

**БИБЛИОТЕКА КЛИМАТЕХНИКА**

# **СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

**с поверхностными  
воздухоохладителями**

**Ю.В. Семенов**



**ТЕХНОСФЕРА**



# БИБЛИОТЕКА климатехника

Ю.В. СЕМЕНОВ

Системы  
кондиционирования  
воздуха  
с поверхностными  
воздухоохладителями

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2014

УДК 628.8  
ББК 38.762  
С30

**С30 Семенов Ю.В.**

**Системы кондиционирования воздуха с поверхностными воздухоохладителями**  
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. — 272 с.: илл. ISBN 978-5-94836-386-8

В книге рассмотрены физические основы, принципы работы и особенности наиболее распространенных в настоящее время систем кондиционирования воздуха — систем с поверхностными воздухоохладителями. Описаны физические свойства и процессы, без знания которых трудно понять, как работают современные системы кондиционирования воздуха. В доступной форме изложены основы холодильной техники.

Рассмотрены основные понятия, связанные с системами кондиционирования воздуха. Изложены основы расчетов поверхностных воздухоохладителей. Приведены практические примеры расчетов. Подробно рассмотрены современные системы комфортного кондиционирования с водяными и хладоновыми поверхностными воздухоохладителями (системы «чиллер-фанкойлы», сплит- и VRF-системы). Изложены рекомендации по подбору оборудования для этих систем.

Книга предназначена для специалистов по проектированию систем кондиционирования воздуха, студентов технических учебных заведений, а также всех желающих ознакомиться с современными системами кондиционирования воздуха. Книга будет полезна также специалистам, занимающимся монтажом и обслуживанием рассматриваемых систем.

**УДК 628.8**  
**ББК 38.762**

Все права на данное издание защищены законодательством РФ, включая право на полное или частичное воспроизведение в любой форме.

Информация, содержащаяся в книге, тщательно проверена. Тем не менее, учитывая возможные человеческие или технические ошибки, автор не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимой в книге информации и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

Все товарные знаки и зарегистрированные товарные знаки, упомянутые в книге, являются собственностью соответствующих компаний. Случайное неправильное упоминание или пропуск товарного знака или названия его законного владельца не должно рассматриваться как нарушение прав собственности.

© 2014, Семенов Ю.В.  
© 2014, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оформление

**ISBN 978-5-94836-386-8**

# Содержание

Предисловие . . . . .	9
Введение . . . . .	10
Условные обозначения . . . . .	15
<b>Глава 1. Физические основы . . . . .</b>	<b>17</b>
1.1. Агрегатные состояния вещества и фазовые переходы . . . . .	17
1.1.1. Испарение . . . . .	18
1.1.2. Кипение . . . . .	24
1.1.3. Конденсация . . . . .	26
1.2. Газообразное состояние вещества . . . . .	27
1.2.1. Давление газа . . . . .	27
1.2.2. Плотность и удельный объем газа. . . . .	29
1.2.3. Закон Авогадро . . . . .	30
1.2.4. Моль и постоянная Авогадро . . . . .	31
1.2.5. Идеальный газ . . . . .	32
Уравнение состояния идеального газа . . . . .	32
Теплоемкость . . . . .	34
Энтальпия . . . . .	35
1.2.6. Основные процессы и законы идеальных газов . . . . .	36
1.2.6.1. Изохорный процесс . . . . .	36
1.2.6.2. Изобарный процесс . . . . .	37
1.2.6.3. Изотермический процесс . . . . .	38
1.2.7. Свойства газовых смесей . . . . .	39
Газовая смесь . . . . .	39
Состав газовой смеси . . . . .	39
Закон Дальтона . . . . .	40
Газовая постоянная смеси . . . . .	40
Молекулярная масса газовой смеси . . . . .	41
Парциальное давление компонентов газовой смеси . . . . .	42
Удельная теплоемкость газовой смеси . . . . .	42
Энтальпия идеальной газовой смеси . . . . .	43
1.3. Влажный воздух . . . . .	43
1.3.1. Что такое влажный воздух. . . . .	43
1.3.2. Сухой воздух . . . . .	44

Состав сухого воздуха . . . . .	44
Газовая постоянная и молекулярная масса сухого воздуха . . . . .	45
Плотность и удельный объем сухого воздуха. . . . .	45
Удельная теплоемкость сухого воздуха . . . . .	45
Энтальпия сухого воздуха . . . . .	46
1.3.3. Водяной пар. . . . .	46
1.3.4. Параметры влажного воздуха . . . . .	47
Влагосодержание . . . . .	47
Давление. . . . .	48
Относительная влажность . . . . .	49
Плотность . . . . .	49
Энтальпия . . . . .	50
1.3.5. i-d-диаграмма влажного воздуха . . . . .	51
Принципы построения . . . . .	51
Некоторые параметры влажного воздуха на i-d-диаграмме . . . . .	54
1.3.6. Температурные параметры влажного воздуха . . . . .	55
Температура по сухому термометру. . . . .	56
Температура точки росы . . . . .	56
Температура по мокрому термометру. . . . .	58
<b>Глава 2. Основы холодильной техники . . . . .</b>	<b>61</b>
2.1. Фазовые переходы хладагента в холодильном контуре . . . . .	63
2.2. Как работает холодильная установка . . . . .	67
2.3. Теоретический холодильный цикл. . . . .	70
2.3.1. Испаритель . . . . .	73
2.3.2. Компрессор . . . . .	73
2.3.3. Конденсатор . . . . .	74
2.3.4. Расширительное устройство . . . . .	75
2.4. Взаимодействие элементов холодильной установки . . . . .	76
2.5. Реальный цикл охлаждения . . . . .	78
2.6. Расширительные устройства . . . . .	81
2.6.1. Капиллярная трубка . . . . .	81
Как работает капиллярная трубка . . . . .	81
Расход хладагента через капиллярную трубку . . . . .	83
Точка баланса компрессора и капиллярной трубки . . . . .	84
Эффект изменения нагрузки . . . . .	85
Особенности холодильных установок с капиллярной трубкой . . . . .	87
2.6.2. Терморегулирующий вентиль . . . . .	90

Как устроен ТРВ . . . . .	91
Принцип работы ТРВ. . . . .	93
Компенсация потерь давления. . . . .	94
Заправка ТРВ . . . . .	95
Сравнение ТРВ с капиллярной трубкой. . . . .	97
2.6.3. Электронный расширительный вентиль . . . . .	98
<b>Глава 3. Кондиционирование воздуха . . . . .</b>	<b>101</b>
3.1. Комфортные условия воздушной среды. . . . .	101
3.1.1. Условия теплового комфорта . . . . .	101
3.1.2. Зона комфорта на i-d-диаграмме . . . . .	103
3.1.3. Газовый состав воздуха . . . . .	104
3.2. Относительная влажность воздуха и тепловой комфорт. . . . .	107
3.2.1. Влияние влажности воздуха на самочувствие и работоспособность человека . . . . .	107
3.2.2. Зоны комфорта на i-d-диаграмме . . . . .	112
3.2.3. Сравнение зарубежных и российских норм . . . . .	113
3.3. Расчетные параметры наружного воздуха . . . . .	115
3.3.1. Параметры Б по СНиП 41-01-2003 . . . . .	116
3.3.2. Параметры Б по СП 60.1330.2012. . . . .	118
3.3.3. Как рассчитать параметры наружного воздуха при повышенных требованиях задания на проектирование . . . . .	123
3.4. Требования к системам кондиционирования . . . . .	125
3.4.1. Структура современной системы кондиционирования . . . . .	125
3.4.2. Требования к системам кондиционирования. . . . .	126
3.5. Процессы обработки воздуха в СКВ. . . . .	131
3.5.1. Нагрев в калорифере . . . . .	132
3.5.2. Увлажнение . . . . .	134
Увлажнение паром . . . . .	134
Увлажнение водой . . . . .	135
3.5.3. Охлаждение в поверхностном воздухоохладителе. . . . .	136
Охлаждение без осушения . . . . .	136
Охлаждение с осушением . . . . .	137
<b>Глава 4. Поверхностные воздухоохладители . . . . .</b>	<b>139</b>
4.1. Что такое поверхностный воздухоохладитель . . . . .	139

4.2. Параметры воздуха и производительность поверхностного воздухоохладителя . . . . .	143
4.3. Расчет требуемой производительности поверхностного воздухоохладителя . . . . .	146
4.3.1. Тепловлажностный баланс помещения . . . . .	146
4.3.2. Расчет требуемой производительности ПВО. . . . .	147
4.4. От чего зависит производительность поверхностного воздухоохладителя . . . . .	150
Температура хладоносителя. . . . .	153
Расход хладоносителя . . . . .	153
Расход воздуха . . . . .	154
Температура и влажность входящего воздуха . . . . .	154
4.5. Формулы для расчета поверхностных воздухоохладителей . . . . .	158
4.5.1. Водяные поверхностные воздухоохладители . . . . .	159
4.5.2. Хладоновые поверхностные воздухоохладители . . . . .	161
4.5.3. Режимы охлаждения влажного воздуха. . . . .	162
Охлаждение воздуха без осушения . . . . .	164
Охлаждение воздуха с осушением . . . . .	165
4.5.4. Обоснование расчетных формул . . . . .	167
4.5.4.1. Водяные ПВО . . . . .	167
4.5.4.2. Хладоновые ПВО . . . . .	171
4.5.5. Примеры расчетов . . . . .	173
<b>Глава 5. Системы с водяными ПВО (чиллер-фанкойлы). . . . .</b>	<b>175</b>
5.1. Что такое система «чиллер-фанкойлы» . . . . .	175
5.1.1. Фанкойлы . . . . .	177
5.1.2. Чиллеры . . . . .	179
5.1.3. Гидромодули (насосные станции). . . . .	182
5.1.3. Центральный кондиционер . . . . .	183
5.2. Как правильно подобрать фанкойл. . . . .	184
5.2.1. Какие данные приведены в каталоге . . . . .	185
5.2.2. Производительность фанкойла: полная, явная, скрытая . . . . .	186
5.2.3. Расход воды через фанкойл . . . . .	187
5.2.4. Факторы, влияющие на производительность. . . . .	188
Скорость вращения вентилятора (расход воздуха) . . . . .	188
Температура воды на входе . . . . .	189
Расход воды через фанкойл . . . . .	191
Температура воздуха на входе . . . . .	192

5.3. Как правильно подобрать чиллер . . . . .	195
5.3.1. Принцип работы и устройство чиллера. . . . .	195
5.3.1.1. Основные элементы чиллера . . . . .	195
Компрессор. . . . .	195
Кожухотрубный испаритель. . . . .	196
Пластинчатый испаритель . . . . .	197
Конденсатор . . . . .	197
5.3.1.2. Особенности отдельных видов чиллеров . . . . .	198
Моноблочный чиллер с воздушным конденсатором . . . . .	198
Чиллер с водяным охлаждением конденсатора . . . . .	200
Чиллер с выносным воздушным конденсатором . . . . .	201
5.3.2. Особенности подбора различных видов чиллеров. . . . .	203
5.3.2.1. Какие данные приведены в каталоге . . . . .	203
5.3.2.2. Моноблочные чиллеры . . . . .	205
5.3.2.3. Чиллеры с водяным охлаждением конденсатора . . . . .	208
Открытая схема . . . . .	208
Закрытая схема. . . . .	211
5.3.2.4. Чиллеры с выносным воздушным конденсатором . . . . .	213
5.4. Системы холодоснабжения с чиллерами . . . . .	215
5.4.1. Минимальный объем системы . . . . .	215
5.4.1.1. Что такое минимальный объем системы. . . . .	215
5.4.1.2. Как работает чиллер. . . . .	216
5.4.1.3. Как рассчитать минимальный объем системы . . . . .	220
5.4.2. Общие рекомендации по применению антифризов . . . . .	222
Этиленгликоль . . . . .	224
Пропиленгликоль . . . . .	225
Влияние концентрации на морозостойкость гликолей . . . . .	226
<b>Глава 6. Системы с хладоновыми ПВО . . . . .</b>	<b>227</b>
6.1. Сплит-система. . . . .	227
6.1.1. На пути к сплит-системе: оконный кондиционер . . . . .	227
6.1.2. Принцип работы и конструкция сплит-системы . . . . .	228
6.1.3. Изменение температур кипения и конденсации в процессе работы сплит-системы . . . . .	231
Влияние температуры внутреннего воздуха на температуру кипения . . . . .	231
Влияние температуры наружного воздуха на температуру конденсации . . . . .	232
6.2. VRF-система. . . . .	233
6.2.1. На пути к VRF-системе: мультисплит-система . . . . .	233
6.2.2. Что такое VRF-система . . . . .	236



6.2.3. Состав VRF-системы . . . . .	238
6.2.3.1. Наружный блок . . . . .	239
6.2.3.2. Внутренний блок . . . . .	239
6.2.3.3. Электронный расширительный вентиль (ЭРВ) . . . . .	239
6.2.3.4. Медные трубопроводы . . . . .	240
6.2.3.5. Разветвители (рефнеты). . . . .	241
6.2.4. Холодильный контур VRF-системы. . . . .	242
Внутренний блок . . . . .	242
Наружный блок . . . . .	242
6.2.5. Отличия VRF- от сплит-системы . . . . .	244
Отличия в компоновке . . . . .	244
Расширительное устройство . . . . .	244
Жидкостной трубопровод . . . . .	245
Управление работой VRF-системы . . . . .	245
Рабочее давление . . . . .	247
Минимальный объем помещения . . . . .	247
6.3. Особенности подбора хладоновых ПВО . . . . .	248
6.3.1. Какие данные приведены в каталоге . . . . .	248
6.4.2. Производительность ПВО: полная, явная, скрытая . . . . .	249
6.4.3. Факторы, влияющие на производительность. . . . .	250
Температура кипения хладагента . . . . .	250
Температура воздуха в помещении . . . . .	252
Температура наружного воздуха . . . . .	258
Расстояние до компрессора (наружного блока). . . . .	262
<b>Литература . . . . .</b>	<b>265</b>

# Предисловие

Цель данной книги — помочь всем желающим в изучении систем кондиционирования воздуха (СКВ) — сложных технических систем, предназначенных для поддержания определенных параметров воздуха в помещениях различного назначения.

Системы кондиционирования воздуха рассматриваются на примере наиболее распространенных в настоящее время систем — СКВ с поверхностными воздухоохладителями, к которым относятся такие системы комфортного кондиционирования, как системы «чиллер-фанкойлы», сплит- и VRF-системы.

В книге подробно рассмотрены наиболее важные с точки зрения автора вопросы проектирования таких систем, начиная с физических основ и принципов работы и заканчивая особенностями подбора оборудования для различных видов СКВ с поверхностными воздухоохладителями.

Подробно рассмотрены многие вопросы, которым в специальной и учебной литературе обычно уделяется недостаточно внимания — в результате иногда встречаются случаи, когда даже выпускники высших учебных заведений по соответствующей специальности не могут самостоятельно не только грамотно спроектировать более или менее сложную СКВ, но и правильно подобрать сам поверхностный воздухоохладитель.

При изложении материала автор старался избегать сложных математических выкладок, далеко уводящих читателя от физической сущности рассматриваемых явлений и принципов работы оборудования. Подробные выводы расчетных формул, присутствующие в книге, приведены для понимания происхождения этих формул, а также сделанных при этом допущений и упрощений.

Автор надеется, что после изучения данной книги читатель будет обладать базовыми знаниями для грамотного проектирования различных типов СКВ с поверхностными воздухоохладителями. Книга будет полезна также специалистам, занимающимся монтажом и обслуживанием рассматриваемых систем, — в ней они найдут ответы на ряд вопросов, связанных с проблемами СКВ, которые были неправильно спроектированы или смонтированы.

При написании книги автор использовал прежде всего собственные разработки, являющиеся результатом многолетней работы в области холодильной техники и кондиционирования воздуха, а также источники информации, перечисленные в списке литературы. Часть информации была получена автором из открытых материалов, выложенных в Интернете. Так как эта разрозненная исходная информация была творчески переработана, систематизирована и обобщена автором, указать корректные ссылки на ее источники не представилось возможным.

# Введение

Без пищи человек может прожить несколько недель, без воды — несколько дней, а без воздуха ... в лучшем случае всего пару минут.

Чтобы убедиться в этом, глубоко вдохните, задержите дыхание и засекайте время до следующего вдоха. Я смог продержаться всего 1 минуту и 17 секунд.

Вся наша жизнь проходит в воздушном океане, который постоянно окружает нас, где бы мы ни находились. На морском побережье и в лесу, в квартире и в офисе, в самолетах и поездах, в автомобилях и вагонах метро — везде нас окружает воздух.

Мы не замечаем, как дышим, но потребляем около двадцати килограммов воздуха в сутки — примерно раз в десять больше, чем воды или пищи.

И если мы обращаем внимание на качество того, что едим и пьем, то должны еще с большим вниманием относиться к качеству воздуха, которым мы дышим.

Особенно важно дышать чистым воздухом детям и пожилым людям, а также тем, кто страдает респираторными заболеваниями, — для них это действительно вопрос здоровья и жизни. Например, ученые доказали, что духота в помещениях, где постоянно находятся дети, непосредственно сказывается на их физическом и умственном развитии.

К сожалению, качество вдыхаемого воздуха оценить мы можем только по запаху: природа не снабдила нас органом чувств для анализа качества вдыхаемого воздуха. Да и не удивительно: на протяжении тысячелетий люди жили на свежем воздухе, и только в начале 20-го века бóльшая часть населения в промышленно развитых странах перебралась в города.

Современный городской житель проводит бóльшую часть своей жизни в закрытых помещениях, и от того, в какой воздушной среде он находится, напрямую зависит не только его работоспособность, но и самочувствие, и, в конце концов, качество и продолжительность жизни.

При этом человек сам является источником загрязнения окружающего его воздуха: выдыхаемый воздух и выделяемый пот делают воздух в закрытом помещении спертым из-за повышения концентрации углекислого газа и водяного пара.

Ситуация усугубляется тем, что фасады домов стали почти герметичными: современные стеклопакеты практически не пропускают свежий воздух, а в интерьерах применяется большое количество синтетических материалов, являющихся дополнительными источниками загрязнения внутреннего воздуха.

Поэтому в современных «герметичных» зданиях воздух должен подаваться и удаляться системами принудительной вентиляции.

Но для длительного пребывания в закрытых помещениях необходим не только свежий и чистый воздух, важно также, чтобы внутренняя среда помещения была комфортной для нас: чтобы нам было тепло, отсутствовала духота и сквозняки.

Состояние внутренней среды помещения, оказывающее влияние на человека, называется микроклиматом помещения.

Микроклимат помещения характеризуется параметрами воздушной среды (температурой, влажностью и подвижностью воздуха) и температурой ограждающих конструкций (стен, пола, потолка, окон).

Именно сочетание этих параметров и определяет, комфортно ли будет нам в этом помещении.

На микроклимат помещения воздействуют как внешние (солнечная радиация, наружный воздух и т.д.), так и внутренние факторы (люди, оборудование, освещение), в результате чего параметры микроклимата могут отклоняться от комфортных для нас значений.

Для того чтобы создавать и поддерживать в помещениях комфортные параметры воздушной среды, применяются системы кондиционирования воздуха.

Система кондиционирования воздуха (СКВ) — это сложная техническая система, предназначенная для автоматического поддержания комфортных параметров воздушной среды (прежде всего температуры и относительной влажности воздуха) в обслуживаемом помещении.

Совместно с системой вентиляции, обеспечивающей подачу в помещение свежего и удаление загрязненного воздуха, СКВ обеспечивает сохранение здоровья человека при длительном пребывании в закрытых помещениях.

В рабочих помещениях, оборудованных правильно спроектированными и смонтированными СКВ, люди на протяжении всего рабочего дня сохраняют высокую работоспособность и при этом меньше устают. В жилых кондиционируемых помещениях люди быстрее восстанавливают свои силы и лучше высыпаются. А в торговых и развлекательных комплексах, оборудованных системами кондиционирования, люди с удовольствием проводят больше времени.

В России СКВ работают преимущественно летом, когда температура и влажностное содержание наружного воздуха достаточно высоки и подача необработанного наружного воздуха в помещения с помощью системы вентиляции быстро приведет к возрастанию температуры и влажности внутреннего воздуха.

Поэтому для обеспечения теплового комфорта человека в летний период система кондиционирования должна поддерживать не только комфортную температуру воздуха в помещении, но и комфортную относительную влажность воздуха.

Поступающие снаружи и выделяющиеся в помещении тепло и влага являются нагрузками, действующими на СКВ. Эти нагрузки могут быть разделены на явные (вызывающие повышение температуры воздуха в помещении) и скрытые (вызывающие повышение влажности воздуха).

Исследования, проведенные в США, показали, что в современных зданиях изменилось соотношение скрытых и явных нагрузок на СКВ [3.19]. Это вызвано тем, что меры по повышению энергоэффективности зданий (улучшение теплоизоляции, повышение качества светопрозрачных конструкций, светодиодное освещение и т.д.) привели к уменьшению явных нагрузок, в то время как поступления влаги (от людей и приточного воздуха) остались практически неизменными.

Поэтому в современных системах кондиционирования воздуха должно присутствовать оборудование, способное эффективно компенсировать эти поступления влаги. Это означает, что система кондиционирования должна иметь оборудование не только для охлаждения, но и для осушения (уменьшения влажности) воздуха. По данным [3.8], в Германии системы кондиционирования для охлаждения воздуха используются не более 30 дней в году, а для осушения воздуха — около 100 дней в году, и именно благодаря этой функции создают комфортные условия в обслуживаемых помещениях.

Процесс одновременного охлаждения и осушения воздуха реализуется в поверхностных воздухоохладителях, в которых теплообмен между охлаждающей средой и воздухом осуществляется через разделительную перегородку (стенку), то есть без непосредственного контакта.

Воздух, контактируя с холодной теплообменной поверхностью, охлаждается и одновременно осушается за счет конденсации на теплообменной поверхности влаги, содержащейся в воздухе.

В современных поверхностных воздухоохладителях (ПВО) охлаждающая среда циркулирует внутри трубок, которые омываются в поперечном направлении потоком охлаждаемого воздуха.

Поверхностные воздухоохладители широко применяются в качестве секций охлаждения в составе центральных кондиционеров, обрабатывающих и подающих наружный воздух в помещения. Но наибольшее распространение поверхностные воздухоохладители получили в качестве местных кондиционеров, обеспечивающих комфортные параметры воздуха непосредственно в обслуживаемых помещениях.

Это прежде всего фанкойлы — местные кондиционеры, работающие на холодной воде, поступающей от специальных холодильных установок — чиллеров, а также внутренние блоки сплит- и VRF-систем, работающие на современных хладагентах (хладонах).

На рынке климатического оборудования России присутствуют десятки известных производителей как таких воздухоохладителей, так и СКВ на их основе.

Такие СКВ собираются из отдельных блоков (фанкойлов и чиллеров, внутренних и наружных блоков сплит- и VRF-систем), характеристики которых определены при некоторых «стандартных» условиях (температуре и относительной влажности воздуха, температуре охлаждающей среды и т.д.).

Задача инженера, создающего СКВ на базе готовых блоков, на первый взгляд кажется простой: подобрать соответствующие блоки и соединить их трубопроводами, по которым циркулирует охлаждающая среда.

Но это не совсем так.

Поскольку характеристики блоков определены производителем при условиях, которые отличаются от реальных условий эксплуатации, необходим пересчет характеристик блоков на эти новые условия, что не всегда можно правильно сделать не только с помощью сопроводительной документации, но и с использованием компьютерных программ для подбора оборудования.

Рекламная информация обращает внимание читателя прежде всего на отличительные особенности продукции данного производителя, а техническая документация раскрывает характеристики и методики подбора конкретного оборудования, часто только для «стандартных» условий конкретного производителя или ограниченного набора параметров.

При подборе оборудования по компьютерным программам необходимо вводить корректные исходные данные, соответствующие реальным условиям эксплуатации подбираемого оборудования, а также проверять предварительно заданные в программе значения некоторых «неактивных» параметров.

Чтобы в конце концов не получить на объекте бесполезный «кусочек железа», не обеспечивающий требуемые технические характеристики, а иногда и вовсе отказывающийся работать при расчетных условиях, необходимо иметь ясное представление о том, как влияют основные входные параметры на технические характеристики блоков, из которых состоит СКВ.

А это возможно только при хорошем понимании физических процессов, происходящих в соответствующем оборудовании.

Таким образом, при разработке технических решений современных СКВ первостепенное значение приобретает знание принципов работы ее элементов (блоков) и физических процессов, лежащих в их основе.

Это относится как непосредственно к процессам обработки влажного воздуха, так и к процессам, происходящим по другую сторону — в контуре охлаждающей среды. Именно циркулирующая между блоками охлаждающая среда и объединяет отдельные блоки в систему, перенося энергию между ними.

И от того, правильно ли подобраны блоки, автоматика и арматура, как рассчитаны трубопроводы охлаждающей среды, полностью зависит, обеспечит ли система требуемые (проектные) технические характеристики или нет.

В предлагаемой Вашему вниманию книге рассмотрены наиболее важные с точки зрения автора вопросы создания СКВ с поверхностными воздухоохладителями, начиная с физических основ и принципов работы и заканчивая особенностями подбора оборудования для различных видов СКВ.

Книга состоит из шести глав.

В главе 1, написанной по материалам [1.1–1.4], рассмотрены физические основы, без знания которых трудно понять, как работают СКВ. Здесь мы не только кратко повторяем курс элементарной физики, который большинство из нас уже основательно подзабыло, но и рассматриваем некоторые специальные вопросы, выходящие за его рамки. Если Вы уверены в своих знаниях, эту главу можно пропустить.

Глава 2 посвящена холодильной технике — области знаний, лежащей в основе создания как холодильных установок, так и современных систем кондиционирования воздуха. Мы рассмотрим, из чего состоит и как работает парокомпрессионная холодильная установка, познакомимся с теоретическим и реальным холодильным циклом и основными типами расширительных устройств, от которых в немалой степени зависит правильная работа холодильной установки и кондиционера.

В главе 3 рассмотрены основные понятия, связанные с системами кондиционирования воздуха: комфортные условия воздушной среды, расчетные параметры наружного воздуха, требования к современным системам кондиционирования, основные процессы обработки влажного воздуха.

Глава 4 посвящена непосредственно поверхностным воздухоохладителям: принципам работы, конструкции и расчетам. Мы научимся рассчитывать требуемую производительность и параметры воздуха на выходе из воздухоохладителя и изучим влияние различных факторов на производительность ПВО.

В главе 5 рассматриваются традиционные системы с водяными ПВО — системы «чиллер-фанкойлы». Мы познакомимся с принципами работы и устройством чиллеров и фанкойлов и узнаем, как правильно их подбирать.

Завершает книгу глава 6, в которой рассматриваются вопросы, связанные с принципами работы и подбором оборудования для СКВ с хладоновыми ПВО — сплит- и VRF-систем.

Изложенная в книге информация является прочной основой для дальнейшего углубленного изучения конкретных вопросов, связанных с разработкой и эксплуатацией различных видов СКВ с поверхностными воздухоохладителями.

# Глава 1

## Физические основы

### 1.1. Агрегатные состояния вещества и фазовые переходы

В зависимости от соотношения давления и температуры любое вещество может находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях.

Одним из немногих веществ в природе, которое мы можем наблюдать во всех трех агрегатных состояниях, является обыкновенная вода.

Агрегатные состояния воды — лед (твердое), вода (жидкое) и пар (газообразное) — хорошо знакомы нам с раннего детства.

При некоторых соотношениях температуры и давления вещество может одновременно находиться в двух, а иногда и в трех состояниях.

Например, вода может быть *гомогенной* системой (лед, вода, пар) и *гетерогенной* системой (вода–лед, пар–вода, пар–лед, пар – вода – лед).

Гомогенная часть гетерогенной системы, отделенная от других частей системы поверхностями раздела, называется *фазой*. Физические свойства вещества одинаковы во всех точках одной фазы и резко меняются на границах раздела.

*Фазовым переходом* называется процесс, в котором происходит изменение агрегатного состояния вещества. Переход вещества из одной фазы в другую происходит через поверхность раздела фаз и сопровождается затратой теплоты и изменением объема.

Переход вещества из твердого состояния в жидкое называется плавлением, из твердого в газообразное — сублимацией, из жидкого в газообразное — парообразованием. Обратные процессы соответственно называют затвердеванием, десублимацией и конденсацией.

Процесс парообразования может происходить в виде *испарения* и *кипения*.

Испарением называется процесс парообразования, который происходит только с поверхности жидкости. Кипение — процесс превращения жидкости в пар, который происходит не только с поверхности жидкости, но и внутри нее, то есть это процесс парообразования по всему объему жидкости.

Газообразная фаза вещества в зависимости от температуры и давления может быть в виде *сухого насыщенного*, *перегретого* и *влажного насыщенного* пара.

Сухой насыщенный пар — это пар, не содержащий частиц жидкой фазы и находящийся в равновесном состоянии с жидкостью на границе раздела фаз.

Если к сухому насыщенному пару подводить теплоту, то его температура будет возрастать и пар становится перегретым. Разность между температурой перегрето-



го пара и температурой сухого насыщенного пара называется степень перегрева.

Перегретый пар является ненасыщенным. При данном давлении его плотность меньше плотности сухого ненасыщенного пара.

Влажный насыщенный пар является двухфазной системой, находящейся в равновесии (например водяной пар и вода при атмосферном давлении).

Гомогенная или гетерогенная система описывается рядом переменных — физических величин, характеризующих ее свойства. Например, для описания газообразной фазы вещества используются такие переменные, как объем и давление.

Переменные, характеризующие устойчивое состояние системы, называются *параметрами состояния*. Различают *экстенсивные* и *интенсивные* параметры состояния.

Экстенсивные параметры состояния определяют размер рассматриваемой системы. К таким параметрам относится объем и масса вещества. Интенсивные параметры состояния не зависят от размеров системы и остаются одинаковыми во всех частях гомогенной системы (фазы). К таким параметрам относятся, например, давление  $p$  и температура  $T$ .

Вместо экстенсивных параметров часто используют *удельные* параметры состояния, которые ведут себя как интенсивные параметры. Такие параметры относятся к единице массы или объема вещества.

Так, удельный объем  $v$  получается путем деления объема системы  $V$  на ее массу  $M$ :

$$v = \frac{V}{M},$$

а плотность — путем деления массы системы  $M$  на ее объем  $V$ :

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{1}{v}.$$

Так как системы кондиционирования воздуха имеют дела с воздухом, который является смесью нескольких веществ, находящихся в газообразном или парообразном состоянии, наибольший интерес для нас представляют процессы изменения агрегатного состояния вещества, связанные с переходами из жидкого состояния в парообразное (газообразное) и обратно. Такими процессами являются процессы испарения, кипения и конденсации.

### 1.1.1. Испарение

Процесс испарения происходит при любых температурах. Наиболее наглядно процесс испарения можно наблюдать на примере воды, так как этот процесс постоянно происходит вокруг нас в природе. Водяной пар образуется не только на

огромных водных пространствах поверхности Земли, но и на суше: вода непрерывно испаряется с поверхности почвы, с листьев растений, с кожи и из легких и т.д.

Механизм процесса поверхностного испарения жидкости при температурах ниже точки кипения согласно кинетической теории следующий [1.1, 1.2].

Вследствие беспорядочного теплового движения молекул жидкости скорости их в очень широких пределах отклоняются от среднего значения. Часть поверхностных молекул, обладающих кинетической энергией, достаточной для преодоления сил сцепления, вырывается в расположенную над поверхностью жидкости газовую среду.

Вследствие столкновений этих молекул между собой и с молекулами газа они частично отражаются обратно к поверхности жидкости, где вновь отражаются от нее или же поглощаются жидкостью. Часть вырвавшихся или отраженных от поверхности жидкости молекул проникает в газовую среду и уже безвозвратно теряется жидкостью.

Жидкость теряет при испарении наиболее быстро движущиеся молекулы, вследствие чего средняя кинетическая энергия оставшихся молекул уменьшается или, иначе говоря, *температура жидкости становится ниже*. Избыточную энергию вырвавшихся молекул, затрачиваемую на преодоление сил сцепления и работу увеличения объема при испарении, называют *теплотой испарения*.

Количество испарившейся жидкости представляет собой, таким образом, разность между количеством молекул жидкости, оторвавшихся от ее поверхности вследствие теплового движения, и количеством молекул, вновь поглощенных жидкостью при ударах о ее поверхность.

Если вылетает больше молекул, чем возвращается обратно, жидкость испаряется. Если, наоборот, молекулы в большем числе возвращаются в жидкость, чем вылетают из жидкости, происходит конденсация пара.

Если же число вылетающих из жидкости молекул равно (в среднем) числу возвращающихся, получается *динамическое равновесие* пара и жидкости.

Для испарения жидкости нужно, чтобы образующийся пар удалялся (например лужи после дождя при ветре сохнут быстрее, чем при той же температуре в безветрие).

Если пар совсем не удалять, например закупорить пробкой бутылку с легкоиспаряющейся жидкостью, то испарение быстро прекратится. Так как при этом ни жидкость не превращается в пар, ни пар не конденсируется в жидкость, то говорят, что пар и жидкость находятся в динамическом равновесии.

Пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью, называют *насыщенным паром*.

Если в закрытом сосуде при постоянной температуре находятся только жидкость и ее насыщенный пар, то динамическое равновесие между жидкостью и паром поддерживается независимо от количества (уровня) жидкости в сосуде: пока в сосуде есть хоть капля жидкости, давление и плотность насыщенного пара будут постоянными.

Присматриваясь к явлениям испарения, можно заметить, что при одной и той же температуре разные жидкости испаряются по-разному: бензин и подобные ему «летучие» жидкости испаряются быстро, вода — несколько медленнее, а масло испаряется настолько медленно, что это испарение без точных измерений незаметно. *Все жидкости без исключения испаряются.*

Скорость испарения жидкости зависит от сил сцепления молекул — чем больше силы сцепления, тем сложнее вылететь молекуле из жидкости и тем меньше молекул находится в насыщенном паре жидкости. А так как количество молекул в единице объема определяет плотность и давление насыщенного пара, то чем больше силы сцепления, тем меньше плотность и давление насыщенного пара.

Так как силы сцепления молекул определяют также поверхностное натяжение жидкости, то *чем больше поверхностное натяжение, тем менее летуча жидкость* и тем меньше давление насыщенного пара. Следовательно, при одной и той же температуре различные жидкости имеют различную плотность и давление насыщенного пара.

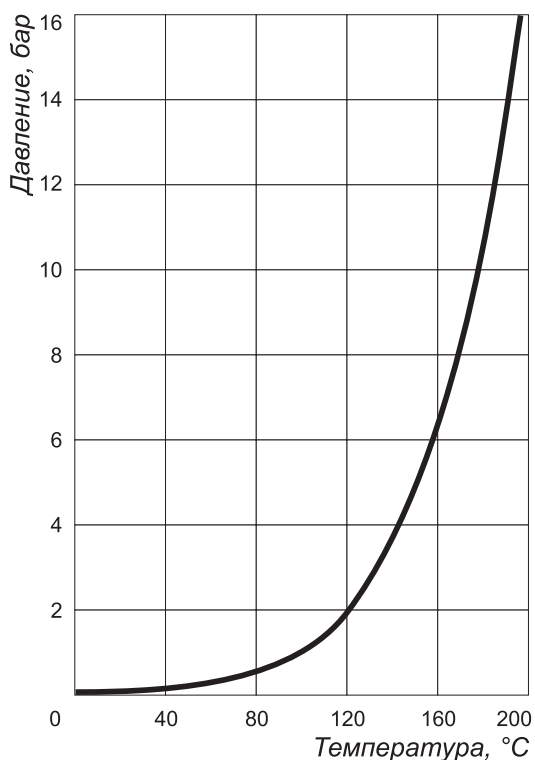
Итак, *плотность и давление насыщенного пара при неизменной температуре являются постоянными величинами, у разных жидкостей — разными.*

Если температура жидкости увеличивается, то возрастает количество молекул, обладающей скоростью, достаточной для того, чтобы преодолеть силы сцепления и вырваться за пределы жидкости. Поэтому при повышении температуры вместе с увеличением скорости испарения жидкости увеличивается и давление насыщенного пара.

На рис. 1.1 приведен график зависимости давления насыщенного пара воды от температуры (кривая насыщения) [1.2].

Из графика видно, что зависимость давления от температуры нелинейная, то есть приращение давления, соответствующее увеличению температуры на 1 К, растет с температурой. В этом заключается отличие насыщенного пара от газов, давление которых при нагревании на 1 К одинаково увеличивается и при низких, и при высоких температурах (на  $1/273$  давления при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , см. раздел 1.2.6).

Это отличие объясняется тем, что при нагревании газов при постоянном объеме меняется только скорость молекул. При нагревании же системы жидкость-пар меняется не только скорость молекул, но и их число в единице объема, т. е. при



**Рис. 1.1.** Зависимость давления насыщенного пара воды от температуры

большой температуре мы имеем пар большей плотности.

При испарении в газовую среду (например воды с открытой поверхности водоема в воздух) скорость удаления молекул пара от поверхности в результате диффузии и конвекции ничтожно мала по сравнению со скоростью испускания молекул жидкостью. Поэтому в слое, непосредственно прилегающем к поверхности жидкости, происходит быстрое накопление молекул пара, прекращающееся, когда парциальное давление пара в этом слое достигает значения, при котором устанавливается равенство между количеством молекул, покидающих поверхность жидкости и поглощенных жидкостью.

Строго говоря, при испарении давление пара над поверхностью жидкости несколько ниже давления насыщения, соответствующего температуре этой поверхности, практически этим отличием можно пренебречь, считая, что пар у поверхности жидкости является *насыщенным*.

Считается, что количество молекул пара, удаляющихся от поверхности испарения, пропорционально разности парциальных давлений насыщенного пара у поверхности жидкости  $P_{\text{н}}$  и парциального давления пара  $P_{\text{п}}$  в окружающей среде на достаточном удалении от поверхности.

Поэтому поверхностное испарение жидкости происходит при  $P_{\text{н}} > P_{\text{п}}$  независимо от того, выше или ниже температура жидкости, чем температура газа, омывающего ее поверхность. При этом *испарение жидкости всегда связано с ее охлаждением*.

Если некоторое количество жидкости поместить в закрытый сосуд, то часть жидкости испарится и над жидкостью будет находиться насыщенный пар. Давление, а следовательно, и плотность этого пара зависят от температуры. Плотность пара обычно значительно меньше плотности жидкости при той же температуре.

Если повысить температуру, то плотность жидкости уменьшится, давление же и плотность насыщенного пара возрастут.

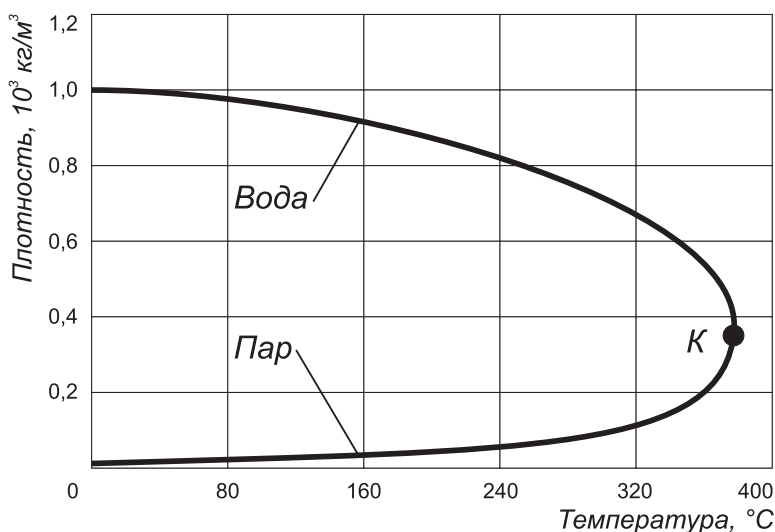
В табл. 1.1 приведены значения плотности воды и насыщенного водяного пара для разных температур (а следовательно, и для соответствующих давлений) [1.2].

**Таблица 1.1. Плотности воды и насыщенного пара**

Температура, °С	Давление насыщенного пара, мм. рт. ст.	Плотность воды, кг/м <sup>3</sup>	Плотность насыщенного пара, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплота парообразования, кДж/кг
15	13	1000	0,073	2454
50	92	998	0,083	2374
100	760	960	0,597	2250
150	3570	920	2,54	2115
200	11660	860	7,84	1940
300	64450	700	46,9	1379
370	157700	440	208	441
374	165500	320	320	0

Из таблицы видно, что чем выше температура, тем меньше разница между плотностью жидкости и плотностью ее насыщенного пара. На рис. 1.2 эти же данные приведены в виде графика.

При некоторой температуре (у воды при 374 °С) эти плотности совпадают. Температуру, при которой плотности жидкости и ее насыщенного пара совпадают, называют *критической температурой* данного вещества. На рис. 1.2 ей соответ-



**Рис. 1.2. Зависимость плотности воды и насыщенного пара воды от температуры**

ствуется точка  $K$ . Давление насыщенного пара, соответствующее точке  $K$ , называют *критическим давлением*.

Верхняя часть графика показывает изменение плотности жидкости в зависимости от ее температуры. При повышении температуры плотность жидкости уменьшается. Нижняя часть графика показывает зависимость плотности насыщенного пара от температуры. Плотность пара увеличивается. При температуре, соответствующей точке  $K$ , плотности жидкости и насыщенного пара совпадают.

Опыт показывает, что при температурах, более высоких, чем критическая, вещество может находиться только в газообразном состоянии. Если мы будем уменьшать объем, занятый паром, при температуре выше критической, то давление пара возрастает, но он не становится насыщенным и продолжает оставаться однородным: как бы велико ни было давление, мы не обнаружим двух состояний, разделенных резкой границей, как это всегда наблюдается при более низких температурах вследствие конденсации пара.

Итак, если температура какого-нибудь вещества выше критической, то равновесие вещества в виде жидкости и соприкасающегося с ней пара невозможно ни при каком давлении.

Критические температуры различных веществ сильно отличаются друг от друга. Некоторые из них приведены в табл. 1.2 [1.2].

После открытия критической температуры стало понятно, почему долго не удавалось превратить в жидкость такие газы, как кислород или водород. Их критическая температура очень низка (табл. 1.2). Чтобы превратить эти газы в жидкость, их нужно охладить ниже критической температуры. Без этого все попытки их сжижения обречены на неудачу.

**Таблица 1.2.** Критические температуры и давления некоторых веществ

Вещество	Критическая температура, °С	Критическое давление, атм
Ртуть	1700	≈1600
Вода	374	218,5
Спирт этиловый	243	62,7
Эфир диэтиловый	197	35,8
Хлор	146	76
Углекислый газ	31	73
Кислород	-118	50
Азот	-146	33
Водород	-240	12,8
Гелий	-263	2,26

Как видно из табл. 1.1, по мере приближения к критической точке удельная теплота парообразования уменьшается, пока в критической точке не превратится в 0. Это объясняется тем, что при повышении температуры уменьшается различие внутренних энергий вещества в жидком и газообразном состояниях. В самом деле, силы сцепления молекул зависят от расстояний между молекулами. Если плотности жидкости и пара отличаются мало,

то мало отличаются и средние расстояния между молекулами. Следовательно, при этом будут мало отличаться и значения потенциальной энергии взаимодействия молекул. Второе слагаемое теплоты парообразования — работа против внешнего давления — тоже уменьшается по мере приближения к критической температуре. Это следует из того, что чем меньше различие в плотностях пара и жидкости, тем меньше расширение, происходящее при испарении, и, значит, тем меньше совершаемая при испарении работа.

### **Выводы**

- 1. Все жидкости без исключения испаряются. Чем больше поверхностное натяжение, тем менее летуча жидкость. При испарении жидкость охлаждается.*
- 2. Плотность и давление насыщенного пара при неизменной температуре являются постоянными величинами, не зависящими от количества жидкости и пара в сосуде. При повышении температуры давление насыщенного пара увеличивается нелинейно.*
- 3. При температурах, более высоких, чем критическая, вещество может находиться только в газообразном состоянии и ни при каком давлении не переходит в жидкость.*
- 4. Удельная теплота парообразования с ростом температуры уменьшается.*

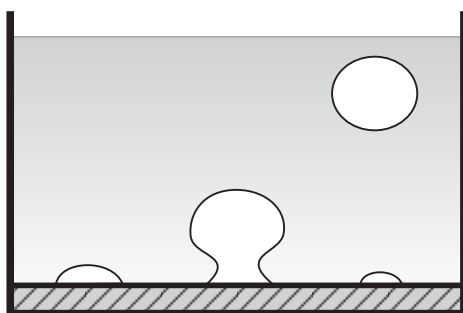
### **1.1.2. Кипение**

Рассмотрим процесс кипения на примере открытого сосуда с водой [1.2].

Если поместить прозрачный сосуд с холодной водой на газовую горелку, скоро дно и стенки сосуда покроются пузырьками растворенного в воде воздуха, выделяющегося из воды при повышении температуры, так как растворимость газов в жидкости при повышении температуры понижается. В этих пузырьках находятся воздух и пар воды. Пузырьки появляются в тех местах стенок сосуда, где нет полного смачивания стенок сосуда водой.

При повышении температуры пузырек постепенно расширяется, при этом между пузырьком и стенкой сосуда образуется все сужающаяся воздушная перемычка (рис. 1.3). Когда пузырек делается достаточно большим, выталкивающая сила воды заставит его оторваться от стенки. У стенки остается небольшое количество воздуха, из которого со временем разовьется новый пузырек.

Поднимаясь вверх, оторвавшиеся пузырьки снова уменьшаются в размерах. Это происходит потому, что пузырьки содержат пар воды и немного воздуха, и когда пузырек достигает верхних, еще не успевших нагреться слоев воды, то значительная часть водяного пара конденсируется в воду и пузырек уменьша-



**Рис. 1.3.** Как кипит вода

начинается «бульканье» — мы говорим, что вода закипела.

Термометр, помещенный в пар над кипящей водой, все время, пока вода кипит, показывает одну и ту же температуру — около  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Очевидно, что при кипении давление паров, образующихся внутри пузырьков у дна сосуда (давление насыщенных паров), таково, что пузырьки могут расширяться, преодолевая атмосферное давление, действующее на свободную поверхность воды, а также давление столба воды.

Мы приходим к выводу, что кипение происходит при такой температуре, при которой давление насыщенного пара жидкости равно внешнему.

Так как существует однозначная зависимость давления насыщенного пара от температуры (см. раздел «Испарение»), очевидно, что температура кипения зависит от внешнего давления.

Понижая давление воздуха над поверхностью воды, мы можем заставить воду вскипеть при температуре значительно ниже  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Наоборот, при повышении внешнего давления температура кипения повышается. Так, в паровых котлах воду нагревают под давлением в несколько атмосфер. Температура кипения при этом значительно превосходит  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При давлении около 15 атмосфер температура кипения воды близка к  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Температуры кипения различных жидкостей (при нормальном давлении) сильно отличаются. Это можно видеть из табл. 1.3 [1.2].

**Таблица 1.3.** Температуры кипения некоторых жидкостей при нормальном давлении

Жидкость	Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	Жидкость	Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$
Водород	-253	Спирт этиловый	78
Кислород	-183	Вода	100
Азот	-196	Ртуть	357
Хлор	-34	Расплавленный цинк	906
Эфир диэтиловый	35	Расплавленное железо	2880

ется. Это попеременное увеличение и уменьшение пузырьков сопровождается звуками: закипающая вода «шумит».

Наконец, вся вода прогревается в достаточной мере. Тогда поднимающиеся пузырьки уже не уменьшаются в размерах (так как насыщенный пар в них уже не конденсируется) и лопаются на поверхности, выбрасывая пар во внешнее пространство. «Шум» прекращается, и



Различие температур кипения веществ связано с различием в давлении насыщенного пара при одной и той же температуре (см. раздел 1.1.1).

Различие температур кипения разных веществ находит большое применение в технике, например при разделении нефтепродуктов. При нагревании нефти раньше всего испаряются наиболее ценные, летучие ее части (бензин), которые можно таким образом отделить от «тяжелых» остатков (масел, мазута).

В отличие от испарения, при кипении жидкости парообразование происходит не только на свободной поверхности жидкости, но и во всей ее массе с подъемом пузырьков к поверхности. Такой интенсивный процесс парообразования требует больших затрат энергии на осуществление фазового перехода жидкость-пар. Для поддержания непрерывного кипения жидкости необходимо выполнить два условия — довести жидкость до требуемой температуры кипения и сообщить ей скрытую теплоту парообразования.

Температура жидкости при ее кипении остается постоянной, так как все подводимое тепло идет на фазовый переход жидкость-пар.

Количество тепла, которое нужно подвести к 1 кг жидкости, равно удельной теплоте парообразования при температуре кипения (кДж/кг).

Так, если вода кипит при 100 °С (при нормальном давлении), на фазовый переход 1 кг воды тратится 2250 кДж тепла.

## **Выводы**

- 1. Кипение жидкости происходит при такой температуре, при которой давление насыщенного пара равно внешнему давлению.*
- 2. Температура кипения жидкости зависит от внешнего давления: чем выше давление, тем выше температура кипения, и наоборот.*
- 3. Кипение однокомпонентной жидкости происходит при постоянной температуре, которая однозначно определяется внешним давлением.*

### **1.1.3. Конденсация**

Конденсацией называется переход пара в жидкость, который происходит при охлаждении или при сжатии и охлаждении одновременно.

Процесс конденсации может проходить только при температурах ниже критической, так как только при этом условии существует возможность одновременного существования двух фаз вещества — жидкости и пара (см. раздел 1.1.1).

Процесс конденсации противоположен процессу кипения. При одинаковом давлении температура конденсации совпадает с температурой кипения, а теплота конденсации, которую нужно забрать у насыщенного пара, чтобы превратить его в жидкость (сконденсировать), равна теплоте испарения при этой температуре.

Для осуществления процесса кипения нужно жидкость нагреть при заданном давлении до температуры кипения и за счет постоянного подвода тепла поддерживать процесс кипения, сообщая жидкости теплоту испарения.

Для осуществления процесса конденсации, наоборот, необходимо при постоянном давлении сначала охладить перегретый пар до температуры конденсации, а затем за счет постоянного отвода тепла поддерживать процесс конденсации, забирая у жидкости теплоту конденсации.

Изменяя давление, при котором происходит кипение (конденсация), можно изменять температуру кипения (конденсации).

Если необходимо, чтобы процесс кипения жидкости проходил при низких температурах, то необходимо создать пониженное давление, соответствующее данной температуре кипения.

Именно такой способ широко применяется в холодильной технике, когда в испарителе создается низкое давление и хладагент (хладон) кипит при температуре, например,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

А для того чтобы сконденсировать полученный пар, создают в конденсаторе повышенное давление, и хладагент конденсируется, например, при температуре  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **Выводы**

- 1. Процесс конденсации может проходить только при температурах ниже критической.*
- 2. Конденсация однокомпонентной жидкости происходит при постоянной температуре, которая однозначно определяется внешним давлением.*
- 3. Изменяя давление, при котором происходит кипение (конденсация), можно изменять температуру кипения (конденсации).*

## **1.2. Газообразное состояние вещества**

### **1.2.1. Давление газа**

В веществе, находящемся в газообразном состоянии, молекулы находятся на значительных расстояниях друг от друга, поэтому силы взаимного притяжения между ними малы.

Газ всегда полностью заполняет объем, ограниченный непроницаемыми для него стенками. Стремясь расшириться, газ оказывает давление на стенки, ограничивающие его объем, например на стенки сосуда, в котором он находится.

Согласно кинетической теории, давление газа объясняется упругими ударами молекул о стенки сосуда, при которых они хаотически сообщают свои импульсы

стенке [1.2]. При единичном ударе стенке сообщается импульс, равный удвоенному произведению массы молекулы  $m$  на ее среднюю скорость  $w$  —  $2 \cdot m \cdot w$ . Давление газа  $p$  определяется при этом как

$$p = 2 \cdot N \cdot m \cdot w,$$

где  $N$  — количество ударов молекул о стенку сосуда в единицу времени.

$N$  зависит от скорости молекул (чем быстрее они летят, тем чаще ударяются о стенку) и от числа молекул в единице объема  $n$  (чем больше молекул, тем больше и число наносимых ими ударов).

### **Единицы измерения давления**

**Паскаль** (русское обозначение: Па, международное: Pa) — единица измерения давления в Международной системе единиц (СИ). Паскаль равен давлению, вызываемому силой, равной одному ньютону (Н), равномерно распределенной по нормальной (перпендикулярной) к ней поверхности площадью один квадратный метр ( $1 \text{ м}^2$ ):

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

**Бар** (русское обозначение: бар; международное: bar) — внесистемная единица измерения давления, примерно равная одной атмосфере. Один бар равен  $10^5$  Па:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

**Миллиметр ртутного столба** (русское обозначение: мм рт. ст.; международное: mm Hg) — внесистемная единица измерения давления.

Происхождение этой единицы связано со способом измерения атмосферного давления при помощи барометра, в котором давление уравнивается столбом жидкости. В качестве жидкости часто используется ртуть, поскольку у нее очень высокая плотность ( $\approx 13600 \text{ кг/м}^3$ ) и низкое давление насыщенного пара при комнатной температуре.

Атмосферное давление на уровне моря составляет примерно 760 мм рт. ст. Стандартное атмосферное давление принято равным (точно) 760 мм рт. ст., или 101 325 Па, отсюда вытекает определение миллиметра ртутного столба ( $101325 / 760$  Па):

$$1 \text{ мм рт.ст.} = 101325 / 760 \approx 133,32 \text{ Па}.$$

**Атмосфера** — внесистемная единица измерения давления, приблизительно равная атмосферному давлению на поверхности Земли на уровне Мирового океана.

Стандартная, нормальная или физическая атмосфера (русское обозначение: атм, международное: atm) в точности равна 101325 Па или 760 миллиметрам ртутного столба (давление, уравниваемое столбом ртути высотой 760 мм при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , плотность ртути  $13595,1 \text{ кг/м}^3$  и нормальное ускорение свободного падения  $9,80665 \text{ м/с}^2$ ):

$$1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

Если давление газа больше атмосферного, то при измерении его давления речь может идти как об абсолютном (от 0, т.е. «абсолютного» вакуума), так и об избыточном давлении (разности между абсолютным и атмосферным давлением).

Прибор, измеряющий избыточное давление, называется манометром. Для измерения атмосферного давления служат барометры. Для измерения давления ниже атмосферного (разряжения, «технического» вакуума) служат вакуумметры.

При рассмотрении процессов изменения состояний идеальных газов речь всегда идет об абсолютном давлении.

Следовательно, можно считать, что  $N$  пропорционально  $n$  и  $w$ , и, соответственно, давление газа  $p$  пропорционально  $n \cdot m \cdot w^2$ .

Число молекул в единице объема  $n$  зависит от того, какой объем занимает данное количество газа. Если газ сжимается, то  $n$  увеличивается, а если сжимается —  $n$  уменьшается.

Произведение  $m \cdot w^2$  представляет собой удвоенную среднюю кинетическую энергию молекулы  $e = m \cdot w^2/2$ .

Следовательно, давление газа пропорционально средней кинетической энергии молекулы.

Газ, как и любое другое тело, обладает внутренней энергией, складывающейся из кинетической и потенциальной энергии образующих его молекул.

При повышении температуры газа происходит изменение его внутренней энергии, которая проявляется в изменении кинетической энергии образующих его молекул, так как силы взаимодействия между молекулами газа практически отсутствуют и изменениями потенциальной энергии можно пренебречь.

Так как температура газа влияет непосредственно на кинетическую энергию образующих его молекул, температура газа будет оказывать влияние и на давление газа, которое пропорционально кинетической энергии.

Таким образом, давление газа зависит от:

- количества молекул газа в данном объеме, т.е. степени сжатия газа;
- температуры газа.

При изучении параметров состояния и процессов газ рассматривается в равновесном состоянии: предполагается, что в газе установилось как механическое, так и тепловое равновесие.

Механическое равновесие означает, что не происходит движения отдельных частей газа — давление газа одинаково во всем его объеме. Тепловое равновесие означает, что не происходит передачи теплоты от одного участка газа к другому — температура одинакова во всем его объеме.

### 1.2.2. Плотность и удельный объем газа

Плотность газа — масса газа в единице объема — определяется делением массы газа  $M$  на его объем  $V$ :

$$\rho = \frac{M}{V}. \quad (1.1)$$

Для сравнения различных газов их плотности измеряют при одинаковых температуре и давлении.

В таблице 1.4 приведены плотности некоторых газов при так называемых нормальных условиях: при температуре  $0^\circ\text{C}$  и давлении  $101325\text{ Па}$  ( $760\text{ мм рт. ст.}$ ) [1.2].