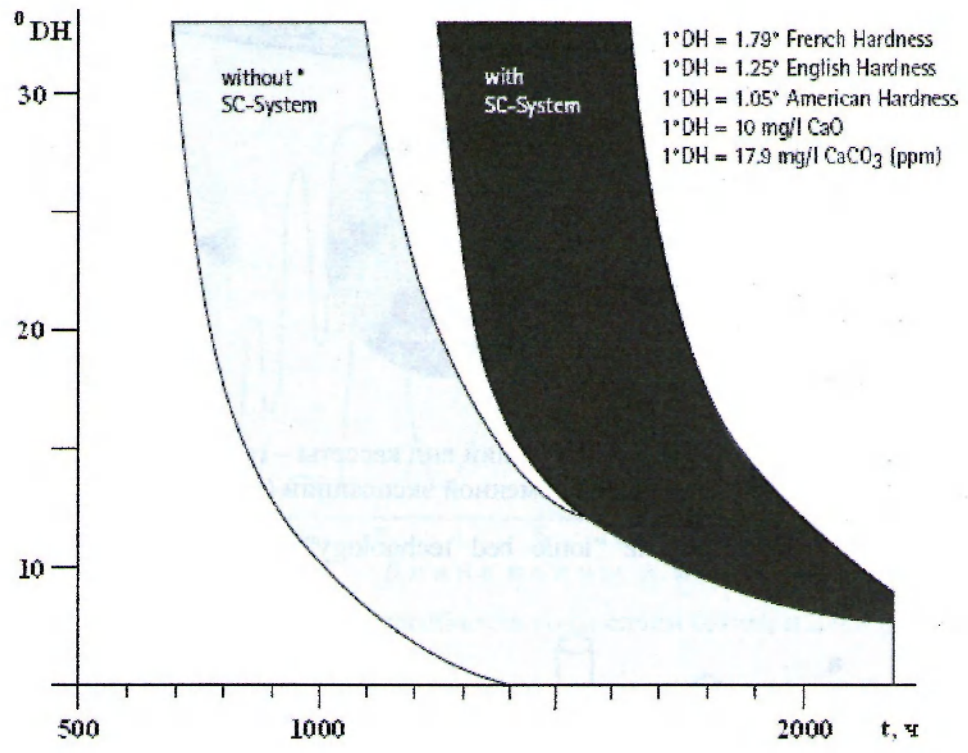


Рис.8.183. Зависимость жизненного срока службы парового цилиндра (t) от жесткости воды времени (DH[1]) при использовании системы SC-System и без нее.

[1]DH – показатель жесткости воды по немецкой шкале (Degree German Hardness)

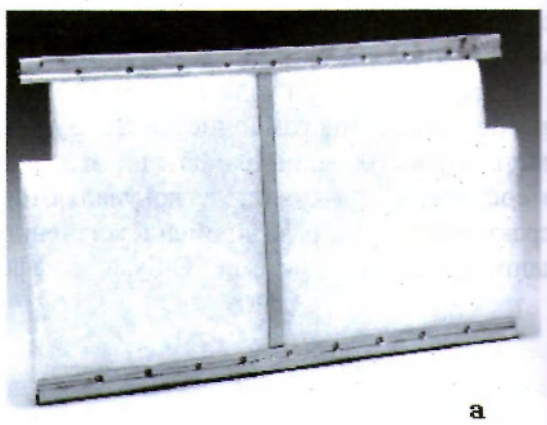
Жесткость воды определяется содержанием в ней солей кальция и магния, а сама вода классифицируется по величине показателя жесткости (табл.8.8).

Таблица 8.8. Классификация воды по жесткости (содержанию солей).

Ти п воды	Содержание солей, ммоль/л	Показатель жесткости, ^{0}DH
мягкая	< 1,3	< 7
средней жесткости	1,3 … 2,5	7…14
жесткая	2,5…3,8	14…21
очень жесткая	> 3,8	> 21

Принципиально иной подход в решении анализируемой задачи продемонстрировала научная группа компании Armstrong, разработав технологию улавливания минеральных солей непосредственно в рабочей емкости – “ionic bed technology”.

С помощью кассет из волокнистого материала “ionic bed” производится поглощение солей воды, тем самым минимизируется их отложение на теплообменной и внутренней поверхности аппарата. При этом удлиняется срок непрерывной работы. Сокращение числа продувок снижает расход воды и энергии на ее подогрев. На рис.8.184 показаны фотоматериалы наращивания солей на волокнах кассет через 400 и 800 часов работы. Новый элемент имеет массу 150…200 г, отработанный – более 1 кг. При полном заполнении кассеты на дисплей выводится сигнал.



а



б

Рис.8.184. Внешний вид кассеты – (а)
и микрофотографии волокон во временной экспозиции (увеличение 52,5×) – (б).

Компания Armstrong оснастила “ionic bed technology” свои газовые и электрические увлажнители (рис.8.185).

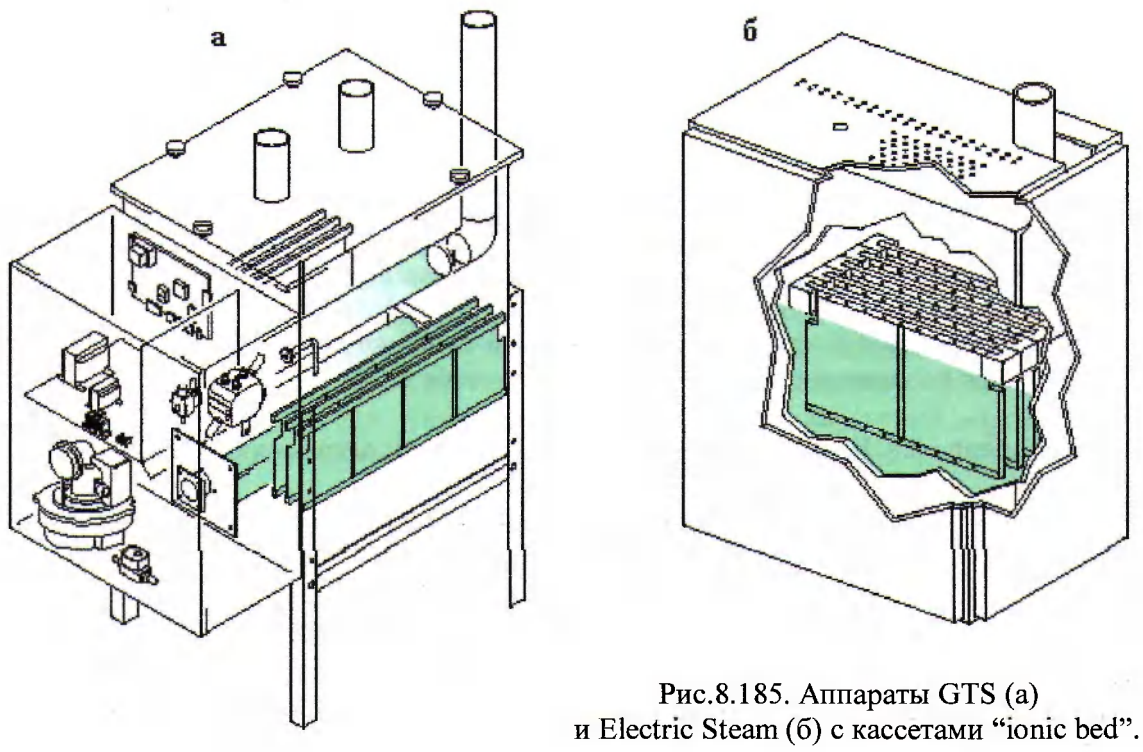


Рис.8.185. Аппараты GTS (а)
и Electric Steam (б) с кассетами “ionic bed”.

8.3.3.3. УВЛАЖНИТЕЛИ С ИНФРАКРАСНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

К паровым увлажнителям также относятся устройства, использующие энергию источника электромагнитного излучения в инфракрасной части спектра для теплового воздействия на поверхностный слой воды и его испарения.

Вода даже в очень тонком слое непрозрачна* для инфракрасных волн с $\lambda > 1$ мкм. Для слоя H_2O в 0,01 мм полосы поглощения соответствуют значениям λ в 1,5, 2, 3, 4,75 и 6 мкм, при этом максимумы приходятся на длину волны в 3 мкм и 6 мкм (данные Кобленца, [30, 191, 266]). С увеличением толщины слоя воды максимумы поглощения несколько смещаются по шкале λ (рис.8.186). Данные по глубине проникновения IR-излучения приведены на рис.8.187.

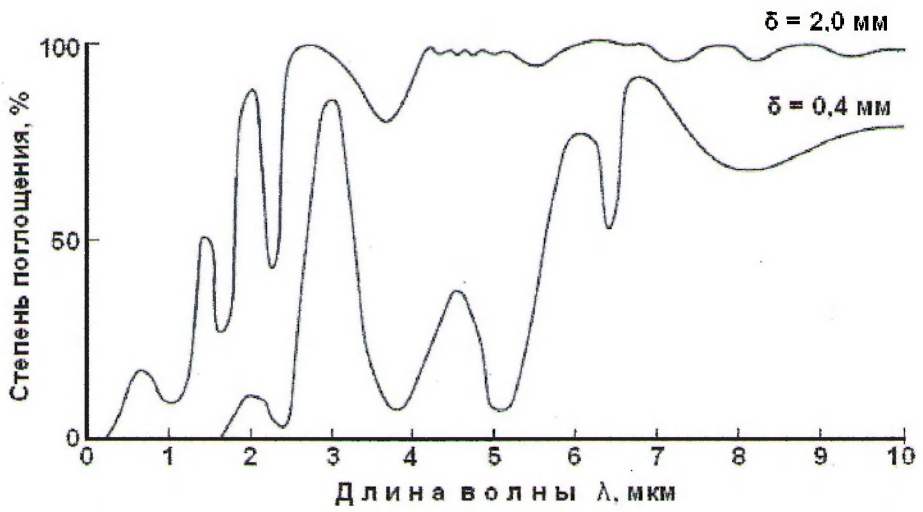


Рис.8.186. Поглотительная способность воды слоем 0,4 мм и 2 мм [193].

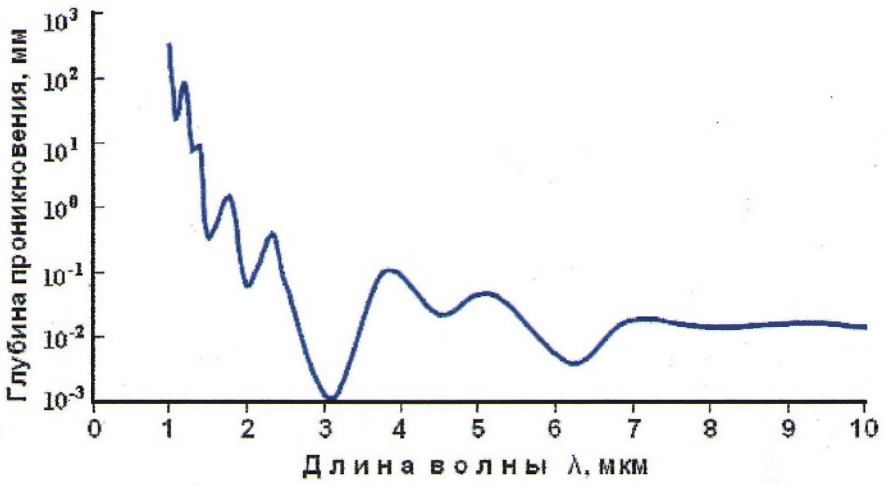


Рис.8.187. Глубина проникновения в слой воды инфракрасного излучения различной длины волны [266].

**поэтому на фотографиях в инфракрасных лучах водная поверхность всегда получается черной. При прохождении света через слой морской воды толщиной в 0,5 м поглощаются только инфракрасные лучи. Видимый свет в цветной последовательности спектра (красный, желтый, зеленый и синий) поглощается на больших глубинах. Синий цвет чистой океанской воды объясняется избирательным поглощением и рассеянием света в воде.*

Инфракрасная область (Infrared (IR), от лат. infra- ниже, под) располагается между границей красного видимого света с длиной волны λ = 780 нм (0,78 мкм) и микроволновым излучением λ = 10000 нм (10 мкм), рис.8.188.



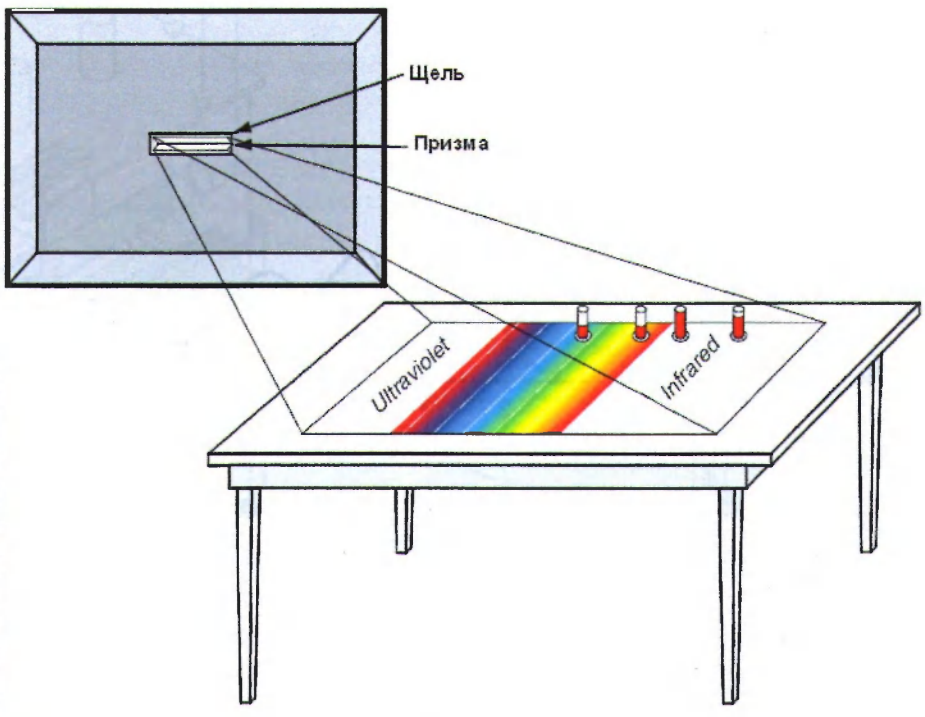
Рис.8.188. Область видимого света и смежные участки инфракрасного и ультрафиолетового излучения (стандарт International Electricity Committee, 1987).

Открыл инфракрасные лучи английский астроном сэр Фредерик Вильям Гершель, который в затемненной лаборатории закрыл окно деревянной панелью с узкой щелью для прохода солнечного света. В щель была помещена призма для разделения света на цвета спектра. Ф.В. Гершель поставил перед собой цель определить теплосодержание светового потока каждого цвета, для чего он установил термометры с зачерненными колбами (рис.8.189). К удивлению ученого, термометр за полосой красного цвета показал существенное приращение температуры.

В своем сообщении Королевскому Научному Обществу (2 марта 1980 г.) Ф.В. Гершель сказал:

". . . the radiant heat from the sun will at least partly consist
– if I may be permitted the expression – of invisible light…"

«…теплота солнечной радиации, по крайней мере, частично состоит из *теплоты*,
если мне будет позволено это выражение, *невидимых лучей*".



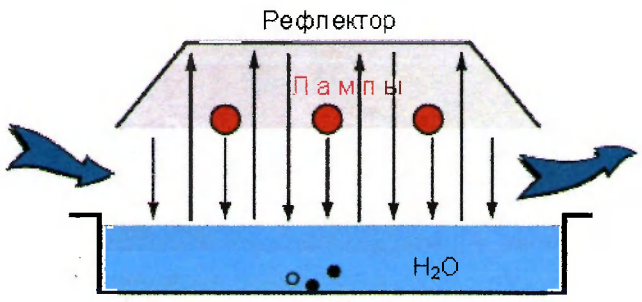
15.11.1738 – 25.08.1822



Sir Frederik William Herschel

Рис.8.189. Опыт Гершеля [192].

Увлажнители имеют простое устройство (рис.8.190). Над кюветой с водой располагаются кварцевые галогенные лампы, являющиеся источником инфракрасного излучения. Сверху ламп установлены рефлекторы, концентрирующие лучистый поток на водную поверхность.



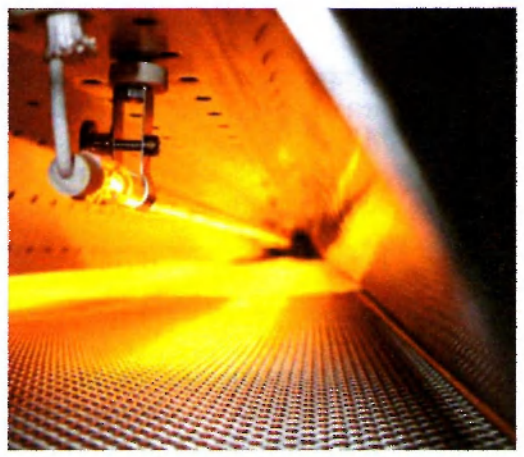


Рис.8.190. Схема устройства увлажнителя с инфракрасными излучателями.

Лампа представляют собой трубку из кварцевого стекла, в которой по центральной оси размещается жаропрочная вольфрамовая спираль. Трубка заполнена инертным газом (ксенон, криптон, аргон, азот или смесь: Kr-Ar, Ar-N_2) с добавлением галогена 0,1…1,0 % (йод, бром, либо их соединения: CH_3I, HBr, CH_3Br, CH_2Br_2). В процессе работы при разогреве спирали до температуры t = 2200…2600 °C вольфрам частично испаряется и вблизи стенки колбы при t < 1100 °C соединяется с молекулами галогена, например йода. При этом образуется неустойчивое химическое соединение – йодистый вольфрам WI_2, которое распадается с перемещением в зону горячей спирали, а вольфрам восстанавливается на спирали. Таким образом, обеспечивается вольфрамово-галогенный цикл[1] без оседания вольфрама на внутреннюю стенку трубки и, соответственно, без потемнения лампы и уменьшения светового потока. Чистый кварц прозрачен для излучений с длиной волны менее 3,8 мкм. При больших значениях λ прозрачность резко уменьшается и при 5 мкм она уже очень мала (рис.8.191).

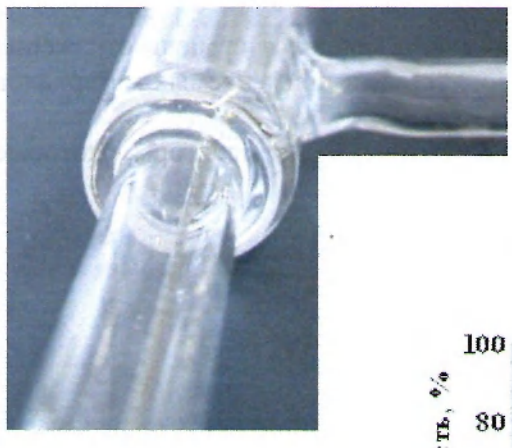
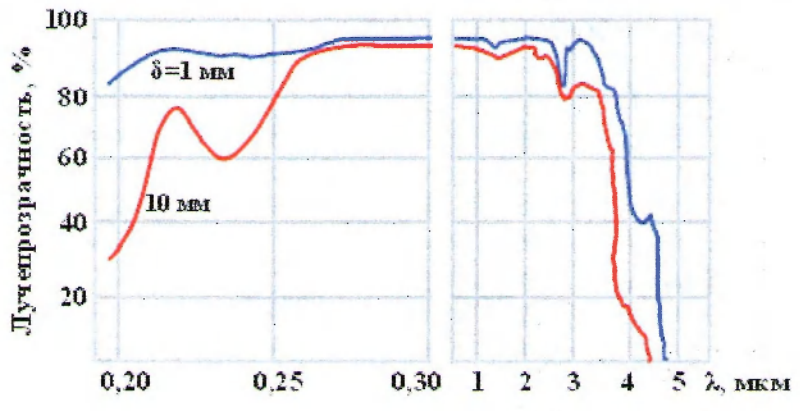


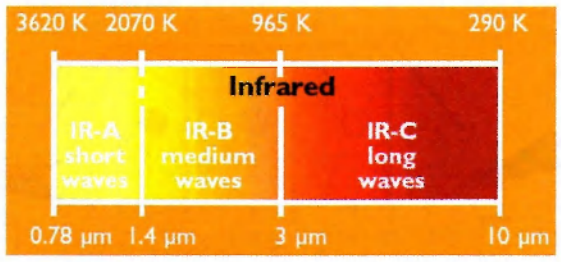
Рис.8.191. Прозрачность[2] кварцевого стекла.

[2] информация компании Heraeus Noblelight

[1]Следует иметь в виду, что вольфрамово-галогенный цикл сам по себе приводит лишь к предотвращению потемнения колбы, но не к увеличению срока службы, поскольку вольфрам восстанавливается на спирали, но уже на новом месте. Лампа, со временем, прейдет в негодность в результате разрыва спирали на истонченных участках. Однако, этот цикл, в сочетании с увеличением давления в колбе до 7…8 атм, способствующим снижению степени испарения вольфрама, обеспечивает больший ресурс работы ламп.



Спектр излучения кварцевых галогенных ламп складывается из спектров излучения вольфрама при температуре 2200 °С, кварца при 500 °С и йода (в видимой части спектра). Более 90 % электромагнитного излучения лампы обеспечивается волнами с λ = 0,77…3,8 мкм [45], рис.8.192.



Основные закономерности радиационного теплообмена описываются соотношениями 8.18 и 8.19, известными как закон Стефана-Больцмана и закон смещения Вина, соответственно:

$$E = \varepsilon \sigma T^4, \qquad (8.18)$$

$$\lambda_{max} - 2898/T, \qquad (8.19)$$

где E [Вт/м^2] – плотность потока интегрального излучения на единицу площади поверхности эмиттера; ε, T [K] – излучательная способность (степень черноты) и температура эмиттера; λ_{max} [мкм] – длина волны, при которой достигается максимум излучения черного тела с температурой T; σ = 5,67·10^{-8} Вт/(м^2 К^4) – постоянная Стефана-Больцмана.

Для воды ε = 0,93.

Наглядной иллюстрацией этих законов является рис.8.192.

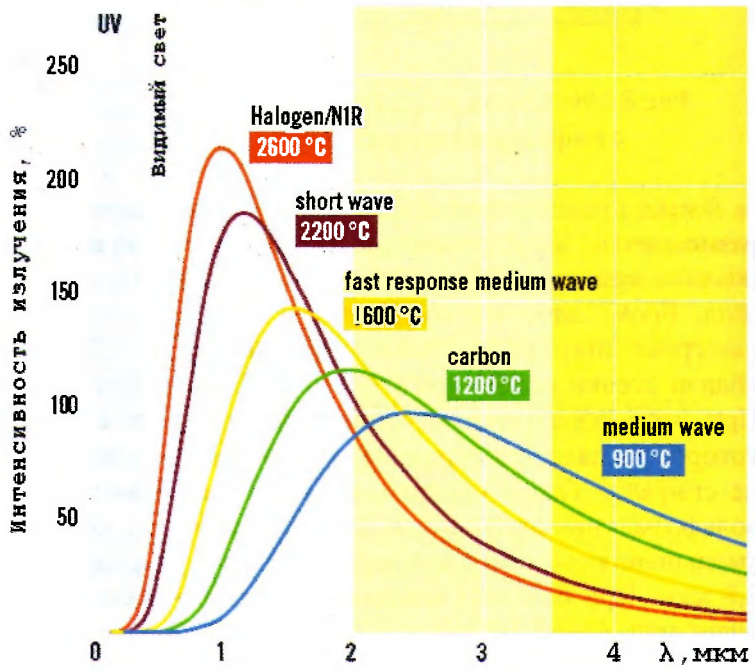


Рис.8.192. Спектральная интенсивность теплового излучения различных инфракрасных ламп [191].

Эффективность работы увлажнителя в значительной мере зависит от степени отражения IR-лучей рефлектором, что определятся его формой и свойствами применяемых материалов (рис.8.193…8.195).

В отношении формы: наиболее эффективны параболические рефлекторы, которые отражают до 86 % лучистого потока.

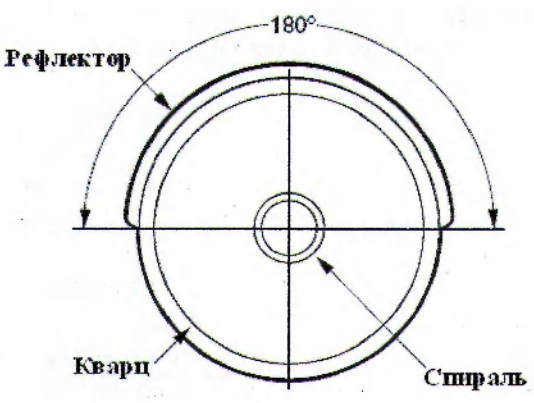
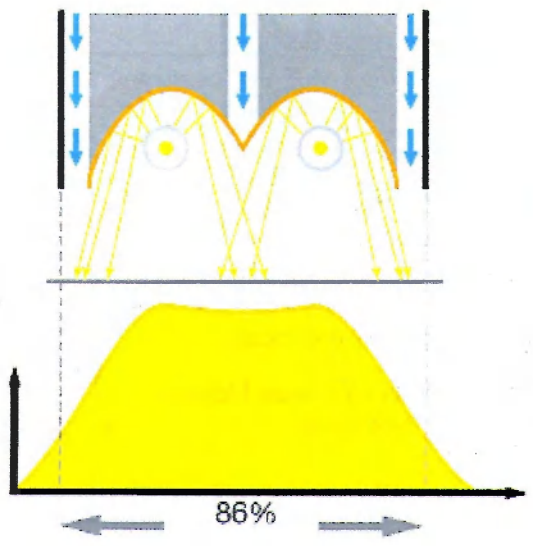


Рис.8.193. Схема IR-излучателя с параболическим рефлектором.



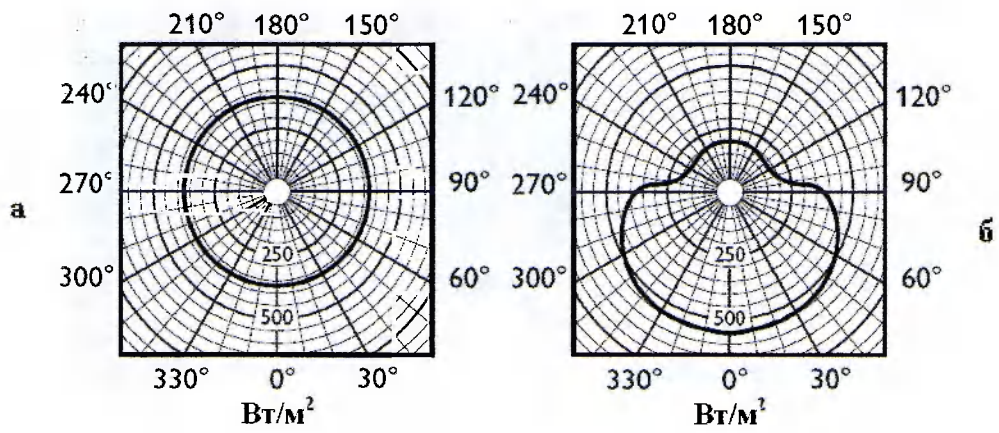


Рис.8.194. Эпюры распределения интенсивности лучистой энергии излучателя Phillips мощностью 1кВт без рефлектора (а) и с его применением (б).

На рис.8.195 представлены данные по эффективности рефлекторов из различных металлов. Наибольшей эффективностью E = 98 % обладает золото (Au), а также алюминий (Al). Причем для золота этот показатель стабилен не только в области средних волн (как в случае Al), но и в коротковолновом диапазоне IR-излучения.

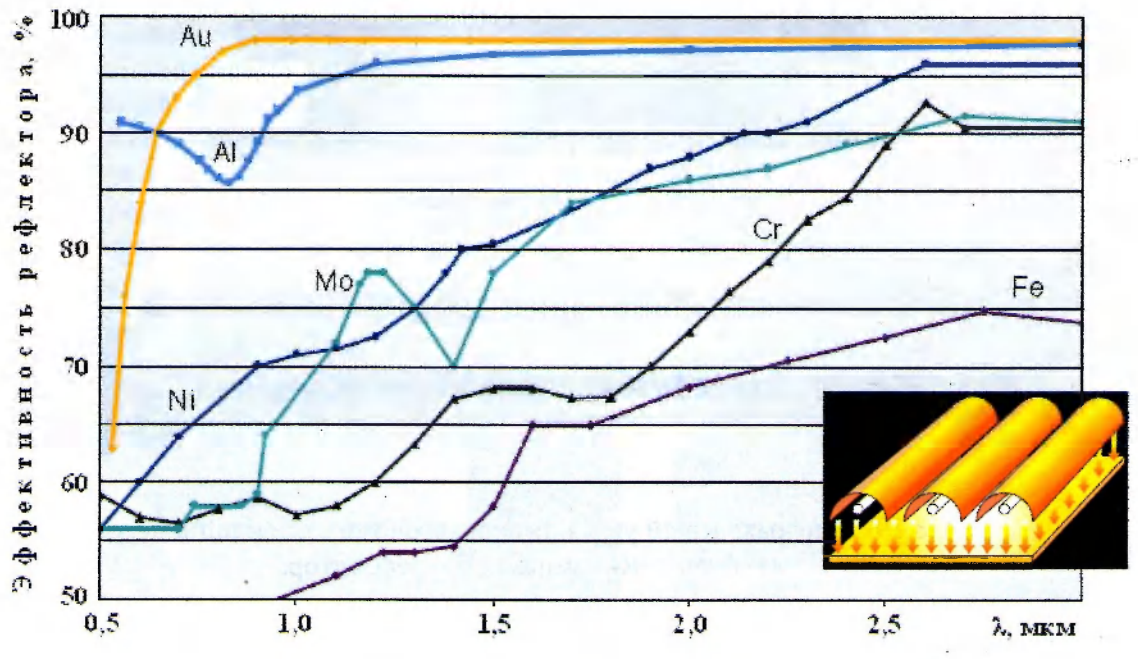


Рис.8.195. Эффективность отражения IR-лучей металлами [192].

Паровые увлажнители с инфракрасными излучателями более 30 лет выпускаются Домодедовским заводом кондиционеров (преобразовано в ОАО ДоКон, РФ) для автономных промышленных кондиционеров. Первое поколение терморадиационных увлажнителей УТ с кварцевыми галогенными лампами КГ-220-1000 (220 В, 1000 Вт) производительностью по влаге 2,2…10 кг/ч [107] в настоящее время заменено новым типоразмерным рядом увлажнителей УВВ (УВВП) (3, 6, 11,3, 14,5 и 29 кг/ч), работающих от трехфазной электрической сети (380 В, 50 Гц). Аппараты представляют собой набор унифицированных секций, состоящих из кюветы для воды и 2-х…3-х ламп. Эти секции образуют вертикальную батарею (до 4-х ярусов), встраиваемую в автономные кондиционеры (рис.8.196).

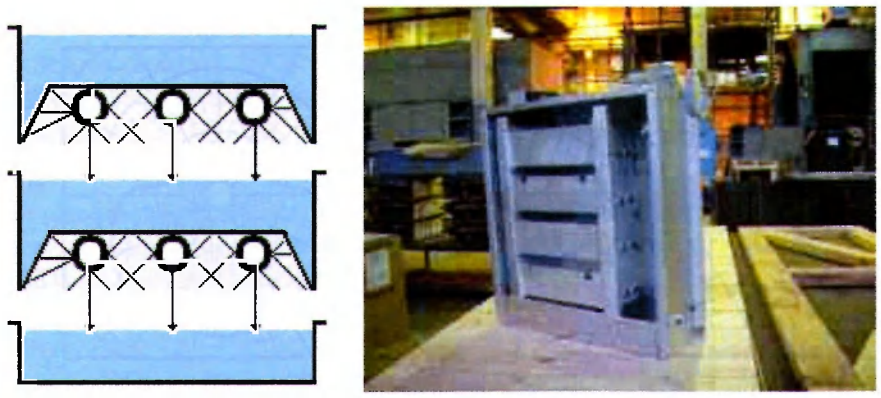


Рис.8.196. Схема и фотография увлажнителей УВВ.

Инфракрасные увлажнители применяются также в прецизионных автономных кондиционерах компании Emerson Network Power (до 2007 г. – Liebert), рис.8.197…8.201.

Производительность увлажнителей 5, 7,9 и 10 кг/ч. В качестве излучателей применены кварцевые инфракрасные лампы компании Филлипс: 1600T3/CL (мощностью 1,6 кВт), 3200T3/CL (3,2 кВт) либо 3800T3/CL/UB (3,8 кВт). Лампа – прямая трубка из кварцевого стекла диаметром 9,5 мм и длиной 503 (1062) мм, рис.8.198.

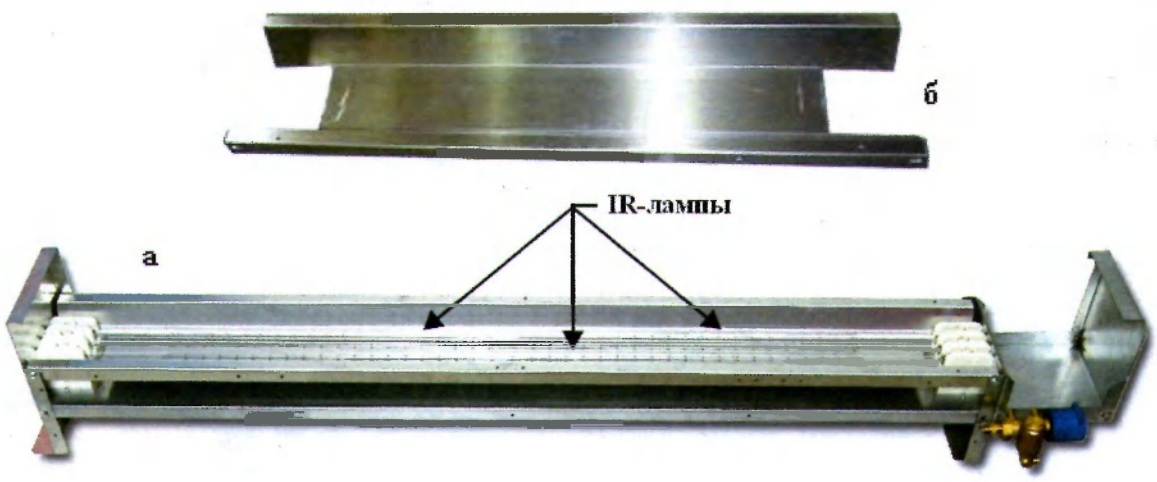


Рис.8.197. Инфракрасный увлажнитель автономных кондиционеров:
а – блок с IR- лампами; б – рефлектор.

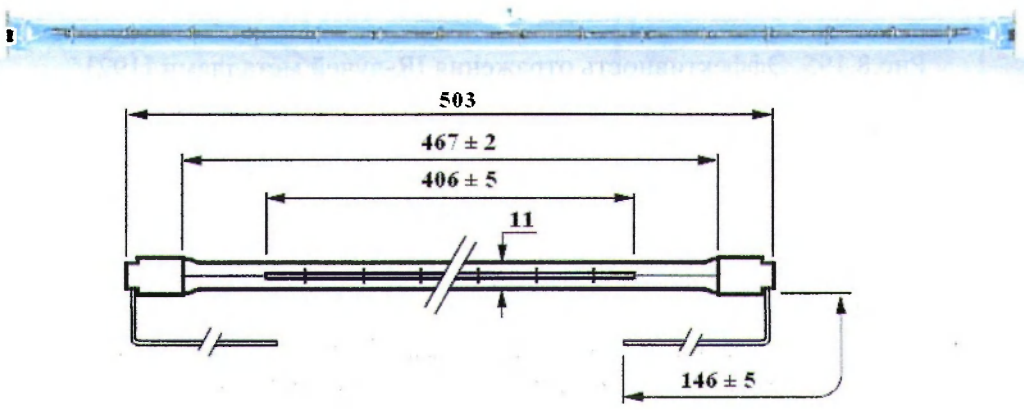


Рис.8.198. Инфракрасная лампа Phillips –1600T3/CL (I/R LINEAR /QRTZ).

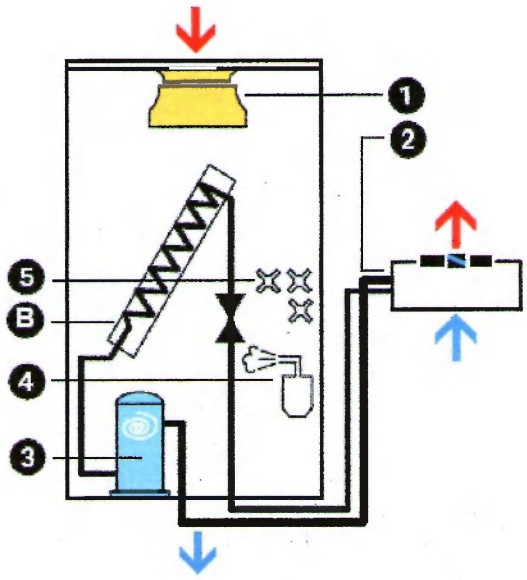
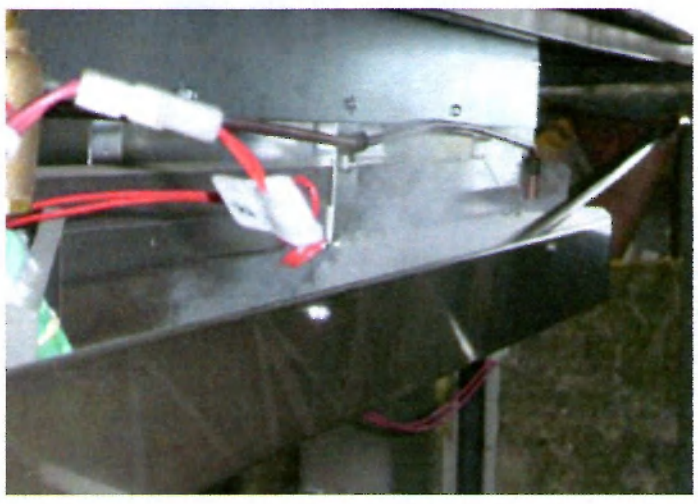


Рис.8.199. Схема кондиционера Liebert DS:
1 – вентилятор; 2 – выносной воздушный конденсатор; 3 – холодильный компрессор; 4 – увлажнитель; 5 – ТЭН; В – воздухоохладитель.

К достоинствам увлажнителей данного типа можно отнести быстродействие (при включении выходит на рабочий режим за 5-6 с), отсутствие прямого контакта между поверхностью ламп и водой, а также то, что соли, содержащиеся в воде, не уносятся в увлажняемый поток воздуха, а выпадают в виде осадка на дно кюветы.

Увлажнители снабжены автоматической системой AutoFlush System наполнения водой, поддержания необходимого уровня воды, а также периодической промывки рабочей емкости. Если увлажнитель не использовался более суток (30 ч), то перед рабочим циклом включается режим промывки в течение 4 мин (при полном заполнении емкости за 15 с). В рабочем режиме через каждые 9,5 мин добавляется 5-кратный объем воды для смыва твердых частиц соли со дна кюветы и солевых хлопьев, образующихся на поверхности воды при ее интенсивном испарении. Солевые хлопья ухудшают процесс увлажнения, поскольку уменьшают площадь зеркала воды, воспринимающего инфракрасные лучи.


а

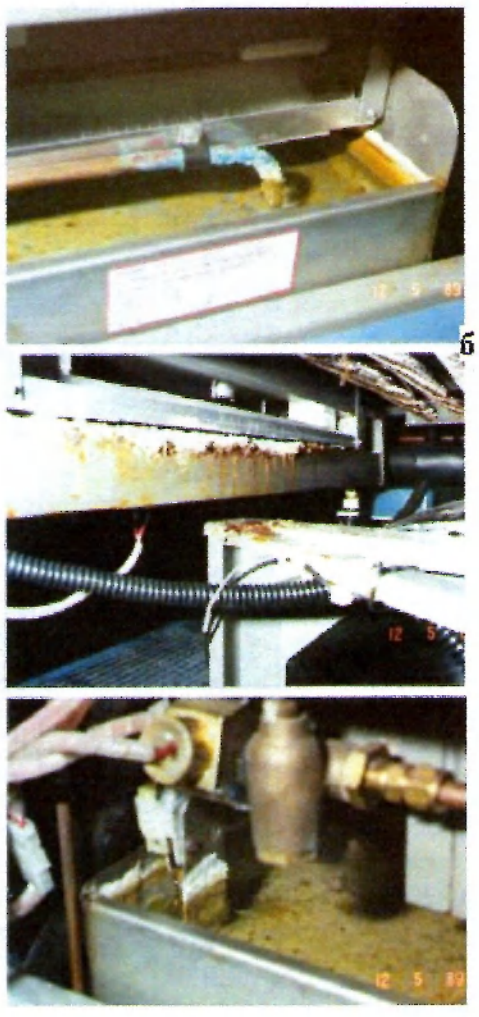
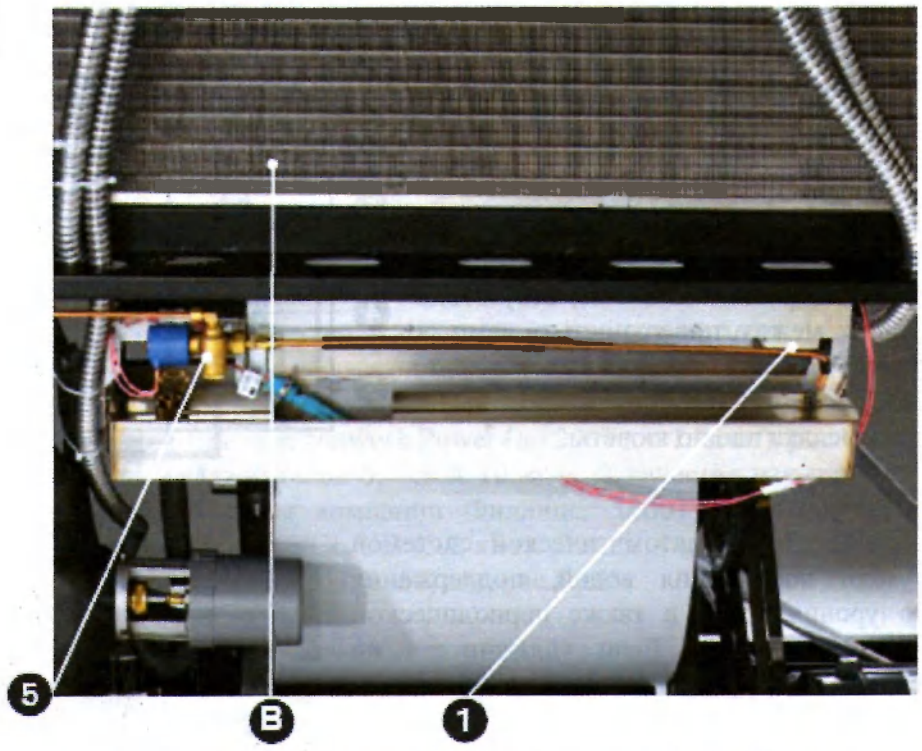

б

Рис.8.200. Фотографии увлажнителя Liebert DS в рабочем состоянии (а) и ревизии после длительной эксплуатации (б).

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)



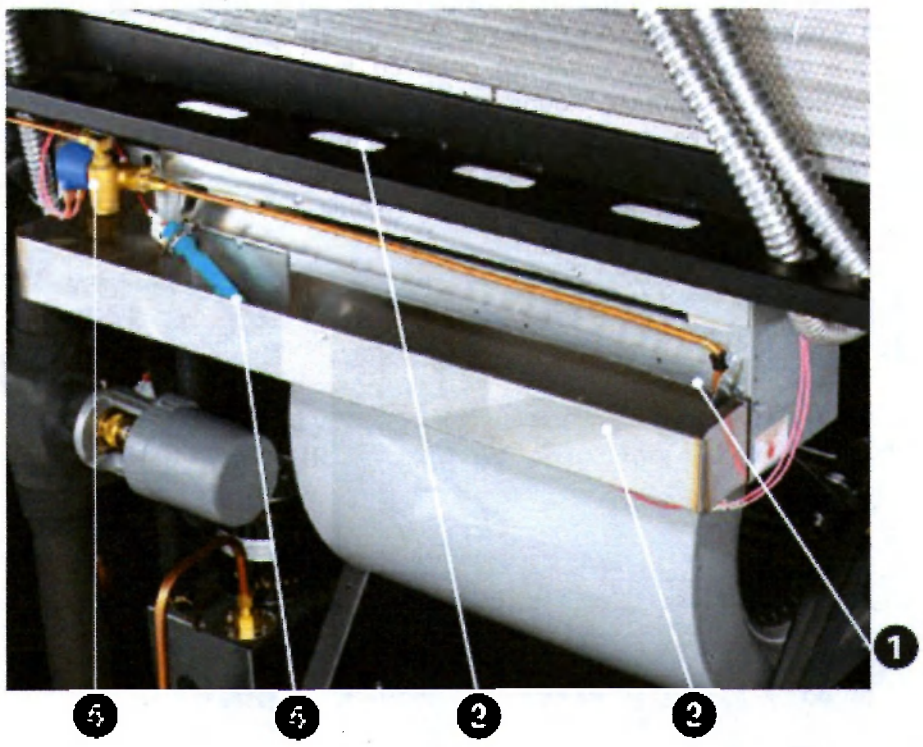


Рис.8.201. Автономные кондиционеры серии Liebert DS (Downflow Model) [215]:
1 – блок с lR- лампами; 2 – водный резервуар (кювета); 3 – обводной воздушный канал (байпас); 4 – поплавковый регулятор уровня; 5 – водяной клапан; В – воздухоохладитель.

Как уже упоминалось, данные увлажнители являются составной частью прецизионных кондиционеров Liebert DS, специально разработанных для информационно-вычислительных центров (ИВЦ). Для этих объектов характерна значительная тепловая нагрузка основного оборудования q ≈ 800 Вт/м^2 с долей явной теплоты SHR = 0,9…1,0 (для офисных помещений q ≈ 160 Вт/м^2, SHR = 0,6…0,7), рис.8.202. При снятии избыточной теплоты в условиях неравномерной тепловой нагрузки помещения ИВЦ (рис.8.203) относительная влажность воздуха может упасть до значений φ < 35…30 %, благоприятствующих накоплению электростатического заряда, опасного для электронной аппаратуры (см. с. 315).

По сценарию распределения тепловой нагрузки ИВЦ, представленному на рис.8.203, часть оборудования центра отключена и, соответственно, установки (Liebert) 3 и 4 не работают, а установки 1, 2 и 5 функционируют в режиме охлаждения и увлажнения (установка 6 – только охлаждение).

Увлажнители обеспечивают необходимый влажностный режим φ = 45…50 % с точностью ± 5 %, при этом их режим работы – дискретный, а нагрузка относительно невелика (до 10 кг/ч).

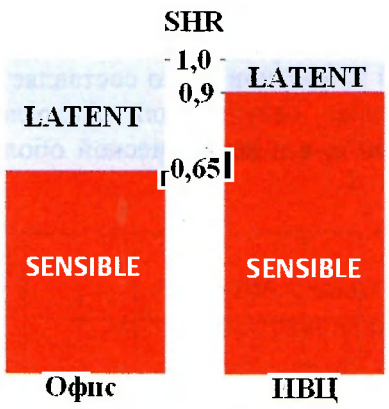
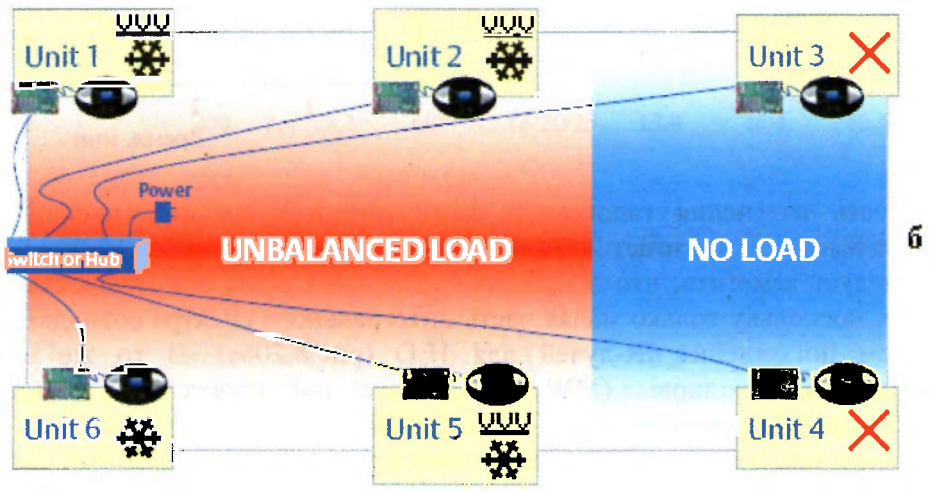


Рис.8.202. Величина SHR для ИВЦ и офисных помещений.



а



б

Рис.8.203. Помещение ИВЦ (а) и вариант возможного распределения тепловой нагрузки (б).

Увлажнитель установлен на байпасной линии по воздушному потоку в обход воздухоохладителя (рис.8.201). Такое конструктивное решение продиктовано тем, что при t = 24 °С и φ = 45 % ассимиляционная способность воздуха по влаге более чем в 5 раз выше, чем при t = 14 °С и φ = 80 % после воздухоохладителя, рис.8.204.

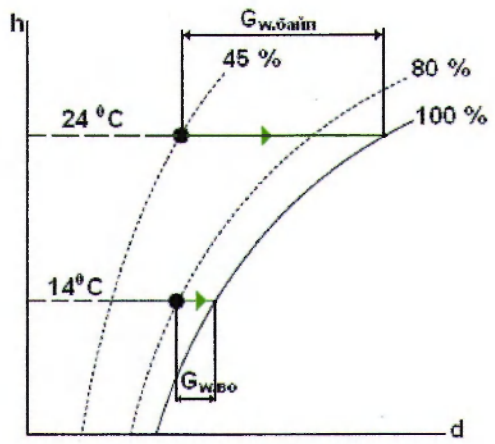


Рис.8.204. Потенциал увлажнения воздуха на линии байпаса $G_{w.байп}$ и после воздухоохладителя $G_{w.во}$.

Высокое быстродействие (практически безинерционность), как и значительная интенсивность IR-излучения – главные факторы, определившие использование галогенных коротковолновых (SW-short wave) ламп в качестве излучателей в действующих моделях инфракрасных увлажнителей.

Время разгона до теплового воздействия с максимальной эффективностью составляет для галогенных ламп с вольфрамовой проволокой несколько секунд, для фехралевых излучателей (сплав Fe-Cr-Al) в кварцевых трубках – 30…60 с, а в керамической оболочке (IR-ТЭНы) – более 5 мин (рис.8.205).

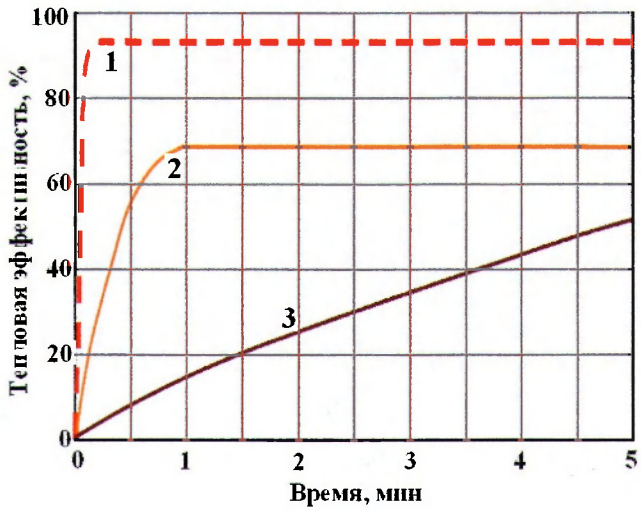


Рис.8.205. Динамические характеристики излучателей:
I – галогенные лампы;
2 – кварцевые лампы;
3 – IR-ТЭНы.

данные компании Toshiba

Интенсивность излучения галогенных ламп определяется их удельной мощностью, которая весьма высока и достигает 200 кВт/м^2 на единицу поверхности эмиттера.

Однако, следует заметить, что в процессе испарения воды эта мощность используется неэффективно, поскольку только малая часть интегрального спектра совпадает с известным распределением поглощения IR-лучей для H_2O (рис.8.206а). В то же время, спектр, характерный для средневолновых (MW-medium wave) ламп практически идеально подходит для проведения процесса испарения воды (рис.8.206б).

Это преимущество, сегодня, легко реализуемо с помощью современных средневолновых излучателей. Их показатели, в т.ч. и время разгона, приближены к рабочим характеристикам галогенных ламп, а распределение IR-лучей по полосам поглощения H_2O имеет лучшее наполнение (табл.8.9). По сообщениям компании Heraeus Noblelight углеродные излучатели способны повысить эффективность процесса выпаривания воды по отношению к обычным галогенным лампам на 200 % и снизить затраты энергии на 70 %.

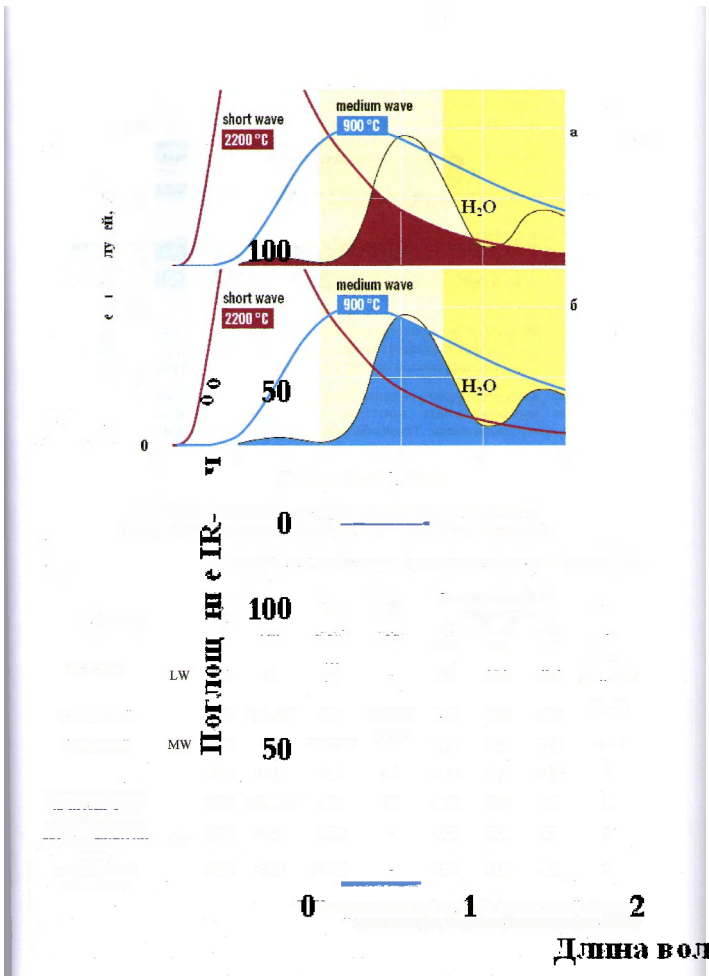


Рис.8.206. Сопоставление эффективности поглощения водой спектра коротковолновых (а) и средневолновых IR-эмиттеров (б).

Таблица 8.9. Рабочие характеристики различных IR-эмиттеров.

Эмиттер		°C	λ_{max}, мкм	E_{max}, кВт/м²	E_L, Вт/см	Распределение E, % по полосам λ			τ, с
						< 2 мкм	2…4 мкм	> 4 мкм	
IR-ТЭНы,		600	4	40[1] 60[2]	-	**2,2**	**37,2**	**60,6**	60…180[1] 300…480[2]
Стандартный		900	2,4…2,7	60*	18/20/25	**13,0**	**46,4**	**40,6**	60…90
Углеродный		1200	2,0	100/150*	40/70*	**26,1**	**46,9**	**27,0**	1…2
		1600	> 1,4	150	80	**43,2**	**40,1**	**16,7**	1
Галогенная лампа стандартная Т-3		2200	1,2…1,4	200	70	**62,5**	**28,7**	**8,8**	1
Галогенная лампа для IR-A диапазона тоже, с повышенной мощностью	SW	2700	< 1,4	1000	-	**73,3**	**21,0**	**5,7**	1
		3000	< 1,4	>1000	-	**77,9**	**17,6**	**4,5**	1

[1]ТЭНы в металлической трубе, [2]в керамической оболочке
* сдвоенные (двухтрубные) эмиттеры (рис.8.207)

В табл. 8.9 приведены данные по линейной интенсивности IR-излучения применяемых эмиттеров (мощность излучения на единицу длины), которая определяет компактность увлажнителя.

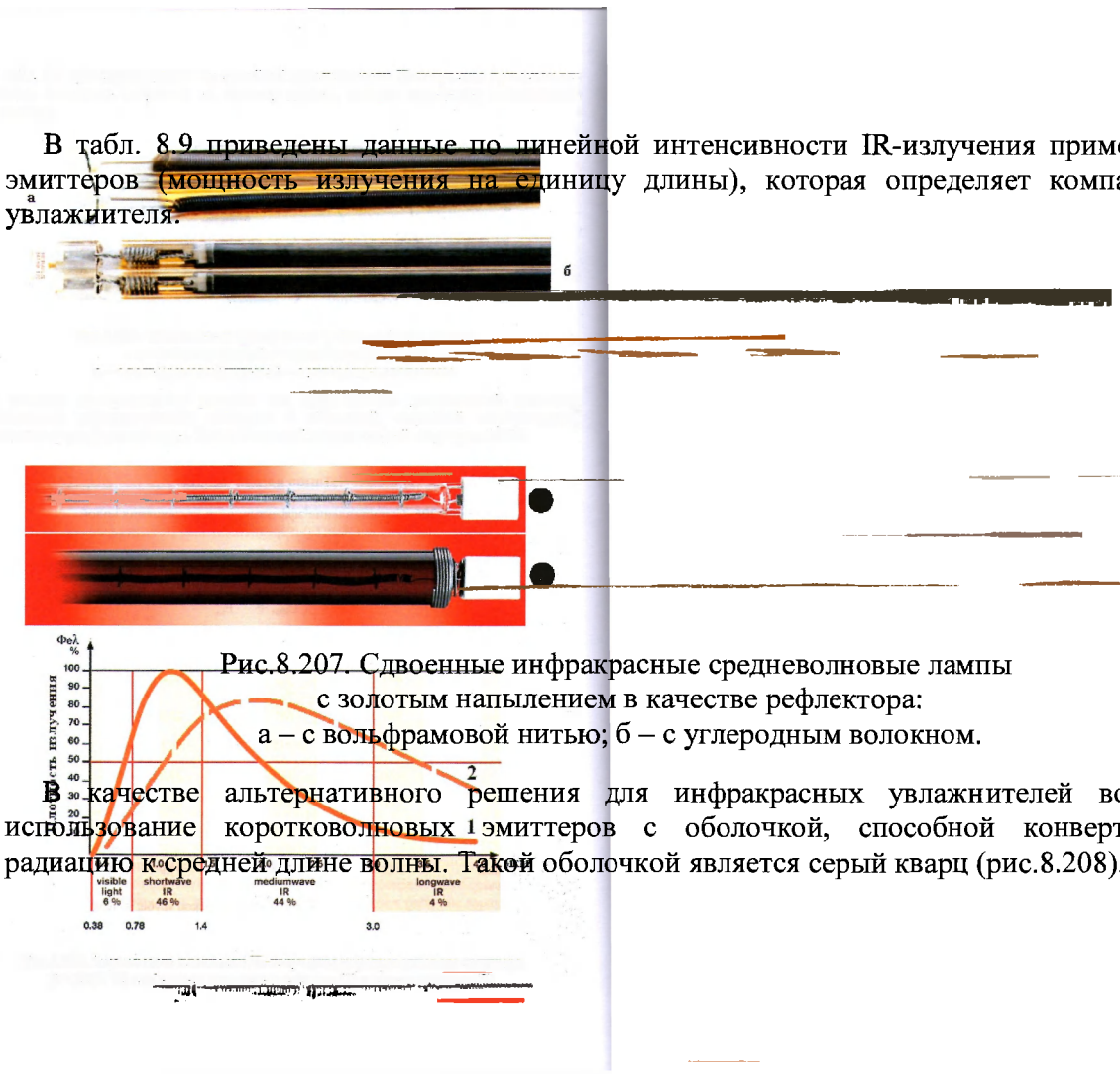


Рис.8.207. Сдвоенные инфракрасные средневолновые лампы
с золотым напылением в качестве рефлектора:
а – с вольфрамовой нитью; б – с углеродным волокном.

В качестве альтернативного решения для инфракрасных увлажнителей возможно использование коротковолновых эмиттеров с оболочкой, способной конвертировать радиацию к средней длине волны. Такой оболочкой является серый кварц (рис.8.208).

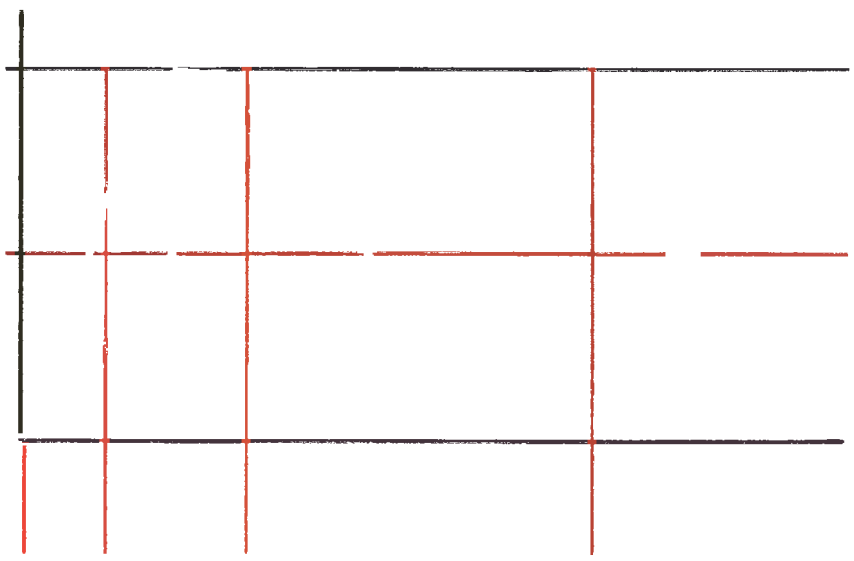


Рис.8.208. Зависимость плотности IR-излучения коротковолнового эмиттера
($t = 2200\ ^0C$) с обычным кварцевым стеклом (1) и серым кварцем (2).

Энергопотребление действующих инфракрасных увлажнителей значительно и относительно производительности по влаге составляет 800…1000 Вт ч/кг. Однако, можно рассчитывать на существенное улучшение этого показателя за счет применения новых средневолновых углеродных IR-ламп с высокоэффективными параболическими рефлекторами, либо с золотым сегментным напылением в качестве собственного отражателя.

Компания Humidifirst провела сопоставление эксплуатационных расходов инфракрасных и ультразвуковых увлажнителей для типового ИВЦ с использованием 10 установок Liebert (рис.8.209). Увлажнение воздуха для этого объекта должно обеспечиваться в течение 3500…4000 часов годового времени. При этом расход электроэнергии составил для увлажнителей инфракрасного типа 96 кВт/ч (или в среднем на один кондиционер – 9,6 кВт/ч), а для ультразвуковых устройств только 3 кВт/ч (0,3 кВт/ч на кондиционер). При стоимости 0,1 $ за 1 кВт/ч расход электроэнергии на работу одного увлажнителя Liebert с инфракрасными излучателями выше на 34600 $ в год.

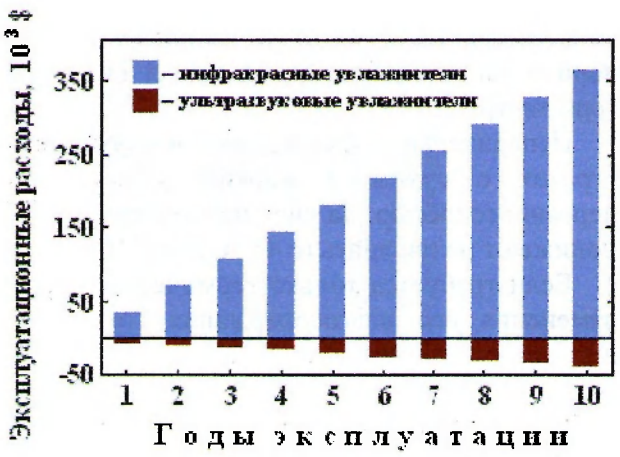


Рис.8.209. Сопоставление инфракрасных и ультразвуковых увлажнителей.

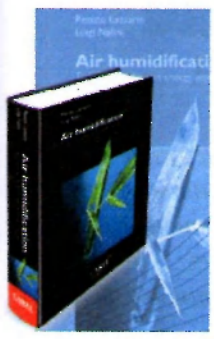
Анализируя данное направление в области увлажнения воздуха, можно заключить, что горячему пару оказывают все больше внимания в связи с его антибактериальными свойствами из-за высокой температуры, отсутствием выброса минеральных солей в воздух и, соответственно, белого налета на предметах в объекте кондиционирования, отсутствием запаха (при использовании Clean Steam). И этот выбор делается сегодня при больших затратах энергии…

Отрадно наблюдать существенный прогресс в развитии паровых технологий. Распространенное мнение прежних лет [5, 52] об ограниченном применении парового метода увлажнения полностью пересмотрено.

Дополнительную информацию по паровым увлажнителям можно получить на сайте Armstrong Steam University и в справочнике компании Армстронг "Humidification Solution Source" (объем: 183 стр., 8,37 Мб), размещен в Интернете по адресу:

ARMSTRONG STEAM UNIVERSITY

www.armstrong-intl.com/common/hvacsolutionsource/humidificationsolutionsourcebook.pdf



В завершении необходимо отметить, что рассмотреные технологии увлажнения (способы и устройства) имеют свои особенности, достоинства и недостатки, области преимущественного использования. Проделанный в 8-ой главе анализ не является исчерпывающим. За дополнительной информацией, при выборе определенной технологии увлажнения для конкретного объекта, следует обращаться к монографии специалистов компании Carel [210], в которой содержатся все необходимые сведения, а также проведено всестороннее сопоставление способов увлажнения воздуха комфортного и промышленного назначения.

9. ИСПАРИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Общеизвестно (отмечалось в § 4.2 и § 8.1), что в изоэнтальпийном процессе контактирования воздуха с водой происходит не только увлажнение, но и его охлаждение, при перераспределении явной и скрытой части энтальпии воздуха. Явное теплосодержание затрачивается на испарение воды и уменьшается (скрытая часть растет).

Степень охлаждения воздуха (Δt) увеличивается с ростом психрометрической разницы температур начального и равновесного состояния. Теоретическим пределом прямого испарительного охлаждения (direct evaporative cooling) является температура по мокрому термометру.

Испарительное охлаждение воздуха (evaporative cooling) традиционно используется в странах с сухим и жарким климатом* (см. § 1.1), рис.9.2, в связи с природной неравновесностью. За счет испарительного эффекта (flash evaporative) температуру воздуха понижают на двадцать (с 45 °С до 25 °С) и более градусов (рис.9.3).

Если требуется только термическая обработка воздуха без изменения его влагосодержания, то применяют косвенно-испарительную схему (indirect evaporative cooling), по которой основной поток воздуха проходит через закрытые для воды каналы, стенки которых с внешней стороны орошаются водой, охлаждаемой, в свою очередь, за счет испарения во вспомогательный поток воздуха. Основной поток при этом охлаждается в процессе теплопередачи через стенку (рис.9.1б, 9.4, 9.7). Таким образом, косвенно-испарительный воздухоохладитель является комбинацией контактного и поверхностного аппаратов.

Включением в схему обработки воздуха секций “direct” и “indirect” можно добиться более глубокого охлаждения – ниже $t_м$, а при многоступенчатой (каскадной) схеме – состояния, близкого к точке росы (τ) (т. К, рис.9.5).

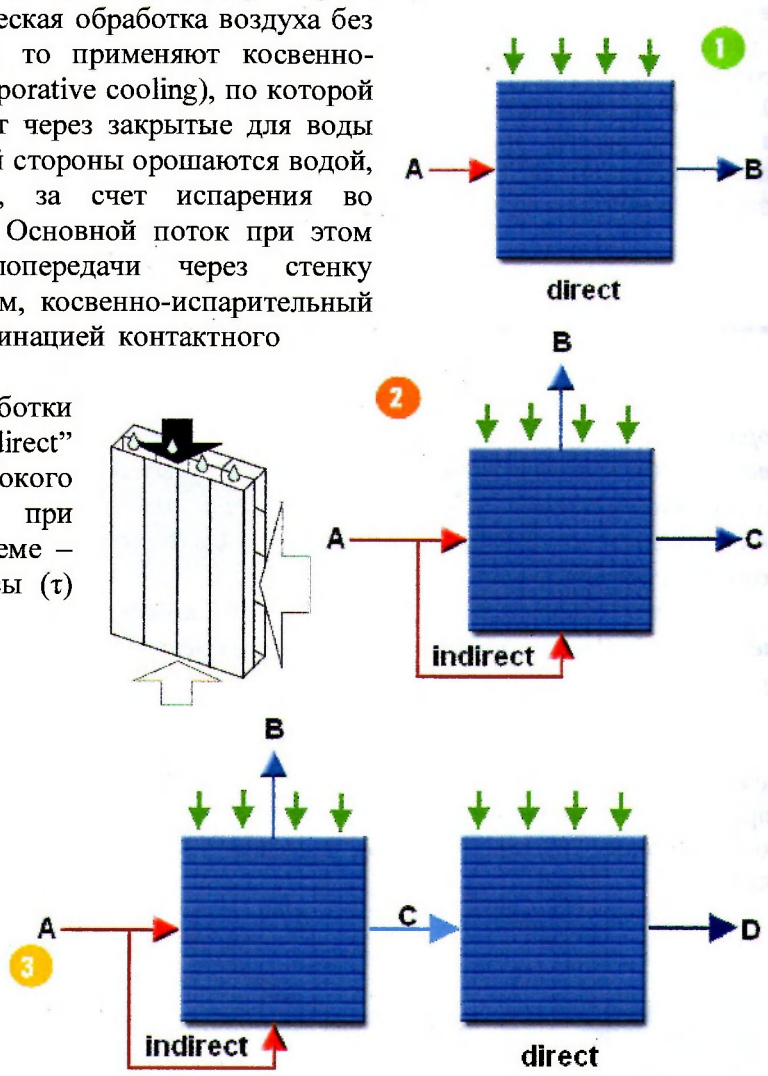


Рис.9.1. Основные схемы испарительного охлаждения воздуха: 1 – непосредственного контакта воздуха и воды (direct); 2 – косвенно-испарительная схема (indirect); 3 – совмещенная схема.

Возможности способа испарительного охлаждения по снятию тепловой нагрузки можно оценить следующим образом. На испарение 1 кг (литра) воды при нормальном атмосферном давлении расходуется 2500 кДж тепловой энергии. Если процесс протекает в течение часа, то тепловая нагрузка окружающего воздуха уменьшается на 2500/3600 = 0,69 кВт – мощность испарительного охлаждения на единицу производительности аппарата 1 л/ч (по воде).

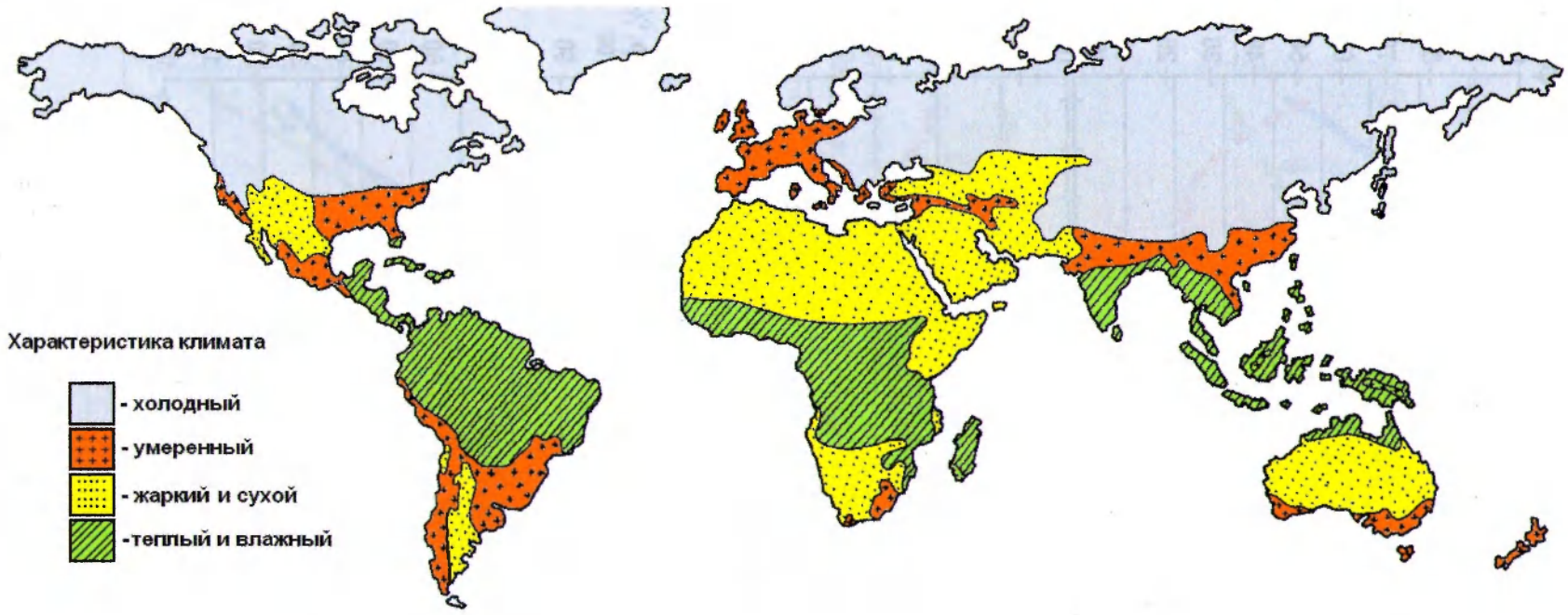


Рис.9.2. Климатическая карта мира. Регионы и страны с сухим и жарким климатом: среднеазиатские республики СНГ, Афганистан, страны Персидского залива (Иран, Ирак и др.), Ближний Восток (Сирия, Саудовская Аравия, Йемен), север и юг Африки (Марокко, Алжир, Тунис, Ливия, Египет, Судан, ЮАР), основная территория Австралии, ряд штатов США (Аризона, Техас), Мексика, Аргентина и др.

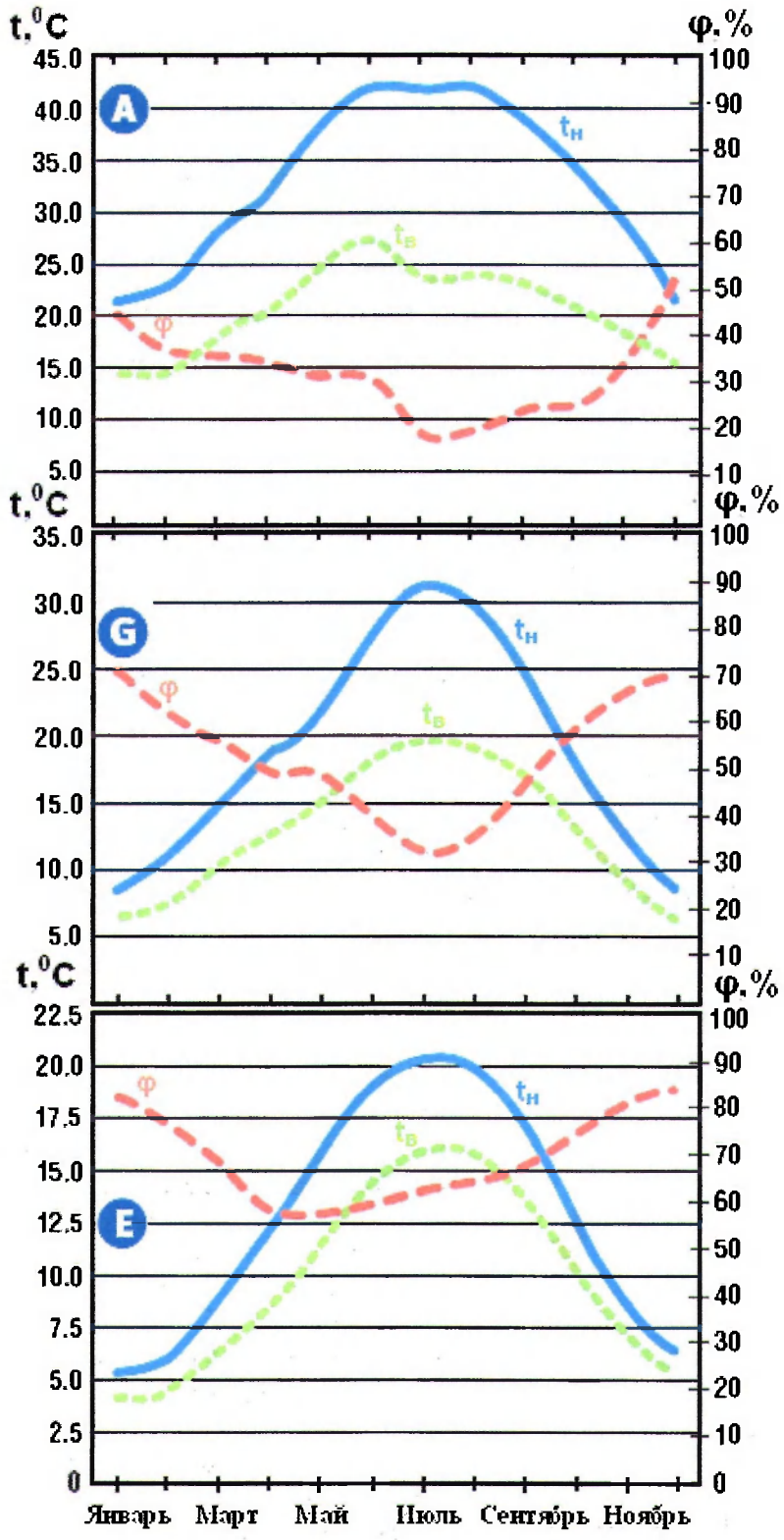


Рис.9.3. Возможности испарительного охлаждения воздуха
для различного климата: жаркого и сухого – Средний Восток (Саудовская Аравия – А);
умеренного – Европа (Великобритания – G; Испания – Е).

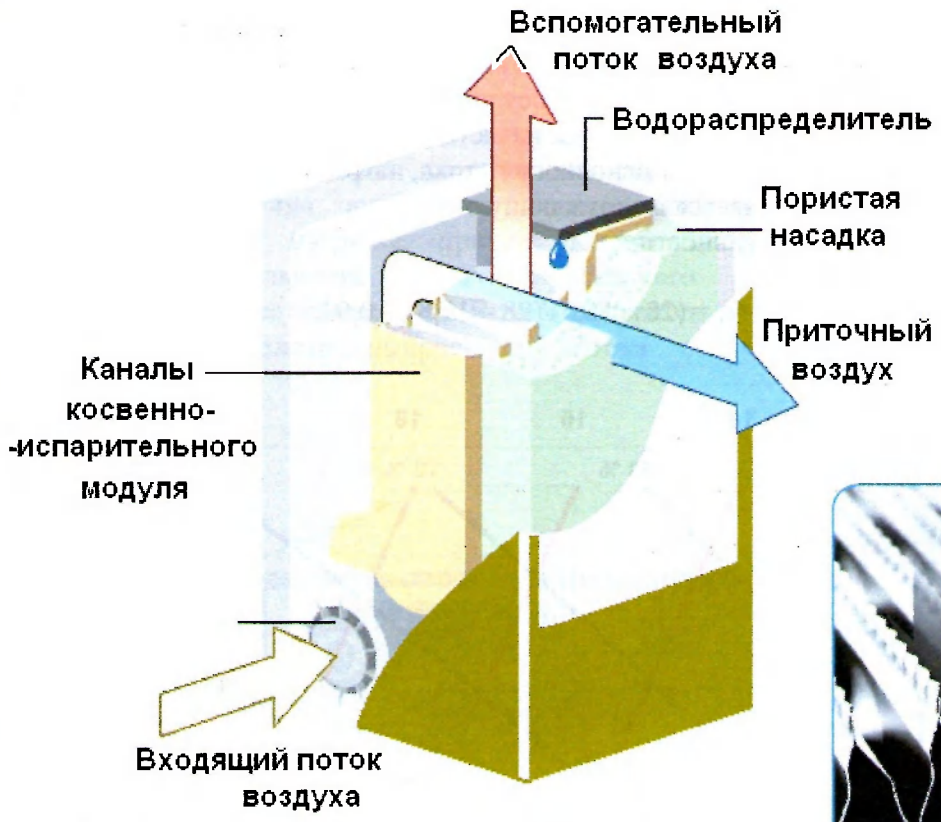
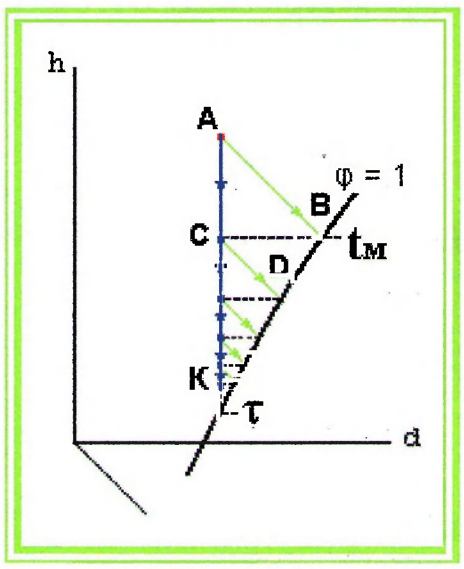




Рис.9.4. Устройство воздухоохладителя IDEC* по совмещенной схеме с двумя модулями прямого и непрямого испарительного охлаждения.

*IDEC – Indirect/Direct Evaporative Cooler



На рис.9.5 процессы прямого и непрямого испарительного охлаждения воздуха построены для идеализированных условий при эффективности процессов $E_t = 1$. В реальных условиях значения коэффициентов эффективности ниже. В случае одноступенчатой схемы: $E_t = 0{,}9\ldots0{,}8$ для прямого испарительного охлаждения и $E_t = 0{,}7\ldots0{,}6$ для непрямого процесса

Рис.9.5. Интерпретация процессов испарительного охлаждения воздуха в d,h-диаграмме.

обозначения точек соответствуют рис.9.1

Интегральное представление процессов обработки воздуха в каскадной установке IDEC дано на рис.9.6, где в d,h-диаграмме проведено построение линий процессов, как по основному потоку 1-2, так и по вспомогательному 2-3 и 3-4. В установке [301] поток воздуха 5000…20000 м^3/ч на выходе из основных каналов, закрытых для влаги, разделяется и 30% его направляется в межканальное пространство для осуществления прямого испарительного охлаждения, а остальные 70 % используются в качестве приточного воздуха в СКВ. Вспомогательный поток, отбирая теплоту от основного потока, нагревается и увлажняется до параметров точки 4, а затем выбрасывается в окружающую среду.

Достигаемый коэффициент эффективности:

$$E_t = (t_1 - t_2)/(t_1 - \tau) = (28 - 18{,}5)/(28 - 17{,}8) = 0{,}93.$$

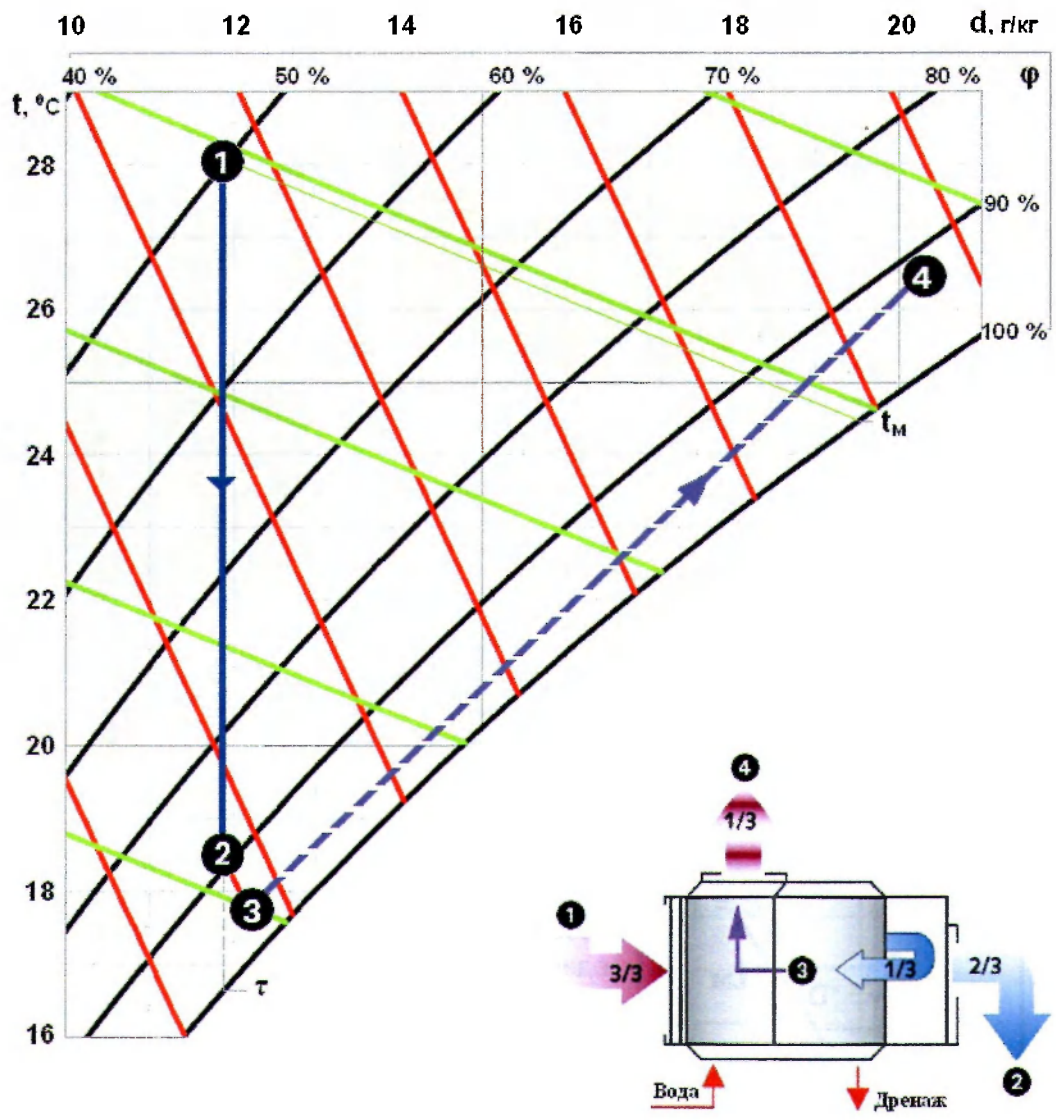
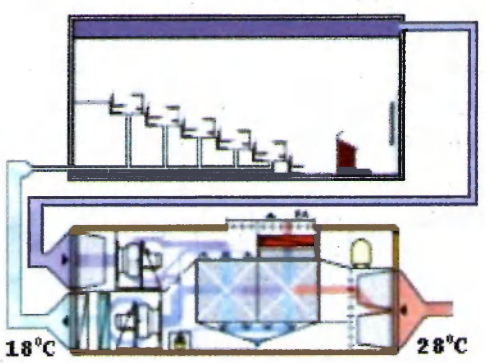


Рис.9.6. Схема установки IDEC
и интерпретация процессов обработки воздуха
в d,h-диаграмме.

На рис.9.7 показана рекуперативная установка косвенно-испарительного охлаждения MENERGA Adsolair™ производительностью 120 тыс. $м^3$/ч приточного воздуха (основной поток). В летний период данная двухступенчатая установка обеспечивает охлаждение воздуха, без использования холодильной машины, на 10°С. Холодильная машина включается только при пиковой тепловой нагрузке, причем потребная холодопроизводительность за счет испарительного блока снижена более чем на 50 %. В зимний период утилизируется теплота выбросного потока с эффективностью 80 %.



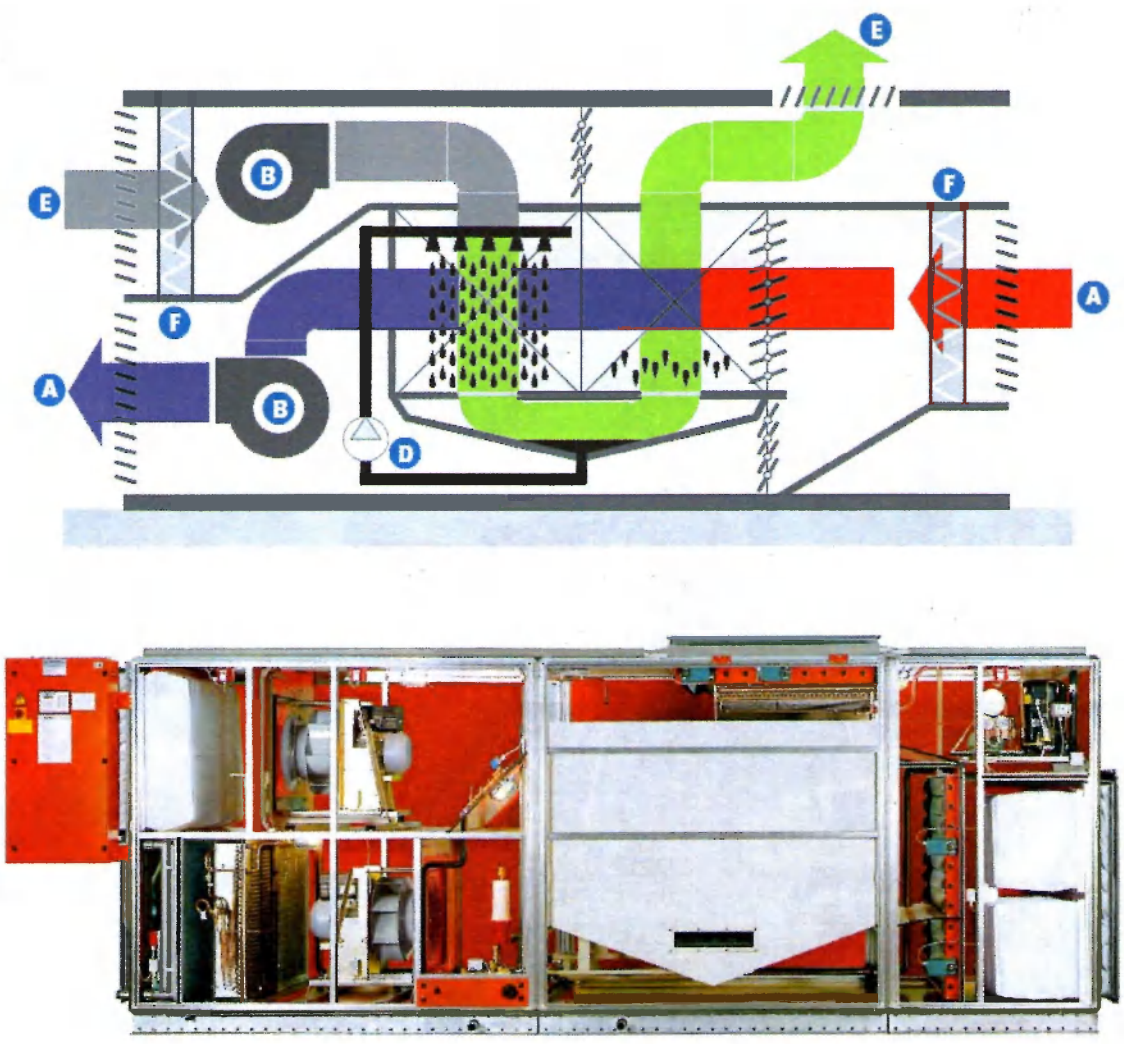


Рис.9.7. Воздухоохлаждающая рекуперативная установка с модулем непрямого испарительного охлаждения (MENERGA Energy-Systems):

A – основной поток воздуха; E – вспомогательный поток воздуха; B – вентиляторы; D – водооборотная система с форсунками и циркуляционным насосом; F – фильтры.

На приведенных ниже фотографиях показана работа наружных систем прямого испарительного охлаждения воздуха компаний Creative Mist Systems и Cool Zone USA, широко используемых в странах с сухим и жарким климатом, для различных объектов: деловые кварталы “city”, места отдыха, кафе, автозаправочные станции, а также спортивные площадки, зоопарки, зоофермы и пр. (рис.9.8).



Рис.9.8. Примеры использования систем испарительного охлаждения воздуха.

Испарительное охлаждение эффективно работает не только в странах с сухим и жарким климатом, но и в регионах с умеренными температурами воздуха, с высокой влажностью (даже в условиях тропиков) при предварительном осушении воздуха десикантами. Используется в СКВ жилых и общественных зданий, производственных помещений, в газотурбинных установках и других объектах. Для этих целей служат камеры орошения с гидравлическими форсунками среднего или высокого давления, различные насадочные структуры (см. § 8.1.1 и § 8.2).

В настоящее время в СКВ комфортного назначения камеры орошения замещаются насадочными аппаратами, которые конструктивно ничем не отличаются от рассмотренных ранее насадочных увлажнителей. Отличие состоит лишь в том, что в режиме испарительного охлаждения аппараты работают с большими значениями коэффициентов орошения, и только в оборотном цикле.

На рис.9.9. показаны автономные насадочные воздухоохладители, работающие по схеме “direct” (вентиляторы трехскоростные, до 800 м^3/ч).

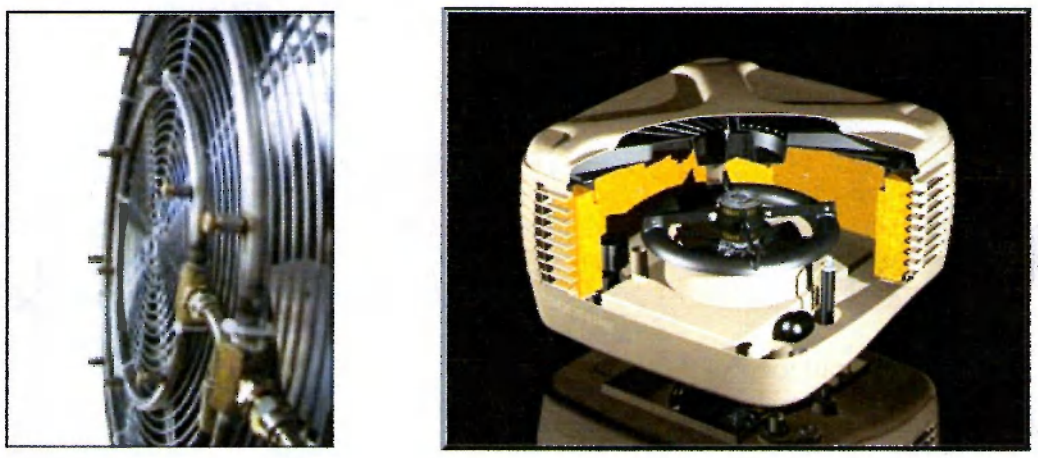
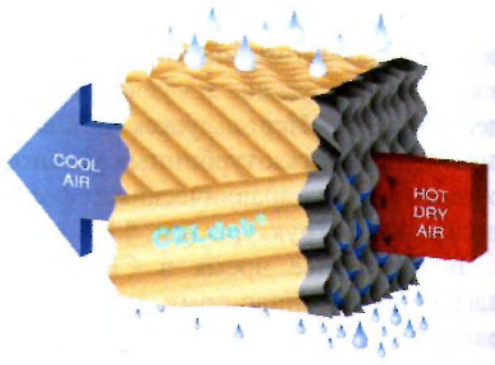


Рис.9.9. Аппараты с форсуночным распылением Mist Cooling System (а), капиллярно-пористой насадкой (б) и регулярным слоем (в): 1 – входящий поток воздуха; 2 – насос; 3 – водораспределитель; 4 – регулярная насадка; 5 – вентилятор; 6 – охлажденный поток воздуха.

Компания Munters выпускает автономные аппараты испарительного охлаждения (увлажнения) воздуха Humimax с насадкой CELdek, производительностью по воздуху 2000, 4000, 6000 и 9000 м^3/ч.



Известная схема испарительного охлаждения от древнеиндийского города *Мохенджо-Даро* (см. § 1.1) подарила миру крышное расположение аппаратов: “Roof Top” (рис.9.10).

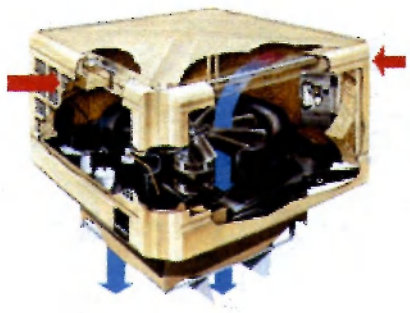




Рис.9.10. Кондиционеры (воздухоохладители direct evaporative cooling) Roof Top компании Bionare с собственным встроенным вентилятором (схема Active).

В подтверждение тому, что хорошие идеи могут жить вечно, на рис.9.11, 9.12 показана действующая схема Мохенджо-Даро (Passive, PDEC) в современных проектах. За счет тех же подвижных воздухоприемников (флюгеров) осуществляется улавливание ветряного потока воздуха, который затем пропускается через орошаемую водой насадку, охлаждается в ней и опускается в кондиционируемое помещение. Архитектура здания (рис.9.11) претерпела небольшие изменения в части устройства узких оконных проемов, диффузорно расширяющихся вовнутрь.



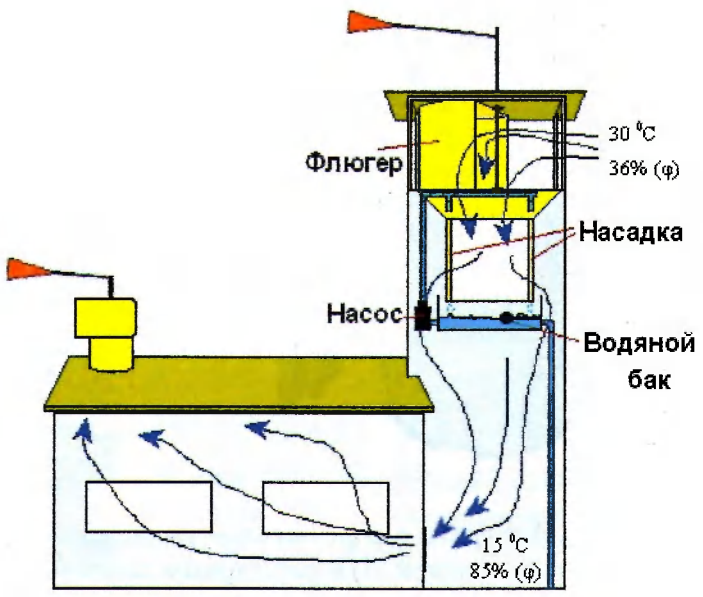


Рис.9.11. Схема пассивного прямого испарительного охлаждения воздуха и фотография здания, которое разрабатывалось под данное инженерное решение.

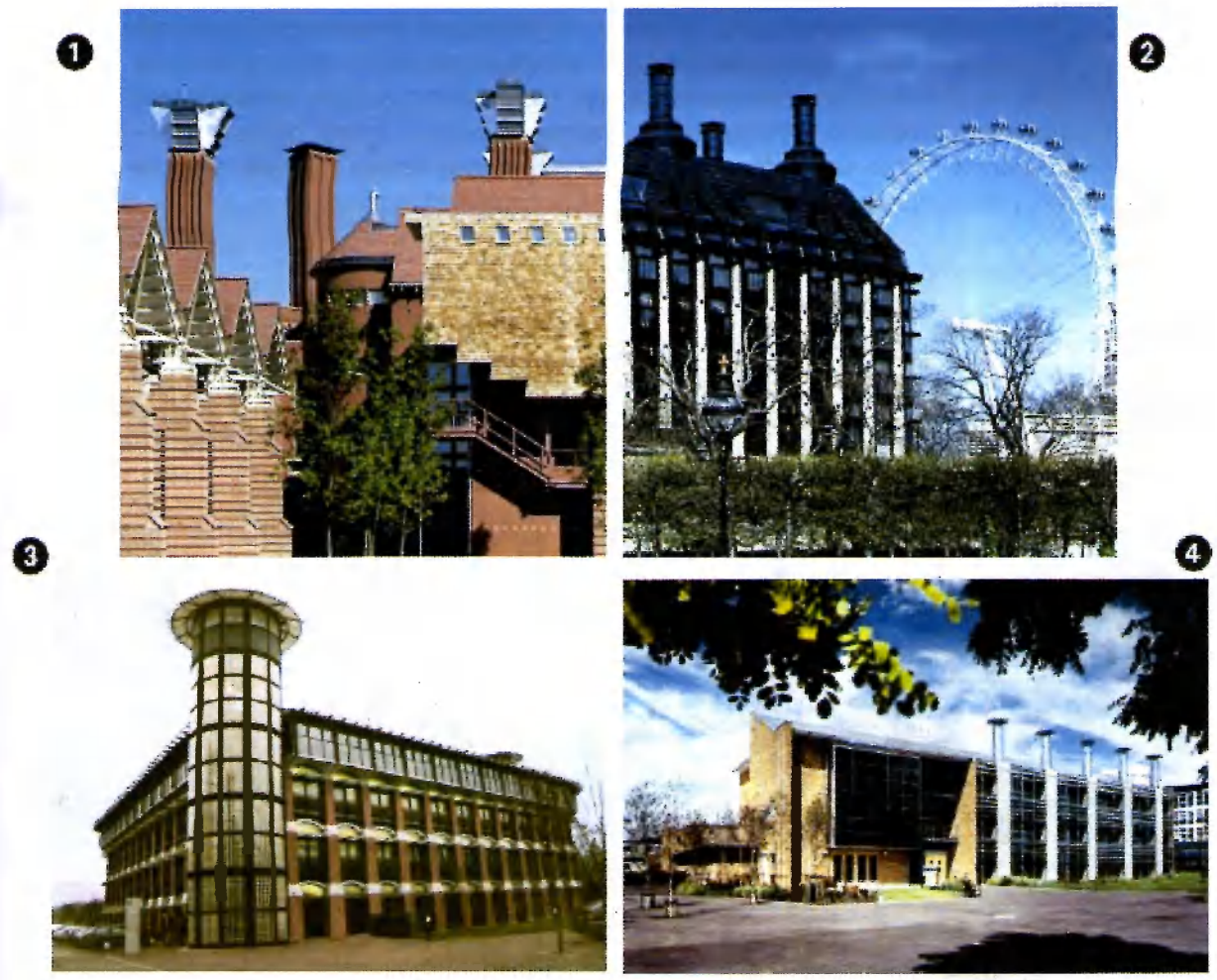


Рис.9.12. Архитектура зданий Великобритании, использующих PDEC:

1 – The Queens Building, De Montfort University (Architect: Short Ford Associates), 2 – Portcullis House, London (Architect: Michael Hopkins and Partners), 3 – Environmental Building, BRE, Watford (Architect: Feilden Clegg), 4 – York House, Inland Revenue, Nottingham (Architect: Michael Hopkins and Partners).

Также жизнеспособна схема "uchimizu" (§ 1.1) косвенно-испарительного охлаждения приточного воздуха за счет орошения крыши (рис.9.13а).

Традиционен способ аккумуляции холода в ночное время суток (в режиме градирни) с последующим охлаждением воздуха в помещении днем (рис.9.13б): "night underfloor evaporative cooling system"– NUECS.

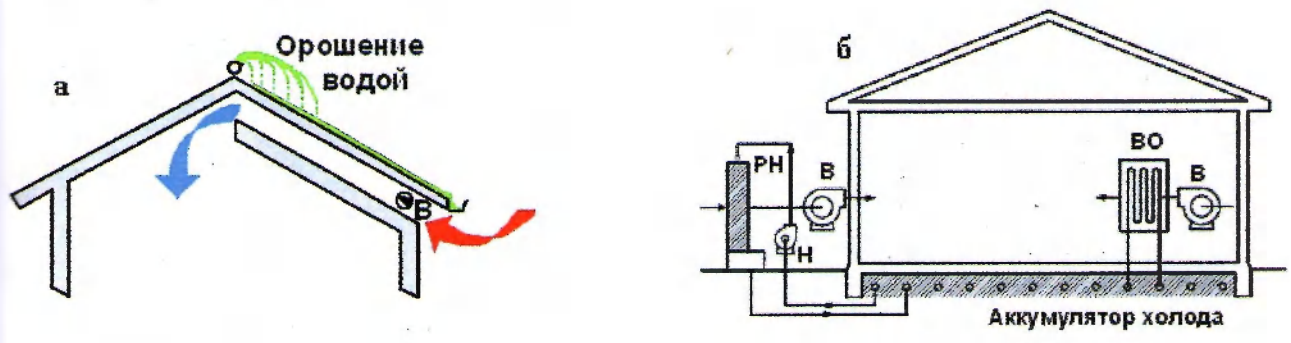


Рис.9.13. Схемы испарительного охлаждения приточного воздуха: орошением крыши (а) и за счет аккумуляции холода (б).

(ВО – воздухоохладитель, В – вентилятор, Н – насос, РН – регулярная насадка).

Схема NUECS работает следующим образом. В подполье помещения заложена система водяных труб, являющаяся теплообменником и одновременно аккумулятором холода, который она получает в результате испарительного охлаждения воды в ночное время. За счет того, что вода имеет высокую теплоемкость (самую высокую среди других веществ, а по отношению к воздуху более чем в 4 раза), она аккумулирует холод и затем, в дневное время суток, охлаждает воздух в помещении в процессе теплопередачи через пол либо с помощью поверхностного воздухоохладителя. При этом насадочный аппарат может также работать на помещение в режиме прямого испарительного охлаждения воздуха.

Испарительное охлаждение имеет широкое промышленное применение (industrial application) в виде установок большой производительности (насадочных, форсуночных, дисковых) (рис.9.14).



Рис.9.14. Промышленные установки испарительного охлаждения (стационарные и мобильные).

Как уже обсуждалось (§ 8.1.1), форсуночное распыление воды в режимах испарительного охлаждения должно базироваться на форсунках с полным факелом. Такие устройства показаны на рис.9.15.

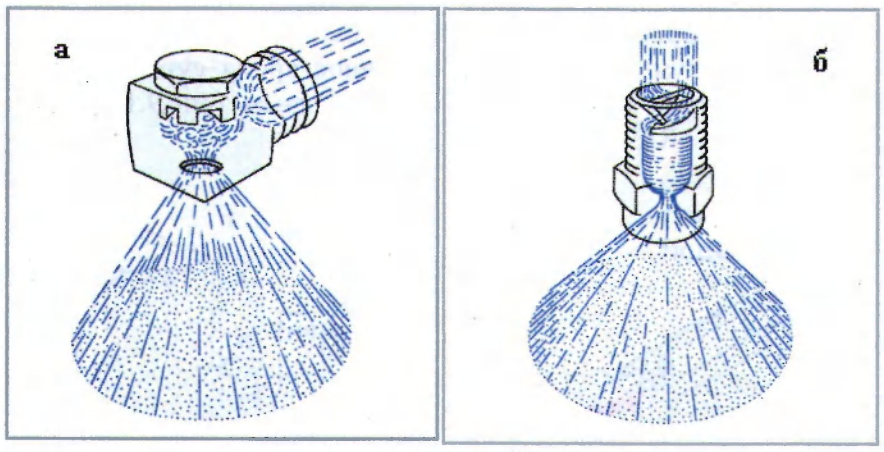


Рис.9.15. Гидравлические форсунки с распылением полным факелом: тангенциальные – а; осевые – б.

Эвольвентные форсунки TF (BETE) с полным факелом и углом распыла 60…170° (производительностью 2,26…10700 л/мин при P = 0,5…20 бар, аналогичны форсункам с полым факелом, см. § 8.1.1), рис.9.16.

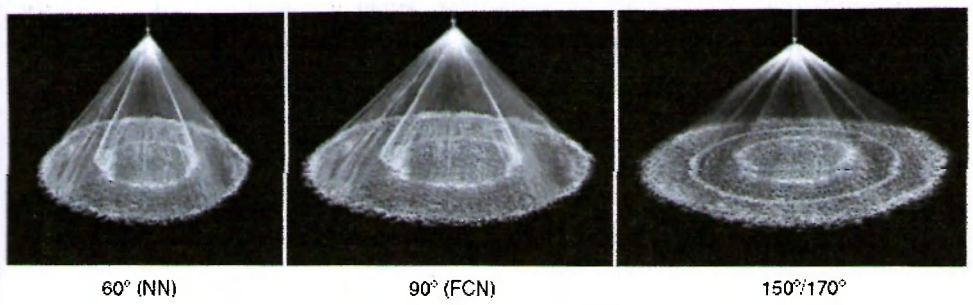




Рис.9.16. Эвольвентные форсунки TF (BETE) с полным факелом.

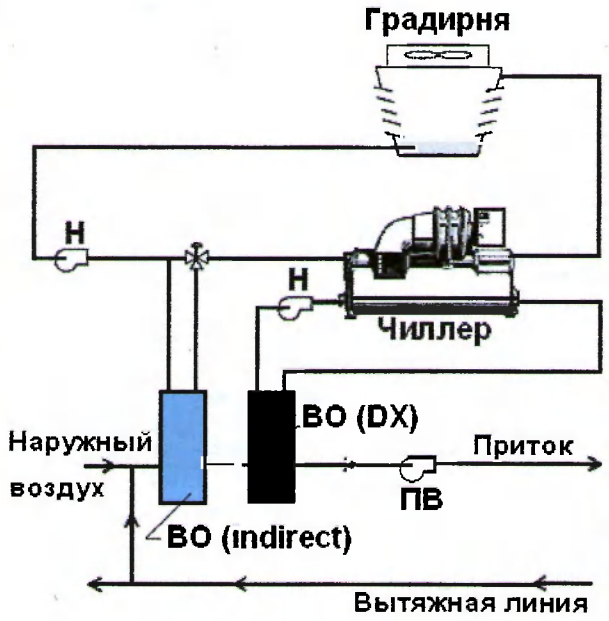
Аппараты “direct” и “indirect evaporative cooling” применяются в качестве основного оборудования, так называемых бескомпрессорных СКВ, и совместно с холодильными установками ХУ в качестве предварительной ступени охлаждения (precooling) (рис.9.17). Энергопотребление таких двухступенчатых установок на 60…80 % меньше, чем кондиционеров компрессионного типа.

Кроме охлаждения воздуха, принцип evaporative cooling используется и для охлаждения воды в брызгальных бассейнах, градирнях, испарительных конденсаторах ХУ.



б

а



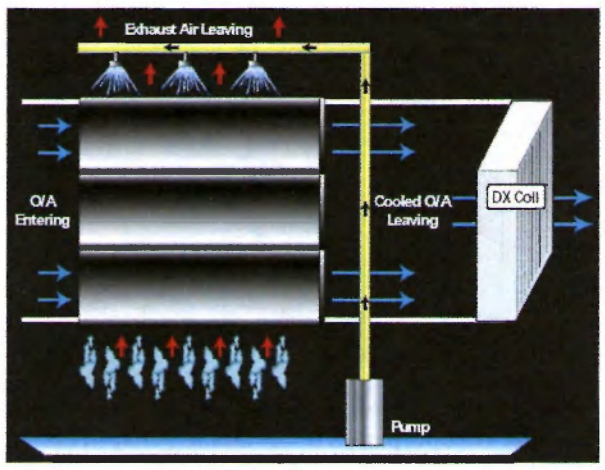


Рис.9.17. Схема СКВ с косвенно-испарительным воздухоохладителем в качестве предварительной ступени (обозначения по рис.9.13) – а и фотография градирни – б.

Многие отрасли промышленности, особенно имеющие «горячие» цеха, не могут позволить себе огромные затраты на кондиционирование воздуха, построенное на базе холодильных машин. Для снижения тепловой нагрузки на рабочих участках с успехом используются аппараты испарительного охлаждения. В Рекомендациях ASHRAE, 1995, глава 47, сказано: «испарительное охлаждение может снимать проблему высоких тепловых нагрузок и способствовать повышению производительности труда и самочувствия рабочих. Если «тепловая» проблема не решена, то в летние месяцы, возникают проблемы, связанные со здоровьем и безопасностью работников. В жаркие дни на предприятиях, не использующих охлаждение воздуха, производительность труда снижается на 25…40 %».

На рис.9.18…9.22 приведен иллюстративный материал компаний Cool Technology и Cool Breeze AIRCONDITIONING по различным вариантам устройства системы прямого испарительного охлаждения в цехах производственных предприятий.

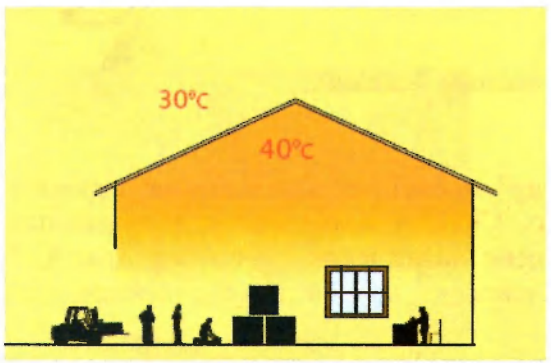


Рис.9.18. Иллюстрации потенциала испарительного охлаждения воздуха в условиях жаркого летнего дня, характерного для климата Англии: $t_н$ и $\varphi_н$ - параметры наружного воздуха; $t_в$ – температура воздуха в цеху.

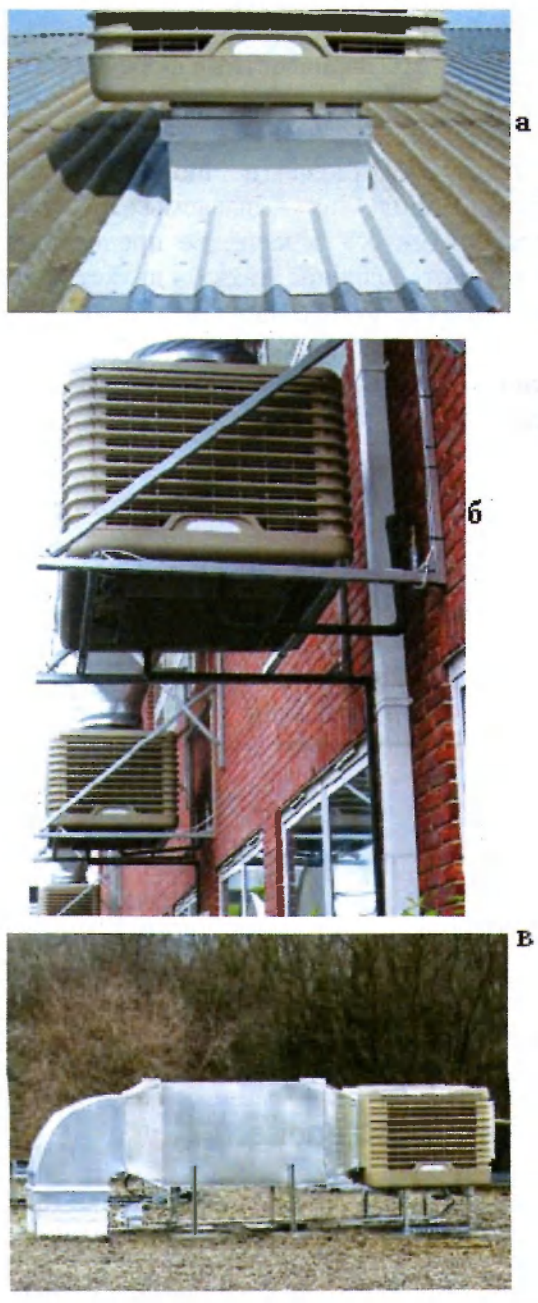


Рис.9.19. Варианты размещения блоков испарительного охлаждения снаружи здания: а – крышный; б – настенный; в – на грунте.

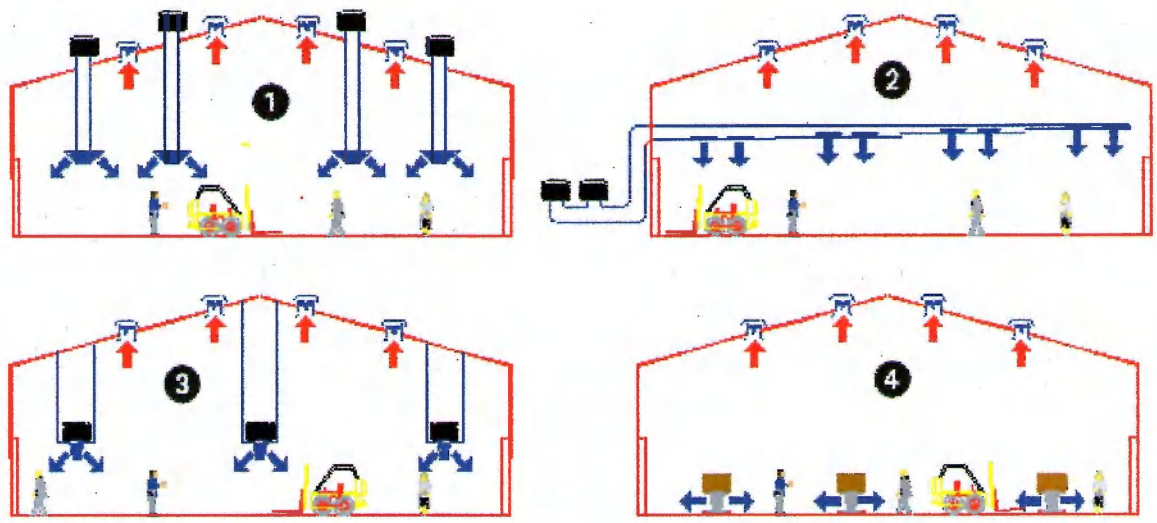


Рис.9.20. Типичные схемы систем испарительного охлаждения приточного наружного воздуха (1, 2) и внутреннего воздуха (3,4).



Рис.9.21. Фотография цеха с приточно-вытяжной системой вентиляции при использовании блоков испарительного охлаждения на притоке (схема 2).

а



б



Рис.9.22. Фотографии внутренних блоков: а – воздухораспределителя (по схеме 1);
б – блока испарительного охлаждения (схема 3).

номера схем, указанные в подрисуночных подписях к рис.9.21, 9.22, соответствуют рис.9.20

Как уже отмечалось, тепломассообменные аппараты СКВ непосредственного контактирования воды и воздуха, являются универсальными в отношении проведения процессов увлажнения и испарительного охлаждения воздуха. Это дает возможность использовать один и тот же аппарат (секцию центрального кондиционера) для увлажнения воздуха зимой и для охлаждения летом. В дополнение к рабочим характеристикам аппарата FA-6 (Munters), см. § 8.2.1, на рис.9.23 приведена зависимость его охлаждающей способности в диапазоне значений φ = 0…100 %.

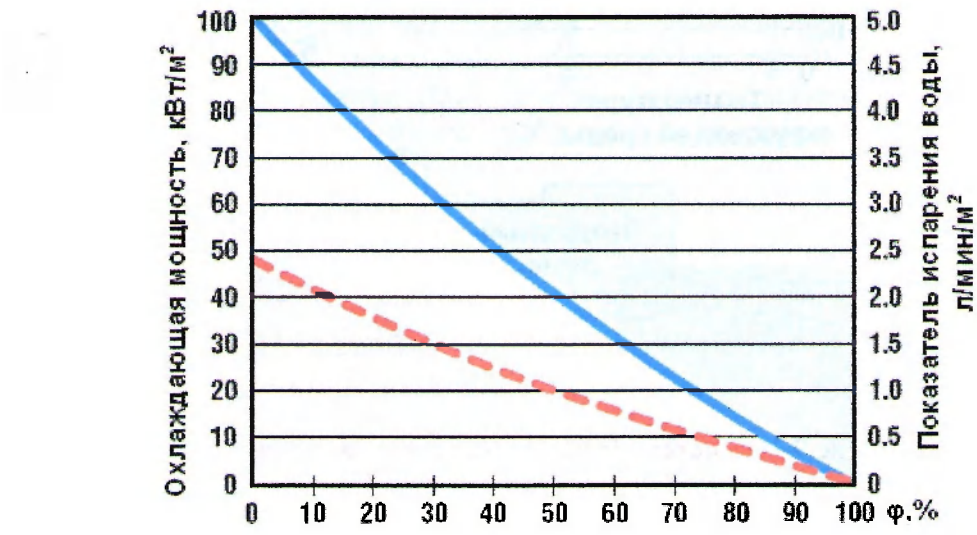
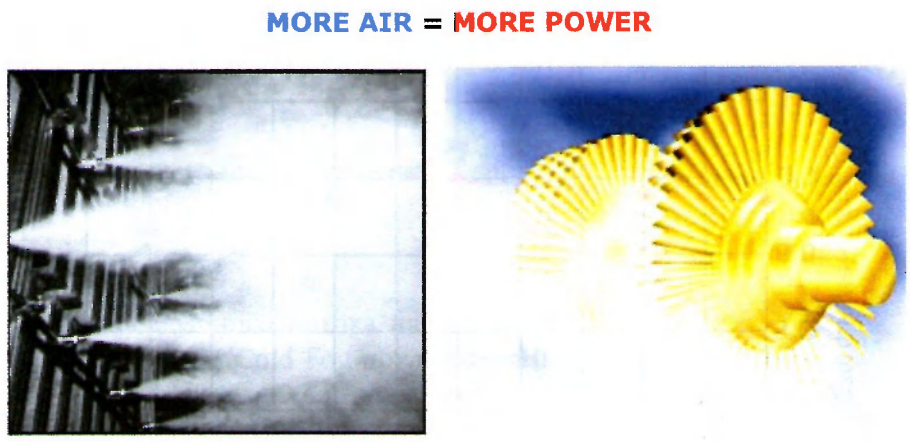


Рис.9.23. Зависимость охлаждающей мощности и степени испарения воды для аппарата FA-6 (Munters) от φ.

Метод испарительного охлаждения нашел свое применение и в энергетике.



Газотурбинные установки ГТУ, генерирующие электроэнергию, в летние жаркие дни могут терять 15…20 % мощности. Охлаждение воздушного потока на входе в компрессор ГТУ – способ повышения эффективности ее работы в условиях высоких температур окружающей среды. Для этого используются установки WAC (Water Atomization Cooling), создающие водный туман (рис.9.24). Тонкодисперсный водный аэрозоль мгновенно испаряется, отбирая теплоту воздуха, и в состоянии «сухого» пара поступает в ГТУ. Испарительное охлаждение воздуха увеличивает его плотность, за счет чего частично компенсируется потеря мощности ГТУ (на 5…10 %). Форсунки WAC очень компактно размещаются во входном патрубке установки.

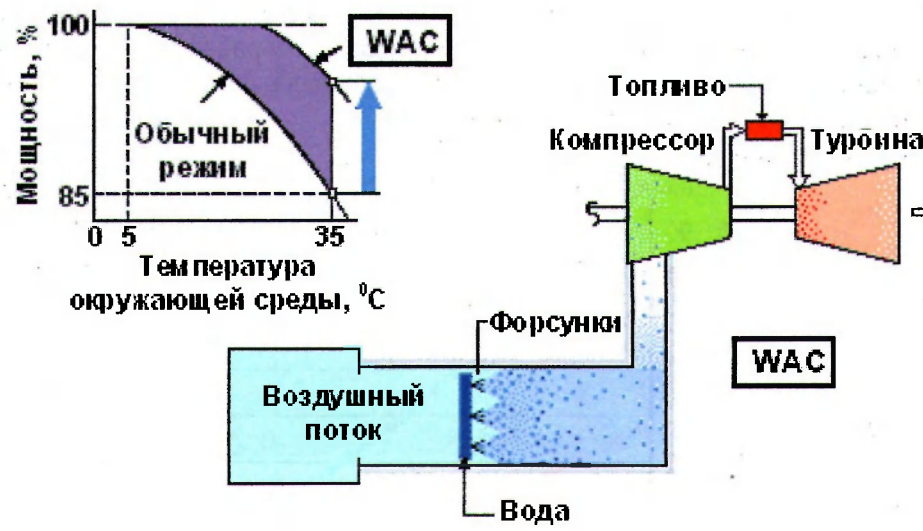


Рис.9.24. Система WAC (по материалам компании Hitachi).

На рис.9.25 показан уровень (в долях единицы) повышения массового расхода воздуха и мощности газотурбинной установки, а также снижения тепловой нагрузки при охлаждении воздуха на входе в ГТУ. В качестве реперной точки, использовалась точка, в которой все перечисленные удельные характеристики равны 1 при $t_в = 15$ °C.

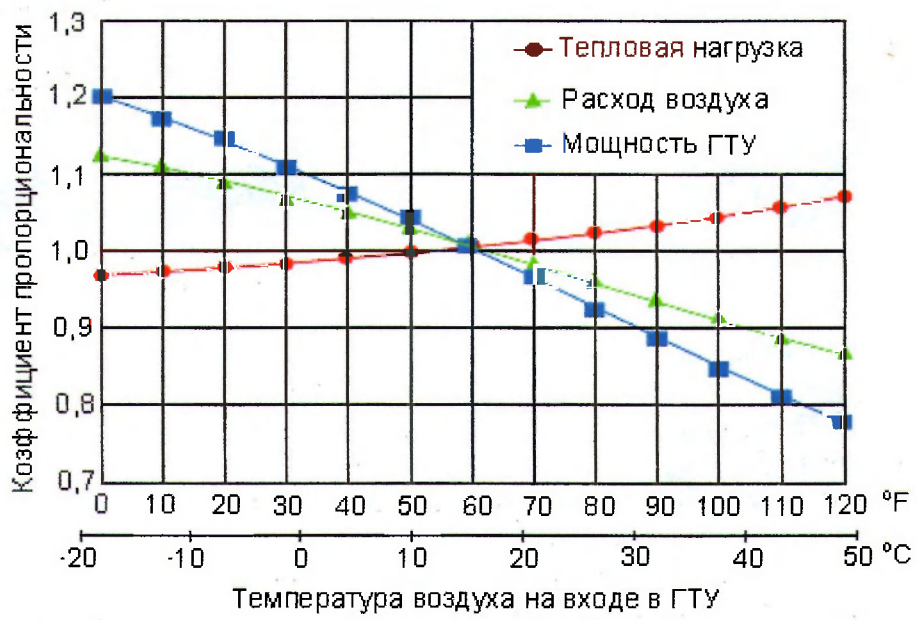


Рис.9.25. Изменение мощности, тепловой нагрузки и расхода воздуха в зависимости от температуры воздуха $t_в$ на входе в ГТУ.

Компания Atomizing Systems Inc. предлагает для этих целей форсунки высокого давления "Cold Fog nozzle" с рубиновой вставкой, в которой выходное отверстие выполняется лазерным способом (рис.9.26). Диаметр d_0 = 0,004, 0,0045, 0,005, 0,006, 0,008, 0,010, 0,012, 0,015" (допуск ± 0,0002"). Рубин выбран в связи с высокой износостойкостью (соответствующий коэффициент для меди – 1, стали – 1,5…2, монель-металла (медно-никелевый сплав) – 2…3, закаленной нержавеющей стали – 10…15, рубина > 120). Такие форсунки надежно работают в диапазоне рабочего давления воды 20…140 бар, что позволяет четко регулировать их производительность, отслеживая изменения режимов работы ГТУ. Повышение давления от уровня в 28 бар практически не сказывается на качестве распыления (D_{50} = 10 мкм), оно используется для распыления большего количества воды, необходимого при переходе на режим ГТУ «повышенной мощности».

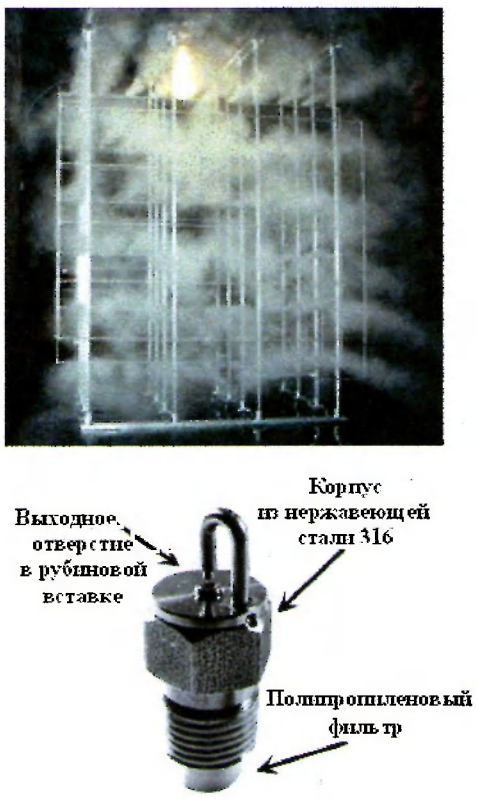




Рис.9.26. Система распыления Cold Fog (а) и форсунка высокого давления (б).

Для охлаждения воздушного потока на входе в ГТУ мощностью 20 МВт система Cold Fog потребляет 10 кВт электроэнергии и 2 $м^3$/ч воды. Обслуживание состоит в замене фильтров (минимальной при использовании установки деионизации воды, рис.9.27). Финишные сменные фильтрующие картриджи (в теле форсунки) рассчитаны на задержку частиц размером 1 мкм.
В системе предусмотрены предварительные фильтры на 5 мкм.

Системы Cold Fog применяются на газотурбинных установках Дженерал Моторс, НАСА, Субару и др.

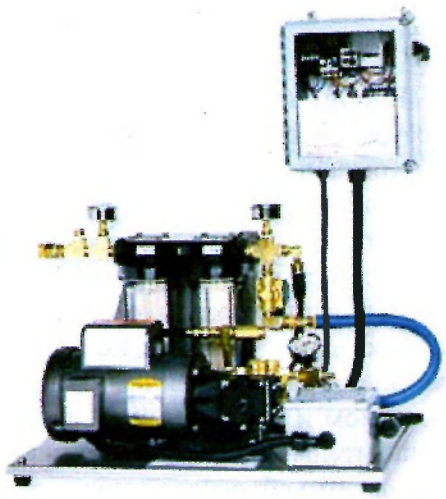


Рис.9.27. Установка подготовки воды.

Компания Munters предлагает для ГТУ свои аппараты (рис.9.28): Turbofog (аналогичное рассмотренным выше решение) и насадочный вариант Turbodek, в качестве альтернативы. Причем последний вариант со специально разработанными насадочными структурами на большие расходы воздуха "Munters Turbine's honeycombed media pad", кроме функции охлаждения, обеспечивает и предварительную мокрую очистку воздуха.

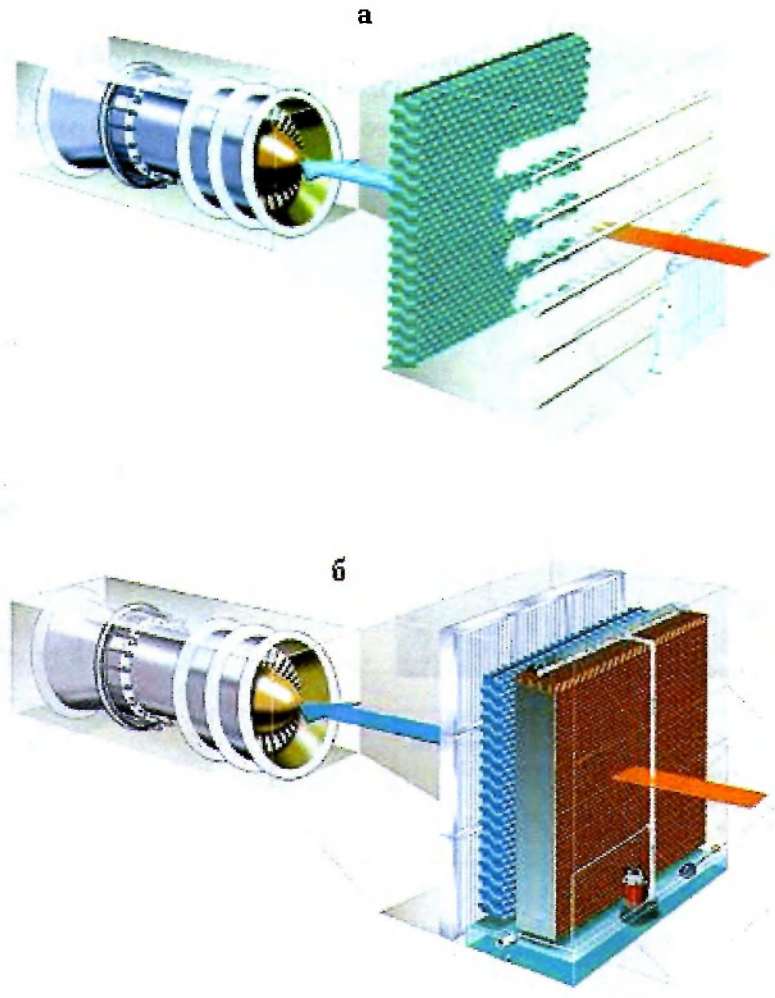


Рис.9.28. Установки Turbofog (а) и Turbodek (б).

Кроме аппаратов прямого испарительного охлаждения для ГТУ применяют также косвенно-испарительные воздухоохладители [305].

Компания Idalex Inc. разработала специальный цикл работы ГТУ (Maisotsenko Combustion Turbine Cycle – МСТС, рис.9.29) и поперечноточный тепломассообменный аппарат (The Coolerado Cooler) для него, в котором обеспечивается охлаждение воздуха ниже $t_м$, – до уровня, приближенного на 80 % к температуре точки росы. Это достигается за счет сложно-разветвленной схемы организации вспомогательного потока воздуха, построенной таким образом, что этот воздух, охлаждаясь в сухом канале, поступает во множество влажных каналов, расположенных поперечно к смежным сухим каналам с основным (рабочим) воздухом (рис.9.30). Тем самым создаются условия сохранения высокого потенциала испарительного охлаждения на уровне начального состояния воздуха по всей длине сухого канала, что объясняет заявленную эффективность процесса.

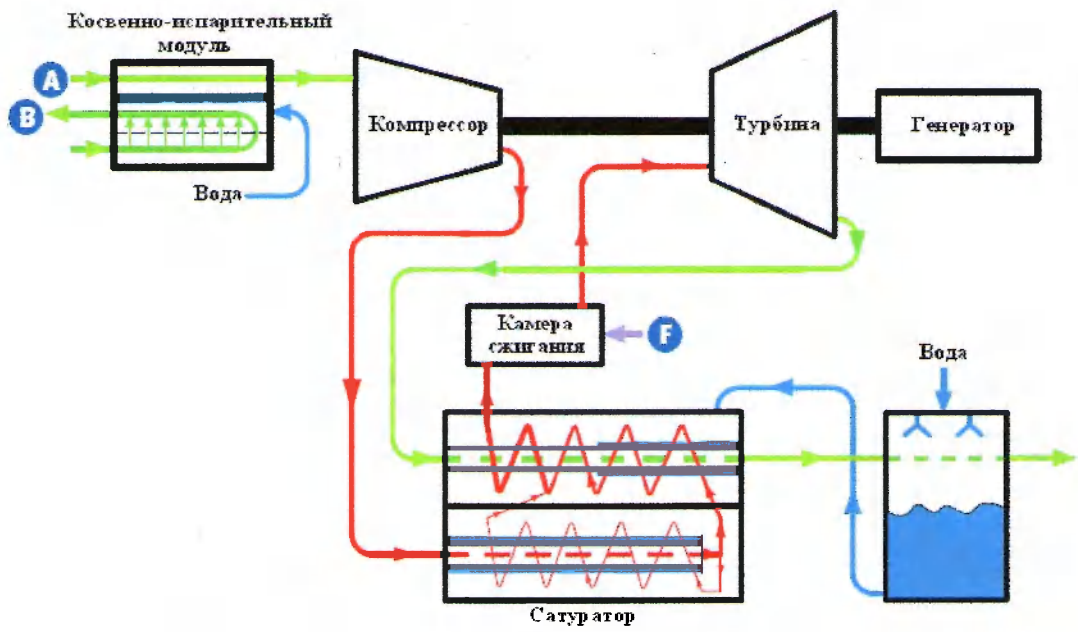


Рис.9.29. МСТС цикл: A – основной (рабочий) поток воздуха; B – вспомогательный поток воздуха; F – топливо.

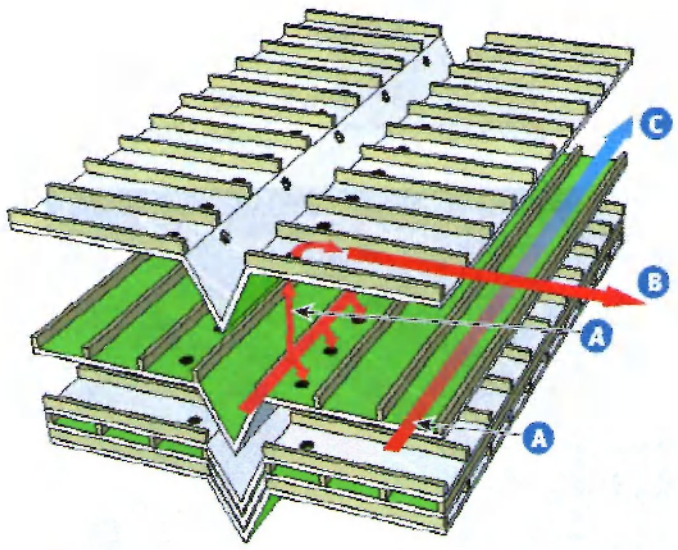


Рис.9.30. Устройство воздухоохладителя Coolerado Cooler:

A – вход основного и вспомогательного потоков; C и B – выход основного и вспомогательного потока, соответственно.

Данный аппарат является примером удачной реализации одного из различных вариантов комбинированных схем косвенно-испарительных охладителей воздуха.

Подробнее о возможностях метода непрямого испарительного охлаждения можно познакомиться в монографии проф. Дорошенко А.В.[28].

к сведению: научный руководитель американской компании *Idalex Inc. проф.В.С. Майсоценко является представителем Одесской научной школы испарительного охлаждения, основателями которой можно считать проф. Алексеева В.П., проф. Дорошенко А.В., к.т.н. Цимермана А.Б.*

Компания ООО «Термотех-Пром» (Одесса), под руководством А. Б. Цимермана, выпускает косвенно-испарительные рекуперативные установки КИРУС холодопроизводительностью 2,9...4 кВт.

Процессы испарительного охлаждения имеют множество интересных и важных инженерных приложений, многовековую историю. Учитывая тенденцию возврата к природным процессам и технологиям, представленные здесь сведения нужно рассматривать только как краткий экскурс в мир "evaporative cooling".

"We shape our buildings, and afterwards our buildings shape us",
Winston Churchill



10. ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА

Geranium (photo: John Lee): головка семени герани перекручивается пять раз при изменении φ от 30 % до 90 %



Человек не имеет рецепторов влажности и, в отличие от растений, слабо реагирует на ее изменение в достаточно широком диапазоне φ. Однако, экстремальные (низкие либо высокие) значения относительной влажности воздуха могут оказывать на человека весьма существенное воздействие.

Ощущение комфорта у людей возникает в диапазоне значений относительной влажности воздуха φ = 30…70 % (в сочетании с другими параметрами). Одновременно с этим создаются условия, оптимальные для здоровья человека, что зафиксировано в нормативных документах:

ASHRAE 62 (USA)	30…60%
ГОСТ 30494 (РФ)	30…60%
CIBSE (UK)	40…70%
VDI 6022 (Germany)	30…65%
ISO 7730	30…70%

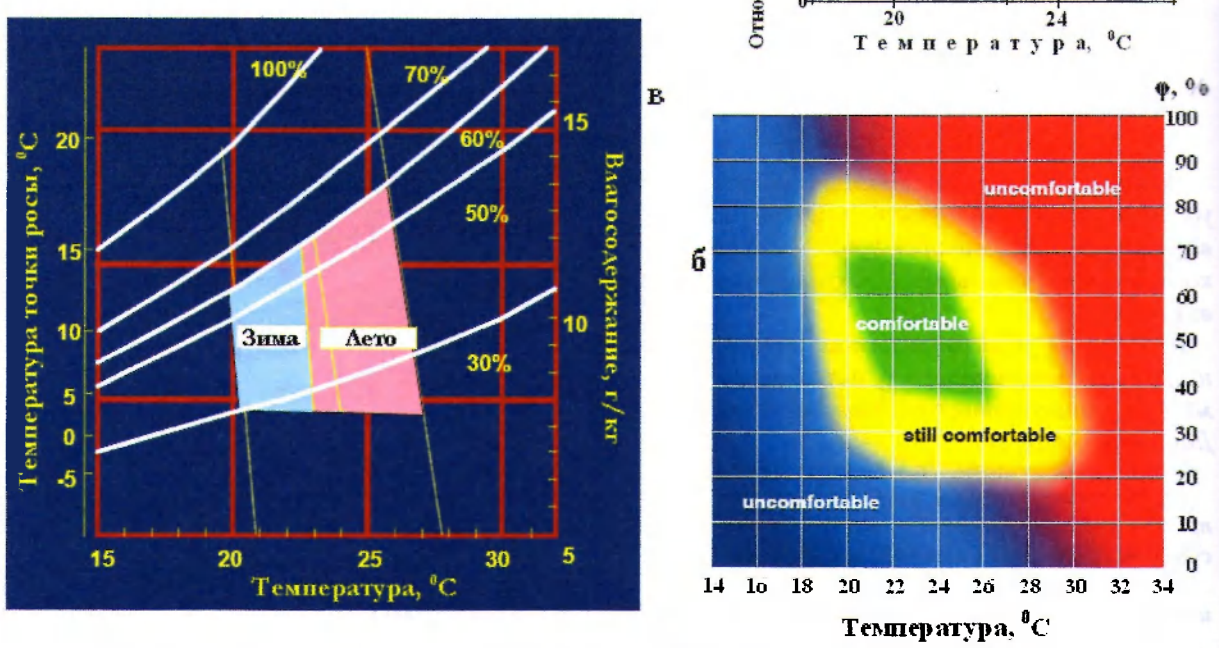


Рис.10.1. Зона комфорта по ISO 7730 (а), CIBSE (б) и ASHRAE 62 (в).

Что же происходит с человеком вне рекомендованного диапазона значений относительной влажности воздуха? Каким же образом эти экстремальные условия сказываются на нашем здоровье?

Типичным примером негативного воздействия низкой относительной влажности является дискомфорт и головные боли пассажиров трансконтинентальных авиалайнеров в течение

длительного полета, продолжающегося 7…12 часов, на высоте до 12 тыс. м при температуре забортного воздуха -50…-70 ^{0}C, когда значения φ в салоне снижаются до 3…8 % [217]. Аналогичные проблемы возникают у пассажиров поездов дальнего следования в зимнее время, особенно в северных широтах (Россия, северо-западные районы Китая и др.).

В условиях сухого воздуха объективно возникает проблема у людей, использующих контактные линзы.

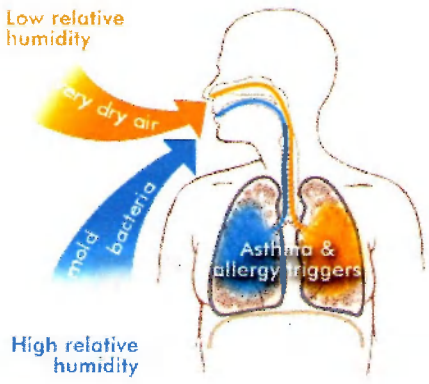
Длительное пребывание человека в условиях с низкой относительной влажностью воздуха (φ < 25%) приводит к негативному воздействию на слизистые оболочки, к их пересыханию, и, соответственно, снижению иммунитета к респираторным заболеваниям и др. [230, 310]. Именно по этой причине в зимнее время чаще проявляются эпидемии гриппа.

Низкая влажность помещений способствует пылеобразованию, в основном от ковровых покрытий, текстиля и пр., что также является одной из причин раздражения слизистых оболочек. Кроме этого частицы пыли – переносчики бактерий [36].

В результате эксперимента проведенного американскими специалистами было установлено, что увлажнение воздуха в помещении способствовало сокращению респираторных заболеваний верхних дыхательных путей на 49 % у детей, содержащихся в детском саду, и на 18 % для служащих (работников офиса).

Повышенная влажность создает благоприятные условия для развития различных микроорганизмов, в т.ч. клещей. Домашний пылевой клещ (0,1…0,5 мм) поселяется в ковровых покрытиях, обивке мягкой мебели и пр., его экскременты, попадая в дыхательную систему человека, приводят к аллергическим заболеваниям.





На рис.10.2 показано влияние влажности воздуха на создание условий, способствующих возникновению респираторных и других заболеваний человека, а также на рост вирусов, бактерий, различных грибов и клещей. Эта стандартная картина наглядно иллюстрирует необходимость поддержания φ в указанных выше пределах [134, 283].

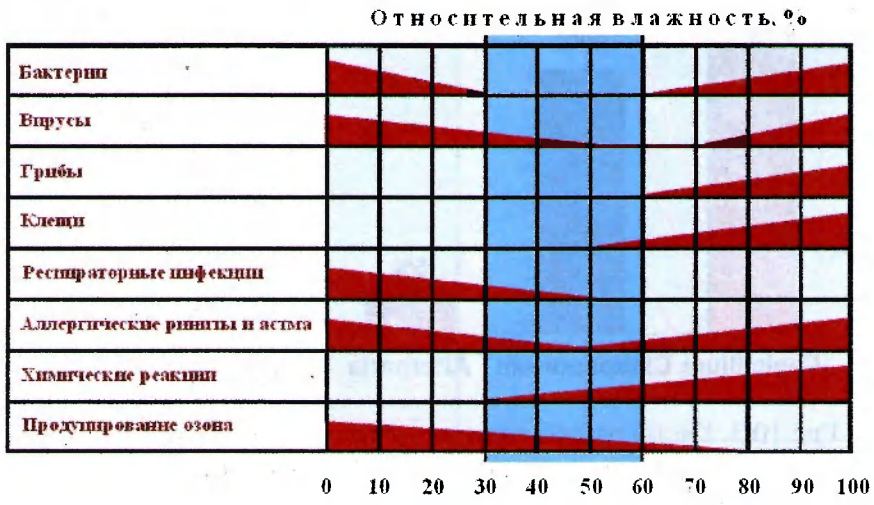


Рис.10.2. Влияние относительной влажности воздуха φ на рост патогенной флоры и заболеваний человека.

"The humans share the planet with mold. They were here before us and will likely be here after us",
Joe Lstiburek, Ph.D., P. Eng., ASHRAE Fellow

"Building air quality degrades for several reasons. However, bacterial or fungal growth in air conditioning systems represents by far the most significant source of introduced biological contaminants",
Ford & Doonan Air Conditioning Systems

10.1. СИНДРОМ «БОЛЬНОГО ЗДАНИЯ» SBS[1]. УСЛОВИЯ И МЕХАНИЗМ ГРИБКОВОГО ПОРАЖЕНИЯ

Невероятно, но факт: 25 % всей биомассы нашей планеты составляют грибы. В настоящее время идентифицировано более 100000 разновидностей грибов (рис.10.6, 10.7).

На рис.10.3 показано характерное распределение грибов в наружном и внутреннем воздухе [240], а на рис.10.4 и рис.10.6 обобщенные данные по благоприятному температурно-влажностному режиму и времени созревания грибковой плесени.

Типичный гриб, ответственный за запах плесени и аллергические реакции человека в больном здании, – Aspergillus (рис.10.6, 10.8) процветает при $\varphi > 70$ %. В этих же условиях повышенной влажности наблюдается высокая жизнеспособность многих опасных для человека вирусов и бактерий, например, Полиемилита и Легионеллы (рис.10.5).

Температурный диапазон роста большинства грибков 0…60 ^{0}C. Оптимальные значения температуры для грибков Aspergillus (рис.10.9) и Penicillium 25…28 ^{0}C[2].

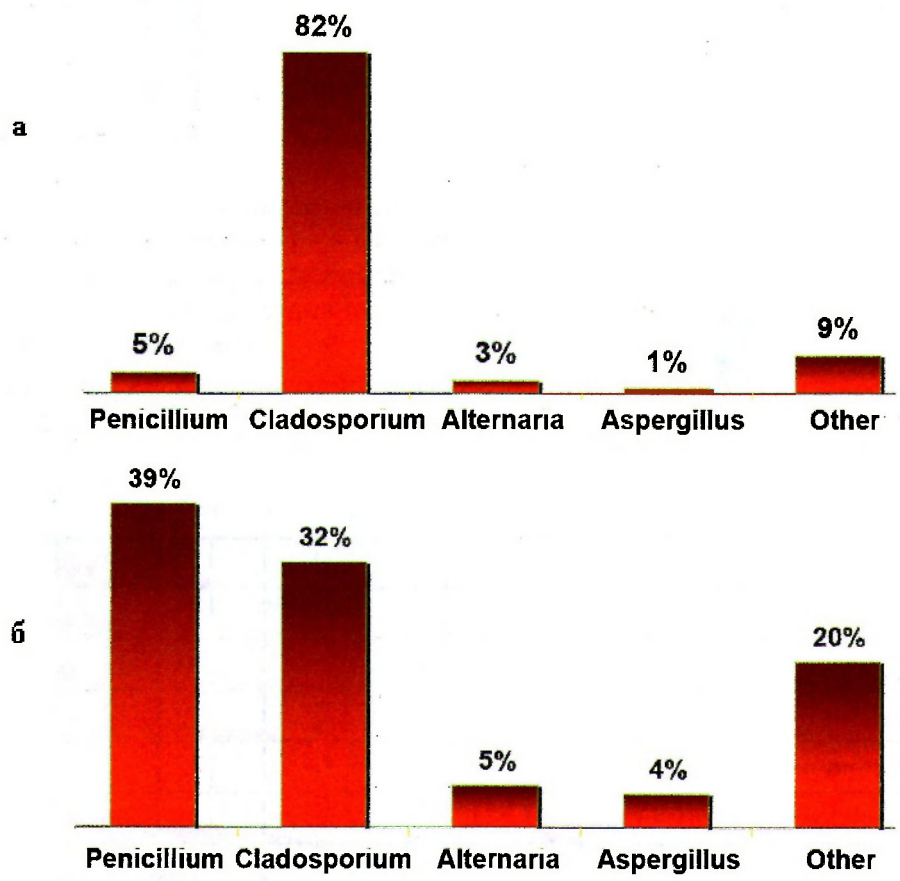


Рис.10.3. Гистограммы типичного распределения грибов в наружном (а) и внутреннем воздухе (б).

[1] см. также § 1.2
[2] БМЭ, М.: Советская Энциклопедия, 1981, т.15, с.168

а

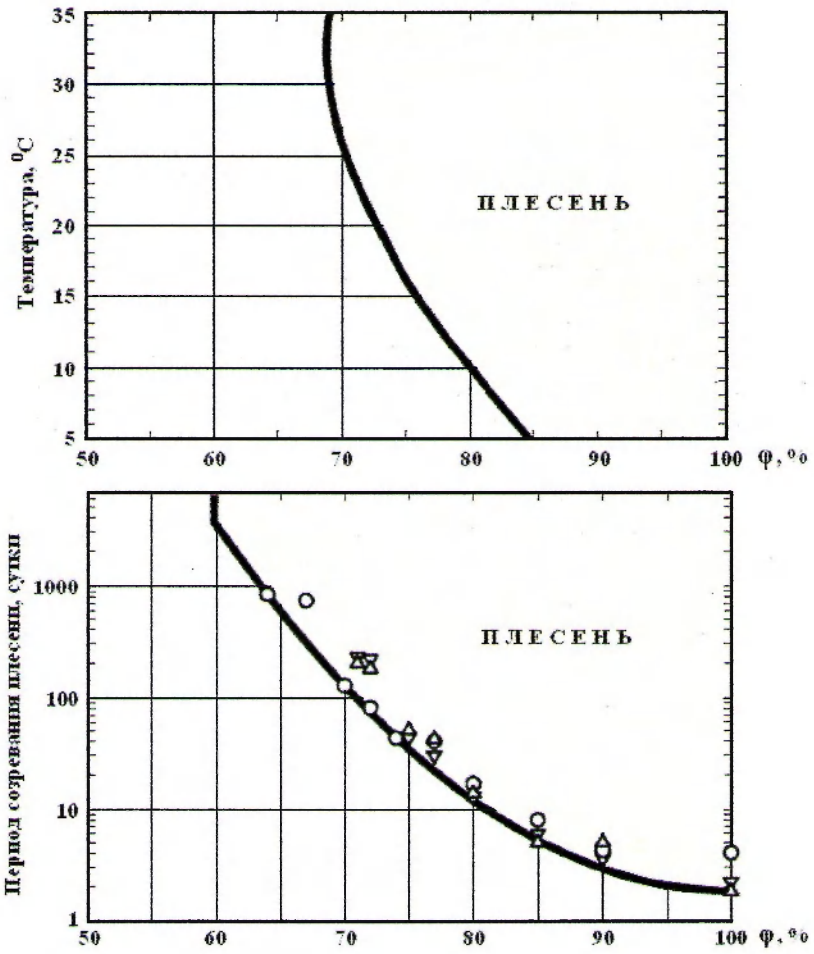


Рис.10.4. Температурно-влажностные условия возникновения видимой плесени (за 100…200 дней) – а, и данные по периоду ее созревания – б [300]:

Δ, ○ – экспериментальные данные Snow and all, 1944.

* см. также § 1.2

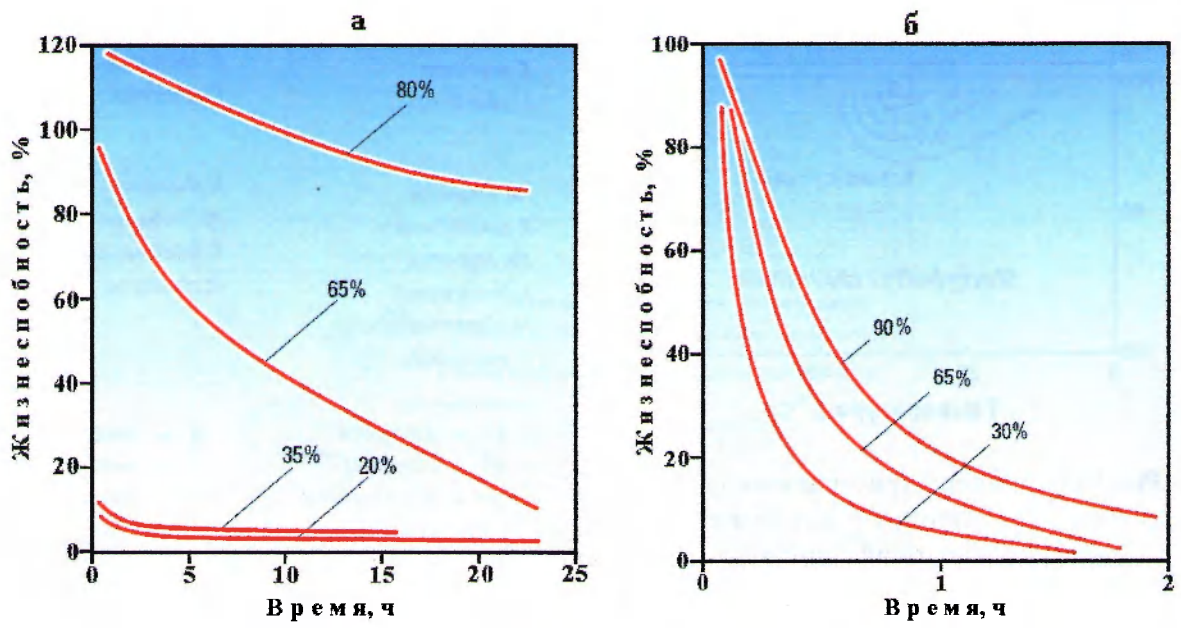


Рис.10.5. Влияние относительной влажности и временной экспозиции на жизнеспособность палочек Полиомиелита (а) и Легионеллы (б) [227].

На рис.10.6 приведены данные по наиболее распространенным грибам, присутствующим в окружающей воздушной среде, а для некоторых колоний грибов, таких как Aspergillus rubber, Penicillium cyclopium, Stacbybotrus cbartarum, – показан темп их роста в мм/сутки.

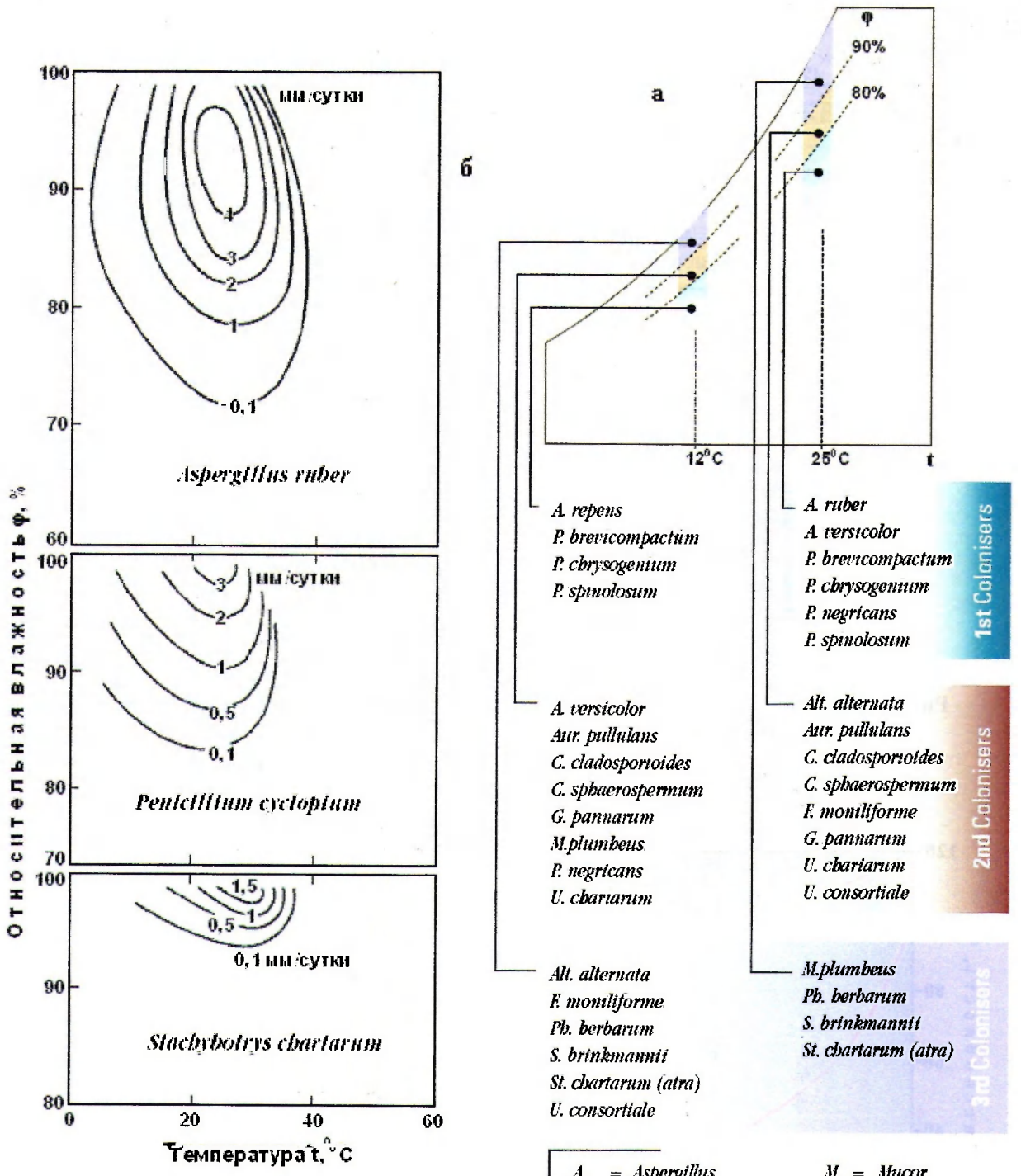


Рис.10.6. Температурно-влажностные условия, благоприятные для развития типичных колоний грибов (а) и изоплеты темпа их роста (б) [234].

Механизм роста грибковой плесени на влажных поверхностях состоит из 4 стадий (рис.10.7). Наиболее важной в процессе контроля влажности в зданиях и системах кондиционирования воздуха является первая начальная стадия, на которой еще можно эффективно предотвратить рост плесени. Уже на второй стадии образуются тонкие длинные нити – гифы, которые не только прочно закрепляются на поверхности, но и проникают в объем материала. Именно поэтому простым механическим способом очистки поверхности не удается избавиться от грибкового поражения. На третьей стадии образуется мицелий – вегетативное тело, которое обладает свойством самосохранения даже в условиях сухого окружающего воздуха. Четвертая стадия – стадия воспроизводства миллионов спор, которые, попадая в воздух, создают своеобразные «плесневелые ароматы», характерные для СКВ, работающих во влажном климате [234].

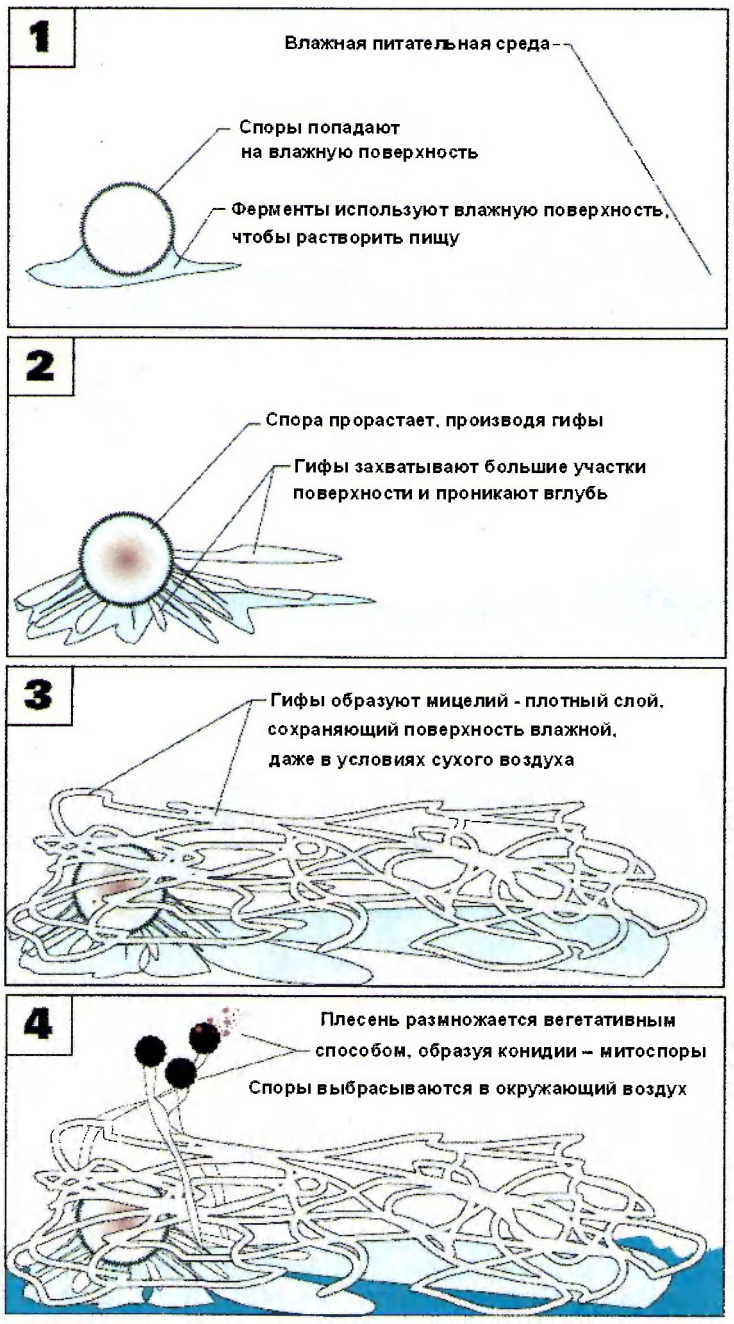


Рис.10.7 Схема размножение грибковой плесени [234].

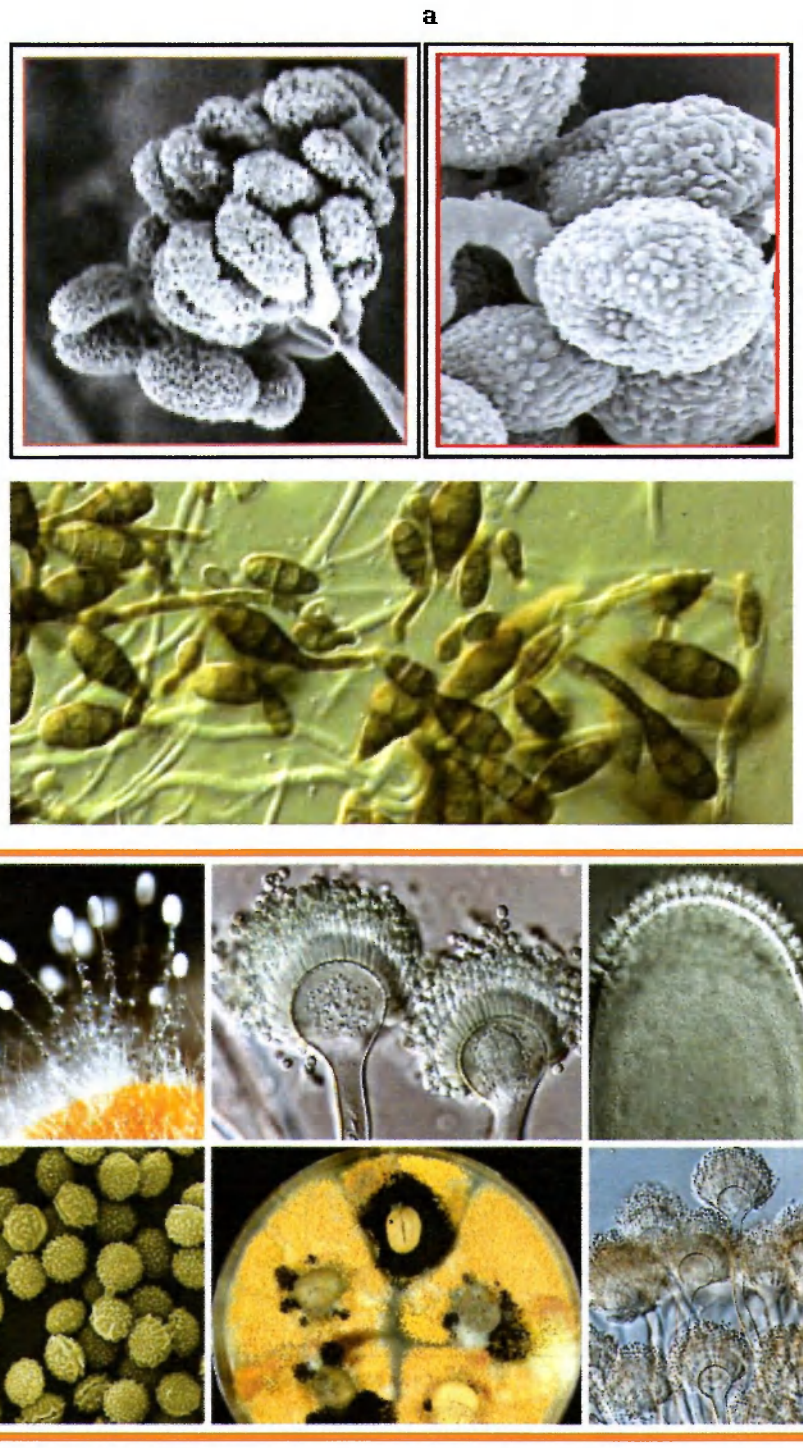


Рис.10.8. Фотографии грибов рода:
а – Stachybotrys (Black Mold), б – Alternaria,
в – Mucor, Ulocladium, Penicillium Sp., A. fumigatus и др. [126, 269].

Споры плесневых грибов Аспергиллус (рис.10.8, табл.10.1) содержат микотоксины и представляют опасность для людей с ослабленной иммунной системой, вызывая заболевания легких.

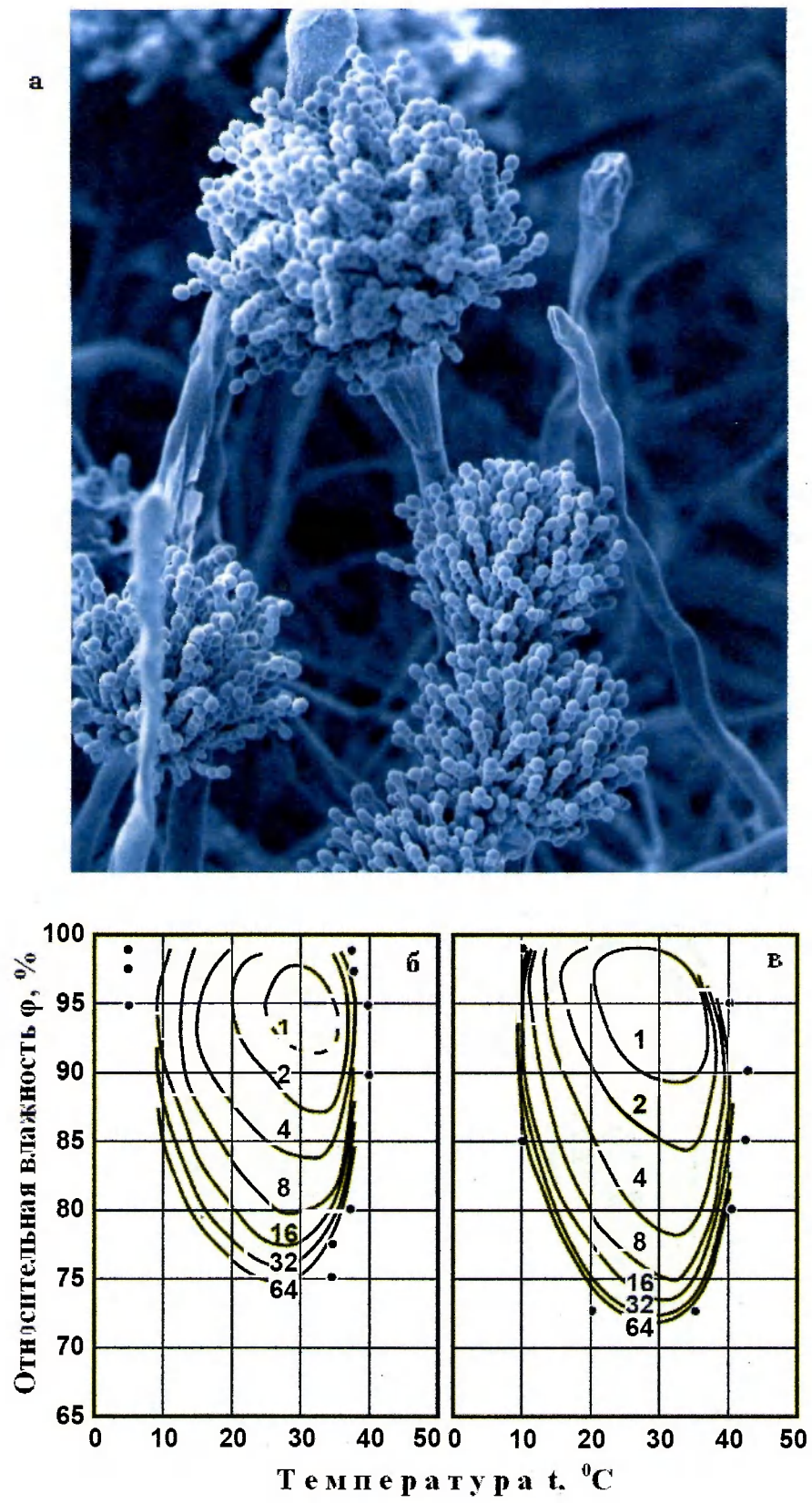


Рис.10.9. Фотография грибов рода Aspergillus versicolor (а) и изоилеты времени (в сутках) созревания колоний: Aspergillus versicolor (б); Aspergillus restrictus (в) [241].

Аспергиллус (Aspergillus) развиваются на любых поверхностях при наличии соответствующих влажностных условий. Это происходит, как правило, в объектах кондиционирования из-за выпадения конденсата на окнах и стенах (при плохой изоляции), недостаточной вентиляции помещений, а также при выпадении влаги на трубопроводах, в воздуховодах и фильтрах систем вентиляции и кондиционирования воздуха, нарушении регламента обслуживания тепломассообменного оборудования и пр. (рис.10.10, 10.11) [214, 250, 279].

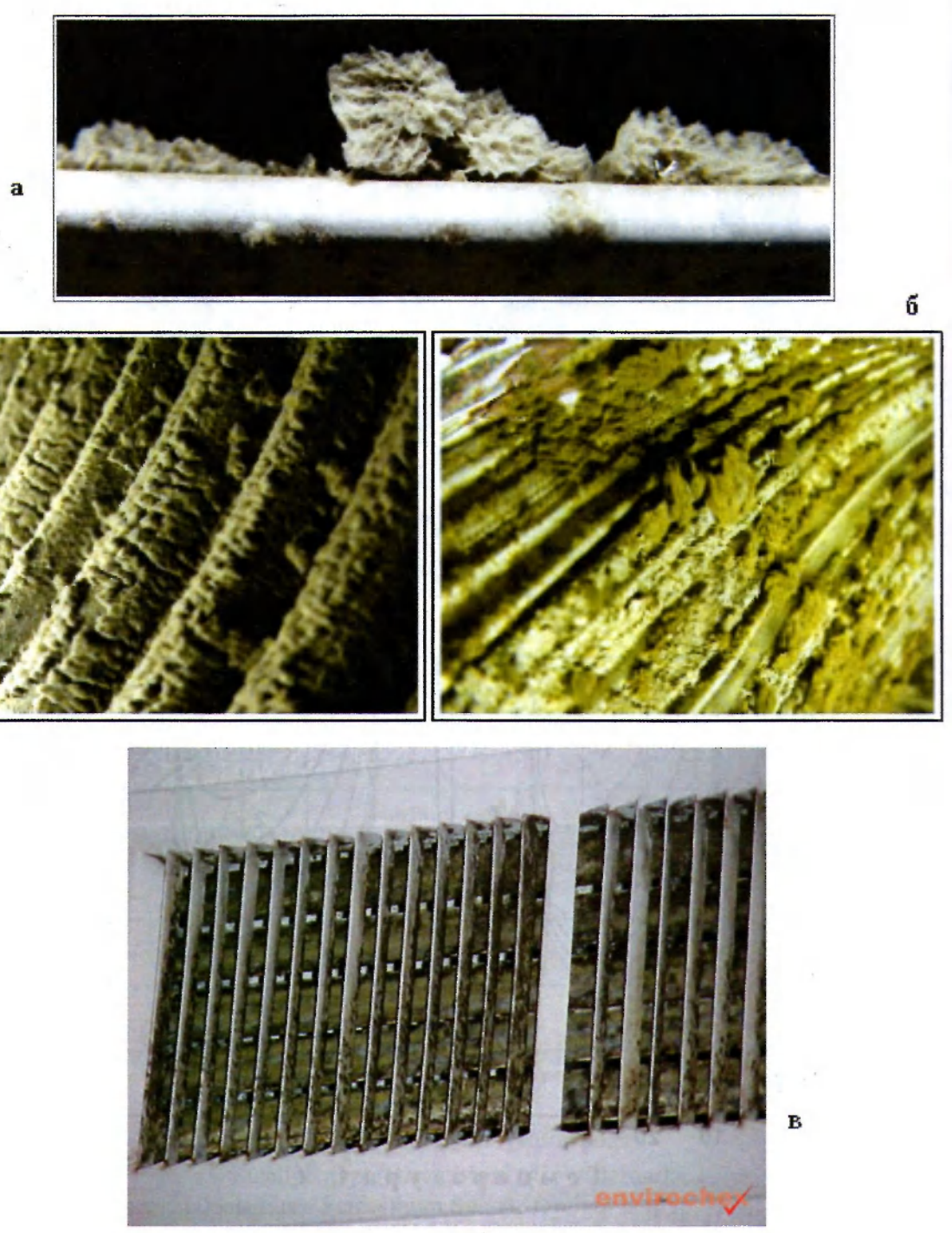


Рис.10.10. Поражение плесневыми грибами неизолированных трубопроводов (а), гофрированных пластиковых воздуховодов (б) [279], входной воздушной решетки* (в).

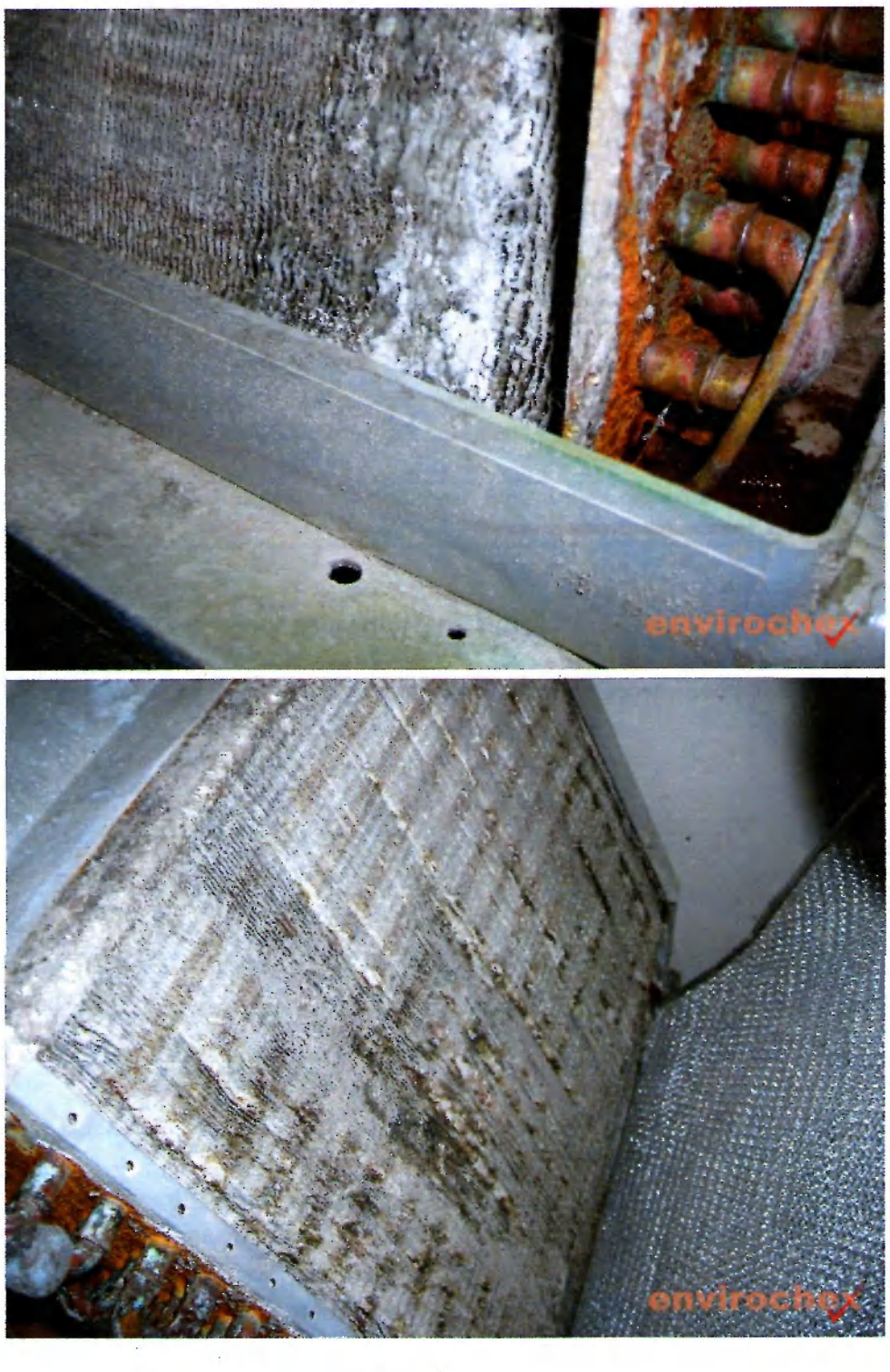


Рис.10.11. Фотографии воздухоохладителя
с трубчато-ребристой поверхностью,
пораженной плесенью*.

*www.envirochex.com/PhotoGallery.htm (Photo Gallery 2: Contaminated HVAC Systems)

На рис.10.12, 10.13 приведены данные по росту плесневых грибов в воздушных фильтрах и на поверхности воздухоохладителей СКВ за период эксплуатации (данные австралийского исследовательского центра Novapharm Research PTY Ltd, 2000 - 2001 г.).

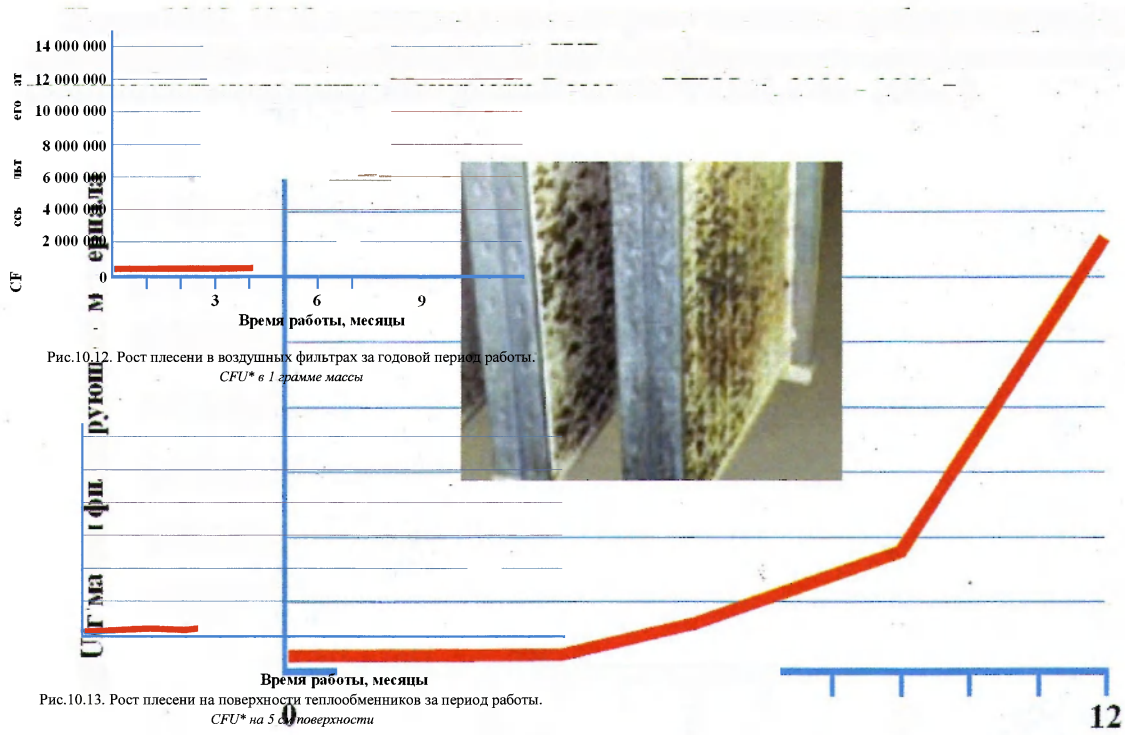
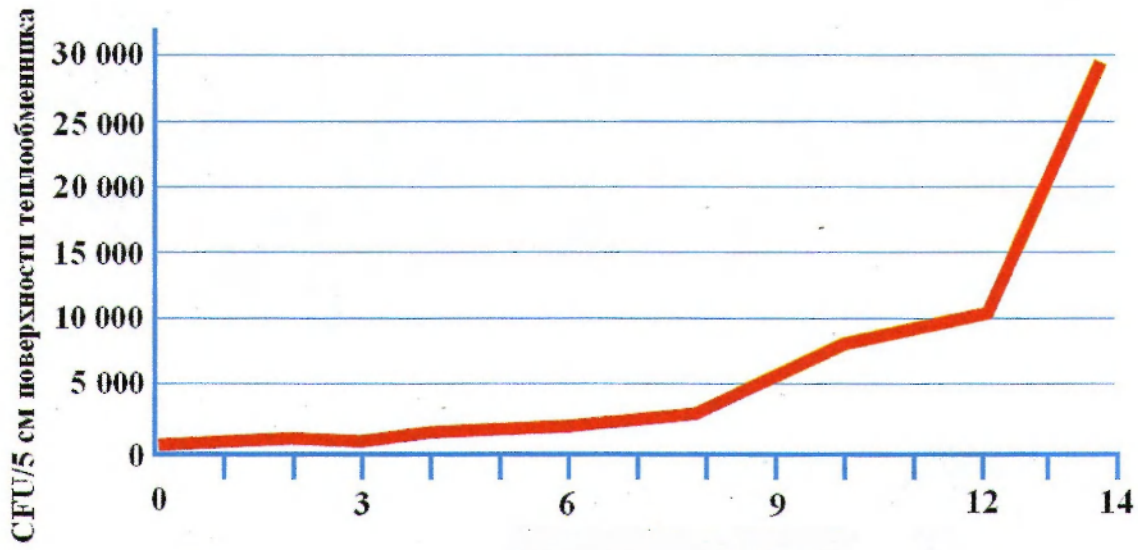


Рис.10.12. Рост плесени в воздушных фильтрах за годовой период работы.
CFU в 1 грамме массы*



Время работы, месяцы

Рис.10.13. Рост плесени на поверхности теплообменников за период работы.
CFU на 5 см² поверхности*

* CFU – colony forming unit – ячейка, формирующая колонии

В настоящее время не существует официальных норм (стандартов) в отношении количественных показателей допустимого присутствия грибков в воздухе, из-за различного восприятия их человеком. Однако, в результате многочисленных наблюдений, зафиксировано, что наличие 150…1000 cfu в одном кубическом метре воздуха – опасно для здоровья человека. Таким образом, здания, в которых количество ячеек, формирующих

колонии грибков более 1000 cfu/м^3 можно считать больными, а данный показатель – одним из критериев синдрома больного здания SBS.

Исследование японских ученых уровня грибкового поражения воздушных фильтров автомобильных кондиционеров, проведенное в г. Осака летом 2002 г., выявило превышение 1000 cfu/м^3 у 24 % и 2000 cfu/м^3 у 13 % из 111 объектов [250].

Негативное воздействие грибков, находящихся во внутреннем воздухе помещений на человека, затрагивающее его здоровье, проявляется в том, что они выступают в качестве аллергенов, токсичны и передают инфекцию.

Известно более 70 аллергенов, продуцируемых грибковыми спорами, размерами ≤ 0,3 мм. Грибы – производители большой разновидности токсических химических веществ – микотоксинов, оказывающих нефротоксический и канцерогенный эффект. Большая группа грибов: Candida, Histoplasmosis, Cryptococcus, Blastomyces, Coccidioides, – источники серьезных инфекционных заболеваний.

В таблице 10.1 приведены данные для 7 типичных семейств грибков с указанием характерных мест прорастания в зданиях, а также веществ, выделяемых в процессе их жизнедеятельности, и возможных заболеваний человека в связи с ними.

Таблица 10.1. Данные о воздействии некоторых грибков на человека [240].

Наименование грибка	Субстрат	Продукты метаболизма	Воздействие на здоровье человека
Alternaria alternata	влажные подоконники и стены	аллергены	астма, аллергия
Aspergillus ersicolor	влажная древесина, обойный клей	микотоксины, VOCs*	неизвестно
Aspergillus fumigatus	бытовая пыль, герметики	аллергены, микотоксины	астма, риниты, пневмонии (в т.ч. инфекционные)
Cladosporium herbarum	влажные подоконники, древесина	аллергены	астма, аллергия
Penicillium chrysogenum	влажные обои, под краской	микотоксины, VOCs*	неизвестно
Penicillium expansum	влажные обои	микотоксины	нефротоксичность
Stacbybotrus chartarum	мокрые ковры, гипсовые конструкции	микотоксины	дерматиты, раздражение слизистых оболочек

* VOCs – volatile organic compounds – летучие органические соединения

Основная рекомендация по предотвращению поражения плесневыми грибами объектов и систем кондиционирования воздуха – поддержание необходимого температурно-влажностного режима.

При наличии 2-ой и более высоких стадий развития грибковых образований необходимо применение установок ультрафиолетового излучения и озонирования [212, 254, 297], рис.10.14 (см. § 10.2).



Рис.10.14. Секция UV-обеззараживания, устанавливаемая перед воздушными фильтрами.

10.2. ПРОБЛЕМА ЛЕГИОНЕЛЛЫ

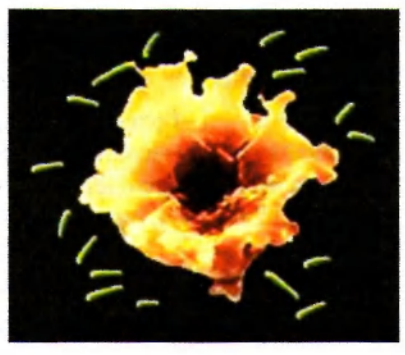
В последние два десятилетия возникло и до 2004 года преобладало настороженное отношение к процессам увлажнения (испарительного охлаждения) воздуха вообще, и оборотной водой в частности, в связи с рядом случаев тяжелых заболеваний людей, инфицированных палочкой Легионелла посредством СКВ. Оборотная контаминированная вода была идентифицирована как возможный источник возникновения бактерий, опасных для здоровья человека. В связи с этим ужесточены требования по чистоте воды, используемой для обработки воздуха. При этом наметилась тенденция отхода от оборотного цикла и перевод аппаратов на режим питания свежей проточной водой высокого качества.

Заболевание человека, известное, как «болезнь легионеров» (Legionnaire's disease, LD), возникает за счет бактериальной инфекции Legionella pneumophila (от греч. pneumo – легкое, и philos – любить) и вызывает пневмонию в тяжелой форме. Legionella pneumophila – наиболее опасная бактерия рода Legionella (от нее происходит 90 % случаев заболеваний, связанных с бактериями данного рода). Род Легионелл насчитывает 40 типов бактерий, половина из которых способна оказать негативное воздействие на здоровье человека. По данным центра контроля болезней CDC, ежегодно от Legionella pneumophila заболевают до 40000 человек (это составляет 15 % от всех случаев пневмоний) с летальным исходом 10…19 % при спорадических (одиночных) случаях и от 5 % до 30 % при эпидемии. Меньший нижний предел смертности при вспышке болезни объясняется установлением правильного диагноза на более ранней стадии (распознавание легионеза достаточно сложный процесс). В тяжелых случаях течения болезни, требующих применения системы искусственного дыхания и диализа, смертность может достигать 67 %.

Бактерии рода Legionella обитают в грунте и в естественных водоемах в небольших количествах. Открытая водная система градирен, испарительных конденсаторов, брызгальных водоохлаждающих бассейнов с оборотной водой высокой температуры, а также декоративных фонтанов (с теплой водой, нагретой в летний солнечный день) (рис.10.15) идеальна для быстрого роста этих бактерий. С потоком воздуха в воду поступает различный органический материал: насекомые, листья, опилки и пр. Органика накапливается в водяных баках аппаратов в виде биологической пленки и служит питательной средой для простейших микроорганизмов-сапрофитов (например, амеб), а они являются пищей Легионелл (рис.10.15, 10.16). Инфицирование амеб происходит достаточно быстро: менее чем за 2 суток (рис.10.17).



Рис.10.15. Декоративный фонтан – среда обитания Легионелл.



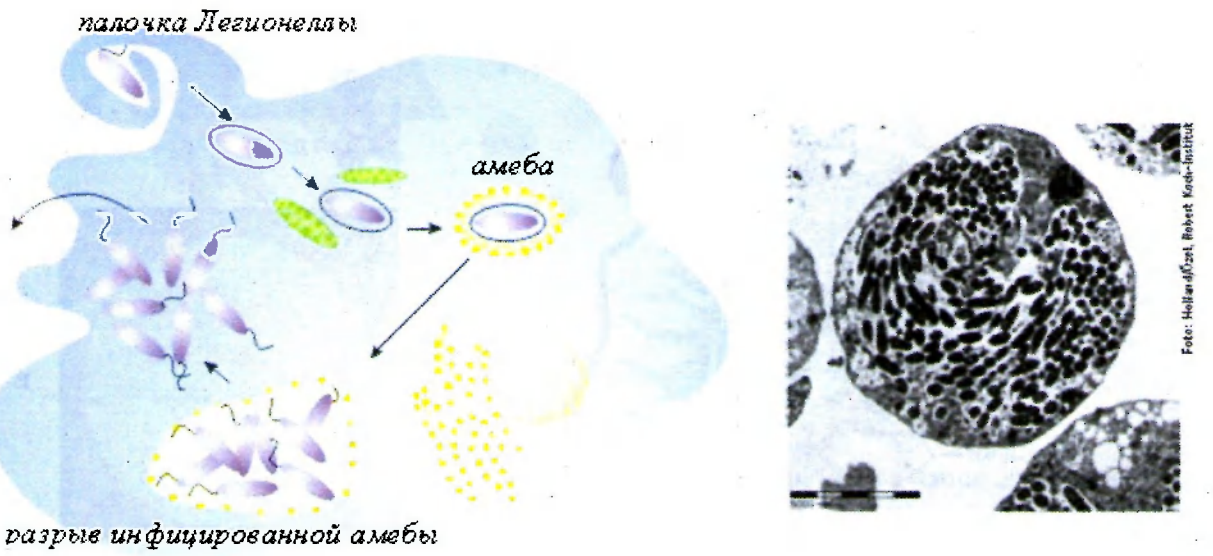


Рис.10.16. Схема заражения амебы палочками Легионеллы и фотография инфицированной амебы (справа) [129].

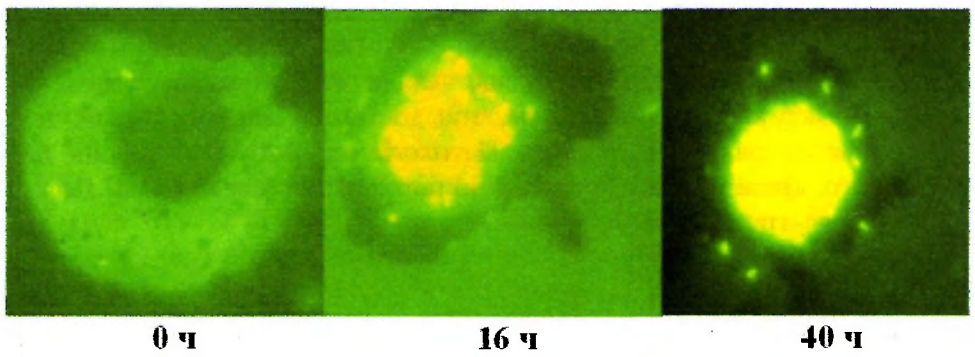
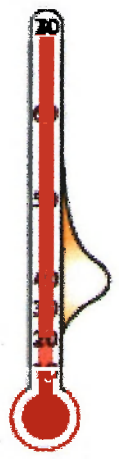


Рис.10.17. Динамика размножения Легионеллы в амебе Acanthamoeba castellanii (микрофотографии Dr. Lück, TU Dresden) [267].



При попадании в человеческий организм Легионеллы уничтожают фагоциты (phagocytic, греч. phagos – пожирающий) – клетки, поглощающие и убивающие патогенные микробы, т.е. *Легионеллы подрывают иммунную систему человека.*

Рост бактерий Legionella зависит от температуры воды. Наиболее благоприятные условия в диапазоне 35…46 °С (pH = 5…7). В этих условиях интенсивно размножаются: цикл генерации составляет 99 минут. При $t_w \geq 70$ °С все палочки Легионеллы мгновенно погибают. 90 % бактерий погибает при: $t_w = 60$ °С и двухминутной экспозиции, $t_w = 50$ °С за 2 часа. В водной среде с $t < 20$ °С бактерии находятся в спящем состоянии, однако при этом они жизнеспособны [211].

Легионелла – грамотрицательная аэробная палочкообразная бактерия (рис.10.18) с типичными размерами: длина – 1,3 мкм, диаметр 0,3…0,9 мкм. Может вырастать до 2…6 мкм и образовывать нити длиной до 20 мкм. Срок жизни – 12 месяцев.

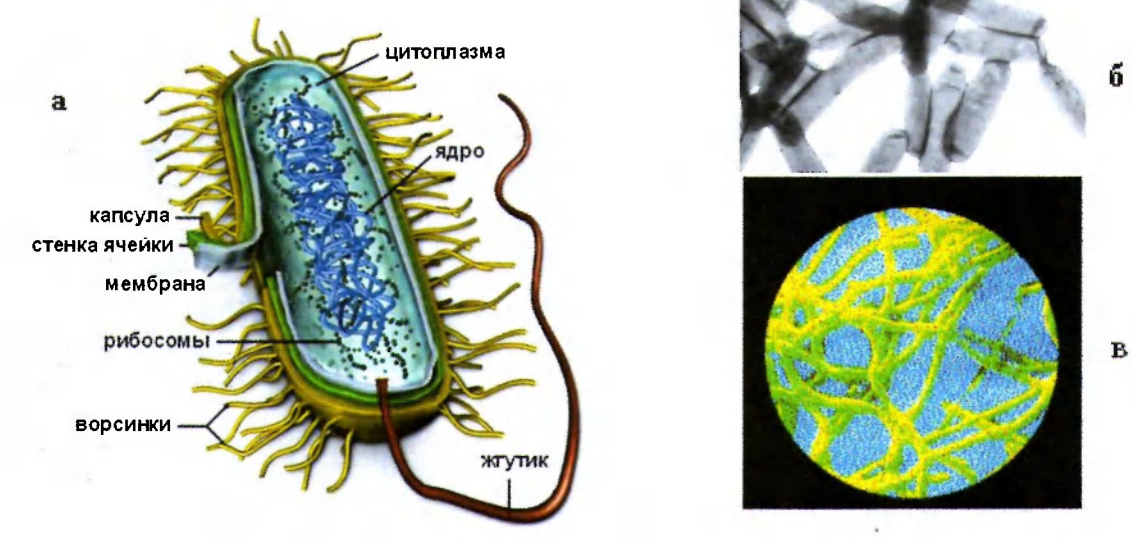


Рис.10.18. Структура грамотрицательных бактерий (а),
колонии палочек (б) и нити (в) Legionella pneumophila.

Следует заметить, что процесс заражения человека происходит аэрогенным (воздушно-капельным и воздушно-пылевым) путем (рис.10.19, 10.20). При этом переход бактерий из воды в воздух возможен только с каплями определенного размера. Благоприятный размер (диаметр) капель: 2…10 мкм. В этом случае они достаточно велики, чтобы переносить бактерии, и достаточно малы, чтобы оставаться в воздухе в виде суспензии [62]. Если размер капли менее 5 мкм, они достигают альвеол легких человека. Большие размеры оседают в трахее (рис.10.19а). Патологический процесс хорошо виден на фотографии поперечного среза ткани (рис.10.19б), пораженной бактериями Легионелла, полученной с помощью электронного микроскопа.

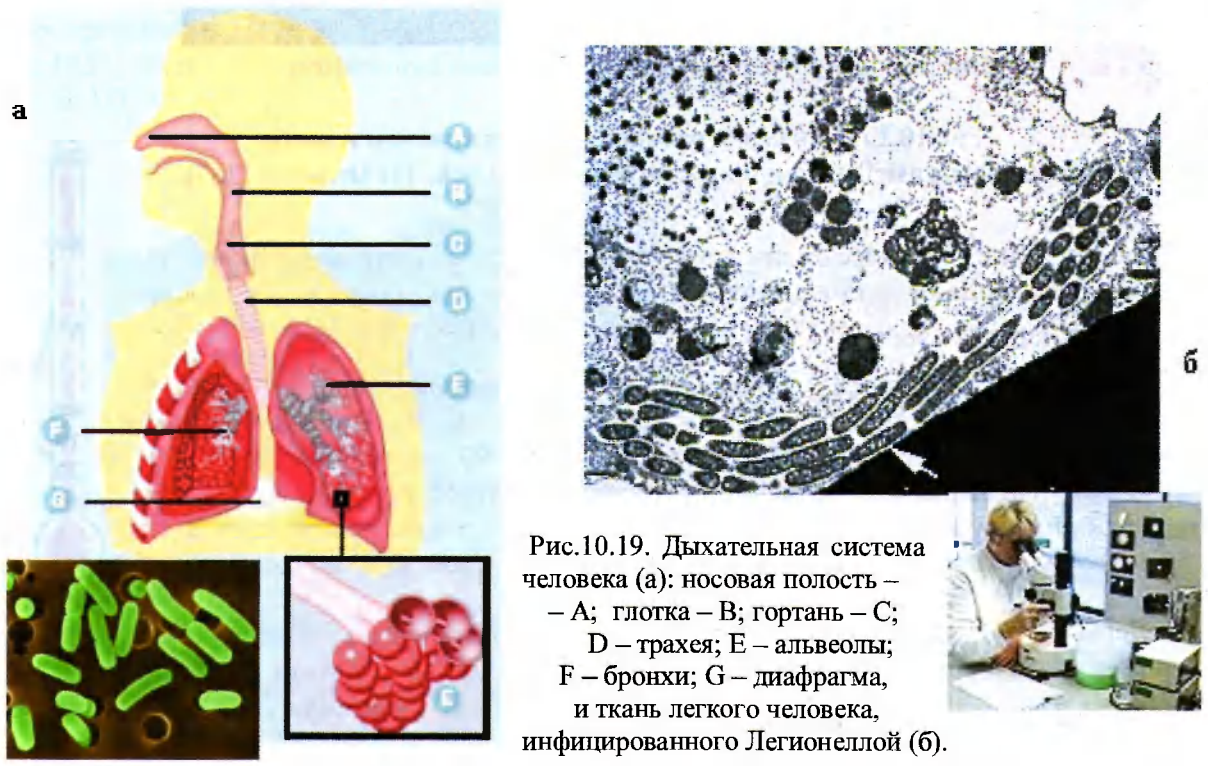


Рис.10.19. Дыхательная система человека (а): носовая полость – – A; глотка – B; гортань – C; D – трахея; E – альвеолы; F – бронхи; G – диафрагма, и ткань легкого человека, инфицированного Легионеллой (б).

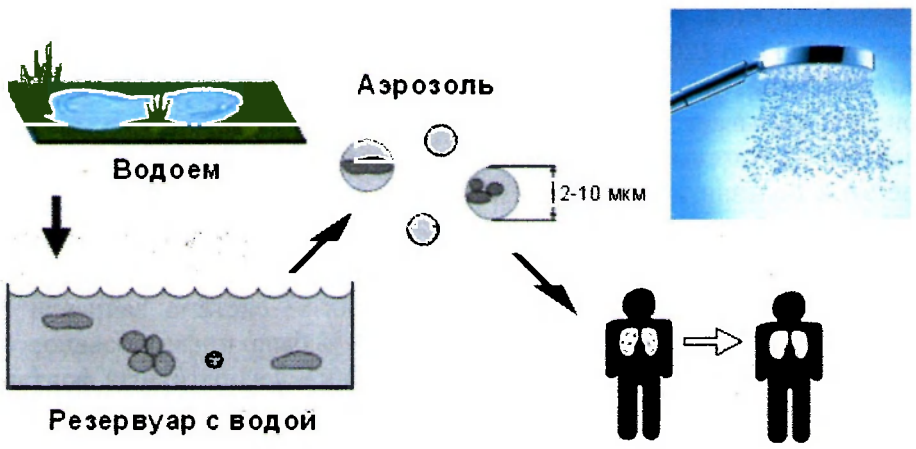


Рис.10.20. Схема заражения человека Легионеллой воздушно-капельным путем.

Нет никаких подтверждений заболевания от глотания зараженной воды либо от человека к человеку

Исследования качества воздуха после увлажнения его в пленочном аппарате испарительного типа, проведенные в течение 8 дней на загрязненной воде с наличием в ней контролируемого числа бактерий, не выявили перенос бактерий в воздушную среду [253].

Свое название «болезнь легионеров» получила после зафиксированной в июле 1976 года вспышки тяжелой болезни, охватившей 221 человека (34 умерли), участников съезда американского легиона и членов их семей, по поводу празднования 200-летия Дня независимости США, проходившего в Филадельфии. Поиск источника распространения привел к СКВ гостиницы Бельвью Стретфорд, принимавшей съезд.



В 1977 году Мак-Дейд и Шепард с соавторами выделили из легочной ткани людей, погибших от этой болезни, неизвестную ранее бактерию Legionella pneumophilla и доказали ее этиологическую роль (см. БМЭ, т. 12, М.: Советская энциклопедия, 1980). Ретроспективные исследования вспышек пневмоний неясной этиологии установили, что данное заболевание наблюдалось в разных странах с 1943 года. Даже в Японии, где культура эксплуатации весьма высока, в период 1979…1982 г.г. зафиксировано 38 случаев болезни легионеров. С 1987 года в течение ряда лет наблюдается эпидемиологическая обстановка в Австралии. В 1999-2000 годах волна заболеваний прокатилась по странам Европы: Великобритании, Голландии, Испании, Франции и Турции. В Голландии в 1999 году внезапно заболели 242 посетителей аукциона цветов (умерло 28 человек) [94]. В 2002 году зафиксированы новые вспышки болезни в Англии (Лондон и г. Бэрроу (восточный Йоркшир)). Причем английские случаи свидетельствуют о заражении людей, проходящих по улице мимо решеток каналов удаляемого воздуха от загрязненных систем кондиционирования воздуха. В г. Бэррo*y* наблюдался капельный выброс с потоком воздуха. Узкая пешеходная зона (фото справа) способствовала концентрированию бактерий в воздушной среде.



Проявилась «болезнь легионеров» в 2002 году и в Украине. Зафиксировано 12 заболевших горняков из г. Марганец Днепропетровской области.

В 2007 году в городе Верхняя Пышма (Свердловская область, РФ) от Легионеллы пострадали 167 человек (5 умерло).

Ежегодно регистрируется 100 случаев заболеваний этой болезни в Италии, 250 – в Великобритании, от 6000 до 12000 в Германии, 8000 … 18000 – в США.

Необходимо отметить, что бактерия Legionella pneumophilla, кроме легочной формы болезни легионеров, вызывает также нелегочную форму (менее опасную, по типу гриппа: поражаются верхние дыхательные пути), известную, как «Понтиак лихорадка» – Pontiak fever. Название этой болезни возникло по названию города в штате Мичиган (США), где впервые, в 1968 г., она была замечена (источник заражения – система кондиционирования воздуха (заболело 144 чел.)). Другие случаи заболевания:

- 1981год, г. Виндзор (Онтарио, Канада), источник – система заправки маслом на автомобильном заводе Форда, из 317 рабочих 46 % было инфицировано;
- 1988 год, Санта-Клара (Калифорния, США), источник – декоративный фонтан ресторана на открытой площадке, заболело 94 % посетителей;
- в этом же (1988) году было отмечено массовое заражение людей, принимавших вихревые ванны на курорте в Шотландии.

Кроме этого, отмечены случаи заболевания рабочих, занятых на чистке паровых турбин, пересыпке грунта и др.

Таким образом, Легионеллез периодически проявляется в разных странах и континентах от Северной Америки до Австралии. В Австралии с 1996 года работает нормативный акт учета болезни LD, обязывающий всех, в т.ч. частных предпринимателей, сообщать о случаях заболевания людей.

На рис.10.21 представлены данные по обследованию различных водных систем и устройств на предмет наличия бактерий семейства Легионелла.

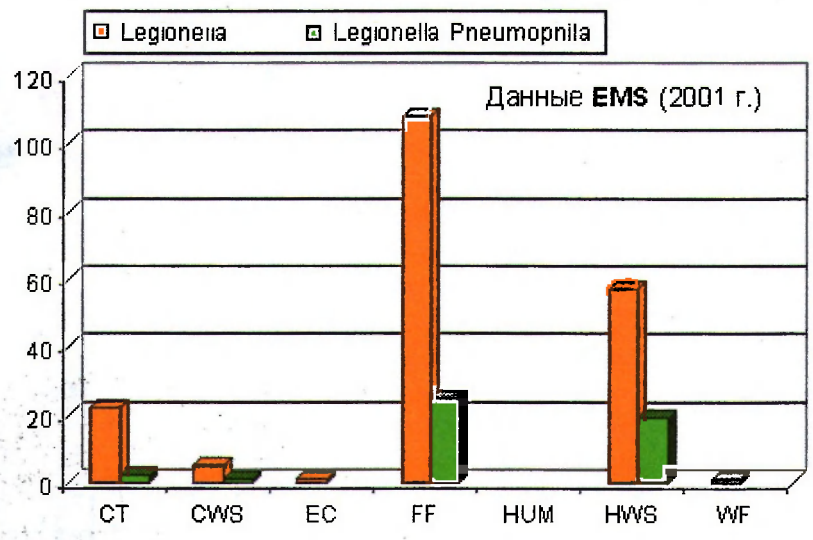


Рис.10.21. Статистика положительных проб воды на Легионеллу, включая L. pneumophila: CT – cooling towers (градирни); CWS – cold water systems (системы холодного водоснабжения); EC – evaporative condensers (испарительные конденсаторы); FF – first flush (паводковые воды); HUM – humidifiers (увлажнители); HWS – hot water systems (системы горячего водоснабжения, ГВС); WF – water features (устройства, создающие эффект водного ручья либо водопада, – используются в офисах и домашних условиях как элемент интерьера и, в определенной степени, в качестве увлажнителя).

Основные местонахождения Легионелл (по данным агентства EMS*): паводковые воды, системы горячего водоснабжения, аппараты испарительного охлаждения воды – градирни (рис.10.22…10.24), испарительные конденсаторы (рис.10.25).

*EMS – environmental monitoring services – бюро контроля окружающей среды (создано в 1986 году в Великобритании), анализирует экологическую обстановку в производственной сфере Европейского сообщества.

Безопасный уровень концентрации Легионеллы определен как:

C_L < 100 CFU на 100 мл воды.

(CFU – colony forming unit - ячейка, формирующая колонии)

Детальное обследование действующих 1407 градирен (не обрабатываемых антибактериальными препаратами) в течение 5 лет в Японии (с 1987 по 1992 год) дали следующие результаты: Легионелла была обнаружена в 856 аппаратах (60,8 %), при этом распределение по концентрации бактерий C_L:

$10 < C_L < 100$ – 73,9 % (219 градирен); $100 < C_L < 100000$ – 25,6 % (63 градирни);
$C_L > 100000$– 0,5 % (4 градирни).



Рис.10.22. Фотографии взятия пробы воды (слева) и работ по очистки градирни (справа).

Больницы являются наиболее уязвимыми объектами с точки зрения возможного заражения пациентов Легионеллами (большое скопление людей с ослабленным иммунитетом). На рис.10.23 представлен фотоматериал по госпиталю Alfred (г. Мельбурн, Австралия), в котором в 2001 году из-за некачественной воды градирен произошла вспышка «болезни легионеров». Градирни были размещены в непосредственной близости - на крыше здания.



Рис.10.23. Крышное размещение градирен и состояние оборотной воды в системе.

На рис.10.24 показана традиционная схема СКВ с отметкой опасной зоны возможного аэрозольного выброса в воздух бактерий Легионеллы (в случае использования градирен).

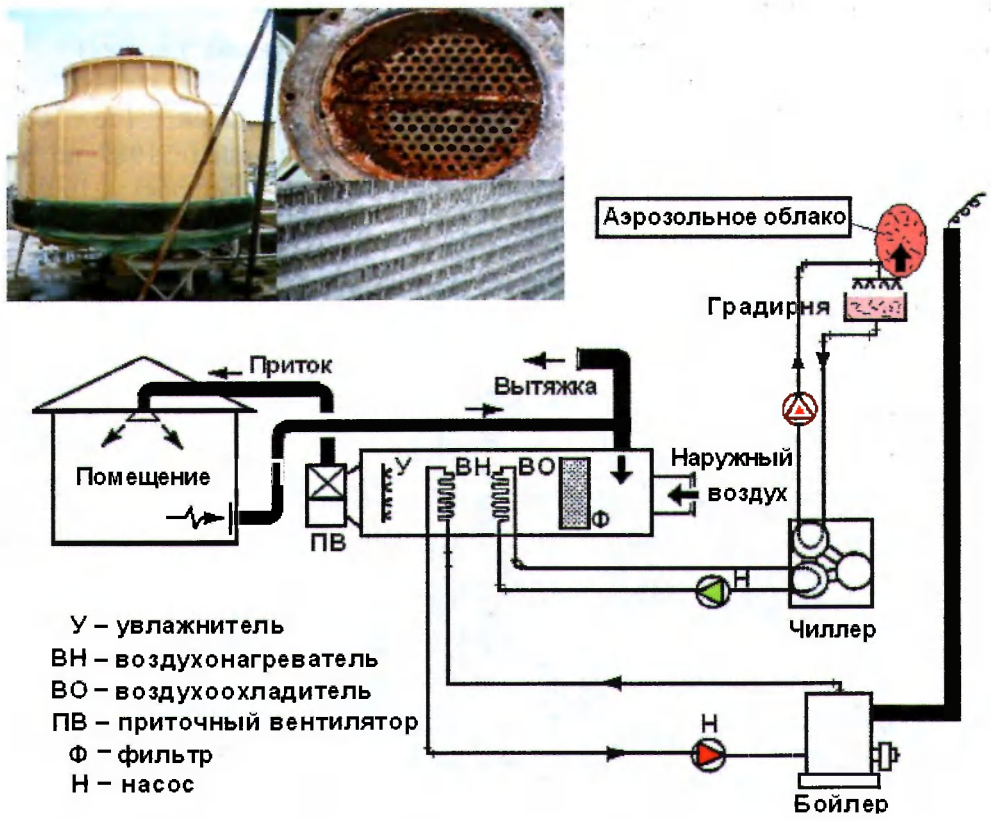


Рис.10.24. Схема центральной системы кондиционирования воздуха и фотография вентиляторной градирни.

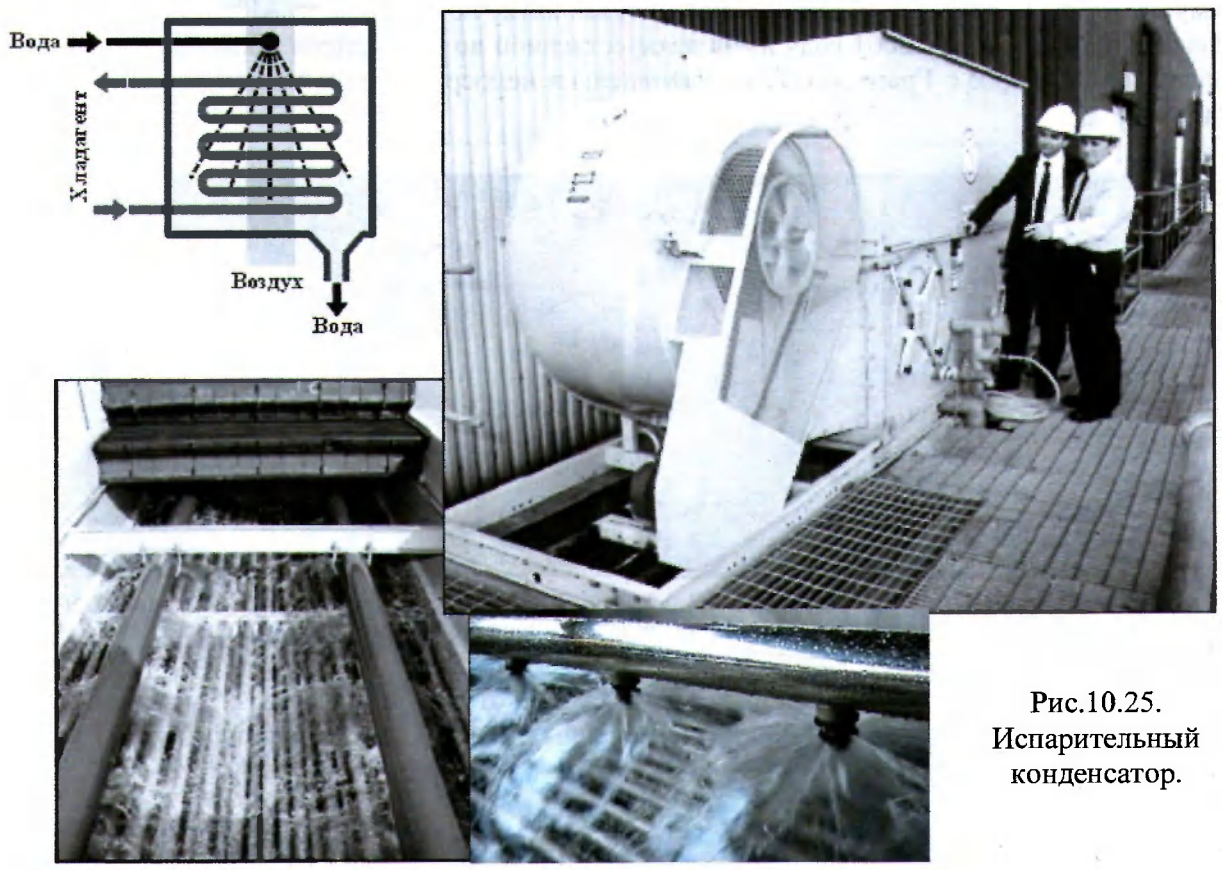


Рис.10.25. Испарительный конденсатор.

На рис.10.26 приведены фотографии (Lisa Fricker, University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC), USA), которые наглядно иллюстрируют потенциально опасное размещение для окружающих зданий аппаратов испарительного охлаждения (градирен, испарительных конденсаторов).



Рис.10.26. Примеры неправильного размещения аппаратов испарительного охлаждения воды.

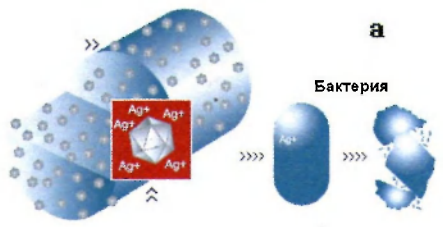
«Интенсивное размножение легионелл возможно в низкотемпературной системе водяного отопления, при аккумулировании горячей воды и наличии редко используемых кранов для нее, аккумулировании холодной воды и использовании водораспылительных насадок, в конденсате воздухоохладителей. Технические решения, направленные на предотвращение размножения легионелл, должны обеспечивать температуру холодной воды ниже 25 °С, аккумулируемой горячей – выше 60 °С, а в распределительной сети – выше 55 °С. Необходима теплоизоляция на всех баках аккумулирования горячей и холодной воды и в распределительных трубопроводах. Длина трубопроводов с низкой степенью циркуляции

воды и трубопроводов горячей воды должна быть минимизирована. Редко используемая водоразборная арматура должна быть «сухой», с прекращением подачи к ней воды.»*

* источник информации указан на с. 482

На основании исследований, проведенных по данной проблеме, Совет директоров ASHRAE принял документ, известный как директива Guideline 12, регламентирующий правила безопасной эксплуатации установок испарительного охлаждения. Основные положения директивы следующие: поддержание и контроль качества воды с использованием антимикробных препаратов; обязательное устройство воздушных фильтров для предотвращения попадания в систему различных органических веществ с потоком воздуха; расположение аппаратов в отдалении от общественных мест с учетом «розы ветров». В соответствии с требованиями стандарта ANSI/ASHRAE 62.1-2007 "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality" (табл.5.1): воздухозаборники наружного воздуха СКВ зданий должны быть отдалены от точки выброса воздуха из градирен и испарительных конденсаторов не менее чем на 7,5 м, а от входа в эти аппараты – на 5 м.

В качестве средств антибактериальной защиты, в настоящее время, предлагается серебряно-медная ионизация воды, обработка ультрафиолетом, диоксид хлора ClO_2 (компании WEDECO, Grunbeck Wasseraufbereitung, Halox Technologies Corp.и др.).



Насыщение воды йонами серебра и меди (при концентрации Ag 0,02…0,04 мг/л, Cu 0,2…0,4 мг/л) оказывает весьма эффективное воздействие на бактерии, блокируя их дыхание и метаболизм (рис.10.27). Однако такие установки имеют высокую стоимость от 6000 до 134000 $, что сдерживает их массовое применение.

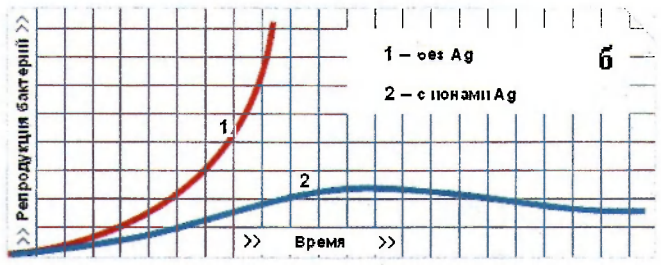
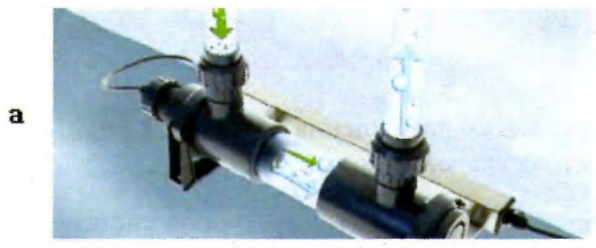


Рис.10.27. Схема обработки воды ионами Ag (а) и воздействие на уровень репродукции бактерий (б).

Широкое распространение получили установки с ультрафиолетовыми лампами (рис.10.29), излучение которых наиболее эффективно в UV-C диапазоне с длиной волны 254 нм (рис.10.28, 10.29). При этом наблюдается разрушение более 99,99 % практически всех патогенных бактерий, содержащихся в воде. В отношении Legionella pneumophila эффективность работы UV-установки 90 %, при дозе излучения 2.04 мДж/м^2. Лампы ртутные низкого давления генерируют ультрафиолетовое излучение с λ = 250…280 нм, обеспечивая биоцидное воздействие на нуклеиновую кислоту и ДНК бактерий, т.е. на генном уровне.



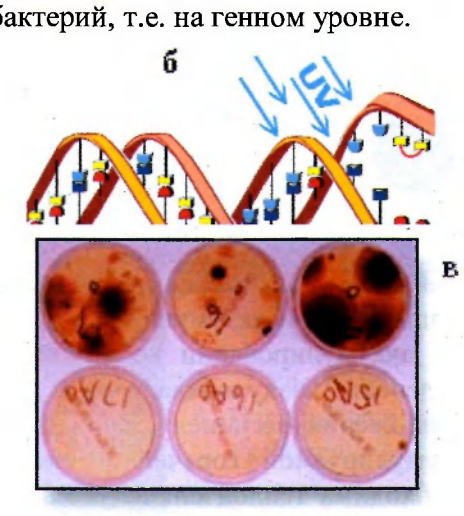


Рис.10.28. Обработка воды ультрафиолетовым излучением в установках WEDECO UV technology (а): схема биоцидного воздействия – б; результаты UV–излучения на образцы бактерий в чашках Петри (верхний ряд – до…, нижний ряд после облучения, соответственно) – в.

Ультрафиолетовые лампы не имеют физического контакта с водой, они заключены в стеклянную колбу из кварцевого стекла, которое в процессе работы должно быть чистым для адекватной передачи волновой энергии. Поэтому вода требует предварительной фильтрации на уровне содержания взвешенных частиц ≤ 60 мг/л. Для предотвращения образования биопленки рекомендуется периодическая ревизия системы с локализованным гиперхлорированием приспособлений и системы трубопроводов.

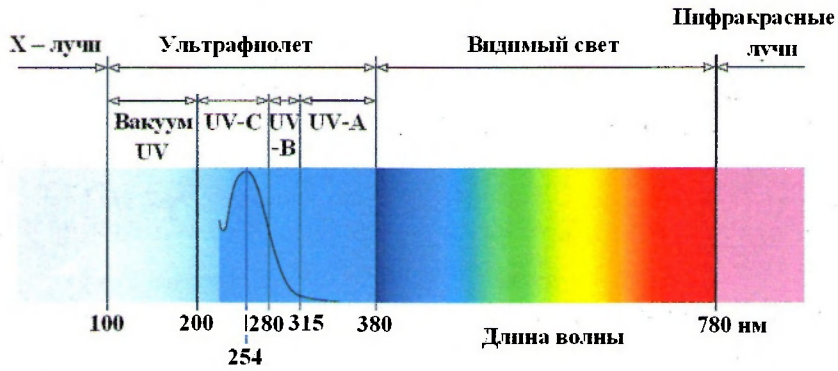


Рис.10.29. Эффективность ультрафиолетового излучения по разрушению бактерий в диапазоне длины волны $\lambda = 200…400$ нм с максимумом, отвечающем $\lambda = 254$ нм.

«Трудность профилактической борьбы с легионеллами в местах их возможной очаговой дислокации вне организма человека состоит в том, что размножаются они в теле амеб. Так, при заборе проб на установках ГВС в домах в литре горячей воды обнаруживается до 300 амеб, служащих патогенным бактериям не только средой обитания и размножения, но и защитой от дезинфекции – например, хлором. Амебы устойчивы также к термической дезинфекции и облучению ультрафиолетом. Скрывая в своих телах легионеллы, они не позволяют обнаружить их при анализе воды.»*

Для решения этой проблемы компания Grunbeck Wasseraufbereitung разработала систему Geno-Break, основанную на последовательной обработке воды в блоках ультразвукового и ультрафиолетового излучения (рис.10.30).

«На первом этапе очистки происходит разрушение амебы. При обработке воды ультразвуком в ней образуются кавитационные пузырьки диаметром около 100 мкм, «схлопывающиеся» через некоторое время под действием наружного давления. При этом в жидкости возникают локальные микрообласти высоких температур и давлений, разрушающие находящиеся в воде частицы и микроорганизмы. Тела амеб вскрываются и разрушаются до отдельных фрагментов. Во время второго этапа «освобожденные» (лишенные защиты) легионеллы частично уничтожаются ультрафиолетовым излучением. При длине его волны 254 нм также повреждается наследственный материал микроорганизмов, делая их неспособными к размножению.

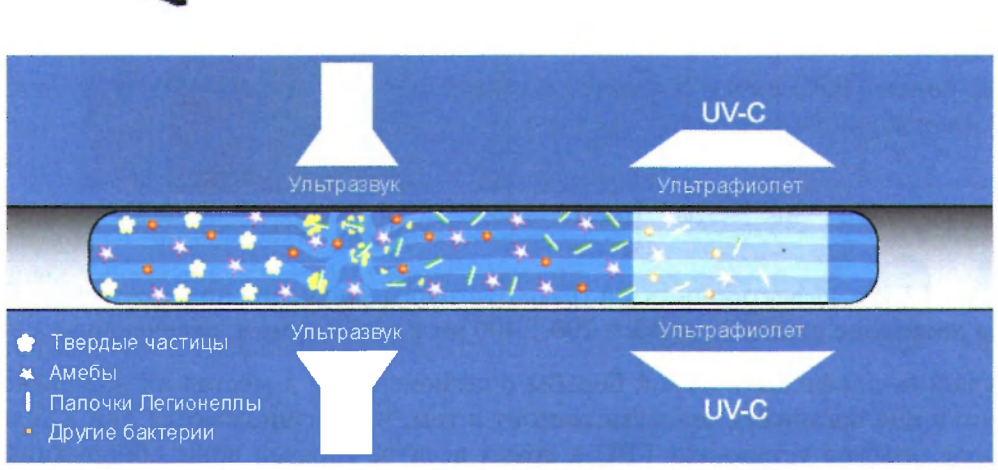


Geno-Break устанавливается в подающую линию горячей воды после водонагревателя, рассчитана на постоянную дезинфекцию 8 м³ воды и применяется для объектов с объемом системы (водонагреватели и трубопроводы) более 400 л: бассейнов, больниц, гостиниц, пансионатов, т.е. там, где применяются агрегаты горячего водоснабжения. В старых системах, имеющих множество микробиологически небезопасных зон, необходимо провести дополнительные санационные работы, определяющиеся для каждого объекта индивидуально. Благоприятную среду для легионелл создают накипь и коррозия, для борьбы с которыми необходимо обеспечить соответствующее стандартам качество холодной воды.»*

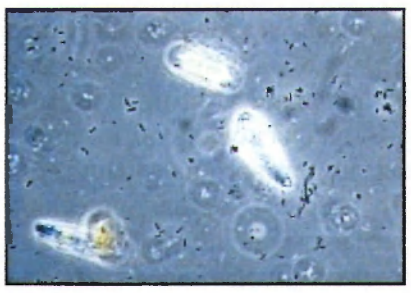
** статья «Техника против легионелл» на сайте «Стройка и Ремонт» www.remont.info (по материалам Grunbeck Wasseraufbereitung, опубликованным в журнале Haus Technik IKZ)*



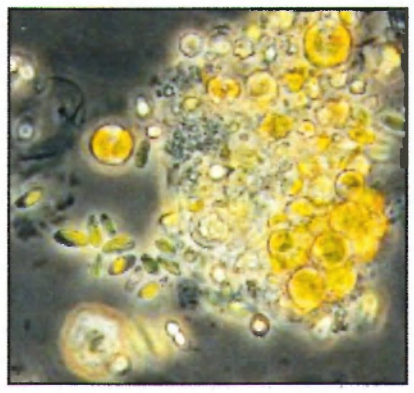
Рис.10.30. Установка Geno-Break и схема обработки воды в блоках ультразвукового и ультрафиолетового изучения.



Учитывая наличие в циркуляционной воде открытых систем испарительного охлаждения не только палочек Легионеллы, но и множество других бактерий, микроорганизмов и водорослей (рис.10.31, 10.34), компания Grunbeck Wasseraufbereitung расширила возможности своих установок Geno. Для комплексной обработки воды, дополнительно к блокам ультразвукового и ультрафиолетового воздействия, добавлен блок хлорирования (ClO_2), рис.10.32.



а



б

Рис.10.31. Фотографии различных микроорганизмов, обнаруженных в воде градирен: а – прудовые бактерии и простейшие двух видов; б – зеленые водоросли [228].



Рис.10.32. Установка Geno-Bartox Pro.

Весьма перспективным может оказаться биологический метод борьбы с Легионеллой, который в настоящее время разрабатывается учеными Лионского университета (Франция). Исследовательская лаборатория г-на Jacques Bodennec выделила из группы простейших амебу *Willaertia sp.*, которая не только не подвержена заражению легионеллой, но и подобно фагоцитам уничтожает других амеб, таких как *Acanthamoeba* и *Hartmanella*, наиболее уязвимых в отношении *Legionella pneumophilla* (рис.10.33) [157].

На рис.10.33 отчетливо видно, что за 2…3 суток Legionella pneumophilla практически полностью пожирает амебы Hartmanella и Acanthamoeba и не оказывает никакого воздействия на амебы Willaertia.



Амебы
автор фотографии Ольга Сытина

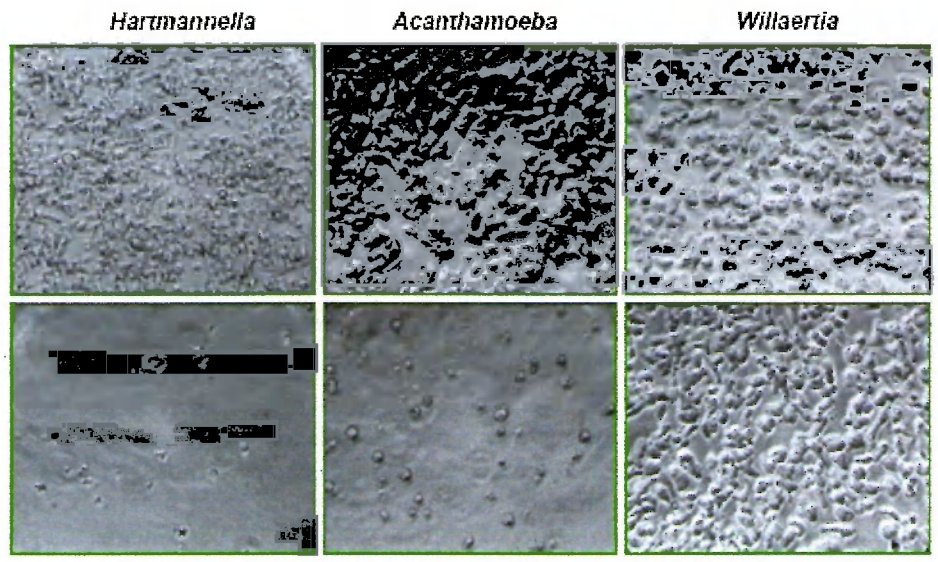


Рис.10.33. Микрофотографии колонии амеб Hartmanella, Acanthamoeba и Willaertia: начальное состояние – верхний ряд; после ввода бактерий Legionella pneumophilla и экспозиции 50…72 часа – нижний ряд.

В заключение можно констатировать, что для развития опасных для человека бактерий должны состояться определенные условия (питательная среда, высокая температура 25…55 °С). Аэрологический путь заражения определяет опасность аппаратов только распылительного типа, при размере капель 2…10 мкм: градирни, брызгальные бассейны, испарительные конденсаторы, форсуночные камеры СКВ.

Увлажнители пленочные (испарительного типа), ультразвуковые на пьезокристаллах, пневмоакустические форсунки, паровые аппараты не должны связываться с проблемой инфекционных заболеваний. Однако следует проводить их санитарную обработку, а также обработку воздушных каналов СКВ, на регулярной основе.

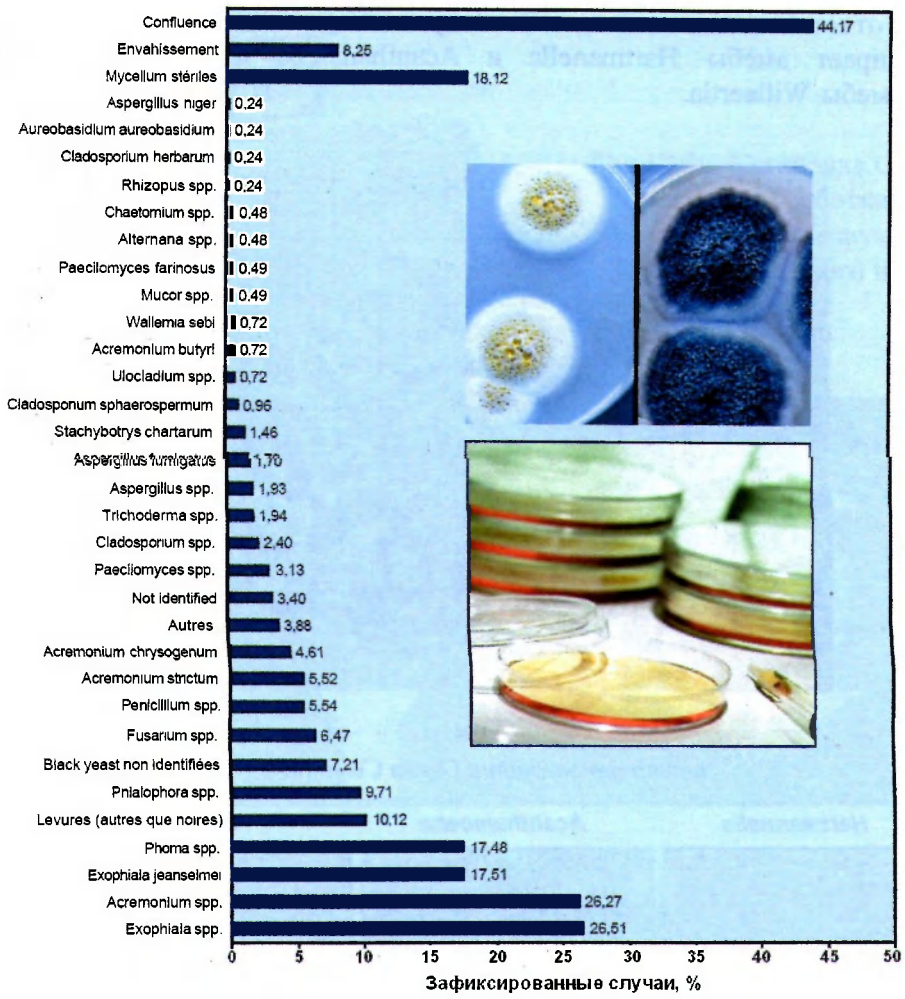


Рис.10.34. Результаты исследования воды 417 увлажнителей на предмет наличия различных грибов, бактерий и пр. [251].

Исследования проводились обычным путем отбора проб и выращивания их микробиологического содержимого в чашках Петри (питательная среда – агар, временная экспозиция до 15 дней).

Приведенная в данной главе информация, убеждает нас в том, что ранее рассмотренные технологии осушения и увлажнения воздуха необходимы не только по требованиям промышленного производства, но и для поддержания необходимых комфортных параметров, а также для решения проблемы IAQ – качества внутреннего воздуха, которая для целого ряда развитых стран является приоритетной, поскольку при этом создаются необходимые условия для сохранения здоровья нации.

Относительно причин, влияющих на качество внутреннего воздуха, существует мнение научного комитета Европейской комиссии SCHER (Scientific Committee on Health and Environmental Risks), занимающегося проблемами здоровья и экологических рисков. В заключении SCHER «Opinion on risk assessment on indoor air quality» (2007), в частности, сказано: «Внутренний воздух содержит более 900 частиц различной химико-биологической природы, которые могут оказать влияние на здоровье человека. Так как их концентрации обычно выше, чем на открытом воздухе, а люди проводят большую часть времени в помещениях, необходимо чтобы любые исследования по норме наружного воздуха коррелировались с данными по IAQ. Состав и концентрации различных компонентов внутреннего воздуха зависят от человеческой активности и существенно изменяются. Поскольку *невозможно предусмотреть все возможные сценарии негативного влияния на здоровье человека*, следует оценивать вклад всех известных источников (табачный дым, открытый огонь, стройматериалы, мебель, изделия, домашние животные) на формирование благоприятных условий для роста плесени. Строители, обслуживающий персонал зданий и жители должны знать, что *поддержание нормируемых значений относительной влажности позволяет избежать неприятностей*, а *достаточный воздухообмен уменьшает накопление загрязняющих веществ*».

"Energy consumption costs money, uses natural resources, increases air pollution, and contributes to global warming. We all share responsibility for prudent energy use" [112].

11. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СКВ

Для утилизации теплоты в СКВ применяют различные способы и схемы. Традиционная схема с рециркуляцией* основной массы воздуха позволяет в объектах с преобладанием явной теплоты сохранить, как правило, до 90 % затраченной энергии на его обработку [39, 86, 106]. Однако эта схема не может быть использована для помещений с выделением вредностей (больницы, предприятия химической промышленности и пр.), а ужесточение требований к качеству внутреннего воздуха определенным образом создает приоритет прямоточных СКВ (рис.11.1, 11.3а).

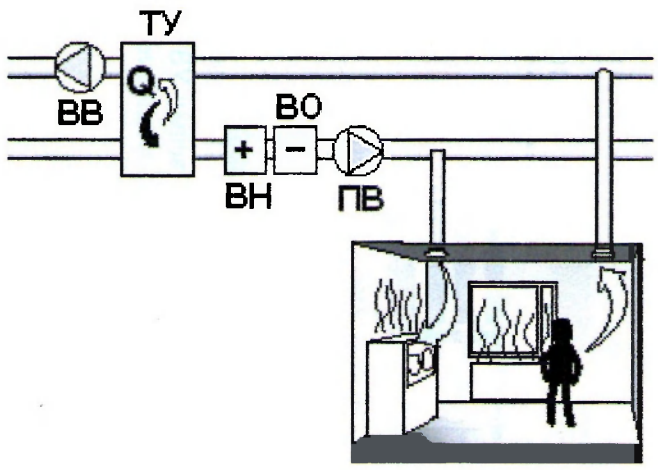
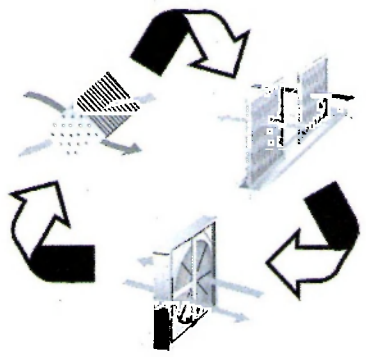


Рис.11.1. Схема прямоточной СКВ с теплоутилизацией:

ПВ, ВВ – приточный и вытяжной вентиляторы;
ВН – воздухонагреватель;
ВО – воздухоохладитель;
ТУ – теплоутилизатор.

Основные способы энергосбережения в СКВ:



- ***Twinvent*** – Twin coil system (Run-around) – с промежуточным теплоносителем и двумя теплообменниками батарейного типа;
- ***Heatvent*** – Heat-pipe exchanger – с применением тепловых труб (термосифонов и фитильных труб);
- ***Directvent*** – Plate type heat exchanger – с пластинчатым рекуперативным теплообменником;
- ***Rotorvent*** – Rotating heat wheel – с вращающимся ротором-регенератором.

Эффективность утилизации тепла на базе теплообменников батарейного типа или тепловых труб 40…60 %, пластинчатых воздушных перекрестноточных теплообменников-рекуператоров 45…70 % и роторов-регенераторов 80…85 (90) %.

*при этом обязательным требованием является обеспечение необходимого количества наружного воздуха, нормируемого в соответствии с физиологическими потребностями человека (регламентируется СНиП). Единой нормы для стран мира не существует, в связи с различной экологической обстановкой, уровнем жизни и пр.

Рис.11.2. Схема центральной СКВ с рециркуляцией и теплоутилизатором:
Н, У, П – наружный, удаляемый и приточный воздух, соответственно; УВ – увлажнитель;
Р – камера смешения (рециркуляции); Ф – фильтр; Ш – шумоглушитель, остальные обозначения по рис.11.1.

11.1. ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

TWINVENT & HEATVENT

Применительно к способам теплоутилизации с использованием теплообменников батарейного типа либо тепловых труб следует выделить две основные схемы организации: параллельную и последовательную (рис.11.3).

Параллельная схема предполагает утилизацию теплоты в установке с разобщенными (удаленными друг от друга) потоками приточного и вытяжного воздуха, что, собственно говоря, и определяет ее преимущество. Последовательная схема позволяет существенно снизить потребную тепло- холодопроизводительность базового теплообменного оборудования на стороне приточного воздуха или повысить его осушающую способность.

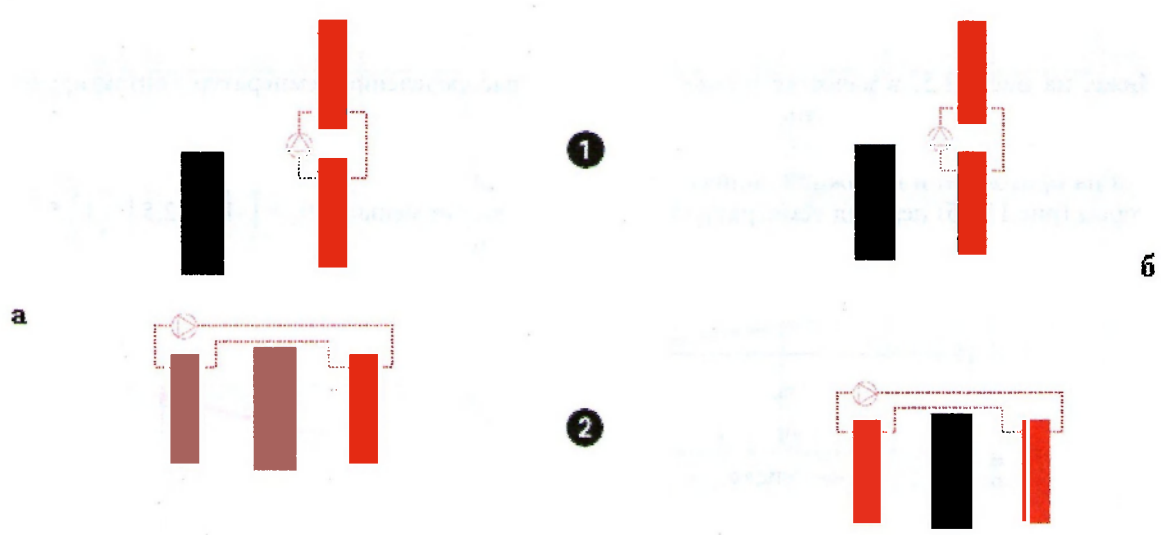


Рис.11.3. Схемы теплоутилизации с промежуточным теплоносителем и двумя теплообменниками (тепловыми трубами) в прямоточных (а) и рециркуляционных СКВ (б): 1 – параллельная; 2 – последовательная.

Обозначения: ОА – наружный воздух (Outdoor Air); SA – приточный (Supply Air); RA – вытяжной (Return Air); EA – удаляемый (Exhaust Air).

Процессы утилизации характеризуются коэффициентами эффективности:

$$E = G_п \left| x_1 - x_2 \right| / G_{min} \left| x_1 - x_3 \right|, \; G_{min} = G_y \quad \text{при } G_y \le G_п, \; (11.1)$$

либо $$E = G_y \left| x_4 - x_3 \right| / G_{min} \left| x_1 - x_3 \right|, \; G_{min} = G_п \quad \text{при } G_п \le G_y \; (11.1')$$

где $G_п$, G_y – массовые расходы приточного и удаляемого воздуха; x_1, x_2 и x_3, x_4 – значения температур (энтальпий либо влагосодержаний)* воздуха на входе и выходе теплообменников на стороне приточного и вытяжного потоков воздуха, соответственно.

*в случае теплообменников-теплоутилизаторов, обеспечивающих только явный теплообмен, используют понятие температурного коэффициента эффективности E_t. При покрытии поверхности каналов тонким слоем десиканта и осуществлении процессов тепломассообмена, кроме E_t, вводятся понятия коэффициентов энтальпийной (полной) эффективности E_h и эффективности по утилизации влаги E_d (см. последующий материал).

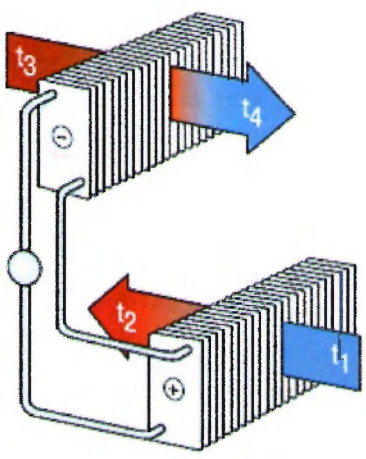


Рис.11.4. К определению коэффициента температурной эффективности E_t.

Приведенное определение коэффициента эффективности теплоутилизации (11.1, 11.1') отвечает стандарту ARI* Standard 1060–2000 «Rating Air-to-Air Energy Recovery Ventilation Equipment».

**ARI – American Refrigeration Institute*

Значения E (E_h, E_t, E_d) определяются в результате испытаний теплообменников с конкретной геометрией для различных расходов и приводятся в каталогах фирм-производителей в виде соответствующих графических зависимостей либо в табличном виде.

Используя данные по E, при известных значениях параметров воздуха на входе в теплообменники, можно определить количество утилизируемой теплоты Q ($Q_{явн}$) либо влаги W:

$$Q = E_h\, G_{min}\,(h_1 - h_3); \qquad (11.2)$$

$$Q_{явн} = E_t\, C_в G_{min}\,(t_1 - t_3); \qquad (11.3)$$

$$W = E_d\, G_{min}\,(d_1 - d_3). \qquad (11.4)$$

Уравнения 11.2…11.4 являются, по сути дела, балансовыми уравнениями.

Ниже, на рис. 11.5, в качестве примера, показано распределение температур контактирующих потоков воздуха и промежуточного теплоносителя по длине теплообменника с коэффициентом эффективности E_t = 0,6 при $G_п = G_у$ и $G_п$ = 1,5 $G_у$. В первом случае (рис.11.5а) перепад температур воздуха на приточной и вытяжной линиях одинаков и составляет $\theta = |-10 - 8{,}5| = |21 - 2{,}5| = 18{,}5\ ^0$. Во втором (рис.11.5б) перепад температур на приточной линии меньше: $\theta_п = |-10 - 2{,}5| = 12{,}5\ ^0$. Эту величину можно получить и расчетным путем. В соответствии с уравнением 11.1:

$$\theta_п = |t_1 - t_2| = E\,|t_1 - t_3| / (G_п / G_у) = 0{,}6\,|-10 - 21|/1{,}5 = 12{,}5\ ^0.$$

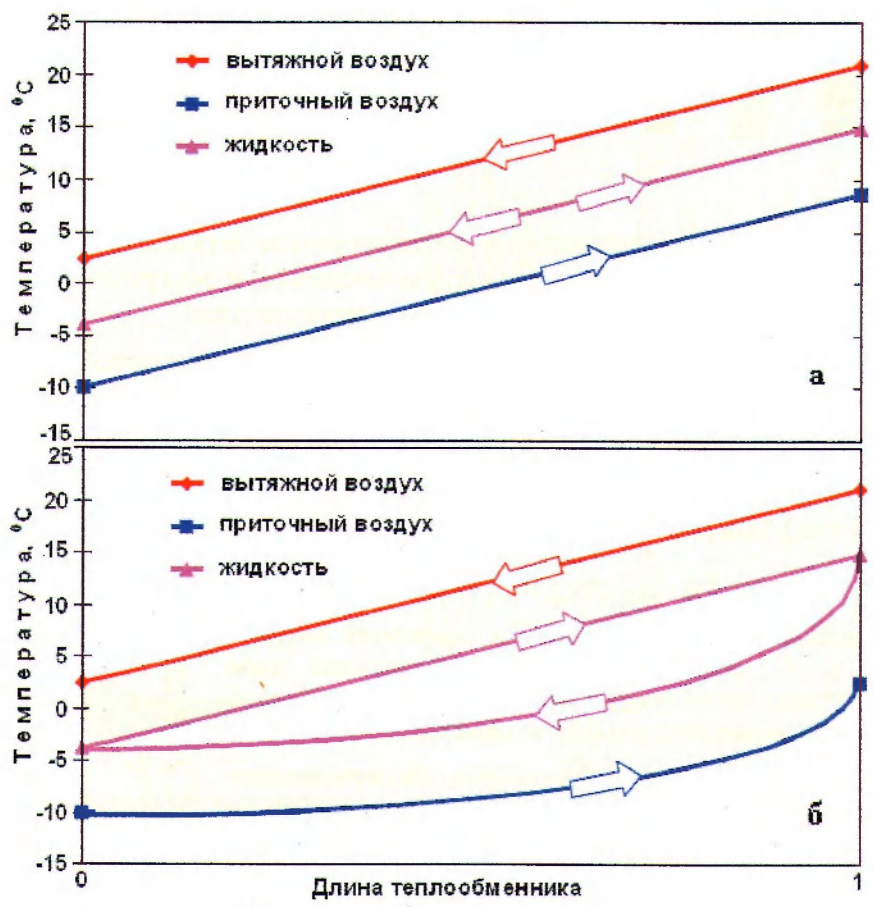


Рис.11.5. Типичная картина распределения температур контактирующих потоков воздуха и жидкости по длине теплообменника при равенстве массовых расходов приточного и вытяжного потоков воздуха (а) и в случае $G_п$ = 1,5 $G_у$ (б).

В схемах Twinvent в качестве промежуточного теплоносителя обычно применяется 25…35 % водный раствор этиленгликоля, поскольку рабочая жидкость должна удовлетворять требованию незамерзания при температурах наружного воздуха ниже 0 ^{0}C и обладать невысокой коррозионной активностью.

Невысокая эффективность способа E_t = 40…60 % объясняется поперечноточной схемой организации контактирования потоков, а также дополнительным термическим сопротивлением рабочей жидкости в суммарном сопротивлении системы.

Первая причина является общей для всех схем теплоутилизации в СКВ с использованием теплообменников-рекуператоров (Twinvent, Heatvent и Directvent). Из рис.11.6 видно, что для достижения E_t = 55 % необходимая поверхность теплообмена для поперечного тока должна быть в два раза больше, чем для противотока, а при одинаковых величинах поверхности эффективность увеличивается до 80 % (в случае противоточной схемы).

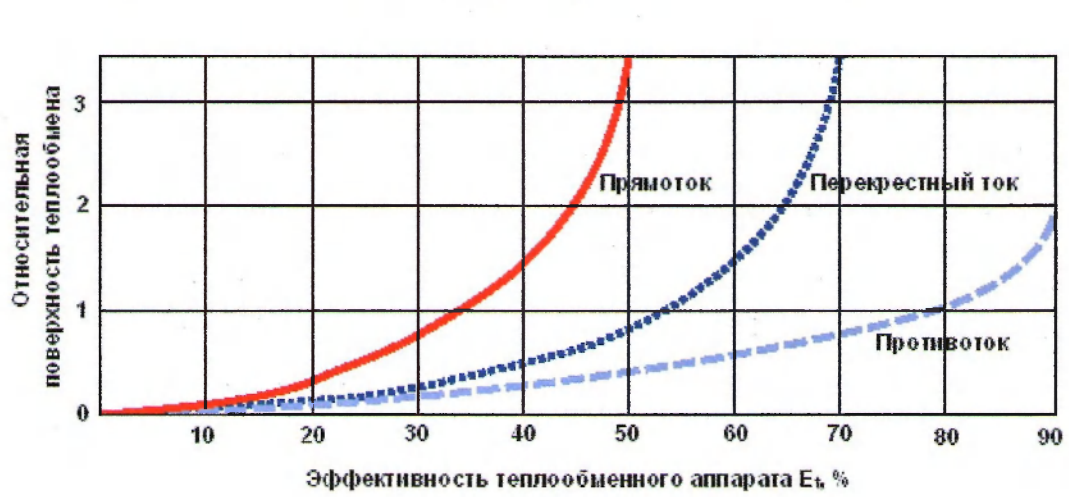


Рис.11.6. Зависимость необходимой относительной поверхности теплообмена от коэффициента эффективности E_t для различных схем (прямотока, противотока и поперечного тока).

Значение E_t можно повысить, приблизив условия теплообмена к потенциалу противоточной схемы, что достигается за счет последовательного включения в жидкостной контур большего числа теплообменников, как на стороне приточного, так и вытяжного воздуха (рис.11.7), а также применением теплообменников специальной конструкции, позволяющей направить промежуточный теплоноситель противоточно обрабатываемому воздуху (рис.11.9);

На рис.11.8 приведена зависимость коэффициента эффективности E_t от соотношения теплоемкостей потоков (водяных эквивалентов [8]) воздуха $C^\circ_в$ и рабочей жидкости $C^\circ_ж$ для различного количества теплообменников (от 1 до 5). Максимумы значений E_t при условии $kF/C^\circ_ж$ = idem отвечают величине $W = C^\circ_в/C^\circ_ж = 1$ (0,8…1,2), т.е наблюдаются при равенстве:

$$C^\circ_в = C^\circ_ж \quad (C^\circ_в = C_в G_в \text{ и } C^\circ_ж = C_ж G_ж), \text{ т.е. } C_в G_в = C_ж G_ж, \ кВт/К \qquad (11.5)$$

где $C_в$, $C_ж$ [кДж/(кг·К)] и $G_в$, $G_ж$ [кг/с] – удельные теплоемкости и массовые расходы воздуха и рабочей жидкости, соответственно; k – коэффициент теплопередачи, кВт/м^2·К; F – величина поверхности, м^2, ($kF/C^\circ_ж$ = NTU – число единиц переноса).

Для теплоутилизации с $E_{t.max}$ при использовании этиленгликоля следует выдерживать соотношение расходов $G_в/G_ж = C_ж/C_в$ = 3,8/1,01 = 3,7, в случае применения воды, в качестве рабочей жидкости, $G_в/G_ж$ = 4,19/1,01= 4,15.

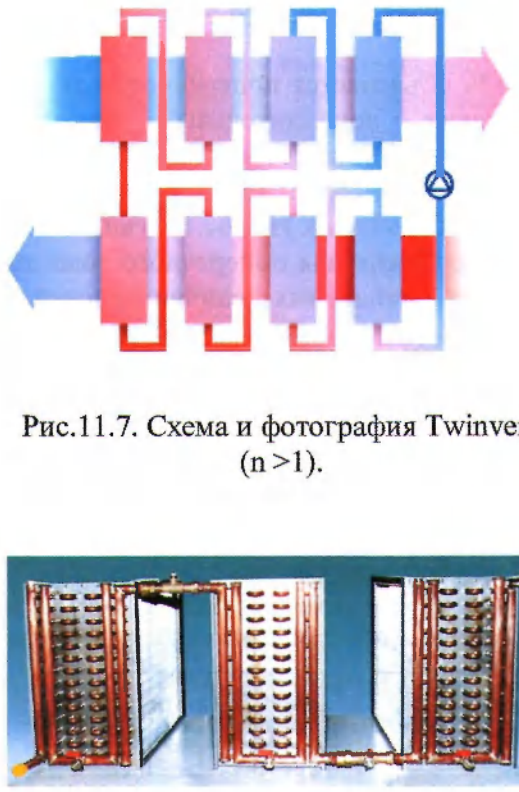


Рис.11.7. Схема и фотография Twinvent (n >1).

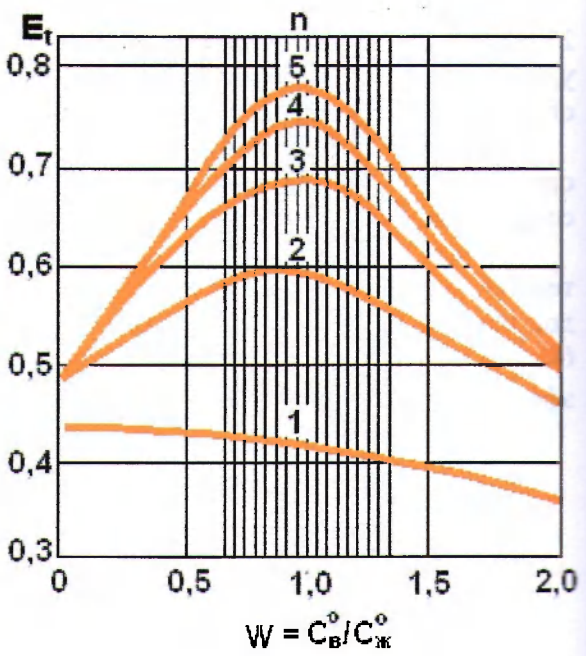


Рис.11.8. Зависимость E_t от соотношения водяных эквивалентов воздуха и рабочей жидкости W при различном числе теплообменников (n = 1…5, на каждой стороне) [202].

На рис.11.9 показана схема теплообменника Howatherm, который при обычной и удобной для СКВ поперечноточной схеме движения воздушного потока за счет оригинальной трассировки жидкостных трубок (P 195 14 167 German Patent 1997, P 198 08 753 German Patent 1999) обладает эффективностью на уровне > 99 % от величины E_t, характерной для противотока.

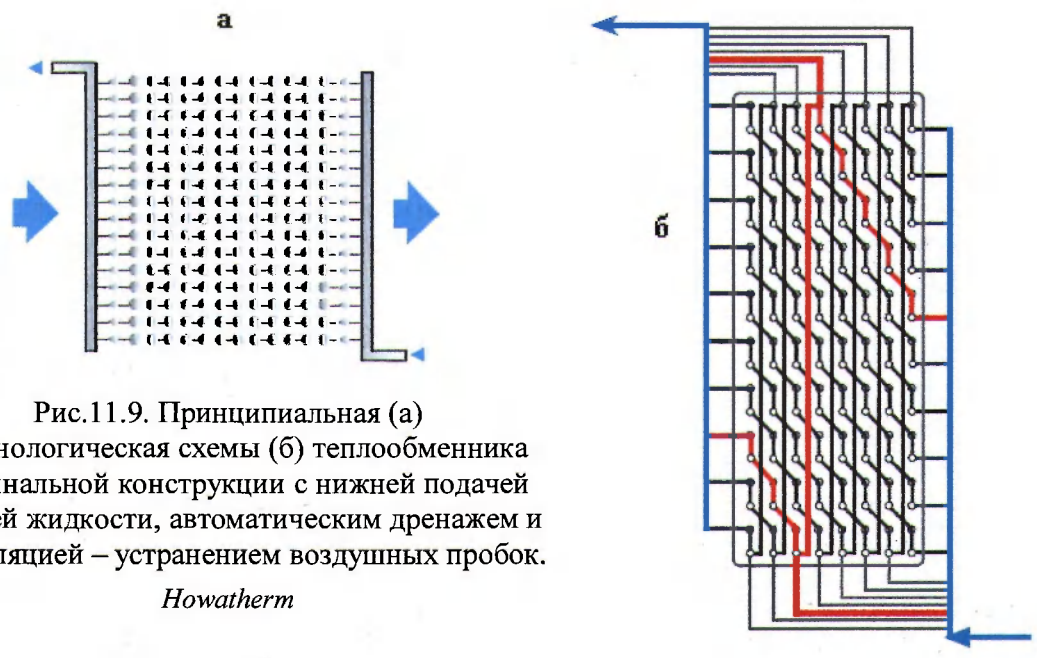


Рис.11.9. Принципиальная (а) и технологическая схемы (б) теплообменника оригинальной конструкции с нижней подачей рабочей жидкости, автоматическим дренажем и вентиляцией – устранением воздушных пробок.

Howatherm

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

Аналогичные конструктивные решения теплообменников используют и другие производители, например, AL-KO Air Technology (рис.11.10).

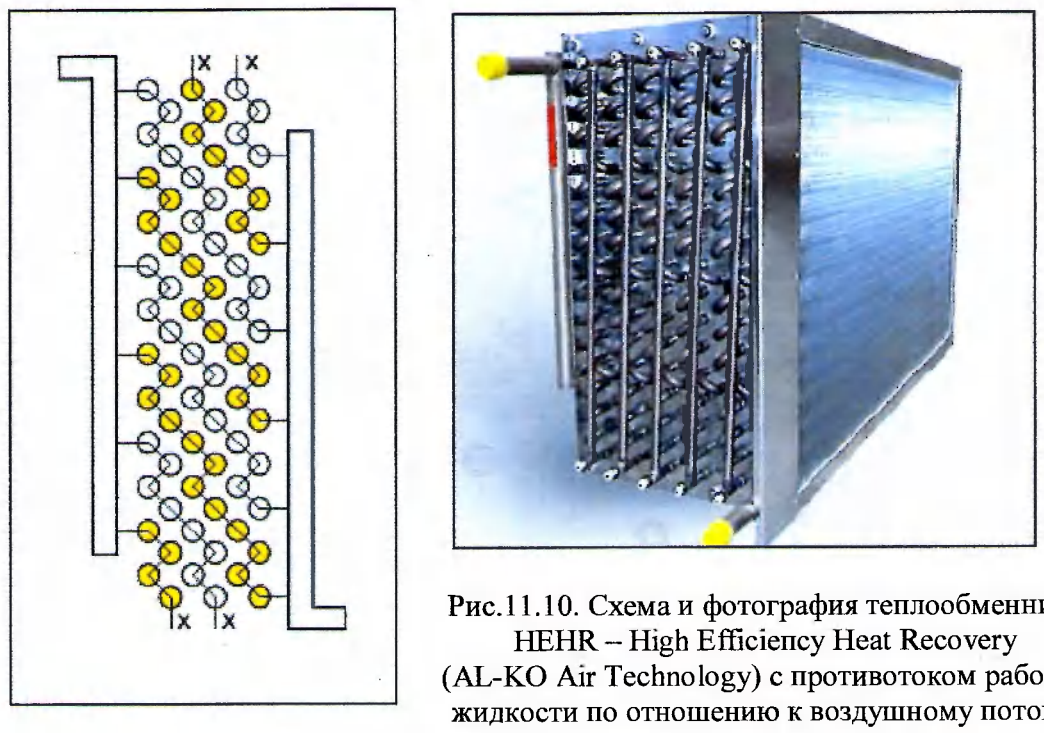


Рис.11.10. Схема и фотография теплообменника HEHR – High Efficiency Heat Recovery (AL-KO Air Technology) с противотоком рабочей жидкости по отношению к воздушному потоку.

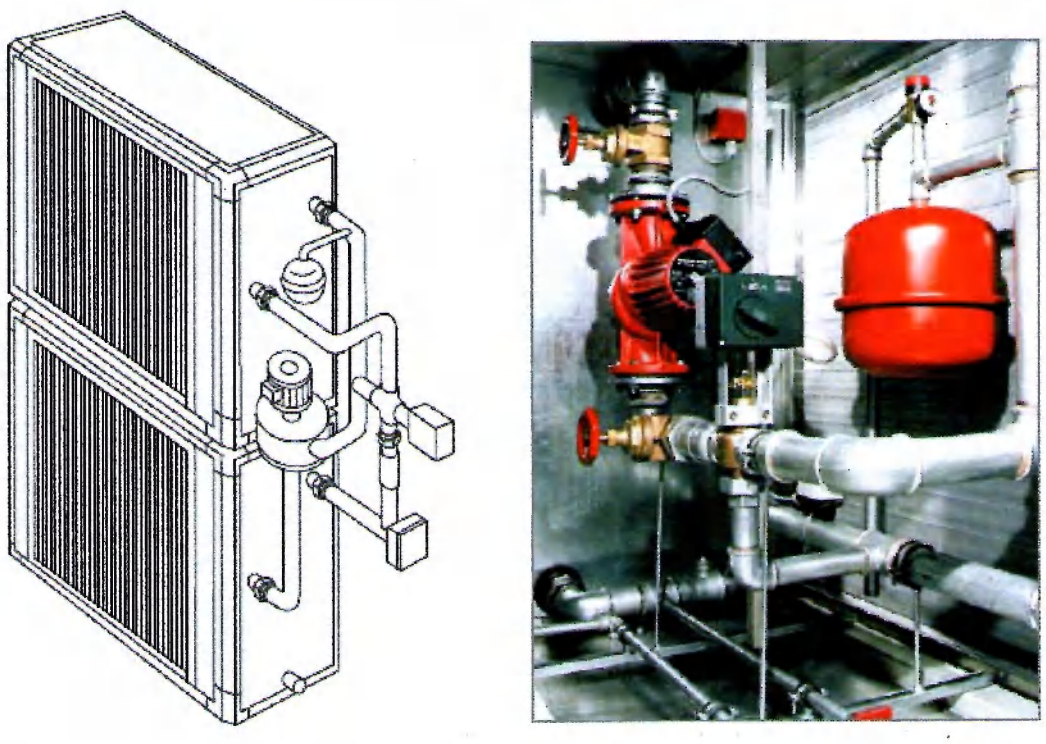
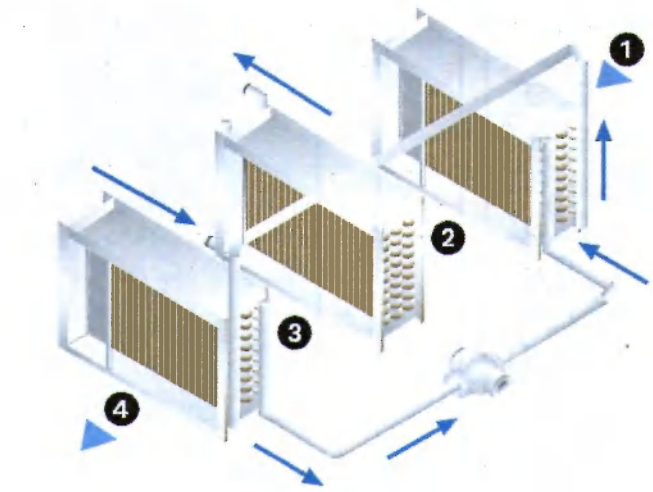


Рис.11.11. Компоновка теплоутилизационной установки ECOTERM и обвязка теплообменников по промежуточному теплохладоносителю (фотография).

Рассмотренные приемы улучшения способа теплоутилизации Twinvent (технология High Performance cycle compound heat recovery system [196]) позволили увеличить эффективность E_t до 70…80 %.

На рис.11.12, в качестве примера использования последовательной схемы теплоутилизации (ТУ), показан принцип “precooling-reheating” предварительного охлаждения (до воздухоохладителя) с последующим нагреванием воздуха (после воздухоохладителя), что широко используется в установках механического осушения воздуха.



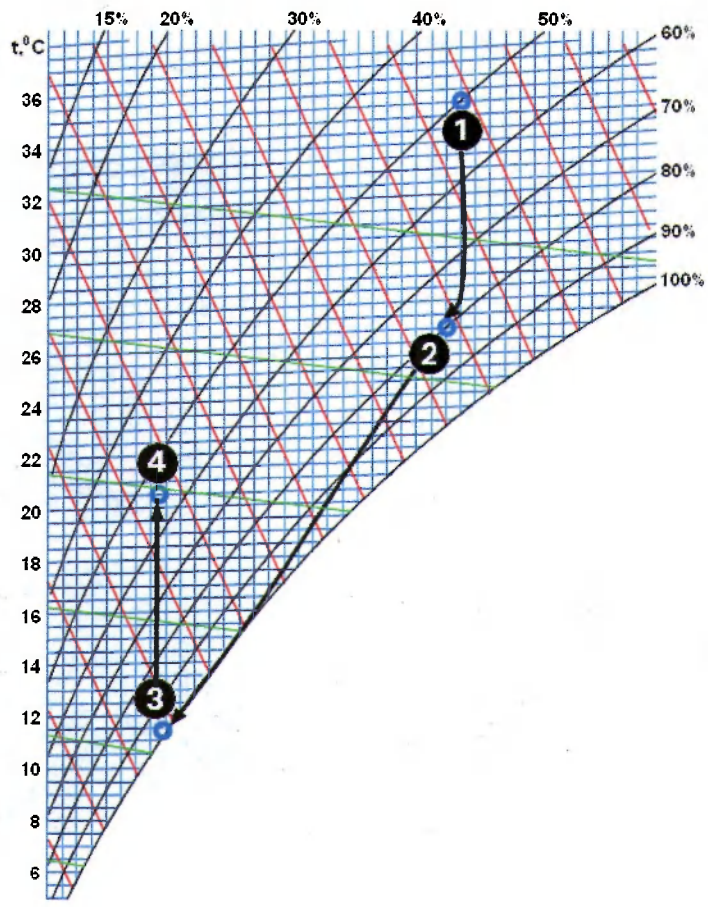


Рис.11.12. Принцип “precooling-reheating”, реализуемый аппаратно (а) и в d,h- диаграмме влажного воздуха (б): 1-2 – охлаждение в теплообменнике ТУ; 2-3 – охлаждение и осушение в воздухоохладителе; 3-4 – нагревание в ТУ.

Теплоутилизаторы на базе тепловых труб (Heat Pipe), также как и Twinvent, являются рекуперативными теплообменниками с промежуточным теплоносителем и объединенными либо раздельными воздушными потоками. Основной элемент – тепловая труба – представляет собой герметичный сосуд, заправленный определенным количеством легко испаряющейся рабочей жидкости (для температурного диапазона установок кондиционирования используются фреоны). Рабочая жидкость в трубке, воспринимая теплоту от воздуха (наружного – летом, вытяжного – зимой), испаряется, и пар за счет перепада давлений перемещается к противоположному концу трубки, расположенному в потоке холодного воздуха, где он конденсируется [90]. Конденсат возвращается к теплому концу гравитационным путем (в случае термосифонов) либо с помощью капиллярных сил (фитильные тепловые трубы) (рис.11.13). Таким образом, происходит утилизация теплоты в процессе теплопередачи от воздушного потока с большим потенциалом к потоку с меньшим потенциалом при фазовых превращениях рабочей жидкости. Мощные тепловые потоки внутри трубки, обусловленные величинами скрытой теплоты испарения и конденсации, определяют достаточно высокую эффективность устройства.

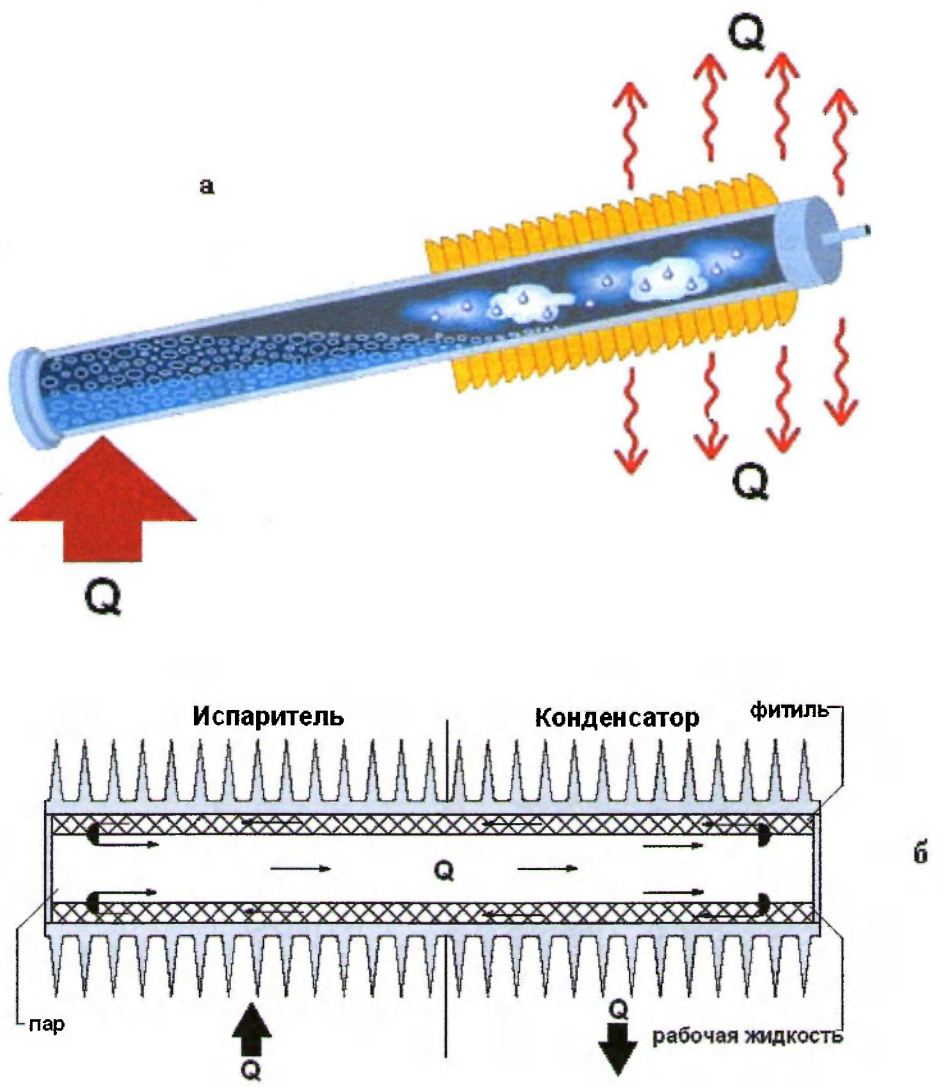


Рис.11.13. Схема работы тепловых труб:
а – термосифонного типа, б – фитильного типа.

Для уменьшения термического сопротивления со стороны воздушных потоков трубы выполняются оребренными (рис.11.14).

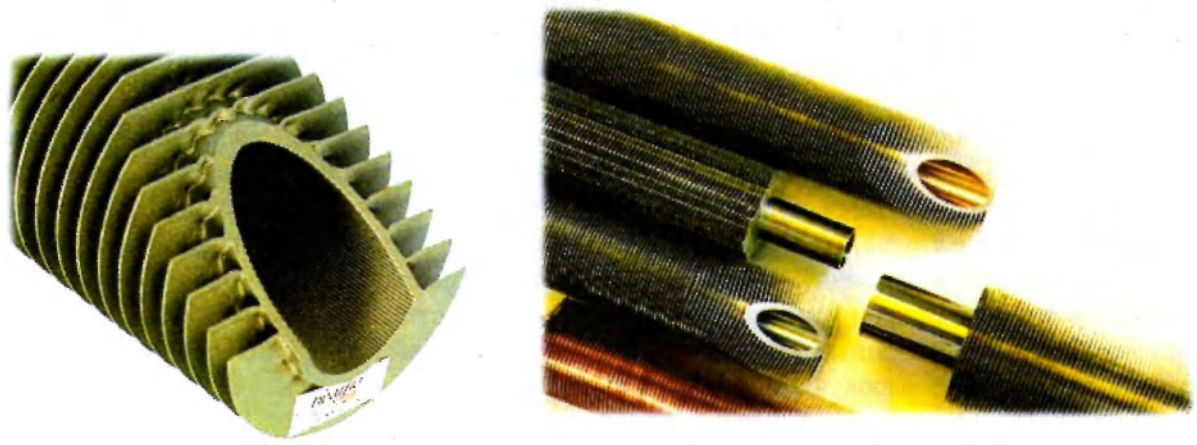
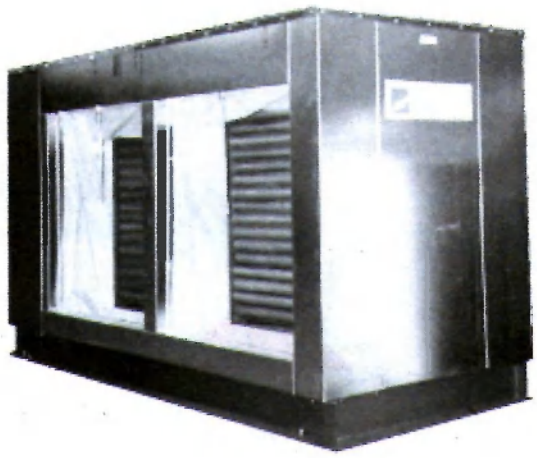


Рис.11.14. Оребренные тепловые трубы.

Фитильные тепловые трубы размещаются в теплообменнике под углом 6…10°, разобщаются по воздушным потокам перегородкой и уплотняются по периметру секции (рис.11.15).



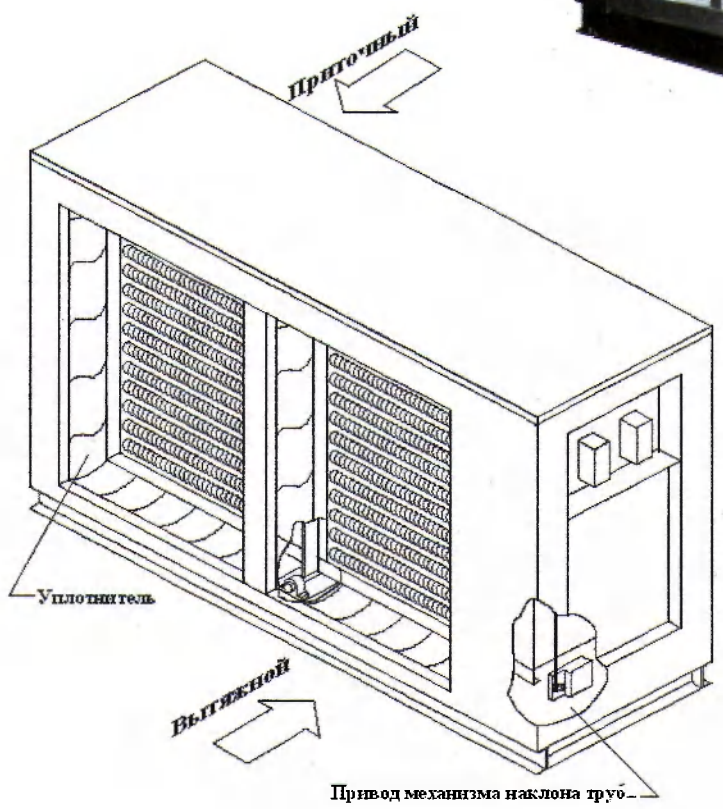


Рис.11.15. Теплоутилизатор с тепловыми трубами.

Тепловые трубы часто используются для повышения эффективности процессов механического осушения воздуха (рис.11.16), а также в роторно-сорбентных схемах (рис.11.17).

На рис.11.16 показан принцип “precooling-reheating” за счет обхвата поверхностного теплообменника U-образной (“U-Shaped”) тепловой трубой.

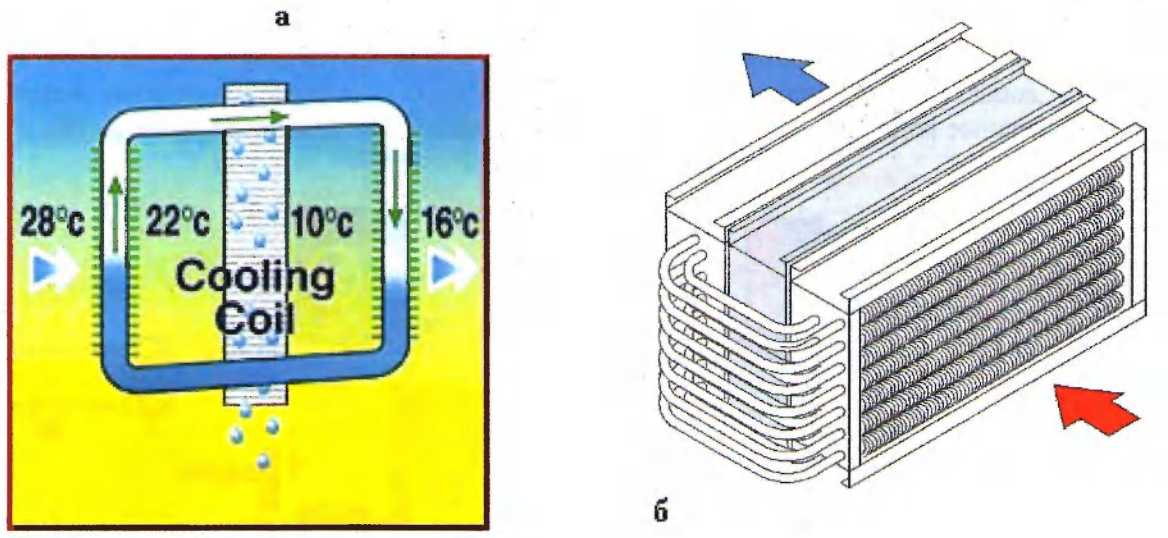


Рис.11.16. Принцип “precooling-reheating” (а) и секция кондиционера (б).



В установках роторно-сорбентной технологии (см. раздел 11.4) минимизация энергозатрат на регенерацию адсорбента привела к использованию тепловых труб в современных схемах "E-SAVE", как один из вариантов, а также газовых горелок, работающих на природном газе (рис.11.17).

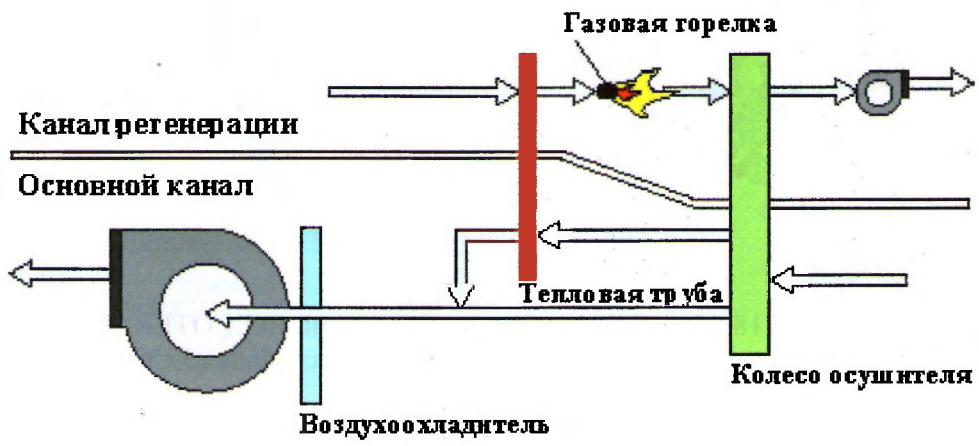


Рис.11.17. Адсорбер "E-SAVE" с тепловой трубой.

11.1.1. МОДУЛЬНАЯ УСТАНОВКА ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИИ *ECONET*

Современная теплоутилизиционная установка ECONET, совмещающая в одном контуре *функции рекуперации, отопления и охлаждения, обладающая повышенным на 15 %* коэффициентом эффективности (E_t = 60…75 %), выпускается компанией Fläkt Woods [160].

В отличие от традиционного варианта ECOTERM с замкнутым жидкостным контуром, включающий два теплообменника-теплоутилизатора и циркуляционный насос, в схему ECONET добавлены теплообменники, подключаемые к низкопотенциальному источнику энергии (водяные конденсаторы холодильных машин, сточные воды и др.), рис.11.18.

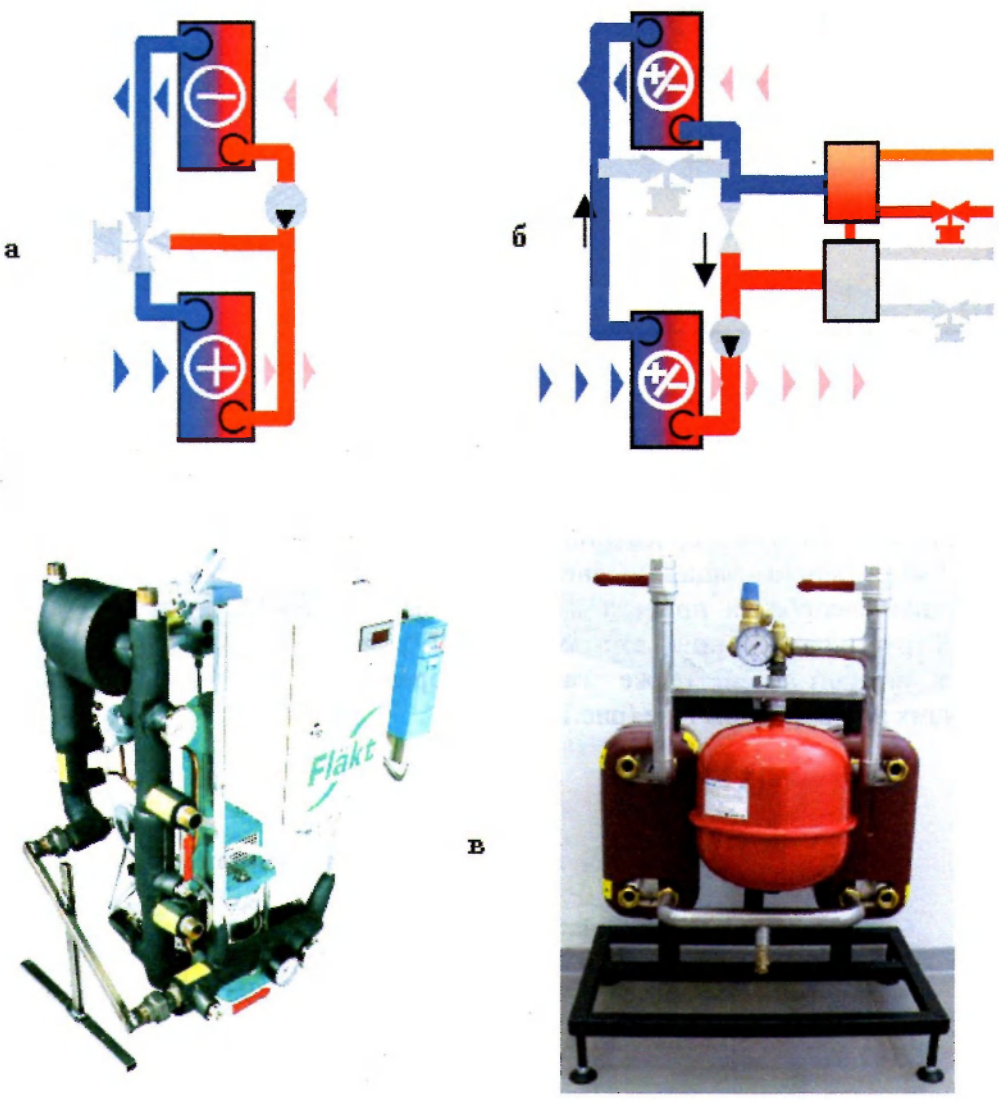


Рис.11.18. Схема установки теплоутилизации ECOTERM (а),
схема (б) и фотографии насосной станции установки ECONET (в).

Используя до 90 % энергии вторичных тепловых потоков, которые, как правило, сбрасываются в окружающую среду, ECONET уменьшает потребную теило-холодопроизводительность СКВ до 60 % при снижении потребляемой электроэнергии до 30 %.

На рис.11.19…11.21 приведены технологические схемы ECONET с отметкой параметров всех потоков обрабатываемого воздуха и промежуточного теплоносителя для зимнего и летнего периода года.

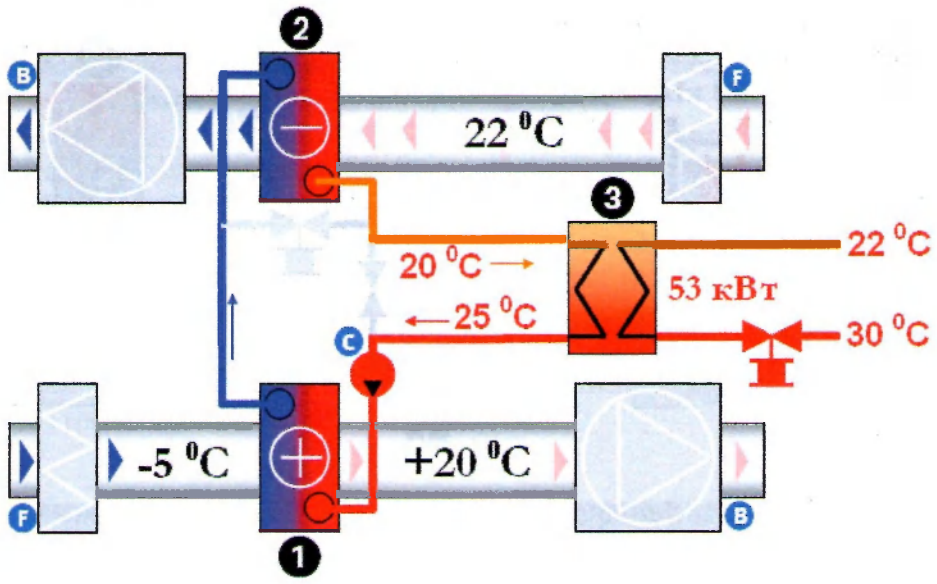


Рис.11.19. Зимний режим работы ECONET:
1, 2 – теплообменники-рекуператоры на стороне приточного и вытяжного потоков воздуха, соответственно; 3 – дополнительный теплообменник, подключаемый к источнику низкопотенциальной энергии; B – вентиляторы; F – воздушные фильтры; C – циркуляционный насос.

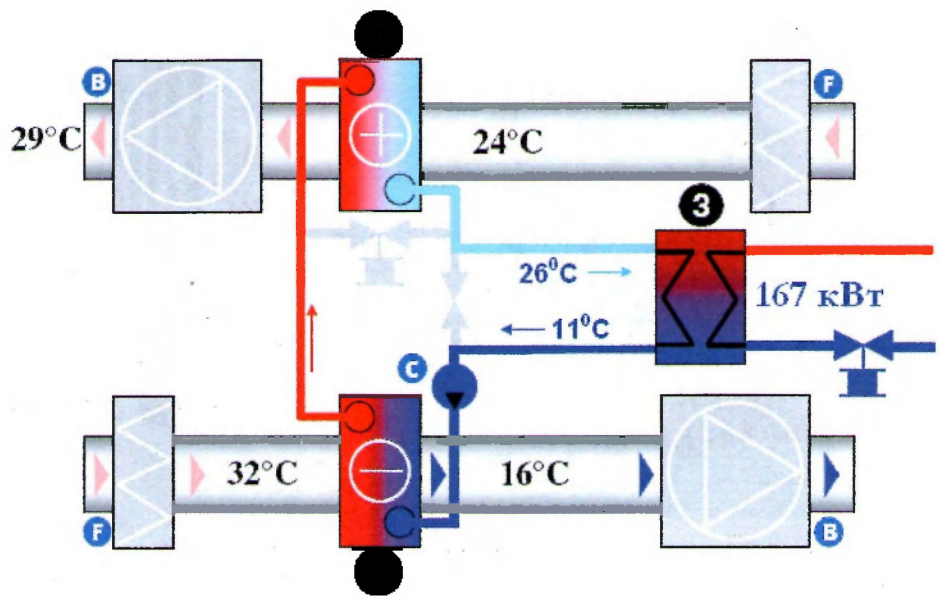


Рис.11.20. Летний режим работы ECONET
(обозначения по рис.11.19).

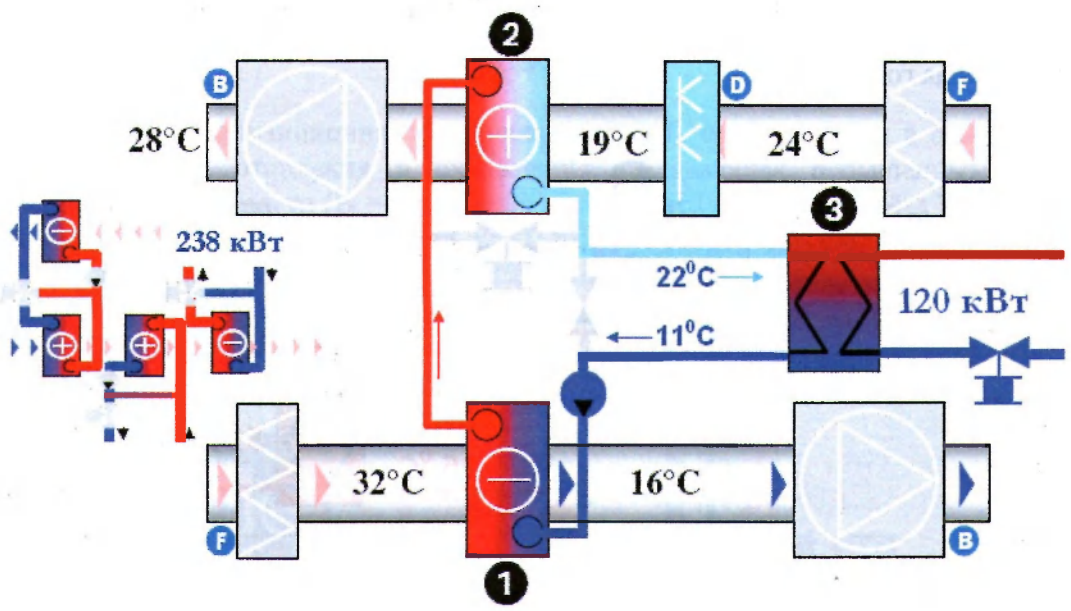


Рис.11.21. Летний режим работы ECONET с включением в схему аппарата испарительного охлаждения (адиабатического увлажнителя) – D (остальные обозначения по рис.11.19).

В порядке сравнения схем ECONET и ECOTERM, на рис.11.21 приведены значения потребной холодопроизводительности Q_0 этих установок: 120/238 кВт. Снижение величины Q_0 практически в 2 раза, в случае ECONET, подтверждает высокую эффективность ее работы.

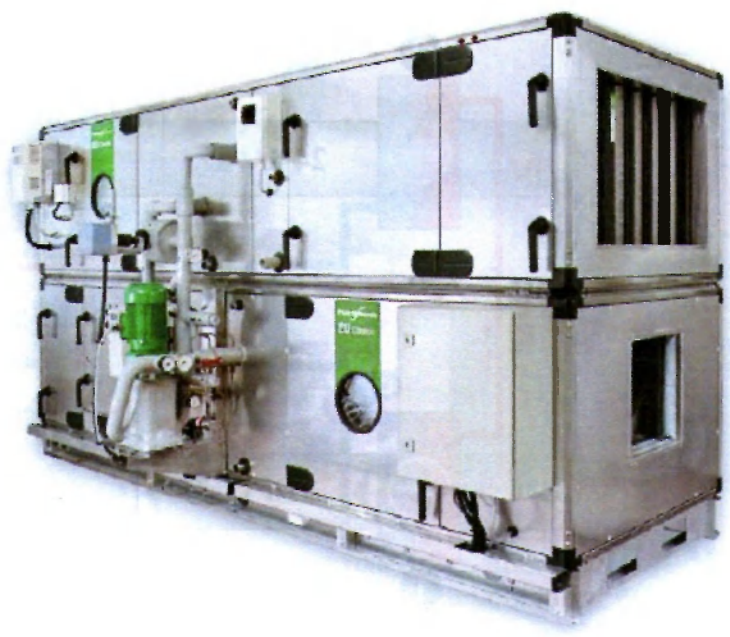


Рис.11.22. Установка ECONET Flakt Woods.

11.1.2. «ЭНТАЛЬПИЙНЫЙ НАСОС»

ENTHALPY PUMP – DOAS SYSTEM

Схема теплоутилизации Twinvent с двумя теплообменниками, объединенные контуром циркуляции промежуточного теплоносителя, используется также в так называемом энтальпийном насосе, разработанном компанией EP Industries.

Конструкция аппаратов – тепломассообменных модулей предполагает применение специальных влагопроницаемых пластин, образующих каналы для прохода воздушного потока (патент США 6,684,649). Стенками каналов являются две смежные пластины с фитильным материалом, заключенным между ними. В верхней части модулей имеется коллектор распределения рабочей жидкости, в качестве которой используется гидрат хлористого лития с концентрацией 5…44 %. В нижней части каждого модуля располагается емкость для сбора раствора и перекачки его с помощью циркуляционного насоса от одного аппарата к другому. Аппараты располагаются соответственно на линиях приточного и удаляемого воздуха (рис.11.23…11.25).

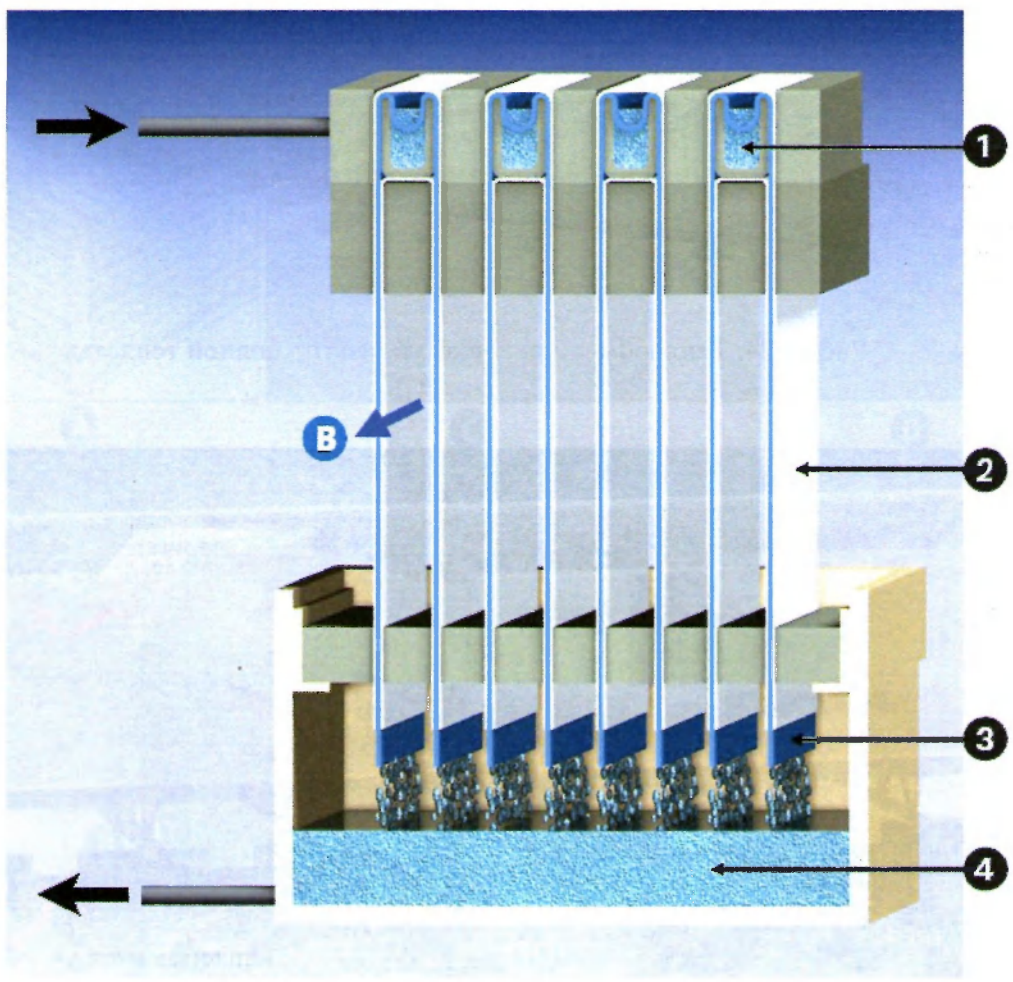


Рис.11.23. Устройство тепломассообменного модуля (EP Technology Module):
1 – коллектор-распределитель теплоносителя: 2 – микропористая пластина (мембрана);
3 – фитиль; 4 – резервуар; В – воздушный поток.

За счет применения гидрофильных пластин и абсорбента ($LiCl \cdot H_2O$) осуществляется перенос теплоты как явным, так и скрытым образом. Наряду с теплообменом наблюдается влагообмен между воздушными потоками, при этом ценный раствор не уносится.

На рис.11.25 приведен пример использования энтальпийного насоса в составе крышного кондиционера.

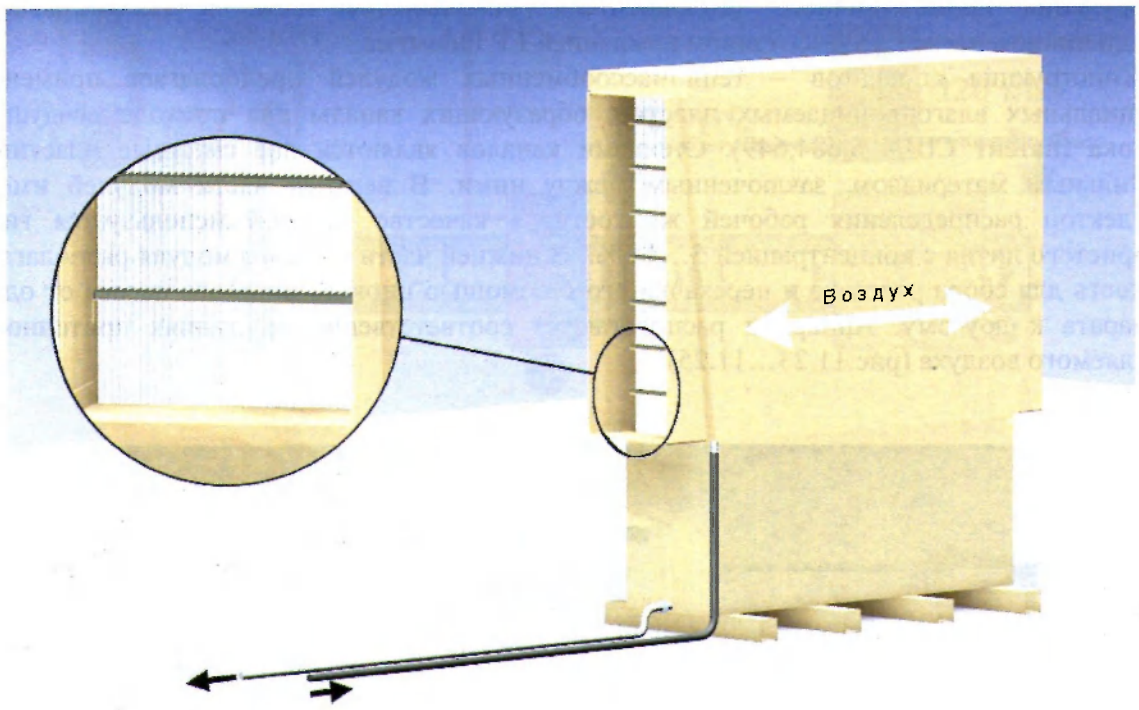


Рис.11.24. Теплообменник-теплоутилизатор полной теплоты.

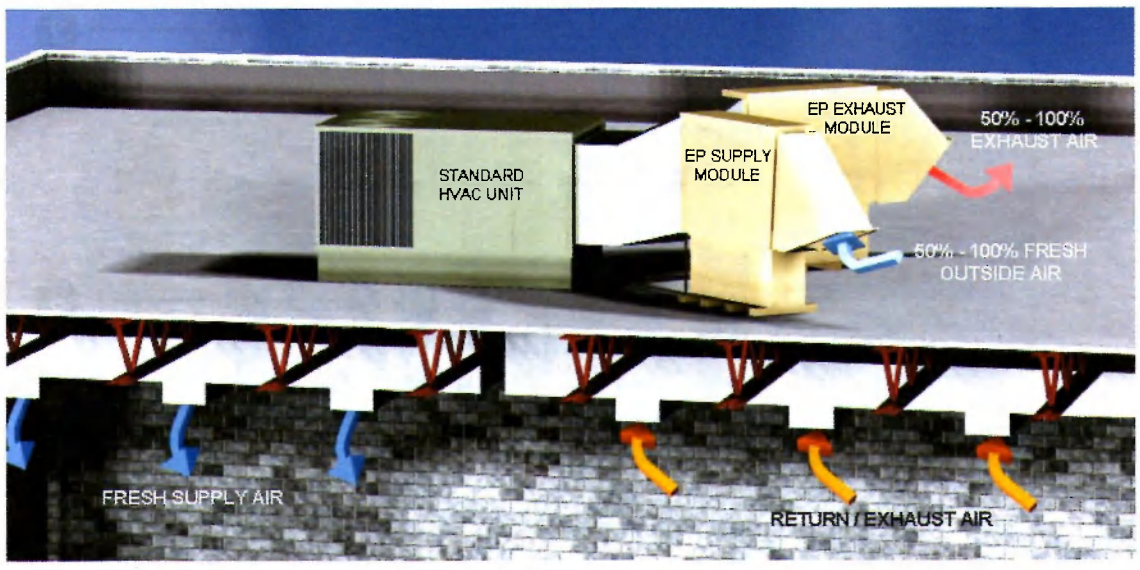
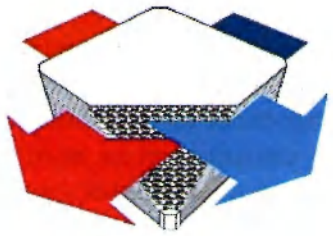


Рис.11.25. Установка кондиционирования воздуха Roof-Top с модулями теплоутилизации полной теплоты.

11.2. ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИЯ НА БАЗЕ ПЛАСТИНЧАТЫХ РЕКУПЕРАТОРОВ

DIRECTVENT



В рекуперативных перекрестноточных теплообменниках передача теплоты происходит через стенки каналов, разделяющих воздушные потоки. Каналы образуются в результате пакетирования пластин, имеющих специальный профиль заданной геометрии, перемежающихся с плоскими листами. Пластины изготавливаются из металла (как правило, из тонкой алюминиевой фольги) либо из гигроскопических материалов (полимеры, крафт-бумага и пр.). Профилированные пластины имеют различную конфигурацию поверхности: гофрированные, с выступами и впадинами и пр. Наличие этих элементов имеет целью развитие поверхности теплообмена в единице объема пакета и повышение интенсивности теплоотдачи между воздухом и поверхностью. Ведущие компании-производители предлагают оригинальные запатентованные профили поверхности, которые разрабатываются собственными научно-исследовательскими центрами (рис.11.26).

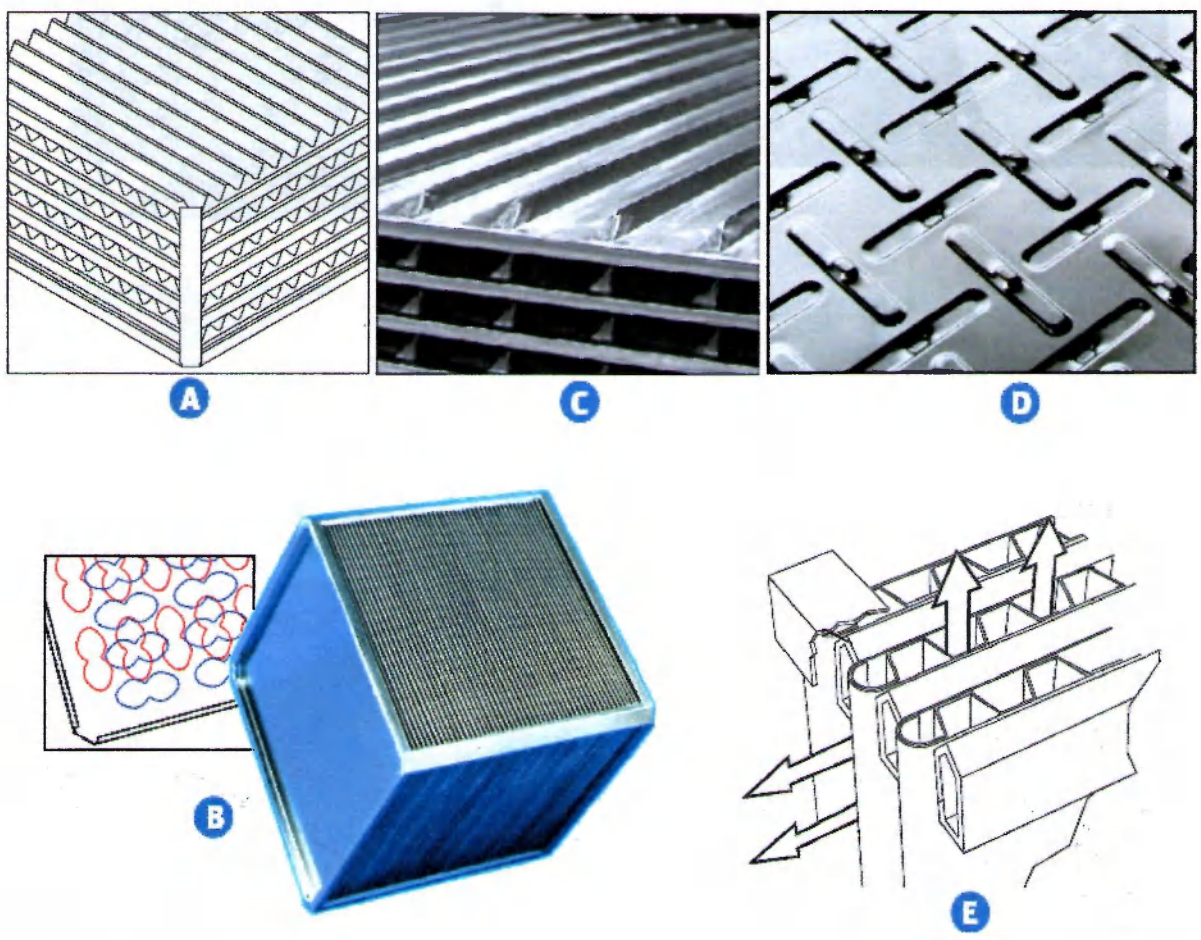


Рис.11.26. Гофрированные (A) и штампованные пластины (B) компании Klingenburg; пластины с плоскими ребрами профиля F (C) и штампованные листы профиля N (D) компании Hoval; гнутые пластины компании XeteX (E).

Расстояние между листами, указанного типа (рис.11.26), в пакетах теплообменников: 8..13 мм – A; 5,5…14 мм – B; 4…12 мм – C; 2…9 мм – D.

Профилирование металлических листов производится на вальцовочных станках либо специальных штампах.

В процессе выполнения операции сборки пара смежных пластин, образующих воздушный канал, связывается по двум кромкам в специальный замок, который уплотняется герметиком на основе эпоксидных смол. Для формирования в пакет связанных между собой пластин используются специальные торцевые детали.

На рис.11.27 показан производственный участок изготовления пластин профиля N компании Hoval, а на рис.11.28 приведены элементы, характеризующие процесс сборки теплообменника.

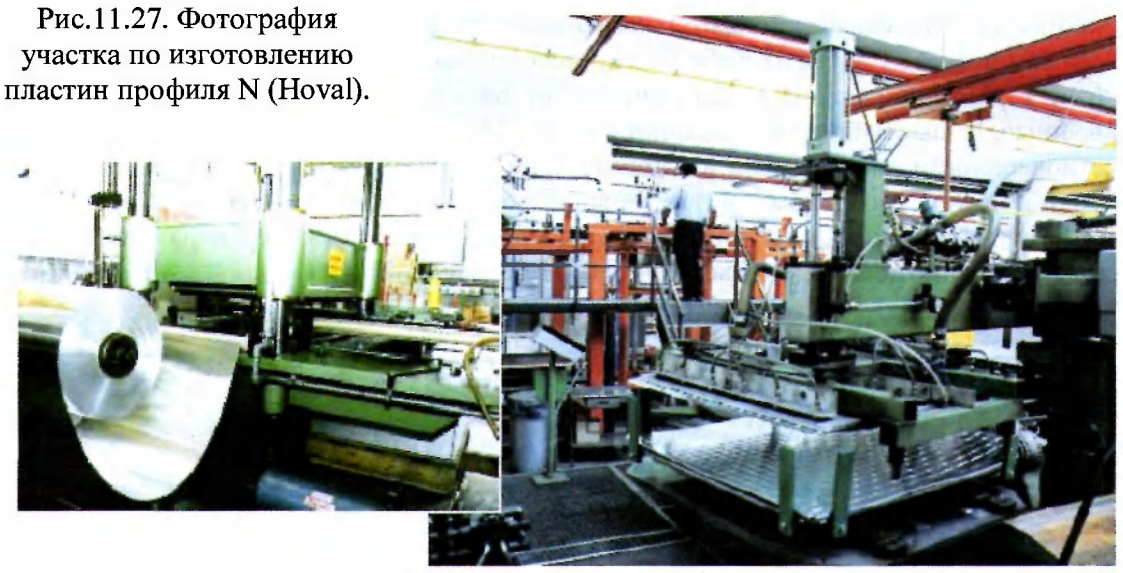


Рис.11.27. Фотография участка по изготовлению пластин профиля N (Hoval).

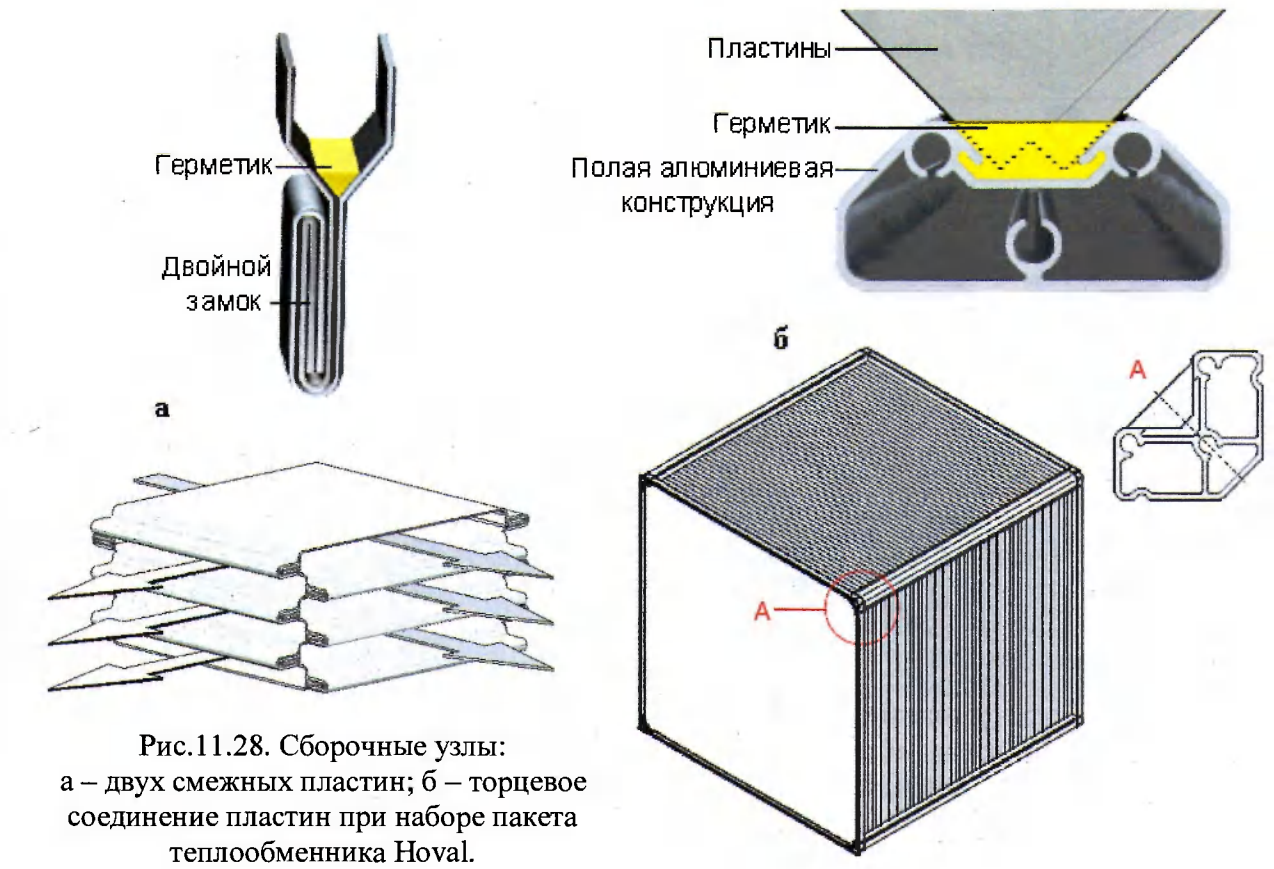


Рис.11.28. Сборочные узлы:
а – двух смежных пластин; б – торцевое соединение пластин при наборе пакета теплообменника Hoval.

Перекрестноточная схема течения воздушных потоков определяет сложное температурное поле распределения в объеме пластинчатого теплообменника, типичная картина представлена на рис.11.29.

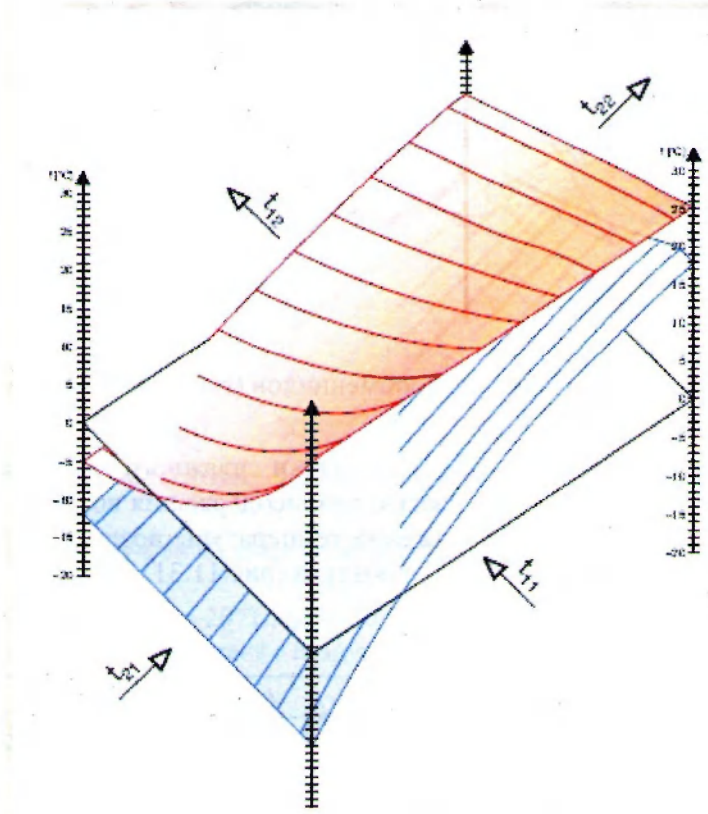
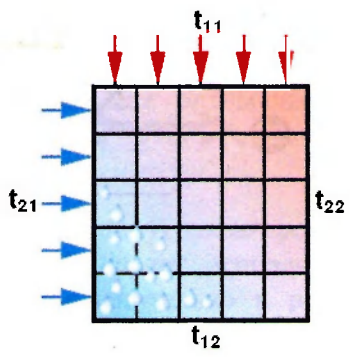


Рис.11.29. Типичное распределение температур воздушных потоков в пластинчатом теплообменнике-рекуператоре [185].

В данном случае: t_{21}, t_{22} – температуры на входе и выходе теплообменника по каналу наружного воздуха в холодный период года; t_{11} и t_{12} – температуры на входе и выходе канала удаляемого воздуха из помещения.



Из рис.11.29 видно, что как внутри каналов, так и на выходе теплообменника распределение температур неравномерное. При определенных сочетаниях параметров входящих потоков воздуха и режимных характеристик может произойти конденсация влаги (рис.11.31), а при отрицательных температурах образование инея. Эти явления сказываются на рабочих характеристиках процесса теплоутилизации (следует учитывать при расчете). Величина аэродинамического сопротивления теплообменника возрастает, поскольку сужается сечение для прохода воздуха. При интенсивном инееобразовании может произойти закупорка каналов.

Защита теплообменников от обмерзания воздушных каналов состоит в устройстве байпасов и отводе части потока холодного воздуха в обход теплообменника по сигналу датчика температуры точки росы в канале охлаждаемого влажного воздуха.

В действующих конструкциях байпасирование осуществляется за счет устройства обводного канала сбоку или через середину пакетов с пластинами (рис.11.30).

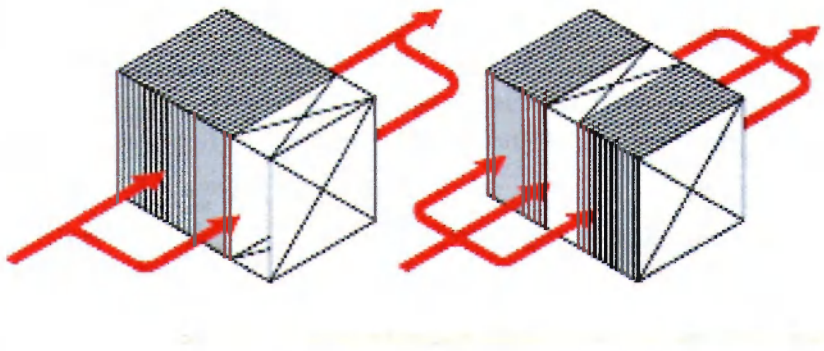


Рис.11.30. Схемы байпасирования теплообменников (side and middle bypass).

В случае конденсации влаги в канале теплого и влажного воздуха происходит перераспределение между явной и скрытой частью теплосодержания воздуха, в связи с чем, разность температур (и, соответственно, понижение температуры воздуха) в данном канале меньше разности температур в канале наружного воздуха (рис.11.31).

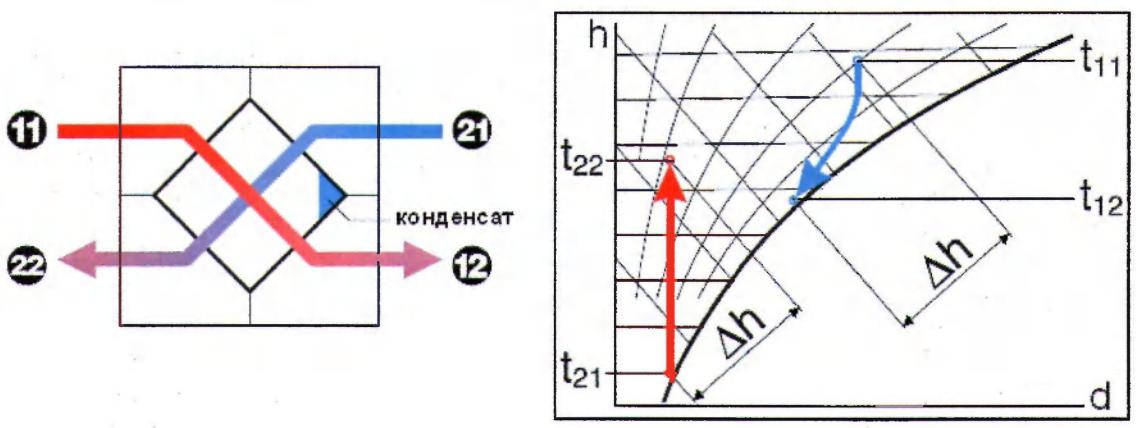


Рис.11.31. Интерпретация процессов обработки воздуха
в пластинчатом теплообменнике (обозначения по рис.11.29).

На рис.11.31, в диаграмме влажного воздуха, проведены линии процессов изменения состояния воздуха в каналах пластинчатого теплообменника-рекуператора для описанного выше случая конденсации влаги. При равенстве разностей энтальпий, характеризующих полную теплоту, передаваемую между каналами, разности температур воздуха отличаются по величине: $t_{11} - t_{12} < t_{22} - t_{21}$. За счет выделения теплоты конденсации наружный холодный воздух нагревается значительнее, чем при работе в сухом режиме, а величина коэффициента эффективности теплоутилизации канала наружного воздуха E_2 увеличивается. Причем приращение этой величины ΔE_2 существенным образом зависит от относительной влажности удаляемого воздуха φ_{11}. Чем выше значение φ_{11}, тем больше количество конденсата и, соответственно, больше ΔE_2 (рис.11.32).

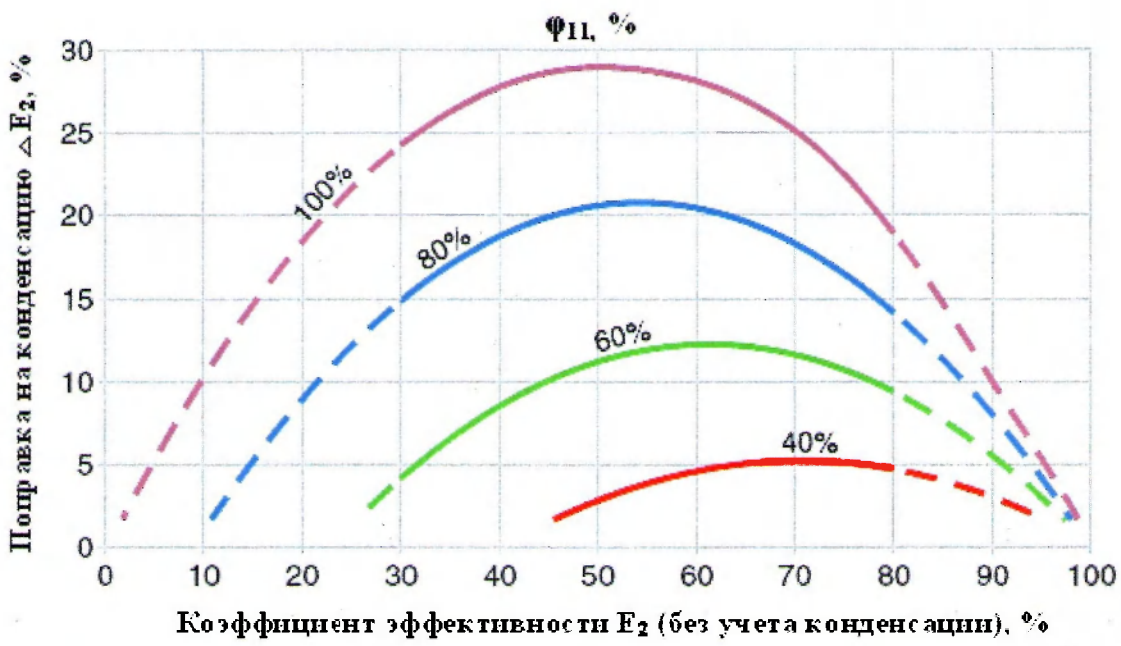


Рис.11.32. К анализу повышения коэффициента эффективности E_2 при конденсации*.

* получено для условий: t_{11} = 20 °С, t_{21} = -10 °С, G_2/G_1 = 1 (G_2 и G_1 – массовые расходы воздуха в каналах наружного и удаляемого воздуха, соответственно).

Зависимость $\Delta E_2 = f(E_2)$ при различных значениях φ_{11}, приведенная на рис.11.32, получена для определенных начальных значений температуры воздуха в каналах. Однако ее полезно рассмотреть в порядке качественного анализа для установления общей картины. Заметно, что функция $\Delta E_2 (E_2)$ имеет свой экстремум: увеличивается вместе с величиной E_2, а затем снова понижается. Низкие значения E_2 не всегда могут быть улучшены. Для $E_2 < 50$ % и $\varphi_{11} < 50$ % явление конденсации практически не наблюдается. Для оптимального использования теплоты конденсации необходимо обеспечивать (за счет режимных характеристик) величину коэффициента эффективности $E_2 > 50$ % [135].

Методика подбора воздушных пластинчатых теплообменников-теплоутилизаторов с учетом явления конденсации изложена в справочнике Hoval [185]. Расчет основан на коэффициентах эффективности и различных поправках к ним. Применительно к ранее сделанным обозначениям параметров воздушных потоков можно записать:

Утилизируемая теплота от удаляемого воздуха, используемая для нагрева холодного наружного воздуха,

$$Q_2 = C_в G_2 E_2 (t_{11} - t_{21}), \text{ кВт.} \qquad (11.6)$$

Конечная температура нагреваемого воздуха:

$$t_{22} = t_{21} + E_2 (t_{11} - t_{21}), {}^0\text{C.} \qquad (11.7)$$

Справочные данные для теплообменника с конкретной геометрией каналов включают данные по номинальной величине коэффициента эффективности E_N (рис.11.33), полученные при равенстве расходов в каналах наружного и удаляемого воздуха $G_2 = G_1$.

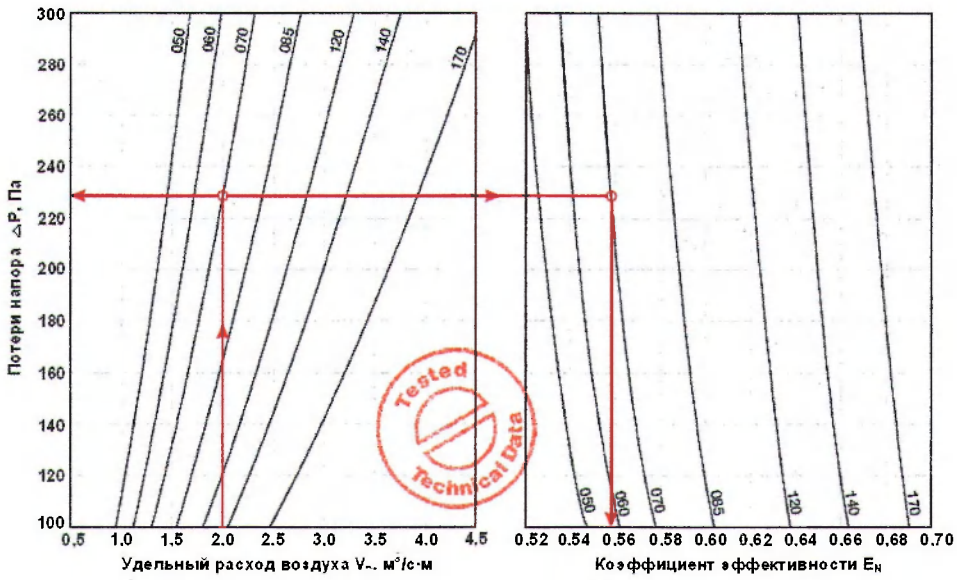


Рис.11.33. Номограмма* [185] определения коэффициента эффективности E_N и величины аэродинамического сопротивления ΔP для теплообменников Hoval с листами профиля N.

*в поле номограммы указаны коды теплообменников, которые присваиваются по значению его длины [см], причем большие номера от 120 до 170 отвечают составным теплообменникам из четырех пакетов 060, 070 и 085.

Если расходы воздуха неравны $G_2 \neq G_1$, то в расчет вводится поправка ΔE_t для величины коэффициента эффективности утилизации явной теплоты E_{2t} (рис.11.34):

$$E_{2t} = E_N + \Delta E_t. \qquad (11.8)$$

В случае конденсации влаги в канале удаляемого воздуха вводится поправка ΔE_2 к величине E_{2t} (рис.11.35):

$$E_2 = E_{2t} + \Delta E_2. \qquad (11.9)$$

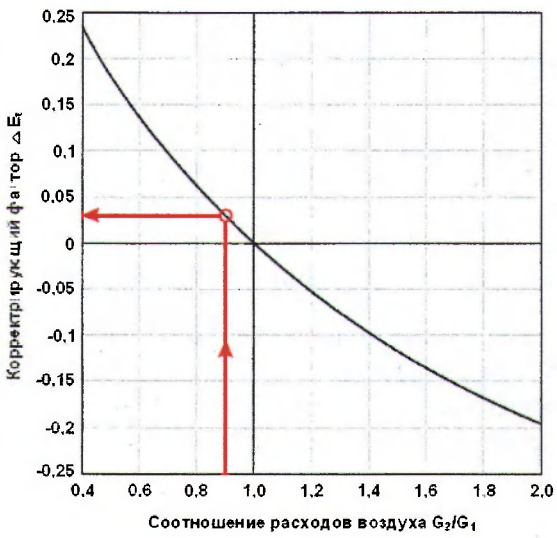


Рис.11.34. Зависимость величины ΔE_t от соотношения расходов G_2/ G_1 [185].

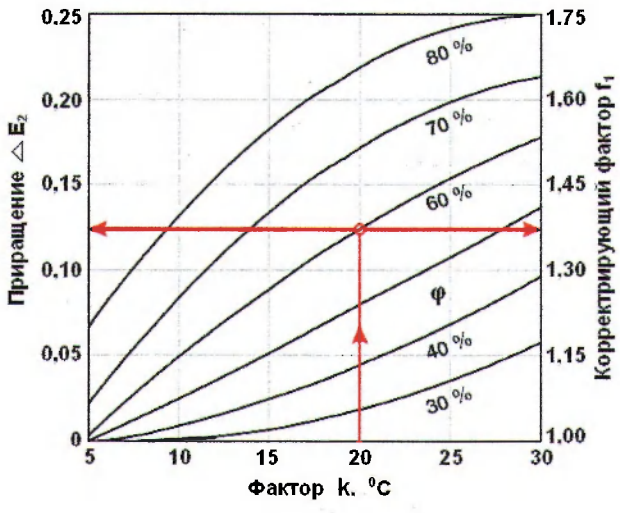


Рис.11.35. К определению величин ΔE_2 и f_1.

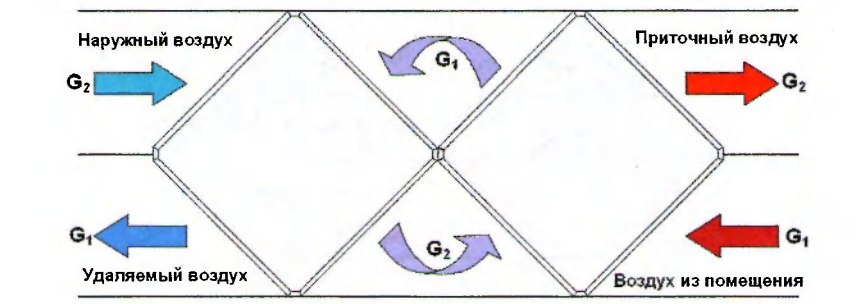
Фактор $k = E_{2t} (t_{11} - t_{21})$ (11.10)

Фактор f_1 используется для коррекции величины аэродинамического сопротивления теплообменника:

$$\Delta P_{факт} = f_1 \Delta P. \qquad (11.11)$$

Задача повышения эффективности пластинчатых теплообменных аппаратов может быть решена за счет максимального приближения к противоточной схеме организации воздушных потоков. Это достигается аналогично схеме Twinvent для теплообменников с промежуточным теплоносителем: включением в технологическую цепочку установки большего числа теплообменников, либо изменением конструкции аппарата.

На рис.11.36 приведены данные по эффективности теплоутилизационной установки, состоящей их двух последовательно включенных перекресноточных пластинчатых теплообменников.



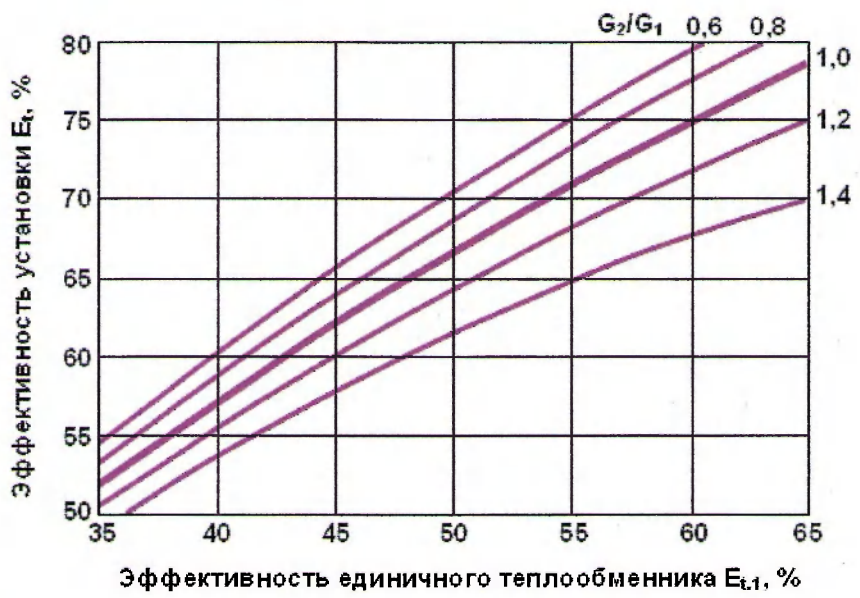


Рис.11.36. Схема и эффективность теплоутилизационной установки из двух теплообменников PWT (Klingendurg) при различных значениях соотношения G_2/G_1.

Специальная конструкция пластинчатых теплообменников GS (Klingendurg) для систем вентиляции и кондиционирования воздуха обеспечивает противоток движения воздуха в смежных каналах на большей части рабочей поверхности при диагональной перекрестной схеме входа и выхода воздуха (рис.11.37, 11.38) [263]. Эффективность работы такого теплообменника достигает ≥ 85 %, что существенно выше, чем у перекрестноточного аппарата PWT.

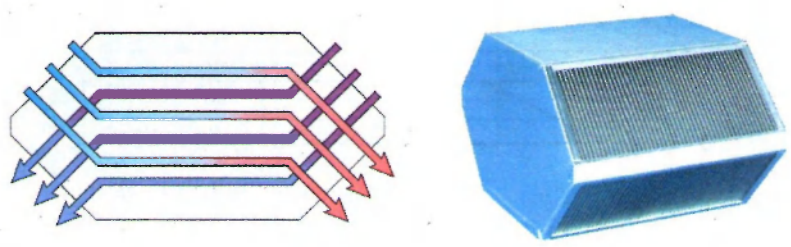


Рис.11.37. Противоточный теплообменник GS (Klingendurg).

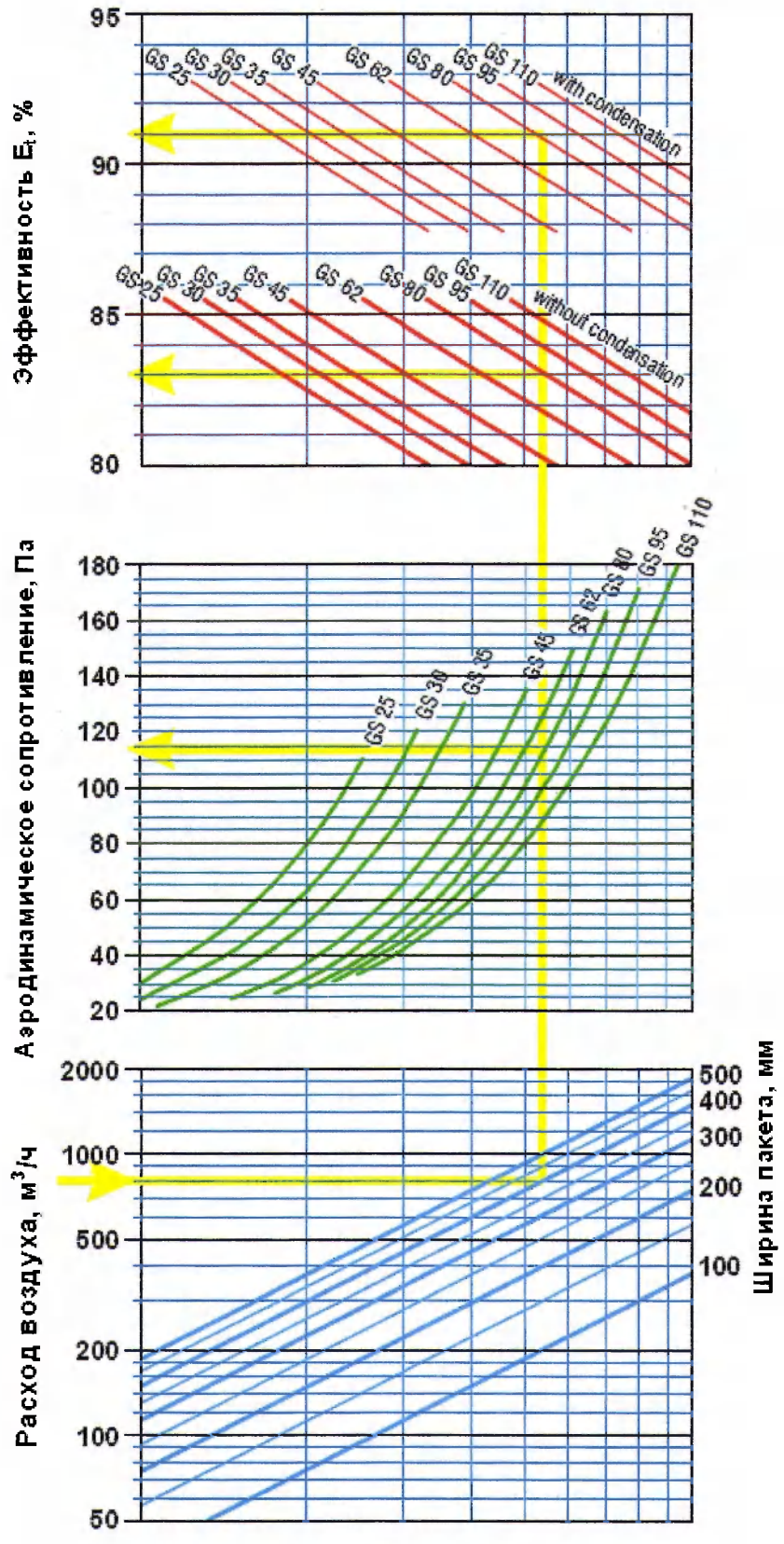


Рис.11.38. Рабочие характеристики теплообменника GS (Klingenburg).

Для значений расхода воздуха $G > 2000$ м^3/ч предлагается сдвоенная конструкция теплообменников GS, причем для более полного использования объема аппарат дополняется двумя стандартными теплообменниками PWT (рис.11.39).

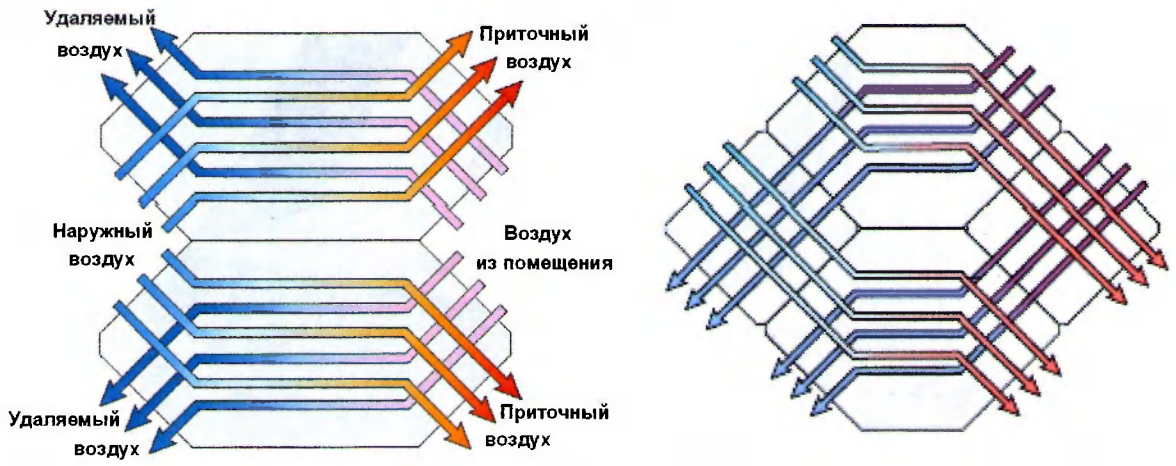


Рис.11.39. Комбинированный теплообменник (сэндвич 2GS/2PWT).

Пластинчатые рекуператоры также применяются для повышения осушающей способности поверхностных воздухоохладителей DX. На рис.11.40 приведена установка механического осушения воздуха с последовательным включением рекуператоров в схему работы холодильной машины, так, что воздух до и после воздухоохладителя проходит через теплоутилизатор – MSP (Multi Small Plate) Technology.

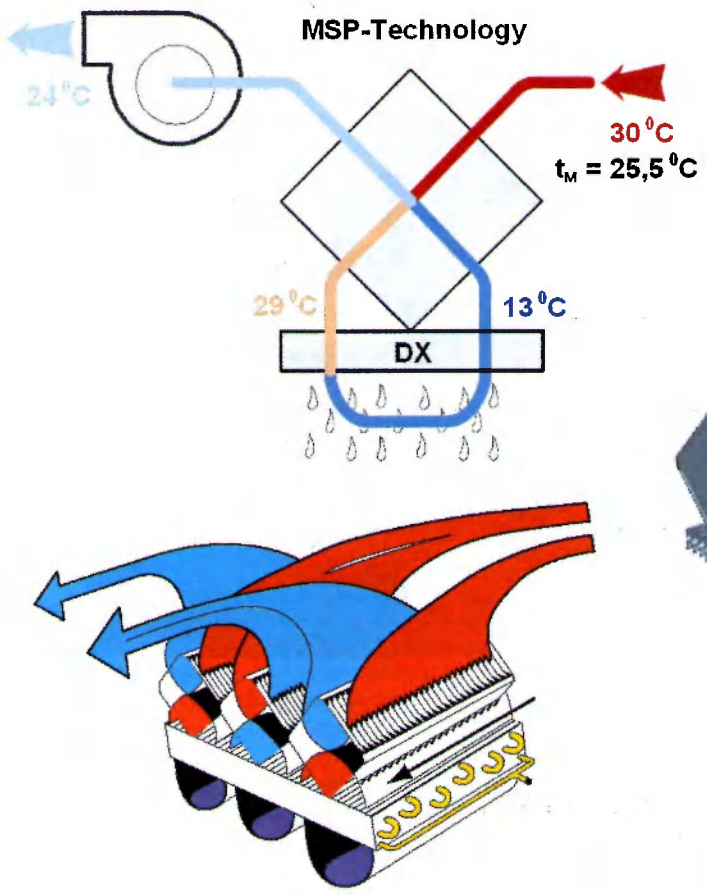
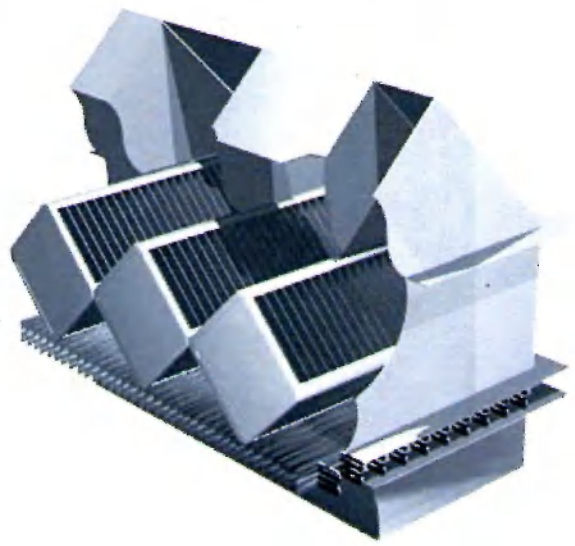


Рис.11.40. Установка механического осушения воздуха с применением пластинчатых рекуператоров по MSP технологии (Nautica).



Данная схема позволяет вдвое снизить потребную холодопроизводительность.

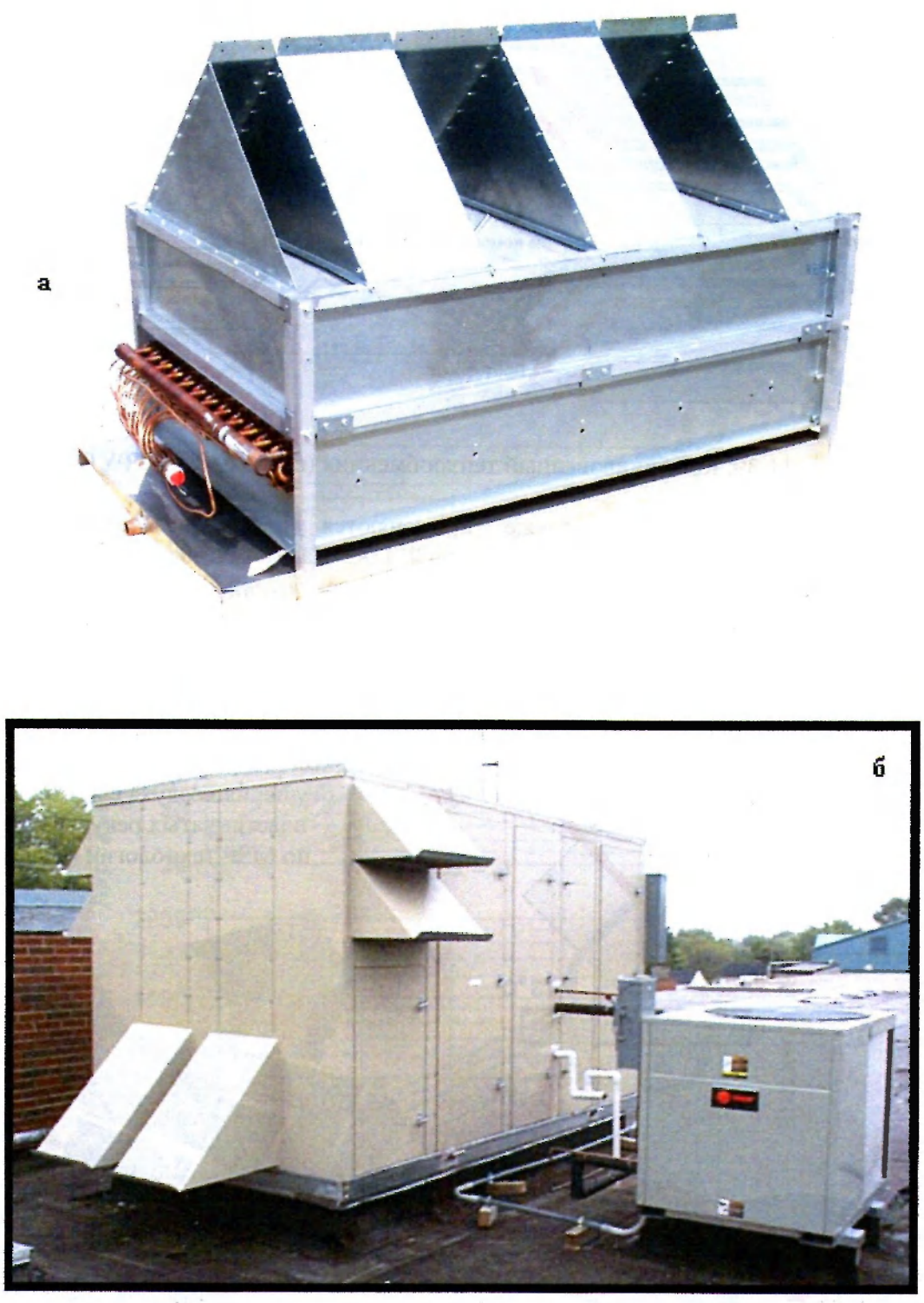


Рис.11.41. Фотографии аппарата MSP® Dehumidifying Coil (а)
и крышного варианта (RoofTop) размещения установки (б).

На рис.11.42…11.44 приведены различные варианты компоновки вентиляторных установок с пластинчатыми теплообменниками-рекуператорами, работающими по параллельной схеме теплоутилизации между потоками приточного и удаляемого воздуха.

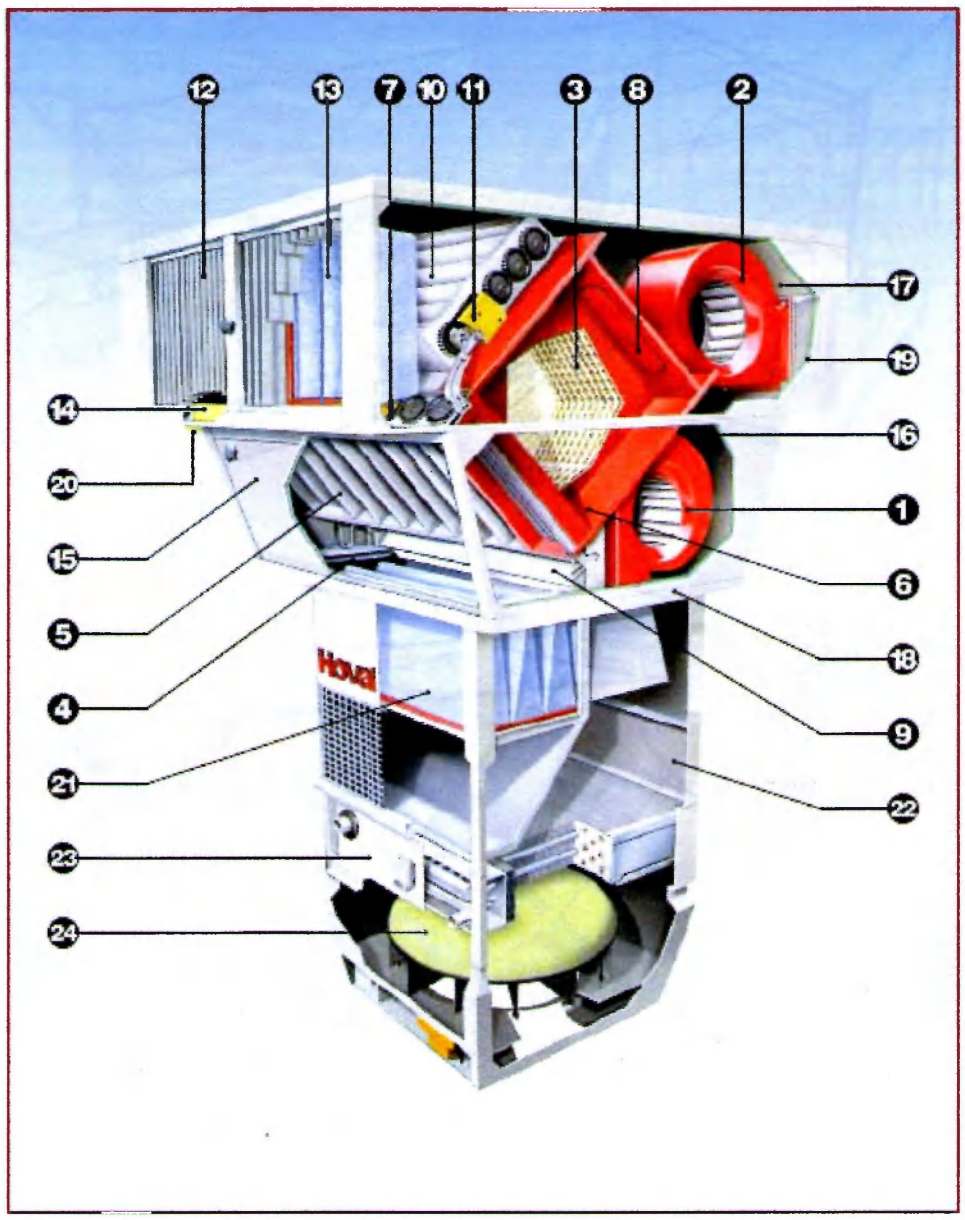
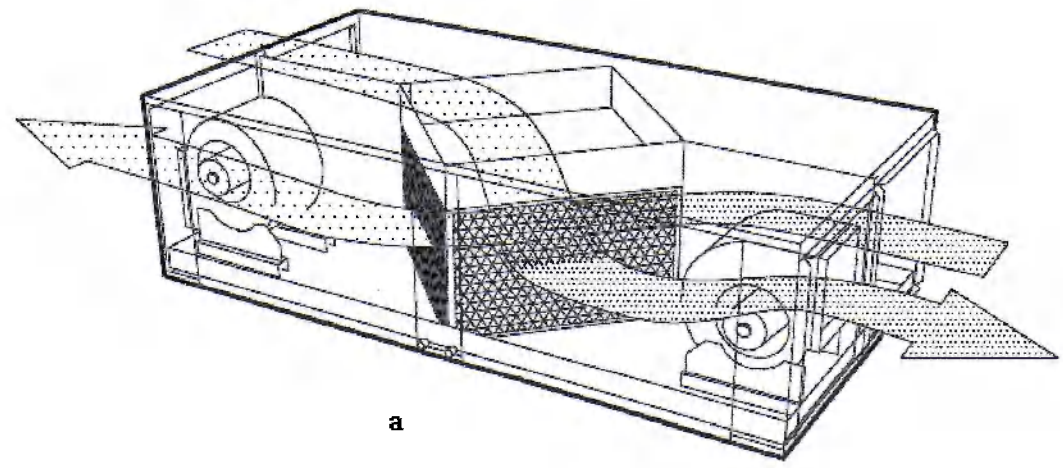
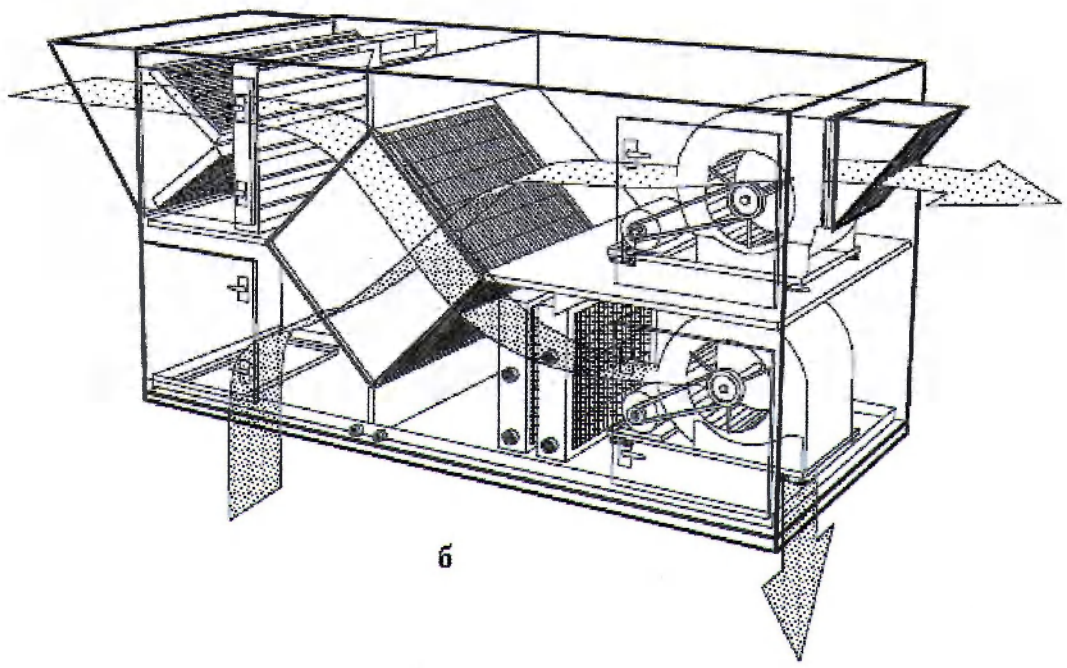


Рис.11.42. Вентиляторная приточная теплоутилизационная установка Hoval крышного типа с пластинчатым рекуператором:

1 – приточный вентилятор; 2 – вытяжной вентилятор; 3 – рекуператор; 4 – дренаж конденсата; 5 – воздушные заслонки фронтального сечения рекуператора и байпаса; 6 – байпас; 7 – привод заслонок байпаса; 8 – гравитационная заслонка байпаса (закрывается при отключении установки); 9 – заслонки канала рециркуляции; 10 – заслонки канала наружного воздуха; 11 – привод заслонок каналов рециркуляционного и наружного воздуха; 12 – защита от дождя; 13 – фильтр наружного воздуха; 14 – электрический щит; 15 – съемная панель обслуживания фильтров; 16 – панель обслуживания вентиляторов; 17 – решетка удаляемого воздуха; 18 – рама установки; 19 – изоляция; 20 – выключатель вентиляторов; 21 – фильтр рециркуляционного воздуха; 22 – панель обслуживания воздухонагревателей; 23 – воздухонагреватель; 24 – воздухораспределитель приточного воздуха инжекционного типа.



а



б

Рис.11.43. Вентиляторные приточные теплоутилизационные установки с горизонтальным (а) и вертикальным (б) диагональным расположением теплообменника-рекуператора (XeteX).

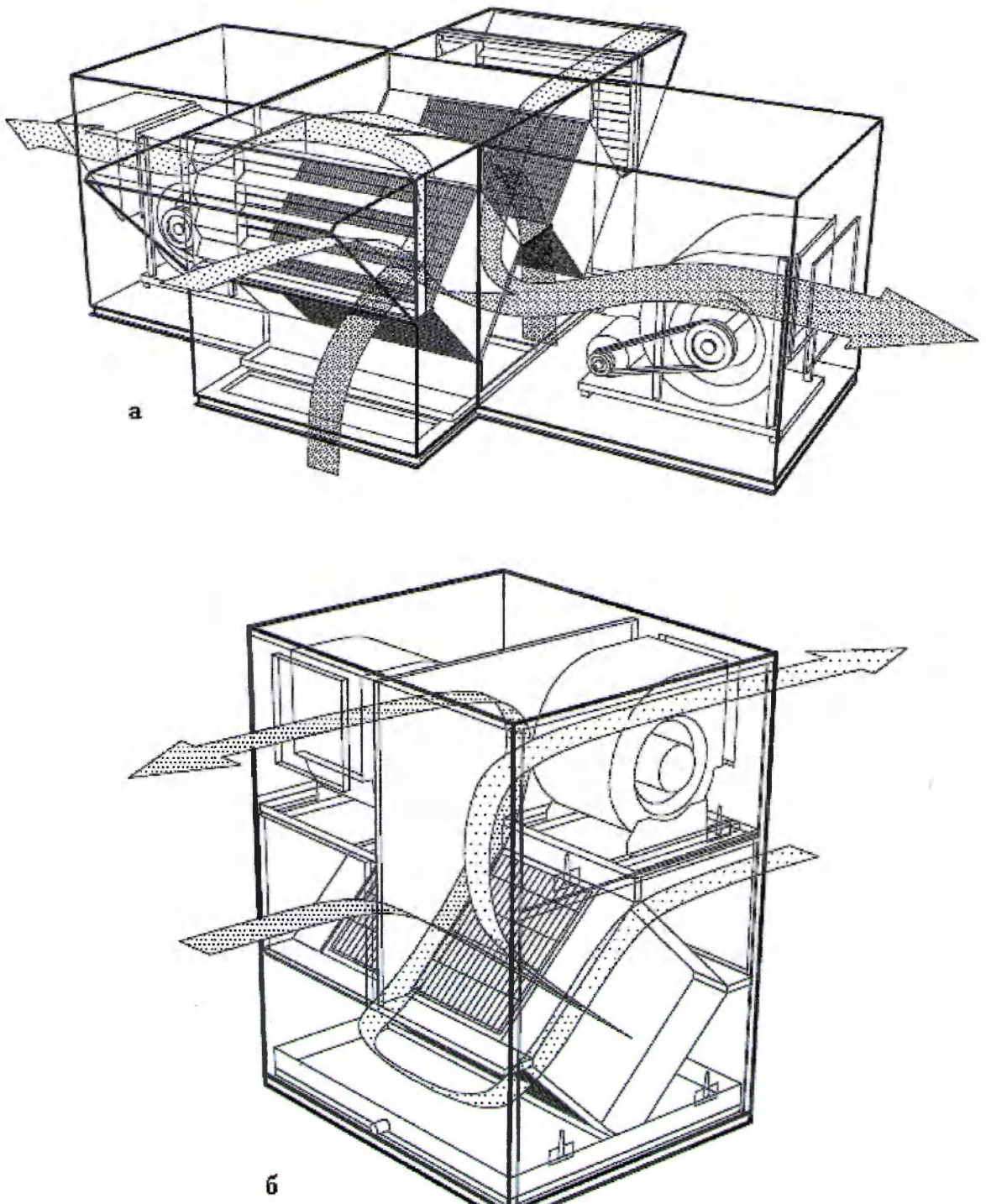


Рис.11.44. Вентиляторные приточные теплоутилизационные установки большой производительности со сдвоенными теплообменниками-рекуператорами и различным расположением вентиляторов:
по горизонтальной оси – а; и по вертикали – б (XeteX).

11.2.1. РЕКУПЕРАТОРЫ С ГИГРОСКОПИЧНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

При использовании гигроскопичных пластин в рекуператорах обеспечивается утилизация полной теплоты.

Примерами такого решения являются теплоутилизаторы ERV (RenewAire) и Lossnay (Mitsubishi Electric), рис.11.45, 11.46, [233]. Тепломассообменные модули этих аппаратов представляют собой набор склеенных между собой пластин из гигроскопической резины (в случае ERV) или специальной бумаги (Lossnay core). Пара смежных пластин: плоская и треугольного профиля, – образует каналы для прохода воздушного потока (рис.11.45). Специальный клей, используемый для сборки модулей, не уменьшает рабочую поверхность тепломассообмена, поскольку он, также как и пластины, влагопроницаем.

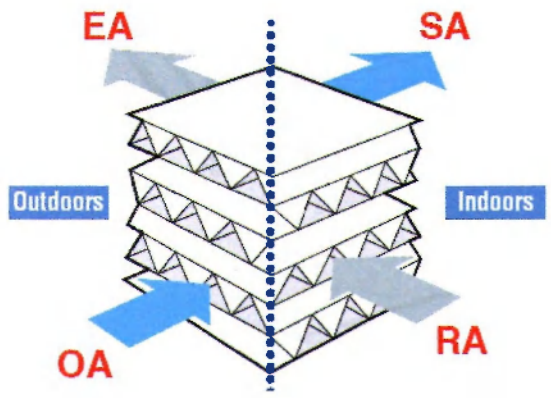


Рис.11.45. Схема тепломассообменного модуля ERV/Lossnay.

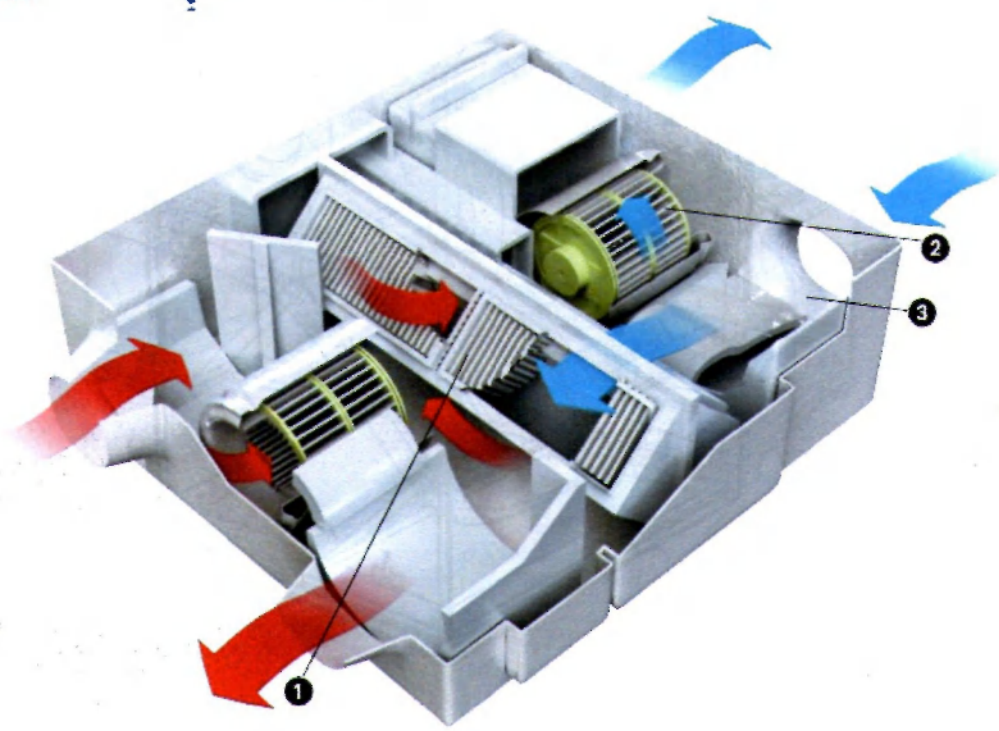


Рис.11.46. Теплоутилизатор Lossnay: 1 – тепломассообменный модуль; 2 – четырехскоростной диаметральный вентилятор; 3 – вентиляционный канал.

Материал пластин Lossnay – оригинальная гигроскопичная бумага, отличает данные теплообменники от обычных пластинчатых рекуператоров.

Существует две модификации бумаги (рис.11.47):
- двухслойный материал, состоящий из тонкой водопроницаемой пленки, размещенной на пористой основе, толщиной 120 мм;
- ультратонкая непористая пленка, которая свободно пропускает молекулы водяных паров и задерживает другие более крупные газовые молекулы (CO_2, NH_3 и др.).

На базе двухслойного материала выпускались рекуператоры серии LGH-RX3. Новая серия LGH-RX4 включает тепломассообменные модули, изготовленные на основе ультратонкой пленки.

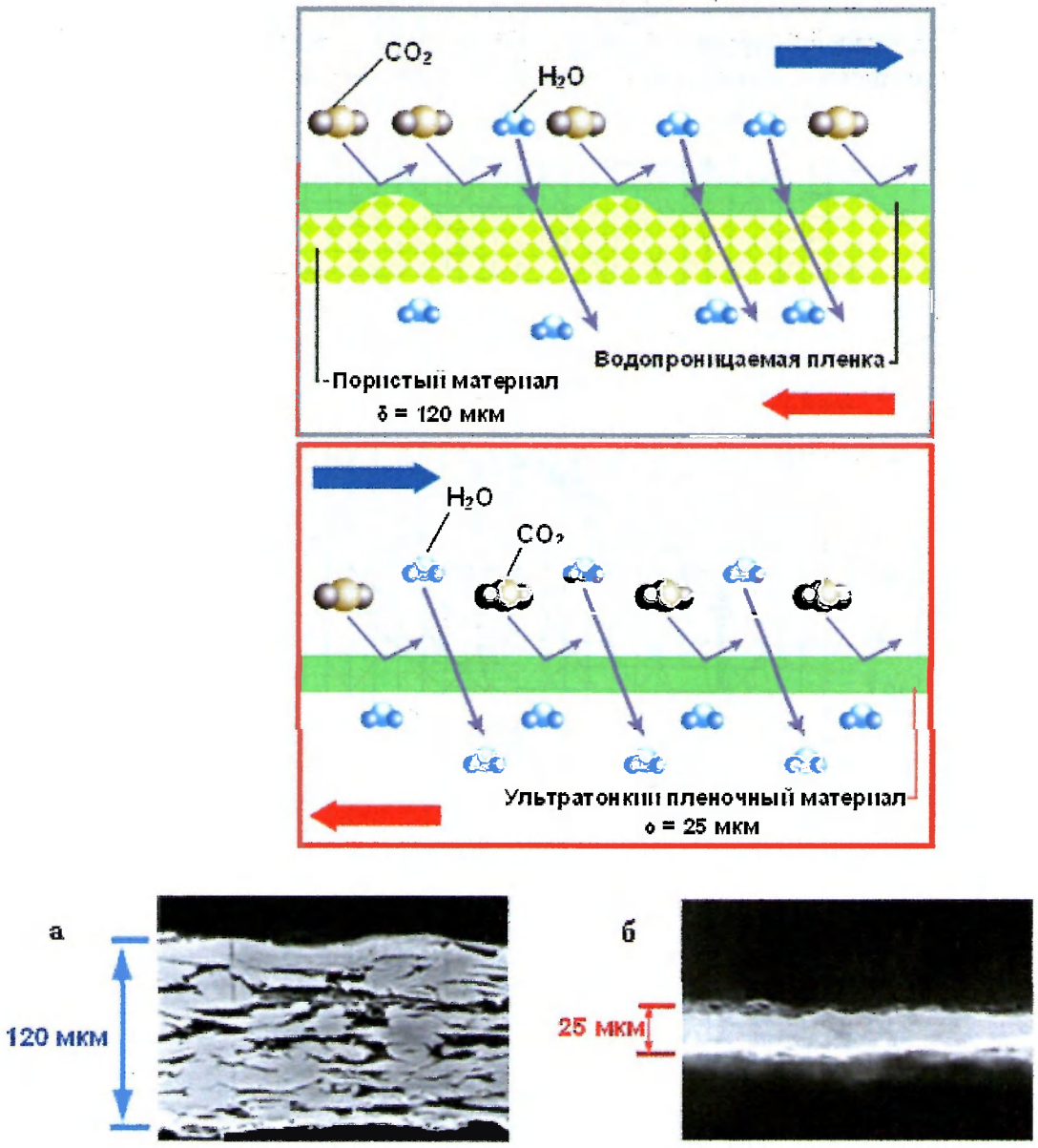


Рис.11.47. Схемы и фотографии специальной бумаги (Lossnay core):
а – двухслойной; б – однослойной.

В результате совершенствования материала гигроскопичных пластин удалось добиться высоких значений коэффициентов эффективности E_h = 70…78 % (E_t = 79…85 %, $E_d \approx$ 60 %), а также создать барьер, препятствующий перетечке отработанного воздуха (< 1 %). Пропуск молекул аммиака NH_3 менее 2,5 %, углекислого газа CO_2 < 0,3 %.

11.3. ИЗОБРАЖЕНИЕ В d,h - ДИАГРАММЕ ПРОЦЕСОВ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИИ В УСТАНОВКАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С РЕКУПЕРАТОРАМИ

На рис.11.48…11.50, в качестве примера, показаны построения в d,h- диаграмме процессов обработки воздуха для зимнего и летнего режимов работы установок кондиционирования воздуха (УКВ), в которых использованы рекуператоры явной и полной теплоты для теплоутилизации энергии, затраченной в УКВ (теплоты либо холода).

Рекуператоры явной теплоты – все, рассмотренные выше в § 11.1.1 и § 11.2, аппараты батарейного типа, тепловые трубы, пластинчатые воздушные теплообменники, в которых осуществляется теплообмен только явным образом (без массообмена).

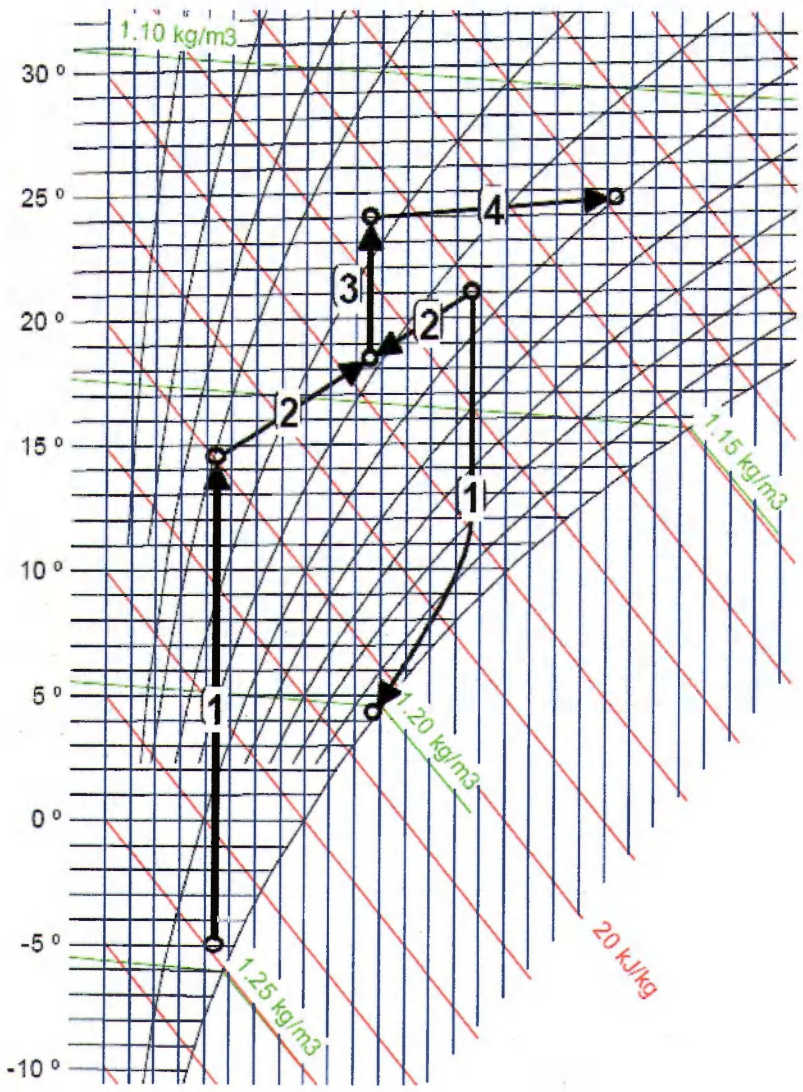
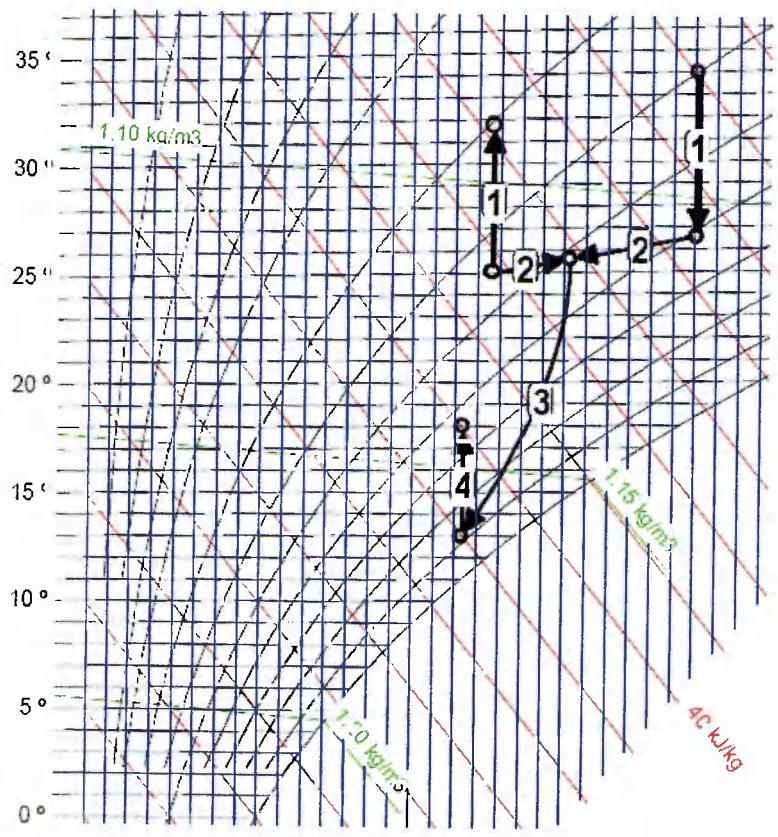


Рис.11.48. Построение процессов в d,h- диаграмме
для зимнего режима работы УКВ с рекуператором явной теплоты:
1 – теплоутилизация; 2 – смешение наружного воздуха после ТУ и воздуха помещения;
3 – подогрев в поверхностном воздухонагревателе; 4 – увлажнение паром.

а



б

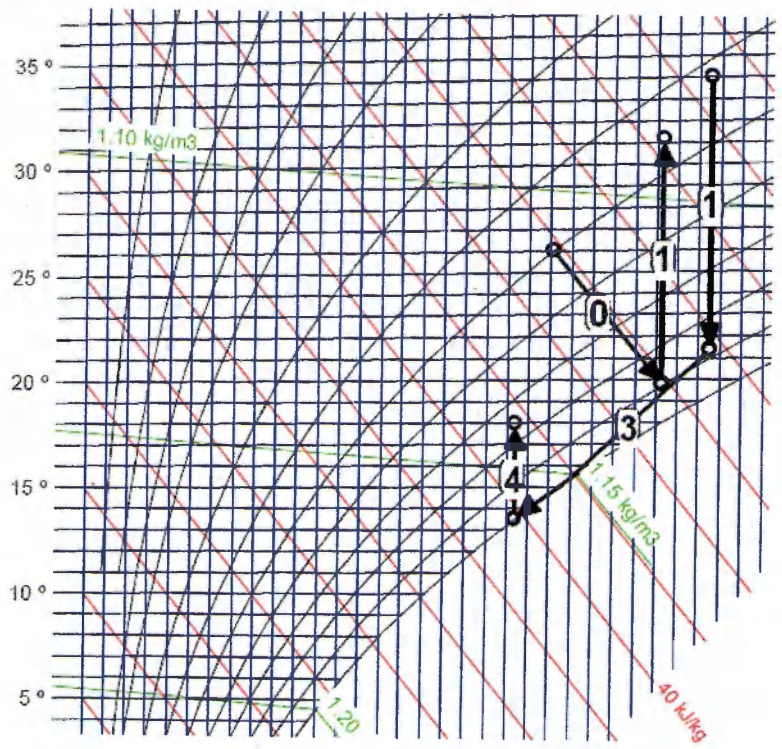


Рис.11.49. Построение процессов в d,h- диаграмме для летнего режима работы УКВ с рекуператором явной теплоты по классической схеме (а) и с использованием предварительного охлаждения воздуха перед ТУ (б):

0 – испарительное охлаждение воздуха из помещения, подаваемого в ТУ;
1 – теплоутилизация в рекуператоре; 2 – смешение наружного воздуха после ТУ и воздуха помещения; 3,4 – охлаждение и нагревание в поверхностных аппаратах: воздухоохладителе и воздухонагревателе, соответственно.

Повысить эффективность ТУ явной теплоты в летнем режиме можно, используя принцип косвенно-испарительного охлаждения, который здесь реализуется за счет предварительного испарительного охлаждения воздуха на входе в ТУ (процесс 0, рис.11.49), подробнее рассмотрен в § 11.4.1.

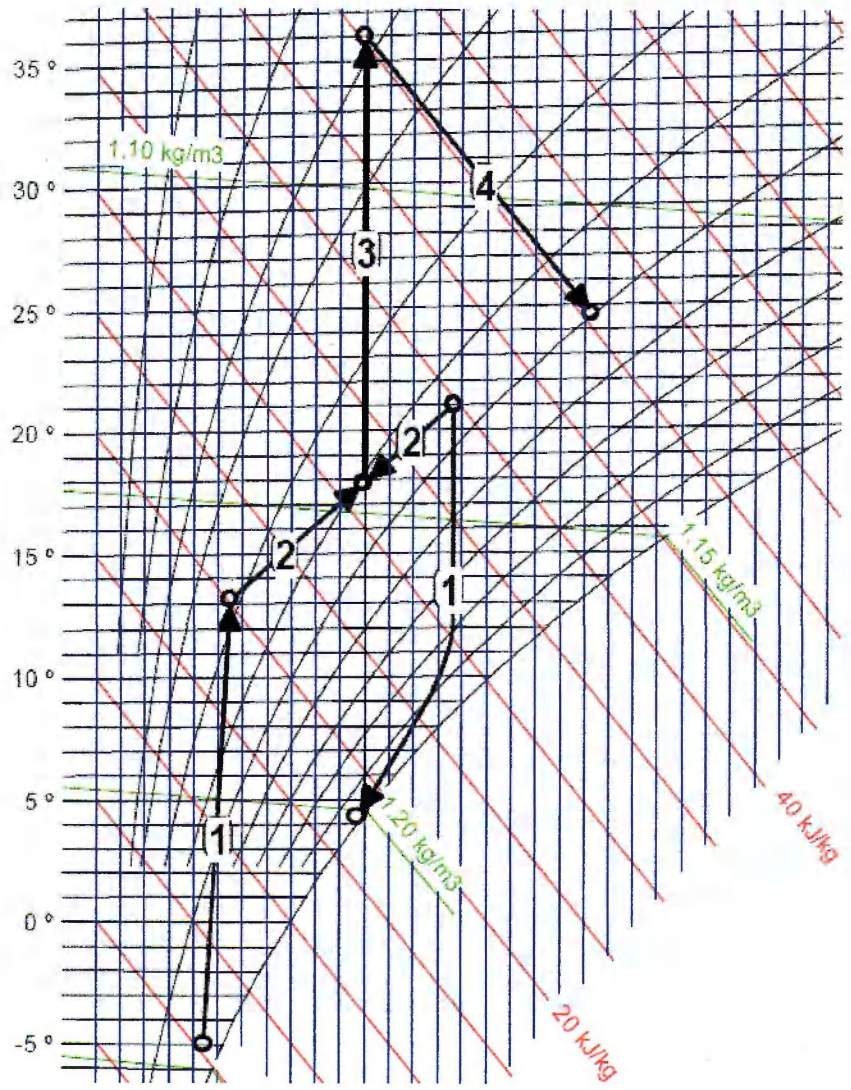


Рис.11.50. Построение процессов в d,h- диаграмме
для зимнего режима работы УКВ с рекуператором полной теплоты:

1 – теплоутилизация; 2 – смешение наружного воздуха после ТУ и воздуха помещения; 3 – подогрев в поверхностном воздухонагревателе; 4 – увлажнение оборотной водой.

Рекуператоры с гигроскопичными пластинами полной теплоты, за счет теплоутилизации как явной, так и скрытой части теплоты, являются более эффективными аппаратами ТУ по сравнению с рекуператорами явной теплоты: в зимнем режиме работы подогрев наружного воздуха идет одновременно с его увлажнением (процесс 1, рис.11.50).

Еще большей эффективностью обладают регенаторы полной теплоты enthalpy wheel и sorption wheel, § 11.4. В случае их применения процесс в d,h- диаграмме имеет значительное отклонение от линии d = const.

* приведенные построения процессов теплоутилизации в d,h- диаграмме выполнены инженерной компанией Kunz Beratungen GMBH, Dietlikon, Switzerland: www.kunz.beratungen.ch

11.4. ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ РОТОРОВ-РЕГЕНЕРАТОРОВ

ROTORVENT

Rotorvent -

- самая эффективная технология теплоутилизации в СКВ

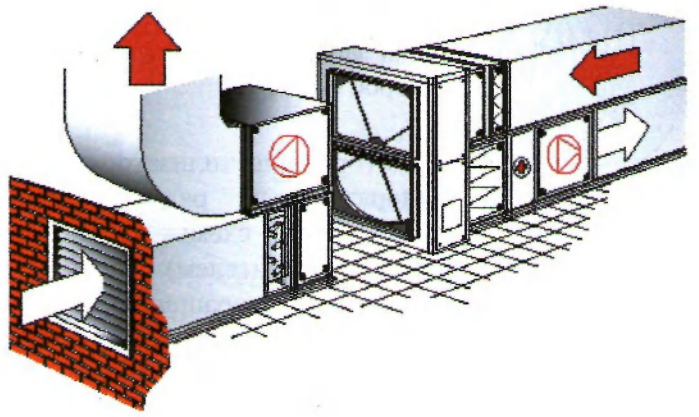
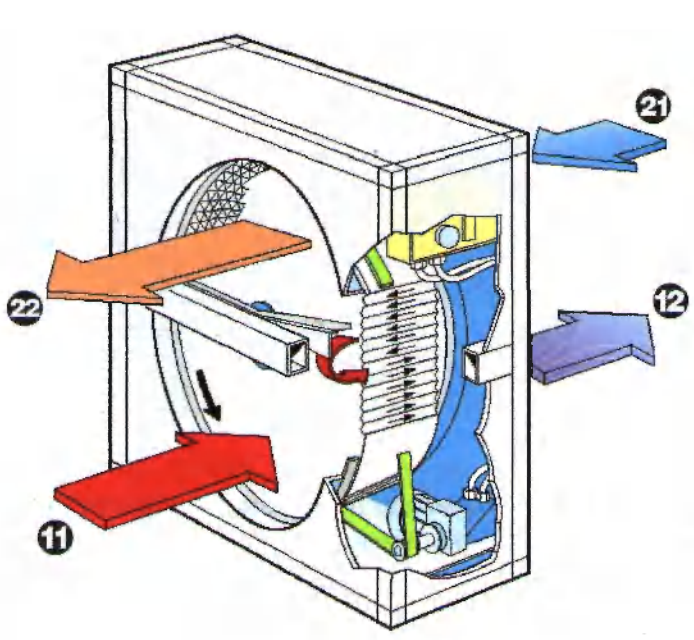


Рис.11.51. Схема размещения роторного теплоутилизатора в центральной СКВ.

Существует три типа роторов: негигроскопический ротор (non-hygroscopic rotor) явной теплоты (sensible (condensation) wheel), гигроскопический (hygroscopic rotor) полной теплоты (enthalpy wheel) с капиллярно-пористой структурой поверхности металлических листов (как правило, алюминиевых, прошедших специальную химическую обработку) и ротор с тонким слоем десиканта на рабочей поверхности (composite rotor либо sorption wheel). Последнее устройство также является ротором полной теплоты. Принцип работы ротора полной теплоты в осуществлении процессов тепло- и массообмена в сорбционных каналах при нагревании и охлаждении приточного воздуха показан на рис.11.62.

Конструкция ротора-теплоутилизатора, как уже отмечалось в § 7.2.5.2, аналогична конструкции ротора-осушителя и приведена на рис.11.52…11.56. Роторы набираются чередованием плоских и гофрированных листов алюминиевой фольги: сплошными лентами (one-piece rotor – W-type wheel) либо отдельными сегментами (sectorized rotor – S-type wheel) (рис.11.52, 11.53). Толщина фольги: 70, 80, 100 или 120 мкм. Высота гофра: 1,6, 1,9, 2,5 мм.



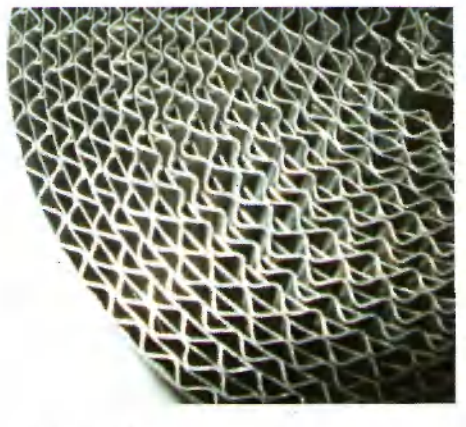
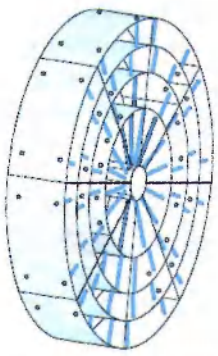
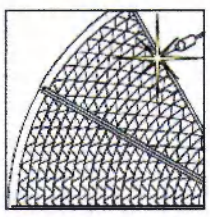


Рис.11.52. Ротор-теплоутилизатор. Устройство со схемой работы и фотография сегмента насадки ротора:
11 - 12 – удаляемый воздух;
21 - 22 – наружный воздух.





Фиксация листов в насадочном слое осуществляется с помощью клея (AEX Inc.), шпилек (Enventus AB), точечной сваркой (Klingenburg) либо замковым способом, разработанным компанией Swegon (PM-Luft AB): выступ, выполненный в виде каблука, на вершине гофра входит в соответствующую впадину на плоском листе.

На фото (справа) показан процесс изготовления роторов Hoval.



Ротор-теплоутилизатор имеет широкий типоразмерный ряд 20 единиц (в случае двухроторной схемы, § 11.3.1, унифицирован с ротором-осушителем). Толщина ротора 250 (200) мм. Скорость вращения выше скорости колеса осушителя и, как правило, составляет 0,75…12 об/мин (до 25 об/мин – изделия компании AEX).

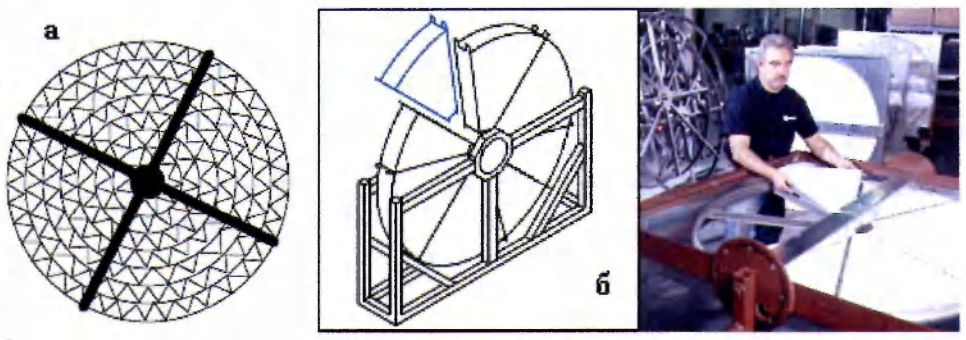


Рис.11.53. Компоновка ротора: а – сплошной лентой; б – сегментами.

Все роторы диаметром свыше 2,5 м набираются сегментами (по соображениям удобства их транспортирования, масса одного сегмента не превышает 50 кг). В случае необходимости, по отдельному заказу, также могут изготавливаться и роторы малого диаметра (рис.11.54).

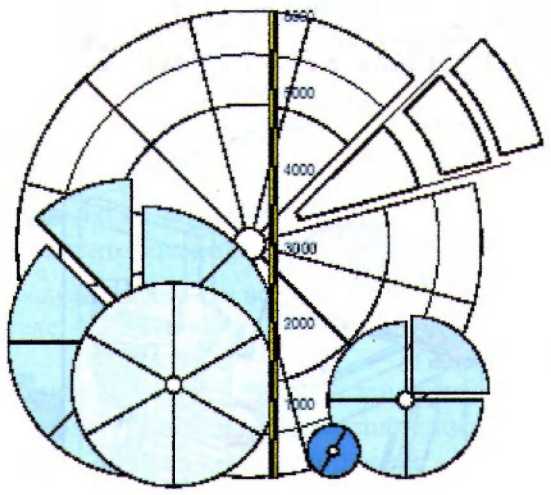


Рис.11.54. Типоразмерный ряд роторов компании Klingenburg.

При определенных условиях, связанных с величиной перепада давлений ΔР в приточной линии (P_1) и вытяжной (P_3), возможны перетечки отработанного воздуха в поток свежего приточного воздуха, что нежелательно. Для устранения перетечек в роторных устройствах предусмотрено специальное накладное устройство – сектор чистки “Purge sector” (рис.11.55).

Это устройство за счет расширяющейся части обеспечивает шлюзование отработанного воздуха в каналах ротора на линии раздела двух потоков воздуха. Чем меньше $\Delta P = P_1 - P_3$, тем больше должен быть угол α захвата площади ротора за счет отклонения угла секции (ΔP = 1200 Па – α = 2°, ΔP = 95 Па – α = 10°). При этом следует выдерживать следующее условие: $P_1 > P_4$, $P_2 > P_3$. Сектор чистки работает должным образом при значениях $\Delta P \geq 200$ Па.

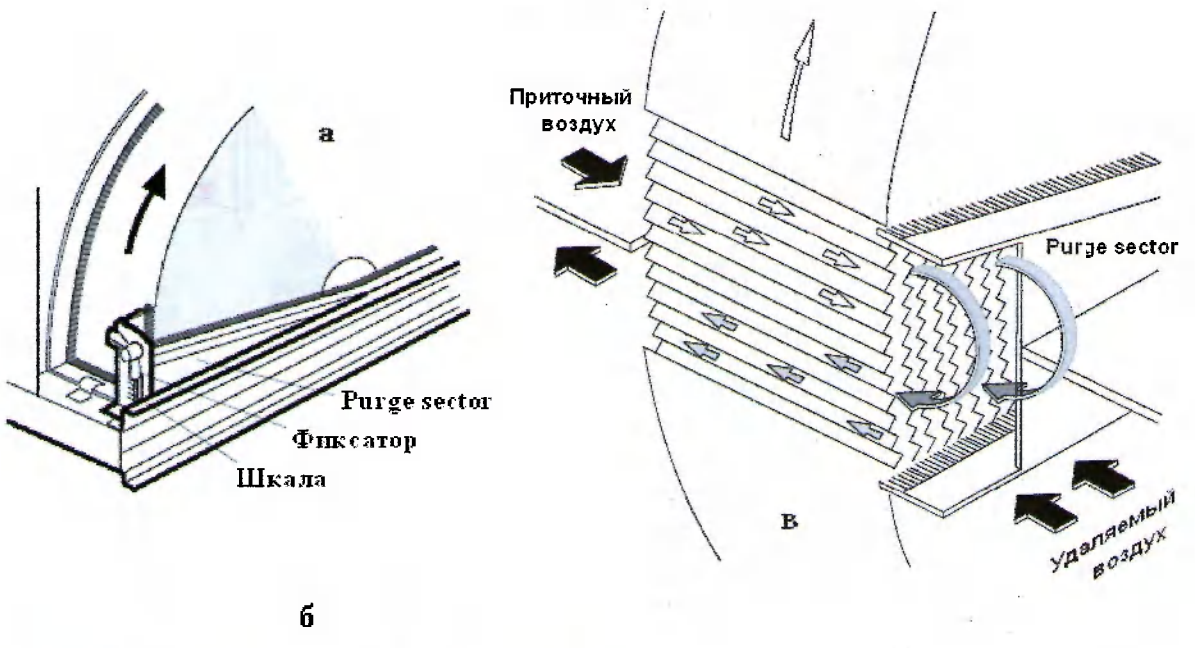


Рис.11.55. Сектор чистки: устройство – а; фотография – б; схема работы (в) и настройки (г).

После настройки по условиям эксплуатации сектор чистки должен обеспечивать минимальный переток отработанного воздуха. Современные конструкции способны ограничивать этот показатель величиной 0,04 % от величины объемного расхода.

Как и сектор чистки, так и периферийная часть ротора (по наружной окружности) уплотняются прокладками из войлока или резины (рис.11.55, 11.56).

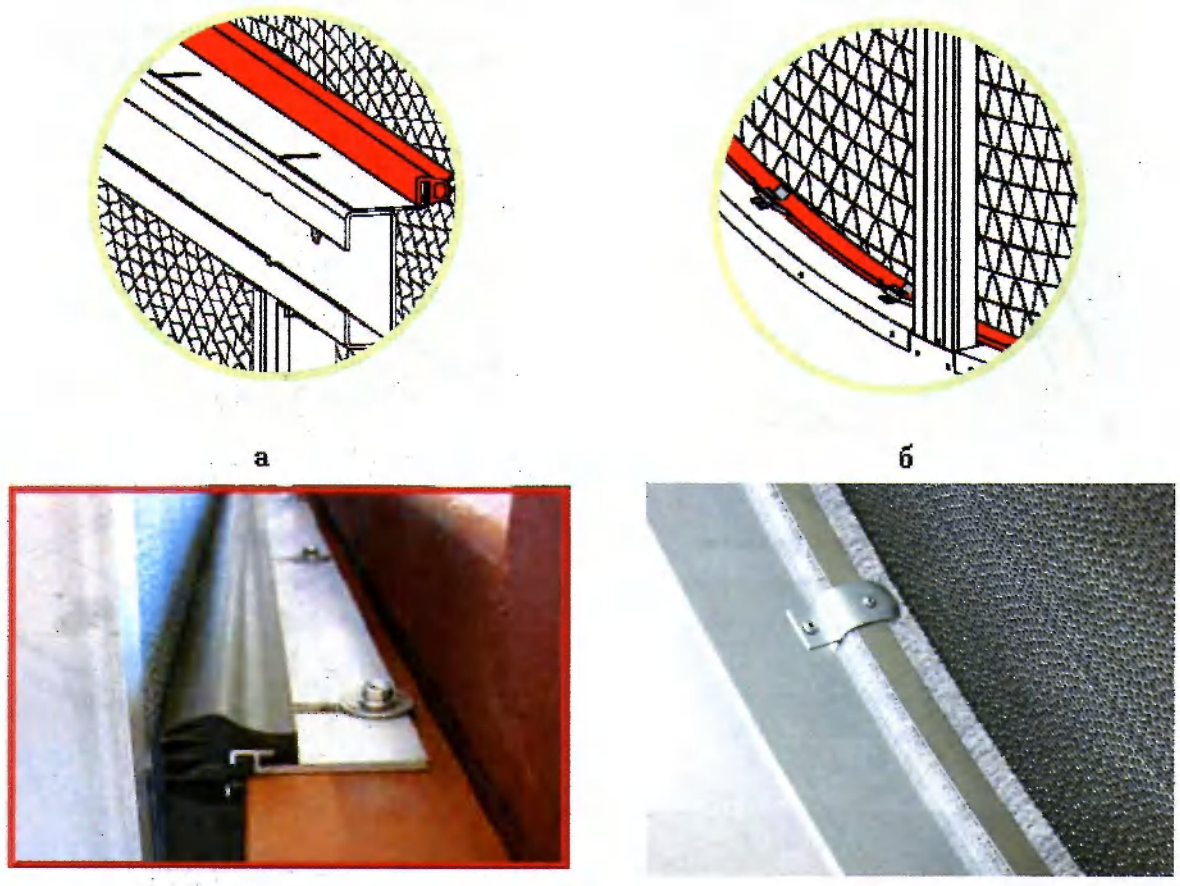


Рис.11.56. Уплотнение ротора:
а – сектора чистки (резина); б – по периферии (войлок).

В процессе эксплуатации каналы ротора могут зарастать различными отложениями, в т.ч. биологического происхождения (рис.11.57). В связи с этим, в перечне работ регламентного обслуживания предусмотрена обязательная процедура очистки ротора продувкой воздухом либо промывкой струями воды под давлением.

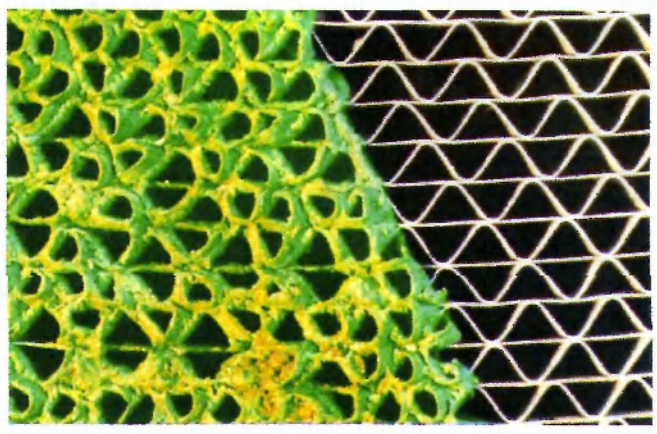


Рис.11.57. Фотография торцевой части ротора:
загрязненной (слева) и очищенной (справа).

На рис.11.58, 11.59, в качестве примера, представлены фотоматериалы ведущих компаний в области Rotorvent – Swegon и Systemair.

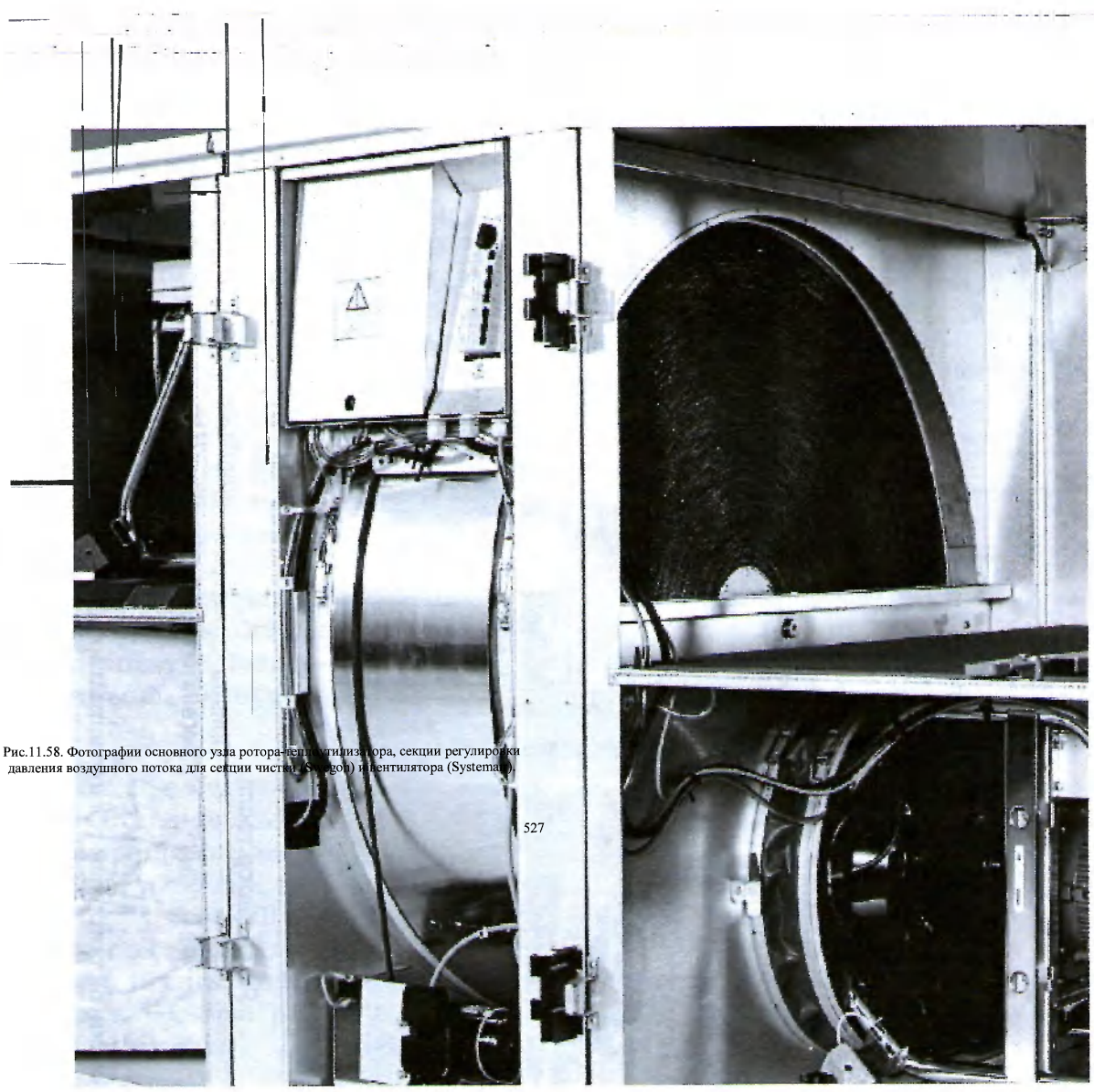
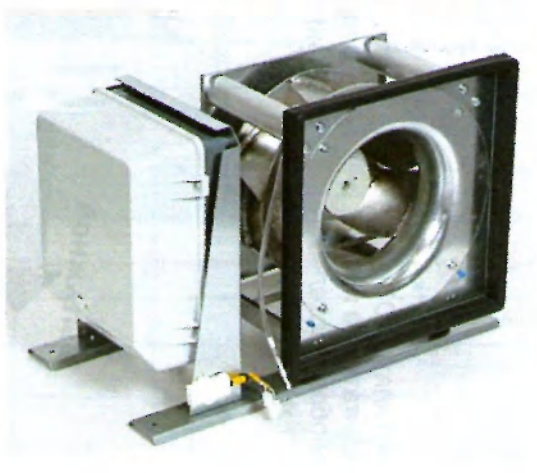


Рис.11.58. Фотографии основного узла ротора-регенератора, секции регулировки давления воздушного потока для секции чистки (Swegon) и вентилятора (Systemair)





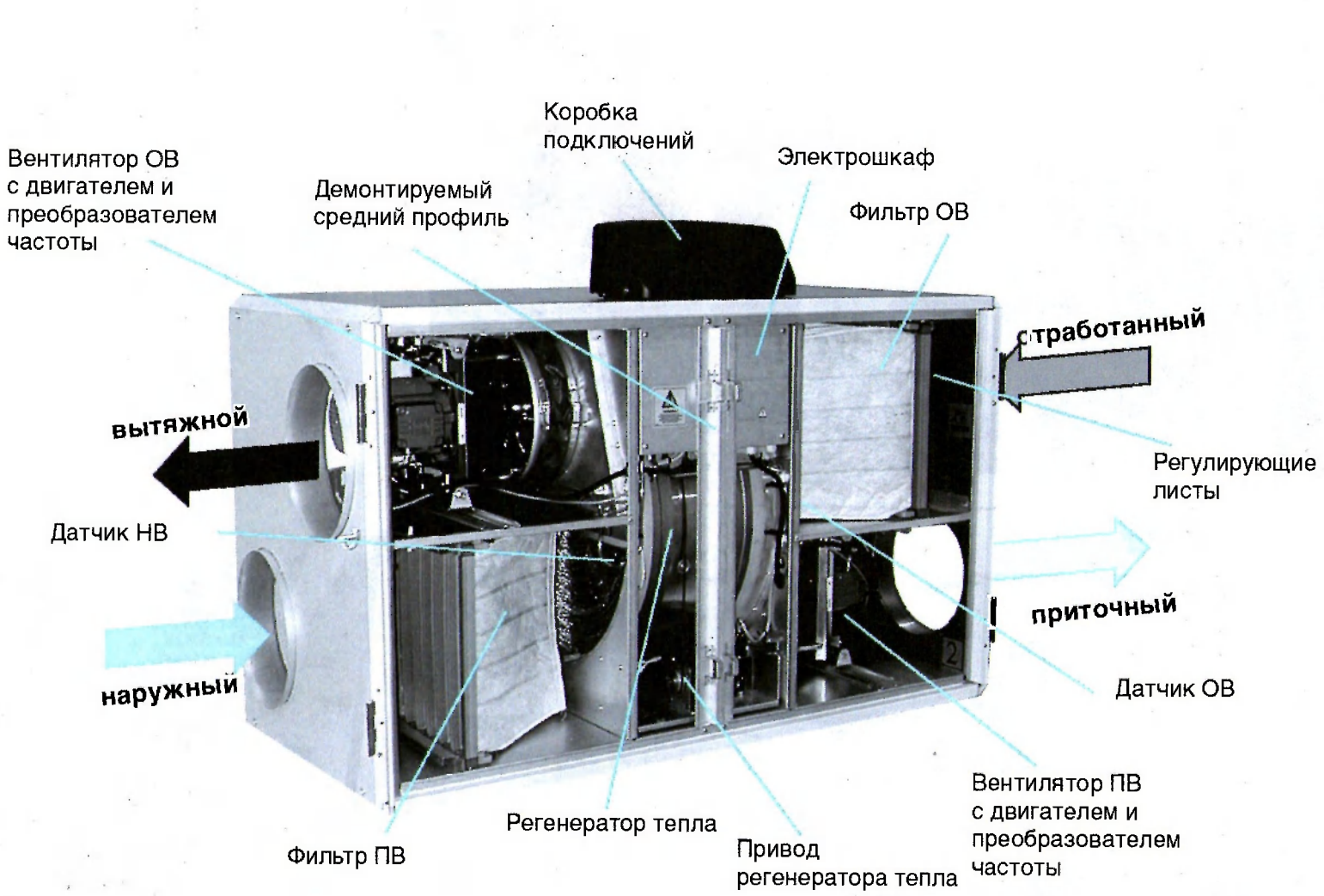


Рис.11.59. Агрегатированный роторный теплоутилизатор “Gold” (Swegon).

Необходимо отметить, что техническая реализация импрегнированного цеолитного слоя в каналах роторов-теплоутилизаторов (также как и роторов-осушителей, § 7.2.5.2) позволяет использовать эти устройства в условиях загрязненных сред без переноса вредных веществ из удаляемого потока в чистый приточный воздух. Такие роторы сегодня применяются в объектах с повышенными требованиями к чистоте воздуха, в т.ч. и в медицинских учреждениях.

Поскольку цеолиты – это молекулярные сита с определенным размером каналов, то использование цеолитов 3А и 4А позволяет осуществлять селективный отбор молекул с меньшим диаметром. Диаметр молекул воды, как известно, составляет 2,8 А. В то же время диаметр молекул многих газов-загрязнителей воздуха больше размера входного окна указанных цеолитов, в связи с чем они не улавливаются, а значит и не передаются, рис.11.60 (см. также материалы прил. VIII).

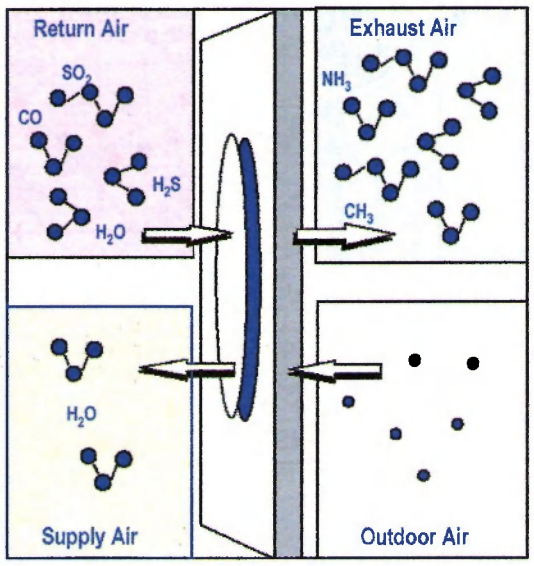
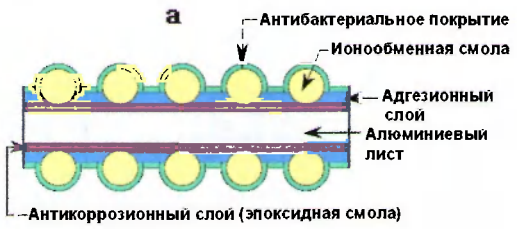


Рис.11.60. Иллюстрация переноса молекул воды в каналах роторов: Outdoor Air – наружный, Supply Air – приточный, Return – вытяжной и Exhaust Air – удаляемый, - потоки воздуха, соответственно.

В качестве альтернативы силикагелиевых роторов разработаны кассеты Hi-Panex-Ion (Ion Power Total Heat Exchanger, Seibu Giken) с покрытием поверхности листов, образующих каналы, специальными ионообменными смолами (ионитами) Ion Exchange Resin, рис.11.61а, на основе линейных полимеров стирола, поперечно сшитых дивинилбензолом (Polystyrene DVB Cation, прил. VIII). Эти материалы, за счет проявления механизма гидратации и осмоса ионов, способны значительно уменьшить накопление и последующий выброс вредных веществ. Иониты, подобно цеолитам, позволяют ограничить адсорбцию молекул веществ, имеющих больший размер и меньшую полярность, по отношению к молекулам H_2O (рис.11.61б).



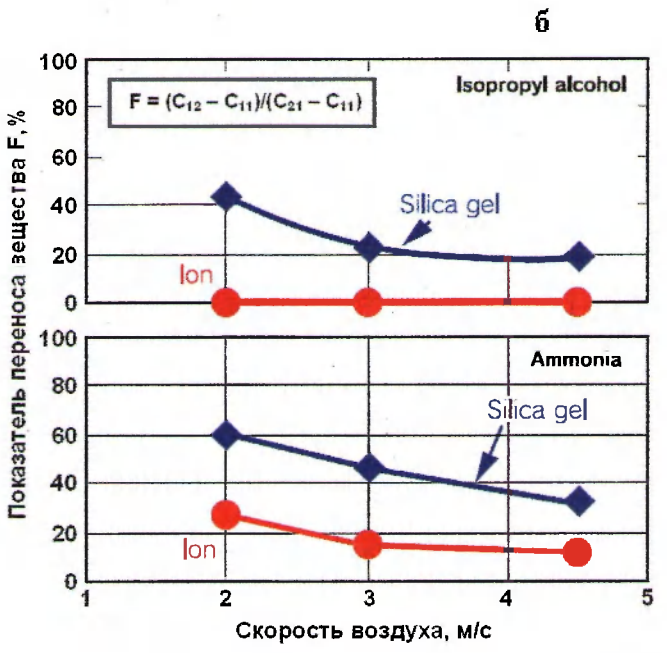


Рис.11.61. Многослойная конструкция листов Hi-Panex-Ion – а и результаты тестирования Hi-Panex-Ion и силикагелиевых роторов в отношении переноса паров вредных веществ – б: аммиака (Ammonia) и изопропил алкоголя (Isopropyl alcohol) при следующих параметрах наружного и внутреннего воздуха: $t_н = 30\ ^0C$, $\varphi_н = 60\%$; $t_{вн} = 27\ ^0C$, $\varphi_{вн} = 50\ \%$.

C_{11}, C_{12}, C_{21} – концентрации вещества в соответствующих потоках воздуха, индексация по рис.11.52

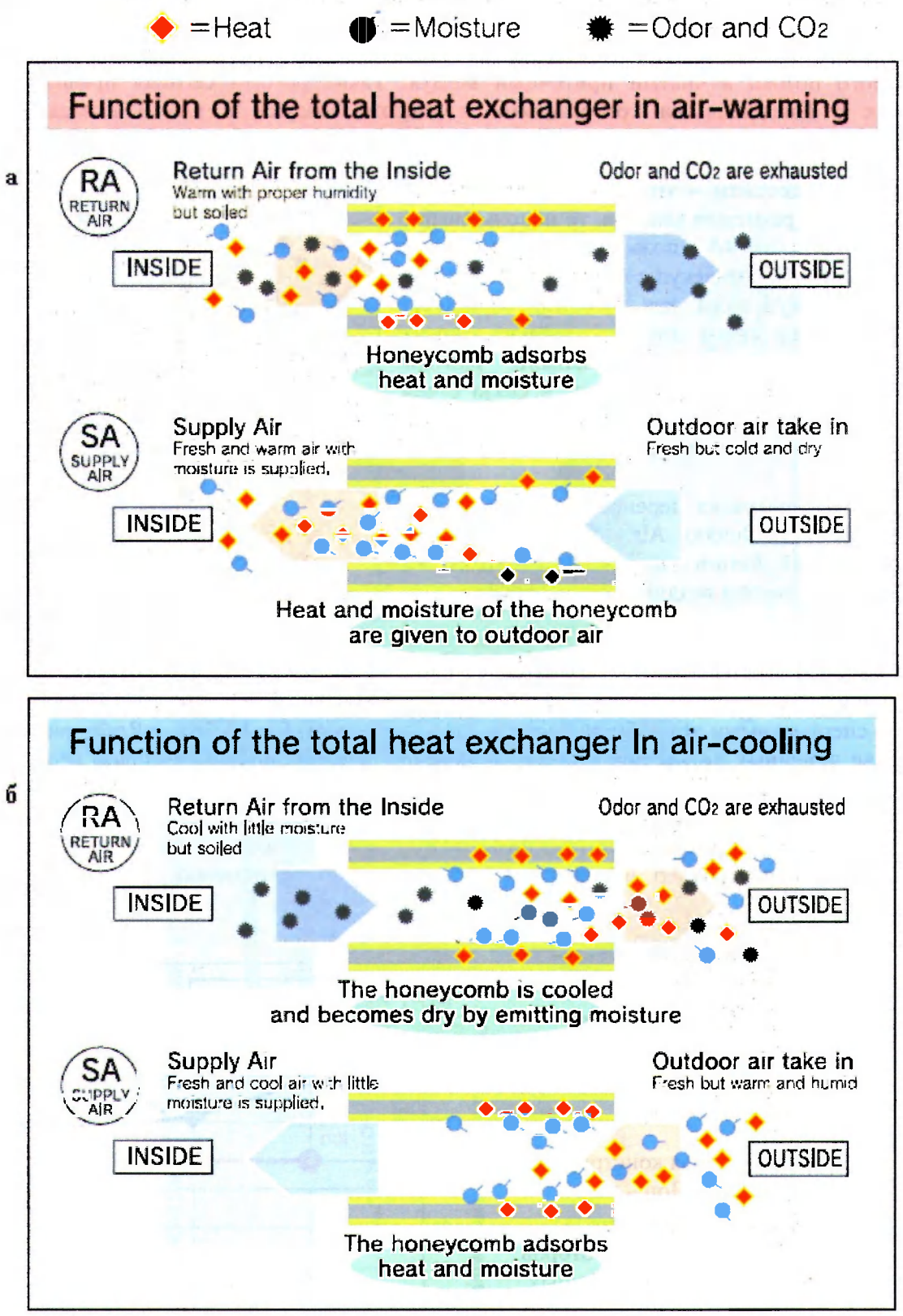


Рис.11.62. К пониманию процессов тепломассообмена в роторах-теплоутилизаторах полной теплоты при нагревании (а) и охлаждении приточного воздуха (б), обозначения по рис.11.60.

иллюстрации Seibu Giken Co. Ltd (Japan)

Интерпретация в d,h- диаграмме процессов теплоутилизации, осуществляемых в роторах-регенераторах, для летнего и зимнего режимов работы представлена на рис.11.63, 11.64 [161].

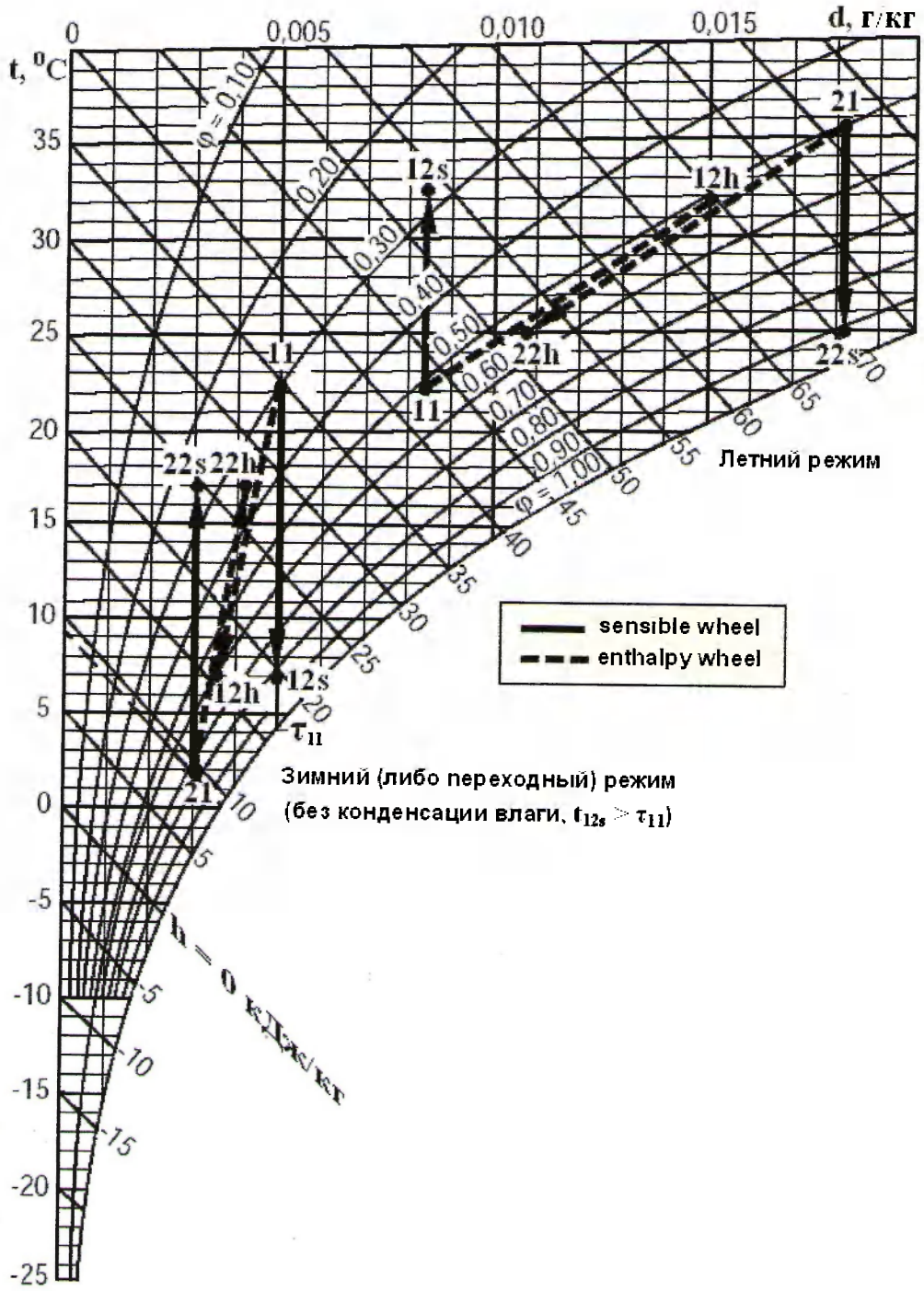


Рис.11.63. Построение процессов в d,h- диаграмме
для летнего и зимнего режимов,
нумерация точек соответствует рис.11.52.

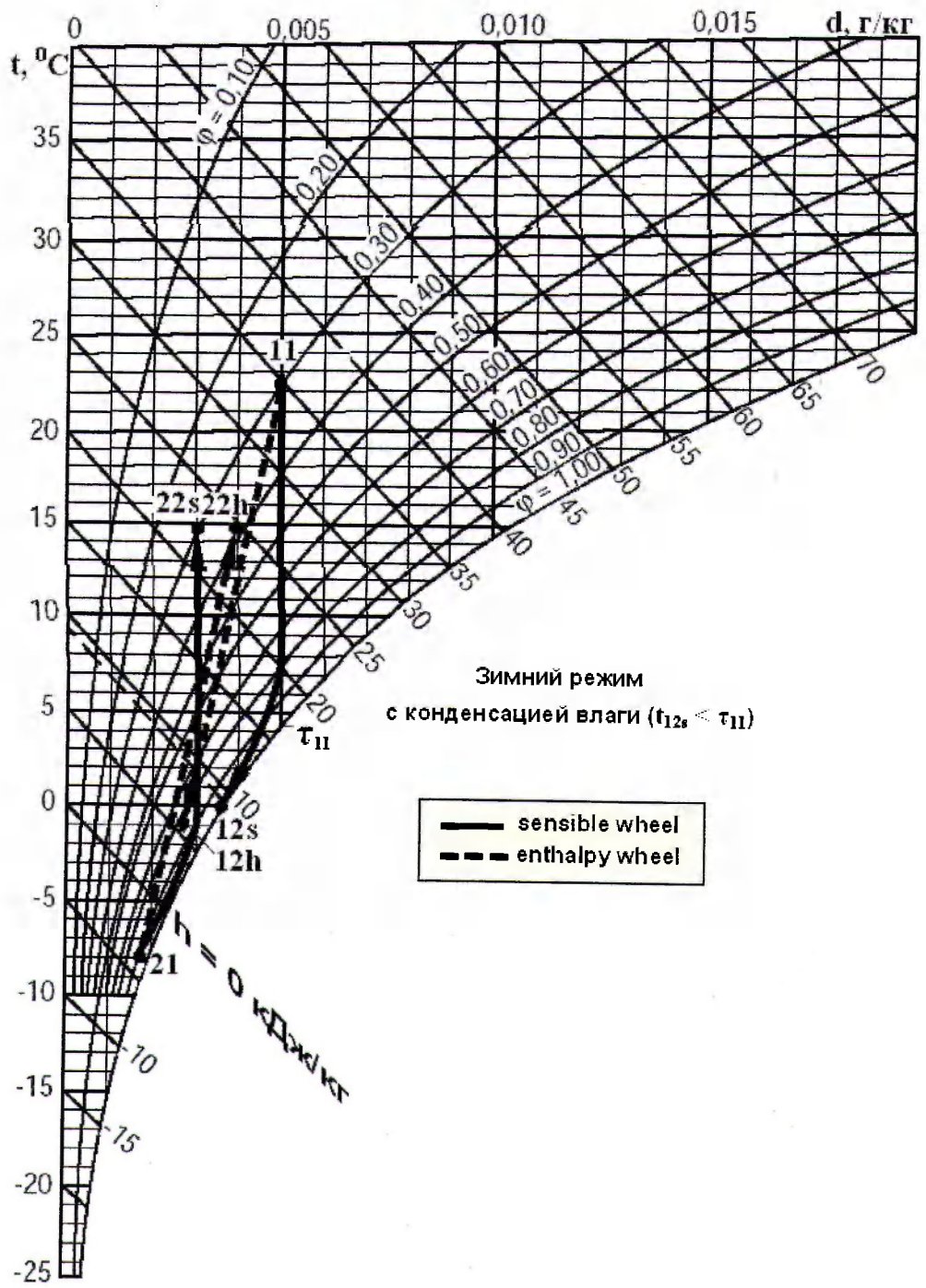


Рис.11.64. Построение процессов в d,h- диаграмме для зимнего режима с конденсацией влаги, нумерация точек соответствует рис.11.52.

Энтальпийные роторы (enthalpy wheel), по сути дела, являются контактными аппаратами и осуществляют перенос теплоты явным и скрытым образом. Они характеризуются 3-мя коэффициентами эффективности: энтальпийным E_h, температурным E_t и переноса влаги E_d. По этим данным производится расчет процесса теплоутилизации и подбор роторов. Фирмы-производители, как правило, предлагают номограмный метод подбора.

Энтальпийные роторы обеспечивают процесс теплоутилизации с большей эффективностью по отношению к роторам явной теплоты (sensible wheel). Их преимущество особенно заметно в условиях влажного климата, либо когда явная тепловая нагрузка помещения составляет менее 80 % полной нагрузки. В качестве иллюстрации можно использовать построения в d,h- диаграмме для условий летнего режима. Как видно из рис.11.63, при одинаковых температурных коэффициентах эффективности E_t = 0,25 роторов обоих типов, энтальпийный (или полный, total) коэффициент эффективности ротора полной теплоты существенно выше и составляет E_h = 0,75.

Энтальпийный ротор обеспечивает в летнем режиме охлаждение и одновременное осушение воздуха при температурах выше точки росы, что невозможно для обычного негигроскопичного ротора с алюминиевой фольгой. В зимнее время осуществляется одновременное нагревание и увлажнение воздуха.

Легко заметить (рис.11.63, 11.64), что процесс тепломассообмена в данном устройстве в d,h- диаграмме идет по лучу, приблизительно совпадающему с линией смешения двух потоков. Это означает, что:

ротор полной теплоты обеспечивает самый короткий путь приведения параметров наружного воздуха к параметрам приточного воздуха, практически исключая смешение потоков.

На рис.11.65 приведены данные по величине коэффициента эффективности утилизации влаги E_d для роторов трех типов: sensible wheel, hygroscopic wheel, sorption wheel. Очевидно преимущество sorption wheel – сорбционного ротора со слоем десиканта, характеризующегося плавной восходящей кривой $E_d(k)$ во всем исследуемом диапазоне значений потенциала конденсации k (от -4 до 10 г/кг).

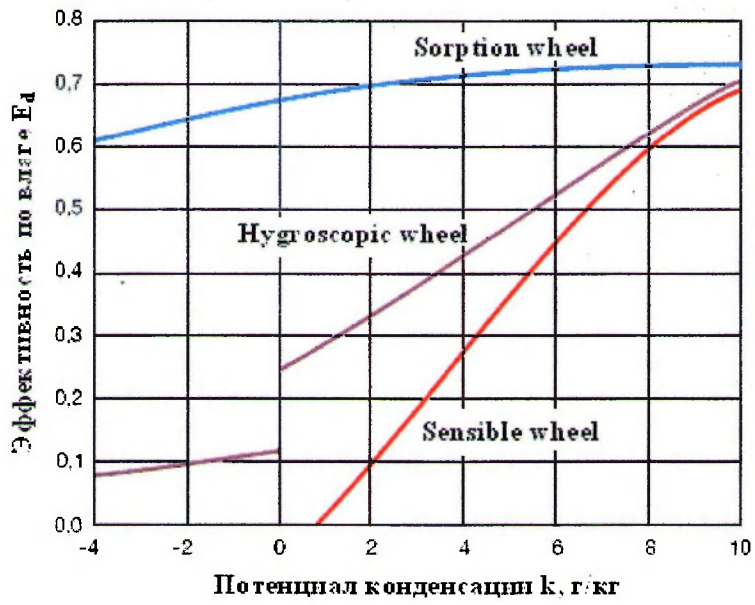


Рис.11.65. Зависимость коэффициента эффективности по влаге E_d различных роторов-регенераторов от потенциала конденсации k* [186].

*отрицательные значения k отвечают летнему режиму работы

Потенциал конденсации $k = d_{11} - d''(t_{21})$ – разность влагосодержаний: начального значения d_{11} теплового и влажного удаляемого воздуха и $d''(t_{21})$ насыщенного воздуха при температуре холодного наружного воздуха на входе в регенератор, рис.11.66.

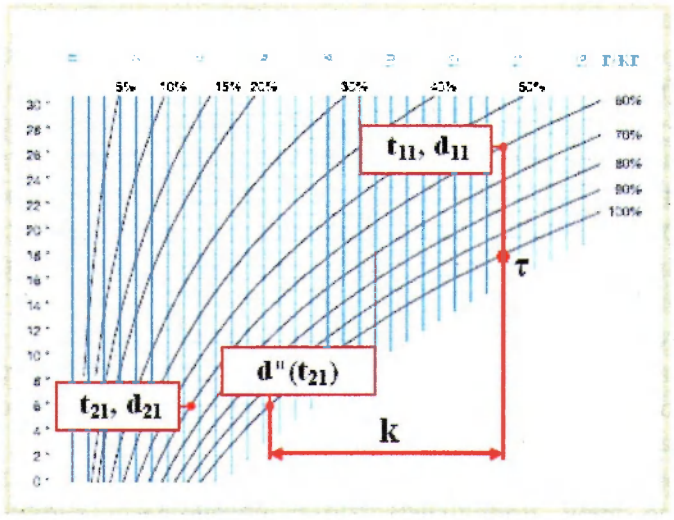


Рис.11.66. К определению потенциала конденсации k.

При отрицательных температурах наружного воздуха возможно обмерзание каналов регенераторов. В режимах комфортного кондиционирования воздуха (вентиляции) опасность обмерзания каналов возникает при t = - 15 °С для негигроскопических роторов и t = - 25 °С для гигроскопических роторов.

Эффективность роторов-регенератов существенным образом зависит от их скорости вращения (рис.11.67), что используется при регулировании параметров приточного воздуха.

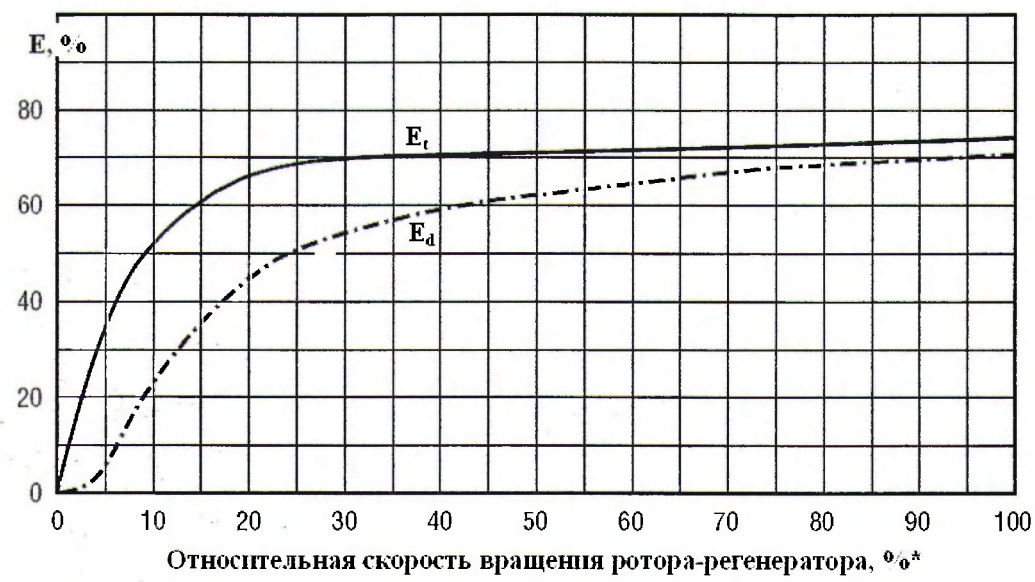
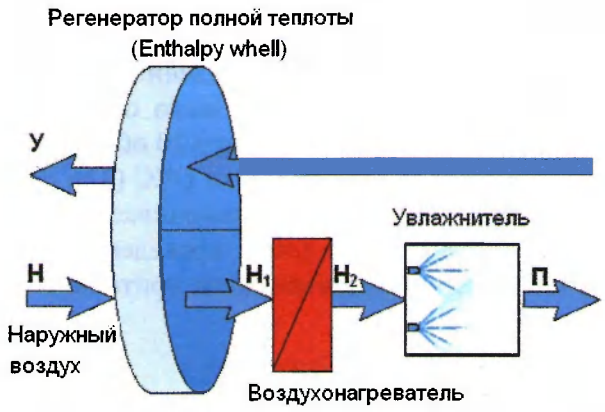


Рис.11.67. Зависимость коэффициентов эффективности роторов-регенераторов Regoterm (Fläkt Woods) от скорости вращения ротора (*в процентах от максимального значения).

Вращающиеся роторы-регенераты являются эффективными устройствами утилизации теплоты и влаги. Они с успехом применяются в различных приточных вентиляционных

установках и в системах кондиционирования воздуха. На рис.11.68, в качестве примера, показано сокращение расходов теплоты и воды на увлажнение в зимнем режиме в случае применения энтальпийного ротора в прямоточной СКВ. Для достижения параметров воздуха в точке П без ротора необходимо обеспечить нагрев воздуха в процессе НН' и увлажнение - Н'П.



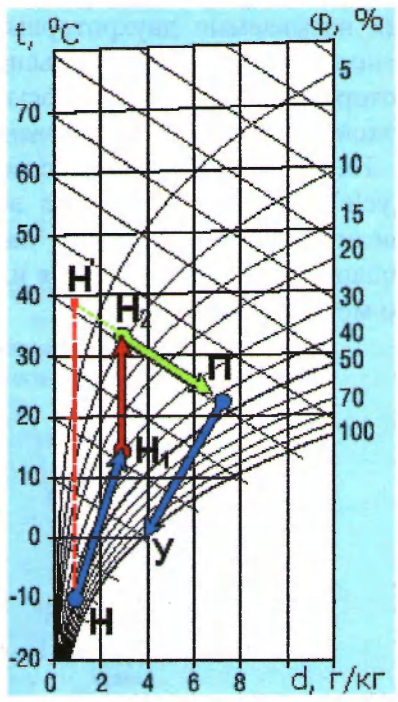
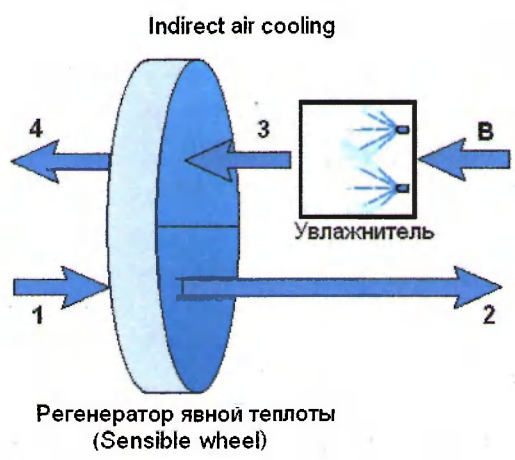


Рис.11.68. Схема прямоточной СКВ для холодного периода года и интерпретация процессов обработки воздуха в d,h- диаграмме.

Повысить эффективность процесса охлаждения приточного воздуха в негигроскопичном роторе можно за счет устройства прямого испарительного охлаждения выбросного потока применением секции адиабатного увлажнения (рис.11.69).

На рис.11.69, в поле диаграммы влажного воздуха, красным цветом показаны линии процесса для варианта работы одного устройства – негигроскопичного ротора, синим – с добавлением секции увлажнения. Комбинация регенератора явной теплоты с увлажнителем – это прием косвенно-испарительного охлаждения воздуха, – используется в энергосберегающих схемах DEC (§ 11.4.1).



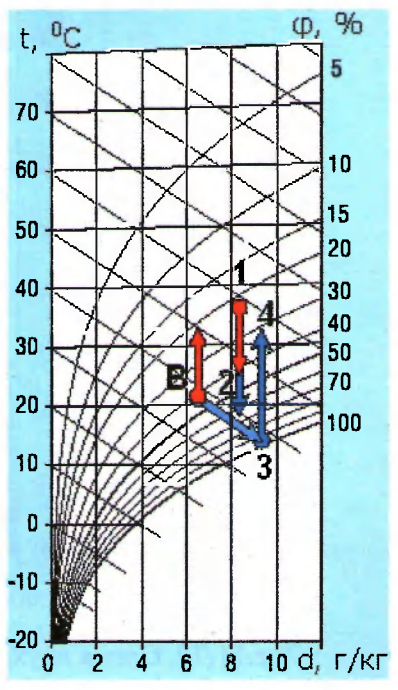
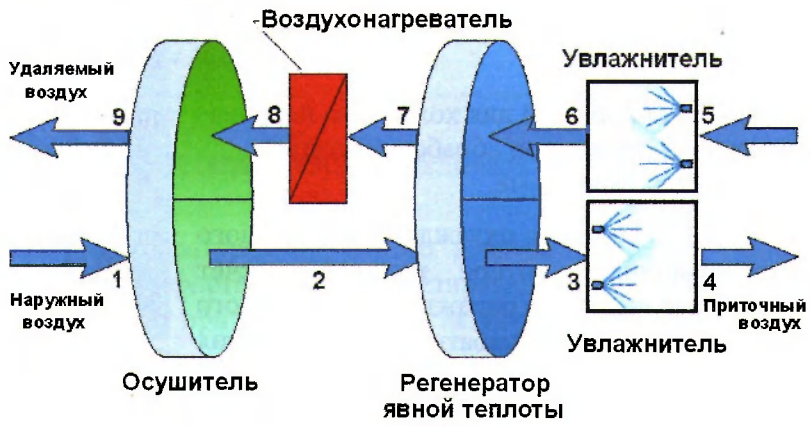


Рис.11.69. Блок косвенно-испарительного охлаждения воздуха и процессы в d,h- диаграмме.

11.4.1. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СХЕМЫ DEC/ ECOS

Так же, как и тепловые трубы (либо другие рекуператоры), роторы-теплоутилизаторы применяются в энергосберегающих схемах DEC - Dehumidification and Evaporative Cooling – так называемые двухроторные установки СКВ [149], рис.11.70…11.71. При этом в них используются описанные выше блоки косвенно-испарительного охлаждения. Энтальпийный ротор работает в режиме осушения, скорость вращения – 20 об/ч. Число оборотов ротора явной теплоты в секции косвенно-испарительного охлаждения воздуха – 20 об/мин.

На рис.11.70 приведена стандартная (классическая) схема установки DEC (The Pennington Cycle), разработанная еще в 1960-х годах. Ротор-осушитель обеспечивает две задачи: увеличение потенциала наружного воздуха в отношении проведения процесса испарительного охлаждения и регулирование относительной влажности приточного воздуха по методу точки росы.



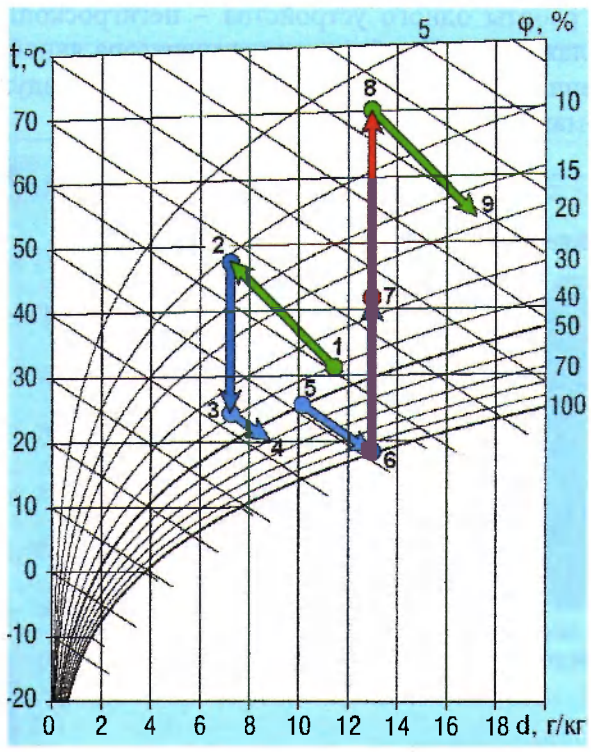
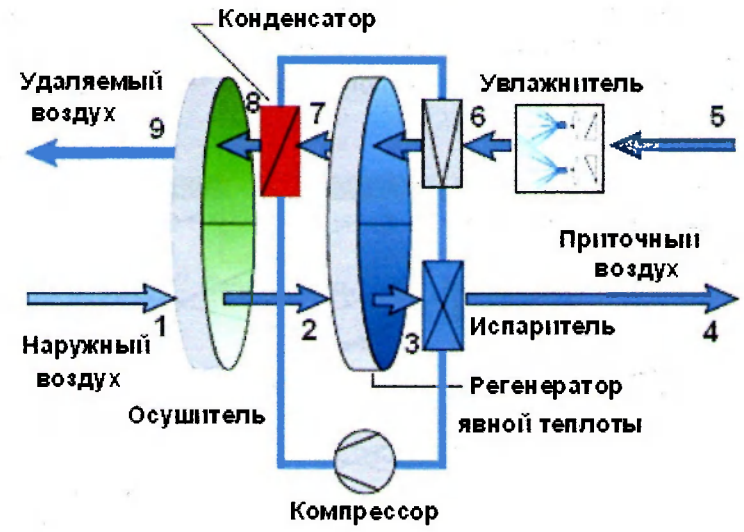


Рис.11.70. Схема двухроторной установки (теплоутилизатор – sensible wheel) для умеренного климата и процессы обработки воздуха в d,h-диаграмме.

В схему DEC может быть включена холодильная машина, работающая в режиме теплового насоса [166], рис.11.71. В этом случае рационально используется теплота конденсации хладагента для регенерации ротора-осушителя и расширяется диапазон параметров приточного воздуха, не ограниченный значением температуры по мокрому термометру (т.3, рис.11.71, 11.72).



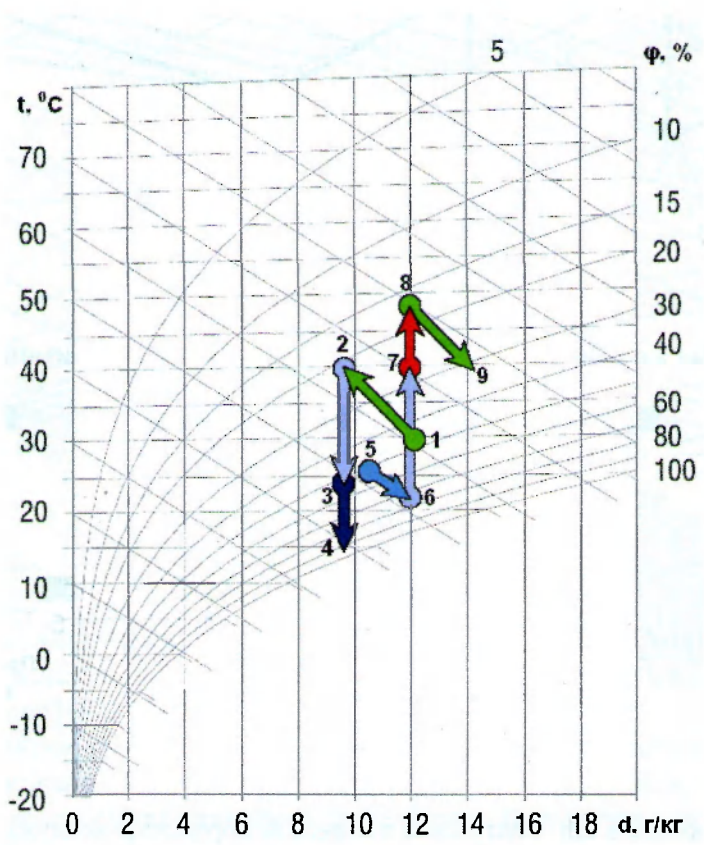
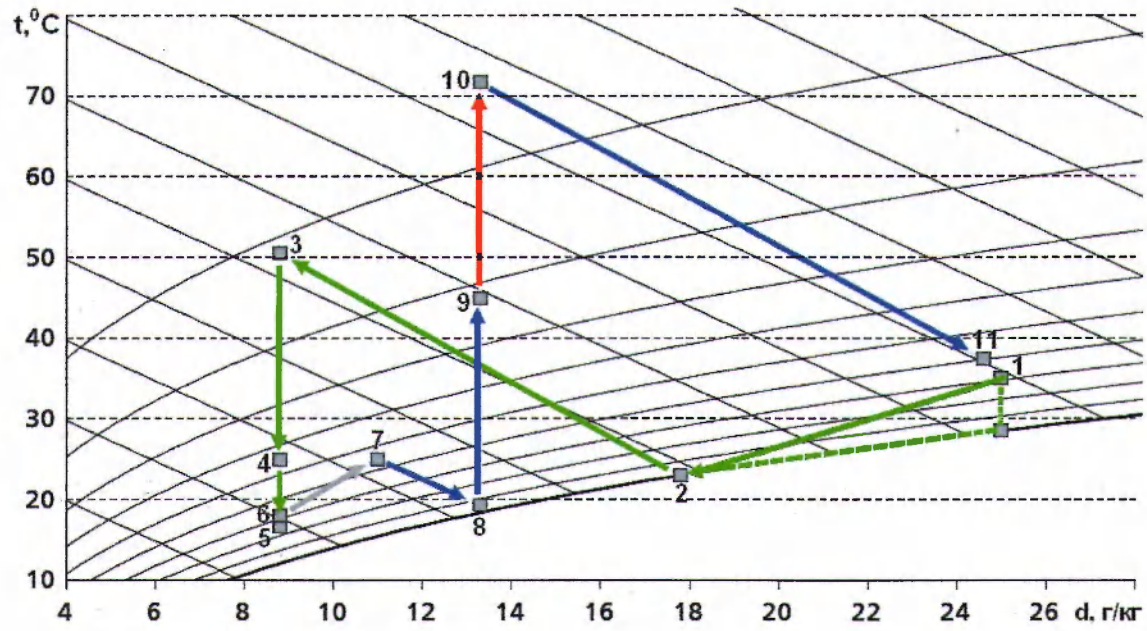


Рис.11.71. Схема DEC с тепловым насосом и построения процессов в d,i- диаграмме.

В условиях умеренного климата установки DEC могут эффективно работать без использования холодильных машин. Построения, выполненные в d,h-диаграмме на рис.11.70 отвечают климатическим условиям г. Запорожье, и характерны для многих населенных пунктов Украины.

Рассматриваемая схема обработки воздуха также работоспособна и в климатических зонах с жарким и влажным климатом. Однако, поскольку косвенно-испарительного эффекта охлаждения воздуха здесь не достаточно, то в схему дополнительно включены блоки-воздухоохладители на входе воздуха в ротор-осушитель и после блока косвенно-испарительного охлаждения (рис.11.71), либо применяется трехроторная схема по технологической цепочке: регенератор полной теплоты – осушитель – регенератор явной теплоты (рис.11.73) [238].



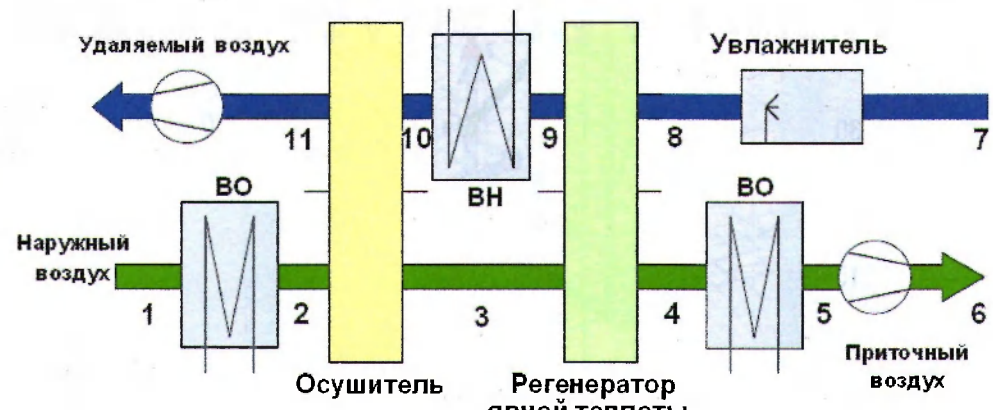


Рис.11.72. Изображение в d,h- диаграмме процессов обработки воздуха в двухроторной установке (теплоутилизатор – sensible wheel) и ее схема для влажного и теплого климата: ВО – воздухоохладитель; ВН – воздухонагреватель.

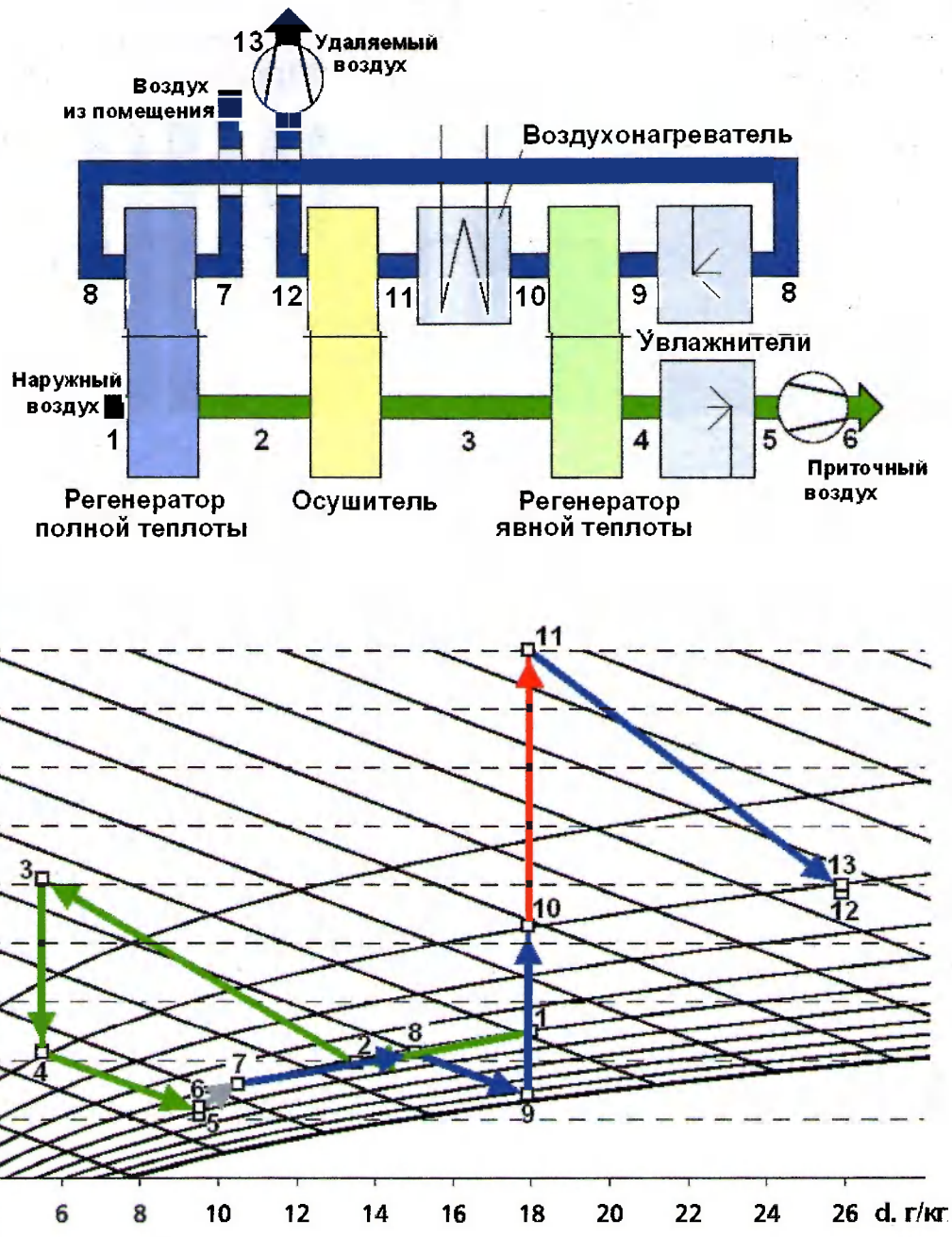


Рис.11.73. Трехроторная схема DEC
и построения процессов в d,h- диаграмме.

Альтернативным вариантом роторных DEC схем является схема с применением пластинчатого тепломассообменного регенератора ECOS – indirect Evaporative Cooled Sorptive heat exchanger [182, 183, 238, 239], рис.11.74.

Аппарат регенеративного типа ECOS – пластинчатый противоточный теплообменник, набираемый гофрированными листами тонкой алюминиевой фольги, в котором заложено чередование каналов со слоем десиканта и без него. В качестве десиканта используется специальная бумага (рис.11.74а).

В основных каналах с десикантом реализуется процесс осушения и одновременного охлаждения приточного воздуха. Осушение происходит в процессе адсорбции влаги десикантом, а охлаждение – по косвенно-испарительному принципу, за счет испарения воды во вспомогательный поток воздуха в смежных каналах. При этом теплота на испарение

отбирается от воздуха в основном канале в процессе теплопередачи через стенку, и он охлаждается. Для подохлаждения воздуха на входе во вспомогательный канал используется увлажнитель. Вспомогательные каналы орошаются водой (рис.11.74б).

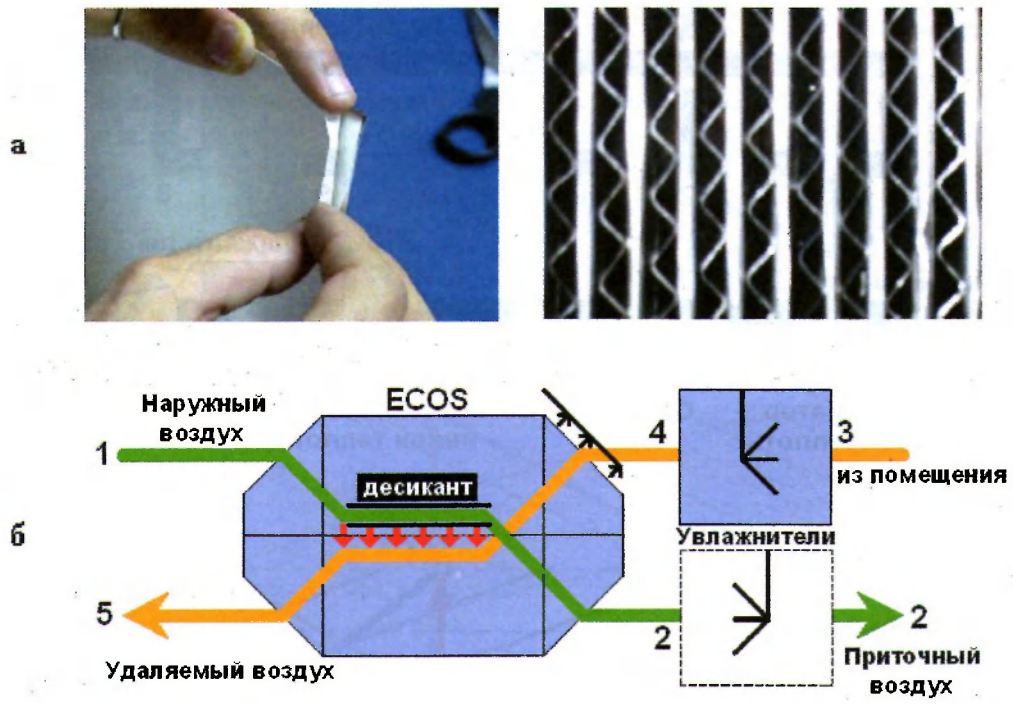


Рис.11.74. Устройство регенератора (а) и схема ECOS (б).

В схеме установки предусмотрено использование двух аппаратов ECOS. Один из них работает в режиме сорбции, другой – десорбции (регенерации) за счет продувки воздухом, нагретым до температуры 60…95 °С. Они переключаются при насыщении влагой основных сорбционных каналов тепломассообменного модуля аппарата, работающего на процесс обработки приточного воздуха (рис.11.75). Следует иметь в виду, что режим регенерации аппарата предусматривает по окончании десорбции его охлаждение (на рис.11.75 не показано).

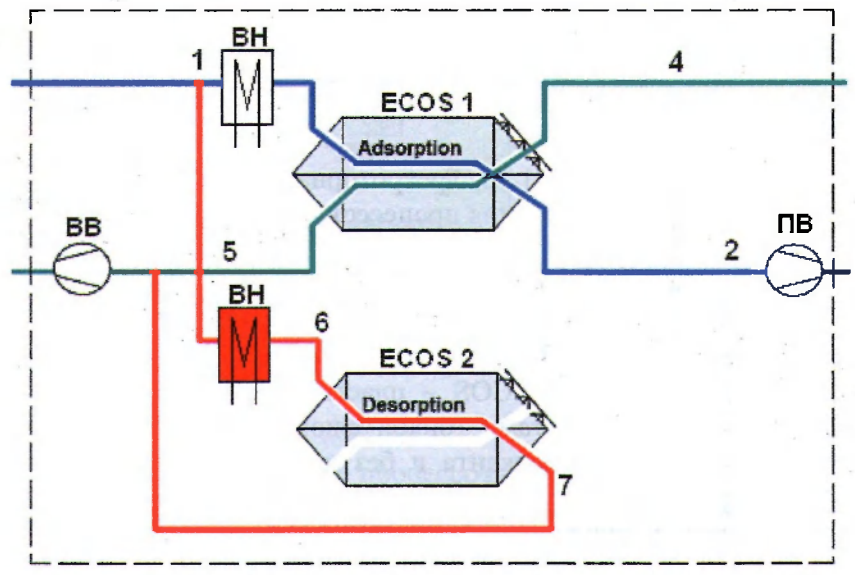


Рис.11.75. Цикличная работа аппаратов ECOS в составе установки кондиционирования воздуха: ВН – воздухонагреватели; ПВ, ВВ – приточный и вытяжной вентиляторы.

На рис.11.76, в d,h-диаграмме, показаны процессы термовлажностной обработки воздуха, осуществляемые в установке ECOS (с учетом позиций, отмеченных на рис.11.74 и 11.75).

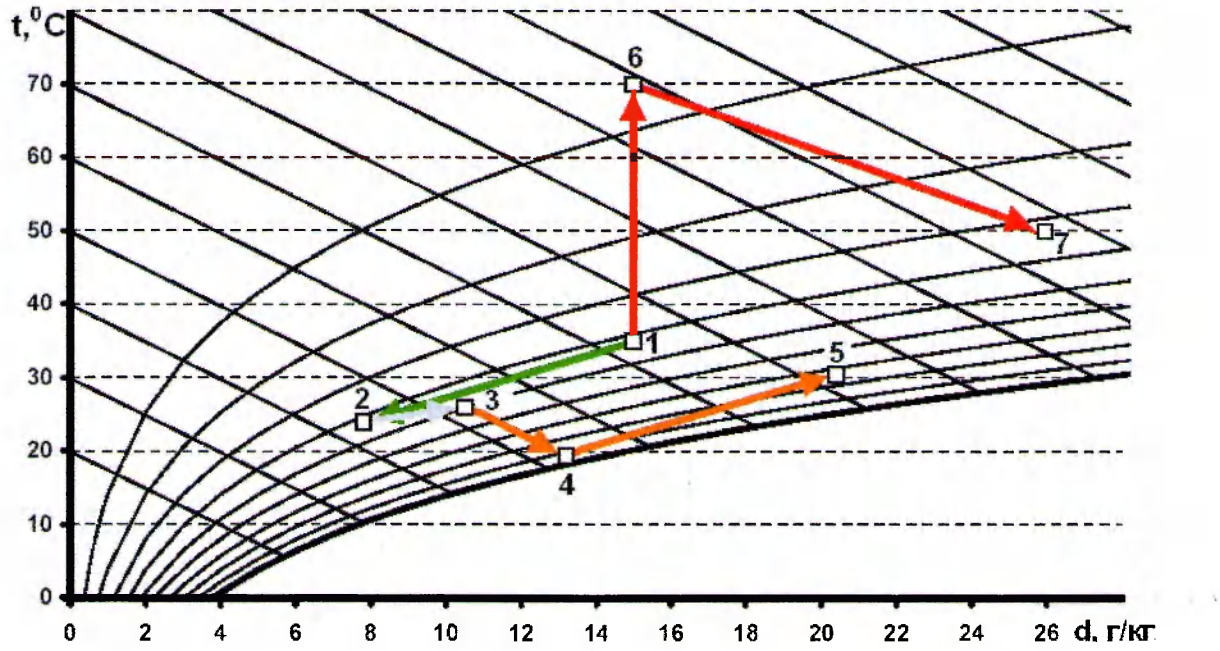


Рис.11.76. Построения в d,h-диаграмме процессов обработки воздуха в ECOS [183].

Преимуществом установки ECOS по сравнению с традиционным вариантом роторных DEC является отсутствие движущихся частей, значительно меньшая стоимость, а также более высокая эффективность процесса E ≥ 90 %. Приведенные на рис.11.77 построения процессов, осуществляемых в установках DEC и ECOS, наглядно показывают лучшие результаты (более глубокое охлаждение) в случае ECOS.

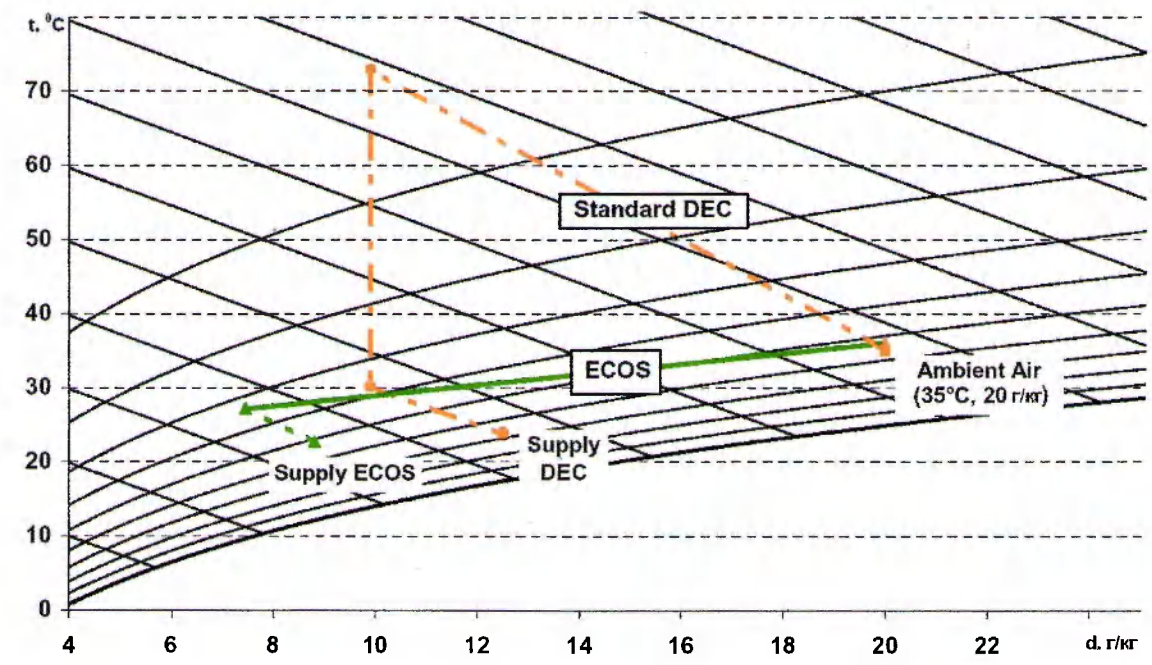


Рис.11.77. Процессы обработки приточного воздуха в установках DEC и ECOS [239].

Если для осушения воздуха используется силикагель, то для регенерации его тонкого слоя достаточна температура $t_{рег}$ = 70 °С. Увеличение температуры регенерации не оказывает существенного влияния на эффективность процесса обработки воздуха по технологии DEC (ECOS). На рис.11.78 показано, что увеличение $t_{рег}$ на 40 градусов (от 55 °С до 95 °С) дает незначительное понижение температуры приточного воздуха на 2° (с 16,5 °С до 14,5 °С) [177].

Для регенерации на уровне 70 ^{0}С вполне подходит солнечная энергия. На рис.11.79, 11.80 показаны двухроторная установка DEC с использованием солнечной энергии для регенерации осушителя и работы абсорбционной холодильной машины, и установка ECOS .

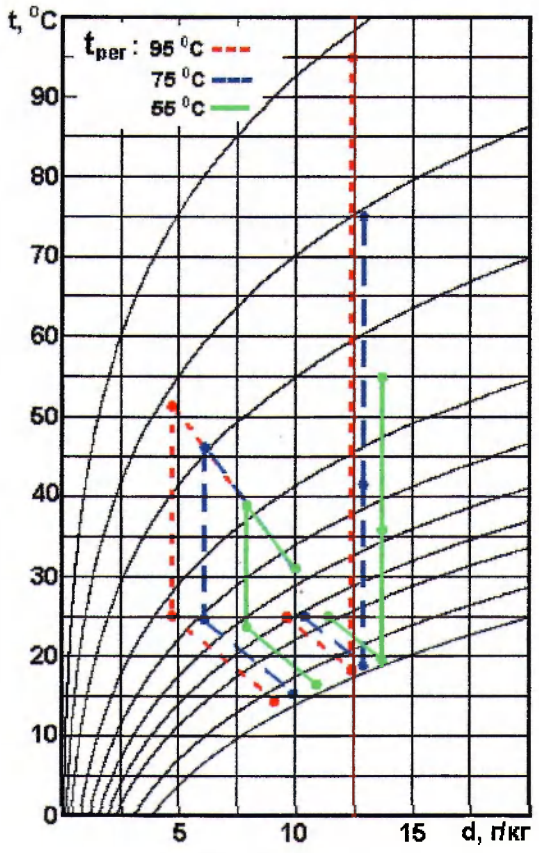


Рис.11.78. Влияние температуры регенерации силиагелиевого ротора-осушителя на процесс обработки воздуха в установке DEC.

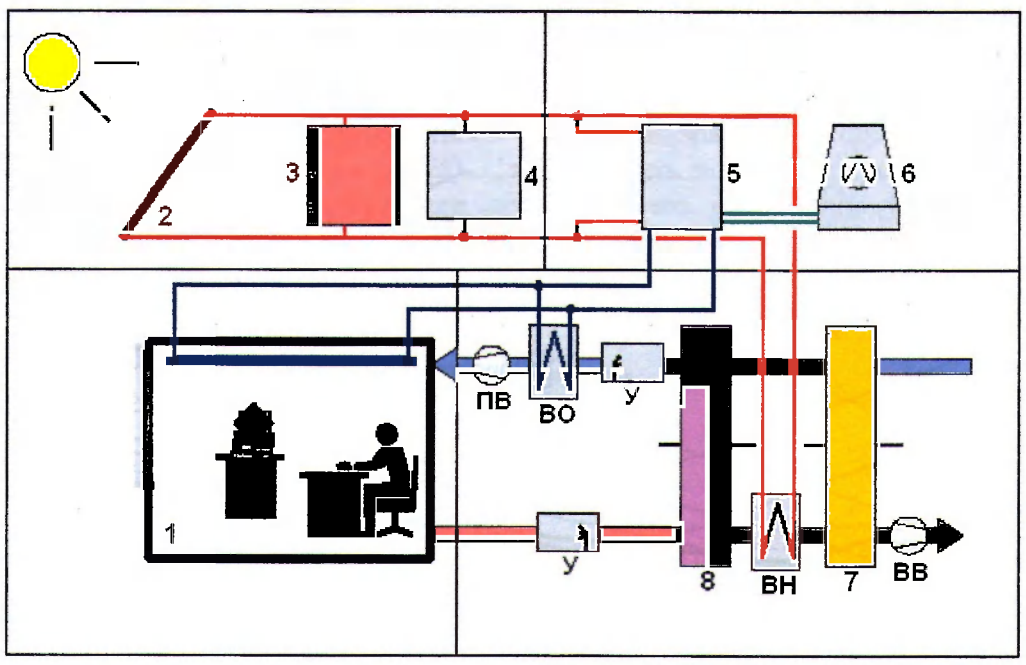


Рис.11.79. Схема СКВ по технологии DEC с использованием солнечной энергии:

1 – помещение; 2 – солнечный коллектор; 3, 4 – основной и резервный водонагреватели; 5 – чиллер; 6 – градирня; 7 – ротор-осушитель; 8 – регенератор полной теплоты; ВН – воздухонагреватель; ВО – воздухоохладитель; ПВ, ВВ – приточный и вытяжной вентиляторы.

Отредактировал и опубликовал на сайте : PRESSI (HERSON)

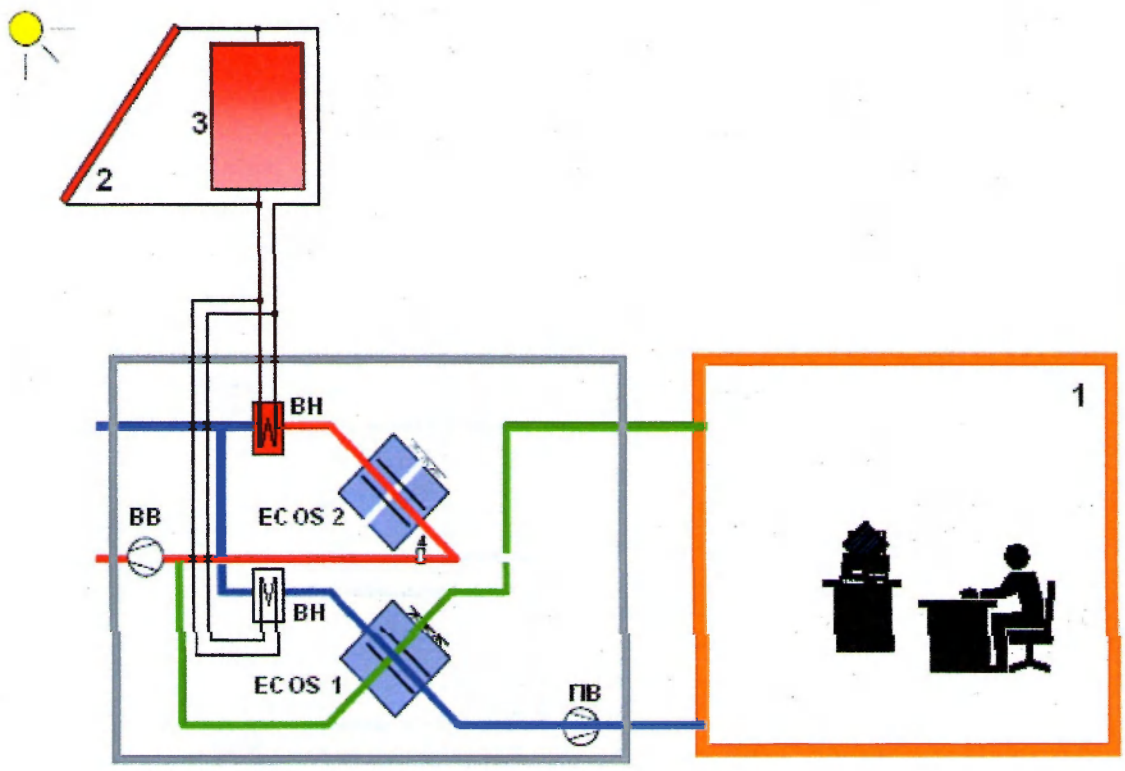


Рис.11.80. Схема СКВ по технологии ECOS с использованием солнечной энергии

(ECOS 1 и ECOS 2 – пластинчатые теплообменники-регенераторы, остальные обозначения по рис.11.71).

Разработка процессов кондиционирования воздуха по технологиям DEC и ECOS, представленных в данном параграфе, выполнена в институте солнечной энергии Fraunhofer Institut во Фрайбурге (ФРГ), как и схемы СКВ с максимальным использованием возможностей, получаемых от природы: возобновляемой энергии Солнца, эффекта испарительного охлаждения, сорбции и десорбции (рис.11.79, 11.80).

На этом считаю возможным завершить знакомство с процессами, аппаратами и технологиями термовлажностной обработки воздуха

Надеюсь, что приведенные сведения по современным материалам и технологиям способствовали расширению вашего представления о предмете, проявлению новых возможностей в проектировании и других инженерных приложениях





И все же надо отдавать себе отчет в том, что объем информации в данной книге, можно сравнить лишь с вершиной айсберга «современных представлений о кондиционировании воздуха»

ПРИЛОЖЕНИЕ I

СХЕМЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНДИЦИОНЕРОВ
оконного и раздельного (split) типа

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ЦЕНТРАЛЬНЫХ СКВ

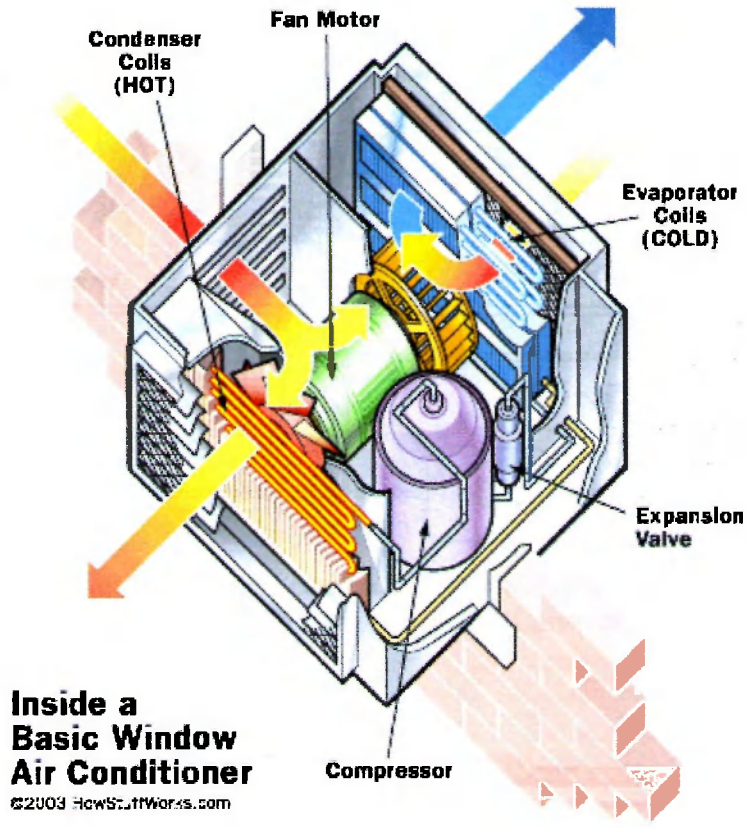


Рис.I.1. Автономный кондиционер оконного типа.

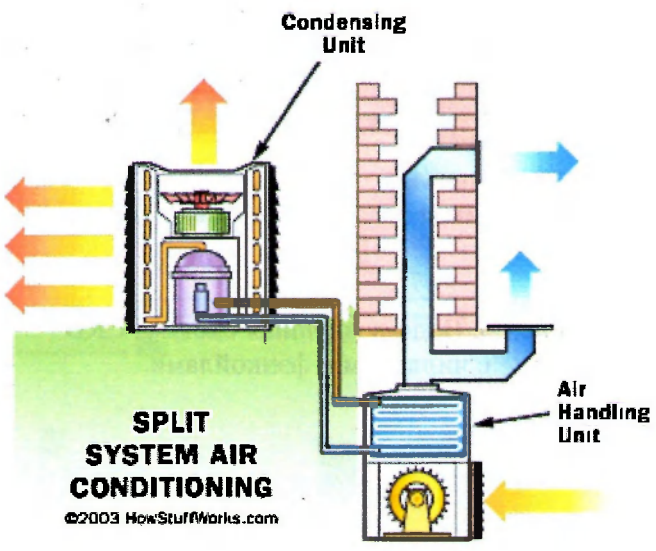
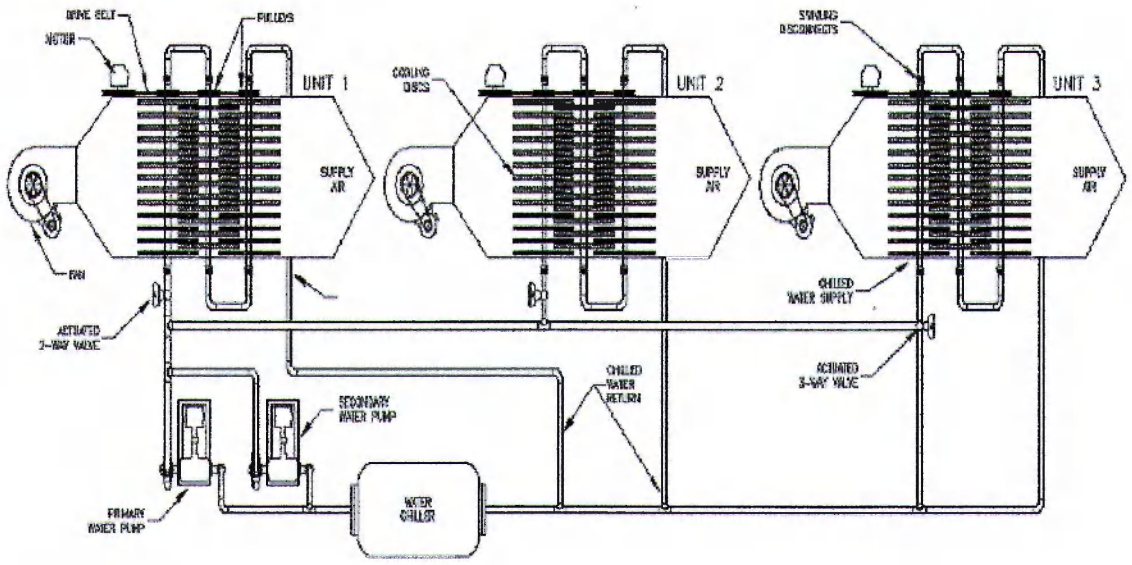
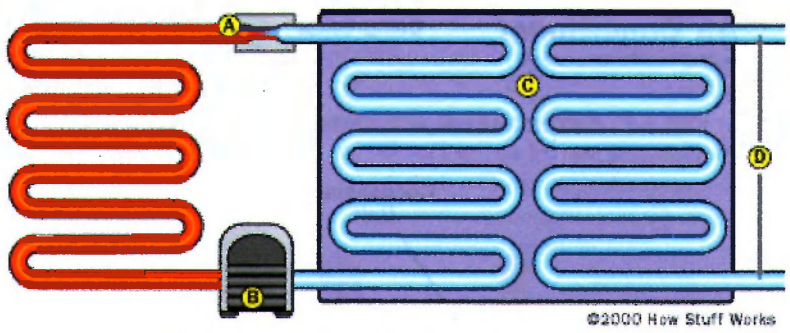


Рис.I.2. Схема сплит-системы.





Ⓐ Expansion valve Ⓒ Heat exchanger
Ⓑ Compressor Ⓓ Chilled water to building

Рис.I.3. Водо-воздушная система СКВ
с чиллером и фэнкойлами.

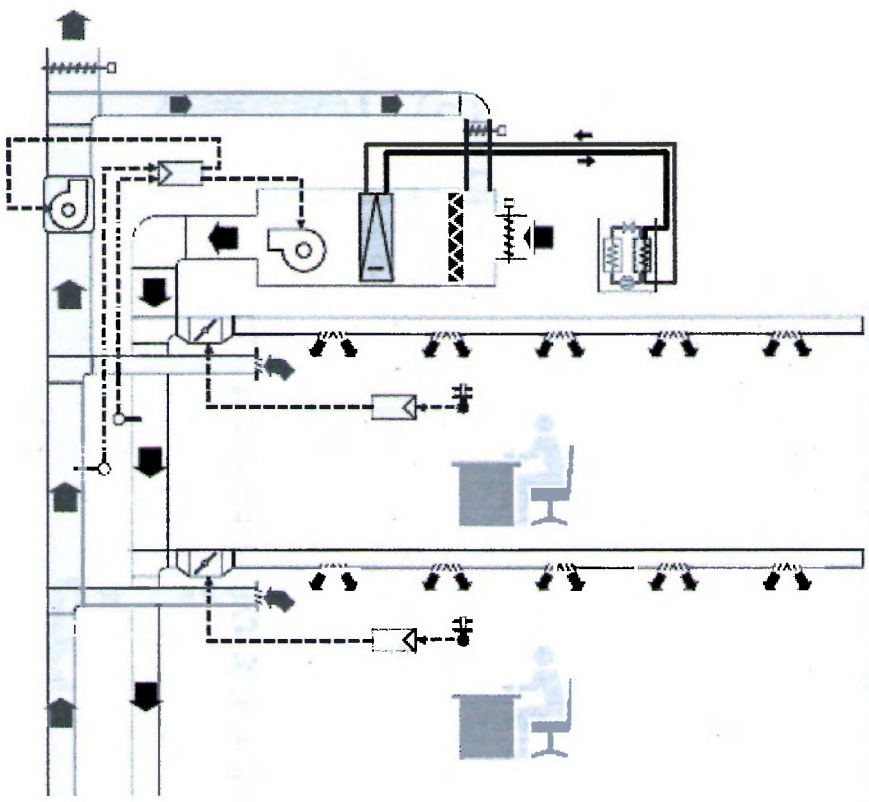


Рис.I.4. Центральная система кондиционирования воздуха
с постоянным расходом воздуха CAV (Constant Air Volume).

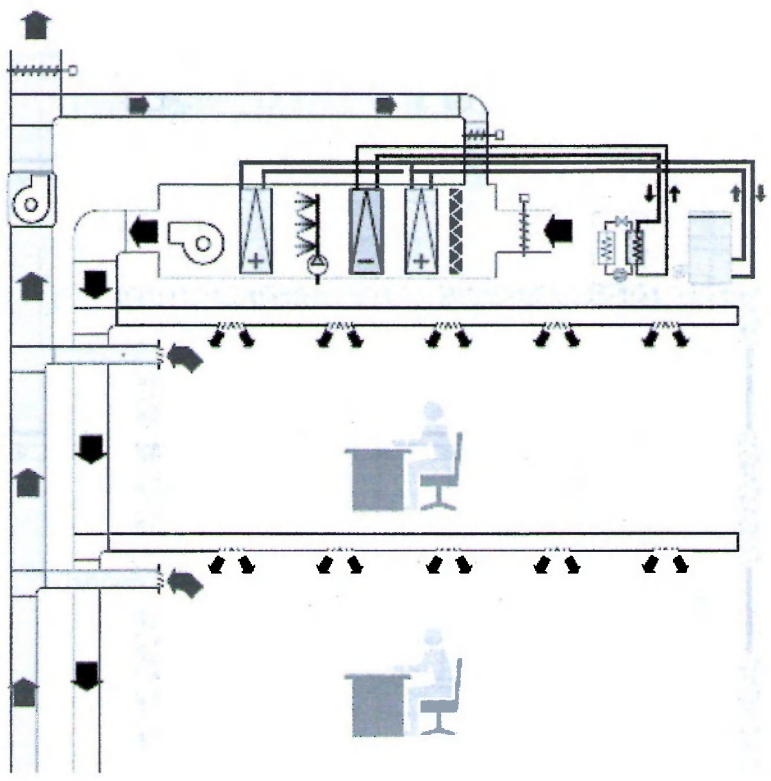


Рис.1.5. Центральная система кондиционирования воздуха
с переменным расходом воздуха VAV(Variable Air Volume).

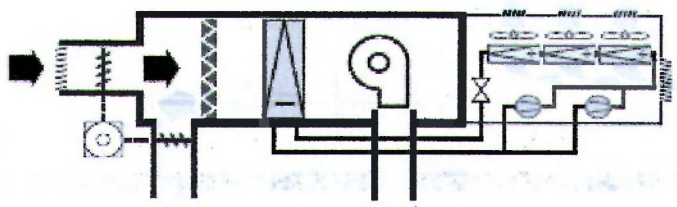




Рис.I.6. Центральная система кондиционирования воздуха
Roof-Top с крышным расположением оборудования.

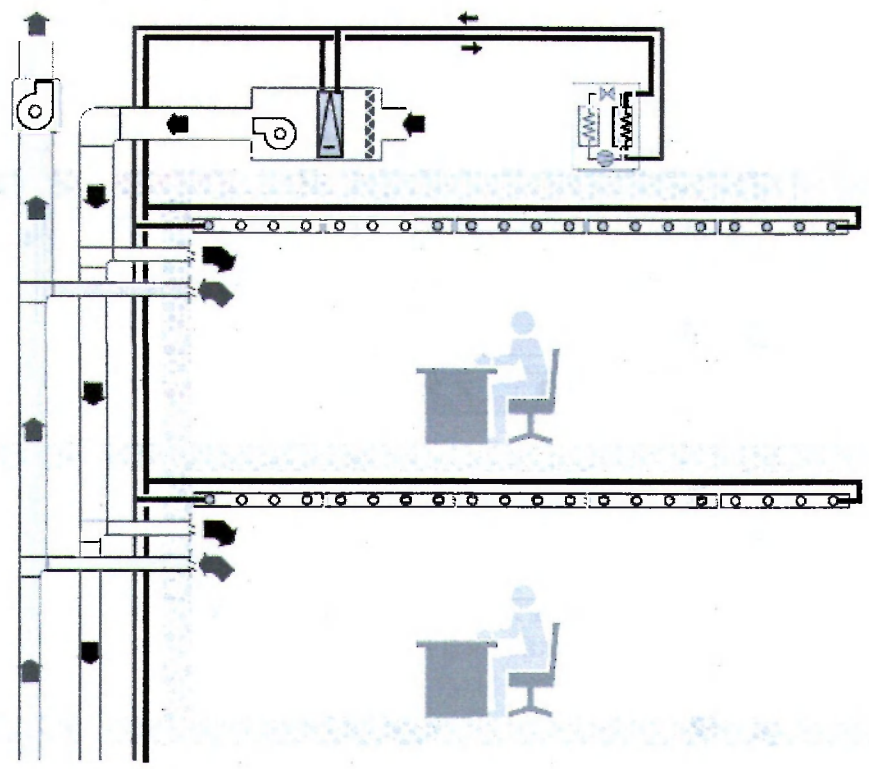


Рис.I.7. Центральная система кондиционирования воздуха
с потолочным радиационным охлаждением.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ВОЗДУХ. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица П.1. Температура, давление и плотность воздуха на различной высоте над уровнем моря (стандартная атмосфера).

Высота, м	Температура, °С	Давление, гПа	Плотность, кг/м^3
0000	15.0	1013	1.2
1000	8.5	900	1.1
2000	2.0	800	1.0
3000	-4.5	700	0.91
4000	-11.0	620	0.82
5000	-17.5	540	0.74
6000	-24.0	470	0.66
7000	-30.5	410	0.59
8000	-37.0	360	0.53
9000	-43.5	310	0.47
10000	-50.0	260	0.41
11000	-56.5	230	0.36
12000	-56.5	190	0.31
13000	-56.5	170	0.27
14000	-56.5	140	0.23
15000	-56.5	120	0.19
16000	-56.5	100	0.17
17000	-56.5	90	0.14
18000	-56.5	75	0.12
19000	-56.5	65	0.10
20000	-56.5	55	0.088
21000	-55.5	47	0.075
22000	-54.5	40	0.064
23000	-53.5	34	0.054
24000	-52.5	29	0.046
25000	-51.5	25	0.039
26000	-50.5	22	0.034
27000	-49.5	18	0.029
28000	-48.5	16	0.025
29000	-47.5	14	0.021
30000	-46.5	12	0.018
31000	-45.5	10	0.015
32000	-44.5	8.7	0.013
33000	-41.7	7.5	0.011
34000	-38.9	6.5	0.0096
35000	-36.1	5.6	0.0082

Таблица II.2. Величина парциального давления водяных паров на линии насыщения $P_п''$.

	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
°C	кПа	кПа	кПа	кПа	кПа	кПа	кПа	кПа	кПа	кПа
0	0.611	0.615	0.620	0.624	0.629	0.634	0.638	0.643	0.647	0.652
1	0.657	0.662	0.666	0.671	0.676	0.681	0.686	0.691	0.696	0.701
2	0.706	0.711	0.716	0.721	0.726	0.731	0.737	0.742	0.747	0.752
3	0.758	0.763	0.769	0.774	0.780	0.758	0.791	0.796	0.802	0.807
4	0.813	0.819	0.825	0.831	0.836	0.842	0.848	0.854	0.860	0.866
5	0.872	0.878	0.884	0.891	0.879	0.903	0.909	0.916	0.922	0.929
6	0.935	0.941	0.948	0.955	0.961	0.968	0.974	0.981	0.988	0.995
7	1.002	1.009	1.015	1.022	1.029	1.037	1.044	1.051	1.058	1.065
8	1.073	1.080	1.087	1.095	1.102	1.110	1.117	1.125	1.132	1.140
9	1.148	1.156	1.163	1.171	1.179	1.187	1.195	1.203	1.211	1.219
10	1.228	1.236	1.244	1.253	1.261	1.269	1.278	1.286	1.295	1.304
11	1.312	1.321	1.330	1.339	1.348	1.357	1.366	1.375	1.384	1.393
12	1.402	1.412	1.421	1.430	1.440	1.449	1.459	1.468	1.478	1.488
13	1.497	1.507	1.517	1.527	1.537	1.547	1.557	1.567	1.578	1.588
14	1.598	1.609	1.619	1.630	1.640	1.651	1.662	1.672	1.683	1.694
15	1.705	1.716	1.727	1.738	1.749	1.761	1.772	1.783	1.795	1.806
16	1.818	1.830	1.841	1.853	1.865	1.877	1.889	1.901	1.913	1.925
17	1.938	1.950	1.962	1.975	1.987	2.000	2.012	2.025	2.038	2.051
18	2.064	2.077	2.090	2.103	2.116	2.130	2.143	2.157	2.170	2.184
19	2.197	2.211	2.225	2.239	2.253	2.267	2.281	2.295	2.309	2.324
20	2.338	2.353	2.367	2.382	2.397	2.412	2.427	2.442	2.457	2.472
21	2.487	2.502	2.518	2.533	2.549	2.565	2.580	2.596	2.612	2.628
22	2.644	2.660	2.677	2.693	2.709	2.726	2.743	2.759	2.776	2.793
23	2.810	2.827	2.844	2.861	2.879	2.896	2.914	2.931	2.949	2.967
24	2.985	3.002	3.021	3.039	3.057	3.075	3.094	3.112	3.131	3.150
25	3.169	3.188	3.207	3.226	3.245	3.264	3.284	3.303	3.323	3.343
26	3.362	3.382	3.402	3.423	3.443	3.463	3.484	3.504	3.525	3.546
27	3.567	3.588	3.609	3.630	3.651	3.673	3.694	3.716	3.738	3.759
28	3.781	3.804	3.826	3.848	3.870	3.893	3.916	3.938	3.961	3.984
29	4.007	4.031	4.054	4.078	4.101	4.125	4.149	4.173	4.197	4.221
30	4.245	4.270	4.294	4.319	4.344	4.369	4.394	4.419	4.444	4.469
31	4.495	4.521	4.547	4.572	4.599	4.625	4.651	4.677	4.704	4.731
32	4.758	4.785	4.812	4.839	4.866	4.894	4.921	4.949	4.977	5.005
33	5.033	5.062	5.090	5.119	5.147	5.176	5.205	5.235	5.264	5.293
34	5.323	5.353	5.382	5.412	5.443	5.473	5.503	5.534	5.565	5.596
35	5.627	5.658	5.689	5.721	5.752	5.784	5.816	5.848	5.880	5.913
36	5.945	5.978	6.011	6.044	6.077	6.111	6.144	6.178	6.212	6.246
37	6.280	6.314	6.348	6.383	6.418	6.453	6.488	6.523	6.559	6.594
38	6.630	6.666	6.702	6.738	6.775	6.812	6.848	6.885	6.922	6.960
39	6.997	7.035	7.073	7.111	7.149	7.187	7.226	7.265	7.304	7.343
40	7.382	7.421	7.461	7.501	7.541	7.581	7.621	7.662	7.703	7.744
41	7.785	7.826	7.867	7.909	7.951	7.993	8.035	8.078	8.120	8.163
42	8.206	8.249	8.293	8.336	8.380	8.424	8.469	8.513	8.558	8.602
43	8.647	8.693	8.738	8.784	8.829	8.875	8.922	8.968	9.015	9.062
44	9.109	9.156	9.204	9.251	9.299	9.347	9.396	9.444	9.493	9.542
45	9.591	9.641	9.690	9.740	9.790	9.840	9.891	9.942	9.993	10.044
46	10.095	10.147	10.199	10.241	10.303	10.356	10.409	10.462	10.515	10.569
47	10.622	10.676	10.730	10.785	10.840	10.894	10.950	11.005	11.061	11.116
48	11.173	11.229	11.286	11.342	11.399	11.457	11.514	11.572	11.630	11.689
49	11.747	11.806	11.865	11.924	11.984	12.044	12.104	12.164	12.225	12.286
50	12.347	12.408	12.470	12.532	12.594	12.657	12.7	12.782	12.846	12.909

Таблица II.3. Абсолютная влажность воздуха $\rho_п$ как функция температуры точки росы τ.

τ, °C	$\rho_п$, г/м^3	τ, °C	$\rho_п$, г/м^3
+30	30.3	-16	1.27
+29	28.7	-17	1.15
+28	27.2	-18	1.05
+27	25.8	-19	0.96
+26	24.4	-20	0.88
+25	23.0	-21	0.80
+24	21.8	-22	0.73
+23	20.6	-23	0.66
+22	19.4	-24	0.60
+21	18.3	-25	0.55
+20	17.3	-26	0.51
+19	16.3	-27	0.46
+18	15.4	-28	0.41
+17	14.5	-29	0.37
+16	13.6	-30	0.333
+15	12.8	-31	0.301
+14	12.1	-32	0.271
+13	11.4	-33	0.244
+12	10.7	-34	0.220
+11	10.0	-35	0.198
+10	9.4	-36	0.178
+9	8.8	-37	0.160
+8	8.3	-38	0.144
+7	7.8	-39	0.130
+6	7.3	-40	0.117
+5	6.8	-41	0.104
+4	6.4	-42	0.093
+3	6.0	-43	0.083
+2	5.6	-44	0.074
+1	5.2	-45	0.067
0	4.84	-46	0.060
-1	4.47	-47	0.054
-2	4.13	-48	0.048
-3	3.81	-49	0.043
-4	3.51	-50	0.038
-5	3.24	-51	0.034
-6	2.99	-52	0.030
-7	2.76	-53	0.027
-8	2.54	-54	0.024
-9	2.33	-55	0.021
-10	2.14	-56	0.019
-11	1.96	-57	0.016
-12	1.80	-58	0.014
-13	1.64	-59	0.012
-14	1.51	-60	0.011
-15	1.38		

ПРИЛОЖЕНИЕ III

АППРОКСИМАЦИЯ SONNTAG ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ ПАРЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ВОДЯНЫХ ПАРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ниже приведены уравнения III.1 и III.2 (SONNTAG) для расчета величины парциального давления насыщенных водяных паров над водой $P_п"$ и надо льдом $P_л$ [278], являющиеся наиболее точными корреляциями экспериментальных данных.

$$\ln P_п" = -6096{,}9385 \cdot T^{-1} + 16{,}635794 - 2{,}711193 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1{,}673952 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2{,}433502 \cdot \ln T,$$

гПа,

$$173{,}15 \le T \le 373{,}15 \text{ [K]}. \qquad \text{(III.1)}$$

$$\ln P_л = -6024{,}5282 \cdot T^{-1} + 24{,}7219 + 1{,}0613868 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1{,}3198825 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0{,}49382577 \cdot \ln T,$$

гПа,

$$173{,}15 \le T \le 273{,}16 \text{[K]}. \qquad \text{(III.2)}$$

Погрешность расчетных значений $P_п"$ невелика: ≤ 0,01 % - над водой и ≤ 1 % - надо льдом в диапазонах указанных выше температур воздуха [110].

На рис. III.1. показано отклонение по величине температуры точки росы δτ при расчете по формуле Магнуса-Тетенса (2.16) по отношению к расчетной величине τ по III.1 и III.2.

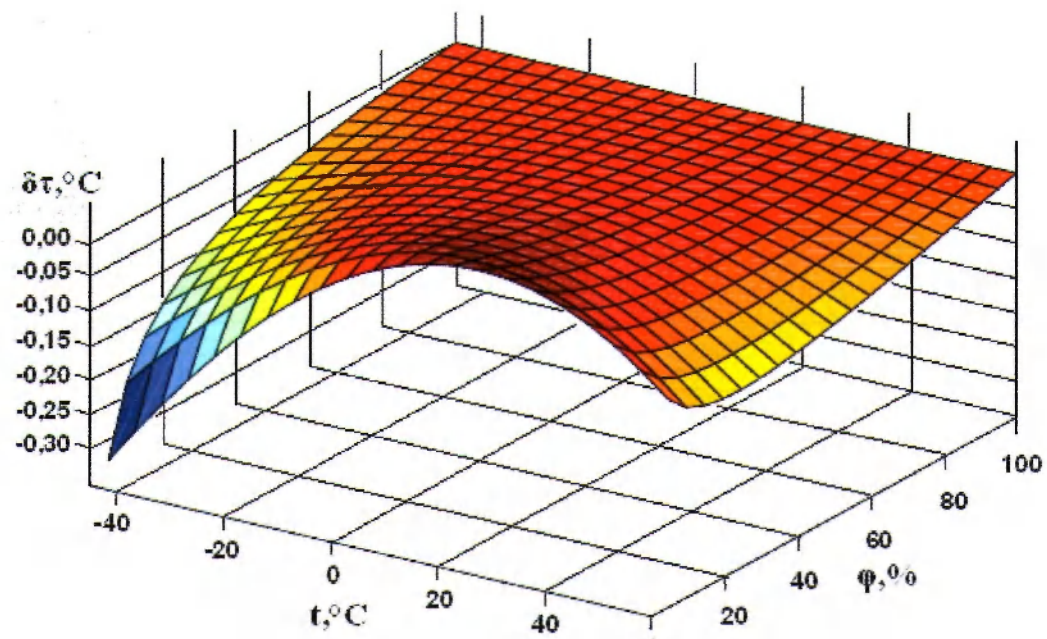


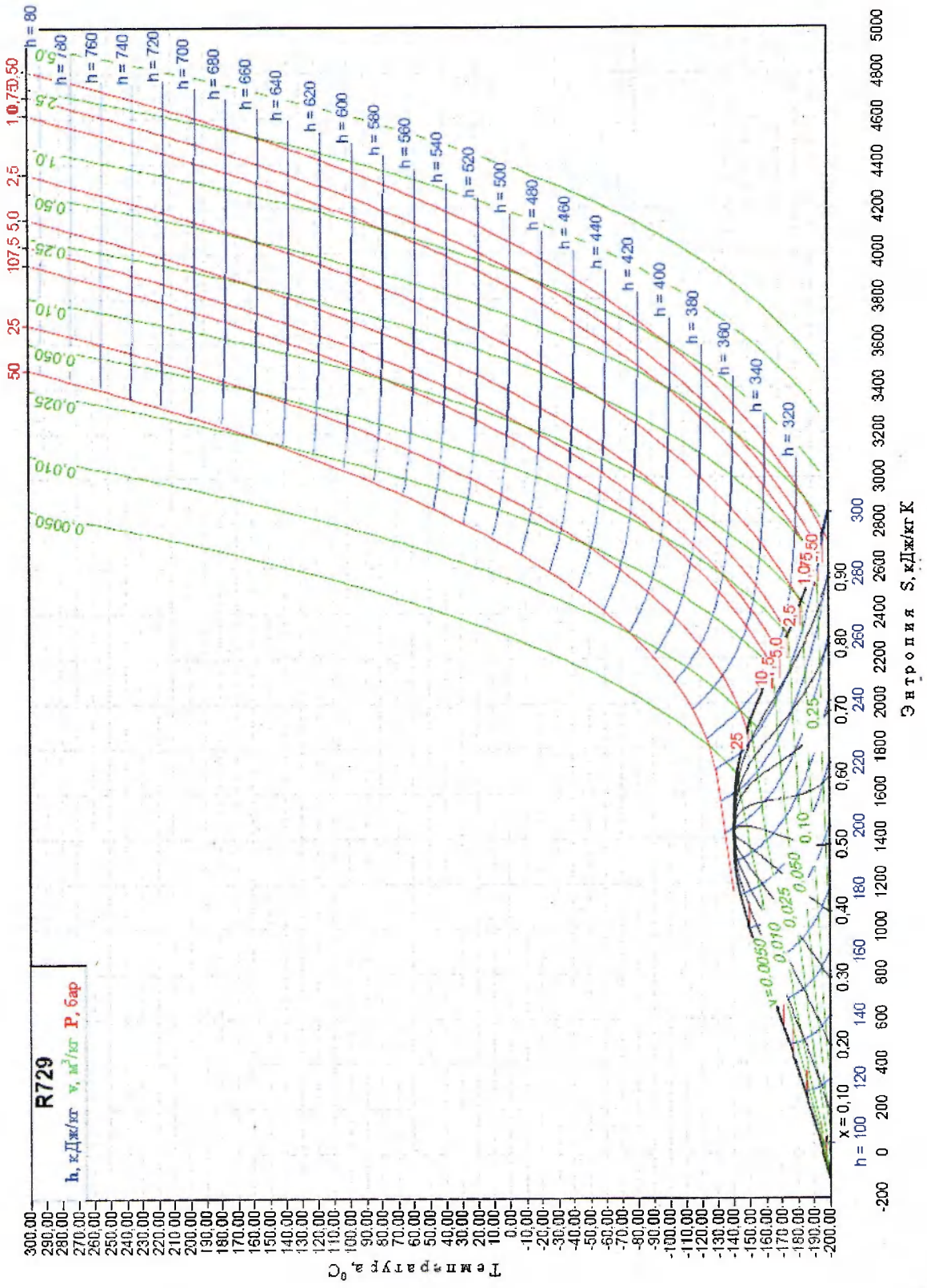
Рис.III.1. Девиация расчетных значений τ по формуле 2.16 по отношению к расчетам по III.1 и III.2 (выполнена Hardy B.*).

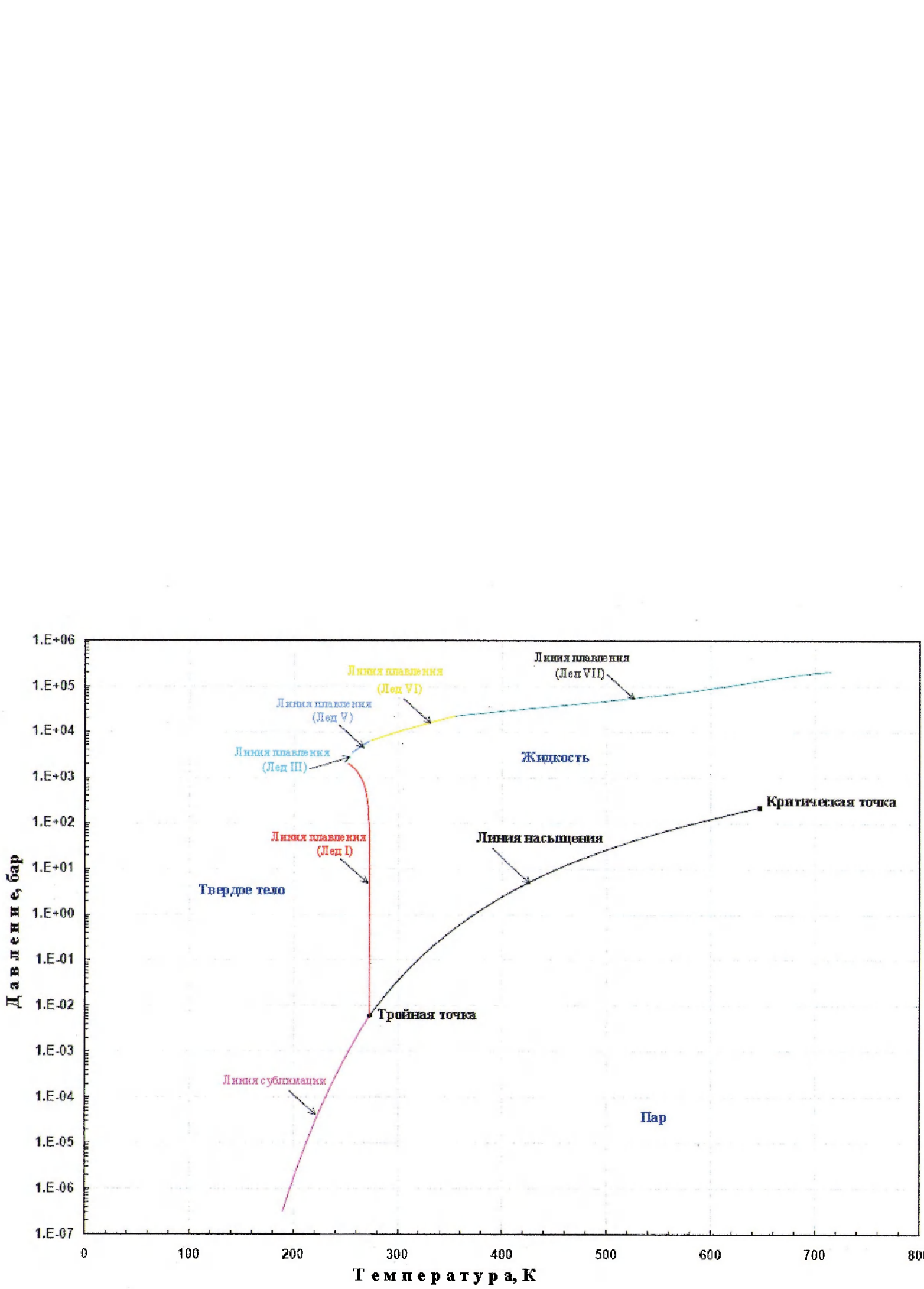
*Hardy B., Thunder Scientific Corporation, Albuquerque, NM, USA The proceedings of the Third international Symposium on Humidity & Moisture, Teddington, London, England, April 1998.

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЙ R729, R718

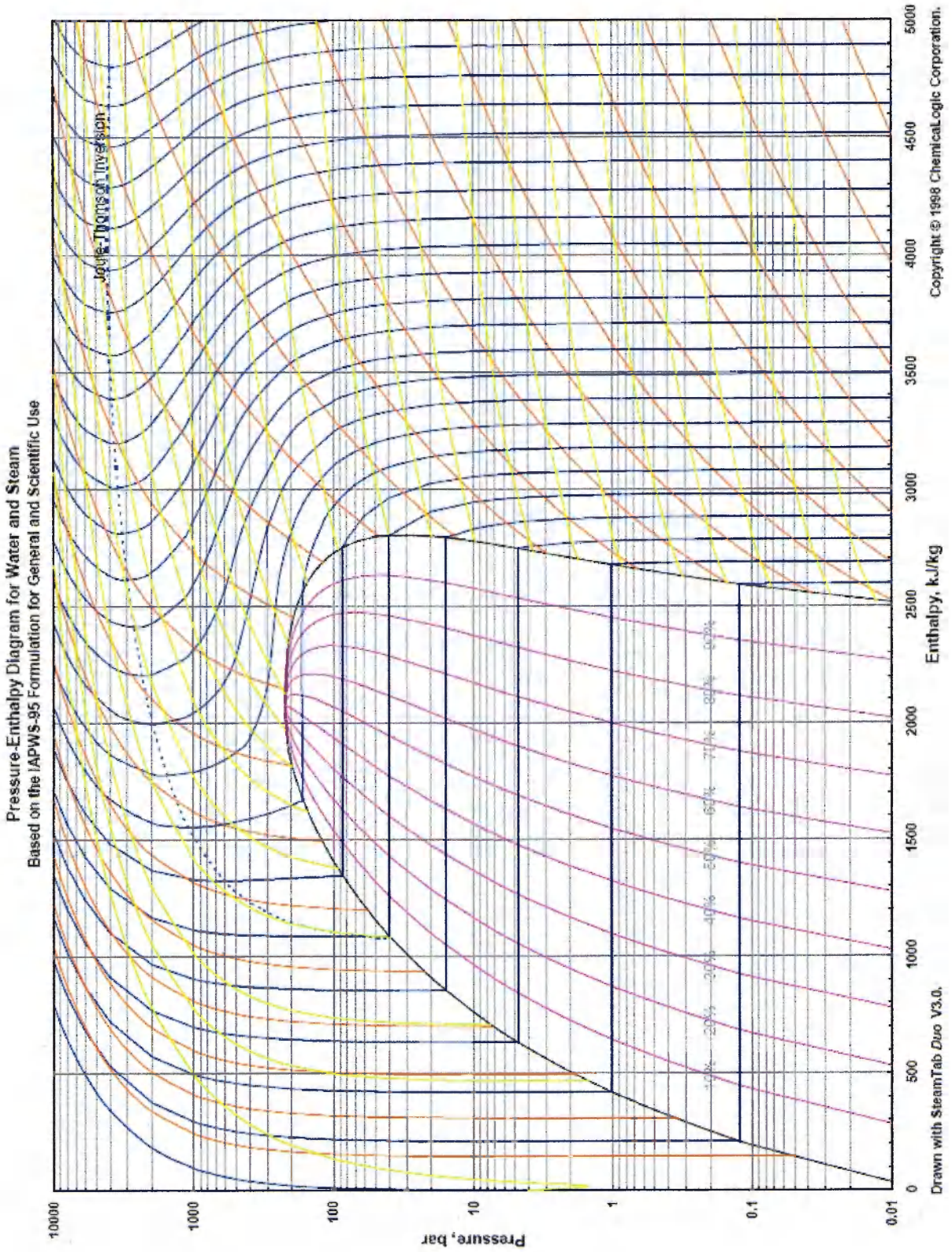
S, T – диаграмма воздуха (R729)





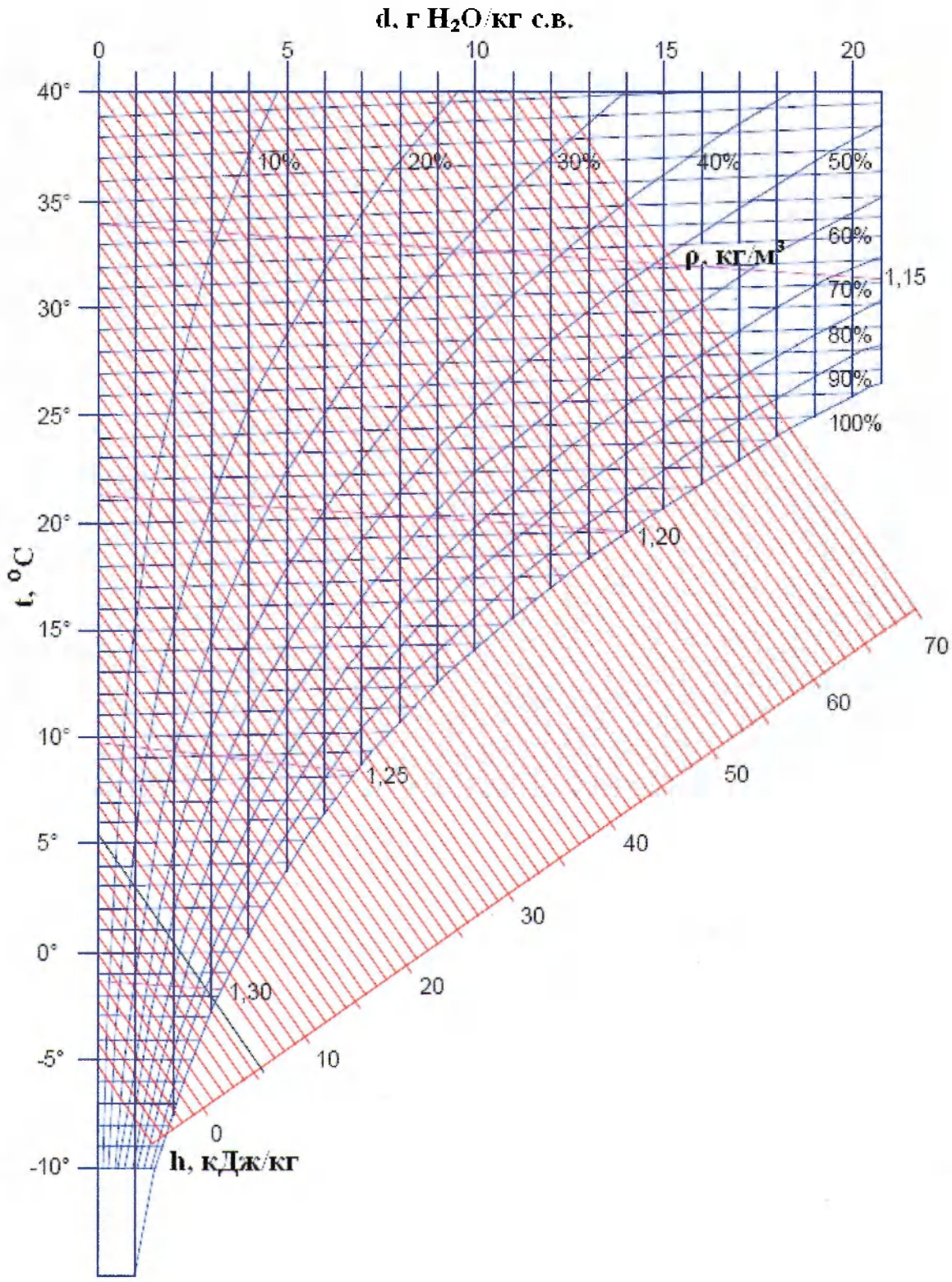
Фазовая диаграмма воды (R718)

Диаграмма h,P для воды и водяного пара

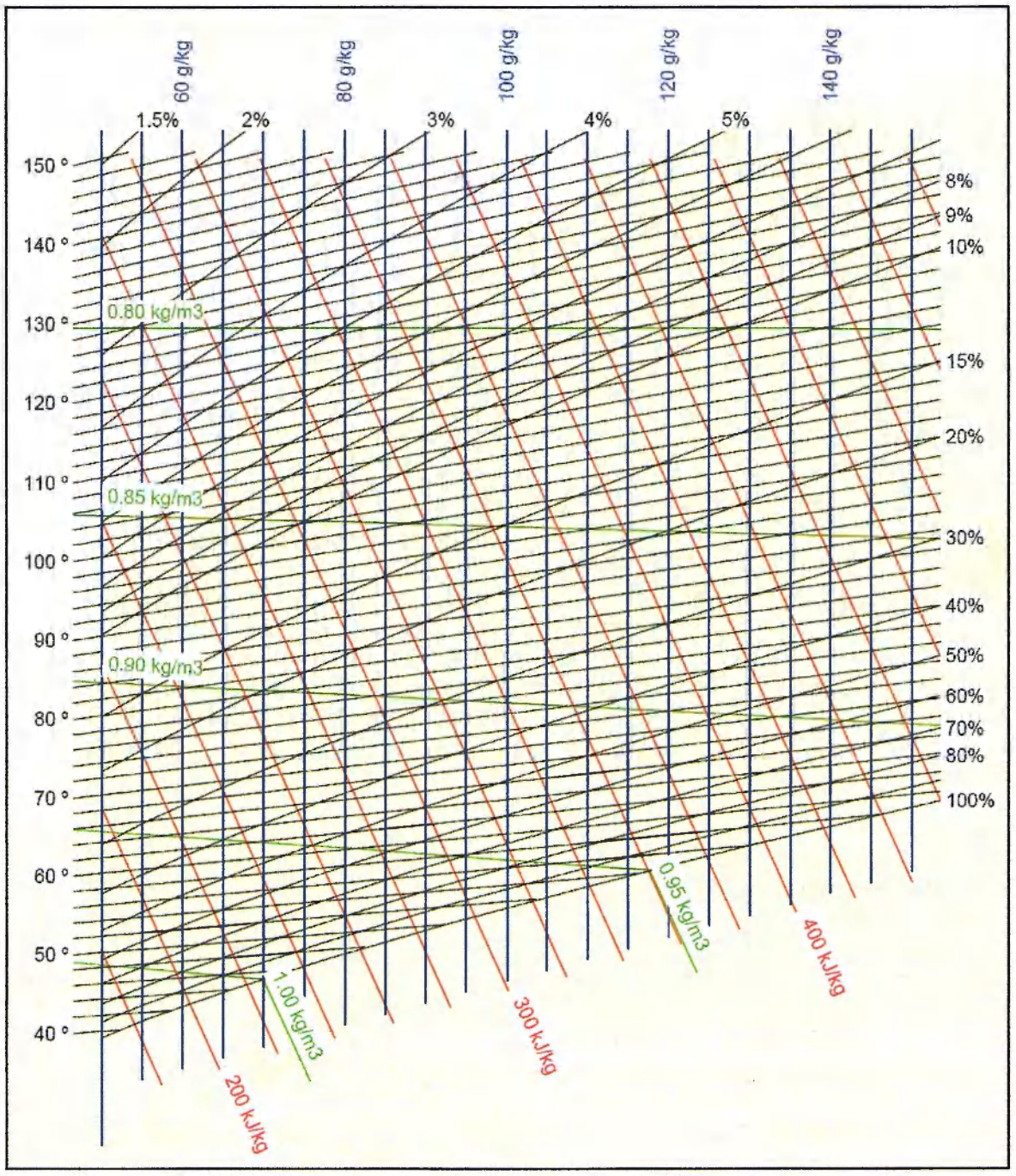


ПРИЛОЖЕНИЕ V
КОСОУГОЛЬНАЯ d,h – ДИАГРАММА РАМЗИНА-МОЛЬЕ

Диапазон t: [-10…40] °C $P_б$ = 100 кПа



Диапазон t: [40…150] °C $P_б$ = 100 кПа



ПРИЛОЖЕНИЕ VI

ПСИХРОМЕТРИЧЕСКАЯ t,d – ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Психрометрическая диаграмма (Psychrometric Chart) является зеркальным отражением d,h-диаграммы Рамзина-Молье, повернутой на 90° (рис.VI.1, VI.2).

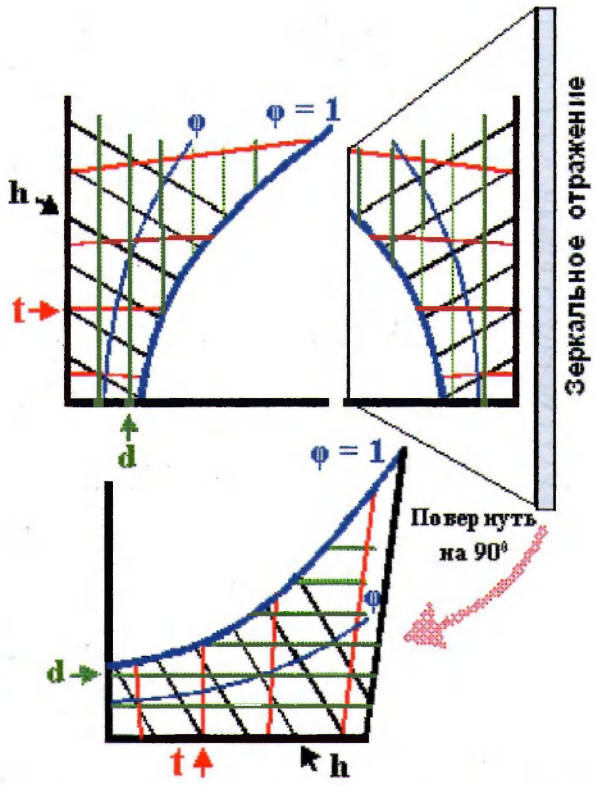


Рис.VI.1. Схема трансформации* d,h- диаграммы Рамзина-Молье в психрометрическую t,d- диаграмму.

*www.padfield.org/tim/cfys/mollier/moll3.php

ASHRAE выпускает диаграммы для трех диапазонов температуры воздуха:
- normal temperature 0…50 °C;
- low temperature -40…10 °C;
- high temperature 100…200 °C,

и четырех значений атмосферного давления, в соответствии с высотой расположения географического пункта от уровня моря (sea level – 0 м, high altitude: 750 м, 1500 м, 2250 м).

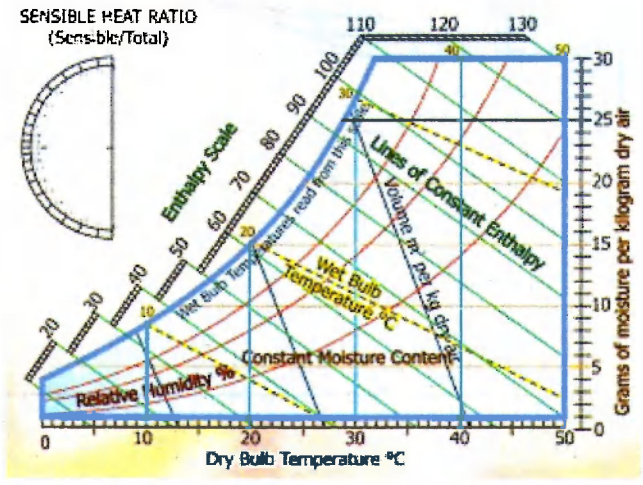


Рис.VI.2. Психрометрическая t,d-диаграмма.

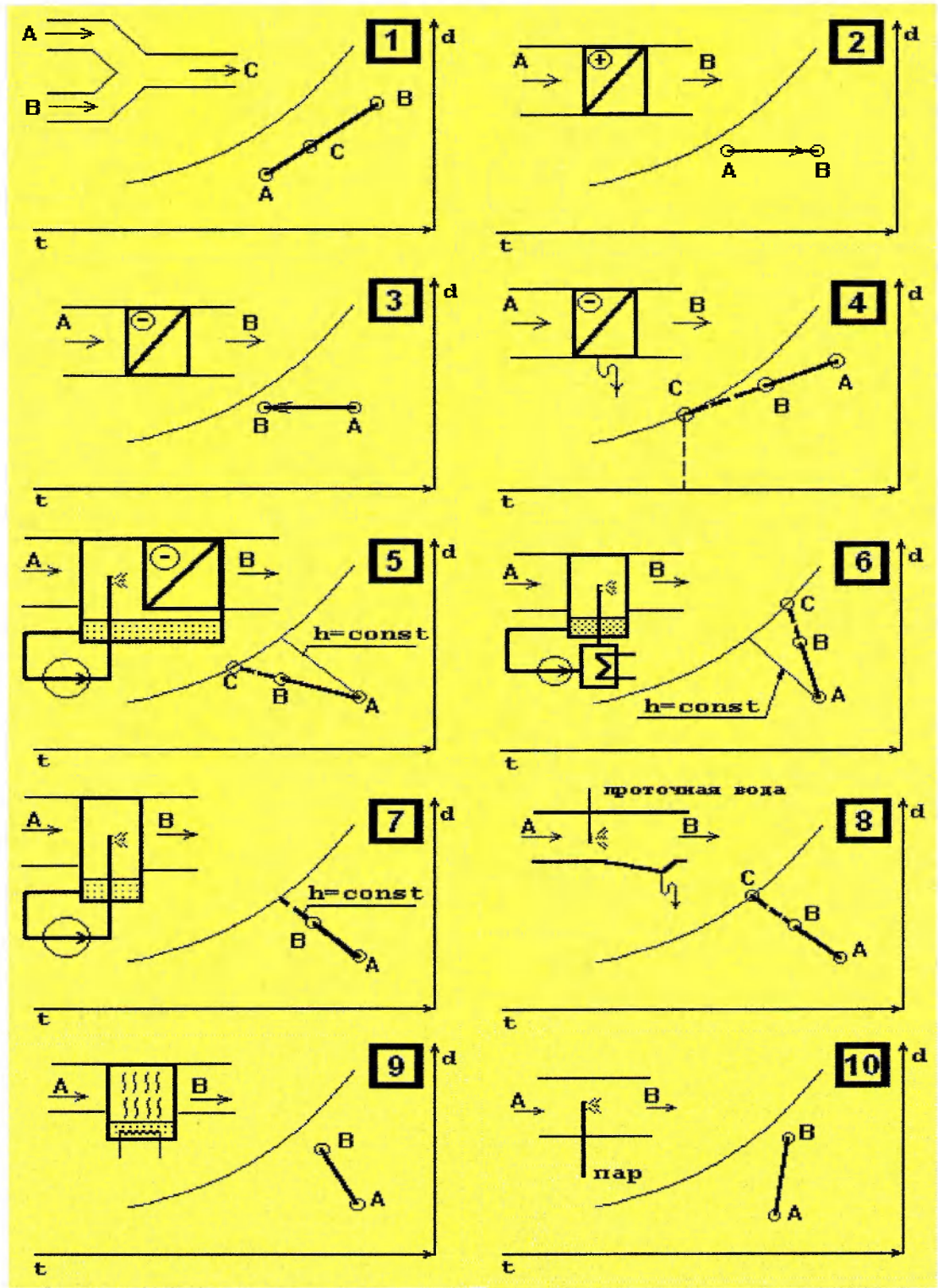
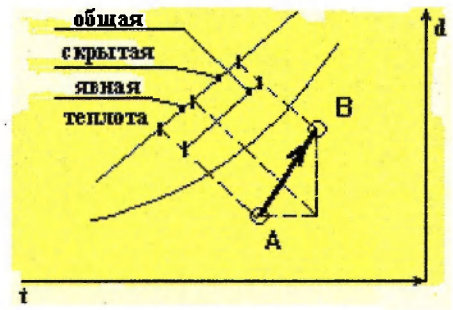


Рис.VI.3. Изображение основных процессов обработки воздуха в τ,d- диаграмме:

1 – смешение двух потоков; 2...4 – процессы в поверхностном аппарате (2 – нагревание, 3 – охлаждение, 4 – охлаждение (ниже τ) и осушение); 5 – обработка в орошаемом поверхностном ВО; 6 и 7 – процессы в контактном аппарате (6 – политропический процесс при $t_w > t_м$; 7 – адиабатическое увлажнение, $t_w = t_м$); 8 – увлажнение разбрызгиванием проточной воды; 9 – увлажнение над поверхностью подогретой воды; 10 – увлажнение острым паром.

В диаграмме легко определяются явная и скрытая составляющие изменения теплосодержания влажного воздуха в процессе его политропической обработки (рис.VI.4), с помощью шкалы SHR проводится луч процесса (рис.VI.5).



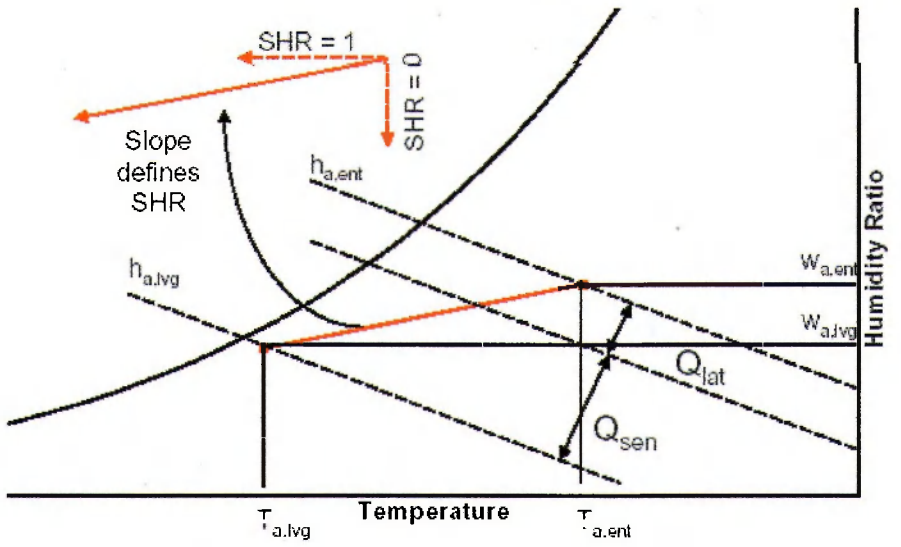


Рис.VI.4. Определение в психрометрической диаграмме явной Q_{sen} и скрытой Q_{lat} тепловых нагрузок и шкала SHR (sensible heat ratio) (см. § 5).

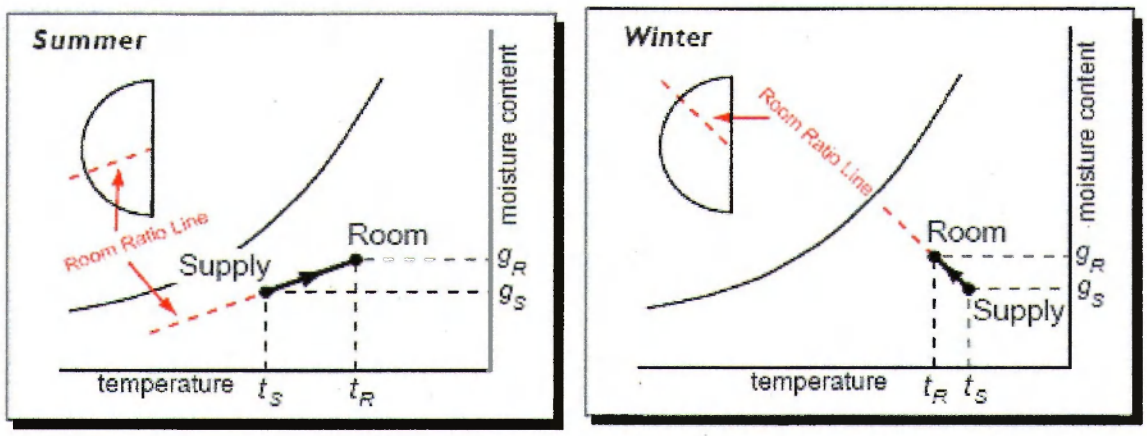


Рис.VI.5. Проведение луча процесса в помещении в психрометрической диаграмме.

Рис. VI.4, как и VI.2, дан в оригинальном исполнении для самостоятельного изучения и освоения американской психрометрической диаграммы, лежащей в основе всех расчетных методик ASHRAE (полезным будет научиться читать диаграммы с температурной шкалой в градусах Фаренгейта).

Расчеты параметров воздуха можно проводить в диаграммах с помощью компьютерных программ, предлагаемых различными фирмами (на CD, либо размещенные в Интернете). На рис.VI.6 показаны, в качестве примера, расчет параметров и построение процессов обработки в d,h- и t,d- диаграммах (в диалоговых окнах). Здесь представлены следующие процессы: (111-2) – охлаждение и осушение; (2-3) – подогрев в поверхностном аппарате; (3-4 (100)) – увлажнение паром.



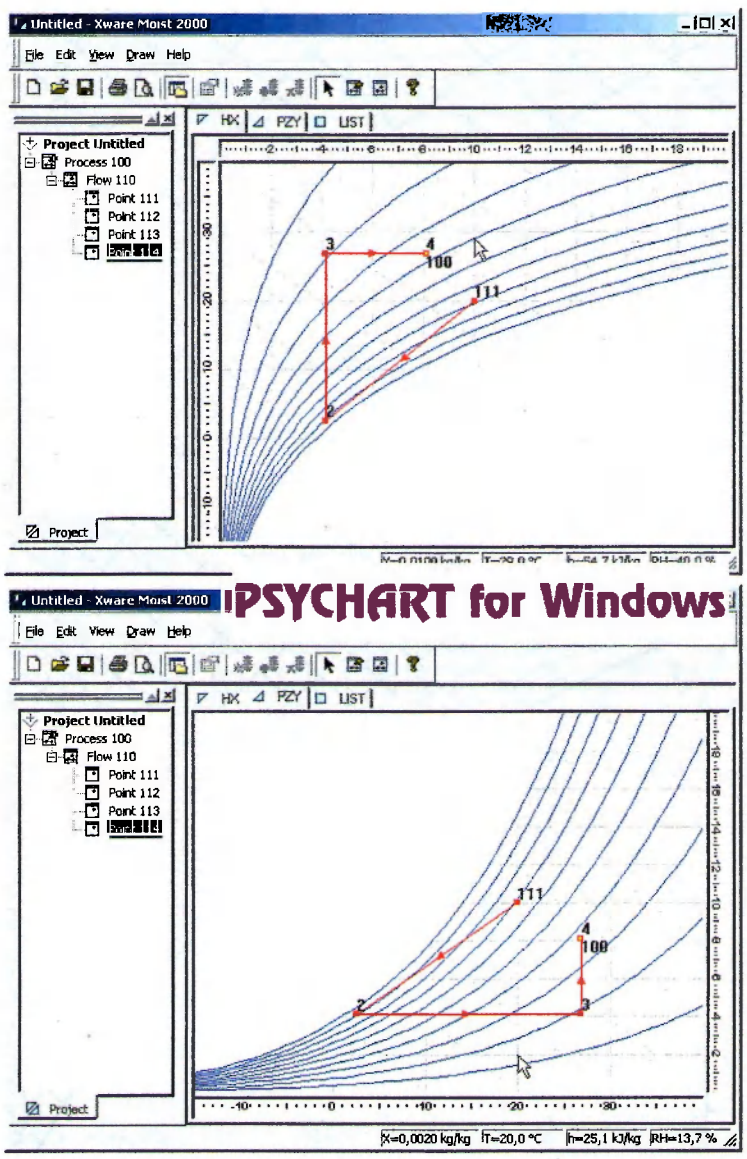
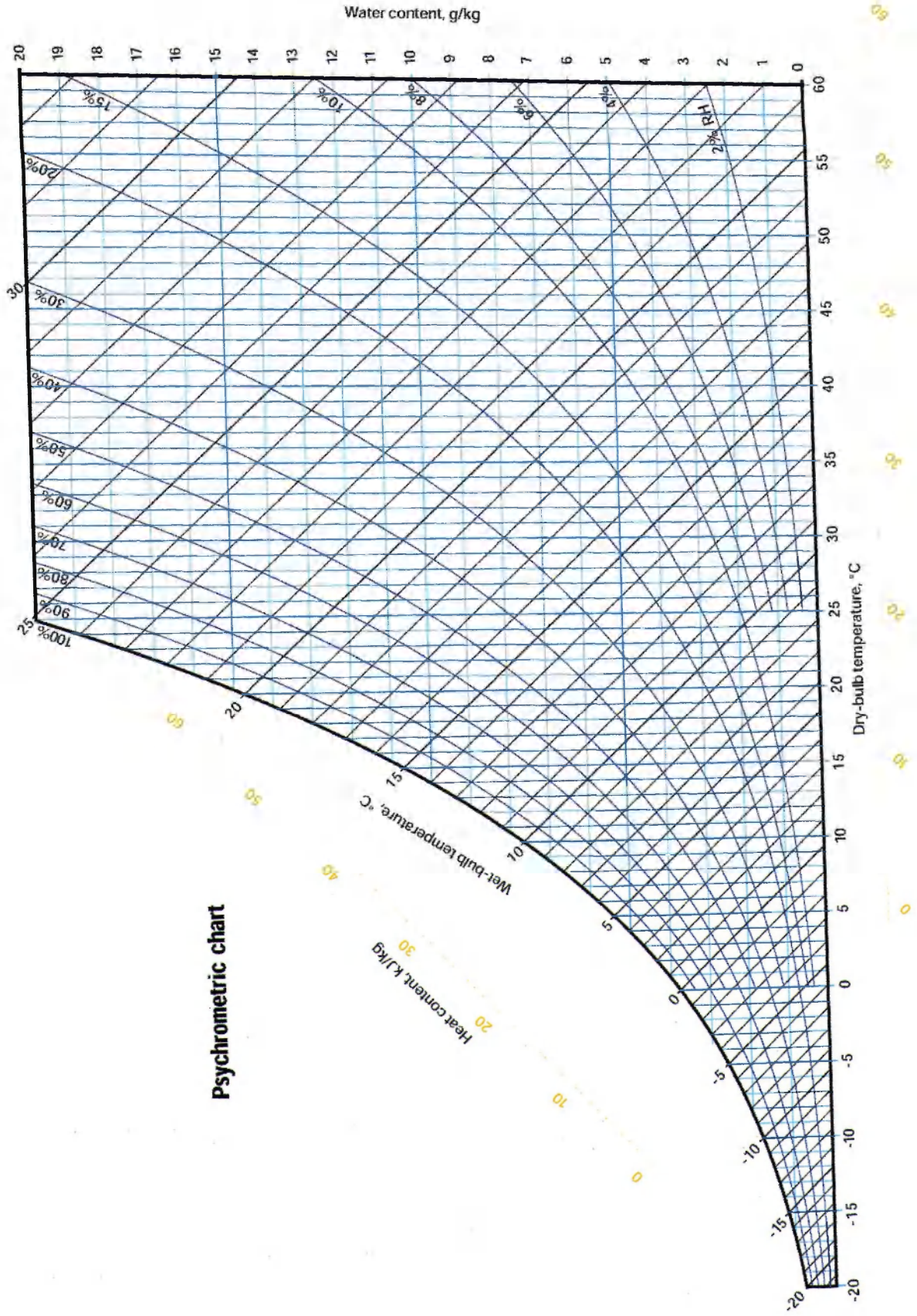


Рис.VI.6. Электронные версии диаграмм влажного воздуха с построением процессов обработки.

Электронная версия психрометрической диаграммы с автоматическим определением параметров влажного воздуха по точке, фиксируемой в поле диаграммы курсором, размещена в Интернете компанией Дайкин по адресу: *www.be/internet/denv/content*. Также можно воспользоваться версиями, разработанными компаниями:
- ChemicaLogic (*www.chemialogic.com/download/psychrometric-chart-metric.pdf*);
- Munters AB (см. на вкладке, с. 557.


Psychrometric chart
Water content, g/kg
Wet-bulb temperature, °C
Dry-bulb temperature, °C
Heat content, kJ/kg
RH
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%

ПРИЛОЖЕНИЕ VII

СВОЙСТВА АБСОРБЕНТОВ – ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ХЛОРИДОВ КАЛЬЦИЯ И ЛИТИЯ, ЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ

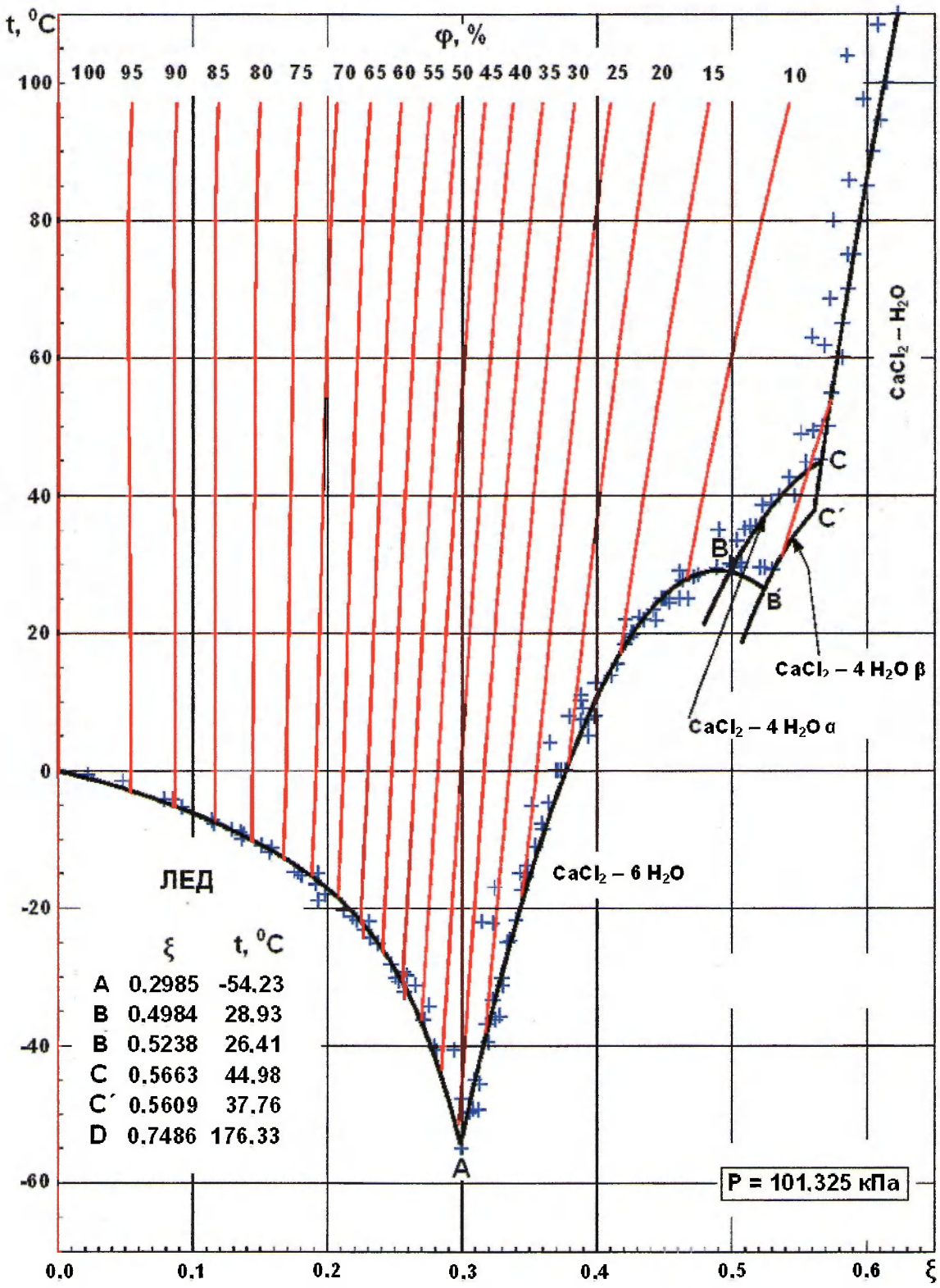


Рис.VII.1. Фазовая диаграмма гидрата $CaCl_2$ [146].

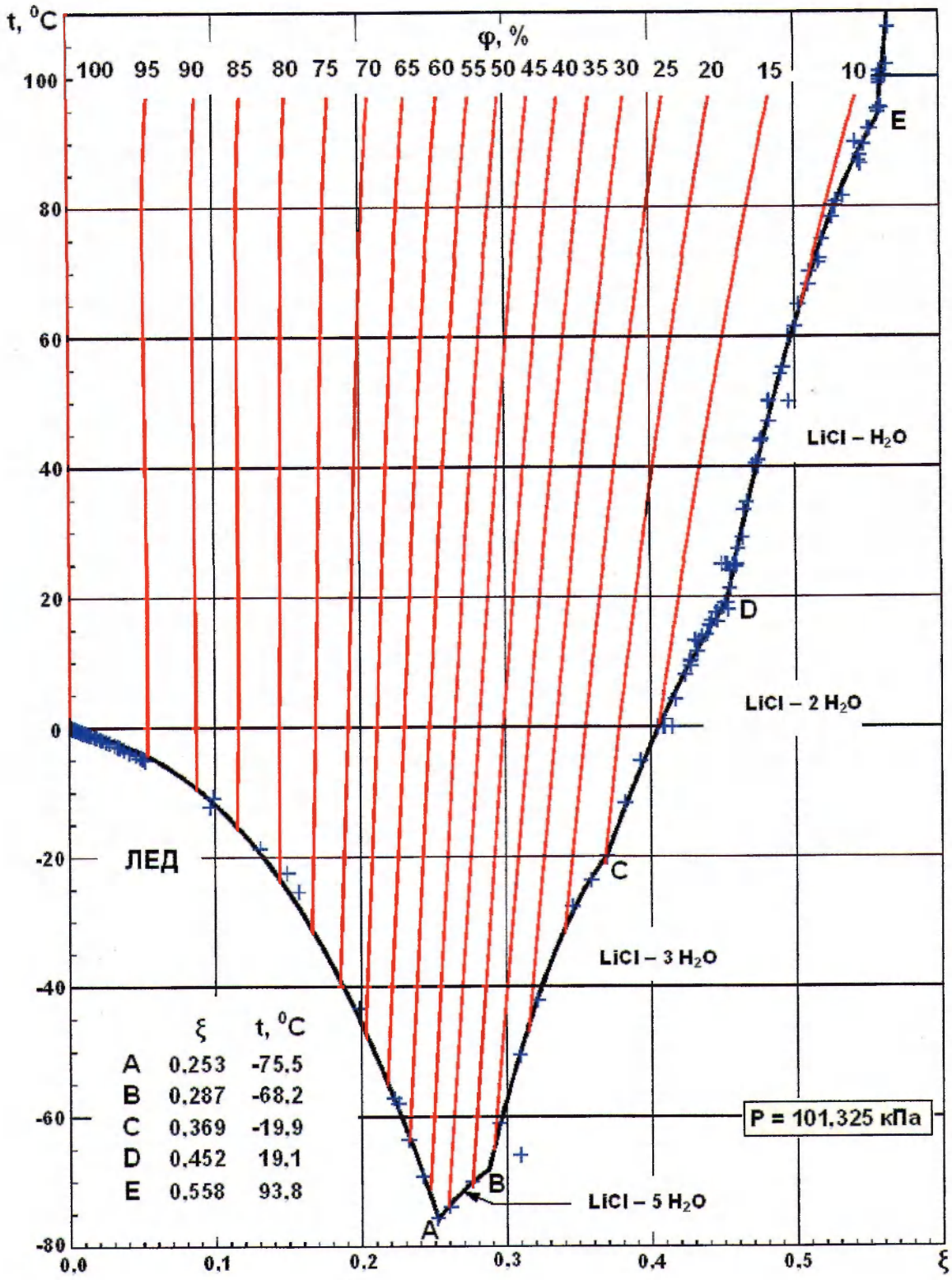


Рис.VII.2. Фазовая диаграмма гидрата LiCl [146].

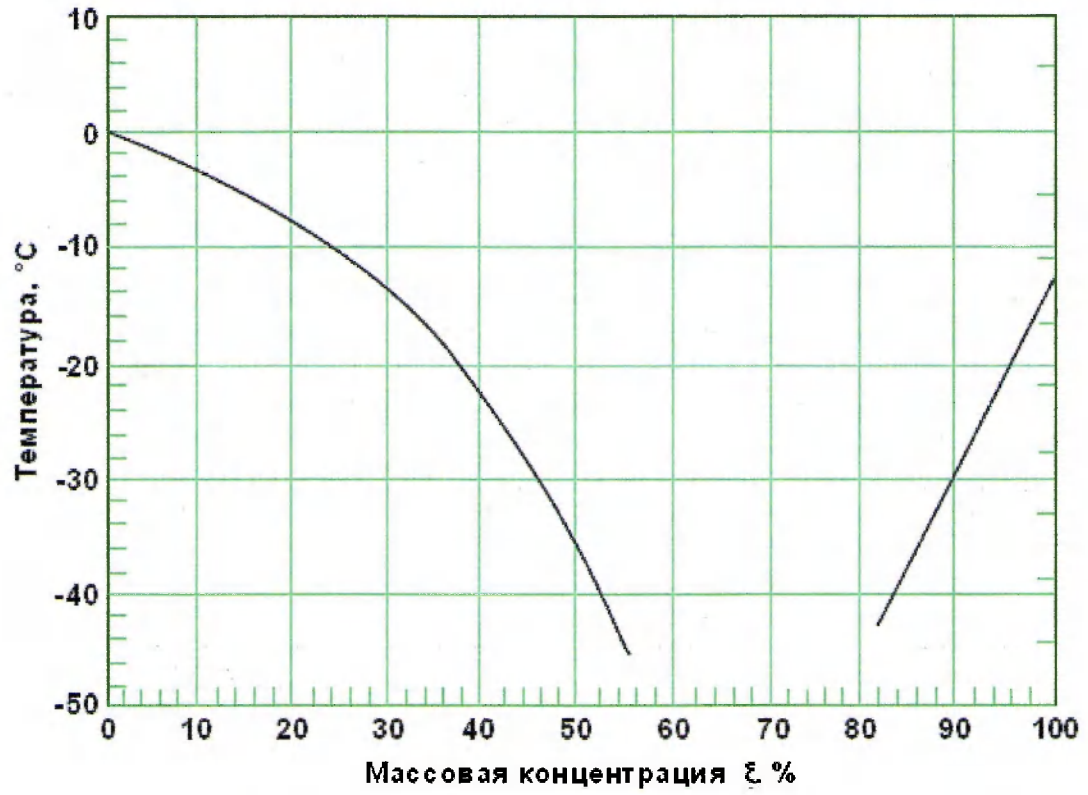


Рис.VII.3. Фазовая диаграмма этиленгликоля [165].

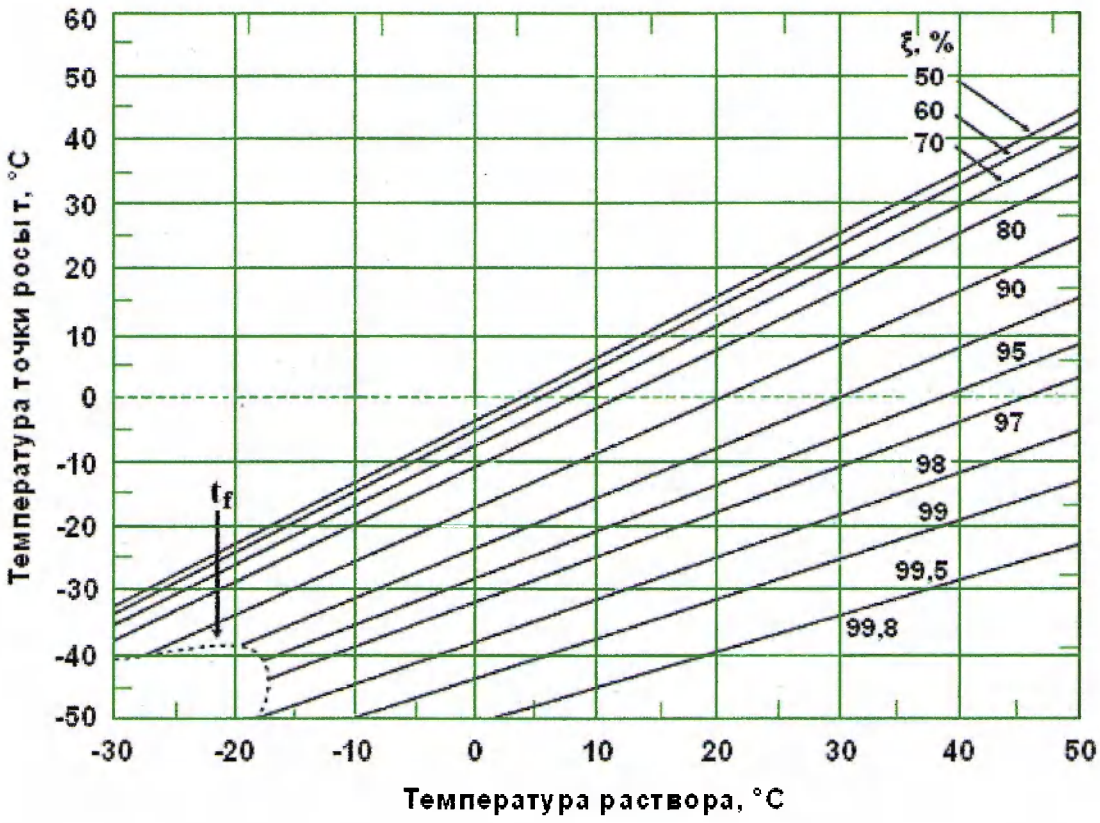


Рис.VII.4. Температура точки росы воздуха у поверхности этиленгликоля [165].

ПРИЛОЖЕНИЕ VIII

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ АДСОРБЕНТАХ (ЦЕОЛИТАХ, ИОНИТАХ)

Цеолиты типа X, Y, Rho (FAU) имеют кубооктаэдрическую структуру элементарных ячеек (§ 7.2.1). Ее объем равен 7776 $Å^3$, где могут поместиться 256 молекул воды, что в 1,67 раза больше, чем в случае молекулярных сит типа А. В каждой такой ячейке 13X (NaX) содержится 8 больших и 8 малых полостей. Большая полость имеет четыре входа, образованных 12-членными кислородными кольцами диаметром d ≈ 8-10 Å. Поэтому X-структура (рис.VIII.2) более открыта, чем структура цеолитов типа А, и доступна для молекул большего диаметра [41]. В связи с этим сито 13X можно использовать не только для осушения воздуха, но и его очистки от паров подавляющего большинства компонентов сложных смесей: все типы углеводородов, в том числе галогенозамещенные (фреоны, хлороформ, четыреххлористый углеводород), органические соединения (меркаптаны, диоксан и др.).

Как уже отмечалось в § 7.2.1, селективная способность цеолитов определяется геометрической величиной их входного окна, соразмерной с критическим* диаметром молекул (табл.VIII.1), а также уровнем поляризованности молекул абсорбтива. Сорбция различных органических соединений зависит также и от формы молекулярных групп (рис.VIII.1, VIII.2).

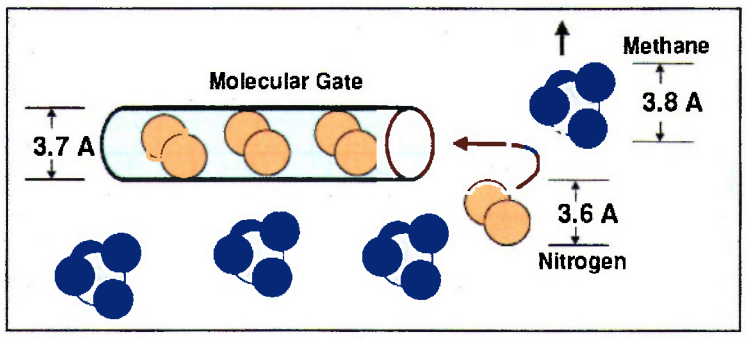


Рис.VIII.1. Поглощение адсорбентом молекул азота [153].

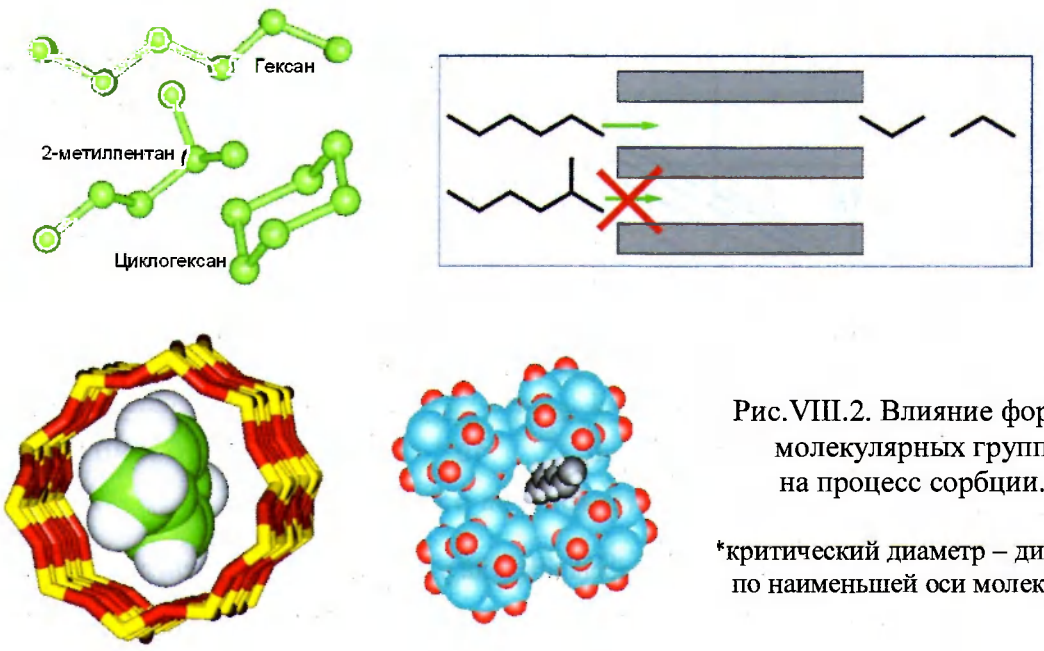


Рис.VIII.2. Влияние формы молекулярных групп на процесс сорбции.

*критический диаметр – диаметр по наименьшей оси молекулы

Таблица VIII.1. Значения критического диаметра молекул различных веществ.

№	Вещества	Критический диаметр,(Å)
1	Гелий	2.0
2	Водород, ацетилен	2.4
3	Вода, кислород, оксид и диоксид углерода	2.8
4	Азот	3,0
5	Аммиак, сероводород	3,6
6	Аргон	3,8
7	Метан	4.0
8	Этилен, Гексан	4.2
9	Этан, метанол, этиловый спирт	4.4
10	Метил – меркаптан	4.5
11	Пропан, углерод от C_4 до C_{22}	4.9
12	Пропилен	5.0
13	Бутен	5.1
14	2 – Метил пентан	5.4
15	Углерод C_{22}	5.6
16	Циклогексан	6.0
17	Толуол, параксилен	6.7
18	Бензол	6.8
19	Углеродистый тетрахлорид	6.9
20	Метаксилен	7.1
21	Триэтиламин	8.4





Иониты – высокомолекулярные органические вещества, практически нерастворимые, способные к обратимому обмену своих ионов на эквивалентное количество других ионов, находящихся в окружающей их среде. Эти синтетические ионообменные материалы с 1930 годов широко используются в различных промышленных технологиях: очистка и умягчение воды, сорбция различных веществ и пр.

Современные иониты полистирола с прошивкой дивинилбензолом, обладающие функциональными группами сульфоновой кислоты SO_3H и ионной формой Na^+ (рис.VIII.4), имеют большую обменную емкость, высокую механическую прочность (95-100 %) и осмотическую стабильность. На их основе построена работа различных катионообменников, в т.ч. роторов-теплоутилизаторов Hi-Panex-Ion (§ 11.4) для осуществления процесса сорбции водяных паров.

Идея создать альтернативу силикагелиевым роторам на основе ионитов возникла в компании Seibu Giken Co. Ltd (Japan) в 1999 г., в связи с тем, что механизм адсорбции H_2O силикагелей, основанный на химической активности гидроксилированной поверхности,

проявляемой силанольными группами Si-OH, за счет которых образуются водородные связи с молекулами сорбата (см. § 7.2.4.1.2.), также хорошо работает и на поглощение молекул вредных веществ, рис.VIII.3.

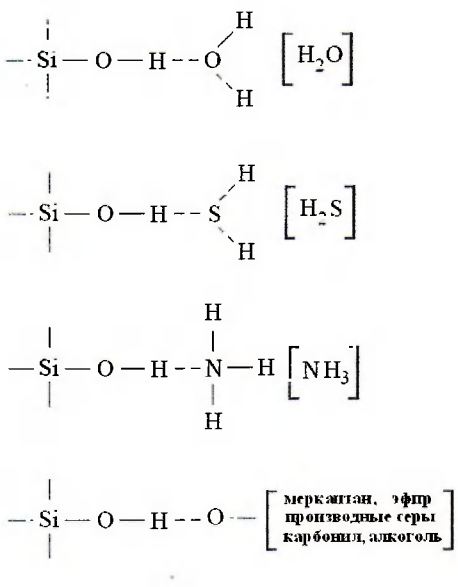
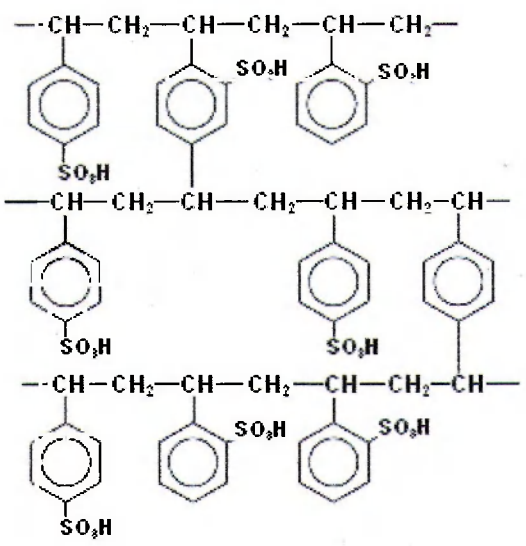
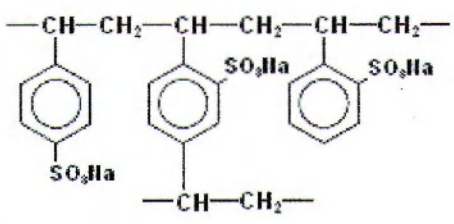


Рис. VIII.3. Адсорбция водяных паров, а также других веществ силикагелями.



а



б

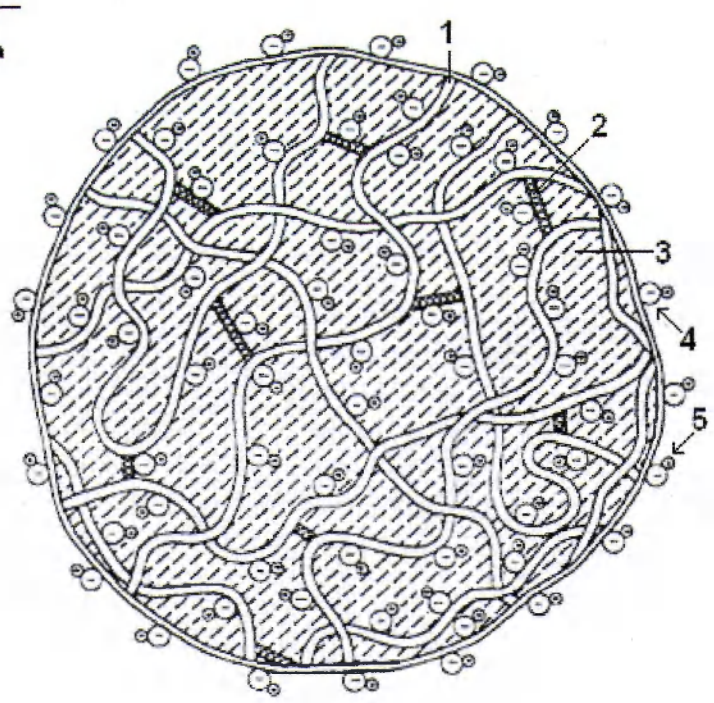


Рис.VIII.4. Химическая формула (а) и структурная схема (б) ионообменной смолы Ion Exchange Resin, применяемой в роторах-теплоутилизаторах Hi-Panex-Ion*:

1 – нити стирола;
2 – прошивка дивинилбензолом;
3 – гидротированная H_2O;
4 – фиксированные анионы SO_3^-;
5 – подвижные обменные катионы Na^+.

*European Patent EP 0957320A2, 17.11.1999. Bulletin 1999/46, заявители: Seibu Giken Co., Ltd., Koga-Shi, Fukuoka-ken (JP)

ПРИЛОЖЕНИЕ IX

БИОГРАФИЧЕСКИЕ ОЧЕРКИ





Леонид Константинович Рамзин

26.10.1887 — 28.06.1948

Профессор Л.К. Рамзин – выдающийся русский ученый, представитель теплотехнической школы МВТУ

Леонид Константинович Рамзин родился в 1887 году в селе Сосновка Тамбовской губернии. Его родители, Прасковья Ивановна и Константин Филиппович, были учителями земской школы.



В 1898 году Леонид поступил в Тамбовскую мужскую гимназию. Развитию математических способностей помогло обучение у замечательного математика И. Александрова.

В студенческие годы, обучаясь в ИМТУ*, принимал активное участие в научных проектах под руководством проф. В.И. Гриневецкого и проф. К.В. Кирша, в частности, им был усовершенствован графический метод расчета парового котла.

В 1914 году, получив звание инженера-механика, был оставлен на преподавательской работе: читал лекции по нескольким курсам, в том числе *по дисциплине «Сушка материалов», в результате чего Л.К. Рамзин разрабатывает косоугольную d,h-диаграмму состояния влажного воздуха (1918 г.)*.

Л.К. Рамзин – студент ИМТУ

В 1920 году Л.К. Рамзин избирается профессором МВТУ и в течение десяти лет руководит кафедрами «Топливо, топки и котельные установки» и «Тепловые станции».

Когда по указанию В.И. Ленина была создана Государственная комиссия по электрификации России во главе с Г.М. Кржижановским, в неё был включён и Рамзин. Л. К. Рамзин принял самое непосредственное и активное участие в коллективной работе над планом ГОЭЛРО, который был составлен в 1920 году.

Рамзин был лично знаком с В.И. Лениным, который высоко ценил его научный потенциал, профессиональные знания и организаторские способности. Ленин контролировал работу аппарата Главного управления по топливу и ход выполнение плана ГОЭЛРО, неоднократно привлекал Рамзина к выполнению конкретных поручений. Так, по совету Ленина, Леонид Константинович был назначен председателем приёмочной комиссии Каширской электростанции.

В 1921 году Ленин поддержал предложение Рамзина о создании Теплотехнического научно-исследовательского института имени В.И. Гриневецкого и К.В. Кирша (в настоящее время – Всероссийский теплотехнический институт). Леонид Константинович был его директором до 1930 года, а с 1944 – главным инженером и научным руководителем. Известны слова Ленина в письме к секретарю ЦК РКП (б): «Рамзин – лучший топливник в России. В лице Рамзина мы имеем самого выдающегося учёного по такой специальности, по которой у нас после Кирша людей нет».




1-й всесоюзный энергетический съезд, доклад проф. Л. К. Рамзина. 1928 год

Судьба Л.К. Рамзина трагична. В 1930 г. по сфальсифицированному делу так называемой Промпартии были арестованы 2000 ученых и инженеров. Решением суда десять человек, в том числе и профессор Рамзин, были приговорены к расстрелу. Позднее приговор был заменен лишением свободы сроком на 10 лет.

В заключении Л.К. Рамзин не прерывает свою научную и изобретательскую деятельность: в конце 1931 года завершает работу по созданию опытного образца прямоточного котла. Создание такого котла позволило внедрить пар высоких давлений в советскую энергетику. За этот котел Леонид Константинович был награжден Сталинской премией в 1943 году, а конструкция экранов топки котла получила название «навивка Рамзина» и широкое распространение на прямоточных котлах. После этого было специально создано Бюро прямоточного котлостроения, а Леонид Константинович стал его руководителем. В феврале 1936 года Л.К. Рамзин был амнистирован.



котел «Рамзина»

Осенью 1943 года профессор Рамзин вернулся в Москву и некоторое время работал заведующим лабораторией в ЭНИНе – энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского. В том же году был создан энергомашиностроительный факультет МЭИ (ныне Институт энергомашиностроения и механики), и в его составе – кафедра котлостроения, которой Л.К. Рамзин руководил до 1948 г.

Леонид Константинович Рамзин скончался на 61 году жизни, захоронен на Армянском кладбище г. Москвы.

В научном наследии проф. Рамзина главным и бесценным даром для специальности «Кондиционирование воздуха» является d,h- диаграмма влажного воздуха. Разработав ее в 1918 году, Л.К. Рамзин затем постоянно использовал диаграмму в своих лекциях [108, 292]. Опубликована она была в Известиях теплотехнического института в 1925-1927г.г. [79].



*ИМТУ – Императорское московское техническое училище – высшее специальное учебное заведение, имеющее главной целью образовывать механиков-строителей, инженеров-механиков и инженеров-технологов (из §1 Устава ИМТУ, 1868 г.), в советское время переименовано в МВТУ, а в настоящее время – МГТУ им. Н.Э. Баумана.

При работе над очерком использованы материалы МГТУ [66], института истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН (В. Гвоздецкий, зав. отделом истории техники и технических наук), МЭИ (В.М. Супранов, доцент), ТАТЭНЕРГО (последние размещены в сети «Интернет»), а также Тамбовского областного краеведческого музея.

Рихард Молье (Richard Mollier)
30.11.1863 — 13.03.1935



Профессор Р. Молье – один из крупнейших паротехников конца XIX – начала XX столетий, сыгравший огромную роль в развитии теории водяного пара, увеличении точности расчетов паровых процессов и циклов [109].

Рихард Молье родился 30 ноября 1863 г. в австрийском Триесте, где проживал до 1882 г. Здесь он обучался в немецкой гимназии, а затем продолжил свое образование в Граце и Мюнхене, изучая высшую математику, физику и машиностроение. В 1892 г. в техническом университете Мюнхена защитил диссертацию в области технической термодинамики. В 1896 г. получил место профессора прикладной физики и машиностроения Геттингенского университета, а в следующем 1897 году принял предложение Дрезденского технического университета, с которым связывает всю свою дальнейшую жизнь.

В 1904 году им была предложена h,s- диаграмма водяного пара, что значительно упростило расчеты в этой области, а в 1906 году в журнале Союза немецких инженеров VDI были опубликованы его «Новые таблицы и диаграммы для водяного пара», где были использованы новые величины: энтальпии воды и пара.

В 1923 году, как считается, независимо от Л.К. Рамзина [108, 234, 235, 292], разработал d,h- диаграмму влажного воздуха. В диаграмме Р. Молье впервые появилась шкала значений тепловлажностного отношения, являющегося характеристикой процесса (см. главу 3). В том же году на конгрессе по термодинамике, проходившем в Лос-Анджелесе (США), было принято решение: все диаграммы влажного воздуха с ординатой - h, – именовать диаграммами Молье.

В 1925 году Р. Молье предложил уравнение состояния водяного пара, которое вместе с таблицами были востребованы не только в Германии, но и в других странах (неоднократно издавались в России). Уравнение Молье принадлежит к классу уравнений, в которых поправка к объему является функцией давления и температуры, в связи с чем его можно рассматривать как прообраз современного уравнения состояния (2.14).



С именем Молье связывает свое решение задачи совместного процесса тепломассопереноса в системе вода – воздух Фридрих Меркель (4.7*).

В 1928 году профессор Р. Молье был удостоен высшей награды VDI – памятной монеты с изображением Грасгофа.

Рихард Молье был высокоэрудированным человеком и прекрасным лектором. В течение многих лет (с 1897 по 1931 г.г.) блестяще преподавал курсы термодинамики, гидравлики, холодильных машин в Дрезденской Высшей технической школе. К нему для подготовки к профессорской деятельности направлялись молодые ученые, в т.ч. из Советского Союза.



Р. Молье умер в Дрездене
13 марта 1935 года.



Фридрих Меркель (Friedrich Merkel)

1892 — 15.09.1929

Всего лишь девять лет было отпущено судьбой Фридриху Меркелю на занятия наукой. Однако результаты его деятельности за этот короткий срок стоят в одном ряду с научными достижениями его знаменитых коллег.

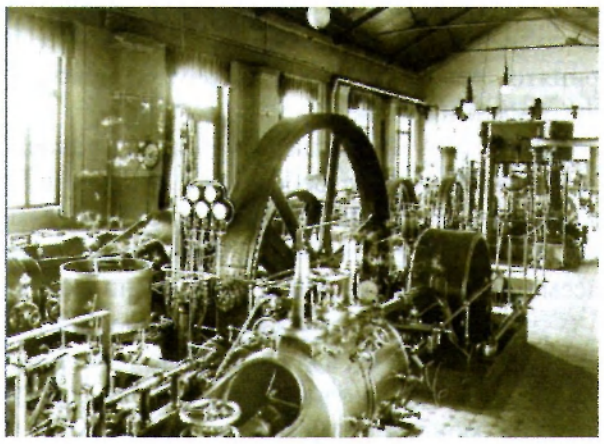
Фридрих Меркель родился в 1892 году в г. Гронинген в семье немецкого фабриканта, и был старшим из 5 сыновей. Уже в юном возрасте проявляет интерес к технике. Закончив с отличием гимназию во Фрайбурге, он проходит стажировку на отцовской бумажной фабрике в слесарной мастерской по обслуживанию котлов и паровых двигателей.

В 20-летнем возрасте Ф. Меркель начал изучать машиностроение в техническом университете Мюнхена (с зимнего семестра 1911/12 учебного года), где в 1913 г. он сдал преддипломный экзамен.

В 1914 году он перешел в Дрезденский технический университет, в котором существовали мощные научные школы проф. Густава Антона Цейнера и проф. Рихарда Молье. Однако, Первая мировая война, начавшаяся в этом же году, помешала Меркелю продолжить учебу: он добровольцем ушел на фронт. Незадолго до окончания войны он был тяжело ранен (сквозное огнестрельное ранение в живот) и прикован к больничной койке на целый год. Только в 1919 г. Ф. Меркель смог вернуться к занятиям.

В 1920 году получил диплом инженера и был приглашен проф. Р. Молье на работу в лабораторию машиностроения, ассистентом.

Первая научная работа Ф. Меркеля была связана с развитием теории паровоздушных смесей. Уже в мае 1922 г. он подготовил и успешно защитил диссертацию «Вклад в термодинамику сушки».



Лаборатория машиностроения Дрезденского технического университета

Последующие два года занимался вопросами конвективного тепломассообмена при испарительном охлаждении воды, созданием методики расчета градирен. В марте 1924 года представил работу «Об испарительном охлаждении», за которую получил звание доцента.

Предложенное им в 1925 году уравнение кинетики совместного тепломассообмена при непосредственном контакте воды и воздуха (4.7*) с одним коэффициентом обмена **σ** и одной движущей силой (разностью энтальпий) значительно упростило инженерные расчеты градирен.

В мае 1928 года получил должность профессора.

Коллеги Фридриха Меркеля отмечали его способности и умение организовывать научные исследования, талант преподавателя. Проф. Молье рассчитывал на него, как на своего преемника. За несколько лет своей деятельности Фридрих Меркель стал широко известен далеко за пределами Саксонии. Внезапная кончина 15 сентября 1929 года лишила науку без одного из наиболее ярких своих представителей.

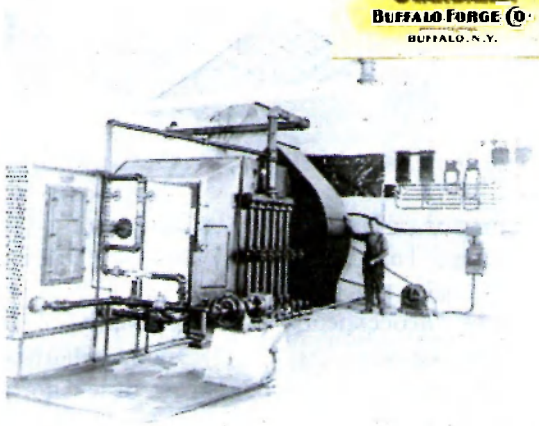
Виллис Хэливенд Керриер

26.11.1876 — 07.10.1950



В.Х. Кэрриер получил образование в Корнелльском университете (степень магистра) и по его окончанию в 1901 году был принят на работу в компанию "Buffalo Forge", занимающей лидирующие позиции по тепловентиляторам.

В 1902 г., занимаясь проблемой поддержания температурно-влажностных условий цветной печати в типографском деле, Кэрриер решает задачу кондиционирования воздуха для помещений книгоиздательской компании "Sackett & Wilhelms" в Бруклине. Установка на базе аммиачной холодильной машины производила охлаждение и осушение воздуха в летнее жаркое время, а зимой осуществлялось увлажнение воздуха паром от бойлера. За счет проведения этих процессов обеспечивалось поддержание необходимых значений температуры и относительной влажности воздуха для качественной четырехцветной печати (см. также § 1.1, с. 16).



17 июля 1902 года (дата внедрения первого промышленного кондиционера) считается точкой отсчета в развитии индустрии кондиционеростроения.

В 1902 – 1903 г.г. Кэрриер продолжил исследования в области осушения воздуха, занимался абсорбцией влаги с помощью водных растворов хлористого кальция.

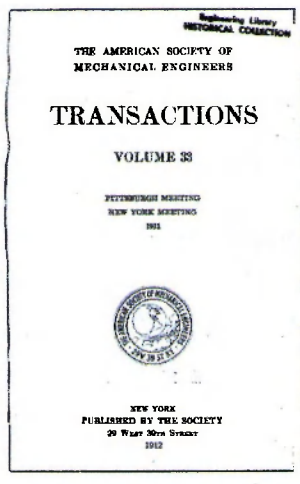
В 1904 – 1096 г.г. разработал психрометрическую диаграмму влажного воздуха.

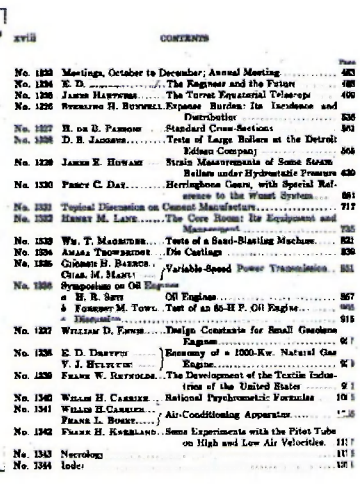
В 1906 г. получил патент США на свой аппарат для обработки ("третирования") воздуха № 808897 (2.01.1906). В 1907 г. – патент на способ регулирования влажности по точке росы приточного воздуха № 854270 (27.05.1907).

В 1908 г. Кэрриер предложил основные зависимости "Rational Psychrometric formulae" для инженерного расчета процессов кондиционирования воздуха.

В 1911 г. данные материалы были доложены в виде двух письменных докладов № 1340 и 1341 в ASME – американском обществе инженеров-механиков.

Таким образом, была основана новая инженерная дисциплина «Кондиционирование воздуха».





В 1915 г. В.Х. Кэрриер
и еще шесть его коллег-инженеров
образовали собственное дело – компанию
“Carrier Engineering Co.” со стартовым
капиталом в 32 000 $.



на фото в первом ряду (слева-направо):
Logan L. Lewis, Willis H. Carrier, Irvine J. Lyle,
Edward T. Murphy, позади: Edmund P. Heckel,
Ernest T. Lyle, Alfred E. Stacey, Jr.

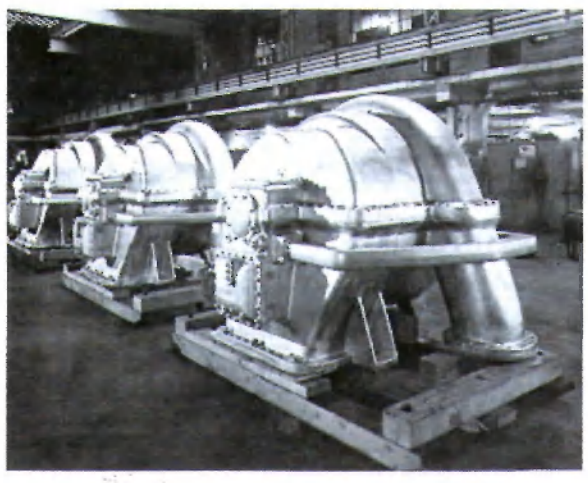
В этом же 1915 году был реализован проект центральной СКВ для кондитерской фабрики New England Confectionery Company в Бостоне, что позволило осуществлять круглогодичное производство шоколадных конфет. А на следующий год (1916 г.), работая над СКВ для аналогичного объекта (W.F. Schrafft Company) Кэрриер усовершенствует систему за счет применения эжекторных воздухораспределителей, при этом увеличивает рабочую разность температур в помещении и добивается равномерного распределения параметров воздуха.

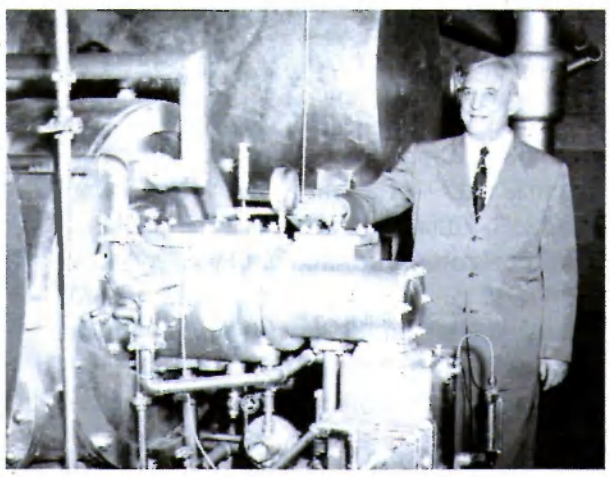
Усилия компании “Carrier Engineering Co.” были направлены на развитие всех компонентов СКВ, в т.ч. и холодильного обудования. Так, в 1921 году был разработан холодильный турбокомпрессор, в 1939 г. – СКВ для "небоскребов" и многое другое в последующие годы (см. § 1.1). Этапы развития компании могут быть предметом отдельного исторического исследования.



Центральная СКВ
для W.F. Schrafft Company

В.Х. Кэрриер избирался президентом ASRE (1927 г.) и ASHVE (1931 г.).





Холодильные турбокомпрессоры Кэрриера

Сегодня компания "Кэрриер" остается одной из ведущих компаний - законодателей в области кондиционеростроения (в 2001 году доход составил 8,895 млрд. $).

Карл Георг Мунтерс
22.03.1897 — 23.10.1989



Инженер, изобретатель (автор более 1000 патентов) и бизнесмен К.Г. Мунтерс – один из самых «успешных» людей Швеции, оставивший после себя огромное наследие блестящих идей и реализованных технических решений в области кондиционирования воздуха и холодильной техники.



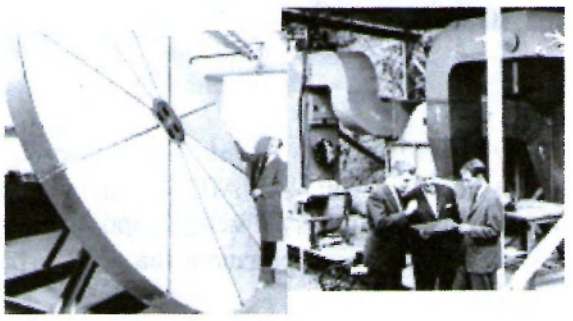
Шведский король Карл XVI вручает Карлу Мунтерсу (на фото слева) золотую медаль Королевской Шведской Академии инженерных наук (октябрь 1974)



Карл Мунтерс, – создатель регулярных насадочных структур, решивший проблему развития поверхности в единице объема при небольших значениях величины аэродинамического сопротивления.

Изобретение Мунтерса произвело настоящую техническую революцию в деле создания компактной тепломассообменной аппаратуры. Оно заключалось в том, что в объеме аппарата испарительного охлаждения (воздухоохладителя, градирни) через равные малые промежутки были размещены плоские листы, – т.н. регулярная насадка. Верхний торец насадки орошался водой, которая пленкой стекала вниз по всей конструктивной поверхности листов. В образованные между листами каналы подавался воздушный поток. При этом за счет одинакового расположения листов, было обеспечено ламинарное течение и снижено аэродинамическое сопротивление насадки, по отношению к ранее известному решению с заполнением объема аппарата насадочными элементами "в навал" (насыпной слой) – нерегулярная насадка. В развитии данного подхода появились гофрированные элементы, осуществлялся поиск оптимальной геометрии.

В последующем (1943 г.) была разработана роторная конструкция аппарата, в котором регулярная насадка вращалась. На основе этих конструкций были созданы увлажнители с насадками “CelDek” и др., теплоутилизаторы – регенераторы “Econovent” (1954 г.), осушители типа “Honeyvent” (1956 г.) (см. § 7.2.5), а затем и очистители воздуха (цеолитный ротор-концентратор VOC, работающий совместно с катализатором).



Один из первых роторов Econovent.





Первые исследования Карл Мунтерс проводил с небольшой группой коллег в Стокгольме в домашней лаборатории.



18 августа 1922 года Карл Мунтерс и Балтазар фон Платен из Королевского Технологического Института, представили водоаммиачную теплоиспользующую холодильную машину. Машина могла работать на электричестве, газе или керосине. Спустя год, на основе этого изобретения фирма AB Arctic начала производство домашних холодильников.
В 1928 компания Elektrolux покупает Arctic и приступает к производству абсорбционного холодильника модели D-fridge.



В середине 50-х годов был разработан первый холодильник для автомобильных прицепов.



Компания "Munters AB" была образована в 1955 году. За годы существования превратилась в мощную международную корпорацию, имеет представительства в 44 странах мира (собственные производства в 28 странах) с коллективом сотрудников более чем 1700 человек.

О ДИАГРАММЕ ГРОСВЕНОРА

Когда работа над книгой была завершена, в информационной сети “Internet” была размещена статья известного специалиста в области кондиционирования воздуха Дональда Гэтли [174], в которой рассказывается об американском ученом-химике Вильяме Мэйсоне Гросвеноре (William Mason Grosvenor, 05.10.1873 - 1944), разработавшем в 1908 году d,t-диаграмму влажного воздуха специально для анализа процесса сушки. Эту диаграмму (см. ниже) по всем ее признакам действительно можно считать первой из диаграмм, относящихся к так называемому европейскому варианту d,h- диаграмм Рамзина-Молье.

Диаграмма Гросвенора мало отличалась от современной формы диаграммы влажного воздуха. Она имела следующие изолинии: температуры, влагосодержания, относительной влажности; плотности и удельного объема сухого и насыщенного воздуха, скрытой теплоты парообразования, а также линий охлаждения (Lines of Constant Cooling). Линия охлаждения по сути дела есть ни что иное, как изоэнтальпа. Конечно, в этой диаграмме не было шкалы тепловлажностного отношения ε, разработанной проф. Р. Молье, не было общепринятого в настоящее время удобного масштаба шкал, исходящего из оптимального угла 135° между осями косоугольной диаграммы. Однако, она была первой…

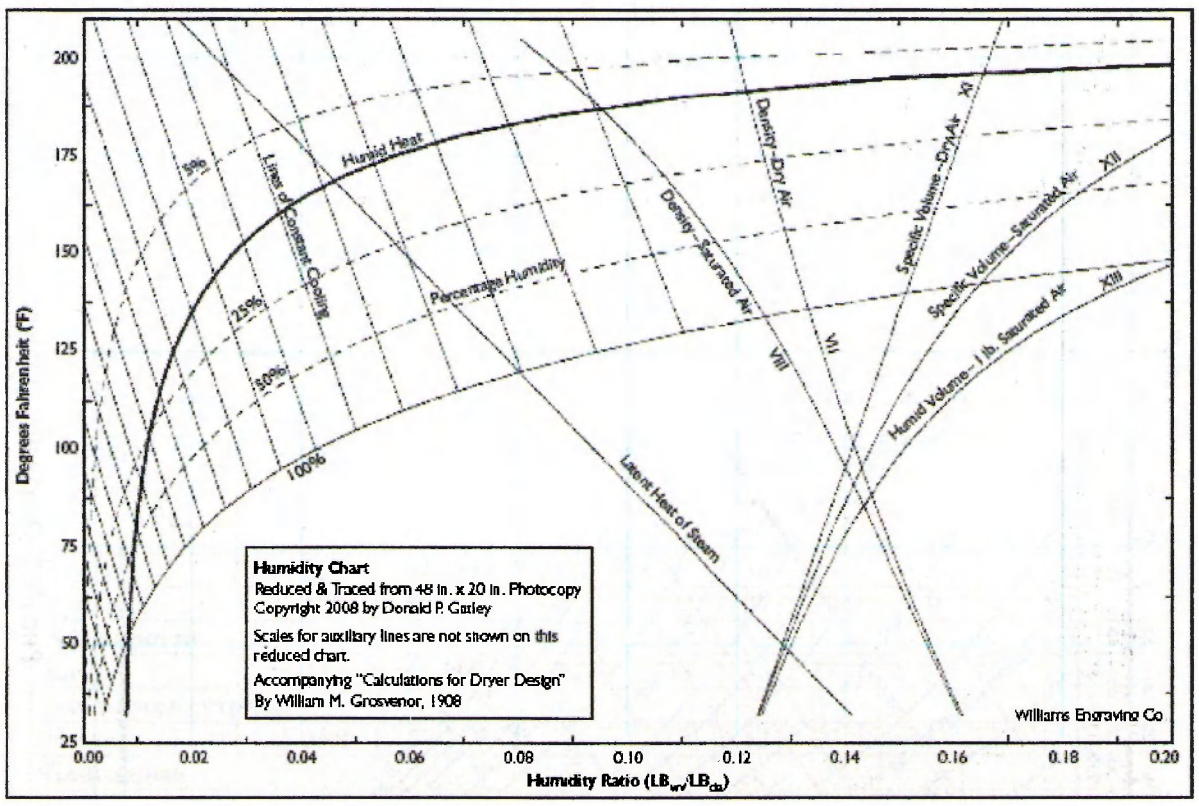


Рис.IX.1. Оригинальная диаграмма Гросвенора*.

*размещена в качестве приложения к трудам
американского института инженеров-химиков, т.1, 1908
(Supplement to Transactions of American Institute of Chemical Engmeers, v.1, 1908).

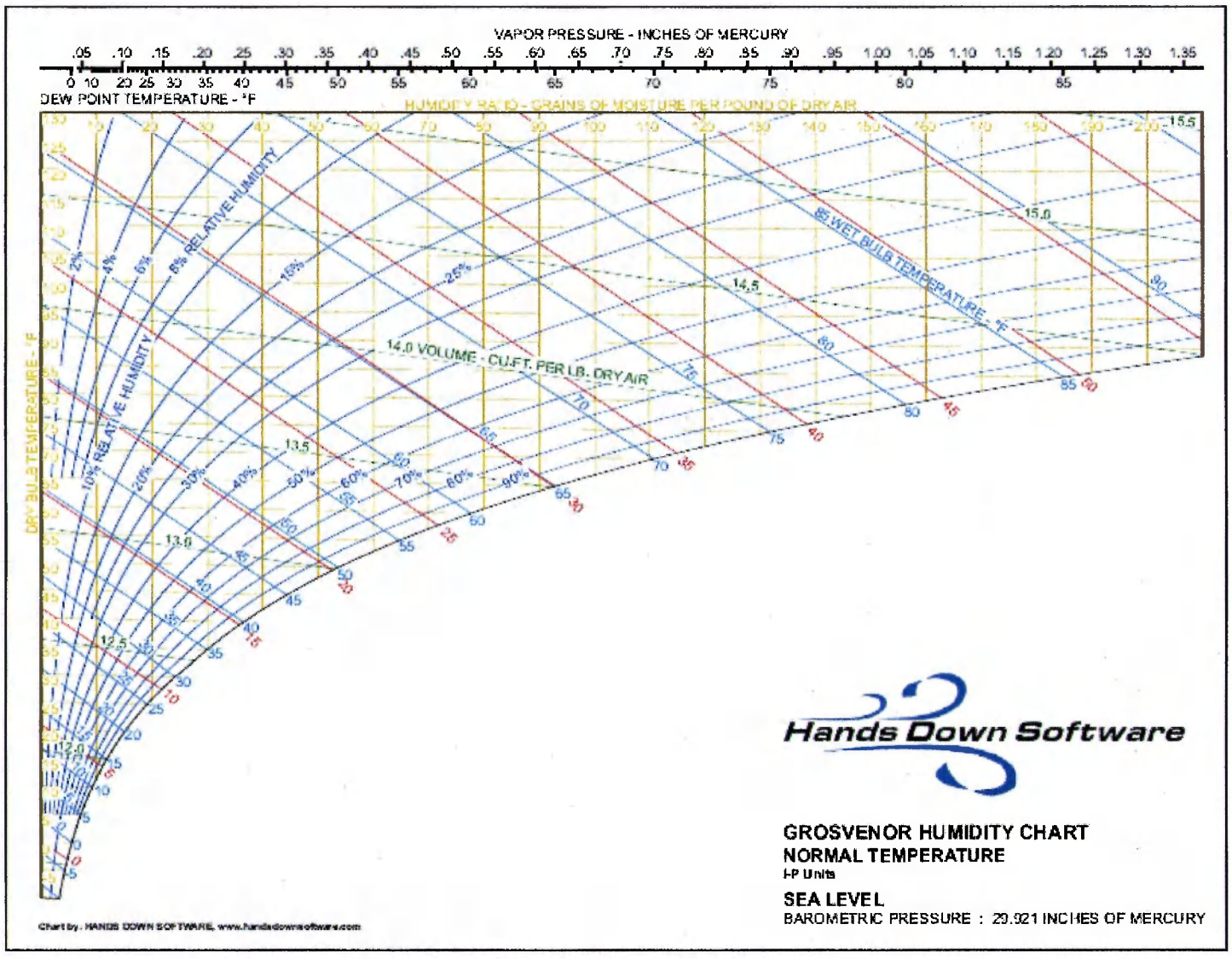


Рис.IX.2. Диаграмма Гросвенора в современной редакции.

ПРИЛОЖЕНИЕ Х

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СТРАН МИРА

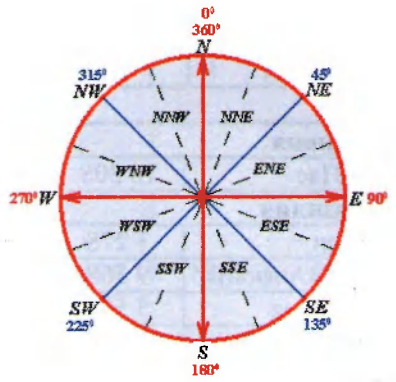


Таблица Х.1. Расчетные параметры наружного воздуха [127, 205].

Страна Географический пункт	Координаты		Высота над уровнем моря, м	Температура, °С			Скорость и направление ветра		
				зима	лето				
	широта, ° ′	долгота, ° ′		t_c	t_c	$t_м$	м/с	зима	лето
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Австралия									
Аделаида	34 56S	138 35E	43	4	34	21	3	NE	NW
Алис-Спрингс	23 48S	133 53E	547	3	39	23	3	N	SE
Брисбен	27 28S	153 02E	42	8	31	24	4	N	NNE
Дарвин	12 28S	130 51E	27	19	34	27	5	E	WNW
Мельбурн	37 49S	144 58E	35	3	33	21			
Перт	31 57S	115 51E	64	6	36	23	3	N	E
Сидней	33 52S	151 12E	42	6	29	23	4	N	NE
Австрия									
Вена	48 15N	16 22 E	196	-12	30	21	7	W	SSE
Азорские острова									
о.Терсейра	38 45N	27 05W	52	9	26	22	5	W	NW
Алжир									
Алжир	36 46N	3 03E	59	7	33	24			
Аргентина									
Буэнос-Айрес	34 35S	58 29W	27	1	32	24	5	SW	NNE
Кордова	31 22S	64 15W	423	0	36	24			
Тукуман	26 50S	65 10W	427	2	37	24			
Афганистан									
Кабул	34 35N	69 12E	1816	-13	36	18	2	N	N
Багамские острова									
Нассау	25 05N	77 21W	3	17	32	27			
Бангладеш									
Читтагонг	22 21N	91 50E	27	12	33	27			
Белиз									
Белиз	17 31N	88 11W	5	17	32	28			
Белоруссия									
Минск	53 54N	27 33E	225	-20	25	19			
Бельгия									
Брюссель	50 48N	4 21E	100	-7	26	20	4	NE	ENE
Бермудские острова									
Гамильтон	33 22N	64 41W	9	13	30	26	8	NW	S
Болгария									
София	42 42N	23 20E	550	-13	30	21			

Продолжение табл.X.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Боливия									
Ла-Пас	16 30S	68 09W	3659	1	21	14			
Бразилия									
Белен	1 27S	48 29W	13	22	32	26	3	SE	E
Белу-Оризонти	9 56S	43 57W	915	10	29	24			
Бразилия	5 52S	47 55W	1049	11	31	24	3	N	E
Куритиба	25 25S	49 17W	949	3	29	23			
Порту-Алегри	30 02S	51 13W	10	4	33	24			
Ресифи	8 04S	34 53W	30	21	31	25	4	S	ESE
Рио-де-Жанейро	22 55S	43 12W	61	16	33	26	3	N	S
Салвадор	13 00S	38 30W	47	20	31	26			
Сан-Паулу	23 33S	46 38W	795	8	29	23	3	N	W
Великобритания									
Белфаст	54 36N	5 58W	7	-3	22	18			
Бирмингем	52 29N	1 56W	163	-3	24	18			
Глазго	55 52N	4 17W	26	-4	22	17			
Кардифф	51 28N	3 10W	62	-3	24	17			
Лондон	51 29N	0 00	45	-3	26	19	4	W	E
Эдинбург	55 55N	3 11W	134	-2	21	17	3	WSW	WSW
Венгрия									
Будапешт	47 31N	19 02E	120	-10	30	22	3	N	S
Венесуэла									
Каракас	10 30N	66 56W	1042	12	28	21	4	E	ENE
Маракайбо	10 39N	71 36W	6	23	36	28			
Вьетнам									
Дананг	16 04N	108 13E	7	17	35	30	3	NW	N
Ханой	21 02N	105 52E	16	12	36	29			
Хошимин (Сайгон)	10 47N	106 42E	9	19	33	29			
Гаити									
Порт-о-Пренс	18 33N	72 20W	37	19	35	27	3	N	ESE
Гана									
Аккра	5 33N	0 12W	27	21	32	26	3	WSW	SW
Гватемала									
Гватемала	14 27N	90 31W	1480	11	28	20	5	N	S
Гвиана									
Джорджтаун	6 50N	58 12W	2	23	31	26			
Германия									
Берлин	52 27N	13 18E	57	-11	27	19	3	E	E
Гамбург	53 33N	9 58E	20	-9	24	19			
Ганновер	52 24N	9 40E	171	-7	26	19	4	E	E
Маннгейм	49 34N	8 28E	109	-12	29	21	3	N	S
Мюнхен	48 09N	11 34E	527	-13	28	19	2	S	N
Гибралтар									
Гибралтар	36 09N	5 22W	3	7	32	24			
Гондурас									
Тегусигальпа	14 06N	87 13W	943	10	31	22	4	N	E
Гренландия									
Нарсарсуак	61 11N	45 25W	26	-22	17	12			
Греция									
Афины	37 58N	23 43E	107	2	34	22	5	N	NNE

Продолжение табл.X.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Салоники	40 37N	22 57E	24	0	34	24			
Грузия									
Тбилиси	41 43N	44 48E	404	-6	29	19			
Дания									
Копенгаген	55 41N	12 33E	13	-7	24	19	6	NE	N
Демократическая Республика Конго									
Киншаса	4 20S	15 18E	325	17	33	27	4	NNW	W
Кисангани	0 26S	25 14E	418	20	33	27			
Доминиканская Республика									
Санто-Доминго	18 29N	69 54W	17	18	32	27	3	NNE	SE
Египет									
Каир	29 52N	31 20E	116	8	38	24	5	N	NNW
Израиль									
Иерусалим	31 47N	35 13E	758	3	34	21	6	W	NW
Тель-Авив	32 06N	34 47E	11	5	34	23	4	N	W
Индия									
Ахмедабад	23 02N	72 35E	50	13	42	26			
Бангалор	12 57N	77 37E	921	14	34	23			
Дели	28 35N	77 12E	214	5	42	28	3	N	NW
Калькутта	22 32N	88 20E	6	12	36	28	2	N	S
Мумбаи (Бомбей)	18 54N	72 49E	11	19	34	27	3	NW	NW
Нагпур	21 09N	79 07E	310	12	42	28	3	N	NW
Ченнаи (Мадрас)	13 04N	80 15E	16	19	39	28	2	W	W
Индонезия									
Джакарта	6 11S	106 50E	8	22	32	26	6	N	N
Купанг	10 10S	123 34E	45	20	34	27			
Макассар	5 08S	119 28E	19	20	32	27			
Медан	3 35N	98 41E	23	22	33	27			
Палембанг	3 00S	104 46E	6	22	33	26			
Сурабайя	7 13S	112 43E	3	20	32	26			
Западный Ириан									
Маноквари	0 52S	134 05E	19	22	31	27			
Иордания									
Амман	31 57N	35 57E	777	2	34	21	3	N	NNW
Ирак									
Багдад	33 20N	44 24E	34	2	44	22	3	WNW	WNW
Мосул	36 19N	43 09E	223	0	44	22			
Иран									
Абадан	30 21N	48 16E	2	5	45	27	3	W	WNW
Мешхед	36 17N	59 36E	946	-10	36	19			
Тегеран	35 41N	51 25E	1220	-4	38	23	3	W	SE
Ирландия									
Дублин	53 22N	6 21W	47	-3	22	18	5	W	SW
Шеннон	52 41N	8 55W	2	-2	23	18	2	SE	W
Исландия									
Рейкьявик	64 08N	21 56E	18	-8	14	12	6	E	E
Испания									
Барселона	41 24N	2 09E	95	2	30	23	5	N	S
Валенсия	39 28N	0 23W	24	3	32	23	4	W	ESE

Продолжение табл.X.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Мадрид	40 25N	3 41W	667	-2	33	21	3	NNE	W
Италия									
Милан	45 27N	9 17E	104	-6	31	24	2	W	SW
Неаполь	40 53N	14 18E	67	2	31	23	3	N	SSW
Рим	41 48N	12 36E	115	-1	33	23	3	E	WSW
Йемен									
Аден	12 50N	45 02E	3	21	38	28			
Казахстан									
Алма-Ата	43 14N	76 53E	775	-21	30	20			
Камбоджа									
Пномпень	11 33N	104 51E	11	20	36	28	2	N	W
Канада									
Альберта									
Калгари	51 06N	114 01W	1079	-31	27	17	8	NNW	SE
Эдмонтон	53 34N	113 31W	676	-31	27	17	9	E	SE
Британская Колумбия									
Ванкувер	49 11N	123 10W	5	-7	25	19	6	E	WNW
Квебек									
Квебек	46 48N	71 23W	75	-26	29	22			
Монреаль	28 73N	45 45W	30	-23	29	23			
Манитоба									
Виннипег	49 54N	97 14W	240	-33	30	23	8	W	S
Новая Шотландия									
Амхерст	45 49N	64 13W	20	-21	27	21			
Галифакс	44 39N	63 34W	25	-15	27	19			
Онтарио									
Оттава	45 19N	75 40W	126	-25	31	23			
Торонто	43 41N	79 38W	176	-25	31	23			
Кения									
Найроби	1 16S	36 48E	1821	10	27	18	7	E	ENE
Китай									
Сянган (Гонконг)	14 06N	87 13W	943	10	31	22	4	N	E
Чунцин	29 33N	106 33E	230	4	36	27			
Шанхай	31 12N	121 26E	7	-3	33	27	3	WNW	S
Колумбия									
Барангуилла	10 59N	74 48W	13	22	34	28			
Богота	4 36N	74 05W	2563	8	21	15	4	E	E
Кали	3 25N	76 30W	972	14	28	21			
Меделлин	6 13N	75 36W	1418	13	29	22			
Конго									
Браззавилль	4 15S	15 15E	318	17	33	27			
Корея									
Пиоингуанг	39 02N	125 41E	57	-16	31	24			
Сеул	37 34N	126 58E	87	-13	32	26	4	NW	W
Кот-д'Ивуар									
Абиджан	5 19N	4 01W	20	21	32	28	3	WSW	SW
Куба									
Гавана	23 08N	82 21W	24	17	33	27	6	N	E
Гуантанамо	19 54N	75 09W	6	19	34	27	3	N	ESE
Либерия									
Монровия	6 18N	10 48W	23	21	32	28	2	E	WSW

Продолжение табл.X.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ливан									
Бейрут	33 54N	35 28E	34	7	33	25	4	N	SW
Ливия									
Бенгази	32 06N	20 04E	25	9	34	24	4	SSE	S
Мадагаскар									
Тананариве	18 55S	47 33E	1382	8	29	22			
Малайзия									
Куала-Лумпур	3 07N	101 42E	39	22	34	28	2	N	W
Пенанг	5 25N	100 19E	5	23	34	27			
Марокко									
Касабланка	33 35N	7 39W	50	6	32	22			
Мартиника									
Фор-де-Франс	14 37N	61 05W	4	19	32	27			
Мексика									
Вера-Круз	19 12N	96 08W	56	17	32	28			
Гвадалахара	20 41N	103 20W	1557	6	33	19	4	N	W
Мерида	20 58N	89 38W	22	16	35	26	6	E	E
Мехико	19 24N	99 12W	2310	4	27	16	4	N	N
Монтеррей	25 40N	100 18W	528	5	35	26			
Мьянма									
Мандалай	21 59N	96 06E	77	13	39	27			
Янгон (Рангун)	16 47N	96 09E	5	17	37	28	3	W	W
Непал									
Катманду	27 42N	85 12E	1338	2	31	25	2	W	NW
Нигерия									
Лагос	6 27N	3 24E	3	22	33	28	4	WSW	S
Нидерланды									
Амстердам	52 23N	4 55E	2	-5	24	18	4	S	E
Никарагуа									
Манагуа	12 10N	86 15W	41	19	34	27	5	E	E
Новая Зеландия									
Веллингтон	41 17S	174 46E	120	3	23	18	3	NE	NNE
Крайстчерч	43 32S	172 37E	10	-1	26	19	2	W	NNW
Окленд	36 51S	174 46E	43	6	25	19			
Норвегия									
Берген	60 24N	5 19E	43	-7	23	19			
Осло	59 56N	10 44E	94	-16	25	19	5	N	S
Пакистан									
Карачи	24 48N	66 59E	4	11	37	28	2	N	SSW
Лахор	31 35N	74 20E	214	3	42	28	2	NW	SE
Пешевар	34 01N	71 35E	355	3	41	27	3	W	NE
Панама									
Панама	8 58N	79 33W	6	23	33	27			
Папуа-Новая Гвинея									
Порт-Морсби	9 29S	147 09E	38	21	33	27			
Парагвай									
Ассунсьон	25 17S	57 30W	139	5	37	27	4	NE	NE
Перу									
Лима	12 05S	77 03W	120	13	29	24	5	N	S
Польша									
Варшава	52 13N	21 02E	120	-13	27	21	4	SE	

Продолжение табл.X.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Краков	50 04N	19 57E	220	-14	27	19			
Португалия									
Лиссабон	38 43N	9 08W	95	4	30	20	3	ENE	N
Пуэрто-Рико									
Сан-Хуан	18 29N	66 07W	25	20	31	27	5	ENE	E
Россия									
Архангельск	64 33N	40 32E	7	-28	22	14			
Владивосток	43 07N	131 55E	29	-22	25	21			
Волгоград	48 42N	44 31E	41	-22	32	21			
Екатеринбург	56 49N	60 38E	273	-29	24	17			
Калининград	54 43N	20 30E	7	-14	27	17			
Красноярск	56 01N	92 57E	152	-33	27	17			
Москва	55 46N	37 40E	154	-21	27	19	6	SW	S
Петропавловск	52 53N	158 42E	87	-18	20	14			
Ростов-на-Дону	47 13N	39 43E	48	-16	31	21			
Самара	53 11N	50 06E	58	-25	29	19			
Санкт-Петербург	59 56N	30 16E	5	-21	24	18			
Румыния									
Бухарест	44 25N	26 06E	82	-13	33	22			
Сальвадор									
Сан-Сальвадор	13 42N	89 13W	682	13	36	24	4	N	S
Саудовская Аравия									
Джидда	21 28N	39 10E	6	16	39	29			
Духан	26 17N	50 09E	24	9	43	29	4	N	N
Эр-Рияд	24 39N	46 42E	591	4	42	25	4	N	N
Сенегал									
Дакар	14 42N	17 29W	40	17	34	27	4	N	NW
Сингапур									
Сингапур	1 18N	103 50E	10	22	33	27	2	N	SE
Сирия									
Дамаск	33 30N	36 20E	720	0	38	22			
Соединенные Штаты Америки									
Айдахо									
Бойсе	43 34N	116 13W	2838	-12	34	19	6	SE	NW
Аляска									
Фэрбенкс	64 49N	147 52W	436	-44	26	17	5	N	S
Аризона									
Финикс	33 26N	112 01W	1112	1	42	24	4	E	W
Вашингтон									
Сиэтл	47 39N	122 18W	20	-3	28	19	7	N	N
Висконсин									
Мадисон	43 08N	89 20W	858	-22	31	24	8	NW	SW
Гавайи									
Гонолулу	21 20N	157 55W	13	17	30	24	12	ENE	ENE
Джорджия									
Атланта	33 39N	84 26W	1010	-6	33	24	11	NW	NW
Иллинойс									
Чикаго	41 47N	87 45W	607	-18	33	24	11	NW	SW
Калифорния									

Продолжение табл.X.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Лос-Анжелес	34 03N	118 14W	270	4	32	22	4	NW	NW
Сакраменто	38 31N	121 30W	17	0	37	22	6	NNW	SW
Сан-Франциско	37 46N	122 26W	72	4	22	17	5	W	W
Кентукки									
Луисвилл	38 11N	85 44W	145	-12	34	25	8	NW	SW
Колорадо									
Денвер	39 45N	104 52W	1610	-17	33	17	8	S	SE
Луизиана									
Лейк-Чарльз	30 07N	93 13W	3	–1	34	26	9	N	SSW
Массачусетс									
Бостон	42 22N	71 02W	5	-13	31	23	16	WNW	SW
Миннесота									
Миннеаполис	44 53N	93 13W	254	-25	32	24	8	NW	S
Миссури									
Канзас-Сити	39 07N	94 35W	241	-14	37	25	9	NW	S
Небраска									
Омаха	41 18N	95 54W	298	-19	33	25	8	NW	S
Нью-Иорк									
Нью-Иорк	40 47N	73 58W	48	-9	32	24			
Нью-Мексико									
Альбукерке	35 03N	106 37W	1619	-9	34	18	7	N	W
Оклахома									
Оклахома-Сити	35 24N	97 36W	392	-11	36	25	14	N	SSW
Орегон									
Портленд	45 32N	122 40W	23	-4	30	19			
Пенсильвания									
Питсбург	40 30N	80 13W	347	-15	30	23	10	WSW	WSW
Филадельфия	39 53N	75 15W	2	-10	32	24	10	WSW	WSW
Теннесси									
Нашвилл	36 07N	86 41W	180	-10	34	25	8	NW	WSW
Техас									
Хьюстон	29 59N	95 22W	33	1	35	26			
Эль-Пасо	31 48N	106 24W	1194	-4	37	20	7	N	S
Юта									
Солт–Лейк-Сити	40 46N	111 58W	1286	-13	35	18	6	SSE	N
Сомали									
Могадишо	2 02N	49 19E	12	21	32	28	8	SSW	E
Судан									
Хартум	15 37N	32 33E	390	13	42	24	3	N	NW
Суринам									
Парамарибо	5 49N	55 09W	4	21	33	28	5	NE	E
Таиланд									
Бангкок	13 44N	100 30E	12	17	35	28	2	N	S
Тайвань									
Тайбэй	25 02N	121 31E	9	8	33	28	4	E	E
Тайнань	22 57N	120 12E	21	9	33	28	5	N	W
Танзания									
Дар-эс-Салам	6 50S	39 18E	14	18	32	27			
Тринидад иТобаго									

Продолжение табл.X.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Порт-оф-Спейн	10 40N	61 31W	20	19	32	27			
Тунис									
Тунис	36 47N	10 12E	66	5	37	24	5	W	E
Турция									
Адана	36 59N	35 18E	25	2	36	26			
Анкара	39 57N	32 53E	861	-11	33	19	4	N	W
Измир	38 26N	27 10E	5	-2	36	23	4	NNE	N
Стамбул	40 58N	28 50E	18	-1	31	23	5	N	NE
Узбекистан									
Ташкент	41 20N	69 18E	478	-13	34	21			
Украина									
Киев	50 27N	30 30E	183	-17	29	20			
Одесса	46 29N	30 44E	65	-13	29	21			
Харьков	50 00N	36 14E	144	-19	29	19			
Уругвай									
Монтевидео	34 51S	56 13W	22	4	31	22	6	N	NNE
Филиппины									
Манила	14 35N	120 59E	14	23	33	27	2	N	ESE
Финляндия									
Хельсинки	60 10N	24 57E	9	-18	23	18	2	E	S
Франция									
Лион	45 42N	4 47E	286	-10	32	21	4	N	S
Марсель	43 18N	5 23E	75	-2	31	22	7	SE	W
Нант	47 15N	1 34E	37	-3	28	21	3	NNE	E
Ница	43 42N	7 16E	123	3	29	22			
Париж	48 49N	2 29E	50	-4	30	20	4	NE	E
Страсбург	48 35N	7 46E	142	-9	28	21			
Чехия									
Прага	50 05N	14 25E	202	-13	29	18			
Чили									
Вальпараисо	33 01S	71 38W	41	8	26	19			
Пунта-Аренас	53 10S	70 54W	8	-3	19	13			
Сантьяго	33 27S	70 42W	520	2	32	21	2	N	SW
Швейцария									
Цюрих	47 23N	8 33E	493	-10	27	19			
Швеция									
Стокгольм	59 21N	18 04E	45	-13	23	17	2	W	S
Шри-Ланка									
Коломбо	6 54N	79 52E	7	21	32	27	3	W	W
Эквадор									
Гуаякиль	2 10S	79 53W	6	18	33	27			
Кито	0 13S	78 32W	2880	4	22	17	2	N	N
Эфиопия									
Аддис-Абеба	9 02N	38 45E	2364	5	28	18	5	E	S
Асмэра	15 17N	38 55E	2326	6	27	18	5	E	WNW
Югославия									
Белград	44 48N	20 28E	138	-11	32	23	5	ESE	SE
Южно-Африканская Республика									
Йоханнесбург	26 11S	78 03E	1666	1	28	21			
Кейптаун	33 56S	18 29E	17	6	32	22			
Претория	25 45S	28 14E	1369	2	31	21	2	N	W

Продолжение табл.X.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Япония									
Саппоро	43 04N	141 21E	17	-15	28	23	2	SE	SE
Токио	35 41N	139 46E	6	-2	32	27	5	SW	S
Фукуока	33 35N	130 27E	7	-1	32	27			

Все наименования стран, штатов, провинций и городов приведены в соответствии с данными справочника: Страны мира / Под общ. ред. И.С. Иванова. - М.: Республика, 1999. - 512 с., а также Политической карты мира. - К.: Картографія, 2000.

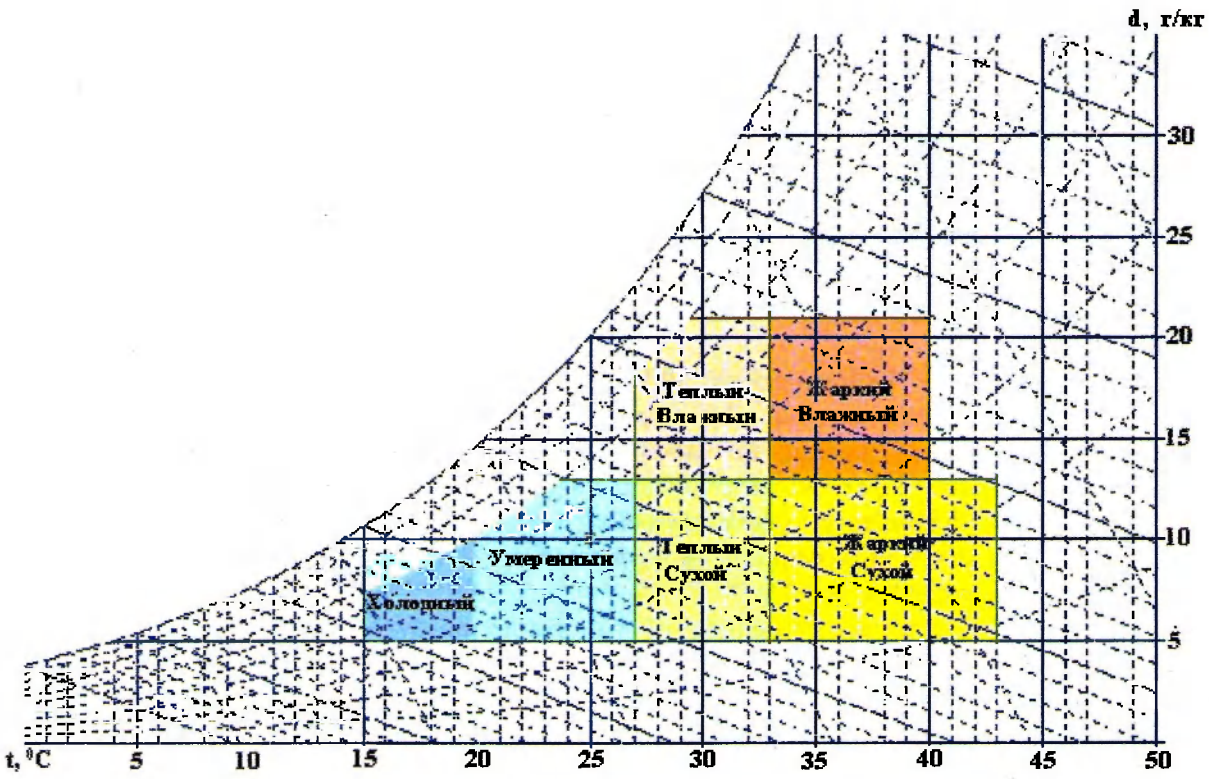


Рис.X.1. Классификация климата в психрометрической диаграмме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. – 568 с.
2. Альмяшева О.В., Гусаров В.В., Лебедев О.А. Поверхностные явления. Учебн. пособие. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Спб., 2004. – 28 с.
3. Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. М.: Химия, 1966. – 294 с.
4. Аристов Ю.И., Гордеева Л.Г., Токарев М.М. и др. Нанокомпозиты « Соль в пористой матрице»: дизайн фазового состава и сорбционных свойств, практические приложения. Тезисы докладов Второй Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО 2007», 13-16 марта 2007, Новосибирск, с. 350.
5. Баркалов Б.В., Карпис Е.Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. – М.: Стройиздат, 1982. – 312 с.
6. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука, 1987. – 159 с.
7. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Издательство иностранной литературы, 1957. – 726 с.
8. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 320 с.
9. Богданов С.Н. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справочник. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.
10. Богословский В.Н., Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла, систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1983. – 320 с.
11. Богословский С.В. Физические свойства газов и жидкостей. Учебное пособие. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Спб., 2001. – 73 с.
12. Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Аэрогидродинамика систем вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1978. – 116 с.
13. Браже Р.А. Восемь лекций по физике атмосферы и гидросферы. Учебное пособие. Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, 2003. – 72 с.
14. Бриганти А. Руководство по техническому обслуживанию холодильных установок и установок для кондиционирования воздуха: Пер. с итал./ Под ред. А.Д. Гальперина – М.: Евроклимат, 2004. – 312 с.
15. Бялый Б.И. Тепломассообменное оборудование воздухообрабатывающих установок ООО «ВЕЗА». – М.: ООО «Инфорт», 2005. – 278 с.
16. Вдовин В., Цветков Л. Системы увлажнения воздуха в производственных помещениях типографий, 6с : *www.avallon.ru/~theimer-m/stat.htm*
17. Виглеб Г. Датчики. – М: Мир, 1989. – 196 с.
18. Вишневский Е.П. К вопросу водоподготовки в системах увлажнения воздуха. С.О.К., №7, 2005, с. 76-87.
19. Вишневский Е.П., Малков Г.В. Вентиляция мостов осушенным воздухом – эффективный метод борьбы с коррозией. С.О.К., № 3, 2006, с. 60-69.
20. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика. Ч.3. Кн.2/ Б.В. Баркалов, Н.Н. Павлов, С.С. Амирджанов и др; Под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера – М.: Стройиздат,1992. – 416 с.
21. Воронец Д., Козич Д. Влажный воздух. Термодинамические свойства и применение. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.
22. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 400 с.
23. Вьет Т. Перспективы развития систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха в Великобритании. – АВОК, 2000, №3.

24. Гоголин А.А. Механические осушители воздуха. Холодильная техника, № 4, 1960, с. 18-22.
25. Гоголин А.А. Осушение воздуха холодильными машинами. – М.: Госторгиздат, 1962. – 102 с.
26. Гоголин А.А., Барулин Н.Я. Кондиционирование воздуха. Обзор зарубежной холодильной техники. – М.: Госторгиздат, 1963. – 127 с.
27. Гордеева Л.Г., Глазиев И.С., Аристов Ю.И. Сорбция воды сульфатами натрия, меди и магния, диспергированными в мезопорах силикагеля и оксида алюминия. Журнал Физической Химии, 2003, т. 77, № 10, с. 1906-1911.
28. Горин А.Н., Дорошенко А.В. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха. Одесса – Донецк, УкрНИИБытМаш, 2006. – 341 с.
29. Гриднев С.А. Электрические кристаллы. Соровский образовательный журнал. № 7, 1996, с. 99 – 104.
30. Дерибере М. Практические применения инфракрасных лучей.–М.-Л.: ГЭИ, 1959.– 440 с.
31. Ефимов А.Л., Косенков В.И., Яковлев И.В. Промышленные и бытовые системы кондиционирования воздуха. – М.: изд. МЭИ, 1999. – 56 с.
32. Загоруйко В.А., Голиков А.А. Судовая холодильная техника. – К.: Наукова думка, 2000. – 607 с.
33. Захаров Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. – СПб.: Судостроение, 1994. – 504 с.
34. Зусманович Л.М., Рыжак Б.Д, Брук М.И. Перспективы применения пневмоакустических форсунок для адиабатического увлажнения воздуха. – в сб. Инженерное оборудование жилых и общественных зданий, вып.1. – М: ЦНИИЭП инженерного оборудования, 1978, 51-60 с.
35. Игнатов В.В. i-t диаграмма влажного воздуха для переменных давлений./ Криогенная техника и кондиционирование. Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана № 430. – М.: 1984, с. 125-130.
36. Изельт П., Арндт У., Вильке М. Увлажнение воздуха. Системы и применение. М.: Техносфера, Евроклимат, 2007. – 216 с.
37. Измерение параметров газообразных и жидких сред при эксплуатации инженерного оборудования зданий: Справочное пособие/ А.А. Поляков, В.А. Канаво, Г.Н. Бобровников и др.; Под ред. А.А. Полякова. – М.: Стройиздат, 1987. – 352 с.
38. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. – М.: Наука, 1987. – 496 с.
39. Карпис Е.Е. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1986. – 268 с.
40. Карпис Е.Е., Карпис В.Е. Тепловлажностная обработка воздуха в СКВ водным раствором хлористого лития. – Холодильная техника, №8, 1996, 12-13 с.
41. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 512 с.
42. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. Пер с англ. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.
43. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 413 с.
44. Коваленко П.П., Орлова Л.Н. Городская климатология. – М.: Стройиздат, 1993. – 144 с.
45. Козелкин В.В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники. М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
46. Кокорин О.Я. Энергосберегающие технологии функционирования систем вентиляции, отопления, кондиционирования воздуха (систем ВОК). – М.: Проспект, 1999. – 206 с.
47. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
48. Кроуфорд А.Э. Ультразвуковая техника. – М.: Изд. Иностранной Литературы, 1958. – 354 с.
49. Крум Д., Робертс Б. Кондиционирование воздуха и вентиляция зданий. – М. Стройиздат, 1980. – 399 с.

50. Кубасов А.А. Цеолиты – кипящие камни. – Соросовский образовательный журнал, № 7, 1998, с.70-76.
51. Ладыженский Р.М. Вентиляция. – Л.-М.: Гос. изд-во строительной литературы, 1940. – 352 с.
52. Ладыженский Р.М. Кондиционирование воздуха. – М.: Пищепромиздат, 1962. – 352 с.
53. Липа А.И., Дорошенко А.В. Кинетические закономерности процессов совместного тепломассопереноса при испарительном охлаждении. – М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1977.- 15 с. – деп. в ВИНИТИ, № 1028-78 Деп.
54. Липа А.И., Подмазко Н.А., Аль-Сагаф М. Анализ современных проблем влажностной обработки воздуха в системах комфортного кондиционирования. Збірник наукових праць 3-ої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (приложение к журналу «Холодильная техника и технология»), Одесса, 2003, с. 51-56.
55. Липа А.И., Сикорская Е.М., Дорошенко А.В. Методы анализа процессов совместного тепломассопереноса при поперечноточном контактировании газа и жидкости. Обзор и развитие. – Одесса: ОТИХП, 1983. -31 с. – деп. В УкрНИИНТИ, № 388- Ук.Д84.
56. Липа.А.И. О кондиционировании воздуха и других терминах. АВОК № 4, 2004, с.40-42. (Про кондиціонування повітря та інші терміни. Холод, №3, 2004, с. 10-12).
57. Лисичкин Г.В. Химическое модифицирование поверхности. – Соросовский образовательный журнал. Химия, 1996, 10 с.
58. Лыгин В.И. Модели «жесткой» и «мягкой» поверхности. Конструирование микроструктуры поверхности кремнеземов. РХЖ (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2002, т. XLVI, № 3, с. 12-18.
59. Маааке В., Эккерт Г.-Ю., Кошпен Ж.-Л. Учебник по холодильной технике (Польманн) : Пер. с франц./ Под ред. В.Б. Сапожникова – М.: издательство МГУ, 1998, 1142 с.
60. Максимов Г.А. Проектирование процессов кондиционирования воздуха.– М.: Высшая школа, 1961. – 97 с.
61. Материалы компании Munters. Испарительный увлажнитель FA6 для систем обработки воздуха. Технические характеристики и методика подбора (материалы компании Munters). 2002. – 29 с.
62. Материалы компании Munters. Регулирование влажности воздуха. Применение методов и оборудования компании в технологических процессах и при хранении продукции и сырья. Том 1. 2002. – 46 с.
63. Маэно Н. Наука о льде. М.: Мир, 1988. – 229 с.
64. Мифы народов мира. Энциклопедия. (В 2 томах). Гл. ред. С.А.Токарев. – М.: Советская Энциклопедия, 1988. – т.2. – 719 с.
65. Наберухин Ю.И. Загадки воды. – Соросовский образовательный журнал. Химия, 1996, № 5, 48 с.
66. Научные школы Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. История развития / Под ред. И.Б. Федорова и К.С. Колесникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. – 424 с.
67. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Ч.1. Теоретические основы создания микроклимата здания: Уч.пос./ Полушкин В.И., Русак О.Н., Бурцев С.И. и др. – СПб: Профессия, 2002. – 176 с.
68. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии.– Л.: Химия, 1987. – 576 с.
69. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей.– М.: Химия, 1979. – 216 с.
70. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы / Под ред. Б. Болина, Б.Р. Дееса, Дж. Ягера, Р. Уоррика. Пер. с англ. – Л.: Гидрометелиздат, 1989. – 557 с.
71. Патент Российской Федерации RU2101423. Способ получения воды из воздуха/ Токарев М.М., Гордеева Л.Г., Аристов Ю.И. и др., 1996.06.06.

72. Патент Российской Федерации RU2169606. Композитный осушитель газов и жидкостей/ Аристов Ю.И. , Гордеева Л.Г., Коротких В.Н., Пармон В.Н., Токарев М.М., 2001.06.27.
73. Потапов В.В. Физико-химические процессы при осаждении кремнезема из гидротермального раствора // Теоретические основы химической технологии, 2004,Т.38, № 1, с.77-85.
74. Проектирование энергоэкономичных общественных зданий / С. Терной, Л. Беркл, К. Роббинс и др.– М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.
75. Прохоров В.И. Системы кондиционирования воздуха с воздушными холодильными машинами. М.: Стройиздат, 1980. – 161 с.
76. Прохоров В.И. Способы приготовления насыщенного воздуха в состоянии тумана.- Вентиляция и кондиционирование воздуха на полиграфических предприятиях. Труды ГипроНИИПолиграфа, вып.5. – М.: Книга, 1974, с.118-130.
77. Радж Балдев, Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. – 576 с.
78. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
79. Рамзин Л.К. Расчет сушилок и 1-d диаграмма. Известия теплотехнического института, № 1 (24), М., 1925-1927.
80. Рощина Т.М. Адсорбционные явления и поверхность.– Соросовский образовательный журнал. Химия, 1998.
81. Рымкевич А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. Санкт-Петербург, АВОК Северо-Запад, 2003. – 271 с.
82. Самойлова Е.А., Головнев Н.Н., Козлова С.А., Кирик С.Д. Функционализированные мезоструктурированные силикаты MCM-41 и SBA-15 и их сорбционные свойства.
83. Северденко В.П., Клубович В.В. Применение ультразвука в промышленности. Минск: Наука и техника, 1967, 264 с.
84. Симонова И.А., Аристов Ю.И. Сорбционные свойства нитрата кальция, диспергированного в силикагеле: влияние размера пор. Журнал Физической Химии, 2005, т. 79, № 8, с. 1477-1481.
85. Слесарев В.И., Шабров А.В., Каргополов А.В. и др. Структурно-информационное свойство воды, 9 с.: *www.aires.spd.ru*
86. Современное оборудование для утилизации тепла и холода в системах кондиционирования воздуха и вентиляции. Динцин В.А., Розенштейн И.Л., Щекин И.Р. Обзорная информация. Вып.2. – М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1981. – 45 с.
87. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха: Учеб. Пособие / Г.В.Нимич, В.А.Михайлов, Е.С.Бондарь. – К.: ТОВ «Видавничий будинок. Аванпост-Прим», 2003. – 630 с.
88. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т.2/ Пер. с англ. Под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
89. Стернзат М.С. Метеорологические приборы и измерения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 392 с.
90. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – Санкт-Петербург: изд-во «АВОК Северо-Запад», ОАО « Техническая книга», 2005. – 399 с.
91. Суорц Кл. Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений: Пер с англ. В 2-х т. Т.1 – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1986. – 400 с.
92. Сыщиков В.И. Сорбционные осушители воздуха (Пособие для проектирования). Л.: Стройиздат, 1969. – 90 с.
93. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2004. – 200 с.
94. Тартаковский И.С. Болезнь легионеров 25 лет спустя. Химия и жизнь – XXI век, 2002.

95. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов и др.; Под общ. ред. Г.Н. Даниловой. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1986. – 303 с.
96. Теплообменные аппараты, приборы автоматизации и испытания холодильных машин/ Под ред. А.В. Быкова. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1984. – 268 с.
97. Техническая термодинамика: Учеб. Для машиностроит. спец. Вузов/ В.И. Кругов, С.И. Исаев, И.А. Кожинов и др.; Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
98. Усольцев В.А. Измерение влажности воздуха. Методы и приборы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1959. – 182 с.
99. Фангер О. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: в поисках совершенства. – АВОК, 2000, № 2.
100. Фенелонов В. Биомиметический синтез – новая стратегия получения неорганических материалов. Еженедельная газета Сибирского отделения Российской академии наук. № 30-31 (2316-2317), 2001.
101. Фитцнер К. Взгляд из Германии на перспективное развитие систем ОВК. – АВОК, 2000, № 3.
102. Хайтер Ш., Торчеллини П., Юдкофф Р. Энергоэффективное здание: оптимизация теплозащиты и систем ОВК. – АВОК, 2000, № 4.
103. Швед Г.М. Циркуляция атмосферы. Статьи Соровского образовательного журнала формате). Науки о Земле, 1997, 4 с.: www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/283.html
104. Штокман Е.А., Шилов В.А., Новгородский Е.Е. и др. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности. – М.: изд. Ассоциации строительных вузов, 2001. – 688 с.
105. Щербаченко Л.А., Карнаков В.А., Марчук С.Д. Исследование поляризации сегнетоэлектриков. Иркутск: ИГУ, 2005. – 13 с.
106. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ. Пособие / Л.Д. Богуславский, В.И. Ливчак, В.П. Титов и др.; Под ред. Л.Д. Богуславского и В.И. Ливчака. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.
107. Янпольский А.Н., Чухман Г.И., Кокорин О.Я., Икингрин И.Н. Ряд терморадиационных увлажнителей для автономных кондиционеров. – В кн.: Проблемы совершенствования и развития оборудования для кондиционирования воздуха и вентиляции. Харьков, ВНИИКондиционер, 1979, с. 100-101.
108. Ярл Салин. Модифицированная диаграмма влажного воздуха. Инженерно-физический журнал (ИФЖ), т.XVI, № 1, 1969, с. 83-94.
109. Ястржембский А.С. Термодинамика и история ее развития. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 666 с.
110. A Guide to the Measurement of Humidity. The Institute of Measurement and Control, London, 1996, 68 p.
111. Abouei Reza. Conservation of Badgirs and Qanats in Yazd, Central Iran. PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006, 6 p.
112. Air - to - Air Energy Recovery. Trane Engineers Newsletter — Vol. 29, No. 5, 8 p.
113. Air Conditioning. Ultrasonic/ENS. Technical Manual 71.1-2, Hamburg, 1997, 71 p.
114. Akio Kodama. Low temperature heat driven Adsorption Desiccant Cooling. TECCs Warwick (UK), 2007, 36 p.
115. Akio Kodama. Low-Temperature Heat Driven Adsorptive Desiccant Cooling Process - Improvement of the Dehumidifying Performance by Removal of Adsorption Heat. Engineering News in Brief. E-mail Newsletter, No. 74, Issued by the Asian TOP Panel, February 2008, 8 p.
116. Akira Endo, Takuji Yamamoto, Takao Ohmori, Masaru Nakaiwa. Humidity control using mesoporous silica as adsorbents of water vapor. Drying 2004 – Proceedings of the 14th

International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 1442-1447.
117. Al-Jaafri A.M. Comparative analysis of vapor compression and hybrid liquid desiccant dehumidification systems. Thesis of the requirements for the degree of Master of Science. University of Florida, 2003, 172 p.
118. Anchaleeporn W. Lothongkum, Virote Boonamnuayvitaya, Srisuda Sae-ung, Benjawan Tonsak, Prapon Thanajindanon, Tippawan Srikraisit, and Wiwut Tanthapanichakoon. Synthesis of inorganic and zeolite-hybrid desiccant by sol-gel method. MaDParT 2005 Proceedings, 2005, 8 p.
119. Anh-Minh Tang, Yu-Jun Cui. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. Can. Geotech. J., vol. 42, 2005, pp. 287-296.
120. Antonio Cesar S. Baptista da Silva, Jose A. Bellini da Cunha Neto, Roberto Lamberts. Spray vaporization for evaporative cooling of buildings. Eighth International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003, pp. 1209-1216.
121. ARISTOTLE. The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation. Ed: J. Barnes. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1984.
122. Aristov Yu.I. New Composite Adsorbents for Conversion and Storage of Low Temperature Heat: Activity in the Boreskov Institute of Catalysis. Journal of the Heat Transfer Society of Japan, 2006, vol. 45, No. 192, pp. 12-19.
123. Aristov Yu.I. Novel Materials for Adsorptive Heat Pumping and Storage Screening and Nanotailoring of Sorption Properties. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2007, vol. 40, No. 13, pp. 1242-1251.
124. Aristov Yu.I. Novel Adsorbent Research: Challenging Offer of Material Science. ZAE Symposium "Material Development for Thermal Energy Storage": Phase Change Materials and Chemical Reactions. June 4-6 2008, Bad Toelz, Germany, 91 p.
125. Aristov Iu.I., Glaznev I.S., Freni A., Dawoud B., Rectuccia G. Kinetics of water sorption on composite adsorbent SWS-1L (calcium chloride confined to mesoporous silica gel). HPC 2004 – 3rd International Conference on Heat Powered Cycles, Cyprus, October 2004, 8 p.
126. Armstrong S., Liaw J. The Fundamentals of Fungi. Ecolibrium™, April 2003, 19 p.
127. ASHRAE (1989). Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
128. ASHRAE-Houston Chapter. The Hot Air Recorder, March 2006, vol. LXI, No. 13, 15 p.
129. Aufklärung statt Panikmache. Grünbeck informierte zum Thema Legionellen. TGA Fachplaner 2, 2004, ss. 22-27.
130. A'zami A. Badgir in traditional Iranian architecture. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp. 1021–1026.
131. Bales C. Chemical and sorption storage – IEA-SHC Task 32 Industry Workshop, Univ. Stuttgart, April 2007, 12 p.
132. Barenbrug A.W.T., Psychrometry and Psychrometric Charts, 3rd Edition, Cape Town, S.H.: Cape and Transvaal Printers Ltd, 1974, 59 p.
133. Barreras F., Amaveda H., Lozano A. Transient high-frequency ultrasonic water atomization. Experiments in Fluids, vol. 33, 2002, pp. 405-413.
134. Baughman A.V., Arens E.A. Indoor humidity and human health: literature review of health effects of humidity-influenced indoor pollutants. ASHRAE Trans., 1996, vol. 102, Pt. I, Papers 3951, 3952.
135. Beck E. Condensation in Plate Heat Exchangers Increases the Efficiency and Pressure Drop, 12 p.: www.hoval.com/docs/Waermerueck_pdf/Condensation_in_PHE. pdf
136. Bhatti M.S. Evolution of Automotive Air Conditioning. Riding in Comfort: Part II. ASHRAE Journal, September 1999, pp. 44-50.

137. Bloomstine M.L., Sorensen O. Prevention of main cable corrosion by dehumidification. COWI A/S, 2006, 13 p.
138. Bonetti J. C., Corvacho H, Brandão Alves F. Cooling buildings in hot humid climates – a decision model for ventilation. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp. 1033–1037.
139. Brohan P., Kennedy J. J., Harris I., Tett S. F. B., Jones P. D. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. Accepted version: December 19th 2005, 35 p.
140. Brooks I. Energy in the Ocean-Atmosphere Climate System. ENVI3410: Lecture 2, 24 p.: www.env.leeds.ac.uk/~ibrooks
141. Built-in Type Ultrasonic Generator Nebulizer Units NB Series. Product Update File. TDK Corporation. PUF-SA 12 EA 2008.10.03, 9 p.
142. Catalog of Meteorological Instruments in the Museum of History and Technology. Prepared by W.E. Knowles Middleton. Smithsonian Institution of Press, Washington, 1969. – 144 p.
143. Claessens S., Van Impe P., T'Joen C., De Paepe M. Heat transfer and friction characteristics of adapted inclined louvered fins. BOF fund (B 05864/01 IV 1), the Ghent University U-Gent, 2006, 8 p.
144. Clements-Croome D.J. Intelligent buildings for the 21-st century. Proceedings of International Symposium (E1, E2, B2) "Air Conditioning in High Rise Buildings ' 2000", Shanghai, China, 2000, pp.32-38.
145. Clifford D. Fundamentals of adsorption for arsenic removal from water. University of Houston, 30 p.
146. Conde M.R. Aqueous solutions of lithium and calcium chlorides:– Property formulations for use in air conditioning equipment design, Zurich – Switzerland, M. CONDE ENGINEERING, 2004, 27 p.
147. Conde M.R. Diagramas de estado e psicrometria do ar húmido. M. CONDE ENGINEERING, 9 p.
148. Conde M.R. Liquid Desiccant-Based Air-Conditioning Systems – LDACS. 1st European Conference on Polygeneration. Tarragona (Spain), 16-17 October 2007, pp. 217-234.
149. Conde M.R. Prototype of an autonomous AHU, with a solid desiccant dehumidifier, Zurich – Switzerland, M. CONDE ENGINEERING, 2002, 14 p.
150. Conde M.R. Thermophysical Properties of Humid Air. Models and Background., Zurich – Switzerland, M. CONDE ENGINEERING, 2007, 24 p.
151. Conde M.R., Weber R. Open absorption system for cooling and air conditioning using membrane contactors. M. CONDE ENGINEERING, 2006, 13 p.
152. Crowder J.W., Richards J.R. Inspection of Gas Control Devices and Selected Industries. Student Manual. APTI Course 455. Third Edition. The University of Texas at Arlington. United States Environmental Protection Agency. February 2003, 185 p.
153. Dairninger Ulr., Lind W. Adsorption process for natural gas treatment. A technology update. Engelhard Corporation, EC-8188, 2004, 24 p.
154. Dapino M.J. On magnetostrictive materials and their use in smart material transducers. Department of Mechanical Engineering of The Ohio University (Columbus, USA), OH 43210-107, 28 p.
155. Dedicated Dehumidification Cycle. APC. Application Note No. 62, 2004, 3 p.
156. Designing with Piezoelectric Tranducers: Nanopositioning Fundamentals. Moving the NanoWorld. PI 1998-2005, 09/2005. – 48 p.
157. Dey R., Cavalie L., Vernet C., Bodennec J., Pernin P. The free-living amoeba Willaertia magna, is particularly resistant to infection by thepathogenic bacteria Legionella pneumophila. Lion-Montpellier, France, 2008, 29 p.
158. Donnelly T.D., Hogan J., Mugler A. , Schubmehl M., Schommer N., Bernoff A.J., Dasnurkar S., Ditmire T. Using ultrasonic atomization to produce an aerosol of micron-Scale particles. Review of scientific instruments, vol.76, No. 113301, 2005, 10 p.

159. Ducreux O., Lavigne C., Nedez C. Air and Gas Drying with Activated Alumina. Axens, Inc., 9 p.
160. ECONET® heating and cooling transfer. Air Handling Units. Planning . Dimensioning. Guide 8024 GB 05.10. Fläkt Woods, October 2005, 19 p.
161. Econovent – PUM. Rotary heat exchanger. Technical handbook. Flakt Woods. 3099 GB 03.02, 29 p.
162. Eicker U. Entwicklungstendenzen solarthermischer Kühiverfahren. HfT Stuttgart, Band 56 – Zweites Symposium "Solares Kühlen in dex Praxis", 2002, 11 s.
163. Electric Duct Heater. Catalog Price Limited. Canada, 2007, 46 p.
164. Erpenbeck T. Sorptionsgestützte solare Klimatisierung. Experimentelle und theoretische Analyse von Potential und Systemverhalten. Dr.-Ing. Dissertation. Am Fachbereich Architektur der Universität Karlsruhe (TH). Sept. 1999, 168 s.
165. Ethylene Glycol. Product Guide. MEGlobal. 2006, 001-00005-1206-CRCG, 33 p.
166. Examples of the use of the SECO Desiccant/enthalpy regenerator. Klingenburg Energy Recovery. 2003, 12 p.
167. Fan H. Modeling a Run-Around Heat and Moisture Recovery System. A Thesis of Master of Science. University of Saskatchewan, Saskatoon, April 2005, 160 p.
168. Feinzig R.H. Commissioning Humidity Control Systems in Critical Environments, EYP Mission Critical Facilities, 15-th National Conference on Building Commissioning, May 2-4, 2007, 35 p.
169. Ferrite Cores. Magnetostriction Vibrators. V2X Series. TDK, 002-01 (e171), 2004, 9 p.
170. Ferrite Cores for ultrasonic oscillator magnetostriction vibrators. V2X Series. TDK, 980317, 2004, 2 p.
171. Fin-Fanner. Hudson Products Corporation, 1999, vol.10, №1, 7 p.
172. Fucks F.J., Puskas W.L. Application of Multiple Frequency Ultrasonics. Blackstone-Ney Ultrasonics, Jamestown USA, June 2005, 9 p.
173. Gatley D.P. Psychrometric chart celebrates 100-th anniversary. ASHRAE Journal, November 2004, p.16-20.
174. Gatley D.P. Grosvenor humidity chart. ASHRAE Journal, October 2008, pp.60-66.
175. Germano Mario. Qualitative modeling of the natural ventilation potential in urban context.These No. 3482 (2006), Lausanne, EPFL, 2006, 177 p.
176. Ghaemmaghami P.S., Mahmoudi M. Wind tower a natural cooling systemin Iranian traditional architecture. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp. 71–76.
177. Ginestet S., Stabat P., Machio D. Control strategies of open cycle desiccant cooling systems mininiizing energy consumption. Ecole des Mines de Paris. 2001, 8 p.
178. Hassanali A., Singer S.J. A model for the water/amorphous silica interface: The undissociated surface. Biophysics Program. Ohio State University, Columbus, 2007, 28 p.
179. Hauge L. The Danish Bridge Heritage, 12 p.: www.iabse.or.kr/iabse_admin/board/FileDownload.aspx?FileName=Hauge.pdf
180. Hayerıttin Y., Hale A. Novel topics in separation processes. Chapter 1. Adsorption. ChE 427, 49 p.
181. Henderson Hugh I., Shirey Don B., Raustad Richard A. Understanding the Dehumidification Performance of Air-Conditioning Equipment at Part-Load Conditions. CIBSE/ASHRAE Conference, Edinburgh, Scotland, 24-26 September 2003, 12 p.
182. Henning H.M. Solar Air-Conditioning and Refrigerstion. TASK 38 of the Solar Heating and Cooling Programme. Melbourne, Australia – May 14, 2007, 135 p.
183. Henning H.M. Solare Klimatisierung – Stand Der Entwicklung. Fraunhofer-Institut fur Solare Energiesysteme, 2005, 22 p.
184. Hirokazu Nakahama. Humidity measurement and psychrometers in environmental testing equipment. Report 2. Special issue: Evaluating Reliability and Humidity Measurement, 1999, No.7, pp.12-18.

185. Hoval Aluminium Plate Heat Exchangers for Heat Recovery in Ventilation Systems. Handbook for Design, Installation and Operation. Art. Nr. 4204784-02- 07/2007, 44 p.
186. Hoval Rotary Heat Exchanger for Heat Recovery in Ventilation Systems. Art.Nr. 4205425 – 02/2006, 32 p.
187. Humidi-MiZer™ Adaptive Dehumidification for Packaged Rooftop Units. Carrier Corporation, 2006, 3 p.
188. Humidity Control Options. Interim Report for ASHRAE 1121-RP/ M.J. Brandemuehl: Civil, Environmental, and Architectural Engineering University of Colorado. December 2000, p. 69.
189. HVAC Systems and Components Handbook / [edited by] Nils R. Grimm, Robert C. Rosaler McGraw-Hill, Inc., 2nd ed., 1998, 908 p.
190. Indoor Air Quality Handbook. A Practical Guide to Indoor Air Quality Investigations, 2003, TSI Incorporated, Shoreview, USA, 30 p.
191. Infrared Emitters for Industrial Processes. Heraeus Noblelight, 2006, 0606 HNG-B 30E, 16 p.
192. Infrared properties of selected materials. Technical Background. Heraeus Noblelight, EA Technology, 1993, 13 p.
193. Jackson A. N., Welch D.E. Industrial Applications of Electric Infrared Heating. Advanced Energy. Raleigh, North Carolina, 1998, 60 p.
194. Jacobi A.M., Park Y., Tafti D., Zhang X. As assessment of the state of the art, and potential design improvements, for flat-tube heat exchangers in air conditioning and refrigeration applications – phase I. Final Report. UNIVERSITY OF ILLINOIS URBANA-CHAMPAIGN. 200I, ARTI-21CR/20020-01, 172 p.
195. Jacobson M.Z. Fundamentals of atmospheric modeling. Cambridge University Press. 2nd Edition, 2008, 812 p.
196. Jua C.X., Dai Y.J., Wu J.Y., Wang R.Z. Use of compound desiccant to develop high performance desiccant cooling system. International Journal of Refrigeration, vol.30, No.2, 2007, pp. 345 – 353.
197. Kakiuchi Hiroyuki. Novel zeolite adsorbents and their applications for AHP and desiccant systems. Mitsubishi Chemical Group Science and Technology Research Center. 2006, 27 p.
198. Kakiuchi Hiroyuki, Iwade Miki, Shimooka Satomi, Ooshima Kazunory, Takewaki Takahiko. Novel zeolite adsorbents and their applications for AHP and desiccant systems. Mitsubishi Chemical Group Science and Technology Research Center. 2007, 6 p.
199. Kanthal Handbook: Appliance Heating Alloys. Catalogue 1-A-2-3 1997, 33 p.
200. Kanthal Handbook: Heating Alloys for Electric Household Appliances. Catalogue 1-A-4-3, 2003, 99 p.
201. Kanthal Handbook: Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces. Catalogue 1-A-5B-3, 2008, 32 p.
202. Kaup C. Hybride Hochieistungs – WRG auf Basis des Kreislaufverbundsystems. Klima/ Luftung, 2004/05, pp.4-11.
203. Kessling W., Peltzer M. Innovate Systems for Solar Air Conditioning of Buildings. Proceedings of the Fourteenth Symposium on improving Building Systems inHot and Humid Climates. Richardson, TX, May 17-20, 2004, ESL-HH-04-05-03, 8 p.
204. Kimura K. Japanese air conditioning experience. IEA Conference on Cooling Buildings in a Warmihg Climate. Sophia Antipolis, France, 20 June 2004, 6 p.
205. Kreider Jan F., Rabl A. Heating and Cooling of Buildings. Design for Efficiency. McGraw-Hill, Inc., International Editions, 1994, 890 p.
206. Laevemann E., Hauer A. Storage of solar thermal energy in a liquid desiccant cooling system. ZAE Bayern, Nice, France, 23 June 2004, 10 p.
207. Laevemann E., Peltzer M., Hublitz A., Kroenauer A., Raab U., Hauer A. Thermochemical storage for air-conditioning using open cycle liquid desiccant technology. Bayern, Ecostock 2006, 20 p.
208. Lang R.J. Ultrasonic atomization of liquids. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, vol.34, No. 1, pp. 6-8.

209. Lawrence M.G. The relationship between relative humidity and the dew point temperature in moist air. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 86, Issue 2, 2005, pp. 225-233.
210. Lazzarin R., Nalim L. Air humidification. Technical, health and energy aspects. CAREL S.p.A., Brugine, 2004, 565 p.
211. Legionella 2003: An Update and Statement by the Association of Water Technologies. 2003, 33 p.
212. Levetin E., Shaghnessy R., Rogers C.F., Scheir R. Effectiveness of Germicidal UV Radiation for Reducing Fungal Contamination within Air-Hanling Units. Applied and Environmental Microbiology, Aug. 2001, vol.67, No.8, pp. 3712-3715.
213. Lewis W.K. The evaporation of a liquid into a gas. Mech. Engineering, vol.44 (7), 1922, pp. 445-446.
214. Ljaljević-Grbić M., Vukojević J., Stupar M. Fungal Colonization of Air-Conditioning Systems. Arch. Biol. Sci., Belgrade, 2008, vol.60, No.2, pp. 201-206.
215. Liebert DS™ Downflow Models Air-Cooled. SL-18810, Emerson Network Power, 2004, 40 p.
216. Lin Chen, Zhen Li. Effect of liquid desiccants properties on dehumidification cycles. Proceedings of the 22-th International Congress of Refrigeration, ICR07-B1-1078, 2007, Beijing, PR China, 8 p.
217. Lindgren Torsten. Cabin Air Quality in commercial Aircraft. Dissertation for the degree of Doctor of Medical Science, Uppsala University, Sweden, 2003, 72 p.
218. Lossow S. Observations of water vapour in the middle atmosphere. Doctoral Thesis, Stockholm University, 2008, 63 p.
219. Lowenstein A., Slayzak S., Ryan J., Pesaran A. Advanced commercial liquid-desiccant technology development study. NREL, 1998, No. BE 803001, 51 p.
220. Lozano A., Amaveda H., Barreras F., Jorda X., Lozano M. High-frequency ultrasonic atomization with pulsed excitation. Journal of Fluids Engineering, November 2003, vol.125, pp. 941-945.
221. Lozza G., Merlo U. An experimental investigation of heat transfer and friction losses of interrupted and wavy fins for fin-and-tube heat exchangers. International Journal of Refrigeration, vol.24, No.5, 2001, pp. 409 – 416.
222. Lüchinger M.B. Synthesis and Functionalization of Mesoporous Silica and its Application as a Support for Immobilized Metal Catalysts. Dissertation ETH Nr. 15847. SWISS Federal Institute of Technology Zurich, 2004, 175 p.
223. Martinsen O.G., Grimnes S., Kongshaug E.S. Dielectric properties of some keratinized tissues. Part 2: Human hair, Medical & Biological Engineering & Computing, 1997, vol. 35, pp. 177-180.
224. Maurellis A., Tennyson J. The climatic effects of water vapour. Physics World, May 2003, 5 p.
225. Mayrbaurl R.M., Goddard H. You Can't Judge a Cabie by its Cover. Modern Steel Construction, September 2007, 3 p.
226. Mazzei P., Minichiello F., Palma D. HVAC dehumidification systems for thermal comfort: a critical review. Applied Thermal Engineering, Elsevier Ltd., 2004, 31 p.
227. MDAire System. Munters Corporation. Dehumidification Division. 2000, SL 1040 REV.0, 4 p.
228. Meitz A. Water treatment for Cooling Towers. Heating/Piping/Air Conditioning, January 1999, pp. 125 - 134.
229. Meteorology Now. Chapter 4. Humidity, Condensation and Clouds, 34 p: www.earthscience.brookscole.com/ahrens/ess4e
230. Mikiya Sato, Shingo Fukayo, Eiji Yano. Adverse Environmental Health Effects of Ultra-Low Relative Humidity Indoor Air. Journal of Occupational Health, 2003, vol.45, pp.133-136.

231. Mingozzi A., Bottiglioni S. An innovative passive system for preventive conservation of the ancient stained glass windows in the Assisi's St. Francis Basilica Superior Church. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp. 191–196.
232. Minkee Choi, Ryong Ryoo. Ordered nanoporous polymer-carbon composites. Nature materials, vol. 2, July 2003, 5 p.
233. Mitsubishi Electric Corporation. Energy Recovery Ventilators. Model RX4 Series. Lossnay. Y04-007 Feb. 2005, 12 p.
234. Mold & Mildew. Chapter 7 by Lew Harriman & Berlin Nelson. Humidity Control Design Guide. ASHRAE, Atlanta, USA, December 2001, 512 p.
235. Mollier R. A new diagram for air/water vapour mixtures, 1923, 11 p. (Translation (by Dr. M. Conde-Petit) of the original (in German) published in Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 67 (36), pp.869-872, 1923).
236. Mollier R. The ix-diagram air/water vapour mixtures, Dresden, 1929, 13 p.
237. Mortiiner B.G.P., Sabah G., Samboer A, Verveckken B. The development of an uitrasonic humidifier for domestic applications. Centre for Instrumentation Research, Cape Technikon: Domestic Use of Electrical Energy Conference, 1999, pp. 138-140.
238. Motta M. Open sorption systems, desiccant air-handling units-market status and new developments. TASK 38. Solar – Conditioning and Refrigeration, April 2007, 17 p.
239. Motta M., Henning H.M., Kallwellis V. Performance analysis of a novel desiccant and evaporative cooling cycle. Paper submitted to HPC 2004 Conference "Heat Powered Cycles", 11th - 13th October 2004, Larnaca, CYPRUS, 8 p.
240. Mould exposure in indoor environment/ by Sonia Marin, Food Technology Dept., Lleida University, Spain, 34 p.
241. Mould – Related Research Trends Related to Building Products and Building Envelopes/ by Donald Onysko. HIP – Workshop, Motreal, Quebec, November 24-25, 2003, 42 p.
242. Nagengast B. 100 Years of the Air Conditioning. ASHRAE Journal, June 2002, pp. 44-46.
243. Nagengast B. Early Twentieth Century Air-Conditioning Engineering. ASHRAE Journal, March 1999, pp. 55-62.
244. Najafabadi R.A., Daneshvar K., Pakseresht S., Pooryousefzadeh S. Role of wind in vernacular architecture of hot and humid region of Iran. Art University of Tabriz, Iran, 2002, 6 p.
245. Nakahara N. Future aspect of HVAC, energy system and BEMS/BOFD in high rise buildings. Proceedings of International Symposium (E1, E2, B2) "Air Conditioning in High Rise Buildings ' 2000", Shanghai, China, 2000, pp. 1- 18.
246. Nakano Y., Ogawa M., Ito M., Asano T., Higo H. Performance analysis of dehumidification utilizing the thermo-sensitive adsorbent in desiccant air conditioning system. Conference ECOS 2005, Trondheim, Norway, 20-23 June 2005, 20 p.
247. Naydenov V. Structured Molecular Sieves. Synthesis, Modification and Characterization. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Sweden, 2003, 67 p.
248. News Letter on Lon-Span Bridges. Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited. No. 30, July 2007, 8 p.
249. News Letter on Lon-Span Bridges. Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited. No. 32, January 2008, 4 p.
250. Nobuo Hamada, Tadao Fujita. Effect of air-conditioner on fungal contamination. Atmospheric Environment, vol. 36, 2002, pp. 5443-5448.
251. Nolard N., Chasseur C., Marlier M., Lognay G. Validation of microbiological and chemical inspections for the workplaces. Programmes PS 50/47 & PS 50/48: Final Report, February 2004, 93 p.
252. Novak P. Air conditioning: principles for appropriate human comfort and new development in refrigeration systems. Proceedings of International IIR conference (E1) "Thermal protection of man under hot and hazardous conditions", Ljubljana, Slovenia, 2001.

253. Orec R., Richards G.N, Cornere B., Dove B., Morris A. Movement of bacteria contaminants is reduced in heated ventilator circuits Respiratory Care (Abstract), 1995, AARC.
254. Ozone Treatment for Prevention of Microbial Growth in Air Conditioning Systems/ by Aakash Khurana. Thesis of M. Sc., University of Florida, USA, 2003, 94 p.
255. Padmavathi V. Climatic architectural tradition of India. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp.1103–1108.
256. Piezoelectric Theory and Applications. Catalog No. 90-1015, 22 p.
257. Piezoelectronic Products. NB Series. Ultrasonic Nebulizer Units. Incorporate Type. TDK (Japan), 2002, 001-01/ef 441, 4 p.
258. POPcool. The efficient air conditioning design for large buildings: minimizer operating cost and optimizer the air. Munters Ltd Dehumidification, UK, Huntington, 2008, 4 p.
259. Precission Spray Nozzles and Accessories. Lechler, 204, 8 p.
260. Pyrtle F. Vibration induced droplet generation from a liquid layer for evaporative cooling in a heat transfer cell. Thesis (Ph.D.). Georgia Institute of Technology, 2005, 116 p.
261. Rabbia M., Dowse G. Energy recovery ventilation. Understanding energy wheels and energy recovery ventilation technology. Carrier Corporation, Syracuse-New York, 2000, 16 p.
262. Ralf W. D. Improving cost per unit and flexibility – optimization concepts for automotive manufacturing. Durr AG. Fisita World Automotive Congress 2006, Yokohama, October 25, 2006, 18 p.
263. Recuperative heat recovery using plate-type heat exchangers. Klingenburg GmbH, 2003, 7 p.
264. Roaf S. Air-conditioning avoidance: lessons from the windcatchers of Iran. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp.1053–1057.
265. Robens E., Dobrowski A. The Measuring Range of Balances. Review Article No.8, 2004, 7 p.
266. Rothwell N.C. Technical information on the principles of Infra Red. Double R Controls Ltd., Heywood, England, 1-st July 2001, 22 p.
267. Rötlich H. Bekämpfung von Legionellen in Wasserkreisläufen in der Trink- und Brauchwasseraufbereitung. VDI Ruhrbezirksverein. Grunbeck, 9 October 2007, 75 s.
268. Samchil Ha. Intelligent HVAC System for Better Environment. 11-th International Refrigeration and Air Conditioning Conf., Purdue University, July 17-20, 2006, 36 p.
269. Samson R.A., Varga J. Aspergillus systematics in the genomic era. Studies in Mycology 59. CBS, Utrecht, 2007, 7 p.
270. Schurmann Ph., Forsyth J., Padrutt R., Heiniger K.C. Spray characterization downstream of the swirl pressure nozzles in gas turbine fogging and high fogging applications. Power-Gen International conference and Exhibition. December 9-11, 2003, Las Vegas, USA, 14 p.
271. Sensors. Humidity Sensors. Humidity Sensors Elements. CHS Series. TDK (Japan), 2004, 001-03/eb 111, 2 p.
272. Sensors. Humidity Sensors. Humidity Sensors Units. CHS Series. TDK (Japan), 2002, 001-01/eb 111, 6 p.
273. Shimooka S., Oshima K., Hidaka H., Takewaki T., Kakiuchi H., Kodama A., Kubota M., Matsuda H. The evalution of direct cooling and heating desiccant device coated with FAM. Journal of Chemical Engineering of Japan, vol.40, No.13, 2007, pp 1330-1334.
274. Shohouhian M., Soflaee F. Environmental sustainable Iranian traditional architecture in hot-humid regions. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp 173–177.
275. Sikorski E., Lipa A.I. Energy pumping concepts to address simultaneously occurring cooling and heating demands in air-conditioned buildings - status quo, comparative analyses and design potentials. Fourth International Conference "Improving Energy Efficiency in Commercial Building" (IEECB'06) - Frankfurt, 26-27 April 2006, 8 p.
276. Slayzak S.J., Ryan J.P. Dessicant Dehumidification Wheel Test Guide. Technical Report NREL/TP. NREL-National Renewable Energy Laboratory (U.S.), Colorado, 2000, 51 p.

277. Soflaee F., Shohouhian M. Natural cooling systems in sustainable traditional architecture of Iran. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp. 715–719.
278. Sonntag D. Important New Values of the Physical Constants of 1986, Vapor Pressure Formulations based on the IST-90 and Psychrometer Formulae. Z. Meteorol., 70 (5), 1990, pp. 340–344.
279. Stamkos J. Microbial Contamination in HVAC Systems. The Hotel Engineer, vol. 8, No.1, 7 p.
280. Stasiulevicius J., Skrinska A. Heat Transfer of Finned Tube Bundles in Crossflow. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., 1987.
281. Stationary Solutions for Air Conditioning and Progress. Testo, 01. 2006, 76 p.
282. Staton J. Ch. Heat and Mass Transfer Characteristics of Desiccant Polymers. Thesis MS., Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 1998, 185 p.
283. Sterling E.M., Arundel A., Sterling T.D. Criteria for human exposure to humidity in occupied buildings. ASHRAE Trans., 1985, vol.91, pp. 611-621.
284. Stiesch G. Performance of rotary enthalpy exchangers. University of Wisconsin-Madison, USA, 1994, 153 p.
285. Takahashi Minori, Fuji Masayoshi. Synthesis and Fabrication of Inorganic Porous Materials: From Nanometer to Millimeter Sizes. KONA, 2002, No 20, pp. 84-97.
286. Takashi Kojima, Hirotsugu Shimizu, Akira Ito. Dehumidification of Air Using Zeolite-Filled Triethylene Glycol Liquid Membranes. Journal of Japan Petroleum Institute, vol. 47, No. 6, 2004, pp. 403-405.
287. Tanaka D., Akita Y., Nakajima Y., Hayashi S. Technology for Improving Indoor Air Quality. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review vol.42, No. 1, 2005, 2 p.
288. Taras M.F. Comparison of Reheat Strategies for Constant Volume Rooftop Units. The Humidi-MiZer™ Adaptive Dehumidification System versus Alternative Methods. Carrier Corporation, NY, March 2008, 11 p.
289. Testing Time for the Forth Road Bridge. Bodycote Testing Group, 2005, 51 p.
290. The Dehumidification Handbook. Second Edition/ by Lewis G. Harriman III, Munters Corporation, 2002, 228 p.
291. The Mist Engineers. Catalog on Pneumatic Spray Nozzles. H. Ikeuchi & Co., Ltd, Osaka, Japan, 2007, 76 p.
292. Todorovic B. Visualization of air conditioning and ventilation processes: the apperiance of humid air diagram a short period at three distant places on a glope. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete island, Greece, pp. 1038-1041.
293. Tokuo Kure, Hideo Hanaoka, Takumi Sugiura, Shinya Nakagawa. Clean-room Technologies for the Mini-environment Age. Hitachi Review , 2007, vol. 56, No. 3, 5 p.
294. Trane Engineers Newsletter: Cooling-Coil Heat Transfer (keystone of system performance) – vol.31, No. 1 (ADM-APN002-EN), 2002, 4 p.
295. Trent R.E. Fundamentals of Adsorption. ZEOCHEM, Louisville (USA), 1992, 28 p.
296. TrueRH™ Series HE-67xx Humidity Element with Temperature Sensor. Product Bulletin of Johnson Controls Inc., 2001, Code No. LIT-216245, 4 p.
297. Ultraviolettstrahlung zur Luftdesinfektion in RLT-Geraten. Howartherm Klimatechnik GMBH, P007-07/03, 12 s.
298. UPS-600 Humidity Sensor. Economical Resistive Element for High Volume Applications. Ohmic Instruments Co., 2005, 4 p.
299. Vaporstream. Electric-to-Steam Humidification System. Product Catalog. DRI-STEEM Corporation, 2008, 32 p.
300. Ventilation, IAQ and Mold/ by Tim McGinn P.Eng., Cohos Evamy Integratedesign, Calgary, Canada, 24 p: www.cohos-evamy.com

301. Vineyard E. Thermally activated technologies overview. ORNL, Distributed Energy Peer Review. December 13-15, 2005, Arlington, Virginia, USA, 26 p.
302. Wai Tak Yinn. Akashi Bridge. Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference. 27 April 2007, Bath, UK, 10 p.
303. Wang S.K., Lavan Z. Air Conditioning and Refrigeration. Mechanical Engineering Handbook. Boka Reton: CRC Press LLC, 1999, 161 p.
304. Welander P., Vincent T. Understand nozzle technology and how to choose the proper nozzle design for your reaction or separation application. Lechter Inc., CEP, June 2001, pp. 75-79, www.aiche.org/cep/
305. Wickler K. Life below the wet bulb: The Maisotsenko cycle. Power, November/December 2003, pp.1-3.
306. Wilson G.B. Air-conditioning: being a short treatise on the humidification, ventilation, cooling, and the hygiene of textile factories-especially with relation to those in the U.S.A. John Wiley & Sons, 1908.
307. Yefeng Liu, Ruzhu Wang. Pore structure of new composite adsorbent $SiO_2 \cdot xH2O \cdot yCaCl_2$ with high uptake of water from air. Science of China (series E), 2003, vol. 46, No. 5, pp. 551-559.
308. Ying Tang, Hai-jun CHEN, Qun CUI *, Xiu-jun CHEN, Hu-qing YAO. Effects of Porous Materials on Adsorption Performance of the Attapulgite-based CaCl2 Composites for Cooling Applications. Proceedings of the 22-th International Congress of Refrigeration, ICR07-B1-1274, 2007, Beijing, PR China, 8 p.
309. Yod Sukamongkol, Supachart Chungpaibulpatana, Bundit Limmeechokchai, Patamaporn Sripadungtham. Development of Simulation Model for Predicting the Performance of a Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Air Heating System for Regenerating Silica Gel in the Air Conditioning Room. The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)", 21-23 November 2006, Bangkok, Thailand, B-039 (O), 6 p.
310. Yujin Sunwoo, Chinmei Chou, Junko Takeshita, Motoko Murakami, Yutaka Tochihara. Physiological and Subjective Responses to Low Relative Humidity. Journal of Physiological Anthropology, 2006, vol. 25 (1), pp.7-14.
311. Zeolite Water Vapor Adsorbent AQSOA. Mitsubishi Plastics, December 2008, 8 p.
312. Zeolite Water Vapor Adsorbent AQSOA. Mitsubishi Plastics, January 2009, 4 p.
313. Zhao X.S., Lu G.Q., Hu X. Organophilicity of MCM-41 adsorbents studied by adsorption and temperature-programmed desorption. Collids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 179, 2001, pp. 261-269.
314. Zhi Chen, Chi Lu. Humidity sensors: A Review of Materials and Mechanisms. Sensor Letters, 2005, vol.3, pp.274-295.
315. Zhuravlev L.T. The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model//Colloids and surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2000, vol.173, pp.1-38.

Послесловие



Открою секрет: чьи книги мне “по вкусу”, памятуя о советах П.Л. Капицы (см. предисловие). Это труды профессоров Романа Марковича Ладыженского, Георгия Алексеевича Максимова, Евгения Васильевича Стефанова, Евсея Ефимовича Карписа, Олега Яновича Кокорина, Вячеслава Николаевича Богословского, Юрия Васильевича Захарова, Василия Анисимовича Загоруйко, а также Анатолия Геннадьевича Сотникова и Юрия Григорьевича Грачева. Работы последних двух ученых рекомендую использовать при изучении дисциплин «Управление процессами и аппаратами СКВ» и «Очистка воздуха».

И, наконец, еще один совет, а точнее, завет Петра Леонидовича Капицы:

> *«Хороший ученый, когда преподает, всегда учится сам. Во-первых, он проверяет свои знания потому, что, только ясно объяснив другому человеку, можешь быть уверен, что сам понимаешь вопрос. Во-вторых, когда ищешь форму ясного описания того или иного вопроса, часто приходят новые идеи. В-третьих, те, часто нелепые, вопросы, которые задают студенты после лекций, исключительно стимулируют мысль и заставляют с совершенно новой точки зрения взглянуть на то явление, к которому подходим всегда стандартно, и это тоже помогает творчески мыслить» [38].*

Поэтому спасибо всем студентам, которые по-своему помогали мне в методическом построении учебного материала, а также моему сыну Александру за помощь в компьютерной верстке.

Тем, кто после прочтения книги утвердился в правильности своего выбора специальности, советую идти дальше, не останавливаться на этом порой тяжелом, но очень увлекательном пути познания. Я, отдаю себе отчет в том, что данную книгу следует рассматривать только как *Начало* и, испытываю удовлетворение от расширения круга лиц, вступивших на этот путь.

Виллис Х. Кэрриер считал, что: *«Развитие кондиционирования воздуха –*
– удел пытливых и острых умов, стремящихся к совершенству».

“Development of air conditioning is the natural outgrowth of busy, intelligent minds aiming towards improvement”



С пожеланием успехов, в том числе получения технологической премии ASHRAE – самой престижной премии в области кондиционирования воздуха...

Алина

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 8

1. ВВЕДЕНИЕ 10

1.1. История вопроса 10
1.2. Требования к специалистам и задачи, стоящие перед ними. Профессиональные объединения 25
1.3. Параметры внешней среды, воздействующей на объекты СКВ 30

2. УЧЕНИЕ О ВОЗДУХЕ 38

2.1. Газовые законы и их применимость для системы влажный воздух 43
2.2. Характеристики влажности воздуха 47
2.2.1. Абсолютная влажность 47
2.2.2. Относительная влажность 47
2.2.3. Плотность 50
2.2.4. Удельная влажность, влагосодержание и парциальное давление 52
2.2.5. Температура точки росы и температура по мокрому термометру 56
2.3. Калорические свойства воздуха. Энтальпия (теплосодержание) и теплоемкость 61
2.4. Некоторые сведения о воде – главном компоненте влажного воздуха и области тумана 64

3. ГИГРОМЕТРИЯ 72

3.1. Принципы и приборы измерения влажности 72
3.1.1 Психрометры 72
3.1.2. Конденсационные гигрометры 79
3.1.3. Механические (волосные) гигрометры 84
3.1.4. Электрические датчики влажности 87
3.1.4.1. Резистивные датчики 87
3.1.4.2. Емкостные датчики 91
3.1.5. Калибровка гигрометров 94
3.2. Страницы истории. Кодекс Да Винчи 97

4. ДИАГРАММЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА 106

4.1. d,h - диаграмма. Построение и расчетная схема определения параметров влажного воздуха 108
4.2. Решение задачи смешения потоков воздуха в d,h – диаграмме 115
4.3. Изображение процессов изменения состояния влажного воздуха в d,h – диаграмме 117

5. ОБРАБОТКА ВОЗДУХА В КОНТАКТНЫХ АППАРАТАХ 123

5.1. Взаимосвязь тепло- и массообмена. Соотношение Льюиса 123
5.2. Основное уравнение кинетики политропических процессов тепломассообмена между воздухом и водой 125
5.3. Дифференциальное уравнение изменения состояния воздуха. Типичные процессы обработки воздуха водой 126
5.4. Изобарно-адиабатический процесс. Температура адиабатического насыщения (теоретический предел охлаждения) 130

6. ОБРАБОТКА ВОЗДУХА В ПОВЕРХНОСТНЫХ АППАРАТАХ 134
6.1. Теплопередача и конструктивные особенности аппаратов 138
6.1.1. Основные типы ребер и их характеристика 139
6.1.2. Компоновка теплообменников 150
6.1.3. Схемы распределения потоков 157
6.1.4. Компоновка кондиционеров. Агрегатированные поверхностные аппараты – фэнкойлы 161
6.1.5. Электрические воздухонагреватели 165
6.1.5.1. Нагревательные элементы. Устройство и материалы 165
6.1.5.2. Особенности аппаратов. Режимные характеристики 172
6.2. Механические осушители 181
6.2.1. Адаптивные циклы осушения 191

7. ОСУШЕНИЕ ВОЗДУХА СОРБЕНТАМИ 194
7.1. Абсорбция влаги. Рабочие вещества, циклы и установки 194
7.2. Адсорбция влаги 210
7.2.1. Физическая картина. Адсорбционные силы 210
7.2.2. Особенности адсорбции паров воды. Водородные связи 213
7.2.3. Кинетика адсорбции 215
7.2.4. Адсорбенты 218
7.2.4.1. Неорганические сорбенты 218
7.2.4.1.1. Алюмогели 218
7.2.4.1.2. Силикагели 220
7.2.4.1.3. Цеолиты 225
7.2.4.2. Органические сорбенты 234
7.2.4.3. Функционализированные сорбенты 237
7.2.4.3.1. Мезоструктурированные мезопористые материалы 237
7.2.4.3.2. Термочувствительные полимеры 243
7.2.4.3.3. Нанокомпозиты 246
7.2.5. Адсорберы 252
7.2.5.1. Установки с переключающимися адсорберами 253
7.2.5.2. Роторно-сорбентные установки 258
7.2.5.2.1. Схемы роторно-сорбентной технологии 272
7.2.5.2.2. Примеры использования 285
7.3. Условия, определяющие выбор способа осушения воздуха 305

8. УВЛАЖНЕНИЕ ВОЗДУХА 312
8.1. Увлажнители-атомайзеры 319
8.1.1. Форсуночные камеры и устройства 320
8.1.1.1. Гидравлические форсунки низкого и среднего давления 325
8.1.1.2. Пневматические форсунки 332
8.1.1.3. Гидравлические форсунки высокого давления 341
8.1.2. Ультразвуковые увлажнители 349
8.1.2.1. Пьзоэлектрические устройства 350
8.1.2.2. Магнитострикционные устройства 369
8.1.3. Механические распылители центробежного типа 373
8.2. Увлажнители испарительного типа 383
8.2.1. Пленочные аппараты 383
8.2.2. Аппараты с капиллярно-пористыми насадками 398
8.2.3. Увлажнители с использованием наноматериалов 401

8.3. Паровые увлажнители 404
8.3.1. Особенности и базовые принципы организации процесса увлажнения воздуха паром 404
8.3.2. Увлажнители, работающие на сетевом паре 413
8.3.3. Автономные пароувлажнители 416
8.3.3.1. Увлажнители с электронагревательными элементами 423
8.3.3.2. Электродные пароувлажнители 426
8.3.3.3. Увлажнители с инфракрасными излучателями 431

9. ИСПАРИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ 444

10. ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА 464

10.1. Синдром «больного здания». Условия и механизм грибкового поражения 466
10.2. Проблема Легионеллы 476

11. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СКВ 489

11.1. Теплоутилизация с помощью поверхностных газожидкостных теплообменников и тепловых труб Twinvent & Heatvent 491
11.1.1. Модульная установка теплоутилизации Econet 500
11.1.2. «Энтальпийный насос» Enthalpy Pump – DOAS System 503
11.2. Теплоутилизаторы на базе пластинчатых рекуператоров Directvent 505
11.2.1. Рекуператоры с гигроскопичными пластинами 518
11.3. Изображение в d,h –диаграмме процессов теплоутилизации в установках кондиционирования воздуха с рекуператорами 520
11.4. Теплоутилизация с помощью роторов-регенераторов Rotorvent 523
11.4.1. Энергосберегающие схемы DEC/ECOS 536

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Схемы и конструктивные особенности кондиционеров 545
II. Влажный воздух. Справочные данные 549
III. Аппроксимация SONNTAG экспериментальной зависимости величины парциального давления насыщенных водяных паров от температуры 552
IV. Диаграммы состояний R729, R718 554
V. Косоугольная d,h -диаграмма Рамзина – Молье 555
VI. Психрометрическая t,d - диаграмма влажного воздуха 559
VII. Свойства абсорбентов:
водных растворов хлоридов кальция, лития и этиленгликоля 563
VIII. Дополнительная информация об адсорбентах (цеолитах, ионитах) 566
IX. Биографические очерки 569
Л.К. Рамзин 569
Р. Молье 571
Ф. Меркель 572
В.Х. Керриер 573
К.Г. Мунтерс 575
О диаграмме Гросвенора 577
X. Климатические данные стран мира 579

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 588

ПОСЛЕСЛОВИЕ 602

ЛИПА Александр Иванович

КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА

Книга издана в авторской редакции

Подписано к печати 02.02.2010 г. Формат 61× 86/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Ризография. Усл. печ. л.79,8. Тираж 500 экз. Зак. № 0125.

Издатель: «Издательство ВМВ»
Украина, 65053, Одесса, пр-т Добровольского, 82а
тел.: (0482) 52-22-33, 54-50-48

Отпечатано в типографии "ice-print.com.ua"
тел.: (048) 735-92-83, (063) 231-92-82
e-mail: info@ice-print.com.ua

По вопросу приобретения книги обращаться
на кафедру кондиционирования воздуха ОГАХ

65082, Одесса, ул. Дворянская, 1/3,
тел. (048) 7264865, 7209108, 7209178.
E-mail: a_i_lipa@yahoo.com

606

Александр Иванович Липа



Награжден знаком «Отличник образования Украины» (2002), медалью имени профессора В.Н. Богословского «За значительные заслуги в развитии отечественной инженерной школы в области ОВК» (2008, АВОК, РФ)



Проректор Одесской государственной академии холода, заведующий кафедрой кондиционирования воздуха, первый вице-президент и один из основателей Всеукраинской ассоциации инженеров по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и инженерной теплофизике «АВОК – Украина», член Президиума Российской ассоциации АВОК, член редакционных коллегий журналов «Монтаж + Технология» и «Холод» (издаются ООО «Форум Инвест», Киев, при поддержке немецкого издательского дома Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG, Stuttgart), действительный член Международной академии холода, кандидат технических наук (1984), старший научный сотрудник по специальности «Машины и аппараты холодильной и криогенной техники и систем кондиционирования» (1986), доцент по кафедре кондиционирования воздуха (1991), автор более 100 научных трудов, научный руководитель ежегодных конференций «Климатизация зданий и сооружений» на международной выставке «Акватерм» (Международный выставочный центр МВЦ, Киев, 2004 - 2010) и «Современные системы климатизации промышленных и гражданских объектов» на отраслевой специализированной выставке «Промхолод» (ВЦ «КиевЭкспоПлаза», 2008 - 2010), а также международной научно-технической конференции «Инновационные технологии XXI века для климатизации и теплоснабжения зданий», проводимой с 2004 г. ассоциациями «АВОК – Украина» и «АВОК» (РФ) в г. Одесса.

ISBN 978-966-413-146-6