

Рой Дж. Доссат

ОСНОВЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Рой Дж. Доссат

ОСНОВЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Roy J. Dossat

PRINCIPLES OF REFRIGERATION

PRINCIPLES OF REFRIGERATION

Second Edition
SI Version

Roy J. Dossat
Professor of Mechanical Technology
University of Houston
Houston, Texas

John Wiley and Sons
New York
Chichester
Brisbane
Toronto

Рой Дж. Доссат

ОСНОВЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Под редакцией Л. Г. Каплана
Перевод с английского
М. Б. Розенберга

Москва
«Легкая и пищевая
промышленность»
1984

ББК 31.392

Д70

УДК 621.56.002.72.004.2

Доссат Рой Дж. Основы холодильной техники.
Пер. с англ. — М.: Легкая и пищевая пром-сть,
1984 — 520 с.

В книге американского ученого изложены физические и термодинамические основы холодильной техники. Описаны принципы действия холодильных машин, их термодинамические циклы, рассмотрены схемы различных машин. Приведена холодильная технология пищевых продуктов и режимы их холодильной обработки. Рассмотрены основы теории и конструкции компрессоров и теплообменных аппаратов, даны рекомендации по их выбору, размещению и монтажу. Содержатся справочные данные и рекомендации для практической работы.

Книга предназначена для инженерно-технических работников по монтажу, эксплуатации и проектированию холодильных установок.
Табл. 62. Ил. 355.

Д 2303050000-011 11-84
Д 044(01)-84

© 1961, 1978, 1981 by John Wiley & Sons, Inc.

© Предисловие, перевод на русский язык издательство «Легкая и пищевая промышленность», 1984.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Книга профессора Хьюстонского университета (США) Роя Дж. Досага является учебником для колледжей, готовящих специалистов по холодильной технике.

В начале книги рассмотрены известные основные физические представления и законы, касающиеся молекулярного строения вещества, видов энергии и их преобразования, тепловых процессов с идеальными газами, психрометрии воздуха применительно к холодильной технике. Это необходимо для последующего усвоения процессов, происходящих в холодильных машинах, установках кондиционирования воздуха и камерах холодильной обработки и хранения **пищевых продуктов**.

Изложены принцип действия парокомпрессорных холодильных машин, теория их термодинамических циклов, рассмотрены диаграммы энтальпия—давление этих циклов. Приведены примеры расчета холодильных циклов, которые дают наглядное представление о влиянии режима работы на характеристики холодильных машин, и хорошо выполненные иллюстрации с указанием на них параметров состояния хладагента в различных точках рабочего цикла, охлаждаемого объекта и среды, охлаждающей конденсатор холодильной машины.

Большое место в книге отведено основам холодильной технологии пищевых продуктов: охлаждению, замораживанию и холодильному хранению. Дано описание холодильного оборудования для осуществления этих функций, а также торгового холодильного оборудования. Изложены основные положения по проектированию холодильников для пищевых продуктов, рекомендации по режимам хранения, охлаждения и замораживания фруктов, овощей, мясопродуктов.

Приведен обширный справочный материал, представляющий большой интерес для проектировщиков холодильников, в частности указаны рекомендуемые температуры, влажность, скорость движения воздуха и длительность хранения различных продуктов в холодильных камерах. Изложена методика расчета теплопритоков в камеры холодильников, а также даны характеристики основных теплоизоляционных материалов и конструкций.

Рассмотрены испарители для охлаждения жидких хладоносителей и воздуха, схемы и конструкции испарителей различного типа и назначения, методы регулирования подачи хладагента в испаритель. Приведены справочные таблицы теплофизических свойств жидких хладоносителей. Даны рекомендации по расчету, расположению испарителей и воздухоохладителей различного типа (непосредственного охлаждения и с промежуточным хладоносителем) в камерах холодильников и их монтажу.

Изложены основы теории поршневых компрессоров. Метод теплового расчета поясняется приведенными примерами. Следует также отметить наглядное графическое представление влияния режима работы компрессора на его параметры: коэффициент подачи, холодопроизводительность, потребляемую мощность.

Рассмотрены схемы регулирования холодопроизводительности машин, принцип действия и конструкции приборов и устройств для его осуществления.

Приведены схемы, конструкции, основы теплового расчета конденсаторов и градирен. Соответствующее внимание уделено экономному расходованию воды при охлаждении конденсаторов. Для конденсаторов с воздушным охлаждением и испарительных конденсаторов рассмотрены различные варианты поддержания необходимого давления конденсации в холодное время года. Полезны сведения по очистке конденсаторов водяного охлаждения от накипи и по замкнутым системам циркуляции воды, охлаждающей конденсатор.

Даны основы проектирования схем трубопроводов и центробежных насосов для воды и жидких хладоносителей, приведены гидравлические расчеты.

С привлечением большого объема справочных данных рассмотрены термодинамические и теплофизические свойства наиболее распространенных хладоагентов. Показано влияние этих свойств на конструктивные и эксплуатационные показатели холодильных машин. Рассмотрены методы обнаружения утечек хладоагентов, их физиологическое воздействие, допустимые концентрации в воздухе.

Большое внимание уделено приборам для автоматического регулирования подачи хладоагента в испаритель. Особенно подробно рассмотрены терморегулирующие вентили, в том числе термоэлектрические. Приводятся их характеристики и рекомендуемые схемы установки в сочетании с испарителями различных типов. Интересны схемы холодильных машин с поплавковыми регуляторами уровня высокого и низкого давления, а также сведения по электромагнитным вентилям и дроссельным регуляторам давления.

Рассмотрены конструкции холодильных компрессоров, при этом значительное место отведено системам смазки и требованиям к маслам. Обширные сведения приведены по поршневым компрессорам, а также конструкциям их наиболее ответственных узлов. Дается четкое представление о ротационных, винтовых и центробежных компрессорах, принципе их действия и особенностях конструкции.

В книге приведены основные положения по проектированию трубопроводов хладоагента. Описаны также запорная арматура, фильтры, осушители и индикаторы наличия воды в хладоагенте. Имеется большой справочный материал по выбору трубопроводов, исходя из гидравлических сопротивлений и необходимости обеспечения переноса масла в вертикальных участках паровых трубопроводов (при движении вверх) для установок, работающих на хладоагентах, которые растворяются в смазочных маслах.

Рассмотрены холодильные установки, работающие по сложным схемам и холодильным циклам (многоступенчатого сжатия, каскадные, многотемпературные), а также абсорбционные холодильные машины (водоаммиачные, бромистолитиевые и трехкомпонентные).

Наибольший интерес представляют схемы оттаивания испарителей для

охлаждения воздуха и рекомендации по оборудованию холодильных машин устройствами оттаивания.

В книге изложен материал по электрооборудованию холодильных установок, представлены основные и необходимые для специалистов по проектированию и эксплуатации холодильного оборудования сведения об электродвигателях, пусковых и защитных электроприборах, приборах автоматики, связанных со схемой питания электродвигателей для привода компрессоров, вентиляторов и насосов холодильной установки.

В приложении представлены таблицы и диаграммы, включающие сведения об испарителях, конденсаторах, компрессорно-конденсаторных агрегатах, компрессорах, градирнях, а также рекомендации по подбору водорегулирующих вентилей и центробежных насосов, выпускаемых американскими фирмами. Указанные таблицы и диаграммы оставлены в русском издании книги, поскольку на них базируются примеры расчетов.

Материал книги изложен доступно и лаконично, четко объясняется физическая сущность процессов, происходящих в холодильных установках и системах кондиционирования воздуха. Математические уравнения, необходимые для понимания теории холодильных машин, представлены в простом виде.

Многочисленные примеры расчетов и задачи способствуют самостоятельной подготовке специалистов по холодильной технике.

Характерной особенностью книги является то, что наряду с теоретическим и практическим материалом по холодильной технике и технологии в ней даны, как указывалось выше, основы физики, термодинамики и психрометрии, а также приведены сведения по гидравлике и электрооборудованию холодильных установок. Это позволит читателям освоить профессию холодильщика и повысить квалификацию без использования дополнительной литературы.

Существенным достоинством этой книги является большой объем практических и справочных сведений, связанных с эксплуатацией, монтажом и проектированием установок с холодильными машинами парокompрессионного типа.

Абсорбционные холодильные машины рассмотрены в небольшом объеме, а парожеткотные, термоэлектрические и другие типы холодильных машин не нашли отражения в этой книге, видимо, в связи с их малым распространением.

Книга Роя Дж. Доссата будет полезна специалистам по техническому обслуживанию, монтажу и проектированию холодильного оборудования.

Л. Г. Каплян

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данном учебнике в доступной форме изложен полный курс по назначению и применению холодильного цикла и машинного оборудования. Книга написана для холодильных факультетов колледжей, однако расположение, широта охвата и способ изложения материала таковы, что книга может быть использована также для заочного и вечернего обучения, для повышения квалификации и для самообразования.

Несмотря на глубокое рассмотрение вопросов термодинамики холодильного цикла, нет необходимости в изучении специальной программы по этим вопросам и в предварительной учебной подготовке по физике и термодинамике. Первые главы посвящены основным положениям физики и термодинамики, включая введение в психрометрию, что является необходимым предварительным условием глубокого изучения вопросов машинного охлаждения.

В книге подчеркивается циклический характер холодильной системы, и каждый узел системы рассматривается во взаимосвязи с другими узлами и со всей системой в целом. Большое внимание уделено взаимосвязи теории и практики. Приведены примеры решения практических задач. В приложении даны также таблицы характеристик холодильного оборудования.

Большая часть материала книги основана на информации из изданий Американского общества инженеров по отоплению, холодильной технике и кондиционированию воздуха, а также изданий следующих изготовителей оборудования:

Акме Индастриз, Инк.; Алко Вэлв Компани; Анаконда Метал Хоуз Дивижн, Америкен Брасс Компани; Белл энд Госсетт Компани; Бон Алюминум энд Брасс Корпорейшн; Кэрриер Корпорейшн; Контроулз Компани оф Америка; Дин Продактс, Инк.; Детройт Контроулз Дивижн, Америкен Рейдэтор энд Стандард Санитари Корпорейшн; Детройт Айс Машин Компани; Доул Рефриджерейтинг Компани; Донхэм-Буш, Инк.; Эдвардс Энджиниринг Корпорейшн; Э. И. Дюпон де Немюр энд Компани; Фризинг Эквипмент Сейлз, Инк.; Фрик Компани; Джeneral Контроулз Компани; Джeneral Электрик Компани; Халстед энд Митчелл; Ингерсолл-Рэнд Компани; Кеннард Дивижн, Америкен Эйр Филтер Компани, Инк.; Крамер Трентон Компани; Маккьюзи, Инк.; Марли Компани; Марш Инструмент Компани; Мюллер Брасс Компани; Пенн Компани, Инк.; Престоулд, Лтд.; Рикоулд Корпорейшн; Сингер Компани, Контроулз Дивижн; Спорлан Вэлв Компани; Текумсе Продактс Компани; Трантер Манюфакчуринаг, Инк.; Тюбулар Эксчейнджер Манюфакчуерз Ассошиэйшн, Инк.; Тайлер Рефриджерейшн Корпорейшн; Вилтер Манюфакчуринаг Компани; Уоррингтон Корпорейшн; Йорк Корпорейшн, филиал Борг-Уорнер Корпорейшн.

Выражается благодарность всем этим фирмам за их вклад в виде фотографий и другого графического материала, а также за разрешение поместить соответствующие данные, без которых издание книги было бы невозможным.

Глава I

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

МАССА И ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА

Масса m вещества, обычно выражаемая в граммах (г) или килограммах (кг), и объем V , обычно выражаемый в кубических сантиметрах (см³) или кубических метрах (м³), являются основными мерами измерения количества вещества. $1 \text{ м}^3 = 1000000 \text{ см}^3$. Мерами измерения объема жидкости являются литр (л) или миллилитр (мл). $1 \text{ л} = 0,001 \text{ м}^3$, а $1 \text{ мл} = 1 \text{ см}^3$.

Плотность ρ — это масса вещества, заключенная в единице объема, а удельный объем v — величина, обратная плотности:

$$\rho = m/V, \quad (1-1)$$

$$v = V/m. \quad (1-2)$$

Плотность обычно выражают в килограммах на кубический метр (кг/м³) или килограммах на литр (кг/л), а удельный объем — в кубических метрах на килограмм (м³/кг) или литрах на килограмм (л/кг). Обратите внимание на то, что $\rho = 1/v$, а $v = 1/\rho$.

Ниже показано, что удельный объем и плотность вещества не являются постоянными величинами, а изменяются в зависимости от его температуры. Так, максимальная плотность воды примерно составляет 1000 кг/м^3 при температуре 4°C . Плотность воды снижается до 958 кг/м^3 при температуре 100°C , которая является точкой кипения воды при нормальном атмосферном давлении. При необходимости более точные величины могут быть определены по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара.

Относительная плотность вещества — это отношение плотности данного вещества к плотности какого-нибудь стандартного вещества. При работе с жидкостями за стандартное вещество обычно принимают воду, имеющую максимальную плотность (1000 кг/м^3) . Если ρ_v — плотность воды, то относительная плотность любого вещества будет

$$d = \rho/\rho_v. \quad (1-3)$$

Относительная плотность — безразмерная величина.

МАССОВЫЙ И ОБЪЕМНЫЙ РАСХОД

Если массу выражают в граммах (г) или килограммах (кг), то массовый расход измеряют в граммах в секунду (г/с) или килограммах в секунду (кг/с). Кроме того, единицами массового расхода являются килограммы в минуту (кг/мин) и килограммы в час (кг/ч). Подобным же образом, когда объем выражают в литрах (л) или кубических метрах (м³), то объемный расход потока определяют в литрах в секунду (л/с), кубических метрах в секунду (м³/с), кубических метрах в минуту (м³/мин) или кубических метрах в час (м³/ч).

Из уравнений (1-1) и (1-2) можно определить в соответствующих единицах следующие соотношения между массой и объемом или массовым расходом и объемным расходом потока:

$$m = V\rho = V/v, \quad (1-4)$$

$$V = mv = m/\rho, \quad (1-5)$$

где m — масса или массовый расход потока; V — объем или объемный расход потока.

Пример 1-1. Объемный расход воды через трубу составляет $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$. Чему равен массовый расход?

Решение. Принимая плотность воды равной 1000 кг/м^3 и используя уравнение (1-4), получим $m = 0,03 \text{ м}^3/\text{с} \cdot 1000 = 30 \text{ кг/с}$.

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Простейшей формой движения тела является прямолинейное движение с постоянной скоростью. Такое движение имеет место, когда тело в единицу времени перемещается в одном направлении на одинаковое расстояние. Тело, перемещающееся таким

образом, движется с постоянной скоростью. Скорость, таким образом, является векторной величиной и обозначает как направление движения, так и его количественную характеристику.

Скорость движения тела — это расстояние, на которое тело перемещается в единицу времени. Независимо от того, является ли скорость движения постоянной или нет, средняя скорость — это расстояние, на которое тело перемещается, деленное на время, требуемое для этого перемещения:

$$v = s/t, \quad (1-6)$$

где v — скорость движения тела, м/с (м/мин, км/ч); s — пройденное расстояние, м (км); t — продолжительность движения, с (мин, ч).

Пример 1-2. Снаряд перемещается на 1000 м за 3,5 с. Рассчитать среднюю скорость его движения.

Решение. Применяя уравнение (1-6), получим $v = 1000 \text{ м}/3,5 \text{ с} = 285,7 \text{ м/с}$.

УСКОРЕНИЕ

Тело часто движется с переменной скоростью. Движение с переменной скоростью называется движением ускорения, а изменение скорости называется ускорением a . Ускорение может быть положительным или отрицательным в зависимости от того, увеличивается или уменьшается скорость движения.

Простейшая форма движения с ускорением — это равномерное движение с таким ускорением, когда движение осуществляется в одном направлении, а изменение скорости постоянно. В таких случаях, если начальная скорость движения v_0 , то мгновенная скорость v_i через t секунд будет равна

$$v_i = v_0 + at. \quad (1-7)$$

Если тело начинает движение из состояния покоя (т. е. начальная скорость v_0 равна нулю), то уравнение (1-7) может быть упрощено:

$$v_i = at. \quad (1-8)$$

Тогда

$$t = v_i/a \quad (1-9)$$

и

$$a = v_i/t. \quad (1-10)$$

Средняя скорость движения v тела с равномерным ускорением из состояния покоя равна $v_i/2$. Тогда в соответствии с уравнением (1-6) расстояние s , пройденное телом за t секунд, равно

$$s = v_i t/2 = at^2/2. \quad (1-11)$$

Свободное падение тела является наиболее характерным примером движения с равномерным ускорением. Тело, падающее свободно только под действием силы тяжести, имеет ускорение $9,807 \text{ м/с}^2$. Эта величина известна как ускорение свободного падения g , или универсальная гравитационная постоянная. Влияние силы тяжести на тело уменьшается с увеличением высоты (над уровнем моря). Следовательно, местное ускорение свободного падения зависит от высоты, а также от географической широты места, так как диаметр земного шара несколько больше у экватора. Приведенная величина ускорения рассчитана для широты 45° , но ее можно применить с достаточной точностью для любой широты.

Пример 1-3. Стальной шарик массой $0,21 \text{ кг}$ начинает падать из состояния покоя с крыши здания по направлению к земле. Вычислить скорость движения шарика в момент его удара о землю и высоту здания, если продолжительность падения $3,5 \text{ с}$. При этом трением шарика о воздух можно пренебречь.

Решение. По уравнению (1-8) находим

$$v_i = 9,807 \text{ м/с}^2 \cdot 3,5 \text{ с} = 34,32 \text{ м/с}.$$

Применяя уравнение (1-11), определяем высоту здания: $s = 34,32 \text{ м/с} \cdot 3,5 \text{ с} = 60 \text{ м}$.

СИЛА

Сила — векторная величина, служащая мерой взаимодействия тел. Сила заставляет тело двигаться, останавливаться или изменять направление движения. Под действием силы можно также изменить размер или форму тела, т. е. тело можно закрутить, изогнуть, растянуть, сжать.

Единица измерения силы¹ — ньютон. Один ньютон равен силе, сообщаящей телу массой один килограмм ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы:

$$F = ma, \quad (1-12)$$

где F — сила, Н; m — масса, кг; a — ускорение, м/с^2 .

Пример 1-4. Тело массой 15 кг движется под действием неуравновешенной силы с ускорением 10 м/с^2 в направлении равнодействующей силы. Вычислить величину силы.

Решение. По уравнению (1-12) находим $F = 15 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 = 150 \text{ Н}$.

Силу тяжести, или гравитационную силу, действующую на тело, определяют, подстав-

¹ Хотя сила, как и скорость, является векторной величиной, но в данной книге она будет рассматриваться как скалярная величина.

для в уравнение (1-12) вместо ускорения a местное ускорение свободного падения g . Следовательно, уравнение (1-12), если его используют для вычисления гравитационной силы, можно записать следующим образом:

$$F = mg, \quad (1-13)$$

где g — ускорение свободного падения, Н/кг, которое, как указывалось ранее, равно 9,807 м/с².

Пример 1-5. Определить гравитационную силу, действующую на тело массой 25 кг.
Решение. По уравнению (1-13) находим $F = 25 \text{ кг} \cdot 9,807 \text{ Н/кг} = 245,18 \text{ Н}$.

ДАВЛЕНИЕ

Давление — это сила, действующая на поверхность тела в направлении, перпендикулярном этой поверхности. Если сила не равномерно действует на данную поверхность, то среднее давление в любой точке поверхности можно рассчитать делением силы на общую площадь поверхности:

$$p = F/S, \quad (1-14)$$

где p — давление, Н/м², или Па; F — сила, Н; S — площадь поверхности, м².
Поскольку $F = ma$, то

$$p = ma/S, \quad (1-15)$$

и в случаях, когда a равно g ,

$$p = mg/S. \quad (1-16)$$

Пример 1-6. Прямоугольный бак размером $2 \times 3 \text{ м}$ частично заполнен водой, масса которой 18 000 кг. Определить гравитационную силу и давление, действующие на дно бака.

Решение.

Гравитационная сила $F = 18\,000 \text{ кг} \times 9,807 \text{ Н/кг} = 176\,526 \text{ Н}$.

Площадь поверхности дна бака 6 м². Согласно уравнению (1-14) $p = 176\,526 \text{ Н/} 6 \text{ м}^2 = 29\,421 \text{ Па}$, или Н/м².

Обратите внимание на то, что в уравнении (1-14) единицей давления является паскаль (Па). Давление равно 1 Па, когда сила в 1 Н равномерно действует на площадь в один квадратный метр.

Ниже показано, что давление измеряется также высотой столба жидкости. Когда используют ртуть, давление выражают в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.). При использовании воды давление выражают в миллиметрах водяного столба (мм вод. ст.).

Атмосферное давление

Земной шар окружен атмосферой толщиной 80 км. В связи с тем что воздух имеет массу и подвержен действию гравитации, он создает давление, которое называется атмосферным. Представьте себе воздушную колонну с площадью поперечного сечения 1 м² и высотой от поверхности земли до верхней границы атмосферы. Гравитационная сила, создаваемая у основания колонны, равна 101325 Н. В связи с тем что эта сила действует на 1 м², давление атмосферы составляет 101325 Н/м², или Па. Эта величина нормального барометрического (атмосферного) давления на уровне моря, которую иногда называют давлением в одну атмосферу. Обратите внимание на то, что давление в одну атмосферу приблизительно равно давлению 0,1 МПа.

Атмосферное давление непостоянно и изменяется в зависимости от температуры, влажности и других параметров окружающей среды. Давление зависит также от высоты, причем оно понижается с ее увеличением.

Для измерения атмосферного давления применяют барометры. Существует несколько типов барометров. Простой барометр для измерения давления в единицах ртутного столба изготавливают из стеклянной трубки, один конец которой запаян. Трубку заполняют ртутью примерно на высоту 1 м, затем закрывают открытый конец трубки указательным пальцем, переворачивают трубку этим концом вниз и опускают его в открытый сосуд с ртутью. Когда конец трубки откряпают, убоав палец, уровень ртути в трубке понизится и в ней у запаянного конца создается почти абсолютный вакуум (рис. 1-1). Под действием давления атмосферы на ртуть, находящуюся в открытом сосуде, ртуть в трубке поднимается на высоту, соответствующую давлению. Следовательно, высота ртутного столба в трубке (мм рт. ст.) является мерой измерения давления атмосферы. Нормальное давление

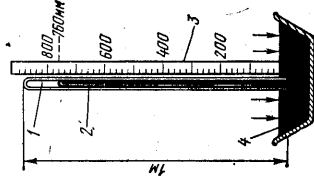


Рис. 1-1. Воздействие атмосферного давления на открытый сосуд с ртутью (величина давления определяет высоту столба ртути):

1 — вакуум; 2 — стеклянная трубка; 3 — шкала; 4 — сосуд с ртутью

атмосферы 101325 Па (на уровне моря), действующее на открытый сосуд, поднимает столб ртути в трубке на высоту 760 мм. Из этого следует, что столб ртути высотой 760 мм эквивалентен давлению 101325 Па. Находим, что 1 мм рт. ст. соответствует давлению около 133,3 Па.

На основании вышеуказанного и с учетом плотности ртути при 0°C могут быть получены следующие соотношения:

$$1 \text{ см рт. ст.} = 1333,2 \text{ Па}; \quad (1-17)$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,32 \text{ Па}; \quad (1-18)$$

$$1 \text{ Па} = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ см рт. ст.}; \quad (1-19)$$

$$1 \text{ Па} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.} \quad (1-20)$$

Под действием нормального атмосферного давления, равного 101325 Па, столб воды (при 4°C) в вертикальной трубке поднимается примерно на 10,332 м. Следовательно, можно вывести следующие зависимости:

$$1 \text{ м вод. ст.} = 9806,65 \text{ Па}; \quad (1-21)$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,807 \text{ Па}; \quad (1-22)$$

$$1 \text{ Па} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м вод. ст.}; \quad (1-23)$$

$$1 \text{ Па} = 1 \cdot 10^{-1} \text{ мм вод. ст.} \quad (1-24)$$

Пример 1-7. Ртутный барометр показывает давление 764 мм рт. ст. Определить атмосферное давление в паскалях.

Решение. По уравнению (1-18) определяем атмосферное давление:
764 мм рт. ст. $\times 133,32 = 101,856 \text{ кПа}$.

Пример 1-8. Вычислить высоту водяного столба в метрах, эквивалентную давлению 15 кПа.

Решение. Согласно уравнению (1-21) высота водяного столба равна 15000 Па/9806,65 = 1,53 м.

Манометры — это приборы для измерения давления среды (газообразной или жидкой) в закрытом сосуде. В холодильной технике обычно используют два типа манометров: гидравлические и пружинные.

В гидравлическом манометре для измерения давления используют жидкость. Высота столба указывает на величину давления. В манометрах этого типа обычно применяют воду или ртуть. Соответственно эти приборы называют водяным или ртутным манометром. Простой барометр, описанный выше, является гидравлическим прибором.

Простой ртутный манометр (рис. 1-2) состоит из U-образной трубки, открытой с обоих концов и частично заполненной ртутью. Когда оба колена U-образной трубки открыты, давление атмосферы на ртуть в трубке с обоих концов, а следовательно, и высота

двух столбов ртути одинаковы. Высоту двух столбов ртути в этом положении отмечают как нулевую точку на шкале. Шкалу калибруют в миллиметрах для того, чтобы определить величину отклонения ртутных столбов от нулевой точки в любом направлении (рис. 1-2, а).

Для определения давления одно колено U-образной трубки соединяют с сосудом, в

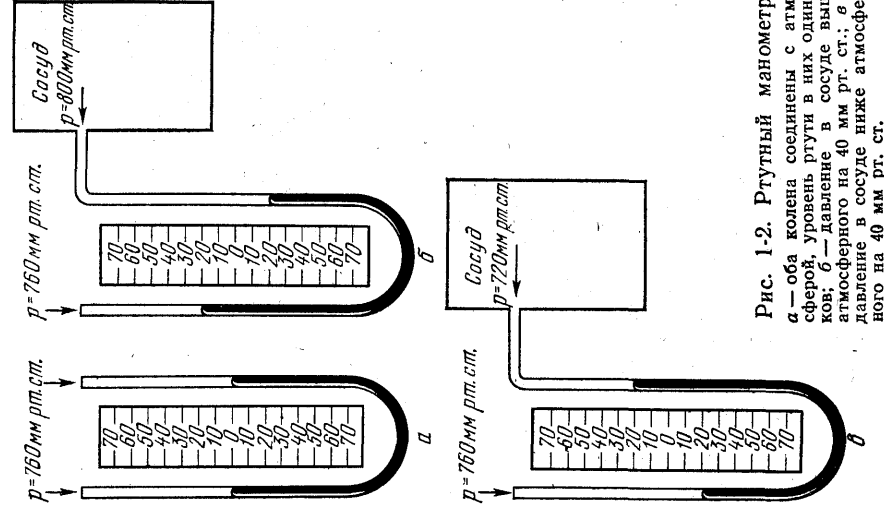


Рис. 1-2. Ртутный манометр:

а — оба колена соединены с атмосферой, уровень ртути в них одинаков; б — давление в сосуде выше атмосферного на 40 мм рт. ст.; в — давление в сосуде ниже атмосферного на 40 мм рт. ст.

котором необходимо измерить давление. Давление в сосуде действует на ртуть в одном колене трубки, а атмосферное давление действует на ртуть в другом (открытом) колене трубки. Если давление в сосуде выше атмосферного, то уровень ртути в колене трубки на стороне сосуда понижается, а уровень ртути в открытом колене трубки повышается на такую же величину (рис. 1-2, б). Если давление в сосуде меньше атмосферного, то уровень ртути в открытом колене понижается,

а уровень ртути в колене, соединенном с сосудом, повышается на равную величину (рис. 1-2, а). В любом случае разность высот двух столбов ртути является мерой разности между абсолютным давлением среды в сосуде и атмосферным давлением.

Из рис. 1-2, б видно, что уровень ртути на 20 мм ниже нулевой точки в колене U-образной трубки, соединенной с сосудом, и на 20 мм выше нулевой точки в открытом колене трубки. Это свидетельствует о том, что давление в сосуде выше атмосферного на 40 мм рт. ст. (533 Па). На рис. 1-2, в показано, что уровень ртути понизился на 20 мм в открытом колене трубки и повысился на 20 мм в колене, соединенном с сосудом. Это указывает на то, что давление в сосуде на 40 мм рт. ст. (533 Па) ниже атмосферного. Давление ниже атмосферного обычно называют вакуумом и также измеряют в миллиметрах ртутного столба.

Водяные манометры применяют для измерения небольших давлений. Как указывалось ранее, нормальное атмосферное давление, поддерживающее столб ртути на высоте 760 мм, поднимает столб воды примерно на 10,33 м.

Если требуется повышенная точность измерений, то в показания манометров вносят поправки на колебания температуры, так как все среды подвергаются тепловому расширению и сжатию при изменении температуры.

Основные физические величины, в том числе давление, даны ниже.

Величина	Единица измерения
Длина	м
Площадь	м ²
Объем	см ³
Объемный расход	л/с
Масса	кг
Массовый расход	г/с
Удельный объем	м ³ /кг
Плотность	см ³ /г
Скорость	кг/м ³
Давление	м/с
Сила	Па (Н/м ²)
Работа и энергия	м вод. ст.
Мощность	Н
Удельная теплоспособность (или удельная энтропия)	Дж
Удельная энтальпия	Вт (Дж/с)
Теплопроводность	Дж/(кг·К)
Коэффициент теплопередачи (или теплоотдачи)	Дж/кг
	Вт/(м·К)
	Вт/(м ² ·К)

В связи со слишком большой требуемой длиной трубки и из-за других практических соображений гидравлические манометры обычно не используют для измерения давления намного выше одной атмосферы. Пружинные манометры с трубкой Бурдона широко используют для измерения больших давлений, встречающихся в холодильной технике. Исполнительный механизм пружинного манометра показан на рис. 1-3. Трубка Бур-

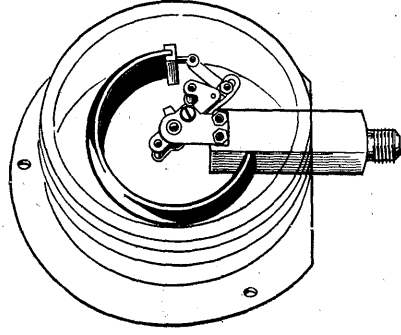


Рис. 1-3. Механизм пружинного манометра

дона представляет собой изогнутую эллиптическую металлическую трубку, которая стремится выпрямиться при повышении давления среды в ней и скручиваться при понижении давления. Любое изменение кривизны трубки передается через систему шестерен на стрелку. Направление и величина перемещения стрелки зависят от направления и величины изменения кривизны трубки.

Пружинными манометрами измеряют давление выше или ниже атмосферного. Приборы, предназначенные для измерения давления выше атмосферного, называются манометрами (рис. 1-4, а), а для измерения давления ниже атмосферного — вакуумметрами (рис. 1-4, б). Давление выше и ниже атмосферного во многих случаях измеряют с помощью мановакуумметров (рис. 1-4, в). Манометры калибруют от 0 до 2000 кПа, вакуумметры — от 0 до —100 кПа, мановакуумметры — от —100 кПа до 1500 кПа.

Абсолютное и манометрическое давление

Абсолютное давление — это «общее», или «действительное», давление среды, а манометрическое давление — это давление, показываемое манометром. Необходимо помнить, что манометры имеют нулевую точку

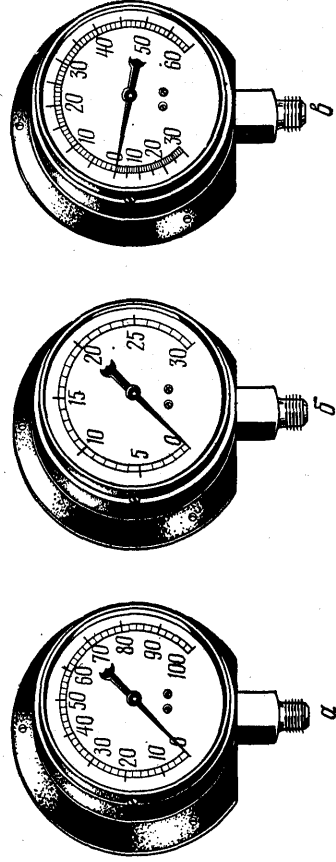


Рис. 1-4. Пружинные приборы для измерения давления:
а — манометр; б — вакуумметр, в — мановакуумметр

при атмосферном давлении. Следовательно, ни гидравлический, ни пружинный манометр не измеряет абсолютное давление среды в сосуде. С помощью манометров определяют только разность между абсолютным давлением среды в сосуде и атмосферным давлением. Когда давление среды выше атмосферного, абсолютное давление среды в сосуде определяют, прибавляя атмосферное давление к манометрическому, а когда давление среды ниже атмосферного, абсолютное давление среды находят, вычитая манометрическое давление из атмосферного. Разница между абсолютным давлением и манометрическим графически показана на рис. 1-5.

Пример 1-9. Манометр, размещенный на холодильном конденсаторе, показывает

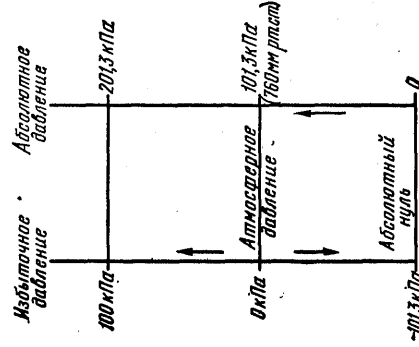


Рис. 1-5. Соотношение между абсолютным и избыточным давлением (манометр имеет нулевую отметку шкалы при атмосферном давлении)

давление 850 кПа. Каково абсолютное давление холодильного агента в конденсаторе? Решение. В связи с тем что не известно показание барометра, принимаем, что атмосферное давление на уровне моря нормальное (101,325 кПа). Так как давление холодильного агента выше атмосферного, то атмосферное давление, равное 101,325 кПа, прибавляем к манометрическому давлению, равному 850 кПа. Следовательно, абсолютное давление агента равно 951,325 кПа.

Пример 1-10. Мановакуумметр на всасывающем патрубке компрессора показывает $-1,5$ кПа, а барометр 758 мм рт. ст. (101 кПа). Определить абсолютное давление пара хладагента на входе в компрессор.

Решение. Так как давление пара на входе в компрессор ниже атмосферного, то манометрическое давление пара ($-1,5$ кПа) вычитаем из атмосферного в 101 кПа. В результате получаем, что абсолютное давление пара равно 99,5 кПа.

Пример 1-11. Давление пара хладагента при сжатии увеличилось с -50 кПа до 630 кПа. Рассчитать, на сколько повысилось давление в килопаскалях.

Решение. Если начальное давление пара ниже атмосферного, то повышение давления пара определяем суммированием двух давлений: $50 + 630 = 680$ кПа.

РАБОТА

Ниже в тексте, если не будет специально указано, давление, выражаемое в килопаскалях (кПа), это манометрическое давление, а давление, обозначаемое в мегапаскалях (МПа), это абсолютное давление.

Механическая работа совершается тогда, когда сила, приложенная к телу, перемещает его на некоторое расстояние. Дейст-

вие силы параллельно направлению движения. Количество совершенной работы A равно силе F , умноженной на расстояние s , на котором действует сила, т. е.

$$A = Fs, \quad (1-25)$$

где A — совершенная работа, Дж; F — сила, Н; s — расстояние, м.

В связи с тем что $F = ma$, то

$$A = mas, \quad (1-26)$$

а в случаях, когда a равно g ,

$$A = mgs. \quad (1-27)$$

Пример 1-12. Вентилятор массой 165 кг поднимают на крышу здания высотой 96 м. Пренебрегая трением и другими потерями, рассчитать совершенную работу.

Решение. В данном случае сила F является гравитационной, т. е. $F = mg$. Следовательно, применяя уравнение (1-27), находим $A = 165 \text{ кг} \times 9,807 \text{ Н/кг} \times 96 \text{ м} = 155343 \text{ Дж} = 155,34 \text{ кДж}$.

Пример 1-13. Большой ящик перемещается на расстояние 110 м на горизонтальном конвейере при силе трения 92 Н. Определить совершенную работу.

Решение. По уравнению (1-25) получаем

$$A = 92 \text{ Н} \times 110 \text{ м} = 10120 \text{ Дж} = 10,12 \text{ кДж}.$$

МОЩНОСТЬ

Мощность — это работа, выполняемая в единицу времени. Единичной мощности является ватт (Вт). Один ватт — это работа в один джоуль, совершенная в одну секунду (Дж/с). Мощность определяют с помощью следующего соотношения:

$$W = A/t = Fs/t = mas/t = mgs/t, \quad (1-28)$$

где W — мощность, Вт; A — работа, Дж; t — время, с.

Пример 1-14. Пренебрегая трением и другими потерями, рассчитать мощность, требуемую для подъема в течение 5 мин вентилятора, описанного в примере 1-12.

Решение. Из примера 1-12 следует, что совершенная работа равна 155343 Дж. Известно, что продолжительность подъема составляет 5 мин (300 с). Применяя уравнение (1-28), находим

$$W = 155343 \text{ Дж} / 300 \text{ с} = 517,81 \text{ Вт}.$$

Пример 1-15. Пренебрегая трением и другими потерями, определить мощность, требуемую для подачи $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ воды в бак, расположенный на высоте 130 м над уровнем земли.

Решение. Принимая плотность воды равной 1000 кг/м^3 , по уравнению (1-28) находим

$$W = 0,02 \text{ м}^3 \times 1000 \text{ кг/м}^3 \times 9,807 \text{ Н/кг} \times \\ \times 130 \text{ м} / 1 \text{ с} = 25498 \text{ Вт} = 25,5 \text{ кВт}.$$

ЭНЕРГИЯ

Считается, что тело обладает энергией, если оно может совершить работу. Энергия, требуемая для совершения определенной работы, всегда точно соответствует выполненной работе. Таким образом, количество энергии в теле всегда равно количеству работы, которое тело может совершить при переходе из одного положения или состояния в другое. Энергия, как и работа, измеряется в джоулях (Дж).

Кинетическая энергия

Согласно представлениям молекулярно-кинетической теории энергия вещества представляется собой сумму кинетической и потенциальной энергии его молекул. Кинетическая энергия тела обусловлена скоростью движения и массой молекул. Например, падающее тело, текущая среда, движущиеся части оборудования обладают кинетической энергией, так как они движутся. Кинетическая энергия тела K_I является функцией его массы m и скорости движения v :

$$K_I = mv^2/2, \quad (1-29)$$

где K_I — кинетическая энергия, Дж; m — масса, кг; v — скорость, м/с.

Пример 1-16. Автомобиль массой 1625 кг движется со скоростью 50 км/ч. Какова его кинетическая энергия?

Решение. Скорость $v = 50 \text{ км/ч} = 13,89 \text{ м/с}$. Применяя уравнение (1-29), находим

$$K_I = 1625 \text{ кг} \times 13,89 \text{ м/с}^2 / 2 = 156,8 \text{ кДж}.$$

Потенциальная энергия

Потенциальная энергия тела обусловлена взаимным расположением и силами сцепления молекул. Работа, которую тело может совершить при переходе из данного положения или состояния в какое-либо исходное положение или состояние, является мерой измерения потенциальной энергии тела. Например, головка копра для забивки свай обладает потенциальной энергией, когда она поднята на некоторую высоту. При падении головки забивает сваю, совершая работу. Сжатая стальная пружина или растянутая

резиновая полоска обладает потенциальной энергией вследствие изменения ее конфигурации. Поэтому они могут совершить работу, так как стремятся вернуться в исходное состояние.

Гравитационную потенциальную энергию тела можно определить по следующему уравнению:

$$P_t = mgl, \quad (1-30)$$

где P_t — потенциальная энергия, Дж; m — масса, кг; g — ускорение свободного падения, Н/кг; l — высота над произвольно выбранной стандартной точкой, м.

Пример 1-17. В баке, расположенном на высоте 110 м над уровнем земли, содержится 150 м³ воды. Определить гравитационную потенциальную энергию воды.

Решение. Принимая, что плотность воды равна 1000 кг/м³, общая масса воды составляет 150000 кг. По уравнению (1-30) находим

$$P_t = 150000 \text{ кг} \times 9,807 \text{ Н/кг} \times 110 \text{ м} = 147105 \text{ кДж.}$$

Суммарная внешняя энергия

Суммарная внешняя энергия тела — это сумма его кинетической и потенциальной энергии.

Пример 1-18. Определить суммарную внешнюю энергию 1 кг воды, протекающей со скоростью 50 м/с по желобу, смонтированному на высоте 200 м над уровнем моря.

Решение. Применяя уравнение (1-29), находим

$$K_t = 1 \text{ кг} \times (50 \text{ м/с})^2 / 2 = 1,25 \text{ кДж.}$$

Потенциальную энергию определяем по уравнению (1-30):

$$P_t = 1 \text{ кг} \times 9,807 \text{ Н/кг} \times 200 \text{ м} = 1,96 \text{ кДж.}$$

Следовательно, суммарная внешняя энергия равна $1,25 + 1,96 = 3,21 \text{ кДж.}$

Закон сохранения энергии

Первое начало термодинамики гласит, что количество энергии в любой термодинамической системе постоянно. Энергия не исчезает и не появляется, а переходит из одной формы в другую.

Работа, совершенная с участием тела для сообщения ему движения, изменения его положения или конфигурации, сохраняется в нем в виде энергии. Во всех случаях сохраняемая энергия равна совершенной работе. В связи с тем что энергия может быть кинетической или потенциальной, она проявляется в самых различных формах, напри-

мер в виде механической, электрической, химической, а также энергии тепловой, и легко переходит из одного вида в другой. Электрическая энергия, например, переходит в теплоту в электрическом тостере или нагревателе, в механическую энергию — в электродвигателях и других электрических аппаратах. Механическая, химическая энергия и теплота преобразуются в электрическую энергию в генераторе, батарее и термопаре соответственно. Химическая энергия преобразуется в теплоту в химических реакциях, например при горении или окислении. Это только несколько примеров бесчисленного количества видов преобразования энергии. Определены многие закономерности преобразования различных форм энергии, причем некоторые из них представляют особый интерес при изучении холодильной техники и потому будут рассмотрены в дальнейшем.

ЗАДАЧИ

1-1. Бак, имеющий размер основания $0,85 \times 1,8 \text{ м}$, заполнен водным раствором хлористого натрия (рассолом) на высоту $0,68 \text{ м}$. Общая масса рассола 1238 кг . Определить удельный объем и плотность рассола.

1-2. Бак с размером основания $1,5 \times 0,7 \text{ м}$ заполнен на высоту $0,8 \text{ м}$ 60%-ным раствором этиленгликоля с плотностью $1,1 \text{ кг/л}$. Каковы общая масса и удельный объем раствора гликоля?

1-3. Постоянная сила в 630 Н действует на тело массой 8 кг . Чему равно ускорение тела?

1-4. Рассчитать силу, требуемую для передачи телу массой 15 кг ускорения 20 м/с^2 .

1-5. Определенная масса воды создаст гравитационную силу в 40 Н . Какова масса воды?

1-6. Рассчитать гравитационную силу тела массой $3,73 \text{ кг}$.

1-7. Исходя из условий задачи 1-1, определить силу и давление, действующие на дно бака.

1-8. Цилиндрический бак высотой $1,1 \text{ м}$ имеет диаметр дна $0,3 \text{ м}$. Если давление на дно бака 1240 Па , какова сила, действующая на дно?

1-9. Барометр показывает 756 мм рт. ст. Каково атмосферное давление в паскалях? Каково абсолютное давление в паскалях?

1-10. Ртутный манометр показывает абсолютное давление в паскалях.

1-11. Манометр на холодильном конденсаторе показывает 832 кПа , а барометр на стене показывает 770 мм рт. ст. Каково абсолютное давление холодильного агента в конденсаторе?

1-12. Манометр на стороне всасывания холодильного компрессора показывает 35 кПа, а манометр на стороне нагнетания — 680 кПа. На сколько повысилось давление пара холодильного агента в цикле сжатия?

1-13. Абсолютное давление пара на входе в компрессор 0,09 МПа, а абсолютное давление нагнетаемого пара 0,85 МПа. Определить, на сколько повысилось давление пара в цикле сжатия.

1-14. Пренебрегая трением и другими потерями, определить мощность, требуемую

для объемной подачи $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$ воды по вертикали на 30 м.

1-15. Поток воды в трубе имеет среднюю скорость $2,3 \text{ м/с}$. Какова кинетическая энергия 1 кг воды?

1-16. Автомобиль, имеющий массу 8500 кг, движется со скоростью 105 км/ч . Рассчитать кинетическую энергию.

1-17. На протяжении 630 км русло реки имеет перепад высоты $0,7 \text{ м/км}$. Какова общая потеря потенциальной энергии 1 кг воды, протекающей по данному участку реки?

Глава 2.

ВЕЩЕСТВО, ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ, ТЕПЛОТА, ТЕМПЕРАТУРА

ТЕПЛОТА

Теплота является видом энергии. Это очевидно из того, что теплота может быть преобразована в другие виды энергии, и наоборот. Термодинамически теплота определяется как энергия, переходящая из одного тела в другое в результате разности температур между двумя телами. Все другие виды перехода энергии происходят в виде работы.

МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Все, что имеет массу или занимает определенный объем, т. е. любое вещество, состоит из молекул. Молекула — это наименьшая частица данного вещества, на которую его можно разделить с сохранением первоначальных свойств. Например, крупницу поваренной соли (NaCl) можно разделить на отдельные молекулы, и каждая молекула будет молекулой соли, т. е. первоначального вещества. Однако все молекулы состоят из атомов. Так, молекула соли состоит из одного атома натрия и одного атома хлора. Поэтому, если молекула соли разделена на атомы, последние не будут атомами соли, т. е. первоначального вещества, а атомами двух совершенно различных веществ, а именно: одного атома натрия и одного атома хлора.

Существуют некоторые вещества, молекулы которых состоят только из одного атома. Молекула кислорода O_2 , например, состоит из двух атомов кислорода. Если молекулу кислорода разделить на два составляющих его атома, то каждый атом будет атомом кислорода, т. е. первоначального вещества. Однако атомы кислорода не будут стойкими в этом состоянии. Они не останутся свободными, и отдельные атомы кислорода при возможности будут соединяться с атомами или молекулами другого вещества, образуя новое соединение, или будут соединяться друг с другом, повторно образуя молекулы кислорода.

Молекулы, составляющие вещество, находятся в непрерывном движении и связаны между собой силами взаимного притяжения, т. е. сцепления. Силы притяжения, имеющиеся в молекулах, можно сравнить с притяжением, которое существует между противоположными электрическими зарядами или между противоположными магнитными полюсами. При увеличении расстояния между молекулами силы взаимного притяжения уменьшаются. Между молекулами имеется некоторое пространство, и они относительно свободно перемещаются. Известно также, что молекулы находятся в состоянии постоянной и быстрой вибрации или движения, причем интенсивность

и величина вибрации или движения зависят от количества заключенной в них энергии.

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ТЕЛА

В главе I было указано, что тело обладает внешней механической энергией вследствие его движения, а также изменения положения или конфигурации относительно какого-либо исходного состояния. Наличие внутренней энергии тела обусловлено движением, положением или конфигурацией составляющих его молекул. Молекулы любого материала обладают кинетической и потенциальной энергией. Общая внутренняя энергия материала является суммой внутренней кинетической и потенциальной энергии. Это характеризуется уравнением

$$U = K + P, \quad (2-1)$$

где U — общая внутренняя энергия; K — внутренняя кинетическая энергия; P — внутренняя потенциальная энергия.

Внутренняя кинетическая энергия — это энергия движения молекул. Когда энергия передается веществу, в результате чего увеличивается скорость движения его молекул, внутренняя кинетическая энергия и температура вещества повышаются. И наоборот, если внутренняя кинетическая энергия вещества уменьшается, то движение молекул замедляется и температура будет соответственно понижаться.

Очевидно, что температура тела является показателем средней скорости движения молекул тела. В соответствии с молекулярно-кинетической теорией, если внутренняя кинетическая энергия уменьшится до нуля, то температура тела снизится до абсолютного нуля ($-273,15^\circ \text{C}$) и прекратится всякое движение молекул.

СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Вещество может быть в трех различных фазовых, или агрегатных, состоя-

ниях: твердом, жидком, паро- или газообразном. Например, вода — это жидкость, но в виде льда она в твердом состоянии и, кроме того, может быть в виде пара (газа).

Влияние теплоты на фазовое состояние вещества

Многие вещества могут быть в любом из фазовых состояний при соответствующих давлении и температуре. Ниже будет показано, что количество энергии в молекулах вещества определяет не только температуру, но и фазовое состояние его. Другими словами, в результате подвода или отвода энергии фазовое состояние вещества, а также его температура могут измениться.

Примером изменения фазового состояния вещества является расплавление металла при подводе достаточного количества теплоты. Явления плавления льда и кипения воды знакомы каждому. Переход вещества из одного фазового состояния в другое вызван изменением его внутренней энергии.

Внутренняя потенциальная энергия вещества зависит от взаимного расположения молекул и сил их сцепления. Чем больше расстояние между молекулами, тем больше внутренняя потенциальная энергия вещества.

Расстояние между молекулами увеличивается и силы взаимного притяжения молекул быстро убывают, когда тело расширяется или изменяется его фазовое состояние при подводе энергии.

Необходимо понимать, что в данном случае энергия, сообщаемая телу, не влияет на скорость движения молекул (внутреннюю кинетическую энергию), а воздействует только на степень молекулярного разделения (внутреннюю потенциальную энергию).

Твердая фаза

Вещество в твердой фазе обладает относительно небольшой внутренней по-

тениальной энергией. Молекулы связаны довольно плотно силами взаимного притяжения и силой тяжести. Вещество в твердой фазе имеет довольно жесткую молекулярную структуру, в которой положение каждой молекулы более или менее определенное, а движение молекул ограничено их вибрацией, амплитуда которой может быть меньшей или большей в зависимости от внутренней кинетической энергии.

Твердое вещество сохраняет свои размеры и форму вследствие жесткой молекулярной структуры. Твердое вещество практически не сжимается и оказывает значительное сопротивление любой попытке изменить его форму.

Жидкая фаза

Молекулы вещества в жидкой фазе обладают большей энергией, чем молекулы в твердой фазе, и они не так плотно соединены друг с другом. Это позволяет им преодолеть в некоторой степени силы притяжения и иметь большую свободу движения. Они могут перемещаться таким образом, что материал может «течь». Жидкость практически несжимаема, сохраняет свой объем и приобретает форму любого сосуда, в котором находится.

Паровая, или газовая, фаза

Молекулы вещества, находящегося в газовой фазе, обладают большей энергией, чем молекулы вещества в жидкой фазе. Они не соединены друг с другом силами притяжения, и на них не воздествует сила тяжести. Следовательно, молекулы газа перемещаются с большой скоростью, непрерывно сталкиваясь друг с другом и со стенками сосуда. В связи с этим газ легко сжимается и заполняет полностью сосуд, в котором находится. Кроме того, если газ не заключен в герметичный сосуд, то произойдет его утечка в окружающую среду.

ТЕМПЕРАТУРА

Температура — это свойство вещества и мера измерения уровня теплового воздействия на тело. Высокая температура указывает на то, что тепловое воздействие на тело большое и оно горячее. Таким же образом низкая температура указывает на малое тепловое воздействие на тело и то, что оно холодное. Ранее говорилось, что температура — это функция внутренней кинетической энергии и, таким образом, характеризует среднюю скорость движения молекул.

Чаще всего температуру измеряют с помощью термометра. Принцип действия большинства термометров основан на способности жидкости к расширению или сжатию соответственно при повышении и понижении температуры. В термометрах чаще всего используют спирт или ртуть из-за их низкой температуры замораживания и относительно постоянных коэффициентов расширения. Ртутный термометр наиболее точен, так как коэффициент расширения у ртути более постоянен в широком диапазоне температур, чем у спирта. Однако недостатками ртутного термометра являются его более высокая стоимость и трудность считывания показаний. Спирт более дешевое вещество и может быть окрашен для облегчения считывания.

В настоящее время широкое распространение имеет температурная шкала Цельсия. Точка, при которой вода замерзает при стандартном барометрическом давлении, принимается в качестве нулевой точки шкалы Цельсия, а точка кипения воды при стандартном барометрическом давлении обозначается цифрой 100. Расстояние на шкале между этими двумя точками разделено на 100 одинаковых единиц, называемых градусами, и потому разность между точками замерзания и кипения воды по шкале Цельсия равна 100°. Вода замерзает при 0°C и кипит при 100°C.

Шкала Цельсия имеет условную точку нуля. Для определения только изме-

нения температуры в процессе или температуры вещества относительно какой-либо известной справочной точки показания термометра со шкалой Цельсия достаточно верны. Однако при необходимости использовать значение температуры

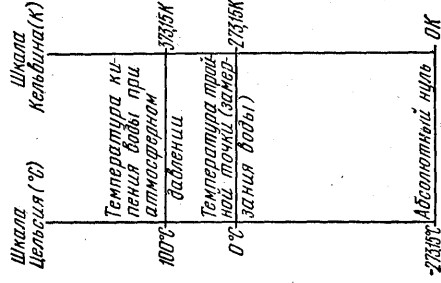


Рис. 2-1. Сравнение шкал температур по Кельвину и Цельсию

туры в уравнениях некоторых фундаментальных законов требуются значения температуры по шкале с действительной нулевой точкой, т. е. температурой абсолютного нуля. Экспериментально доказано, что такая точка находится примерно на уровне -273°C (рис. 2-1).

Температуру по шкале Цельсия можно перевести в абсолютную температуру, отсчитываемую по шкале Кельвина, сложением 273 с показанием по шкале Цельсия. Цена деления в 1°C равна цене деления в 1°K .

Для перевода из шкалы Цельсия в абсолютную температуру и наоборот используют следующие соотношения:

$$\begin{aligned} K &= ^{\circ}\text{C} + 273; & (2-2) \\ ^{\circ}\text{C} &= K - 273. & (2-3) \end{aligned}$$

Пример 2-1. Если температура газа 100°C , какова температура в градусах Кельвина? Решение. Применяя уравнение (2-2), находим

$$K = 100^{\circ}\text{C} + 273 = 373 \text{ K}.$$

Пример 2-2. Температура пара на стороне всасывания холодильного компрессора -30°C . Определить абсолютную температуру в градусах Кельвина.

Решение. Применяя уравнение (2-2), находим

$$K = -30^{\circ}\text{C} + 273 = 243 \text{ K}.$$

НАПРАВЛЕНИЕ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Теплота передается от одного тела к другому только в том случае, если между телами существует разность температур. Когда тело находится в тепловом равновесии с окружающей средой (т. е. имеет ту же температуру), передачи энергии в форме теплоты между телом и окружающей средой не происходит. Теплопередача всегда имеет место из зоны с высокой температурой в зону с более низкой температурой (от теплого тела к более холодному) и никогда в обратном направлении. Теплота — это энергия, которая не уничтожается или не исчезает в каком-либо процессе. Теплота покидает одно тело и поглощается другим, температура которого ниже тела, теряющего энергию. Интенсивность теплопередачи всегда пропорциональна разности температур, вызывающей ее.

СПОСОБЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Передача энергии в виде теплоты осуществляется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность

Явление теплопроводности наблюдается тогда, когда энергия передается при непосредственном контакте между молекулами одного тела или между молекулами двух или более тел, имеющих тепловой контакт друг с другом. В любом случае одни молекулы передают свою энергию другим молекулам, располо-

женным рядом с ними. Передачу энергии от молекулы к молекуле посредством теплопроводности можно сравнить с передачей всей или части энергии движения одного шара в момент удара другим шаром на бильярдном столе.

При нагревании одного конца металлического стержня над пламенем часть теплоты переходит за счет теплопроводности от молекулы к молекуле по направлению к более холодному концу. Когда молекулы нагретого конца стержня поглощают энергию, они движутся быстрее и на большее расстояние, ударяются о другие молекулы, находящиеся рядом с ними. В момент удара быстрая движущаяся молекула передает часть своей энергии более медленно движущимся соседним молекулам, в результате чего последние начинают двигаться быстрее. Таким образом энергия передается от молекулы к молекуле от нагретого конца стержня к холодному. Естественно, что молекулы, находящиеся дальше от источника теплоты, обладают меньшей энергией, чем молекулы у нагретого конца.

При прохождении теплоты через металлический стержень воздух, окружающий стержень, также нагревается за счет теплопроводности. Быстро вибрирующие молекулы нагретого стержня соударяются с молекулами воздуха, находящимися в контакте со стержнем. Энергия, передаваемая таким образом молекулам воздуха, заставляет их двигаться с большей скоростью и передавать свою энергию другим близким расположенным молекулам воздуха. Так, часть теплоты, воспринимаемой металлическим стержнем, передается и уносится окружающим воздухом. Если подачу теплоты к стержню прекращают, окружающий воздух будет продолжать поглощать теплоту от стержня, пока температура стержня не уравнивается с температурой воздуха. Когда это произойдет, система будет находиться в состоянии равновесия и не будет происходить теплопередачи.

Интенсивность передачи теплоты посредством теплопроводности, как указывалось ранее, прямо пропорциональна разности температур между телами с высокой и низкой температурой. Однако интенсивность передачи теплоты неодинакова в различных материалах. Некоторые материалы, например металлы, передают теплоту очень быстро, а другие, такие, как стекло, дерево и пробка, плохо поглощают теплоту. Следовательно, при любой данной разности температур интенсивность теплопередачи вследствие теплопроводности через различные материалы одинаковой длины и поперечного сечения будет неодинаковой. Относительную способность материала проводить теплоту называют теплопроводностью. Материалы, которые хорошо проводят теплоту, обладающую высокой теплопроводностью, а материалы, являющиеся плохими проводниками, имеют низкую теплопроводность и используются в качестве теплоизоляции.

Твердые вещества являются лучшими проводниками теплоты, чем жидкости, а жидкости — лучшими, чем газы, что обусловлено различной молекулярной структурой. В связи с тем, что в газе молекулы находятся на значительном расстоянии друг от друга, теплопередача теплопроводностью, т. е. непосредственным контактом между молекулами, затруднена.

Конвекция

Теплопередача конвекцией происходит в том случае, когда теплота переносится из одного места в другое посредством токов какой-либо текучей среды. Эти токи называются конвекционными и являются результатом изменения плотности среды из-за расширения ее нагретой части.

Когда любая часть среды нагревается, она расширяется и ее объем на единицу массы увеличивается. Нагретая часть становится легче, она поднимается вверх и немедленно замещается более

холодной и тяжелой частью среды. Например, воду, налитую в бак, нагревают с помощью горелки, расположенной в центре дна бака (рис. 2-2). Теплота передается через металлическое дно бака переносится в воду. По мере поглощения теплоты

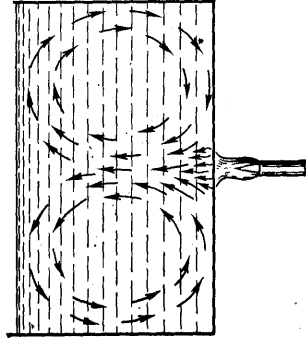


Рис. 2-2. Конвективные токи воды в баке при ее нагревании

воды, расположенной вблизи горелки, температура воды повышается, и вода расширяется. Нагретая вода, которая легче окружающей воды, поднимается вверх и замещается более холодной и более плотной водой, находящейся по сторонам. При нагревании эта часть воды так же поднимается вверх и так же замещается более холодной водой. При продолжении этого процесса теплота распределяется во всей массе воды посредством конвекционных токов, образовавшихся в массе воды.

Теплые токи воздуха, например над плитами и другими теплыми телами, знакомы каждому. На рис. 2-3 показано,

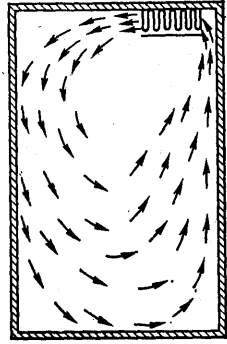


Рис. 2-3. Комната, нагреваемая за счет естественной конвекции воздуха

как используют конвекционные токи для распространения теплоты во всем нагреваемом пространстве.

Излучение

Теплопередача излучением происходит движущимися волнами, подобными световым, когда энергия передается от одного тела к другому без промежуточной среды. Энергия в форме теплоты, передаваемая волновым движением, называется лучистой энергией.

Известно, что молекулы тела находятся в состоянии быстрой вибрации, которая создает волновое движение в окружающей тело среде. Так, внутренняя энергия тела преобразуется в лучистую энергию волн. Когда эти волны энергии воспринимаются другим телом, они поглощаются им, увеличивая его внутреннюю энергию. Так, Земля получает теплоту от Солнца посредством излучения. Энергия вибрации молекул на Солнце передается в виде волн лучистой энергии пространству вокруг Солнца. Энергия волн проходит через миллиарды километров космического пространства и передается Земле или любым другим материальным телам на их пути. Лучистая энергия поглощается и преобразуется во внутреннюю энергию, т. е. вибрационное движение молекул горячего тела (в данном примере Солнца) воспроизводится в молекулах более холодного тела (Земли).

Все вещества отдают и поглощают теплоту в виде лучистой энергии. Если температура тела выше температуры окружающей среды, то оно излучает больше теплоты, чем поглощает. Внутренняя энергия тела уменьшается при передаче энергии окружающей среде. Если нет разности температур, то тело находится в состоянии энергетического равновесия, т. е. тело ни приобретает, ни отдает энергии.

Передача теплоты через вакуум невозможна ни теплопроводностью, ни конвекцией, так как по характеру проте-

кания процесса необходимо исключить промежуточной среды. В связи с тем что для передачи лучистой энергии промежуточная среда необходима, то она может передаваться через вакуум. Кроме того, когда лучистая энергия передается от горячего тела к холодному через промежуточную среду, например воздух, она не влияет на его температуру. Например, теллота излучается «теплой» стеной и передается «холодной» через слой воздуха, не оказывая заметного влияния на его температуру. В воздухе молекулы находятся на большом расстоянии друг от друга, в связи с чем волны лучистой энергии могут легко проходить между ними, и только незначительная часть ее поглощается молекулами воздуха. Большая часть лучистой энергии поглощается твердым веществом, структура молекул которого наиболее компактна и жесткая.

Тепловые лучи подобны световым и отличаются только длиной волны и частотой. Световые лучи имеют такую длину волны, что являются видимыми. Видимость тепловых лучей зависит от температуры излучающего тела. Например, когда металл нагревается до достаточно высокой температуры, он начинает «светиться», т. е. испускает видимые тепловые лучи (свет).

Когда лучи энергии (видимые или невидимые) попадают на тело, они могут быть отражены, преломлены, поглощены им или пройти сквозь него.

Количество лучистой энергии, которое пройдет сквозь материал, зависит от степени его прозрачности. Очень прозрачные материалы, например чистое стекло или воздух, пропускают большую часть лучистой энергии, а непрозрачные материалы, например дерево, металл или пробка, не пропускают ее.

Количество лучистой энергии, которое отражается или поглощается материалом, зависит от поверхности материала (текстуры и цвета). Материал светлого цвета и с хорошо отполированной поверхностью, например зеркало, отража-

ет максимальное количество лучистой энергии, а материалы с шероховатой, тусклой, темной поверхностью поглощают максимальное количество лучистой энергии.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ФОРМЕ ТЕПЛОТЫ

Количество теплоты Q измеряют в джоулях. Интенсивность потока теплоты, которую также обозначают символом Q , обычно выражают в джоулях в секунду (Дж/с), или в ваттах (Вт). Интересно отметить, что интенсивность теплотового потока имеет ту же единицу измерения, что и мощность.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Удельная теплоемкость c — это количество теплоты в калориях, требуемое для изменения температуры 1 кг вещества на 1°C или 1°K . Например, удельная теплоемкость латуни равна $0,195 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Это означает, что необходимо израсходовать $0,195 \text{ кДж}$ теплоты для повышения температуры 1 кг латуни на 1°C или 1°K . И наоборот, от 1 кг латуни должно быть отведено $0,195 \text{ кДж}$ теплоты для понижения ее температуры на 1°C или 1°K .

Хотя удельная теплоемкость любого вещества зависит от температуры, для большинства жидкостей и твердых веществ это изменение незначительно для обычных расчетов. Удельную теплоемкость можно считать величиной постоянной. Вместе с тем удельная теплоемкость вещества зависит от его фазового состояния. Например, удельная теплоемкость воды $4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, а удельная теплоемкость льда $2,095 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

На величину удельной теплоемкости газа влияет его температура. Удельная теплоемкость газа рассмотрена в главе 3. Наиболее часто используемые величины приведены ниже.

Стандартное ускорение силы тяжести g_c	9,80665 м/с ²
Нормальное атмосферное давление	101325 Па 760 мм рт. ст.
Вода	
Плотность	1000 кг/м ³ 1 кг/л
Удельная теплоемкость	4,19 кДж/(кг·К)
Скрытая теплота плавления льда при 0°С	335 кДж/кг
Скрытая теплота парообразования при 100°С	2257 кДж/кг
Воздух	
Плотность (стандартная)	1,2 кг/м ³
Удельная теплоемкость	1 кДж/(кг·К)

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ

Из определения удельной теплоемкости очевидно, что количество теплоты, полученной или отведенной от любой массы материала для изменения температуры, можно определить из следующей формулы:

$$Q = mc (T_2 - T_1), \quad (2-4)$$

где Q — количество теплоты, кДж; m — масса, кг; c — удельная теплоемкость, кДж/(кг·К); T_1, T_2 — начальная и конечная температура соответственно, °С или К.

Обратите внимание на то, что в уравнении (2-4) массу можно заменить массовым расходом. В данном случае Q будет интенсивностью потока теплоты, а не количеством теплоты.

Пример 2-3. Воду массой 20 кг нагревают с 25 до 80°С. Рассчитать количество израсходованной теплоты.

Решение. Применяя уравнение (2-4), находим

$$Q = 20 \text{ кг} \times 4,19 \text{ кДж/(кг·К)} \times (80^\circ\text{С} - 25^\circ\text{С}) = 4609 \text{ кДж.}$$

Пример 2-4. Предположим, что 0,2 м³/с воды охлаждается от 39 до 2°С. Рассчитать количество отведенной теплоты (в кДж/с и в кВт).

Решение. Из данных, приведенных на с. 24, находим, что средняя плотность воды равна 1000 кг/м³. Массовый расход составляет $0,2 \times 1000 = 200 \text{ кг/с}$.

По уравнению (2-4) вычисляем

$$Q = 200 \text{ кг/с} \times 4,19 \text{ кДж/(кг·К)} \times (2^\circ\text{С} - 39^\circ\text{С}) = -31006 \text{ кДж/с (кВт).}$$

Обратите внимание, что результаты, полученный в примере 2-4, будет отрицательным, когда $T_2 < T_1$. Это указывает на то, что теплота отводится от рассматриваемого материала, а не передается ему. Знаком «минус» обычно пренебрегают, за исключением случаев решения задач с энергетическим балансом.

СУХАЯ И СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА

Теплота, переданная веществу или отведенная от него, может вызвать изменение фазового состояния или температуры вещества. Для удобства теплоту в зависимости от того эффекта, который она оказывает на вещество, делят на два вида. Теплоту, которая вызывает изменение температуры вещества, называют сухой теплотой, а теплоту, расходуемую на изменение фазового состояния вещества, — скрытой теплотой.

Агрегатное состояние большинства веществ при повышении температуры изменяется. Сначала вещество переходит из твердой фазы в жидкую, а затем, когда температура жидкости продолжает повышаться до уровня, после которого вещество не может существовать в виде жидкости, оно превращается в пар. Теплоту, которую подводят или отнимают от вещества при переходе из твердой фазы в жидкую или наоборот, называют скрытой теплотой плавления.

Теплоту, которую подводят к жидкости для превращения ее в пар или отводят от пара для превращения его в жидкость, называют скрытой теплотой парообразования.

Сухая теплота твердого вещества

Для лучшего понимания молекулярной (внутренней) энергии вещества рассмотрим возрастающее влияние энергии, поглощаемой твердым веществом, на его состояние, если начальная температура вещества равна абсолютному нулю (0 К). Теоретически молекулы вещества при этом условии не обладают энергией и находятся в состоянии полного покоя.

Когда энергия передается твердому веществу в форме теплоты или работы, молекулы начинают медленно вибрировать и температура вещества повышается. При дальнейшем увеличении передаваемой энергии температура и скорость движения молекул твердого вещества продолжают расти. Это будет происходить до тех пор, пока температура твердого вещества не достигнет точки плавления. Общее количество теплоты, требуемое для повышения температуры твердого вещества от абсолютного нуля до температуры плавления, называется сухой теплотой вещества и может быть рассчитано с помощью уравнения (2-4).

Скрытая теплота плавления

При достижении температуры плавления скорость движения молекул твердого вещества в пределах жесткой молекулярной структуры максимальна. В этой точке любое дополнительное количество теплоты, полученное твердым веществом, вызывает частичное его плавление, а если подается достаточное количество теплоты, вся масса твердого вещества переходит в жидкую фазу, в то время как температура остается постоянной. Это относится только к кристаллическим твердым веществам. Некристаллические твердые вещества, например стекло, не имеют постоянной температуры плавления, т. е. она колеблется при изменении фазового состояния. Однако при расчете количества теплоты обычно принимают, что температура постоянна во время изменения фазового состояния.

Температура плавления зависит от вида вещества и давления. Например, при нормальном атмосферном давлении температура плавления свинца равна примерно 315°C , меди — 1095°C и льда — 0°C . Температура плавления понижается с повышением давления, за исключением температуры плавления некристаллических твердых веществ. Их температура плавления повышается при

увеличении давления. В большинстве случаев влияние давления на температуру плавления незначительно. Она остается практически постоянной в отношении только широком диапазоне давлений.

Энергия в форме теплоты, полученная веществом во время перехода из твердой фазы в жидкую, используется молекулами для частичного преодоления межмолекулярных сил притяжения. Поэтому молекулы могут перемещаться относительно друг друга, в результате чего вещество из твердой фазы переходит в жидкую. В жидкой фазе вещество приобретает форму сосуда, в котором оно находится.

Между молекулами твердого вещества существует значительное притяжение, и для его преодоления требуется относительно большое количество энергии. Скрытая теплота плавления любого вещества — это количество энергии, приходящейся на единицу массы для превращения его в жидкое состояние из твердого или наоборот.

Следует подчеркнуть, что изменение фазового состояния в любом направлении происходит при одной температуре, т. е. температура, при которой твердое вещество превращается в жидкое, та же, при которой жидкость замерзает, образуя твердое вещество. Кроме того, количество теплоты, требуемой для изменения фазового состояния, одинаково в любом случае и может быть определено из следующего уравнения:

$$Q = m\lambda, \quad (2-5)$$

где Q — количество теплоты, кДж; m — масса, кг; λ — скрытая теплота плавления, кДж/кг.

Пример 2-5. Определить количество скрытой теплоты, отданной 10 кг воды, температура которой 0°C , при ее замерзании, если скрытая теплота плавления воды 335 кДж/кг .
Решение. Применяя уравнение (2-5), находим

$$Q = 10 \text{ кг} \times 335 \text{ кДж/кг} = 3350 \text{ кДж}.$$

Пример 2-6. Предположим, что 25 кг льда поглощают 20 кДж теплоты при 0°C . Сколько льда превратится в воду?

Р е ш е н и е. Преобразуя уравнение (2-5), определяем

$$m = 20 \text{ кДж} : 335 \text{ кДж/кг} = 0,06 \text{ кг}.$$

Пример 2-7. Рассчитать количество теплоты, необходимое для плавления 150 кг льда в час (2,5 кг/с).

Р е ш е н и е. По уравнению (2-5) вычисляем

$$Q = 2,5 \text{ кг/с} \times 335 \text{ кДж/кг} = 837,5 \text{ кДж/с, или кВт}.$$

Теплота жидкости

Вещество переходит из твердой фазы в жидкую при определенной температуре плавления. Если жидкость перестает быть в контакте с расплавленным твердым веществом, то ее температуру можно повысить, дополнительно подавая теплоту. Теплота, получаемая жидкостью (после изменения фазового состояния), увеличивает внутреннюю кинетическую энергию (скорость движения молекул) жидкости, и ее температура соответственно повышается. Постепенно достигается точка, при которой молекулы жидкости движутся с наибольшей скоростью. Температура жидкости будет максимальной при том же давлении, и любое добавление энергии в форме теплоты вызывает превращение части жидкости в пар. При дополнительной подаче теплоты жидкость продолжает испаряться и превращаться в пар, а ее температура остается постоянной (при условии, что давление жидкости неизменно).

Общее количество теплоты, полученной жидкостью при повышении ее температуры от температуры плавления до температуры парообразования, называют теплотой жидкости и рассчитывают по уравнению (2-4).

Температуру, при которой вещество переходит из жидкой фазы в пар или, наоборот, из пара в жидкость, называют температурой насыщения. Жидкость при температуре насыщения называется насыщенной жидкостью, а пар — насыщенным паром. При любом данном давлении температура насыщения — это

максимальная температура жидкости и минимальная температура пара.

Температура насыщения для различных жидкостей неодинакова и зависит от давления. Например, железо испаряется приблизительно при 2455°C , медь — при 2345°C , а свинец — при 1650°C . При атмосферном давлении вода кипит при 100°C , а спирт при 77°C . Некоторые жидкости кипят при исключительно низкой температуре. Так, температура кипения аммиака, кислорода и гелия при нормальном атмосферном давлении — 33°C , -182°C и -269°C соответственно.

Влияние давления на температуру насыщения жидкостей рассмотрено более подробно в главе 4.

Скрытая теплота парообразования

Любая энергия в форме теплоты, получаемая жидкостью после достижения ею температуры насыщения, уменьшает силы взаимного притяжения молекул (увеличивает внутреннюю потенциальную энергию), и жидкость переходит в паровую фазу¹. При изменении фазового состояния внутренняя кинетическая энергия (скорость движения молекул) не увеличивается, температура жидкости и пара остается постоянной, равной температуре насыщения.

При переходе вещества из жидкой фазы в пар его молекулы получают достаточно энергии для преодоления сил взаимного притяжения, включая силу тяжести. Количество энергии, необходимое для совершения внутренней работы по преодолению этих сил, очень велико. Поэтому при переходе из жидкой фазы в пар вещество поглощает значительно

¹ Часть энергии, полученной веществом, расходуется на совершение внешней работы и не влияет на внутреннюю энергию вещества. Когда давление постоянное, количество совершенной работы пропорционально изменению объема вещества. Внешняя работа рассмотрена на с. 27.

больше энергии, чем при переходе из твердой фазы в жидкую. Количество энергии, которую 1 кг жидкости поглощает при переходе из жидкой фазы в пар или отдает при переходе из паровой фазы в жидкую, называют скрытой теплотой парообразования. Скрытая теплота парообразования неодинакова для различных жидкостей и так же, как и температура насыщения, зависит от давления данной жидкости. Вообще, когда давление увеличивается, температура насыщения жидкости повышается, а скрытая теплота парообразования уменьшается.

Количество теплоты, требуемой для кипения или конденсации любой жидкости при температуре насыщения, можно определить из следующего уравнения:

$$Q = m r, \quad (2-6)$$

где Q — количество теплоты, кДж; m — масса, кг; r — скрытая теплота парообразования, кДж/кг.

Пример 2-8. Определить количество энергии, требуемой для испарения 2 м³ воды при 100°С, если скрытая теплота парообразования воды при данной температуре равна 2257 кДж/кг.

Решение. Плотность воды примерно равна 1000 кг/м³ (см. с. 24) и общая масса воды составляет 2000 кг. По уравнению (2-6) рассчитываем

$$Q = 2000 \text{ кг} \times 2257 \text{ кДж/кг} = 4514000 \text{ кДж.}$$

Пример 2-9. В открытом сосуде при нормальном атмосферном давлении имеется 50 кг воды при 90°С. Количество теплоты, полученной водой при нагревании, равно 40000 кДж. Сколько воды при этом испарится?

Решение. Вода должна быть сначала нагрета до температуры насыщения. Применяя уравнение (2-4), определяем, сколько теплоты получила вода при нагревании от 90 до 100°С:

$$Q = 50 \text{ кг} \times 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \times (100^\circ\text{С} - 90^\circ\text{С}) = 2095 \text{ кДж.}$$

Вычитая эту теплоту из общего количества подведенной теплоты, находим скрытую теплоту парообразования:

$$Q = 40000 \text{ кДж} - 2095 \text{ кДж} = 37905 \text{ кДж.}$$

Преобразуя уравнение (2-6), получаем $m = 37905 \text{ кДж} : 2257 \text{ кДж/кг} = 16,79 \text{ кг.}$

Теплота перегретого пара

Когда жидкость испарилась, температуру образовавшегося пара можно еще повысить при его нагревании. Теплоту, добавляемую пару после его образования, обычно называют теплотой перегретого пара. Пар, температура которого выше температуры насыщения, называют перегретым паром. Вопросы, связанные с перегретым паром, рассматриваются подробно в главе 4.

ВНЕШНЯЯ РАБОТА

Выше было показано, что внутреннюю кинетическую и потенциальную энергию вещества можно увеличить или уменьшить, если соответственно подвести или отнять от него энергию. Необходимо признать, однако, что не вся полученная веществом энергия сохраняется в нем и увеличивает внутреннюю энергию. Очень часто некоторое количество энергии, переданное веществу, поглощается им и превращается в механическую работу. Следовательно, энергия может быть передана веществу как в виде механической работы, так и в виде теплоты. Например, головка гвоздя, по которой ударяют молотком, нагревается при переходе части механической энергии молотка во внутреннюю энергию гвоздя. Скорость движения молотка металла, из которого изготовлен гвоздь, под действием удара молотка увеличивается, и температура головки гвоздя повышается. Если быстро согнуть и разгибать проволоку, то гнущаяся часть проволоки становится горячей той же причине. Кроме того, всем знакомо повышение температуры двух трущихся поверхностей в месте контакта.

Внешняя энергия тела часто преобразуется во внутреннюю энергию, и наоборот. Например, пуля, летящая к цели, обладает кинетической энергией из-за своей массы и скорости движения. При ударе в цель пуля теряет скорость дви-

жения и часть ее кинетической энергии превращается в потенциальную энергию пули и цели.

ЗАДАЧИ

2-1. 150 кг воды нагревают с 15 до 85° С. Сколько затрачено тепловой энергии?
2-2. Вода в количестве 2 м³ охлаждает-

ся от 30 до 2° С за 1 с. Рассчитать интенсивность теплопередачи.

2-3. Сколько расходуется теплоты в секунду при плавлении льда с интенсивностью 12,36 кг/с?

2-4. Определить, сколько расходуется теплоты для испарения 50 кг воды при температуре насыщения 100° С.

2-5. Теплота в количестве 5000 кДж передается 20 кг воды при 65° С. Сколько воды испарится?

Глава 3 ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫ НА ОБЪЕМ

При увеличении энергии вещества повышается скорость движения молекул, уменьшаются силы сцепления молекул, увеличивается среднее расстояние между молекулами, в результате чего вещество занимает больший объем. Это происходит в соответствии с молекулярно-кинетической теорией, описанной ранее. Следовательно, когда энергия передается веществу или отводится от вещества, находящегося в одном из трех фазовых состояний, оно расширяется или сжимается, т. е. объем увеличивается или уменьшается соответственно с приобретением или потерей энергии.

Вода является исключением из этого правила. Если воду охлаждать, ее объем уменьшается до тех пор, пока температура не будет примерно 4°С. В этой точке вода имеет максимальную плотность и при дальнейшем охлаждении она снова расширяется, пока температура не снизится до 0°С. Затем вода замерзает, что сопровождается еще большим расширением. Один кубический метр воды при замерзании занимает объем 1,085 м³. Во время процесса затвердевания возникает огромная сила расширения, которой достаточно для разрыва стальных труб или сосудов с ограниченным объемом.

Процесс расширения воды при замерзании как будто бы противоречит у-

тверждению, что молекулы вещества ближе друг к другу в твердой фазе, чем в жидкой, но в данном случае это не так. Это очевидное противоречие объясняется тем фактом, что лед — это кристаллическое твердое вещество. Молекулы действительно находятся ближе друг к другу в твердой фазе, так как они группируются, образуя кристаллы. Относительно большое пространство между кристаллами в твердой фазе, а не увеличение среднего расстояния между молекулами является причиной необычного увеличения объема при затвердевании.

РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ И ЖИДКОСТЕЙ

В процессе нагревания твердого или жидкого вещества его объем увеличивается при повышении температуры. Как указывалось ранее, многие приборы для измерения температуры основаны на этом принципе. Величина расширения вещества при повышении температуры на 1°С называется коэффициентом расширения.

Твердые и жидкие вещества не являются легкосжимаемыми материалами. Если твердое или жидкое вещество находится в сосуде ограниченной вместимости и объем вещества не может увеличиваться при повышении температуры, то в веществе возникает большое давление, которое может вызвать коробление или

разрыв материала сосуда или то и другое одновременно. Для обеспечения возможности расширения и сжатия при изменении температуры в процессе строительства шоссе, мостов, а также прокладки трубопроводов предусматривают температурные швы. Сосуды по этой же причине никогда не заполняют полностью, так как должно быть свободное пространство для нормального расширения жидкости. Если этого не сделать, большие силы расширения при повышении температуры разрывают сосуд, а иногда может произойти и взрыв.

ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ И ОБЪЕМА ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Свободная молекулярная структура газа является причиной большого изменения его объема при нагревании или охлаждении, чем твердого или жидкого вещества. Далее будет показано, что состояние газа может измениться и что существуют определенные законы, которые объясняют соотношения между давлением, температурой и объемом газа.

Соотношения между несколькими параметрами анализируются более легко, когда газ участвует в ряде независимых процессов, во время которых он переходит из какого-то первоначального состояния в какое-то конечное таким образом, что изменяются только два из трех параметров, а третий параметр сохраняется неизменным.

Применяя газовые законы, необходимо помнить, что газ всегда заполняет сосуд полностью, а величины параметров газа следует определять от естественных нулевых точек.

ПРОЦЕСС С ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Если энергия передается газу при таких условиях, что его давление поддерживается постоянным, то объемы данной массы газа прямо пропорциональны их абсолютным температурам. Это формулировка закона Гей-Люссака для процесса с постоянным давлением, который может быть записан в виде уравнения

$$T_1 V_2 = T_2 V_1, \quad (3-1)$$

где T_1 , T_2 — начальная и конечная абсолютная температура газа соответственно; V_1 , V_2 — начальный и конечный объем газа соответственно.

Для лучшего представления изменений в процессе с постоянным давлением примем, что газ заключен в цилиндре под плотно установленным поршнем, не имеющим трения (рис. 3-1, а). Газ находится под давлением, создаваемым массой поршня и воздуха над ним. В связи с тем что поршень свободно перемещается в цилиндре, при расширении или сжатии газа его объем изменится таким образом, что давление газа остается постоянным. Температура и объем газа увеличиваются при нагрева-

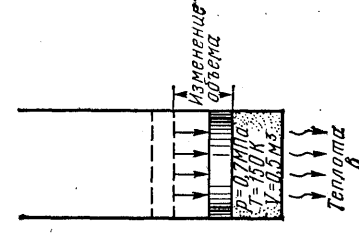
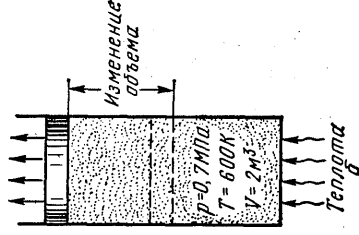


Рис. 3-1. Процесс при постоянном давлении:

а — газ находится в цилиндре под плотно установленным поршнем, не имеющим трения; б — температура и объем газа увеличиваются при нагреве, усиление объема пропорционально повышению абсолютной температуры; в — температура и объем газа уменьшаются при его охлаждении, уменьшение объема пропорционально понижению абсолютной температуры

нии, и поршень в цилиндре поднимается. Температура и объем газа при охлаждении уменьшаются, следовательно, поршень опускается. В любом случае давление газа остается неизменным.

Пример 3-1. Газ с начальным объемом $1,5 \text{ м}^3$ и температурой 280 К нагревается при постоянном давлении до увеличения его объема до 3 м^3 . Определить конечную температуру газа.

Решение. Используя уравнение (3-1), находим

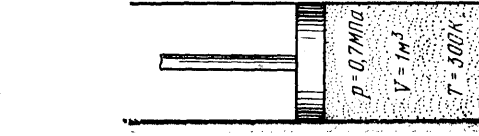
$$T_2 = T_1 V_2 / V_1 = 280 \text{ К} \times 3 \text{ м}^3 / 1,5 \text{ м}^3 = 560 \text{ К}.$$

Пример 3-2. Газ с начальной температурой 28°С охлаждается при постоянном давлении до 14°С . Каким будет конечный объем газа, если начальный объем равен 2 м^3 . **Решение.** В связи с тем что температура выражена в градусах Цельсия, необходимо перевести ее в кельвины. По уравнению (3-1) рассчитываем

$$V_2 = T_2 V_1 / T_1 = (14^\circ \text{С} + 273) \times 2 \text{ м}^3 / (28^\circ \text{С} + 273) = 1,91 \text{ м}^3.$$

ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ОТ ОБЪЕМА ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

При постоянной температуре объема данной массы газа обратно пропор-



а

циональны их давлениям. Так формулируется закон Бойля—Мариотта для процесса с постоянной температурой (рис. 3-2). Например, при сжатии газа при постоянной температуре абсолютное давление увеличивается пропорционально уменьшению объема.

Ранее указывалось, что молекулы газа движутся хаотично с большой скоростью, часто сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Возникающее при этом давление является следствием соударения молекул. Величина этого давления зависит от силы и частоты ударов молекул о стенки сосуда. Чем больше сила и частота ударов, тем выше давление. Количество молекул в данном пространстве и скорость их движения определяют силу и частоту ударов.

Когда газ сжимается при постоянной температуре, то скорость движения молекул остается неизменной. Увеличение давления происходит за счет уменьшения объема газа, так как то же самое количество молекул газа находится в меньшем объеме, в результате чего повышается частота столкновений. Обратное



Рис. 3-2. Процесс при постоянной температуре:

а — первоначальное состояние; б — расширение при постоянной температуре с изменением объема обратно пропорционально изменению абсолютного давления; в — сжатие при постоянной температуре с изменением объема обратно пропорционально изменению абсолютного давления

явление происходит, когда газ расширяется при постоянной температуре.

Любой термодинамический процесс, протекающий при постоянной температуре рабочего вещества, называется изотермическим.

Закон Бойля—Мариотта¹ для процесса при постоянной температуре газа можно записать следующим образом:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad (3-2)$$

где p_1 , p_2 — первоначальное и конечное абсолютное давление соответственно; V_1 , V_2 — первоначальный и конечный объем соответственно.

Пример 3-3. Воздух в количестве 3 кг расширяется при постоянной температуре от объема 1,9 м³ до объема 3,8 м³. Если первоначальное абсолютное давление воздуха 0,138 МПа, то каково конечное абсолютное давление воздуха?

Решение. Применяя уравнение (3-2), рассчитываем

$$p_2 = p_1 V_1 / V_2 = 0,138 \text{ МПа} \times 1,9 \text{ м}^3 / 3,8 \text{ м}^3 = 0,069 \text{ МПа}.$$

Пример 3-4. Газ, объем которого составляет 4 м³, расширяется при постоянной температуре. Его начальное абсолютное давление 0,39 МПа, а конечное — 0,2 МПа. Определить конечный объем газа.

Решение. По уравнению (3-2) находим

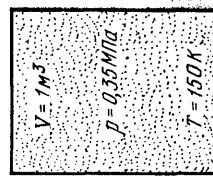
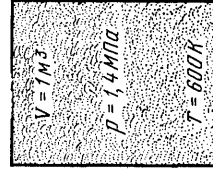
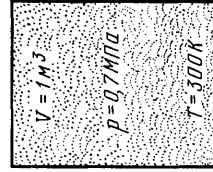
$$V_2 = p_1 V_1 / p_2 = 0,39 \text{ МПа} \times 4 \text{ м}^3 / 0,2 \text{ МПа} = 7,8 \text{ м}^3.$$

Пример 3-5. Газ, начальный объем которого 2 м³, сжимается при постоянной температуре до конечного объема 0,4 м³. Если

¹ Автор в своей книге называет этот закон законом Бойля.

Рис. 3-3. Процесс при постоянном объеме газа:

а — первоначальное состояние; *б* — абсолютное давление увеличивается прямо пропорционально увеличению абсолютной температуры; *в* — абсолютное давление уменьшается прямо пропорционально уменьшению абсолютной температуры



начальное избыточное давление газа 30 кПа, то каково его конечное давление?

Решение. Прибавляя нормальное атмосферное давление 101,325 кПа к начальному избыточному давлению 30 кПа, получим начальное абсолютное давление 131,325 кПа. По уравнению (3-2) находим

$$p_2 = p_1 V_1 / V_2 = 131,325 \text{ кПа} \times 2 \text{ м}^3 / 0,4 \text{ м}^3 = 656,625 \text{ кПа абс.}$$

Вычитая атмосферное давление из вычисленного значения, получим

$$656,625 \text{ кПа} - 101,325 \text{ кПа} = 555,300 \text{ кПа изб.}$$

ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Предположим, что газ находится в закрытом цилиндре и его объем не может измениться при нагревании или охлаждении (рис. 3-3, *а*). Когда температура газа повышается при нагревании, абсолютное давление его увеличивается прямо пропорционально повышению абсолютной температуры (рис. 3-3, *б*). Если газ охлаждается, то его абсолютное давление уменьшается прямо пропорционально снижению абсолютной температуры (рис. 3-3, *в*).

Давление (сила и частота ударов молекул о стенки цилиндра) увеличивается, когда температура, а значит, и скорость движения молекул газа повышаются при неизменном объеме пространства, в котором находится газ. Таким же образом, когда газ охлаждается при постоянном объеме, сила и частота ударов молекул

о стенки сосуда уменьшаются и давление газа снижается. Уменьшение силы и частоты ударов молекул является результатом снижения скорости движения.

Следующее уравнение характеризует закон Шарля для процесса с постоянным объемом газа:

$$T_1 p_1 = T_2 p_2, \quad (3-3)$$

где T_1 , T_2 — начальная и конечная абсолютная температура соответственно; p_1 , p_2 — начальное и конечное абсолютное давление соответственно.

Пример 3-6. Воздух в баке имеет начальную температуру 21°C и начальное абсолютное давление $0,12$ МПа. При нагревании воздуха его абсолютное давление повышается до $0,28$ МПа. Определить его конечную температуру.

Решение. По уравнению (3-3) находим

$$T_2 = T_1 p_2 / p_1 = (21^\circ\text{C} + 273) \times \\ \times 0,28 \text{ МПа} / 0,12 \text{ МПа} = 686 \text{ К, или} \\ 686 \text{ К} - 273 = 413^\circ\text{C}.$$

Умножая обе части уравнения (3-6) на массу m , получим

Свойства газов

Газ	Показатель адиабаты k	Теплоемкость при постоянном давлении c_p , кДж/(кг·К)	Теплоемкость при постоянном объеме c_v , кДж/(кг·К)	Удельная газовая постоянная R , Дж/(кг·К)
Воздух	1,406	1	0,711	287
Аммиак	1,273	2,1269	1,6705	487
Углекислота	1,28	0,8709	0,6783	189
Оксень углерода	1,403	1,0174	0,7243	297
Водород	1,41	14,277	10,132	4124
Азот	1,41	1,0216	0,7243	297
Кислород	1,4	0,9127	0,6531	260
Сернистый ангидрид	1,26	0,6448	0,515	130

Таблица 3-1

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Используя соотношения (3-1) и (3-2), характеризующие законы Гей-Люссака и Бойля—Мариотта соответственно, получим следующее уравнение:

$$p_1 V_1 / T_1 = p_2 V_2 / T_2, \quad (3-4)$$

Из уравнения (3-4) следует, что для данной массы газа отношение произведение абсолютного давления и объема к абсолютной температуре всегда постоянно, т. е.

$$pV/T = \text{const.} \quad (3-5)$$

Уравнение (3-5) называется уравнением Клапейрона. Для 1 кг массы любого газа уравнение (3-5) можно записать следующим образом:

$$pv/T = R, \quad (3-6)$$

где R — удельная газовая постоянная (на 1 кг массы газа); v — удельный объем.

$$pmv = mRT,$$

но так как $pmv = V$, то

$$pV = mRT,$$

где p — абсолютное давление, Па; V — объем, м^3 ; m — масса, кг; R — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К); T — абсолютная температура, К.

Удельная газовая постоянная R различна для каждого газа (табл. 3-1).

Уравнение (3-8) известно как уравнение состояния идеального газа и очень полезно при решении многих задач. Значение R для большинства газов имеется в таблицах. Если любые три из

четырёх величин известны, то четвертую находят по уравнению (3-8).

Пример 3-7. Ресивер воздушного компрессора объемом 2 м^3 заполнен воздухом температурой 40°С . Если манометр на ресивере показывает давление $0,75 \text{ МПа}$, то какова масса воздуха в ресивере?

Решение. В табл. 3-1 находим, что R для воздуха равна $287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Абсолютное давление составляет $750000 \text{ Па} + 101325 \text{ Па} = 851325 \text{ Па}$. Применяя уравнение (3-8), находим

$$m = 851325 \text{ Па} \times 2 \text{ м}^3 / 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \times$$

$$\times (40^\circ \text{С} + 273) = 18,95 \text{ кг.}$$

Пример 3-8. Воздух массой 2 кг имеет объем $0,2 \text{ м}^3$. Если абсолютное давление воздуха $0,884 \text{ МПа}$, то какова температура воздуха?

Решение. По табл. 3-1 определяем, что R для воздуха равна $287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Используя уравнение (3-8), рассчитываем

$$T = 884000 \text{ Па} \times 0,2 \text{ м}^3 / 2 \text{ кг} \times 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 308 \text{ К.}$$

ВНЕШНЯЯ РАБОТА

Работа совершается, когда объем вещества изменяется. Если объем вещества увеличивается, то работа совершается самим веществом. Если объем вещества уменьшается, то совершается внешняя работа по его сжатию. Например, рассмотрим газ, находящийся в цилиндре с подвижным поршнем (см. рис. 3-1, а). При нагревании температура газа повышается. Он расширяется, перемещает поршень в цилиндре вверх и преодолевает давление атмосферы. Совершаемая работа выражается в том, что поршень перемещается расширяющимся газом на определенное расстояние (см. рис. 3-1, б)*.

Для совершения работы требуется энергия. Из рис. 3-1, б видно, что для производства работы используется энергия газа, который нагревается с помо-

* Часть совершаемой работы расходуется на преодоление сил трения и атмосферного давления.

щью внешнего теплоотдатчика. Однако газ может совершать внешнюю работу без получения энергии извне. Например, при расширении газ совершает работу за счет собственной энергии. Его внутренняя кинетическая энергия уменьшается на количество энергии, требуемой для совершения работы, при этом снижается также и температура.

Для сжатия газа необходимо совершить определенную работу. Во время цикла сжатия молекулам газа передается энергия, количество которой равно количеству совершенной работы. Другими словами, механическая работа движения поршня преобразуется во внутреннюю кинетическую энергию газа (увеличивается скорость движения молекул). Если газ не охлаждается в процессе сжатия, то его температура будет повышаться пропорционально количеству совершенной работы. Повышение температуры газа в процессе сжатия является обычным процессом. Это можно проверить на ощупь, дотрагиваясь, например, до ниппеля камеры, накачиваемой с помощью ручного насоса, или до головки воздушного компрессора.

ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Из закона сохранения энергии четко следует, что энергия, переданная телу, используется полностью. Ранее говорилось, что часть или вся энергия, переданная веществу, может покинуть его в виде работы, а другая часть энергии, которая не используется для совершения внешней работы, остается в теле в виде теплоты. Вся энергия, переданная телу, увеличивает его внутреннюю кинетическую и потенциальную энергию или используется для совершения внешней работы. Математическое утверждение данного понятия можно записать следующим образом:

$$\Delta Q = \Delta K + \Delta P + \Delta A, \quad (3-9)$$

где ΔQ — теплота, поглощенная телом; ΔK — часть полученной энергии, которая увели-

чивает внутреннюю кинетическую энергию; ΔP — часть переданной энергии, которая увеличивает внутреннюю потенциальную энергию; ΔA — часть энергии, которая используется для совершения внешней работы.

Греческой буквой Δ (дельта) обозначают изменение состояния. Например, если K — это внутренняя кинетическая энергия, то ΔK — изменение внутренней кинетической энергии.

ВНЕШНЯЯ РАБОТА, СОВЕРШАЕМАЯ ТВЕРДЫМ ИЛИ ЖИДКИМ ВЕЩЕСТВОМ

При нагревании твердого или жидкого вещества повышается его температура, при этом оно несколько расширяется, за счет чего совершается небольшое количество работы. Практически можно считать, что вся энергия в форме теплоты, подводимая к твердому или жидкому веществу, что обуславливает изменение температуры, увеличивает его внутреннюю кинетическую энергию. Следовательно, не совершается работа и не увеличивается внутренняя потенциальная энергия. В данном случае ΔP и ΔA в уравнении (3-9) равны нулю, и, следовательно, $\Delta Q = \Delta K$.

При переходе твердого вещества в процессе плавления в жидкую фазу изменение объема так мало, что можно пренебречь совершенной при этом внешней работой. Кроме того, переданная энергия не увеличивает внутренней кинетической энергии тела, так как температура также остается постоянной. Вся теплота, поглощаемая расплавленным твердым веществом, увеличивает внутреннюю потенциальную энергию. Поэтому ΔK и ΔA равны нулю, а $\Delta Q = \Delta P$.

Совершенно другое происходит при переходе жидкости в пар. Изменение объема, а следовательно, и совершенная внешняя работа значительны. Например, когда 1 кг воды при атмосферном давлении превращается в пар, объем увеличивается от $0,001 \text{ м}^3$ до $1,673 \text{ м}^3$. Для испарения 1 кг воды требуется 2257 кДж теплоты, из которых 167 кДж

расходуется на совершение работы расширения (при атмосферном давлении). Остальная часть теплоты увеличивает внутреннюю потенциальную энергию пара. В данном случае только $\Delta K = 0$, а $\Delta Q = \Delta P + \Delta A$.

ПРОЦЕССЫ С ИДЕАЛЬНЫМИ ГАЗАМИ

Различные законы, определяющие зависимости давления и объема газа от его температуры, как объяснялось выше, относятся с определенной точностью только к гипотетическому идеальному газу. В процессах, происходящих с идеальным газом, не учитывается взаимодействие его молекул. Молекулы такого газа совершенно свободны и независимы от сил взаимного притяжения. Следовательно, теплота, подводимая к идеальному газу или отводимая от него, не влияет на внутреннюю потенциальную энергию вещества.

Понятие идеального газа значительно упрощает решение задач, связанных с изменением состояния газа. Предполагает, что состояние идеального газа изменяется без внутреннего трения, т. е. без совершения внутренней работы по преодолению межмолекулярных сил.

Нетрудно понять сущность внутреннего трения. Жидкость, например масло, не может свободно течь при низкой температуре из-за внутреннего трения, являющегося результатом наличия значительных межмолекулярных сил в жидкости. Однако при нагревании жидкости молекулы получают дополнительную энергию, силы взаимного притяжения молекул уменьшаются, внутреннее трение снижается, и жидкость течет более легко.

Превращение жидкости в пар, конечно, приводит к значительному уменьшению сил взаимного притяжения молекул и внутреннего трения, но между молекулами пара все же существует некоторое взаимодействие. Межмолекулярные силы наибольшие, когда температура газа близка к температуре насыще-

ния, и быстро уменьшаются при нагревании газа. Газ приближается к идеальному состоянию, если взаимодействие его молекул и, следовательно, внутреннее трение пренебрежимо малы.

В действительности идеальный газ не существует, но многие газы, например воздух, азот, водород и гелий, близки к идеальному состоянию. Поэтому любая ошибка, которая может возникнуть при рассмотрении их в качестве идеальных газов, не имеет решающего значения в большинстве практических расчетов.

Очень важно, чтобы изучающий холодильную технику понимал и мог применять законы идеальных газов, но необходимо помнить, что пар в нормальном холодильном цикле близок к точке насыщения и его нельзя рассматривать в качестве идеального газа. Газовые законы можно применить для пара хладагента только в очень общем виде. Если применять газовые законы для определения зависимости давления и объема пара от температуры, то могут возникнуть серьезные ошибки. Для пара обычно необходимо использовать значения параметров, имеющиеся в таблицах или диаграммах, которые определены экспериментально или путем сложных расчетов. В данной книге имеется несколько таких таблиц и диаграмм, которые будут рассмотрены ниже.

Принято считать, что газ участвует в процессе, если он переходит из какого-либо начального состояния в какое-либо конечное состояние. Состояние газа зависит от большого количества параметров. Можно выделить пять основных процессов, в которых происходит изменение параметров газа: изобарный (при постоянном давлении), изохорный (при постоянном объеме), изотермический (при постоянной температуре), адиабатный и политропный.

Ранее уже упоминалось, что расстояние между молекулами идеального газа столь велико, что они не притягиваются друг к другу, а энергия, поглощаемая

идеальным газом, не влияет на его внутреннюю потенциальную энергию. В данном случае очевидно, что теплота, поглощаемая идеальным газом, увеличивает внутреннюю кинетическую энергию (температуру) газа, или расходуется на совершение внешней работы, или то и другое вместе. В связи с тем что изменение внутренней потенциальной энергии ΔU всегда равно нулю, общее уравнение превращения энергии для идеального газа можно записать следующим образом:

$$\Delta Q = \Delta K + \Delta A. \quad (3-10)$$

Необходимо помнить, что, например, повышение температуры газа указывает на увеличение его начальной кинетической энергии, а изменение объема газа свидетельствует о совершенной работе за счет внутренней энергии газа или за счет теплоты, поступившей от внешнего теплоотдатчика.

Процесс с постоянным объемом

Если газ нагревается в закрытом сосуде, т. е. объем его постоянный, то давление и температура газа изменяются в соответствии с законом Шарля (см. рис. 3-3). Внешняя работа не совершается из-за неизменного объема газа ($\Delta A = 0$). Поэтому в процессе с постоянным объемом, обозначаемым индексом V ,

$$\Delta Q_V = \Delta K_V. \quad (3-11)$$

Из уравнения (3-11) следует, что в процессе с постоянным объемом вся теплота, переданная газу, увеличивает его внутреннюю кинетическую энергию. Газ не отдает теплоту, которая могла бы превратиться в работу.

Если газ охлаждается при постоянном объеме, то в результате отвода теплоты эффективно снижается его внутренняя кинетическая энергия. Необходимо отметить, что ΔQ в уравнении (3-10) обозначает отведенную от газа теплоту, ΔK указывает на увеличение внутренней кинетической энергии, а ΔA — на со-

вершенную газом работу. Поэтому если газ отдает теплоту, то значение ΔQ отрицательно. Таким же образом при уменьшении внутренней кинетической энергии газа величина ΔK отрицательна, а значение ΔA отрицательно при совершении внешней работы. Следовательно, при охлаждении газа величины ΔQ и ΔK в уравнении (3-11) отрицательны.

Процесс при постоянном давлении

Нагревание газа при постоянном объеме в соответствии с законом Гей-Люссака приводит к повышению его температуры и увеличению объема. В ходе процесса газом совершается работа одновременно с увеличением внутренней энергии. Следовательно, когда одна часть передаваемой энергии увеличивает внутреннюю кинетическую энергию газа, другая часть получаемой энергии преобразуется в работу. Для процесса при постоянном давлении, обозначаемом индексом p , уравнение энергии можно записать следующим образом:

$$\Delta Q_p = \Delta K_p + \Delta A_p. \quad (3-12)$$

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗА

Количество теплоты, требуемой для повышения температуры 1 кг газа на 1°C (1 К) при его постоянном объеме, называется удельной теплоемкостью при постоянном объеме c_v . Таким же образом, количество теплоты, необходимой для увеличения температуры 1 кг газа на 1°C при постоянном давлении, называется удельной теплоемкостью при постоянном давлении c_p . Удельная теплоемкость любого газа при постоянном давлении всегда больше удельной теплоемкости при постоянном объеме. Причину этого явления можно объяснить довольно легко.

Количество теплоты, требуемой для увеличения внутренней кинетической энергии газа при повышении его темпе-

ратуры на 1°C , совершенно одинаково во всех процессах, протекающих с изменением параметров газа. В связи с тем что работа не совершается в процессе при постоянном объеме, теплота расходуется только на увеличение внутренней кинетической энергии. Однако в процессе при постоянном давлении объем газа увеличивается с повышением температуры на 1°C , и при этом совершается также и определенная внешняя работа. Поэтому в процессе при постоянном давлении расходуется большее количество теплоты как для совершения работы, так и для увеличения внутренней кинетической энергии газа. Например, удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме составляет $0,711 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, а удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении — $1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Для любого из этих двух процессов увеличение внутренней кинетической энергии воздуха для повышения его температуры на 1°C составляет $0,711 \text{ кДж}/\text{кг}$. В процессе при постоянном давлении дополнительно требуется $0,289 \text{ кДж}/\text{кг}$ — это теплота, требующаяся для совершения работы по увеличению объема при повышении температуры.

ИЗМЕНЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В любом процессе, в котором происходит изменение температуры газа, наблюдается и изменение внутренней кинетической энергии газа, которое можно рассчитать по уравнению

$$\Delta K = mc_v (T_2 - T_1), \quad (3-13)$$

где ΔK — увеличение внутренней кинетической энергии, кДж; m — масса, кг; c_v — теплоемкость при постоянном объеме, кДж/(кг·К); T_1 , T_2 — начальная и конечная температура соответственно, $^\circ\text{C}$ или К.

Пример 3-9. Температура воздуха массой 2 кг повышается при его нагревании с 24 до 50°C . Если c_v для воздуха $0,711 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, то каково увеличение внутренней кинетической энергии?

Решение. Применяя уравнение (3-13), находим

$$\Delta K = 2 \text{ кг} \times 0,711 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times (50^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C}) = 36,97 \text{ кДж}.$$

Пример 3-10. Воздух массой 5 кг охлаждают с 35 до 25°С. Рассчитать увеличение внутренней кинетической энергии. Решение. Используя уравнение (3-13), определяем

$$\Delta K = 5 \text{ кг} \times 0,711 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times (25^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}) = -35,55 \text{ кДж}.$$

Обратите внимание на то, что в примере 3-10 T_2 меньше T_1 , в результате чего значение ΔK отрицательно. Это указывает на то, что внутренняя кинетическая энергия уменьшается, а не увеличивается.

ТЕПЛОТА, ПЕРЕДАННАЯ В ПРОЦЕССЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Так как в процессе с постоянным объемом $\Delta Q_V = \Delta K_V$, то

$$\Delta Q_V = m c_V (T_2 - T_1). \quad (3-14)$$

Пример 3-11. Если в примере 3-9 газ нагревается при постоянном объеме, то каково количество теплоты, переданной газу в процессе?

Первое решение. По уравнению (3-14) рассчитываем

$$\Delta Q_V = 2 \text{ кг} \times 0,711 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times \times (50^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C}) = 36,97 \text{ кДж}.$$

Второе решение. Если в примере 3-9 $\Delta K_V = 36,97 \text{ кДж}$, а $\Delta Q_V = \Delta K_V$, то $\Delta Q_V = 36,97 \text{ кДж}$.

Пример 3-12. Если в примере 3-10 воздух охлаждается при постоянном объеме, то каково количество теплоты, переданной воздуху в процессе?

Решение. Если в примере 3-10 $\Delta K_V = -35,55 \text{ кДж}$, а $\Delta Q_V = \Delta K_V$, то $\Delta Q_V = -35,55 \text{ кДж}$.

Обратите внимание на то, что в примере 3-12 отрицательное значение ΔK_V указывает на уменьшение внутренней кинетической энергии, ΔQ_V также имеет отрицательное значение и характеризует отвод теплоты от газа.

ВНЕШНЯЯ РАБОТА В ПРОЦЕССЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Работу, совершаемую в процессе при постоянном давлении, можно выразить следующим уравнением:

$$\Delta A_p = A_p = p(V_2 - V_1), \quad (3-15)$$

где A_p — совершенная работа, Дж; p — абсолютное давление, Па; V_1, V_2 — начальный и конечный объем соответственно, м^3 .

Предположим, что поршень на рис. 3-1,а имеет площадь S (в м^2), а абсолютное давление газа в цилиндре равно p (в Па). В соответствии с уравнением (1-14) сила, действующая на поршень, будет равна $F = pS$.

Предположим теперь, что в цилиндре газ с начальным объемом V_1 нагревается и расширяется до объема V_2 , а его давление поддерживается постоянным (см. рис. 3-1,б). При этом сила pS действует на расстояние l и совершается работа [см. уравнение (1-25)]. Количество совершённой работы равно $A = pSl$, но так как $Sl = V_2 - V_1$, то $A = p(V_2 - V_1)$.

Пример 3-13. Воздух массой 1 кг, начальным объемом $0,83 \text{ м}^3$ и начальной температурой 294 К нагревается и расширяется при постоянном давлении 101325 Па до конечного объема $1,13 \text{ м}^3$. Рассчитать совершённую внешнюю работу.

Решение. Применяя уравнение (3-15), находим

$$A_p = 101325 \text{ Па} (1,13 \text{ м}^3 - 0,83 \text{ м}^3) = 30,4 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

ТЕПЛОТА, ПЕРЕДАННАЯ В ПРОЦЕССЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

В соответствии с уравнением (3-12) ΔQ_p (общее количество теплоты, переданной газу в процессе при постоянном давлении) равно сумме ΔK_p (увеличению внутренней кинетической энергии газа) и ΔA_p (внешней работе, совершаемой при расширении газа).

Пример 3-14. Рассчитать общее количество теплоты, переданной воздуху в процессе при постоянном давлении. Параметры процесса приведены в примере 3-13.

Решение. Применяя закон Гей-Люссака для процесса при постоянном давлении, определяем

$$T_2 = T_1 V_2 / V_1 = 294 \text{ К} \times 1,13 \text{ м}^3 / 0,83 \text{ м}^3 = 400 \text{ К}.$$

По уравнению (3-13) рассчитываем

$$\Delta K = 1 \text{ кг} \times 0,711 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times (400 \text{ К} - 294 \text{ К}) = 75,37 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Из примера 3-13 имеем, что $\Delta A_p = 30,4 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Применяя уравнение (3-12), вычисляем $\Delta Q_p = 75,37 + 30,4 = 105,77 \text{ кДж}/\text{кг}$.

В связи с тем что удельная теплоемкость при постоянном давлении c_p учитывает не только увеличение внутренней кинетической энергии 1 кг газа, но также и работу, совершенную при изменении температуры на 1°С в процессе при постоянном давлении, общее количество теплоты, переданной во время процесса, определяют с помощью следующего уравнения:

$$\Delta Q_p = m c_p (T_2 - T_1). \quad (3-16)$$

Следовательно, уравнение (3-16) позволяет по-другому решить пример 3-14. В табл. 3-1 указано, что теплоемкость воздуха при постоянном давлении c_p равна 1 кДж/(кг · К). Таким образом, используя уравнение (3-16), находим

$$\Delta Q_p = 1 \text{ кг} \times 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times (400 \text{ К} - 294 \text{ К}) = 106 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

ДИАГРАММА ОБЪЕМ — ДАВЛЕНИЕ

Из уравнения (3-4) следует, что термодинамическое состояние газа адекватно описывается двумя свойствами газа. Следовательно, приняв два любых параметра газа в качестве математических координат, термодинамическое состояние газа можно выразить в виде точки на диаграмме. Кроме того, когда условия, при которых газ переходит из какого-то начального состояния в какое-либо ко-

нечное состояние, известны, то процесс на диаграмме можно изобразить в виде кривой.

Графическое изображение процесса или цикла называется диаграммой процесса или диаграммой цикла соответственно. Такие диаграммы полезны при анализе и решении различных задач.

В связи с тем что работа, совершаемая в процессе или цикле, является функцией давления и объема, эти показатели используются в качестве координат. Когда объем и давление используются в качестве координат диаграммы процесса или цикла, диаграмму называют диаграммой объем — давление или V, p -диаграммой.

Для демонстрации применения V, p -диаграммы на рис. 3-4 рассмотрен

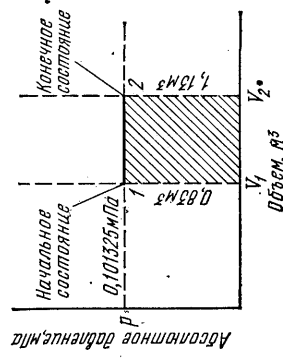


Рис. 3-4. Процесс при постоянном давлении на диаграмме объем — давление

процесс, описанный в примере 3-13. Обратите внимание на то, что в качестве вертикальной координаты служит абсолютное давление в паскалях, а в качестве горизонтальной координаты — объем в метрах кубических.

Начальное состояние газа в примере 3-13 характеризуется давлением, равным 101325 Па, и объемом 0,83 м³. Для нанесения точек, соответствующих начальному состоянию газа, на V, p -диаграмму следует от точки на вертикальной оси, обозначающей давление 101325 Па (0,101 МПа), провести пунктирную горизонтальную линию, а от

точки на горизонтальной оси, обозначающей объем $0,83 \text{ м}^3$, — вертикальную линию. Точка пересечения пунктирных линий (точка 1) соответствует начальному термодинамическому состоянию газа.

В примере 3-13 газ нагревается при постоянном давлении и расширяется до объема $1,13 \text{ м}^3$. Вследствие того что давление остается неизменным в течение всего процесса, точка, характеризующая конечное состояние газа, должна быть на линии постоянного давления. Точка 2 на линии давления, обозначающая конечное состояние газа, определяется пересечением этой линии с вертикальной линией, проведенной из точки на горизонтальной оси, обозначающей конечный объем.

Промежуточные термодинамические состояния характеризуются точками на линии 1—2. Линия от точки 1 до точки 2, таким образом, обозначает процесс при изменении термодинамического состояния газа и представляет собой V, p -диаграмму описанного процесса.

На рис. 3-4 площадь прямоугольной (заштрихованной) зоны под линией процесса является произведением высоты p и основания ($V_2 - V_1$). Однако в соответствии с уравнением (3-15) произведение $p(V_2 - V_1)$ — это внешняя работа в процессе при постоянном давлении. В таком случае очевидно, что площадь зоны между линией процесса и осью

объема V представляет собой V, p -диаграмму описанного процесса.

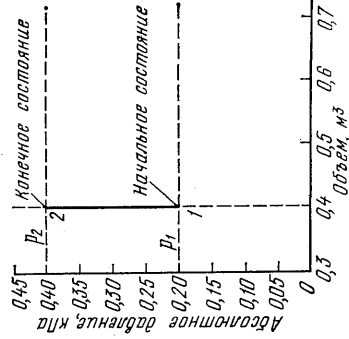


Рис. 3-5. Процесс при постоянном объеме на диаграмме объем — давление

объема представляет собой меру (в Дж) количества внешней работы, совершенной в процессе.

На рис. 3-5 дана V, p -диаграмма процесса при постоянном объеме. Предположим, что состояние газа в начале процесса характеризуется давлением, равным $0,2 \text{ МПа}$, и объемом — $0,4 \text{ м}^3$. Газ нагревают при постоянном объеме до давления $0,4 \text{ МПа}$. Кривая постоянного давления от начального состояния 1 до конечного состояния 2 обозначает происходящий процесс.

Анализ V, p -диаграммы на рис. 3-5 показывает, что между линией 1—2 процесса и осью объема нет площади зоны. Значит, работа не совершается, если процесс происходит при постоянном объеме.

ПРОЦЕСС ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

По закону Бойля — Мариотта давление изменяется обратно пропорционально объему, когда газ сжимается и расширяется при постоянной температуре, т. е. давление увеличивается при сжатии газа и уменьшается при его расширении. В связи с тем что газ совершает работу в процессе расширения при постоянной температуре, теплота для совершения работы должна подводиться от внешнего теплоотдатчика (см. рис. 3-2, б). При этом вся подводимая к газу теплота во время процесса расходуется на совершение работы.

Когда газ сжимается без охлаждения, внутренняя энергия его увеличивается на количество энергии, затрачиваемой на работу сжатия. Поэтому, если температура газа остается постоянной при сжатии, он должен отдавать в окружающую среду такое количество теплоты, которое равно количеству совершенной работы при сжатии (см. рис. 3-2, в).

ΔK в уравнении (3-10) равно нулю, так как нет изменения внутренней кинетической энергии в процессе при постоянной температуре, а общее уравнение

энергии для процесса при постоянной температуре можно записать следующим образом:

$$\Delta Q_t = \Delta A_t. \quad (3-17)$$

Работа в изотермическом процессе

На рис. 3-6 показана V, p -диаграмма изотермического расширения газа. В

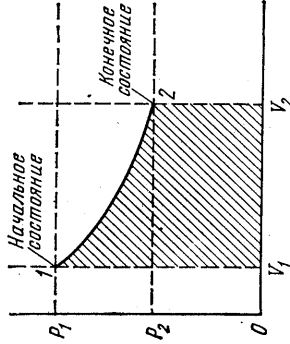


Рис. 3-6. Процесс при постоянной температуре на диаграмме объем — давление

процессе при постоянной температуре давление и объем изменяются в соответствии с законом Бойля — Мариотта. На диаграмме изотермический процесс расширения показан в виде кривой 1—2, а выполняемая работа (в Дж) — заштрихованной зоной. Площадь этой зоны, а следовательно, и работу, совершаемую в процессе, можно вычислить по уравнению

$$A_t = p_1 V_1 \times \ln (V_2 / V_1), \quad (3-18)$$

где $\ln$ — натуральный логарифм.

Пример 3-15. Определенная масса газа с начальным и абсолютным давлением 0,32 МПа и объемом 2 м³ изотермически расширяется до объема 4 м³. Определить конечное абсолютное давление газа и работу, совершаемую газом.

Решение.

Применяя уравнение (3-2), находим

$$p_2 = 0,32 \text{ МПа} \times 2 \text{ м}^3 / 4 \text{ м}^3 = 0,16 \text{ МПа}.$$

По уравнению (3-18) определяем

$$A_t = 320000 \text{ Па} \times 2 \text{ м}^3 \times \ln (4 \text{ м}^3 / 2 \text{ м}^3) = 443,6 \text{ кДж}.$$

Пример 3-16. Определенная масса газа с начальным абсолютным давлением 0,16 МПа и объемом 4 м³ изотермически сжимается до объема 2 м³. Определить конечное абсолютное давление газа и работу, совершаемую газом.

Решение. Согласно уравнению (3-2)

$$p_2 = p_1 V_1 / V_2 = 0,16 \text{ МПа} \times 4 \text{ м}^3 / 2 \text{ м}^3 = -0,32 \text{ МПа}.$$

Применяя уравнение (3-18), рассчитываем

$$A_t = 160000 \text{ Па} \times 4 \text{ м}^3 \times \ln (2 \text{ м}^3 / 4 \text{ м}^3) = -443,6 \text{ кДж}.$$

Обратите внимание на то, что процесс в примере 3-16 является полностью противоположным процессу, описанному в примере 3-15. Если в процессе примера 3-15 происходит расширение, то в примере 3-16 — сжатие. Заметьте также, что при сжатии — работа совершается газом, а при расширении — за счет внешнего теплоотдатчика. Однако в том и другом случае происходит в одинаковых условиях, то количество совершаемой работы одинаково в обоих примерах.

Теплота, переданная в изотермическом процессе

В связи с тем что изотермический процесс происходит без изменения температуры, внутренняя кинетическая энергия газа не изменяется и $K = 0$. В соответствии с уравнением (3-17) количество теплоты, полученной газом в процессе при постоянной температуре, равно количеству совершаемой работы. При изотермическом расширении теплота передается газу для совершения им работы, а при изотермическом сжатии теплота отводится от газа, в результате чего внутренняя энергия газа не увеличивается.

Пример 3-17. Определить количество теплоты, переданной газу в процессе расширения при постоянной температуре. Условия взять из примера 3-15.

Решение. Из примера 3-15 $A_t = 443,6 \text{ кДж}$.

Так как в изотермическом процессе $\Delta A_t = \Delta Q_t$, то $\Delta Q_t = 443,6 \text{ кДж}$.

Пример 3-18. Какое количество теплоты передается газу в процессе при постоянной температуре, описанном в примере 3-16?

Решение. Из примера 3-16 находим $\Delta A_t = -443,6$ кДж.

Так как $\Delta A_t = \Delta Q_t$, то $\Delta Q_t = -443,6$ кДж.

Обратите внимание на то, что газу передается отрицательное количество теплоты, следовательно, это количество теплоты в течение процесса отводится от газа.

АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

Адиабатный процесс — это процесс, в котором газ изменяет свое состояние без передачи или отвода теплоты из окружающей среды. Кроме того, ни один из параметров (давление, объем, температура газа и пр.) адиабатного процесса не остается постоянным.

Когда газ расширяется, он совершает работу за счет внешней энергии. В описанном ранее примере газ для совершения работы поглощает теплоту от внешнего теплоотдатчика. В связи с тем что в адиабатном процессе теплота не передается газу от внешнего теплоотдатчика, он должен совершить внешнюю работу за счет собственной энергии. Адиабатное расширение всегда сопровождается понижением температуры газа, так как он отдает свою внутреннюю энергию для совершения работы (рис. 3-7).

Когда газ сжимается адиабатно, работа совершается за счет внешней энергии. Энергия газа увеличивается на количество, равное количеству совершенной

работы. Так как теплота не передается внешнему телу при сжатии газа, внутренняя энергия его увеличивается, а температура повышается.

В результате того, что теплота не передается и не отводится от газа в адиабатном процессе, значение ΔQ_a всегда равно нулю, а уравнение энергии для адиабатного процесса можно записать следующим образом:

$$\Delta K_a + \Delta A_a = 0. \quad (3-19)$$

Поэтому $\Delta A_a = -\Delta K_a$ и $\Delta K_a = -\Delta A_a$.

Работу, совершаемую газом в адиабатном процессе, можно выразить с помощью следующего уравнения:

$$A_a = (p_1 V_1 - p_2 V_2) / (k - 1). \quad (3-20)$$

Пример 3-19. Газ с начальным абсолютным давлением 0,32 МПа и объемом 2 м³ расширяется адиабатно до конечного объема 4 м³. Определить совершенную газом внешнюю работу, если конечное абсолютное давление равно 0,121 МПа.

Решение. Для воздуха отношение значений теплоемкости равно:

$$k = c_p / c_v = 1000 / 711 = 1,406.$$

По уравнению (3-20) определяем

$$A_a = (320000 \text{ Па} \times 2 \text{ м}^3) / (1,406 - 1) = 384,24 \text{ кДж}.$$

Пример 3-20. Газ с начальным и абсолютным давлением 0,121 МПа и объемом 4 м³ сжимается адиабатно до конечного объема 2 м³. Определить количество совершенной работы, если конечное давление воздуха 0,32 МПа?

Решение. Из примера 3-19 находим, что для воздуха $k = 1,406$. Используя уравнение (3-20), рассчитываем

$$A_a = [(121000 \text{ Па} \times 4 \text{ м}^3) - (320000 \text{ Па} \times 2 \text{ м}^3)] / (1,406 - 1) = -384,24 \text{ кДж}.$$

СРАВНЕНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО И АДИАБАТНОГО ПРОЦЕССОВ

Сравнение изотермического и адиабатного процессов представляет определенный интерес. При изотермическом расширении вся энергия, необходимая для совершения работы, подается газу в виде теплоты от внешнего теплоотдат-

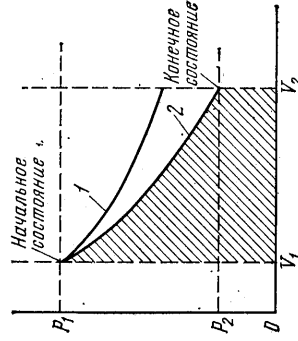


Рис. 3-7. Адиабатный процесс на диаграмме объем — давление:

1 — кривая изотермического расширения газа; 2 — кривая адиабатного расширения газа

чика. В связи с тем что энергия в форме теплоты подается газу от внешнего теплоотдатчика с той же интенсивностью, с какой газ совершает работу, внутренняя энергия газа не увеличивается и не уменьшается, а температура газа остается постоянной в течение всего процесса. При адиабатном расширении теплота не передается газу в течение процесса и вся работа расширения совершается за счет внутренней энергии газа. Поэтому внутренняя энергия газа всегда уменьшается на величину, равную совершенной работе, а температура газа соответственно понижается.

Рассмотрим теперь процессы изотермического и адиабатного сжатия. В любом процессе сжатия газа работа совершается, обычно поршнем и количество теплоты, равное количеству совершенной работы, передается газу. В процессе изотермического сжатия энергия в виде теплоты передается от газа к внешнему теплоприемнику с той же интенсивностью, с какой совершается работа по сжатию газа. Поэтому внутренняя энергия газа не изменяется, и его температура остается постоянной. При адиабатном сжатии нет передачи энергии в виде теплоты от газа к внешнему теплоприемнику. Поэтому выполненная работа увеличивает внутреннюю энергию газа, и его температура соответственно повышается.

ПОЛИТРОПНЫЙ ПРОЦЕСС

Целесообразно политропный процесс сравнить с изотермическим и адиабатным процессами. Процессы изотермического расширения (энергия для расширения газа поступает извне) и адиабатного расширения (для совершения работы расширения используется энергия самого газа) можно рассматривать как границы, между которыми происходят все процессы расширения. Следовательно, любой процесс расширения, при котором для совершения работы расходуется энергия частично от внешнего теплоотдачи

ка и частично самого газа, находится между изотермическим и адиабатным процессами (рис. 3-8). Этот процесс называется политропным. Если при политропном расширении большая часть

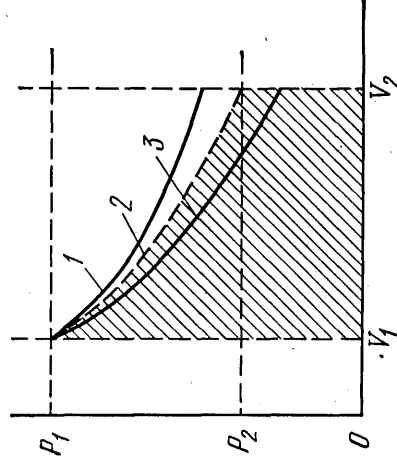


Рис. 3-8. Политропный процесс на диаграмме объем — давление:
1 — кривая изотермического процесса ($n=1$); 2 — кривая политропного процесса ($n>1$); 3 — кривая адиабатного процесса ($n=k$)

энергии, необходимая для совершения работы, поступает от внешнего источника, то он близок к изотермическому процессу. В том случае, когда для совершения работы используется в основном энергия газа, процесс близок к адиабатному.

Это действительно и для процесса сжатия. Когда газ теряет теплоту в процессе сжатия, но недостаточно интенсивно, процесс сжатия является политропным. Чем значительнее потери теплоты, тем больше политропный процесс приближается к изотермическому. Чем меньше потери теплоты, тем больше политропный процесс приближается к адиабатному. Если нет потерь теплоты, то процесс является адиабатным.

Действительное сжатие газа в компрессоре очень близко к адиабатному сжатию. Это объясняется тем, что процесс сжатия происходит очень быстро и в окружающую среду передается незначительное количество теплоты от газа через

стенки цилиндра. Водяная рубашка цилиндра повышает интенсивность теплоотдачи, и процесс сжатия приближается больше к изотермическому.

ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ И ОБЪЕМА ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В АДИАБАТНОМ ПРОЦЕССЕ

Температура, давление и объем газа изменяются в адиабатном процессе, и зависимости между этими параметрами в таком процессе могут быть определены следующими уравнениями:

$$T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{k-1} \quad (3-21)$$

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \quad (3-22)$$

$$p_2 = p_1 (V_1/V_2)^k \quad (3-23)$$

$$p_2 = p_1 (T_2/T_1)^{k/(k-1)} \quad (3-24)$$

$$V_2 = V_1 (T_1/T_2)^{1/(k-1)} \quad (3-25)$$

$$V_2 = V_1 (p_1/p_2)^{1/k} \quad (3-26)$$

Пример 3-21. Воздух адиабатно расширяется от 2 до 4 м³. Если начальное абсолютное давление воздуха 0,32 МПа, то каково конечное абсолютное давление?

Решение. По табл. 3-1 определяем, что для воздуха $k = 1,406$. Применяя уравнение (3-23), находим

$$p_2 = p_1 (V_1/V_2)^k = 0,32 \text{ МПа} \times (2/4)^{1,406} = 0,121 \text{ МПа}.$$

Пример 3-22. Воздух расширяется адиабатно от 2 до 4 м³. Если начальная температура воздуха 300 К, то какова конечная температура?

Решение. В табл. 3-1 указано, что для воздуха $k = 1,406$. По уравнению (3-21) вычисляем

$$T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{k-1} = 300 \text{ К} \times (2/4)^{1,406-1} = 300 \text{ К} \times 0,755 = 226,5 \text{ К}.$$

Пример 3-23. Воздух расширяется адиабатно от начального абсолютного давления 0,32 МПа до конечного абсолютного давления 0,121 МПа. Если начальная температура 300 К, то какова конечная температура?

Решение. Используя уравнение (3-22), находим

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 300 \text{ К} \times \\ &\times (0,121/0,32)^{(1,406-1)/1,406} = \\ &= 300 \text{ К} \times 0,378^{0,289} = 300 \text{ К} \times 0,755 = \\ &= 226,5 \text{ К}. \end{aligned}$$

ПОКАЗАТЕЛЬ ПОЛИТРОПНОГО РАСШИРЕНИЯ И СЖАТИЯ ГАЗА

Зависимости давления и объема от температуры газа для политропного процесса можно определить по уравнениям (3-21) — (3-26), за исключением того, что показатель k для политропного расширения или сжатия заменится на n . Работу в политропном процессе рассчитывают по уравнению (3-20), заменяя k на n .

Обычно значение n определяют при действительных испытаниях машины, в которой происходит расширение или сжатие газа. В отдельных случаях средние значения n для некоторых часто используемых газов, параметры которых изменяются при более или менее стандартных условиях, приводят в таблицах. Значение n можно рассчитать, если известны величины двух параметров газа в начальном и конечном состояниях. Никогда не следует использовать такую зависимость:

$$n = \log (p_1/p_2) / \log (V_1/V_2). \quad (3-27)$$

Значение n зависит от теплоемкости газа. В связи с тем что удельная теплоемкость может изменяться, теоретически n может быть любой величины.

В широком понимании политропный процесс — это процесс, в котором удельная теплоемкость остается постоянной. В соответствии с этим определением все пять процессов, рассмотренных в этой главе, являются политропными процессами. Иногда удобно ограничить термин «политропный» только такие процессы, которые находятся между изотермическими и адиабатными процессами. Показатели изотермического и адиабатного расширения или сжатия равны 1 и k соответственно. Следовательно, значение n для ограниченного политропного процесса должно быть между 1 и k . Чем ближе политропный процесс приближается к адиабатному, тем ближе n приближается к k .

Пример 3-24. Воздух с начальным абсолютным давлением 0,32 МПа и начальной

температурой 300 К расширяется политропно от 2 до 4 м³. Показатель политропного расширения равен 1,2. Определить массу воздуха (в кг); конечное абсолютное давление (в МПа); конечную температуру (в К); работу, совершенную газом (в кДж); увеличение внутренней энергии (в кДж); теплоту, переданную газу (в кДж).

Решение:

а) в табл. 3-1 дано, что R для воздуха составляет 287 Дж/(кг·К). Применяя уравнение (3-8), находим

$$m = pV/RT = 320000 \text{ Па} \times \\ \times 2 \text{ м}^3 / [287 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \times 300 \text{ К}] = 7,43 \text{ кг};$$

б) по уравнению (3-23) определяем

$$p_2 = p_1 (V_1/V_2)^n = 0,32 \text{ МПа} (2/4)^{1,2} = \\ = 0,32 \text{ МПа} \times 0,435 = 0,139 \text{ МПа};$$

в) из уравнения (3-21) вычисляем

$$T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{n-1} = 300 \text{ К} (2/4)^{1,2-1} = \\ = 300 \text{ К} (0,5)^{0,2} = 300 \text{ К} \times 0,87 = 261 \text{ К};$$

г) по уравнению (3-20) рассчитываем

$$A_a = (p_1 V_1 - p_2 V_2)/(n - 1) = [(320000 \text{ Па} \times \\ \times 2 \text{ м}^3) - (139000 \text{ Па} \times 4 \text{ м}^3)]/(1,2 - 1) = \\ = 420 \text{ кДж};$$

д) в табл. 3-1 дано, что значение c_v для воздуха равно 0,711 кДж/(кг·К). Следовательно, используя уравнение (3-13), находим

$$\Delta K = 7,43 \text{ кг} \times 0,711 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} (261^\circ\text{C} - \\ - 300^\circ\text{C}) = -206 \text{ кДж};$$

е) по уравнению (3-10) вычисляем

$$\Delta Q = \Delta K + \Delta A = -206 \text{ кДж} + 420 \text{ кДж} = \\ = 214 \text{ кДж}.$$

Обратите внимание, что в примере 3-24 количество работы, совершенной воздухом при политропном расширении, равно 420 кДж, причем 214 кДж из этого количества передается от внешнего источника, а 206 кДж расходуется самим воздухом, в результате чего на такое же количество уменьшается его внутренняя кинетическая энергия.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Термодинамическая система — это любая зона или пространство, ограниченное действительными или воображае-

мыми границами, выбранными для анализа энергии и ее преобразования. Пространство снаружи граничной системы называется окружающей средой. Граничные системы могут быть неподвижными или подвижными. Газ в металлическом сосуде является примером системы с неподвижными границами. Газ в сосуде образует систему, а стенки сосуда являются границами системы. Предполагим, что газ находится в резиновом шарике и стенки шарика являются граничной системы. При нагревании газа эластичные стенки шарика растягиваются и граница системы меняется с расширением газа.

Система может быть большой или небольшой. Например, пар находится во всей холодильной системе или в одном цилиндре компрессора соответственно. Системы бывают вакуумными, содержащими одно или несколько веществ или даже несколько фаз одного вещества. Например, в системе имеется сухой воздух и водяной пар (два вещества) или вода и водяной пар (две фазы одного вещества). В однородной системе содержится одно вещество или одна его фаза, или равномерная смесь нескольких веществ или фаз.

Система бывает замкнутой или открытой. В замкнутой системе только энергия переходит границу системы, а из открытой системы не только энергия, но и масса газа переходит в окружающую среду и обратно. Если массовый расход из открытой системы и в нее имеет установившийся и равномерный характер, то систему называют системой с постоянным расходом.

Состояние термодинамической системы зависит от физических свойств газа: температуры, давления, объема и энтропии. Его можно определить или описать только тогда, когда параметры газа постоянны, т. е. система находится в равновесии.

Все термодинамические системы, рассмотренные в данной главе, являются замкнутыми однородными системами с

действительными границами. Границы системы неподвижны для процесса с постоянным объемом и подвижны в процессах, происходящих в цилиндре с подвижным поршнем.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Переход системы из одного состояния в другое называется процессом. Термодинамические процессы могут быть обратимыми или необратимыми. Обратимый процесс — это процесс, который теоретически может быть совершен полностью в обратном порядке, т. е. когда параметры системы и окружающей среды возвращаются в начальные состояния. Все другие процессы называются необратимыми. На практике полностью обратимые процессы невозможны, т. е. все действительные процессы необратимы, хотя некоторые могут приближаться к идеальному обратимому процессу.

Существует ряд внутренних и внешних факторов, которые создают необратимость процессов. Внутренняя необратимость создается внутренним трением среды, возникающим за счет молекулярных сил и турбулентности. Например, предположим, что под поршнем в цилиндре находится газ высокого давления. Если поршень перемещается быстро, то часть газа непосредственно вблизи него стремится расшириться и занять полость, образуемую отходящим поршнем, а другая часть газа остается в состоянии покоя. В среде возникают турбулентность и трение за счет расхода части энергии, которая могла быть использована для совершения полезной работы. Таким образом создается разность давлений и температур. Во внутренне обратимом процессе используется идеальный газ. Он протекает так, что его параметры (давление, температура и т. д.) остаются неизменными во всей системе. Все процессы идеального газа, рассмотренные в данной главе, являются внутренне обратимыми.

Внешняя необратимость является ре-

зультатом воздействия внешних для системы факторов. Одна из наиболее частых причин внешней необратимости — это механическое трение между трущимися поверхностями, например между подшипниками и стенками цилиндра. Другой причиной является теплопередача, которая по своему характеру может происходить только в одном направлении: от среды с более высокой температурой к среде с более низкой температурой. Адиабатный (изотропный) процесс без трения является обратимым процессом и имеет особое значение при анализе цикла паровой компрессионной холодильной машины.

Несмотря на то что идеальные обратимые процессы невозможны на практике, по их графическому изображению на описанной ранее диаграмме с координатами давление — объем можно рассчитывать действительные процессы или их результаты.

Можно показать, что любые изменения в значениях различных физических свойств в термодинамическом процессе зависят только от начального и конечного состояний системы и совершенно не зависят от того, каким образом осуществляется процесс. Однако количество переданной теплоты и количество совершенной работы в любом термодинамическом процессе зависят от способа осуществления процесса. Следовательно, физические свойства системы являются функциями состояния, а передача энергии, т. е. теплоты, или энергии в виде работы — функцией способа осуществления процесса.

ЗАДАЧИ

3-1. Газ с начальным объемом 4 м^3 при температуре 630 К охлаждается при постоянном давлении до уменьшения его объема до $1,7 \text{ м}^3$. Определить конечную температуру газа.

3-2. Газ с начальной температурой 16°C нагревается при постоянном давлении до 30°C . Если начальный объем газа $1,4 \text{ м}^3$, каков конечный объем?

3-3. Воздух массой 2 кг сжимается при постоянной температуре от 2,6 до 0,89 м³. Если начальное абсолютное давление воздуха 21 МПа, то каково конечное абсолютное давление?

3-4. Газ объемом 2 м³ расширяется. Его абсолютное давление изменяется от 0,62 МПа до 0,16 МПа при постоянной температуре. Определить конечный объем газа.

3-5. Определенная масса газа изотермически расширяется от начального объема 0,62 м³ до конечного объема 3,16 м³.

Если начальное абсолютное давление газа 0,65 МПа, каково конечное абсолютное давление газа?

3-6. Воздух в ресивере имеет начальную температуру газа 75°C и начальное абсолютное давление 0,46 МПа. Если воздух охлаждается до понижения абсолютного давления 0,23 МПа, какова конечная температура газа в градусах Цельсия?

3-7. Ресивер воздушного компрессора имеет объем 0,8 м³ и заполнен воздухом при 50°C. Если абсолютное давление воздуха 0,625 МПа, какова масса воздуха в ресивере?

3-8. Определить удельный объем воздуха, если его температура 21°C при нормальном барометрическом давлении.

3-9. 4 кг кислорода имеют объем 0,5 м³. Если абсолютное давление кислорода 0,776 МПа, какова температура кислорода?

3-10. Воздух массой 2 кг нагревают при постоянном объеме от 40 до 92°C. Сколько работы совершается воздухом? Каково увеличение внутренней кинетической энергии? Сколько теплоты передается воздуху?

3-11. СО₂ имеет объем 0,65 м³ и заполнен СО₂ при температуре 25°C и абсолютном давлении 0,3 МПа. Сосуд нагревают до повышения температуры СО₂ до 150°C. Определить, какова масса СО₂? Каково ко-

нечное абсолютное давление? Каково увеличение внутренней кинетической энергии? Сколько подается теплоты?

3-12. Воздух массой 2 кг при давлении 0,1742 МПа расширяется от начального объема 0,12 м³ до конечного объема 0,2 м³ при нагревании. Давление воздуха постоянно. Если начальная температура воздуха 363 К, то какова конечная температура воздуха? Сколько подается теплоты? Каково увеличение внутренней кинетической энергии? Каково количество работы совершается газом?

3-13. Углекислый газ, имеющий объем 2 м³ при давлении 0,85 МПа, изотермически расширяется (при постоянной температуре) до объема 4,5 м³. Определить, каково увеличение внутренней энергии? Какова работа, совершаемая газом? Сколько теплотой энергии передается газу?

3-14. Воздух объемом 1 м³ с начальной температурой 22°C при начальном давлении 0,1 МПа изотермически сжимается до конечного давления 0,8 МПа. Определить, сколько работы совершается воздухом? Каково увеличение внутренней кинетической энергии? Сколько теплоты передается воздухом?

3-15. Предположим, что в задаче 3-14 воздух сжимается адиабатно, а не изотермически. Рассчитать конечную температуру воздуха; конечный объем воздуха; количество теплоты, переданной воздуху; работу, совершенную воздухом; увеличение внутренней кинетической энергии.

3-16. Предположим, что в задаче 3-14 воздух сжимается политропно, а не изотермически. Если n равно 1,25, определить массу газа; конечную температуру воздуха; конечный объем воздуха; работу, совершенную воздухом; увеличение внутренней кинетической энергии; количество теплоты, переданной воздуху.

Глава 4

НАСЫЩЕННЫЙ И ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР

ТЕМПЕРАТУРА НАСЫЩЕНИЯ

Температура, при которой вещество превращается из жидкости в пар или наоборот из пара в жидкость, называется температурой насыщения. Жидкость при температуре насыщения является насыщенной, а пар при температуре насыщения — насыщенным. Необходимо помнить, что температура насыщения жидкости (температура, при которой

жидкость кипит) и температура насыщения пара (температура, при которой пар конденсируется) одинаковы для данного давления.

Температура насыщения для данного давления — это максимальная температура жидкости и минимальная температура пара. При температуре кипения, равной температуре насыщения, и продолжении ее нагревания, часть жидкости испаряется. Таким же обра-

зом при температуре пара, равной температуре насыщения, и продолжении отвода теплоты от него часть пара конденсируется.

ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР

Пар при температуре выше температуры насыщения, которая соответствует его давлению, называется перегретым

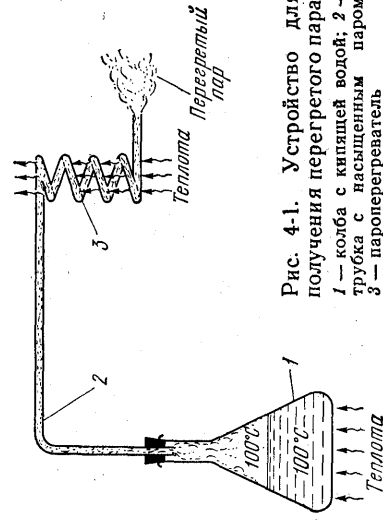


Рис. 4-1. Устройство для получения перегретого пара:
1 — колба с кипящей водой; 2 — трубка с насыщенным паром;
3 — пароперегреватель

паром. Температуру насыщенного пара можно повысить при нагревании. Когда температура пара повышается выше температуры насыщения, пар становится перегретым. Теплота, подаваемая для перегрева пара, обычно называется тепловой перегрева.

До начала процесса перегрева пар должен быть выведен из контакта с кипящей жидкостью (рис. 4-1). Чтобы перегретый пар сконденсировать, его сле-

дует сначала охладить до температуры насыщения, соответствующей его давлению.

ПЕРЕОХЛАЖДЕННАЯ ЖИДКОСТЬ

Если после конденсации пара жидкость охлаждается до температуры ниже ее температуры насыщения, то она называется переохлажденной. Следовательно, переохлажденная жидкость — это жидкость при любой температуре ниже температуры насыщения.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ НАСЫЩЕНИЯ

Температура насыщения зависит от давления. При увеличении давления температура насыщения повышается, а при уменьшении давления — понижается.

Рассмотрим пример влияния давления на температуру насыщения жидкостями. Предположим, что вода находится в закрытом сосуде,верху которого смонтирован дроссельный вентиль (рис. 4-2, а). Давление в сосуде определяют с помощью манометра. Два термометра установлены таким образом, что один из них измеряет температуру пара, а другой — температуру воды. Когда дроссельный вентиль полностью открыт (см. рис. 4-2, а), давление в сосуде равно атмосферному. Температура воды при нагревании повышается до температуры насыщения при нормальном атмосферном

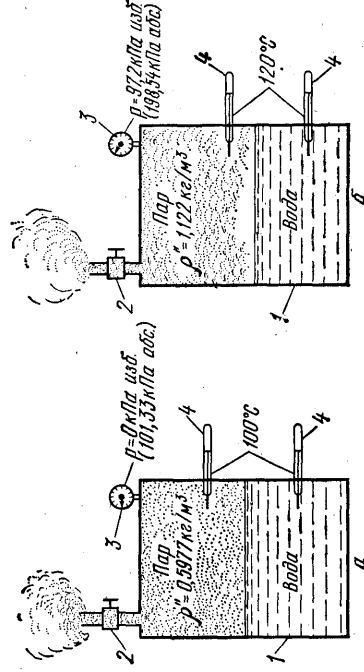


Рис. 4-2. Влияние давления на температуру насыщения:
1 — сосуд с кипящей водой; 2 — вентиль; 3 — манометр; 4 — термометр

давлении, т. е. до 100°C . При дальнейшем нагревании вода начинает кипеть. Пространство над водой вскоре заполнится миллиардами молекул водяного пара, движущихся хаотично с большой скоростью. Некоторые молекулы пара снова попадают в воду, а другие уходят через вентиль наружу и уносятся потоком воздуха.

Если вентиль открыт настолько, что пар может из сосуда свободно удалиться, то он будет покидать сосуд в таком количестве, сколько его образовалось при кипении жидкости. Другими словами, количество молекул, покидающих жидкость и превращающихся в молекулы пара, будет точно равно количеству молекул пара, уходящих из сосуда в окружающую среду и попадающих назад в жидкость. Таким образом, количество молекул пара и плотность пара над жидкостью будут постоянными, а давление, создаваемое паром, будет равно атмосферному давлению снаружи сосуда. В этих условиях водяной пар будет насыщенным, т. е. его температура и давление будут равны температуре и давлению воды, а именно: 100°C и 101325 Па абс. Плотность водяного пара при данной температуре и давлении равна $0,5977\text{ кг/м}^3$, а удельный объем — $1,67\text{ м}^3/\text{кг}$.

Жидкость будет продолжать кипеть при 100°C до тех пор, пока пар может свободно выходить наружу, в результате чего давление и плотность пара над жидкостью останутся постоянными.

Предположим, что дроссельный вентиль частично закрыт (рис. 4-2,б), в результате чего выход пара из сосуда несколько ограничен. В течение некоторого времени равновесие будет нарушено тем, что пар не будет выходить из сосуда в таком же количестве, в каком образуется. Следовательно, количество молекул газа в пространстве над жидкостью будет увеличиваться, что обусловит повышение плотности и давления пара над жидкостью, а также температуры насыщения.

Если предположить, что давление пара увеличивается до $198,540\text{ кПа}$ абс. (до появления равновесия), т. е. до состояния, при котором количество выходящего наружу пара совершенно точно равно количеству пара, образуемого при кипении жидкости, то температура насыщения будет равна 120°C , плотность пара — $1,122\text{ кг/м}^3$, и 1 кг пара будет занимать объем $0,8915\text{ м}^3$ (см. рис. 4-2,б).

При сравнении параметров пара, указанных на рис. 4-2,б, с параметрами пара, приведенными на рис. 4-2,а, можно отметить, что плотность пара больше при высоких давлениях и температуре насыщения. Кроме того, очевидно, что давление и температуру насыщения жидкости или пара можно регулировать, отводя пар от поверхности жидкости.

На рис. 4-2,а показано, что интенсивность парообразования совершенно не влияет или влияет незначительно на давление и температуру насыщения, так как пар может уходить свободно. Следовательно, плотность и давление пара над жидкостью не будут ни увеличиваться, ни уменьшаться при изменении интенсивности парообразования. Из рис. 4-2,б видно, что с увеличением интенсивности парообразования повышаются плотность и давление пара, в результате чего увеличивается температура насыщения. Причина этого заключается в том, что повышение интенсивности парообразования приводит к выходу из сосуда большего количества пара в единицу времени. Давление пара в сосуде зависит от размера дроссельного отверстия вентили. Оно будет повышаться до тех пор, пока разность давлений внутри и снаружи сосуда не достигнет той величины, при которой пар выходит из него с интенсивностью, равной интенсивности кипения жидкости. В результате повышения давления возрастают также температура насыщения и плотность пара. Таким же образом любое снижение интенсивности парообразования приводит к противоположному эффекту.

Давление и плотность пара над жидкостью будут понижаться, в результате чего уменьшается и температура насыщения.

Предположим теперь, что дроссельный вентиль на сосуде снова полностью открывают, как показано на рис. 4-2, а. Пар свободно выходит из сосуда. Плотность и давление пара понижаются до тех пор, пока давление пара не сравняется с атмосферным давлением. Температура насыщения воды при атмосферном давлении равна 100°C . При любой температуре выше температуры насыщения, соответствующей ее давлению, вода кипит. Очевидно, поэтому, чтобы вода сохранялась в виде жидкости, она должна быть охлаждена при понижении давления до атмосферного, например со 120 до 100°C . Часть воды выкипит, а скрытая теплота, необходимая для кипения этой части жидкости, отдается остальной масляной воды. В результате этого температура ее понижается до температуры насыщения (100°C).

ПАРООБРАЗОВАНИЕ

Жидкость превращается в пар при испарении и кипении. В процессе испарения жидкости пар образуется при любой температуре ниже температуры насыщения на свободной ее поверхности. Испарение происходит без заметного нарушения состояния жидкости.

Кипит жидкость только при температуре насыщения. Парообразование наблюдается как во всей толще жидкости, так и на ее свободной поверхности. Оно сопровождается значительным перемешиванием жидкости, а также быстрым образованием пузырьков пара, которые увеличиваются в объеме, поднимаются на поверхность и лопаются. Мы рассмотрим, таким образом, вопросы парообразования при кипении.

Испарение

Испарение происходит постоянно, и то, что вода испаряется из озер, рек,

прудов и пр., является достаточным подтверждением того, что испарение может происходить при температурах ниже температуры насыщения. Любая жидкость, имеющая свободную поверхность, постепенно испаряется независимо от температуры, и пар рассеивается в окружающей среде.

Испарение жидкостей при температуре ниже температуры насыщения можно объяснить следующим образом. Молекулы жидкости находятся в постоянном хаотическом тепловом движении, скорость которого зависит от температуры жидкости. Молекулы непрерывно сталкиваются друг с другом, и некоторые из них в результате этого на короткое время приобретают скорость, а значит, и энергию, превышающую среднюю скорость и энергию других молекул. Если это происходит в толще жидкости, то энергия молекул, движущихся с большей скоростью, чем остальные молекулы, снижается при столкновениях с другими молекулами. Однако если молекулы, находящиеся около свободной поверхности, имеют скорость выше средней, то они могут преодолеть поверхность и вылететь в пространство над свободной поверхностью (рис. 4-3). Вылетающие из жидкости молекулы рассеиваются в окружающей среде.

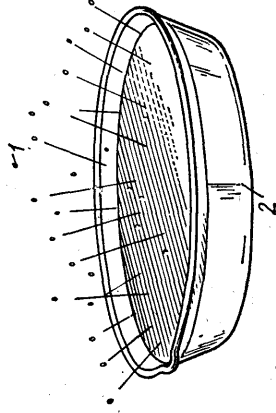


Рис. 4-3. Испарение с поверхности жидкости:
1 — молекулы пара; 2 — сосуд с водой

Интенсивность парообразования

При данной температуре некоторые жидкости кипят интенсивнее других.

Интенсивность кипения жидкостей, имеющих самую низкую температуру кипения, т. е. самую низкую температуру насыщения при данном давлении, наибольшая. Количество образуемого пара при кипении любой жидкости зависит от ряда причин. Так, интенсивность кипения увеличивается при повышении температуры жидкости и при понижении давления над поверхностью. Процесс кипения ускоряется с увеличением площади поверхности жидкости. Кроме того, ниже показано, что интенсивность кипения зависит от степени насыщения пространства паром, находящимся над поверхностью жидкости.

Охлаждение при испарении

Поверхность испаряющейся жидкости покидают молекулы, имеющие самую высокую скорость движения (т. е. обладающие максимальной энергией). Средняя энергия жидкости уменьшается одновременно с понижением температуры. Часть жидкости при испарении поглощает из оставшейся массы жидкости, из окружающей среды или от находящихся рядом предметов такое количество

теплоты, которое равно скрытой теплоте ее парообразования. Поэтому энергия и температура жидкости снижаются. Температура оставшейся жидкости снижается до величины несколько ниже температуры окружающей среды. Образующаяся разность температур создает теплоприток из окружающей среды в массу жидкости. Энергия, теряемая массой жидкости в процессе парообразования, восполняется, и испарение происходит непрерывно, пока имеется жидкость. Образующийся пар рассеивается в окружающей среде.

ПАРОЖИДКОСТНЫЕ СМЕСИ В ЗАКРЫТЫХ СОСУДАХ

Когда в сосуде имеются пар и жидкость, они находятся в насыщенном состоянии. Например, предположим, что открытый сосуд частично заполнен водой, а температура окружающей среды равна 20°C (рис. 4-4,а). В процессе испарения воды при 20°C молекулы пара, покидая жидкость, рассеиваются в окружающей среде. Испарение будет продолжаться до тех пор, пока не останется жидкость. Однако если сосуд име-

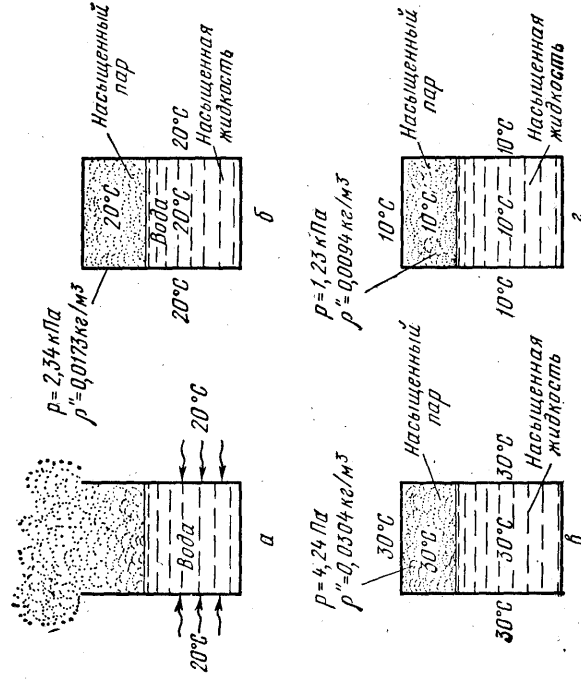


Рис. 4-4. Кипение воды в открытом и закрытом сосудах

ет плотно прилегающую крышку (рис. 4-4,б), то молекулы пара не смогут выйти наружу и соберутся над поверхностью раздела фаз. Вскоре пространство над жидкостью настолько заполнится молекулами пара, что многие из них, движущиеся хаотически вблизи свободной поверхности, возвращаются в жидкость, другие молекулы покидают жидкость. Когда число молекул, вылетающих из жидкости, станет равным числу молекул, возвращающихся в жидкость, т.е. если наступит динамическое равновесие, процесс видимого испарения жидкости прекратится. Пар становится насыщенным. Энергия жидкости увеличивается за счет энергии молекул пара, возвращающихся в жидкость, в том же количестве, которое жидкость теряет с покидающими ее молекулами. После прекращения испарения теплопередачи не происходит, так как жидкость больше не нагревается и ее температура будет равна температуре окружающей среды. Если температура окружающей среды повышется, например, до 30°C , то между ней и жидкостью снова начнется процесс теплопередачи. Температура жидкости и средняя скорость движения молекул увеличиваются, и начинается испарение. Количество молекул, покидающих жидкость, снова будет больше количества возвращающихся молекул; плотность и давление пара над жидкостью повышаются. Температура насыщения жидкости возрастает с увеличением плотности и давления пара. Наконец, когда температура насыщения достигнет 30°C и будет равна температуре окружающей среды, теплопередача и испарение снова прекратятся. Устанавливается состояние равновесия на новом уровне. Плотность и давление пара, а также температура насыщения парожидкостной смеси будут выше, чем в предыдущем примере. В сосуде будет больше пара и меньше жидкости, чем ранее (рис. 4-4,в).

Предположим теперь, что температура окружающей среды снизилась до

10°C . Результатом этого является образование теплого потока от парожидкостной смеси с температурой 30°C к более холодной окружающей среде. Парожидкостная смесь передает теплоту окружающей среде, следовательно, ее температура и средняя скорость движения молекул понизятся, и многие молекулы пара, не обладающие достаточной энергией, возвращаются снова в жидкость, т.е. часть пара конденсируется. Плотность и давление пара, а также температура насыщения уменьшатся. Когда температура насыщения станет равной 10°C , т.е. совпадет с температурой окружающей среды, теплопередача прекратится. Установится состояние равновесия, и количество молекул, возвращающихся в жидкость, будет равно количеству молекул, покидающих ее. В этом новом состоянии плотность и давление пара, а также температура насыщения будут ниже, чем ранее. Так как часть пара конденсируется, то в смеси жидкости будет больше, а пара меньше, чем при температуре окружающей среды 20 или 30°C (рис. 4-4,г).

СУБЛИМАЦИЯ

Вещество может переходить непосредственно из твердого состояния в пар без промежуточной жидкой фазы. Любое твердое вещество сублимирует при температуре ниже температуры его плавления. Сублимация протекает подобно испарению, но медленнее, так как молекулы, обладающие большой скоростью вблизи свободной поверхности, вылетают из массы вещества в окружающую среду, превращаясь при этом в молекулы пара. Можно привести следующие наиболее распространенные примеры. Твердая углекислота (сухой лед) при нормальной температуре и давлении сублимирует из твердого состояния в пар. Влажное белье, висящее зимой на открытом воздухе, становится сухим в результате сублимации. Сублимируют в морозную погоду лед и снег, например на тротуарах.

КОНДЕНСАЦИЯ

Различают несколько способов конденсации пара: отвод теплоты от пара, повышение давления пара и комбинация указанных двух способов.

Конденсация насыщенного пара при отводе теплоты

Насыщенный пар — это пар, находящийся в термодинамическом равновесии с жидкостью. При охлаждении насыщенного пара происходит его конденсация. Во время охлаждения пара его молекулы отдают часть энергии и скорость их движения снижается. Под действием сил притяжения некоторые молекулы пара переходят в жидкость. При конденсации, если пар находится в закрытом сосуде определенного объема, плотность и давление его уменьшаются, в результате чего температура насыщения снижается. Например, в конденсаторе происходит сжижение пара. Образовавшаяся жидкость сливается из аппарата, а новая порция пара поступает в него. Плотность, давление и температура пара при этом остаются постоянными, и конденсация продолжается до тех пор, пока теплота непрерывно отводится от пара.

Конденсация пара при повышении давления

Если перегретый пар сжимается при постоянной температуре, то его объем уменьшается, а плотность увеличивается (молекулы пара занимают меньший объем). При повышении давления температура насыщения пара увеличивается. Когда будет достигнута точка, в которой температура насыщения парасравнивается с действительной его температурой, плотность пара будет максимальной для данного состояния. Дальнейшее сжатие вызывает прогрессирующее повышение давления и температуры насыщения парожидкостной смеси, ко-

торое сопровождается непрерывной и все возрастающей конденсацией пара. При отсутствии теплопередачи в окружающую среду скрытая теплота парообразования, отдаваемая конденсирующимся паром, повышает температуру насыщения смеси. Этот процесс является обратным процессу расширения.

Критическая температура

Критическая температура газа — это температура, выше которой газ не может быть превращен в жидкость при любом давлении. Для каждого газа характерна своя критическая температура. Некоторые газы имеют высокую критическую температуру, а другие относительно низкую. Например, критическая температура водяного пара приблизительно составляет 375°C , а критическая температура воздуха примерно равна 143°C .

Критическое давление

Критическое давление — это минимальное давление, при котором вещество может существовать в жидком состоянии при критической температуре, т. е. это давление насыщения при критической температуре.

ВАЖНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗОВ И ПАРА

Газ или пар характеризуются рядом параметров, однако шесть из них имеют особое значение при изучении холодильной техники. К этим параметрам относятся давление, температура, объем, энтропия, внутренняя энергия и энтальпия. Давление, температура и объем являются измеряемыми параметрами. Энтальпию, внутреннюю энергию и энтропию невозможно измерить, в связи с чем их рассчитывают. Поэтому они называются расчетными параметрами.

Давление, температура, объем и внутренняя энергия уже описывались ра-

нее. Поэтому ниже рассмотрены вопросы, связанные с энтальпией и энтропией.

Энтальпия

Энтальпия I — это полная энергия рабочего тела в открытой системе, определяемая термодинамическим состоянием тела. Энтальпия является расчетным параметром тела.

Удельная энтальпия i — отношение энтальпии I к массе тела. Обычно интерес представляет удельная энтальпия, поэтому в данной книге под термином «энтальпия» подразумевается «удельная энтальпия».

Математически энтальпию определяют следующим образом:

$$i = u + pv, \quad (4-1)$$

где i — энтальпия, Дж/кг; u — внутренняя энергия, Дж/кг; p — абсолютное давление, Па; v — удельный объем, м³/кг.

В главе 3 указывалось, что не вся энергия, получаемая телом, остается в нем, увеличивая внутреннюю энергию. Во многих случаях часть или вся энергия расходуется на совершение работы. В уравнении (4-1) часть переданной энергии, сохраняемой в теле и увеличивающей его внутреннюю энергию, выражается величиной u , а та часть переданной энергии, которая расходуется на совершение работы, обозначается pv . Несмотря на то что энергия, выраженная через произведение pv , не сохраняется в рабочем теле, она тем не менее характеризует энергию, которая должна быть передана телу для перевода его из начального состояния в требуемое конечное.

Рассмотрим, например, процесс преращения 1 кг воды в пар при 100°С и атмосферном давлении. Объем 1 кг воды при 100°С равен 0,001 м³, а объем 1 кг пара при 100°С — 1,673 м³. Следовательно, в процессе парообразования рабочее тело расширяется при постоянном давлении, совершая работу.

Энтальпия 1 кг воды при 100°С рав-

на 419 кДж/кг, а энтальпия 1 кг пара при 100°С — 2676 кДж/кг. Следовательно, скрытая теплота парообразования равна 2257 кДж/кг (2676 — 419).

Эта величина равна общему количеству теплоты, требуемой для испарения 1 кг воды при 100°С. Для совершения работы расширения при постоянном давлении из общего количества подведенной энергии требуется приблизительно следующее количество:

$$\begin{aligned} \omega_p &= p(v_2 - v_1) = (101325 \text{ Па}) (1,673 \text{ м}^3/\text{кг} - \\ &\quad - 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}) = 169,4 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Следовательно, та часть подведенной энергии, которая сохраняется в среде, увеличивая ее внутреннюю энергию, равна 2087,6 кДж/кг (2257 — 169,4).

V - p -диаграмма процесса парообразования показана на рис. 4-5. Величины энтальпии и удельного объема взяты из таблицы пара, которая рассматривается в этой главе позднее.

Энтропия

Энтропия, как и энтальпия, является расчетным параметром вещества. Энтропия — функция состояния термодинамической системы, характеризующая направление протекания процесса теплообмена между системой и внешней средой.

Как и в случае с энтальпией, интерес представляет удельная энтропия s , а не энтропия S . Поэтому термин «энтропия» используется здесь для обозначения удельной энтропии s , если не будет оговорено специально.

Уже указывалось ранее (см. главу 3), что работу, совершаемую в процессе, можно выразить в виде произведения изменения объема ΔV на среднее абсолютное давление. Понятие энтропии позволяет теплоту, переданную в течение процесса, рассматривать как произведение двух этих факторов. Теплоту, переданную в течение процесса, можно выразить в виде произведения изменения

энтропии и средней абсолютной температуры¹:

$$\Delta Q = \Delta s T_m; \quad (4-2)$$

$$\Delta s = \Delta Q / T_m; \quad (4-3)$$

$$T_m = \Delta Q / \Delta s, \quad (4-4)$$

где ΔQ — теплота, отнесенная к 1 кг рабочего тела, кДж; Δs — изменение энтропии, кДж/(кг·К); T_m — средняя абсолютная температура, К.

Эти уравнения справедливы для идеальных обратимых процессов (см. главу 3). Однако так как величина изменения энтропии Δs между любыми точками, характеризующими состояние рабочего тела, имеет определенное значение независимо от прохождения процесса, то изменение энтропии для необратимого процесса можно определить с помощью расчета для обратимого процесса между теми же двумя точками состояния.

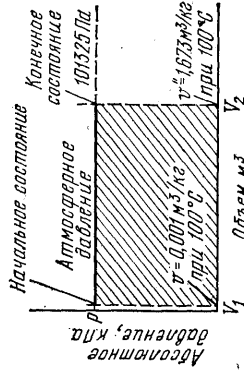


Рис. 4-5. Внешняя работа (169,4 кДж), совершаемая расширяющимся паром при кипении 1 кг воды при атмосферном давлении, на V , p -диаграмме

На V , p -диаграмме (рис. 4-5) зона под кривой процесса, которая является произведением изменения объема ΔV и средней абсолютной температуры, обозначает работу, совершенную в процессе. Подобным образом на s , T -диаграмме (диаграмма температура — энтропия) зона под кривой процесса, являющаяся произведением изменения энтропии Δs и

¹ Средняя абсолютная температура — это не только средняя величина между начальной и конечной температурами процесса, но и среднее значение абсолютной температуры в течение всего процесса.

средней абсолютной температуры T_m , обозначает теплоту, переданную в процессе. Процесс парообразования, описанный выше, показан на рис. 4-6.

В рассмотренном выше процессе парообразования температура постоянно

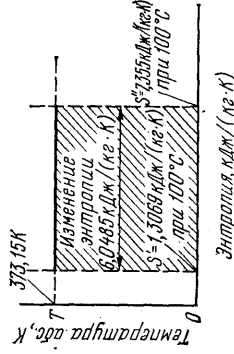


Рис. 4-6. Процесс парообразования на s , T -диаграмме

100°C, следовательно, средняя абсолютная температура T_m процесса равна 373,15 К. По таблице состояния пара находим, что энтропия 1 кг воды при 100°C равна 1,3069 кДж/(кг·К), а энтропия 1 кг пара при 100°C составляет 7,3554 кДж/(кг·К). По уравнению (4-2) определяем, что теплота, переданная в процессе, составляет $Q = T_m(s_2 - s_1) = 373,15 \text{ К} (7,3554 - 1,3069) = 2257 \text{ кДж}$.

Не вся энергия системы используется на совершение полезной работы. Напротив, рассмотрим паровой радиатор, применяемый для обогрева помещения. Температура в нем поддерживается около 25°C. Даже в идеальных условиях максимальное количество теплоты, передаваемой паром в помещение через радиатор, равно сумме теплоты, отдаваемой паром при конденсации, и теплоты, получаемой при охлаждении конденсата до комнатной температуры (25°C). Конденсат при 25°C все еще обладает значительным запасом энергии по сравнению с энергией при абсолютном нуле, однако эта энергия в форме теплоты не может быть передана в помещение с температурой 25°C, так как нет разности температур между конденсатом и помещением.

Во всех действительных (необратимых) процессах энтропия системы (или окружающей среды) обязательно увеличивается в основном из-за того, что часть имеющейся энергии расходуется на преодоление трения. В любом идеальном обратимом адиабатном процессе, который часто называют «адиабатным процессом без трения» или «изоэнтропным» процессом, принимают, что имеющаяся энергия не используется на преодоление трения. Кроме того, энтропия является постоянной в течение всего процесса, так как нет теплопередачи.

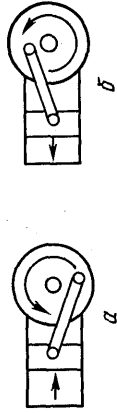


Рис. 4-7. Изоэнтропное расширение газа в цилиндре:
а — газ отдает энергию маховику в процессе расширения; б — маховик отдает энергию газу в процессе сжатия

Например, при изоэнтропном расширении газа в цилиндре (рис. 4-7) вся энергия, отдаваемая газом, передается поршню и затем от него маховику. В ходе сжатия энергия от маховика передается поршню, а затем при изоэнтропном сжатии — газу. Обратите внимание, что в течение всего цикла имеющаяся в системе энергия остается неизменной, в результате чего энтропия также остается постоянной.

Предположим теперь, что газ в цилиндре расширяется необратимо, т. е. часть энергии, отдаваемой газом, используется на преодоление трения в цилиндре и других механических частях. Из этого следует, что только часть энергии, получаемой от газа, передается поршню и далее маховику. Следовательно, в ходе сжатия энергия, получаемая от маховика, будет несколько меньше, чем требуется для повторного сжатия газа до его начального состояния. Кроме того, в процессе повторного сжатия часть имеющейся энергии, поступающей от

маховика, используется на преодоление трения, в результате чего общее количество энергии в конце процесса повторного сжатия будет меньше общего количества энергии газа в первоначальном состоянии. Необратимые потери энергии в обоих процессах указывают на то, что количество имеющейся энергии в системе уменьшилось, а энтропия увеличилась.

Обычно энергия, используемая на преодоление трения, превращается в теплоту и рассеивается в окружающей среде. Следовательно, если необратимые процессы повторяются, то необходимо постоянно подводить энергию к системе от какого-либо внешнего теплоотдатчика для восполнения потерь теплоты в окружающую среду.

ТАБЛИЦЫ ПАРА

При изменении фазового состояния пара в связи с наличием значительных сил взаимного притяжения между молекулами пара всегда существует внутреннее трение. Свойства пара могут быть определены по законам идеального газа. Параметры насыщенного и перегретого пара определены экспериментально, и эти данные обобщены в виде таблиц и диаграмм.

Параметры насыщенных сред

Параметры насыщенных жидкостей и пара (температура, давление, удельный объем, энтальпия, энтропия) в различных состояниях приведены в таблицах (см. табл. 16-2). Температура насыщения среды, которая является вводным параметром вещества, указывается в крайней левой колонке. Соответствующее давление насыщения дается во второй колонке, а затем следует удельный объем жидкости и пара (в третьей и четвертой колонках соответственно). В некоторых таблицах указывается плотность в доп. полнение или вместо удельного объема. Если приводится только плотность, а требуется определить удельный объем, то

последний находят делением единицы на плотность. Таким же образом, когда указывается удельный объем, а требуется вычислить плотность, последнюю находят посредством деления единицы на удельный объем.

В большинстве таблиц приводятся три значения энтальпии: энтальпия насыщенной жидкости i' , которая характеризует теплоту, требуемую для повышения температуры жидкости от расчетной до температуры насыщения (см. табл. 16-2);

скрытая теплота парообразования r при данной температуре насыщения; энтальпия насыщенного пара i'' , которая равна сумме энтальпии жидкости i' и теплоты парообразования r . Если энтальпия парообразования не указана, то ее определяют посредством вычитания i' из i'' .

Обычно указывают две энтропии: s' — энтропия насыщенного жидкости и s'' — энтропия насыщенного пара.

В некоторых таблицах приводят также значения внутренней энергии среды в жидкой и паровой фазах. Если этих значений в таблице нет, то внутреннюю энергию среды в любой фазе можно вычислить с помощью уравнения (4-1).

Ранее указывалось, что состояние газа или пара определяют по двум известным параметрам. Однако для насыщенной жидкости или пара какому-либо заданному давлению соответствует одно значение температуры. Это действительно также для других параметров насыщенной жидкости или пара. Поэтому если известна температура или давление насыщенной жидкости (пара), то величины других параметров можно легко найти из таблиц насыщенного пара.

Пример 4-1. Определить давление, удельный объем, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию 1 кг насыщенного пара R12 при 40°C.

Решение. Находим температуру насыщения 40°C в колонке 1 в табл. 16-2 (свойства насыщенного R12) и на той же строке в колонке 2 читаем соответствующее давление насыщения 0,96065 МПа. На той же

строке приведены удельный объем пара v' , равный 18,1706 см³/г или л/кг, энтальпия пара i' , равная 367,147 кДж/кг, и энтропия пара s' , равная 1,5405 кДж/(кг·К).

Применяя уравнение (4-1), находим $u = \frac{367146}{0,01817} - (960650 \text{ Па} \times \text{Па} \times$

Обратите внимание на то, что значения, полученные из таблиц пара, необходимо перевести в соответствующие единицы до подстановки в уравнение (4-1).

Таблицы перегретого пара

В эти таблицы включены свойства только перегретого пара, и поэтому расположение колонок несколько иное по сравнению с таблицей насыщенного пара. Параметры перегретого пара хладагента R12 приведены в табл. 16-3. До анализа таблицы перегретого пара необходимо обратить внимание на одно значительное отличие насыщенного пара от перегретого. Насыщенный пар имеет только одно значение температуры при определенном давлении, а перегретый пар может иметь любую температуру выше температуры насыщения. Величины удельного объема, энтальпии и энтропии перегретого пара зависят от температуры при данном давлении. Это не значит, что параметры перегретого пара совершенно не зависят от давления пара, а только то, что свойства перегретого пара при любой величине давления определяются его температурой.

Для определения параметров перегретого пара по таблице необходимо знать температуру насыщения или давление пара, а также действительную температуру перегрева.

В табл. 16-3 температура насыщения приведена в верхней части таблицы, а соответствующее ей давление насыщения указано рядом. Температура перегрева дается в правой колонке таблицы с интервалом в 5°C. В таблице приведены значения удельного объема v , энтропии i и энтропии s для каждой имеющейся температуры перегрева. Эти величины можно вычислить прямой интер-

поляцией, если температуры перегрева не указаны.

Пример 4-2. 1 кг пара R12 (температура насыщения 40°C) перегревается до 65°C. Определить давление, удельный объем, энтальпию и энтропию пара.

Решение. В таблице перегретого пара (см. табл. 16-3) находим, что давление, указанное рядом с температурой насыщения, равно 0,96065 МПа. В основной части таблицы, между жирными линиями, дано, что удельный объем v пара равен 20,8819 см³/г или л/кг, энтальпия равна 386,212 кДж/кг, а энтропия — 1,5991 кДж/(кг·К).

Параметры парожидкостных смесей

Так называемый «пар» или «водяной пар», который мы видим поднимающимся над кипящей водой, представляет собой мельчайшие капельки воды, уносимые паром. Отдельные молекулы слишком малы для зрения, и потому пар невидим.

Термин «сухой насыщенный пар» обычно используют для обозначения пара, совершенно не содержащего частиц жидкости, а термин «влажный пар» означает смесь пара и жидкости. Паро-содержание, обозначаемое символом x , — это весовая доля пара в смеси жидкости и пара, а влагосодержание ($1 - x$) обозначает весовую долю жидкости в смеси.

Любой влажный пар (парожидкостная смесь) обязательно находится в состоянии насыщения. Поэтому любая смесь имеет температуру насыщения, соответствующую давлению смеси. Другие параметры смеси определяют с помощью подстановки соответствующих значений из таблиц насыщенного пара в следующие формулы для их расчета:

$$v_{см} = (1 - x) v' + xv''; \quad (4-5)$$

$$i_{см} = (1 - x) i' + xi''; \quad (4-6)$$

$$s_{см} = (1 - x) s' + xs'', \quad (4-7)$$

где x — сухость пара. Индекс $см$ обозначает смесь, а символы v' , i' , s' и v'' , i'' , s'' — величины удельного объема,

энтальпии и энтропии для жидкой и паровой фазы соответственно.

Пример 4-3. Определить удельный объем, энтальпию и энтропию 1 кг R12 при температуре насыщения —5°C и сухости пара 0,32.

Решение. По табл. 16-2 находим, что удельный объем, энтальпия и энтропия жидкого R12 равны 0,70780 л/кг, 195,395 кДж/кг и 0,98311 кДж/(кг·К) соответственно. В том же порядке для паровой фазы эти значения составляют 64,9629 л/кг, 349,321 кДж/кг и 1,55710 кДж/(кг·К).

По уравнению (4-5) находим удельный объем смеси

$$v_{см} = 0,68 \times 0,70780 \text{ л/кг} + 0,32 \times$$

$$\times 64,9629 \text{ л/кг} = 21,27 \text{ л/кг, или}$$

$$0,02127 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Применяя уравнение (4-6), вычисляем энтальпию смеси

$$i_{см} = 0,68 \times 195,395 + 0,32 \times 349,321 =$$

$$= 244,65 \text{ кДж/кг}.$$

Согласно уравнению (4-7) энтропия смеси равна

$$s_{см} = 0,68 \times 0,98311 + 0,32 \times 1,55710 =$$

$$= 1,17 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

ЗАДАЧИ

4-1. Насыщенный жидкий R12 имеет температуру 10°C. Каковы давление, удельный объем, энтальпия, энтропия и внутренняя энергия жидкости?

4-2. Пар R12 имеет температуру насыщения 40°C. Определить давление, удельный объем, плотность, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию пара.

4-3. Пар R12 перегрет до 55°C. Температура насыщения составляет 40°C. Вычислить давление, удельный объем, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию пара.

4-4. Пар R12 имеет температуру насыщения 42°C и перегрет до 72°C. Рассчитать давление, удельный объем, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию пара.

4-5. Насыщенного пара R12 при —10°C содержится в смеси 10%. Определить давление, удельный объем, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию смеси.

Глава 5

ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА

СОСТАВ ВОЗДУХА

Воздух — это механическая смесь газов и водяного пара. Сухой воздух, не содержащий водяного пара, состоит в основном из азота (примерно 78% объема) и кислорода (примерно 21%), а 1% составляют углекислый газ, водород, гелий, неон и аргон. Состав воздуха практически везде одинаков. Объемная доля водяного пара в воздухе зависит в значительной степени от местности, погодных условий и составляет от 1 до 3% объема смеси. В связи с тем что наличие водяного пара в воздухе является следствием испарения воды с поверхности различных водоемов, влажность (массовая доля водяного пара) атмосферы максимальна вблизи больших водоемов и минимальна в районах с сухим климатом.

В действительности нет «сухого воздуха», так как воздух в естественном состоянии содержит определенное количество водяного пара. Введение понятия «сухой воздух» в значительной степени упрощает психрометрические расчеты. Под термином «сухой воздух», который использован ниже, подразумевается воздух без водяного пара, а термины «воздух» и «влажный воздух» указывают на естественную смесь сухого воздуха и водяного пара.

ЗАКОН ПАРЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Закон парциального давления (Дальтона) гласит, что в любой механической смеси газа и пара (которые не соединяются химическим путем) каждый газ или пар в смеси создает свое парциальное давление, равное давлению, которое бы он создавал, занимая весь объем. Общее давление смеси газов равно сумме пар-

циальных давлений каждого из газов, входящих в смесь.

Воздух, являясь механической смесью газов и водяного пара, подчиняется закону Дальтона. Поэтому общее барометрическое давление всегда равно сумме парциальных давлений сухих газов и водяного пара. В связи с тем что психрометрия изучает свойства воздуха в зависимости от содержания водяного пара, и для всех практических целей общее барометрическое давление можно рассматривать как сумму только двух давлений: парциального давления, создаваемого сухими газами, и парциального давления, создаваемого водяным паром.

ТЕМПЕРАТУРА ТОЧКИ РОСЫ

Важно помнить, что водяной пар, содержащийся в воздухе, — это пар низкого давления. Он, так же как пар высокого давления, имеет состояние насыщения, когда его температура равна температуре насыщения, соответствующей определенному давлению. Все компоненты газовой смеси занимают один и тот же объем и имеют одинаковую температуру. Из этого следует, что если температура воздуха выше температуры насыщения, соответствующей парциальному давлению водяного пара, то водяной пар, содержащийся в воздухе, будет находиться в насыщенном состоянии. Такой воздух называется насыщенным (хотя в действительности насыщенным является водяной пар). Температурой точки росы воздуха является температура, до которой нужно охладить содержащийся в нем водяной пар

Параметры воды и водяного пара

Таблица 5-1

Температура t, °C	Давление насыщения p, 10 ⁵ Па	Удельный объем м ³ /кг		Энтальпия i, кДж/кг		Энтропия s, кДж/(кг·К)	
		воды	пара	воды	пара	воды	пара
0	0,006108	0,0010002	206,3	0,04	2501,6	0,0002	9,1577
2	0,007055	0,0010001	179,9	8,39	2505,2	0,0306	9,1047
4	0,008129	0,0010000	157,3	16,80	2508,9	0,0611	9,0526
6	0,009345	0,0010000	137,8	25,21	2512,6	0,0913	9,0015
8	0,010720	0,0010001	121,0	33,60	2516,2	0,1213	8,9513
10	0,012270	0,0010003	106,4	41,99	2519,9	0,1510	8,9020
12	0,014014	0,0010004	93,84	50,38	2523,6	0,1805	8,8536
14	0,015973	0,0010007	82,90	58,75	2527,2	0,2098	8,8060
16	0,018168	0,0010010	73,38	67,13	2530,9	0,2388	8,7593
18	0,02062	0,0010013	65,09	75,50	2534,5	0,2677	8,7135
20	0,02337	0,0010017	57,84	83,86	2538,2	0,2963	8,6684
22	0,02642	0,0010022	51,49	92,23	2541,8	0,3247	8,6241
24	0,02982	0,0010026	45,93	100,59	2545,5	0,3530	8,5806
26	0,03360	0,0010032	41,03	108,95	2549,1	0,3810	8,5379
28	0,03778	0,0010037	36,73	117,31	2552,7	0,4088	8,4959
30	0,04241	0,0010043	32,93	125,66	2556,4	0,4365	8,4546
32	0,04753	0,0010049	29,57	134,02	2560,0	0,4640	8,4140
34	0,05318	0,0010056	26,60	142,38	2563,6	0,4913	8,3740
36	0,05940	0,0010063	23,97	150,74	2567,2	0,5184	8,3348
38	0,06624	0,0010070	21,63	159,09	2570,8	0,5453	8,2962
40	0,07375	0,0010078	19,55	167,45	2574,4	0,5721	8,2583
42	0,08198	0,0010086	17,69	175,81	2577,9	0,5987	8,2209
44	0,09100	0,0010094	16,04	184,17	2581,5	0,6252	8,1842
46	0,10086	0,0010103	14,56	192,53	2585,1	0,6514	8,1481
48	0,11162	0,0010112	13,23	200,89	2588,6	0,6776	8,1125
50	0,12335	0,0010121	12,05	209,26	2592,2	0,7035	8,0776
52	0,13613	0,0010131	10,98	217,62	2595,7	0,7293	8,0432
54	0,15002	0,0010140	10,02	225,98	2599,2	0,7550	8,0093
56	0,16511	0,0010150	9,159	234,35	2602,7	0,7804	7,9759
58	0,18147	0,0010161	8,381	252,72	2606,2	0,8058	7,9431
60	0,19920	0,0010171	7,679	251,09	2609,7	0,8310	7,9108
62	0,2184	0,0010182	7,044	259,46	2613,2	0,8560	7,8790
64	0,2391	0,0010193	6,469	267,84	2616,6	0,8809	7,8477
66	0,2615	0,0010205	5,948	276,21	2620,1	0,9057	7,8168
68	0,2856	0,0010217	5,475	284,59	2623,5	0,9303	7,7864
70	0,3116	0,0010228	5,046	282,97	2626,9	0,9548	7,7565
72	0,3396	0,0010241	4,656	301,35	2630,3	0,9792	7,7270
74	0,3696	0,0010253	4,300	309,74	2633,7	1,0035	7,6979
76	0,4019	0,0010266	3,976	318,13	2637,1	1,0275	7,6693
78	0,4365	0,0010279	3,680	326,52	2640,4	1,0514	7,6410
80	0,4736	0,0010292	3,409	334,92	2643,8	1,0753	7,6132
82	0,5133	0,0010305	3,162	343,31	2647,1	1,0990	7,5850
84	0,5557	0,0010319	2,935	351,71	2650,4	1,1225	7,5588
86	0,6011	0,0010333	2,727	360,12	2653,6	1,1460	7,5321
88	0,6495	0,0010347	2,536	368,53	2656,9	1,1693	7,5058
90	0,7011	0,0010361	2,361	376,94	2660,1	1,1925	7,4799
92	0,7561	0,0010376	2,200	385,36	2663,4	1,2156	7,4543
94	0,8146	0,0010391	2,052	393,78	2666,6	1,2386	7,4291
96	0,8769	0,0010406	1,915	402,20	2669,7	1,2615	7,4042
98	0,9430	0,0010421	1,789	410,63	2672,9	1,2842	7,3796
100	0,0133	0,0010437	1,673	419,06	2676,0	1,3069	7,3554
102	1,0878	0,0010453	1,566	427,50	2679,1	1,3294	7,3315

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Давление насыщения $p, 10^5 \text{ Па}$	Удельный объем v , $\text{м}^3/\text{кг}$		Энтальпия i , кДж/кг		Энтальпия s , кДж/(кг·К)	
		воды	пара	воды	пара	воды	пара
104	1,1668	0,0010469	1,466	435,95	2682,2	1,3518	7,3078
106	1,2504	0,0010485	1,374	444,40	2685,3	1,3742	7,2845
108	1,3390	0,0010502	1,289	452,85	2688,3	1,3964	7,2615
110	1,4327	0,0010519	1,210	461,32	2691,3	1,4185	7,2388
112	1,5316	0,0010536	1,137	469,78	2694,3	1,4405	7,2164
114	1,6362	0,0010553	1,069	478,26	2697,2	1,4624	7,1942
116	1,7465	0,0010571	1,005	487,74	2700,2	1,4842	7,1723
118	1,8628	0,0010588	0,9463	495,23	2703,1	1,5060	7,1507
120	1,9854	0,0010606	0,8915	503,72	2706,0	1,5276	7,1293

до состояния насыщения. Когда известно парциальное давление водяного пара, температуру точки росы воздуха определяют из таблиц пара.

Подобным же образом, когда известна температура воздуха, парциальное давление водяного пара также определяют из таблиц пара.

СОДЕРЖАНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА В ВОЗДУХЕ

Пример 5-1. Принимаем, что определенное количество воздуха имеет температуру 26°C , а парциальное давление водяного пара в воздухе равно 1227 Па . Определить температуру точки росы воздуха.

Решение. По табл. 5-1 находим, что температура насыщения пара, соответствующая давлению 1227 Па , составляет 10°C . Это и есть температура точки росы воздуха.

Пример 5-2. Воздух при температуре 26°C имеет температуру точки росы 16°C . Определить парциальное давление водяного пара в воздухе.

Решение. По табл. 5-1 находим, что давление насыщения, соответствующее 16°C , равно $1816,8 \text{ Па}$. Это давление является также и парциальным давлением водяного пара.

Давление пара прямо пропорционально его плотности. Температура точки росы воздуха является функцией парциального давления водяного пара, и поэтому для данного объема воздуха температура точки росы зависит от массовой доли водяного пара в воздухе. Если массовая доля водяного пара (плотность пара) не меняется, температура точки росы воздуха также остается постоянной.

Увеличение количества водяного пара в воздухе повышает давление водяного пара и температуру точки росы. Таким же образом уменьшение количества водяного пара вызывает снижение давления водяного пара и температуры точки росы.

Количество пара, которое смешивается с данным объемом сухого воздуха, зависит только от температуры воздуха. Количество водяного пара в воздухе определяет парциальное давление пара. Поэтому очевидно, что воздух содержит максимальное количество водяного пара, когда пар создает максимально возможное давление. Максимальное давление любого пара — это давление насыщения при соответствующей температуре. В состоянии насыщения температура воздуха и температура точки росы равны.

АБСОЛЮТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ

Абсолютная влажность воздуха в любом данном состоянии — это масса водяного пара в единице объема воздуха, т. е. плотность пара. Абсолютную влажность или плотность пара обычно обозначают символом γ и измеряют в граммах на метр кубический или килограммах на метр кубический.

Давление водяного пара в воздухе исключительно низкое и поэтому для него можно применять законы идеального газа. Для определения абсолютной влажности (плотности пара) по уравнению (3-8) можно использовать таблицу пара (см. табл. 5-1).

Пример 5-3. Определить абсолютную влажность воздуха с температурой точки росы 20°C , если газовая постоянная R водяного пара низкого давления равна $461 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Решение. В таблице пара (см. табл. 5-1) находим, что давление пара, соответствующее температуре насыщения 20°C , равно 2337 Па . Принимая, что объем V равен 1 м^3 и применяя уравнение (3-8), находим, что масса 1 м^3 водяного пара равна

$$m = pV/RT = 2337 \text{ Па} \times 1 \text{ м}^3 / [461 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times \times (20^{\circ}\text{C} + 273,15)] = 0,01729 \text{ кг, т. е.}$$

$$\gamma = 0,01729 \text{ кг/м}^3.$$

Абсолютную влажность (плотность пара) можно определить, используя обратную величину удельного объема пара, указанного в таблице. В примере 5-3 удельный объем насыщенного пара при температуре точки росы 20°C , как указано в табл. 5-1, равен $57,84 \text{ м}^3/\text{кг}$, и поэтому абсолютная влажность $\gamma = 1:57,84 \text{ м}^3/\text{кг} = 0,017289 \text{ кг/м}^3$.

Относительная влажность

Относительная влажность, выраженная в процентах, — это отношение действительного парциального давления p_p водяного пара в данном объеме воздуха к парциальному давлению p_n водяного пара в насыщенном воздухе при той же температуре воздуха, т. е.

$$\varphi = (p_p/p_n^*) \cdot 100. \quad (5-1)$$

Иногда относительную влажность (в процентах) определяют как отношение действительной плотности пара γ_p к плотности насыщенного пара γ_n . Получаемая величина в основном совпадает с величиной, вычисленной по уравнению (5-1).

Пример 5-4. Воздух при 26°C имеет температуру точки росы 10°C . Определить относительную влажность.

Решение. В табл. 5-1 находим, что парциальное давление водяного пара p_n , соответствующее температуре точки росы при 10°C , равно 1227 Па , а парциальное давление p_p , соответствующее температуре точки росы при 26°C , равно 3360 Па . По уравнению (5-1) рассчитываем

$$\varphi = (1227 \text{ Па}/3360 \text{ Па}) \cdot 100 = 36,5\%.$$

Пример 5-5. Вычислить относительную влажность воздуха (исходные данные взяты из примера 5-4), если температура воздуха снизилась до 16°C .

Решение. Температура точки росы остается неизменной, так как влагосодержание воздуха то же самое. По табл. 5-1 находим, что парциальные давления водяного пара, соответствующие температурам точки росы 10 и 16°C , равны 1227 Па и $1816,8 \text{ Па}$ соответственно. Применяя уравнение (5-1), определяем

$$\varphi = (1227 \text{ Па}/1816,8 \text{ Па}) \cdot 100 = 67,5\%.$$

Удельная влажность

Удельная влажность¹, называемая иногда влагосодержанием, — это содержание массы водяного пара в единице массы сухого воздуха. Ее обычно измеряют в граммах или килограммах на 1 кг сухого воздуха и обозначают символом d .

При любом барометрическом давлении удельная влажность является функцией только температуры точки росы. Однако удельная влажность, соответствующая любой температуре точки росы, колеблется с изменением общего барометрического давления, увеличиваясь с уменьшением давления. Причина этого легко объяснима. В соответствии с за-

¹ Во многих источниках термины «удельная влажность» и «влагосодержание» используются как взаимозаменяемые. Однако Американское общество инженеров по отоплению, холодильной технике и кондиционированию воздуха в своем справочнике «Основы холодильной техники 1972» на с. 98 дает следующее определение: «Влагосодержание — это отношение массы водяного пара к единице массы влажного воздуха».

конами идеального газа объем единицы массы воздуха увеличивается с понижением общего барометрического давления. Плотность пара меняется обратно пропорционально объему, и потому масса водяного пара, требуемая для создания данной плотности и давления пара, увеличивается с увеличением объема воздуха.

Если барометрическое давление и температура точки росы известны, то удельную влажность легко определить из следующего соотношения, которое выведено из уравнения газового состояния [уравнение (3-8)]:

$$d = 0,622 \text{ кг/кг} \times p'' / (p - p''), \quad (5-2)$$

где d — удельная влажность водяного пара в кг на 1 кг сухого воздуха; p — барометрическое давление, Па; p_p — парциальное давление водяного пара, соответствующее температуре точки росы, Па.

Пример 5-6. Определить удельную влажность воздуха при стандартном барометрическом давлении при 26°C и температуре точки росы 10°C .
Решение. В табл. 5-1 находим, что парциальное давление водяного пара, соответствующее температуре точки росы 10°C , равно 1227 Па, а нормальное атмосферное давление составляет 101325 Па. По уравнению (5-2) определяем

$$d = 0,622 \text{ кг/кг} \times 1227 \text{ Па} / (101325 \text{ Па} - 1227 \text{ Па}) = 0,00762 \text{ кг/кг, или } 7,62 \text{ г/кг.}$$

Пример 5-7. Вычислить удельную влажность воздуха (исходные данные см. в примере 5-6), если воздух насыщен водяным паром.

Решение. По табл. 5-1 определяем, что парциальное давление, соответствующее температуре точки росы 26°C , равно 3360 Па. Путем подстановки в уравнение (5-2) находим

$$d = 0,622 \text{ кг/кг} \times 3360 \text{ Па} / (101325 \text{ Па} - 3360 \text{ Па}) = 0,02133 \text{ кг/кг.}$$

Степень насыщения

Степень насыщения — это отношение массы водяного пара в единице массы сухого воздуха к массе водяного пара,

насыщающего воздух. Степень насыщения, как и относительная влажность, выражается в процентах:

$$\psi = (d/d'') 100, \quad (5-3)$$

где d — действительная удельная влажность ненасыщенного сухого воздуха; d'' — удельная влажность насыщенного воздуха при той же температуре.

Пример 5-8. Воздух при нормальном атмосферном давлении и температуре 26°C имеет температуру точки росы 10°C . Определить степень насыщения воздуха.

Решение. Из примеров 5-6 и 5-7 известно, что величины удельной влажности, соответствующие температурам точки росы 10°C и 26°C , равны 0,00762 кг/кг и 0,02133 кг/кг соответственно. По уравнению (5-3) вычисляем $\psi = 0,00762 \text{ кг/кг} \times 100 / 0,02133 \text{ кг/кг} = 35,7\%$.

ТЕМПЕРАТУРА ПО СУХОМУ И ВЛАЖНОМУ ТЕРМОМЕТРАМ

Температура воздуха по сухому термометру — это температура, измеренная с помощью обычного термометра. При измерении температуры воздуха по сухому термометру шарик последнего должен быть затенен для уменьшения влияния теплопередачи излучением.

Температура воздуха по влажному термометру — это температура, измеренная влажным термометром. Влажный термометр — это обычный термометр, шарик которого заключен во влажный мешочек или фитиль. Для получения точного показания по влажному термометру фитиль должен быть насыщен чистой водой примерно при температуре воздуха по сухому термометру, а скорость движения воздуха у фитиля должна быть от 5 до 10 м/с. Эта скорость может моделироваться в неподвижном воздухе посредством кручения термометра, подвешенного на конце цепочки. Пращевой психрометр — это специально сконструированный для этой цели прибор (рис. 5-1). Пращевой психрометр состоит из двух термометров: влажного и сухого,

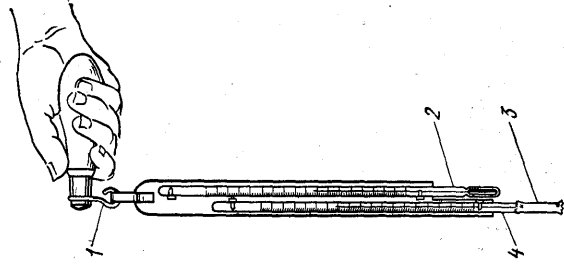


Рис. 5-1. Пращевой психрометр:

1 — шарнирное соединение; 2 — сухой термометр;
3 — влажный фитиль; 4 — влажный термометр

смонтированных рядом друг с другом в защитном кожухе, прикрепленном к ручке шарнирным соединением, в результате чего кожух легко вращается. После насыщения фитиля чистой водой прибор быстро вращают в воздухе в течение примерно 1 мин, после чего снимают показания сухого и влажного термометров. Этот процесс повторяют несколько раз для точности измерения.

Температура воздуха по влажному термометру всегда ниже температуры по сухому термометру. Исключение составляет измерение температуры при 100%-ном насыщении воздуха. В этом случае температура по сухому и влажному термометрам и температура точки росы будут одинаковыми. Разность температур по влажному и сухому термометрам зависит от относительной влажности воздуха и называется психрометрической разностью.

Сухой термометр, на который влажность воздуха не действует, измеряет только действительную температуру воздуха. Влажность воздуха значительно

влияет на показания влажного термометра. Температура по влажному термометру характеризуется, таким образом, соотношением между температурой воздуха по сухому термометру и влажосодержанием воздуха. Вообще, чем ниже влажосодержание воздуха, тем ниже температура по влажному термометру при любой данной температуре по сухому термометру. Причина этого легко объяснима.

Когда ненасыщенный воздух контактирует с водой, вода испаряется с интенсивностью, пропорциональной разности между давлением пара над поверхностью воды и давлением водяного пара в воздухе. Следовательно, когда влажный термометр быстро вращают в ненасыщенном воздухе, вода будет испаряться из фитиля, охлаждая тем самым воду, остающуюся в фитиле (и шарик термометра), до некоторой температуры, которая ниже температуры воздуха по сухому термометру.

Важно помнить, что температура воздуха по влажному термометру характеризуется соотношением между температурой воздуха по сухому термометру и точки росы. Используя температуру воздуха по влажному термометру, легко определять температуру точки росы воздуха, если известна температура по сухому термометру. Ниже будет показано, что температура по влажному термометру является также показателем энthalпии воздуха.

Для испарения воды из фитиля влажного термометра необходима теплота. Испарение части воды с поверхности фитиля приводит к охлаждению оставшейся в нем воды. Поэтому в процессе испарения воды из фитиля остающаяся в нем вода охлаждается до температуры ниже температуры воздуха по сухому термометру. При этом создается разность температур и теплота переходит от воздуха к фитилю. В этих условиях часть теплоты для парообразования поглощается из воздуха, а другая часть — из оставшейся в фитиле воды. При даль-

нейшем понижении температуры фитилей разность между температурами воздуха и фитиля увеличивается и все больше теплоты для испарения воды из фитиля отводится от воздуха и меньше от оставшейся в фитиле воды. Несмотря на продолжающийся процесс испарения воды из фитиля, температура последнего стабилизируется, когда температура фитиля понизится до точки, при которой разность между температурами воздуха и фитиля станет такой, что теплоты воздуха будет достаточно для испарения воды из фитиля. Наступившее состояние адиабатного насыщения характеризуется температурой воздуха по влажному термометру.

Тщательный анализ вышесказанного показывает, что температура по влажному термометру зависит от температуры по сухому термометру и количества водяного пара в воздухе. Например, чем ниже относительная влажность воздуха, тем выше интенсивность испарения воды из фитиля и тем больше требуется теплоты для осуществления процесса испарения. Очевидно, чем выше потребность в теплоте, тем больше психрометрическая разность. Из этого также следует, что чем ниже температура по сухому термометру, тем ниже температура по влажному термометру для любой данной психрометрической разности.

ЭНТАЛЬПИЯ ВОЗДУХА

Воздух характеризуется сухой и скрытой теплотой. Общее количество теплоты воздуха в любом состоянии — это сумма сухой и скрытой теплоты.

Ниже будет показано, что сухая теплота воздуха — это функция температуры по сухому термометру, скрытая теплота воздуха — это функция температуры точки росы, а общее количество теплоты воздуха — это функция температуры по влажному термометру.

Сухая теплота воздуха

Сухая теплота воздуха при данной температуре по сухому термометру — это энтальпия сухого воздуха. Ее можно вычислить по уравнению (3-16).

Для данного расчета принимаем, что $(T_2 - T_1)$ в уравнении (3-16) в цифровом выражении равна температуре воздуха по сухому термометру. При средней удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении c_p , равной 1 кДж/(кг · К), удельная энтальпия i сухого воздуха (в кДж/кг) арифметически равна температуре T воздуха по сухому термометру в градусах Цельсия.

Энтальпию сухого воздуха определяют по следующей формуле:

$$I = m c_p T, \quad (5-4)$$

или

$$I = m i, \quad (5-5)$$

где m — масса сухого воздуха, кг.

Пример 5-9. Определить сухую теплоту 12 кг воздуха с температурой по сухому термометру 26°C и удельной влажностью 0,01 кг/кг, причем последняя соответствует температуре точки росы примерно 14°C .

Решение. По уравнению (5-4) находим

$$I = 12 \text{ кг} \times 1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \times 26^\circ\text{C} = 312 \text{ кДж}.$$

Обратите внимание, что в примере 5-9 сухая теплота воздуха — это функция только температуры по сухому термометру, а температура точки росы не оказывает на нее никакого влияния.

Количество переданной сухой теплоты при нагревании или охлаждении любой данной массы воздуха от какой-либо начальной до конечной температуры по сухому термометру также можно рассчитать по уравнению (3-16). Принимая, что удельная теплоемкость при постоянном давлении c_p для воздуха равна 1 кДж/(кг · К), уравнение (3-16) можно записать следующим образом:

$$Q = m c_p \Delta T, \quad (5-6)$$

где Q — сухая теплота, кДж; m — масса сухого воздуха, кг; ΔT — разность между

начальной и конечной температурами по сухому термометру, °С или К.

Сухую теплоту при нагревании или охлаждении m кг воздуха определяют также умножением массы воздуха на разность удельных энтальпий сухого воздуха в начальном и конечном состояниях:

$$Q = m\Delta i. \quad (5-7)$$

Пример 5-10. Воздух массой 20 кг нагревают от 15 до 50°С. Определить количество полученной воздухом сухой теплоты.

Решение. По уравнению (5-6) находим

$$Q = 20 \text{ кг} \times 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times (50^\circ\text{С} - 15^\circ\text{С}) = \\ = 700 \text{ кДж}.$$

Скрытая теплота воздуха

Компоненты сухого воздуха не конденсируются при комнатной температуре и атмосферном давлении. С практической точки зрения скрытой теплотой воздуха является скрытая теплота водяного пара, находящегося в воздухе. Поэтому количество скрытой теплоты, содержащейся в любом количестве воздуха, зависит от массовой доли водяного пара в нем и скрытой теплоты парообразования воды при соответствующей температуре насыщения водяного пара.

Поскольку температура насыщения водяного пара — это также и температура точки росы, то последняя влияет не только на массовую долю водяного пара в воздухе, но также и величину скрытой теплоты парообразования. Следовательно, скрытая теплота воздуха — это функция только температуры точки росы. Если температура точки росы воздуха остается неизменной, то скрытая теплота воздуха также не меняется.

Энтальпия насыщенного водяного пара при различных температурах насыщения приведена в табл. 5-1 (колонка 6).

Количество сухой теплоты в воздухе относительно мало, и можно считать, что вся теплота водяного пара — это скрытая теплота парообразования. Но

на практике удобно считать, что сухая теплота воздуха является энтальпией сухого воздуха, скрытая теплота сухого воздуха — это энтальпия водяного пара, а их сумма — энтальпия воздуха.

Скрытую теплоту любой данной массы воздуха можно вычислить по уравнению

$$I = mdi'', \quad (5-8)$$

где I — скрытая теплота любой данной массы сухого воздуха с удельной влажностью d , кДж; m — масса сухого воздуха, кг; d — удельная влажность, кг/кг; i'' — удельная энтальпия водяного пара, содержащегося в воздухе, обычно принимаемая как энтальпия водяного пара при температуре насыщения, равной температуре точки росы воздуха, кДж/кг.

Для 1 кг воздуха уравнение (5-8) имеет вид

$$i = di'', \quad (5-9)$$

где i — скрытая теплота 1 кг сухого воздуха с удельной влажностью d , кДж/кг.

Обратите внимание на то, что в любой смеси сухого воздуха и водяного пара массу воздуха m следует считать массой сухого воздуха.

Пример 5-11. Определить скрытую теплоту 10 кг воздуха с температурой 30°С по сухому термометру и температурой точки росы 20°С.

Решение. По табл. 5-1 находим, что давление насыщения, соответствующее температуре насыщения при 20°С, равно 2337 Па, а энтальпия насыщенного пара i'' при данной температуре насыщения равна 2538,2 кДж/кг. Принимая стандартное барометрическое давление на уровне моря 101325 Па, по уравнению (5-2) определяем удельную влажность

$$d = 0,622 \text{ кг}/\text{кг} \times 2337 \text{ Па} / (101325 \text{ Па} - \\ - 2337 \text{ Па}) = 0,01468 \text{ кг}/\text{кг} = 14,68 \text{ г}/\text{кг}.$$

По уравнению (5-8) вычисляем

$$I = 10 \text{ кг} \times 0,01468 \text{ кг}/\text{кг} \times 2538,2 \text{ кДж}/\text{кг} = \\ = 372,6 \text{ кДж}.$$

Следует иметь в виду, что расчеты в предыдущем примере, а также все подобные расчеты отличаются некоторой неточностью.

энтальпия водяного пара i не является полностью скрытой теплотой; это сумма сухой теплоты жидкости при температуре выше 0°C и скрытой теплоты парообразования;

масса воздуха в действительности равна 10 кг сухого воздуха плюс масса водяного пара в смеси с сухим воздухом, т. е. 10 кг сухого воздуха плюс 0,1468 кг водяного пара составят 10,1468 кг; энтальпия водяного пара i'' — это энтальпия при насыщении воздуха водяным паром, она не включает сухую теплоту перегретого пара.

Вспомним, что все компоненты в любой смеси газа и пара имеют одинаковую температуру по сухому термометру. По этой причине, за исключением случая с насыщенным воздухом (когда температуры по сухому термометру и точки росы одинаковы), водяной пар в воздухе находится в перегретом состоянии, а степень перегрева — это разность между температурами точки росы воздуха T_p и по сухому термометру T_c . В примере 5-11 водяной пар в воздухе перегрет с 20°C (температура точки росы) до 30°C (температура по сухому термометру). Принимая, что средняя удельная теплоемкость водяного пара c_p равна 1,88 кДж/(кг · К) и применяя уравнение (3-18), находим, что величина перегрева водяного пара равна 2,76 кДж (0,1468 кг × 1,88 кДж/(кг · К) × 10°C) для 10 кг воздуха.

Из сказанного очевидно, что скрытую теплоту 1 кг сухого воздуха можно определить более точно, если учесть перегрев водяного пара:

$$i'' = i + c_p (T_{c-t} - T_p), \quad (5-10)$$

где c_p — средняя удельная теплоемкость водяного пара, равная 1,88 кДж/(кг · К).

Все рассмотренные неточности не столь значительны, и в практических расчетах ими можно пренебречь.

Если нет таблиц пара, то для определения энтальпии низкотемпературного пара низкого давления (например, в

воздухе) можно пользоваться удобным эмпирическим уравнением

$$i'' = i + c_p T_{c-t}, \quad (5-11)$$

где i — энтальпия водяного пара, равная 2502 кДж/кг; $c_p = 1,88$ кДж/(кг · К).

Расчет по уравнению (5-11) позволяет получить довольно точные значения энтальпии для насыщенного или перегретого водяного пара в диапазоне температур от 0 до 50°C .

Количество скрытой теплоты $Q_{\text{скр}}$ полученной или отведенной от любой данной массы воздуха при его увлажнении или удалении водяного пара соответственно, определяют, умножая массу сухого воздуха на разность энтальпий (на 1 кг воздуха) в начальном и конечном состояниях, т. е.

$$Q_{\text{скр}} = m (i_2 - i_1). \quad (5-12)$$

Так как

$$i_1 = d_1 i_1' \text{ и } i_2 = d_2 i_2',$$

то

$$Q_{\text{скр}} = m [(d_2 i_2') - (d_1 i_1')], \quad (5-13)$$

где индексы 1 и 2 обозначают начальное и конечное состояние воздуха соответственно. Если скрытая теплота воздуха в начальном состоянии меньше скрытой теплоты в конечном состоянии, то результаты, полученный по уравнениям (5-12) и (5-13), будет отрицательным. Это указывает на то, что скрытая теплота и водяной пар отводятся из воздуха, а не добавляются к нему.

Пример 5-12. Воздух массой 45 кг с температурами по сухому термометру и точки росы 35°C и 20°C соответственно проходит за 1 мин через испаритель и охлаждается до конечной температуры по сухому термометру 12°C . Принимая, что воздух на выходе из испарителя насыщен (температуры по сухому, влажному термометрам и точки росы одинаковы) и величины удельной влажности, соответствующие 20°C и 12°C , равны 0,01468 кг/кг и 0,0087 кг/кг соответственно, рассчитать:

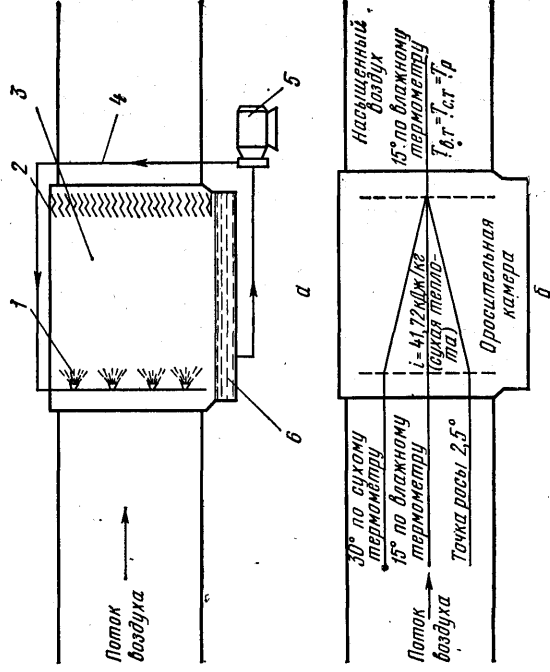
a — массу водяного пара, сконденсированного из воздуха;

b — введенную скрытую теплоту.

Решение. По таблице пара находим (см. табл. 5-1), что энтальпия насыщенного

Рис. 5-2. Адиабатное увлажнение воздуха:

a — оросительная камера для увлажнения воздуха; *1* — распылительные сопла; *2* — отбойник струи; *3* — оросительная камера; *4* — трубопровод подачи орошающей воды; *5* — циркуляционный насос; *6* — поддон для воды; *б* — схема процесса увлажнения в оросительной камере; $T_{в.т}$ — температура по влажному термометру; $T_{с.т}$ — температура по сухому термометру; T_p — температура точки росы



водяного пара равна 2538,2 кДж/кг при 20°C и 2523,6 кДж/кг при 12°C. 45 кг/мин эквивалентно 0,75 кг/с.

a. Масса конденсируемого водяного пара $M = m(d'' - d_2) = 0,75 \text{ кг/с} (0,01468 \text{ кг/кг} - 0,00872) = 0,00447 \text{ кг/с} = 16,09 \text{ кг/ч}$.

б. По уравнению (5-9) находим $i_1 = 0,01468 \text{ кг/кг} \times 2538,2 \text{ кДж/кг} = 37,06 \text{ кДж на 1 кг сухого воздуха}$; $i_2 = 0,00872 \text{ кг/кг} \times 2523,6 \text{ кДж/кг} = 22,01 \text{ кДж на 1 кг сухого воздуха}$.

Используя уравнение (5-12), определяем $Q_{св.р} = 0,75 \text{ кг/с} (37,26 - 22,01) = 11,44 \text{ кДж/с} = 11,44 \text{ кВт}$.

Общее количество теплоты воздуха

Энтальпия воздуха — это сумма энтальпии сухого воздуха и энтальпии водяного пара. Поэтому для 1 кг воздуха

$$i = i_c + i_d, \quad (5-14)$$

где i — энтальпия влажного воздуха, кДж/кг; i_c — энтальпия сухого воздуха, кДж/кг; i_d — энтальпия водяного пара, кДж на 1 кг сухого воздуха.

Для m кг воздуха

$$I = m i, \quad (5-15)$$

где I — энтальпия m кг воздуха, кДж.

Общее количество теплоты Q , полученное воздухом или отведенное от него при его нагревании или охлаждении соответственно, определяется из следующего уравнения:

$$Q = m(i_2 - i_1), \quad (5-16)$$

где индексы 1 и 2 обозначают начальное и конечное состояния воздуха соответственно. Если энтальпия воздуха в состоянии 1 выше, чем в состоянии 2, то результат отрицательный. Это указывает на то, что теплота отводится от воздуха.

Адиабатные процессы, например процесс, рассмотренный выше, распространены и называются процессами адиабатного увлажнения или охлаждения при испарении в зависимости от их назначения¹. В любом случае процесс происходит при контакте ненасыщенного воздуха с водой, обычно орошением воздуха водой (рис. 5-2). Вода поступает в виде струи в воздух, увеличивая тем самым его удельную влажность, темпе-

¹ Процессы, происходящие без теплопередачи к рабочей среде или без отвода теплоты от нее, называют адиабатными процессами.

ратуру точки росы и скрытую теплоту воздуха. Воздух является теплоотдатчиком скрытой теплоты парообразования. Количество сухой теплоты воздуха уменьшается на величину, равную увеличению скрытой теплоты, а температура по сухому термометру соответственно снижается¹. Если воздух орошается водой в течение достаточного времени, то он становится насыщенным (по температуре влажного термометра) на входе в оросительную камеру.

В данном процессе принимается, что температура орошающей воды в оросительной камере равна температуре воздуха по влажному термометру на входе. Это происходит, когда орошающая вода непрерывно рециркулирует без нагревания (охлаждения) внешним теплоотдачиком (теплоприемником).

Температура по влажному термометру как показатель энтальпии

Ранее указывалось, что энтальпия сухого воздуха является функцией температуры воздуха по сухому термометру, а скрытая теплота воздуха (энтальпия водяного пара в смеси с сухим воздухом) — функцией температуры точки росы. Температура по влажному термометру может иметь только одно значение при любой комбинации температур по сухому термометру и точки росы, поэтому температура по влажному термометру является показателем энтальпии воздуха.

Хотя имеется только одна температура по влажному термометру, которая удовлетворяет любую комбинацию температур по сухому термометру и точки росы, есть много комбинаций температур по сухому термометру и точки росы при

¹ В действительности энтальпия воздуха на выходе из адиабатного увлажнителя несколько выше, чем на входе. Увеличение энтальпии равно сухой теплоте воды или водяного пара, добавляемого во время процесса.

одинаковой температуре по влажному термометру (табл. 5-2). Это означает, что различные образцы воздуха с одинаковой температурой по влажному термометру имеют одинаковую энтальпию,

Т а б л и ц а 5-2

Параметры воздуха с температурой 60°C по влажному термометру

Температура, °С		Энтальпия, кДж/кг			
по сухому термо- метру	точки росы	сухая теплота	скрытая теплота парообра- зования	суммарная	
60	60	34,47	27,87	62,34	
65	57	36,26	25	61,26	
70	53,7	39,05	22,17	61,43	
75	50	41,85	19,31	61,16	
80	45,5	44,64	16,4	61,04	
85	40,7	45,59	13,51	59,1	
90	34,7	50,22	10,65	60,87	

несмотря на то что отношение сухой теплоты к скрытой может быть неодинаковым в различных образцах.

В действительности энтальпия воздуха является функцией температуры по влажному термометру только в том случае, когда воздух насыщенный. Энтальпия частично насыщенного воздуха несколько отличается от энтальпии насыщенного воздуха при той же температуре по влажному термометру. Обратите внимание (см. табл. 5-2), что разность энтальпий частично насыщенного и насыщенного воздуха, называемая отклонением энтальпии, увеличивается с уменьшением относительной влажности частично насыщенного воздуха (при увеличении разности между температурами по сухому термометру и точки росы). Однако ошибка, появляющаяся при предположении, что все образцы воздуха характеризуются одинаковой температурой по влажному термометру, часто мала, и во многих случаях ею можно пренебречь. Отклонение энтальпии расматривается ниже более подробно.

СТАНДАРТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУХА

При расчетах массы и энергии, рассмотренных выше, временной параметр в основном не учитывался. Однако на практике интенсивность потока теплоты представляет больший интерес, чем количество теплоты, так как элемент времени часто вводится в основные уравнения массы и энергии путем подстановки вместо величины массы (в кг) массового расхода (в кг/с). В этом случае полученные при решении уравнения результаты выражают интенсивность потока теплоты в джоулях на секунду, или в ваттах, а не количество теплоты в джоулях.

На практике количество воздуха удобно выражать в единицах объема, а не массы. Однако объем любой данной массы воздуха зависит от температуры и давления в соответствии с законами идеального газа. Поэтому разработан стандарт, по которому определенный объем или объемный расход потока воздуха представляет собой известный эквивалент массы или массового расхода. Стандартным считается воздух с плотностью $1,2 \text{ кг/м}^3$ или с удельным объемом $(1/1,2) 0,833 \text{ м}^3/\text{кг}$ при стандартном барометрическом давлении и температуре 21°C .

Понятие «стандартный воздух» позволяет оценить оборудование для обработки воздуха, работающее в одинаковых условиях. Кроме того, величину произведения объема стандартного воздуха на его плотность $(1,2 \text{ кг/м}^3)$ можно использовать для подстановки в уравнения вместо значения массы m .

Данный объем воздуха в любом состоянии можно преобразовать в эквивалентный объем стандартного воздуха, используя одно из следующих уравнений:

$$V_{\text{ст}} = V_{\text{д}} v_{\text{ст}}/v_{\text{д}}; \quad (5-17)$$

$$V_{\text{ст}} = V_{\text{д}} T_{\text{ст}}/T_{\text{д}}, \quad (5-18)$$

где $V_{\text{ст}}$ — объем стандартного воздуха, м^3 ;
 $V_{\text{д}}$ — действительный объем воздуха, м^3 ;
 $v_{\text{ст}}$ — удельный объем стандартного воздуха,

$v_{\text{ст}} = 0,833 \text{ м}^3/\text{кг}$; $v_{\text{д}}$ — действительный удельный объем воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$; $T_{\text{ст}}$ — температура стандартного воздуха, $T_{\text{ст}} = 294 \text{ K}$; $T_{\text{д}}$ — действительная температура воздуха, K .

Пример 5-13. Определить эквивалентный стандартный объем 150 м^3 воздуха при температуре 15°C по сухому термометру.

Решение. По уравнению (5-18) находим

$$V_{\text{ст}} = 150 \text{ м}^3 \times 294 \text{ K} / (15^\circ \text{C} + 273) = 153 \text{ м}^3.$$

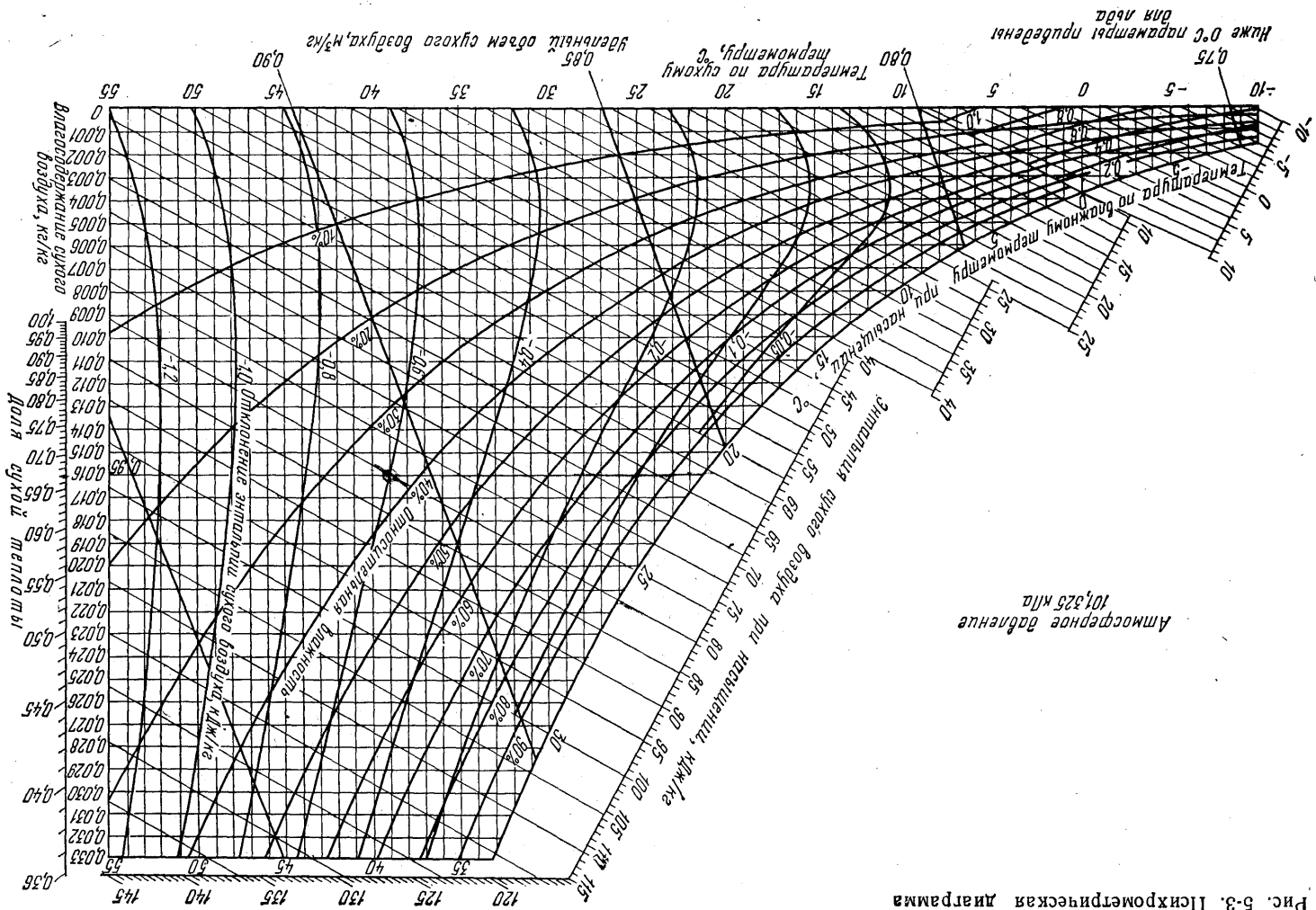
ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ

Психометрическая диаграмма — это графическое изображение психометрических параметров воздуха. Использование диаграмм позволяет осуществить графический анализ психометрических данных и процессов, облегчая тем самым решение многих практических задач, связанных с обработкой воздуха, которые бы иначе решались посредством более трудоемких математических методов. Стандартная психометрическая диаграмма представлена на рис. 5-3. На диаграмме приведены параметры воздуха при стандартном барометрическом давлении.

На рис. 5-4 показано построение психометрической диаграммы и соотношения между некоторыми основными параметрами воздуха. Обратите внимание, что вертикальные линии на диаграмме обозначают постоянную температуру по сухому термометру, а горизонтальные — постоянную температуру точки росы и удельную влажность. Близко расположенные диагональные линии соответствуют постоянной температуре по влажному термометру, а более широко расположенные линии — постоянному удельному объему.

Кривые, идущие от нижнего левого края к верхнему правому, характеризуют относительную влажность воздуха. Кривая на левой стороне диаграммы обозначает 100%-ную относительную влажность и называется кривой насыщения Воздух, находящийся в состоянии, точка параметров которого находится на

Рис. 5-3. Психрометрическая диаграмма



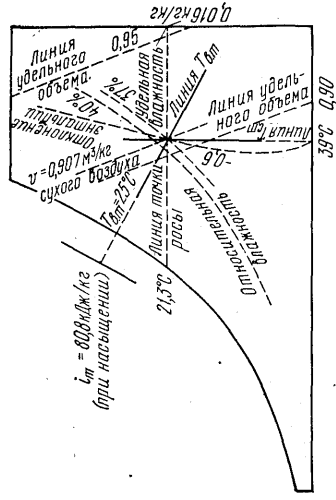


Рис. 5-4. Построение психрометрической диаграммы и соотношения между некоторыми основными параметрами воздуха

кривой насыщения, является насыщенным воздухом. Другие кривые показывают отклонение энthalпии. Отклонение энthalпии — это разность между действительной энthalпией насыщения и удельной энthalпией насыщенного воздуха при той же температуре по влажному термометру.

Значения температур по сухому и влажному термометрам соответствуют точки пересечения линий с кривой насыщения. Температура по сухому термометру, так же как и значения удельного объема, даны внизу диаграммы.

Значения температуры точки росы считаются на кривой насыщения, а соответствующая удельная влажность — на той же линии у шкалы справа.

Удельную энthalпию насыщенного воздуха при любой данной температуре по влажному термометру определяют в точке пересечения линии температуры по влажному термометру со шкалой энthalпии, находящейся над кривой насыщения. Действительную энthalпию воздуха в любом состоянии определяют алгебраическим суммированием отклонения энthalпии и удельной энthalпии при насыщении.

Ниже приведен пример, показывающий, как пользоваться психрометрической диаграммой.

Пример 5-14. С помощью пращового психометра определено, что воздух в помеще-

нии имеет температуру 39°C по сухому термометру и 26°C по влажному. Определить по психрометрической диаграмме удельную влажность; температуру точки росы; приблизительный удельный объем; удельную энthalпию при насыщении; отклонение энthalпии; действительную удельную энthalпию и приблизительную относительную влажность воздуха.

Решение. Нанесем два известных параметра воздуха на диаграмму и получим координатную точку. Когда эта точка установлена, другие параметры воздуха при данном состоянии считаются следующими образом (см. рис. 5-4): удельная влажность 0,016 кг/кг; температура точки росы 21,3°C; удельный объем сухого воздуха (получают интерполяцией) 0,907 м³/кг; удельная энthalпия (при насыщении) 80,8 кДж/кг; отклонение энthalпии — 0,6 кДж/кг; удельная энthalпия (корректированная) 80,8 — 0,6 = 80,2 кДж/кг; относительная влажность 37%.

Пример 5-15. Определить сухую и скрытую теплоту 1 кг воздуха, параметры которого описаны в примере 5-14.

Решение.

Применяя уравнение (5-4), находим

$$i_0 = 1 \text{ кг} \times 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times 39^\circ\text{C} = 39 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Из примера 5-14 $i = 80,2 \text{ кДж}/\text{кг}$. Следовательно, используя уравнение (5-14), рассчитываем

$$i_H = 80,2 \text{ кДж}/\text{кг} - 39 \text{ кДж}/\text{кг} = 41,2 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Другое решение.

Из примера 5-14 $d = 0,016 \text{ кг}/\text{кг}$. По уравнению (5-11) вычисляем

$$\begin{aligned} i'' &= 2502 \text{ кДж}/\text{кг} + 1,88 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times 39^\circ\text{C} = \\ &= 2575,32 \text{ кДж}/\text{кг}. \end{aligned}$$

Применяя уравнение (5-9), находим

$$\begin{aligned} i_H &= 0,016 \text{ кг}/\text{кг} \times 2575,32 \text{ кДж}/\text{кг} = \\ &= 41,2 \text{ кДж}/\text{кг}. \end{aligned}$$

Психрометрические процессы

Психрометрические процессы могут быть изображены на психрометрической диаграмме. Ряд наиболее важных психрометрических процессов анализируется в следующих параграфах для того, чтобы показать возможность психрометрической диаграммы, а также для введения нескольких новых важных понятий.

Воздушные смеси

Один из наиболее часто встречаемых психрометрических процессов — это смешение двух или большего количества потоков воздуха с различными начальными параметрами. В таких случаях состояние получаемой смеси легко определить посредством составления простого ба-

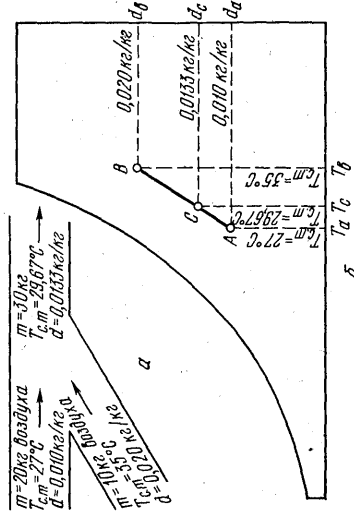


Рис. 5-5. Смешение двух потоков воздуха

ланса массы и энергии. Например, на рис. 5-5, а два потока воздуха, один в состоянии А, а другой в состоянии В, образуют смесь, находящуюся в состоянии С. Очевидно, что масса смеси $m_{см}$ равна сумме масс двух составляющих количеств воздуха, т. е.

$$m_{см} = m_a + m_b. \quad (5-19)$$

Смешение двух потоков воздуха происходит адиабатно (без притока или отвода теплоты) и без притока или потери влажности. Следовательно, энтальпия смеси — это сумма энтальпий составляющих:

$$I_{см,сух} = I_a \text{ сух} + I_b \text{ сух}; \quad (5-20)$$

$$I_{см,п} = I_a \text{ п} + I_b \text{ п}; \quad (5-21)$$

$$I = I_a + I_b; \quad (5-22)$$

$$m_{см} d_{см} = m_a d_a + m_b d_b. \quad (5-23)$$

В соответствии с уравнением (5-4) находим

$$I_{см,сух} = m_{см} c_p T_{см};$$

$$I_a \text{ сух} = m_a c_p T_a;$$

$$I_b \text{ сух} = m_b c_p T_b.$$

Тогда

$$m_{см} c_p T_{см} = m_a c_p T_a + m_b c_p T_b. \quad (5-24)$$

Делением обеих частей уравнения (5-24) на c_p и $m_{см}$ находим

$$T_{см} = (m_a T_a + m_b T_b) / m_{см}. \quad (5-25)$$

Подобным образом при делении обеих частей уравнения (5-23) на $m_{см}$ вычисляем удельную влажность смеси

$$d_{см} = (m_a d_a + m_b d_b) / m_{см}. \quad (5-26)$$

Пример 5-16 20 кг воздуха температурой 27°C по сухому термометру и удельной влажностью 0,01 кг/кг смешиваются с 10 кг воздуха температурой 35°C по сухому термометру и удельной влажностью 0,02 кг/кг (см. рис. 5-5, а). Определить температуру по сухому термометру и удельную влажность смеси.

Решение. (1 способ — расчетный). По уравнению (5-25) определяем

$$\begin{aligned} T_{см} &= (10 \text{ кг} \times 35^\circ\text{C} + 20 \text{ кг} \times 27^\circ\text{C}) / 30 \text{ кг} = \\ &= 29,67^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Используя уравнение (5-26), находим

$$\begin{aligned} d_{см} &= (10 \text{ кг} \times 0,020 \text{ кг/кг} + 20 \text{ кг} \times \\ &\times 0,010 \text{ кг/кг}) / 30 \text{ кг} = 0,0133 \text{ кг на 1 кг} \\ &\text{сухого воздуха}. \end{aligned}$$

Решение (II способ — с помощью психрометрической диаграммы). Нанести параметры каждого из двух компонентов смеси в виде точек на психрометрическую диаграмму (точки А и В на рис. 5-5, б). В связи с тем что изменение влагосодержания и температуры воздуха по сухому термометру носит линейный характер, точка, характеризующая конечное состояние С смеси, будет лежать на прямой линии, соединяющей начальные (до смешения) параметры двух компонентов. Параметры точки С на линии АВ легко определяются при расчете температуры по сухому термометру или влагосодержания смеси, как и в предыдущем решении. Расположение точки С на линии АВ может быть определено графически, так как она всегда делит линию АВ на два отрезка, длина которых прямо пропорциональна массам (или объемам стандартного воздуха) двух компонентов.

Сухой нагрев

Если температура поверхности змеевика, нагретой паром или горячей водой, выше температуры воздуха по сухому термометру, проходящего через змеевик, то происходит его сухой нагрев.

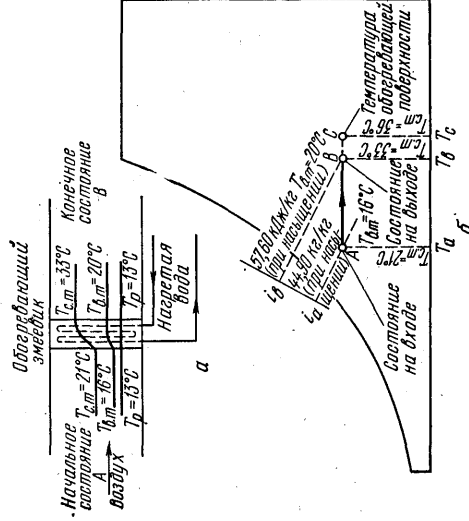


Рис. 5-6. Процесс сухого нагрева

При прохождении через нагретую поверхность воздух поглощает сухую теплоту, в результате чего температура воздуха по сухому термометру повышается и приближается к температуре нагретой поверхности (рис. 5-6, а).

Влага не добавляется и не отводится из воздуха в процессе нагревания. Поэтому его влагосодержание, температура точки росы и скрытая теплота остаются неизменными. Процесс сухого нагрева (или охлаждения) можно показать на диаграмме в виде отрезка на линии постоянной точки росы (постоянной удельной влажности). Ниже приведен типичный пример процесса сухого нагрева.

Пример 5-17. 2 кг воздуха с начальными температурами 21°C по сухому и 16°C по влажному термометрам проходят через обогревающий змеевик, и температура по сухому термометру повышается до 33°C . Найти процесс на психрометрическую диаграмму и определить конечную температуру

воздуха по влажному термометру и количество теплоты, полученной воздухом.

Решение. Используя значения температуры по сухому и влажному термометрам, можно изобразить начальное состояние воздуха на входе в змеевик точкой *A* на диаграмме (рис. 5-6, б). При нагревании воздуха влага не добавляется и не отводится. Процесс характеризует линия постоянной температуры точки росы (постоянной удельной влажности) при повышении температуры по сухому термометру. Конечные параметры воздуха на выходе из змеевика обозначает точка *B*, которая находится на пересечении линии постоянной точки росы с линией постоянной температуры по сухому термометру, соответствующей конечной температуре воздуха по сухому термометру.

Когда точка *B* определена на диаграмме, то находим конечную температуру по влажному термометру. Она равна 20°C .

В данном процессе изменение сухой теплоты равно изменению общего количества теплоты. Поэтому возможны два одинаковых простых решения, которые приведены ниже.

По уравнению (5-6) определяем

$$Q_{\text{сух}} = 2 \text{ кг} \times 1 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К}) \times (33^\circ\text{C} -$$

$$- 21^\circ\text{C}) = 24 \text{ кДж} / \text{с} = 24 \text{ кВт}.$$

На психрометрической диаграмме находим

$$i_a = 44,9 - 0,14 = 44,76 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

$$i_b = 57,6 - 0,45 = 57,15 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Применяя уравнение (5-16), рассчитываем

$$Q = 2 \text{ кг} / \text{с} (57,15 \text{ кДж} / \text{кг} - 44,76 \text{ кДж} / \text{кг}) = \\ = 24,78 \text{ кДж} / \text{с} = 24,78 \text{ кВт}.$$

Коэффициент байпасирования змеевика

Выше было указано, что температура воздуха, проходящего через обогревающий змеевик, близка по сухому термометру к температуре поверхности змеевика (точка *C* на рис. 5-6, б). Если воздух проходит через обогревающий змеевик с низкой скоростью, то температура воздуха по сухому термометру на выходе может повыситься до температуры на поверхности змеевика. Однако в практических условиях часть воздуха, проходящего через любую обогревающую

(или охлаждающий) змеевик, не контактирует с его поверхностью, и поэтому параметры воздуха не меняются. Такой воздух называется байпасированным. Отношение количества байпасированного воздуха к общему количеству воздуха, проходящего через змеевик, называется коэффициентом байпасирования змеевика. Ниже показано, что коэффициент байпасирования зависит в первую очередь от конструкции змеевика.

Можно принять, что воздух на выходе из змеевика — это смесь двух потоков воздуха, т. е. двух компонентов. Один компонент — это часть воздуха, которая непосредственно контактирует с поверхностью змеевика при температуре по сухому термометру, равной средней температуре поверхности змеевика. Другой компонент — это байпасированный воздух, который не контактирует с поверхностью змеевика, и он выходит из змеевика при той же температуре по сухому термометру, которую имел на входе.

Точка *B* (см. рис. 5-6, б), которая обозначает состояние воздуха на выходе из обогревающего змеевика, характеризуется конечное состояние смеси двух потоков воздуха с начальными параметрами (точки *A* и *C* соответственно). Точка *B* всегда делит прямую линию *АС* между двумя точками начального состояния *A* и *C* на две части, величины которых прямо пропорциональны величинам двух воздушных потоков. Следовательно, длина линии *BC* соответствует количеству байпасированного воздуха, а линии *AB* — количеству воздуха, который действительно контактирует с поверхностью змеевика. Линия *АС* характеризует общее количество выходящей из змеевика воздушной смеси.

Как указывалось ранее, коэффициент байпасирования любого змеевика — это отношение байпасированного воздуха к его общему количеству. Соответственно отношение длины линии *BC* к длине линии *АС* равно коэффициенту байпасирования обогревающего змеевика.

По шкале температур по сухому термометру длина линии *BC* равна $T_c - T_b$, длина линии *АС* равна $T_c - T_a$, следовательно, коэффициент байпасирования

$$k_b = (T_c - T_b) / (T_c - T_a), \quad (5-27)$$

где T_a , T_b — температура воздуха по сухому термометру на входе и выходе из змеевика соответственно, °C; T_c — средняя эффективная температура поверхности змеевика, °C.

Важно помнить, что коэффициент байпасирования любого обогревающего или охлаждающего змеевика всегда определяется делением разности между температурой выходящего воздуха по сухому термометру и температурой поверхности змеевика на разность между температурой входящего воздуха по сухому термометру и температурой поверхности змеевика.

Пример 5-18. Вычислить коэффициент байпасирования обогревающего змеевика, используемого в процессе сухого нагрева и описанного в примере 5-17, если средняя эффективная температура поверхности змеевика 36° C.

Решение. По уравнению (5-27) находим коэффициент байпасирования

$$k_b = (36^\circ\text{C} - 33^\circ\text{C}) / (36^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C}) = 0,2.$$

Коэффициент байпасирования змеевика 0,2 означает, что 20% общего количества воздуха проходит через змеевик, не контактируя с его поверхностью, и потому выходит из змеевика в том же состоянии, которое имел на входе (точка *A*), а остальные 80% воздуха контактируют с поверхностью змеевика, и его температура повышается до температуры поверхности змеевика (точка *C*). Смешение этих двух потоков воздуха образует воздушную смесь, выходящую из змеевика в состоянии, характеризующем точкой *B*.

Процессы сухого охлаждения

Сухое охлаждение воздуха осуществляется при прохождении воздуха через сухую охлаждающую поверхность, температура которой ниже температуры воздуха по сухому термометру, но выше температуры точки росы воздуха. На рис.

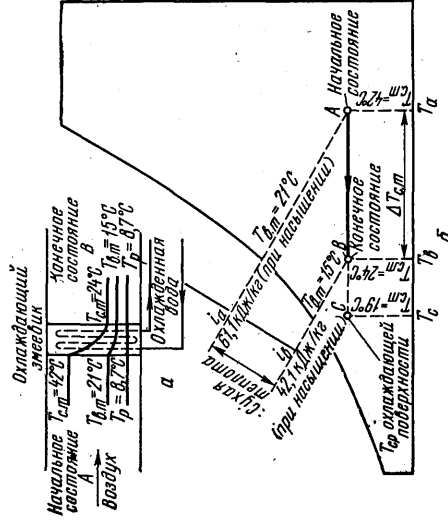


Рис. 5-7. Процесс сухого охлаждения

5-7 показано, что процесс сухого охлаждения подобен процессу сухого нагрева, тем, что влага не добавляется и не отводится, а поэтому влагосодержание, температура точки росы и скрытая теплота воздуха остаются неизменными в течение всего процесса. Кроме того, как и при сухом нагреве, изменение энтальпии воздуха равно изменению сухой теплоты воздуха.

Пример 5-19. 2 кг/с воздуха с температурами 42 и 21° С по сухому и влажному термометрам соответственно проходят через сухую охлаждающую поверхность и охлаждаются до конечной температуры 24° С по сухому термометру. Если температура охлаждающей поверхности 19° С, определить количество отведенной сухой теплоты; коэффициент байпасирования змеевика; массовый расход байпасированного воздуха.

Решение (см. рис. 5-7).

По уравнению (5-6) находим

$$Q_{\text{сух}} = 2 \text{ кг/с} \times 1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \times (42^\circ\text{С} - 24^\circ\text{С}) = 36 \text{ кДж/с} = 36 \text{ кВт}.$$

Применяя уравнение (5-27), рассчитываем

$$k_6 = (24^\circ\text{С} - 19^\circ\text{С}) / (42^\circ\text{С} - 19^\circ\text{С}) = 0,22.$$

Следовательно, массовый расход байпасированного воздуха будет следующим:

$$v = 2 \text{ кг/с} \times 0,22 = 0,44 \text{ кг/с}.$$

Охлаждение и осушение

Одновременное охлаждение и осушение воздуха происходит, когда воздух проходит через охлаждающую поверхность, температура которой ниже начальной температуры точки росы воздуха. Это имеет место независимо от того, выше ли температура воздуха по сухому термометру на выходе из охлаждающей поверхности или ниже начальной температуры точки росы воздуха. Данное утверждение не противоречит ранее сделанному о том, что для конденсации влаги из воздуха температура его должна быть ниже температуры точки росы. Причина этого будет объяснена позже (см. с. 76 — 78) и рассмотрена на примере 5-22. Однако в целях сравнения полезно сначала проанализировать теоретический процесс охлаждения и осушения.

Пример 5-20. 4 кг воздуха с начальными температурами 30 и 21° С по сухому и влажному термометрам соответственно проходит через испаритель, средняя эффективная температура поверхности которого 10° С. Предполагая, что весь воздух контактирует с охлаждающей поверхностью, в результате чего он выходит из испарителя насыщенным с температурой, равной температуре на поверхности испарителя, нанести процесс на психрометрическую диаграмму и определить:

а — отведенное общее количество теплоты на 1 кг сухого воздуха;

б — отведенную сухую теплоту на 1 кг сухого воздуха;

в — отведенную скрытую теплоту на 1 кг сухого воздуха;

г — массу водяного пара, конденсировавшегося из воздуха.

Решение. На основании предположения, что весь воздух контактирует с охлаждающей поверхностью и охлаждается от начального до конечного состояния, можно принять, что процесс кондиционирования проходит по линии *ABC* на психрометрической диаграмме (рис. 5-8, *б*). Воздух в начальном состоянии (точка *A*) сначала охлаждается при постоянной температуре точки росы и удельной влажности по линии *AB* до насыщения (точка *B*) при начальной температуре точки росы воздуха, а затем охлаждается и осушается по кривой насыщения (участок *BC*) до состояния, характеризуемого точкой *C* (на выходе из испарителя). Ход этого теоретического процесса показан на рис. 5-8, *а*.

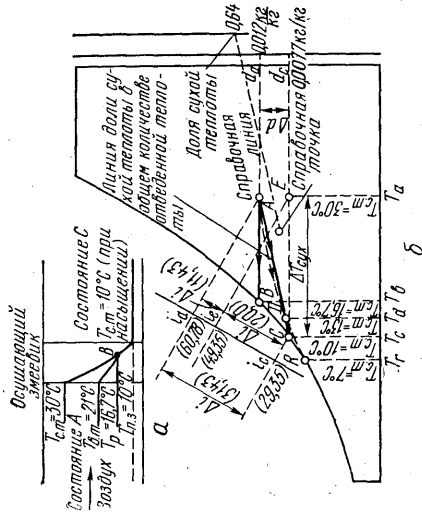


Рис. 5-8. Теоретический процесс охлаждения и осушения:

а — ход процесса; б — психрометрическая диаграмма; $T_{п.з}$ — температура на поверхности змеевика

а. В соответствии с психрометрической диаграммой $t_{d0} = 61,1 - 0,32 = 60,78$ кДж/кг; $i_c = 29,35$ кДж/кг.

Применяя уравнение (5-16), находим $Q = 1$ кг $(60,78$ кДж/кг $- 29,35$ кДж/кг) $= 31,43$ кДж/кг.

б. По уравнению (5-6) определяем $Q_{сух} = 1$ кг $\times 1$ кДж/(кг $\cdot$ К) $(30^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 20$ кДж/кг.

в. Количество отведенной скрытой теплоты составит

$$Q_{окр} = Q - Q_{сух} = 31,43 \text{ кДж/кг} - 20 \text{ кДж/кг} = 11,43 \text{ кДж/кг}.$$

г. Согласно психрометрической диаграмме $d_a = 0,012$ кг/кг; $d_c = 0,0077$ кг/кг. Масса сконденсировавшегося водяного пара будет равна $m_n = 4$ кг/с $(0,012$ кг/кг $- 0,0077$ кг/кг) $= 0,0172$ кг/с $= 17,2$ г/с.

Другой способ решения примера показан на рис. 5-8, б.

Доля сухой теплоты, отведенной от змеевика

В любом процессе охлаждения и осушения от змеевика отводятся сухая и скрытая теплота, сумма которых равна общему количеству отведенной теплоты.

Отношение сухой теплоты к общему количеству отведенной теплоты называется долей сухой теплоты, отведенной от змеевика, $\delta_{сух}$, т. е.

$$\delta_{сух} = Q_{сух}/Q. \quad (5-28)$$

Пример 5-21. Вычислить долю сухой теплоты, отведенной испарителем. Исходные данные см. в примере 5-20.

Решение. Применяя уравнение (5-28), находим

$$\delta_{сух} = 20 \text{ кДж/кг} : 31,43 \text{ кДж/кг} = 0,636.$$

$\delta_{сух}$ можно определить непосредственно по психрометрической диаграмме, используя шкалы доли сухой теплоты, расположенную справа на диаграмме. Прямой участок АС на рис. 5-8, б между точками состояния воздуха на входе А и температуры поверхности змеевика С называется линией $\delta_{сух}$. Обратите внимание, что вертикальная проекция этого участка является показателем отведенной скрытой теплоты (влаги), определяемой на специальной шкале влажности, а горизонтальная проекция — показателем отведенной сухой теплоты, определяемой по шкале температур по сухому термометру. Шкалы температур по сухому термометру и удельной влажности линейные, и потому очевидно, что наклон этого участка меняется пропорционально изменению $\delta_{сух}$. Угол наклона увеличивается с уменьшением $\delta_{сух}$ и уменьшается с увеличением $\delta_{сух}$. При охлаждении воздуха без конденсации влаги линия $\delta_{сух}$ горизонтальна и совпадает с кривыми постоянной температуры точки росы.

Для определения $\delta_{сух}$ непосредственно на диаграмме (см. рис. 5-8, б) проводится прямая линия от исходной точки до шкалы доли сухой теплоты справа диаграммы. Линию проводят параллельно шкале $\delta_{сух}$. Доля сухой теплоты считывается со шкалы в точке, где линия пересекается с ней и составляет 0,64. Заметьте, что эта величина соответствует результату, полученному в примере 5-21.

Практические процессы охлаждения и осушения

Процесс охлаждения и осушения, рассмотренный в примере 5-20, является гипотетическим. Он описывается отрезком АВС (см. рис. 5-8) только в том случае, если весь воздух, проходящий через испаритель, действительно контактирует с охлаждающей поверхностью и охлаждается от начального состояния

(точка A) до конечного (точка C). Это предположение не учитывает существования байпасированного воздуха (предполагается, что $\delta_{сух} = 0$) и того факта, что температура осушающей поверхности неравномерна.

В любом действительном процессе охлаждения и осушения имеется определенное количество байпасированного воздуха. Поэтому воздух, выходящий из испарителя, является смесью обработанного и необработанного воздуха. В таких случаях можно принять, что обработанная часть воздуха контактирует с охлаждающей поверхностью и выходит из испарителя в насыщенном состоянии при температуре, равной температуре поверхности испарителя (точка C), а необработанная часть (байпасированный воздух) выходит из испарителя с теми же параметрами, с какими вошла в него (точка A). Воздух на выходе из испарителя является смесью двух потоков воздуха, начальные параметры которых в данном случае обозначены точками A и C .

Состояние любой смеси двух потоков воздуха на психрометрической диаграмме характеризует точка, находящаяся на прямой линии, соединяющей точки их начальных параметров. Поэтому состояние воздуха на выходе из любого охлаждающего и осушающего змеевика обозначено на рис. 5-8,б точкой D на прямой линии AC между точкой состояния воздуха на входе A и точкой температуры поверхности змеевика C . Состояние воздуха на выходе и, следовательно, место расположения точки D на линии AC зависят от доли байпасированного воздуха в общем количестве воздуха. Чем выше массовая доля байпасированного воздуха, тем больше параметры воздуха на выходе (точка D) приближаются к параметрам воздуха на входе (точка A).

На психрометрической диаграмме параметры осушающего змеевика могут быть выражены точкой C , нанесенной на кривую насыщения, которая соответст-

вует температуре эффективной поверхности змеевика. Эту точку иногда называют точкой росы аппарата.

В главе 11 будет показано, что температура поверхности осушающего змеевика (или любого обогревающего или охлаждающего змеевика) неодинакова. Действительная температура поверхности осушающего змеевика в различных его частях колеблется между точками B и R (см. рис. 5-8,б). Точка B соответствует температуре точки росы воздуха на входе, а температура в точке R близка к температуре хладагента в трубах испарителя. Температура поверхности змеевика (точка C) — это теоретическая эквивалентная температура, или температура эффективной поверхности, при которой воздух имеет те же параметры на выходе, как и при переменной температуре поверхности реального осушающего змеевика.

Линия AC на рис. 5-8,б была определена как линия $\delta_{сух}$ и характеризует все возможные состояния воздуха на выходе, обеспечивающие требуемое соотношение сухой теплоты и общего количества отведенной теплоты. Однако не следует это воспринимать таким образом, что линия $\delta_{сух}$ характеризует действительный процесс осушения воздуха, проходящего через испаритель. По причинам, которые рассмотрены позже (см. с. 191—192), воздух, продуваемый через испаритель, в действительности представляет собой смесь обработанного и необработанного воздуха, точки состояния которых нанесены на кривую, подобную пунктирной линии AR на рис. 5-8,б. Однако действительный характер процесса не имеет значения, так как для любого состояния воздуха на входе и выходе количество сухой теплоты и влаги, отведенных из него, одинаково. По этой причине и в связи с тем, что линия $\delta_{сух}$ определяет точку росы аппарата и характеризует все возможные состояния воздуха на выходе из него, удобно принять, что точки процесса осушения лежат на линии $\delta_{сух}$.

В практике кондиционирования воздуха часто необходимо найти точку росы аппарата, $\delta_{\text{сух}}$ и коэффициент байпасирования змеевика, которые создавали бы определенные параметры воздуха на выходе при известном состоянии на входе. Следующий пример иллюстрирует этот процесс.

Пример 5-22. Определенная масса воздуха входит в осушающий змеевик. Температуры по сухому и влажному термометрам 30 и 20°С соответственно. Воздух на выходе из змеевика должен иметь температуру 17°С по сухому термометру и 14°С по влажному. Определить следующее:

a — среднюю эффективную температуру поверхности змеевика;

b — требуемый коэффициент байпасирования змеевика;

а — требуемую долю сухой теплоты в общем количестве теплоты, отведенной змеевиком;

2 — общее количество отведенной теплоты на 1 кг воздуха;

∂ — отведенную сухую теплоту на 1 кг воздуха;

e — отведенную скрытую теплоту на 1 кг воздуха;

ж — массу сконденсировавшегося водяного пара на 1 кг воздуха.

Решение.

а. Нанести параметры воздуха на входные и выходные в виде точек A и B на психрометрическую диаграмму (рис. 5-9), а затем через эти точки провести прямую линию до пересечения с кривой насыщения (точка C). Эта линия характеризует долю сухой теплоты, отданной осушающей поверхностью, которая нужна для одновременного охлаждения и осушения воздуха в соответствующей пропорции. Средняя эффективная температура

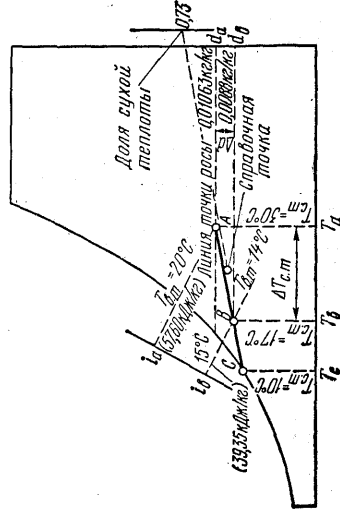


Рис. 5-9. Психометрическая диаграмма процесса, рассмотренного в примере 5-22

поверхности змеивика, которая определяется в точке C пересечения этой линии с кривой насыщения, равна $10^{\circ}C$.

6. Коэффициент байпасирования — это отношение отрезков BC к AC . Применяя уравнение (5-27), находим

$$k_6 = (T_b - T_c)/(T_a - T_c) = (17^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})/(30^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 0,35.$$

в. Для определения требуемой доли сухой теплоты проводим пунктирную линию из исходной точки диаграммы до шкалы доли сухой теплоты параллельно линии АС-В_{сух}, считываемая на пересечении пунктирной линии со шкалой, равна 0,73.

г. На психометрической диаграмме находим, что значения i_a и i_b (корректированные) равны 57,25 кДж/кг (57,60 — 0,35) и 39,28 кДж/кг · (39,35 — 0,075) соответственно.

По уравнению (5-16) вычисляем, что общее количество отведенной теплоты равно

$$Q \approx 1 \text{ кг } (57,25 \text{ кДж/кг} - 39,28 \text{ кДж/кг}) = 17,97 \text{ кДж}.$$

д. Согласно уравнению (5-6) количество отведенной сухой теплоты составит

$$Q_{\text{сух}} = 1 \text{ кг} \times 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \times (30^\circ\text{C} - 17^\circ\text{C}) = 13 \text{ кДж}.$$

е. Количество отведенной скрытой тепловой энергии будет равно

$$Q_{\text{снр}} = Q - Q_{\text{сyx}} = 17,97 \text{ кДж} - 13 \text{ кДж} = 4,97 \text{ кДж}.$$

ж. На диаграмме определяем $d_a = 0,01063$ кг/кг и $d_b = 0,0088$ кг/кг.

Масса сконденсировавшегося водяного пара (на 1 кг воздуха) составит

$$m_{\Pi} = 1 \text{ кг} (0,01063 \text{ кг/кг} - 0,0088 \text{ кг/кг}) = 0,00183 \text{ кг}.$$

ЗАДАЧИ

5-1. Примем, что определенное количество воздуха имеет температуру 24°C , а водяной пар в воздухе создает парциальное давление $1597,3\text{ Па}$. Определить температуру точки росы воздуха.

5-2. Парциальное давление, создаваемое водяным паром в насыщенном воздухе, равно 2062 Па. Определить температуру точки росы воздуха и температуру воздуха по сухому термометру.

5-3. Воздух при 32°C имеет температуру точки росы 12°C . Каково парциальное давление водяного пара?

5-4. Определить абсолютную влажность воздуха для условий задач 5-3, если удельная газовая постоянная R для водяного пара низкого давления равна 461 Дж/(кг·К).

5-5. Вычислить относительную влажность воздуха при условиях задач 5-1, 5-2 и 5-3.

5-6. Определить удельную влажность воздуха при условиях задач 5-1, 5-2 и 5-3.

5-7. Вычислить степень насыщения воздуха при условиях задач 5-1, 5-2 и 5-3.

5-8. Вычислить сухую теплоту 5 кг воздуха при 15°С по сухому термометру и температуре точки росы 3°С.

5-9. Температура 150 кг воздуха повышена с 2 до 50°С. Вычислить количество подведенной теплоты.

5-10. Воздух массой 75 кг проходит через испаритель и охлаждается с 30 до 5°С. Вычислить количество отведенной сухой теплоты от воздуха.

5-11. Определить скрытую теплоту 10 кг воздуха, температура которого 18°С по сухому термометру, а температура точки росы 8°С.

5-12. 1000 кг воздуха с температурами 28 и 16°С по сухому термометру и точки росы соответственно проходит за час через испаритель и охлаждается до температуры 8°С по сухому термометру. Принимая, что воздух на выходе из испарителя насыщен, определить массу водяного пара, сконденсировавшегося из воздуха, и количество отведенной скрытой теплоты.

5-13. Вычислить общее количество отведенной из воздуха теплоты. Исходные данные взять из задачи 5-12.

5-14. Определить параметры воздуха объемом 30 м³ при 65°С в величинах стандартного воздуха.

5-15. Каков действительный объем воздуха при —20°С по сухому термометру, если объемный расход стандартного воздуха равен 3 м³/с?

5-16. По показанию прашевого психрометра воздух в помещении имеет температуру 46°С по сухому термометру и 26°С по влажному. Определить удельную влажность, температуру точки росы, приближенный удельный объем, влагосодержание при насыщении, энтальпию и приближительную относительную влажность с помощью психрометрической диаграммы.

5-17. Определить для воздуха, параметры которого описаны в задаче 5-16, сухую теплоту и скрытую теплоту на 1 кг воздуха.

5-18. 30 кг воздуха при 38°С по сухому термометру и удельной влажности 0,02 кг/кг смешиваются с 20 кг воздуха при 30°С по сухому термометру и удельной влажности 0,011 кг/кг. Определить температуру по сухому термометру и удельную влажность смеси.

5-19. Воздух, массовый расход которого 2 кг/с, при 3°С по сухому термометру и 2°С по влажному проходит через обогревающую поверхность, и температура по сухому термометру повышается до 43°С. Нанести ход процесса на диаграмму и определить конечную температуру воздуха по влажному термометру, полученную сухую теплоту и общее количество поглощенной теплоты.

5-20. Вычислить коэффициент байпасирования обогревающего змеевика (условия см. в задаче 5-19), если средняя температура обогревающей поверхности 53°С.

5-21. Воздух, расход которого 5 кг/с при 43 и 24°С по сухому и влажному термометрам соответственно, охлаждается и осушается, в результате чего воздух на выходе имеет температуры 14 и 11°С по сухому и влажному термометрам соответственно. Определить общее количество отведенной теплоты; отведенную сухую теплоту; массу сконденсировавшегося водяного пара; отведенную скрытую теплоту; долю сухой теплоты в общем количестве отведенной теплоты; среднюю эффективную температуру поверхности испарителя и коэффициент байпасирования.

Глава 6

ОХЛАЖДЕНИЕ И ПАРОВАЯ КОМПРЕССИОННАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА

ОХЛАЖДЕНИЕ

Охлаждение — это процесс отвода теплоты. Холодильная техника — отрасль науки, занимающаяся изучением вопросов снижения и поддержания температур в пространстве или веществе ниже температуры окружающей среды.

С этой целью теплота отводится от охлаждаемого тела и передается другому телу, температура которого ниже температуры охлаждаемого тела. Поэтому очевидно, что охлаждение и нагревание в действительности являются одним процессом с противоположным направлением передачи теплоты. Очень часто только

требуемый результат отличает их друг от друга.

Потребность в теплоизоляции

Теплота всегда мигрирует из области с высокой температурой в область с более низкой температурой, и поэтому всегда существует поток теплоты в охлажденную область из более теплой охлаждающей среды. Охлажденную область обычно требуется оградить хорошим теплоизоляционным материалом для ограничения теплопритока до какого-то практически возможного минимума.

Тепловая нагрузка

Интенсивность отвода теплоты из охлаждаемого пространства или материала для создания или поддержания требуемых температурных условий называется тепловой нагрузкой. В большинстве случаев использования холода общая тепловая нагрузка на холодильное оборудование — это сумма тепловых притоков от нескольких различных источников: теплота, переданная вследствие теплопроводности через изолированные стены; теплота, которая должна быть отведена от теплого воздуха, поступающего в данное пространство через открытые и закрытые двери; теплота, которая должна быть отведена от охлаждаемого продукта для понижения его температуры до температуры хранения; теплота, выделяемая людьми, работающими в данном пространстве, электродвигателями, лампами освещения и другим тепловыделяющим оборудованием.

ХЛАДАГЕНТЫ

Вещество, используемое в любом холодильном процессе для поглощения теплоты в качестве охлаждающего тела, называется хладагентом.

Все процессы охлаждения классифицируются как процессы с отводом сухой или скрытой теплоты в зависимости от

воздействия поглощенной теплоты на хладагент. Когда поглощенная теплота вызывает повышение температуры хладагента, процесс охлаждения осуществляется с отводом сухой теплоты, а при изменении физического состояния хладагента (плавление или кипение) охлаждение происходит с отводом скрытой теплоты. В любом из этих процессов, если охлаждение должно быть непрерывным, температуру хладагента необходимо постоянно поддерживать ниже температуры охлаждаемого пространства или материала.

Рассмотрим следующий пример: 1 кг воды температурой 0°C помещаем в открытый сосуд, находящийся в изолированной камере, начальная температура в которой 20°C (рис. 6-1). В течение некоторого времени теплота будет поступать из камеры в воду, в результате чего температура в камере понизится. Однако при понижении температуры в камере повышается температура воды. Вскоре температура воды и температура в камере уравниваются и теплопередача прекратится. Охлаждение не будет непрерывным, так как температура воды не остается ниже температуры в охлаждаемой камере.

Примем теперь, что вместо воды в сосуд закладывают 1 кг льда также при температуре 0°C (рис. 6-2). В данном случае температура хладагента при по-

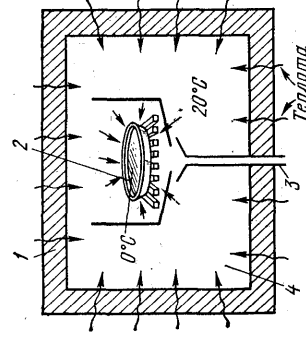


Рис. 6-1. Охлаждение камеры холодной водой:
1 — теплоизоляция; 2 — сосуд с водой; 3 — сливная труба; 4 — камера

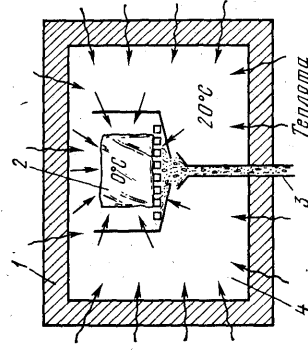


Рис. 6-2. Охлаждение камеры льдом:
1 — теплоизоляция; 2 — лед; 3 — сливная труба; 4 — камера

глощении теплоты из камеры не меняется. Лед просто переходит из твердой фазы в жидкую, а его температура остается постоянной. Теплота, поглощенная льдом, покидает камеру вместе со стекающей водой, а охлаждающее действие, следовательно, будет непрерывным, т. е. до тех пор, пока не растает весь лед.

Вполне возможно и практически непрерывное охлаждение с отводом сухой теплоты, если хладоноситель охлаждается непрерывно и рециркулирует через охлаждаемую камеру, как указано на рис. 6-3. Охлаждение с отводом скрытой теплоты осуществляется с помощью твердых или жидких хладагентов. Наиболее часто используются твердыми хладагентами являются водный лед и твер-

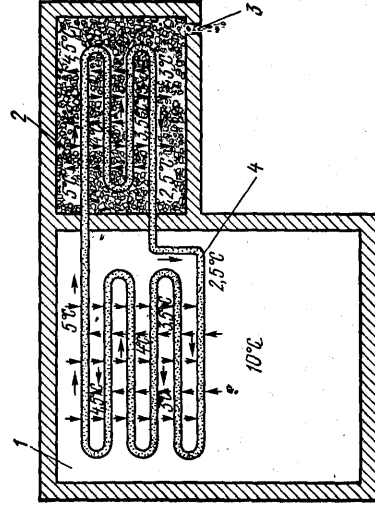


Рис. 6-3. Непрерывно охлаждаемая камера:
1 — камера; 2 — лед; 3 — отверстие для слива талой воды; 4 — змеевик с хладоносителем

дая углекислота (сухой лед). Лед тает при 0°C и переходит в жидкую фазу, а твердая углекислота сублимирует непосредственно в паровую фазу при -78°C и стандартном атмосферном давлении.

Охлаждение льдом

Тающий лед в течение долгого времени с успехом использовался в качестве хладагента. Не так много лет прошло с тех пор, когда лед был единственным хладагентом для домашних холодильников и небольших торговых холодильных шкафов.

В типовом холодильном шкафу с ледяным охлаждением (рис. 6-4) теплота, передаваемая в охлаждаемое пространство различными источниками, поступает к тающему льду в основном с конвективными токами воздуха. Воздух, находящийся в контакте с теплым продуктом и стенами помещения, нагревается за счет теплоты этих материалов. Нагретый воздух расширяется и поднимается к потолку шкафа, унося с собой теплоту к отделению со льдом. Проходя над льдом, воздух охлаждается вследствие перехода теплоты от воздуха ко льду.

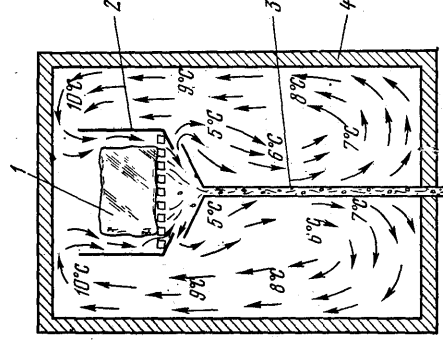


Рис. 6-4. Холодильный шкаф с ледяным охлаждением:
1 — лед; 2 — перегородка; 3 — сливная труба; 4 — шкаф

Охлаждающийся воздух становится более плотным и опускается вниз в отделение для хранения продуктов, где снова поглощает теплоту, и цикл повторяется.

Воздух, переносщий теплоту от теплых стен и хранящихся продуктов, функционирует в качестве теплоносителя. Для обеспечения соответствующей циркуляции воздуха в охлаждаемом пространстве необходимо разместить лед вблизи потолка шкафа и установить соответствующие перегородки для направленной циркуляции потоков воздуха. Подо льдом устанавливают поддон для сбора воды, образующейся в результате таяния льда.

Лед, используемый в качестве хладагента, характеризуется определенными недостатками. Например, невозможно с помощью льда создать требуемую во многих случаях низкую температуру. Для этой цели используют замораживающие смеси.

Например, замораживающая смесь, состоящая из хлористого натрия или хлористого кальция и льда, имеет температуру плавления -20°C .

Другие очевидные недостатки льда заключаются в необходимости частого восполнения его количества, что и крайне неудобно, и неэкономично, а также удаления талой воды.

Другим, менее очевидным, но более серьезным недостатком при использовании льда в качестве хладагента является трудность регулирования скорости охлаждения, что в свою очередь затрудняет поддержание требуемой низкой температуры в охлаждаемом пространстве. Интенсивность поглощения теплоты льдом прямо пропорциональна площади поверхности льда и разности между температурой тающего льда и температурой в пространстве. В связи с этим интенсивность поглощения теплоты льдом снижается с уменьшением площади поверхности льда в процессе таяния. Естественно, что температура в пространстве повышается, когда скорость охлаждения понижается

до такой степени, при которой интенсивность теплопритоков от различных источников превышает интенсивность поглощения теплоты льдом.

Несмотря на недостатки, использование во многих случаях льда более предпочтительно, чем машинное охлаждение. Очень часто свежие овощи, рыба и птица упаковываются с дробленным льдом и транспортируются с ним для предотвращения усушки и сохранения внешнего вида. Кроме того, лед имеет приятный внешний вид и его можно использовать при демонстрации и сервировке отдельных блюд, например салатов, коктейлей и охлажденных напитков.

Жидкие хладагенты

Способность жидкостей поглощать огромное количество теплоты при кипении является основой работы современных систем машинного охлаждения. Кипящие жидкости, используемые в качестве хладагентов, имеют ряд преимуществ по сравнению с таящими твердыми веществами. Процесс кипения легче регулируется, т. е. можно начать и закончить процесс охлаждения по потребности. Интенсивность охлаждения можно задавать в узком диапазоне, температуру кипения жидкости — контролировать, регулируя давление кипения жидкости. Кроме того, пар легко собрать и конденсировать. Полученную жидкость используют бесконечное число раз.

До сих пор при рассмотрении различных свойств жидкости в качестве примера чаще всего приводилась вода. Однако относительно высокая температура насыщения и другие причины не позволяют использовать воду как хладагент в цикле паровой компрессионной холодильной машины. Чтобы получить достаточно низкие температуры для удовлетворения потребности в холоде, вода должна была бы кипеть при очень низком давлении, что экономически нецелесообразно.

Другие многочисленные жидкости при том же давлении имеют более низкие температуры насыщения, чем вода. Однако многие из них обладают свойствами, которые делают невозможным их использование в качестве хладагентов. В действительности свойства только отнесительно небольшого числа жидкостей дают возможность использовать их в качестве хладагентов. Большинство хладагентов являются специально составленными для этой цели смесями.

Нет ни одного хладагента, который был бы пригоден для применения во всех случаях и во всех рабочих условиях. Выбранный хладагент должен иметь свойства, которые наилучшим образом отвечают заданным потребностям.

Среди всех жидкостей, используемых в настоящее время в качестве хладагентов, наиболее точно соответствует требованиям идеального универсального хладагента фторированный углеводород метановой группы, химическое наименование которого дифтордихлорметан (CCl_2F_2). Этот хладагент известен под фирменным наименованием «фреон». В настоящее время он выпускается и под несколькими другими фирменными названиями. Для того чтобы предотвратить путаницу в фирменных и химических наименованиях, он называется хладагентом R12. Хладагент R12 имеет температуру насыщения $-29,8^\circ\text{C}$ при стандартном атмосферном давлении. Поэтому R12 хранят в стальных баллонах в жидком виде при обычной температуре, но под давлением.

В табл. 16-2 приведены термодинамические свойства R12 в состоянии насыщения. Кроме того, в этой таблице даны температуры R12, соответствующие различным давлениям. В табл. 16-4, 16-5 и 16-6 приведены термодинамические свойства некоторых других наиболее распространенных хладагентов.

Кипение хладагента

Огражденное пространство (например, шкаф) можно охладить, применяя

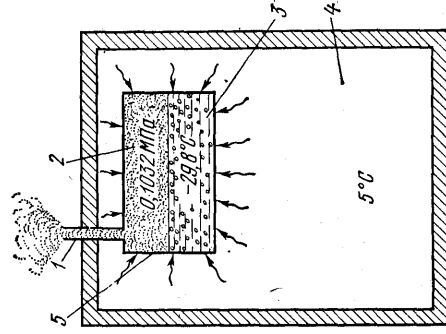


Рис. 6-5. Охлаждение шкафа при кипении жидкого хладагента R12:

1 — выпускное отверстие; 2 — пар хладагента (при атмосферном давлении); 3 — жидкий хладагент; 4 — шкаф; 5 — испаритель

кипающий жидкий R12. Образующийся пар выходит через выпускное отверстие (рис. 6-5). При стандартном атмосферном давлении, температуре насыщения $-29,8^\circ\text{C}$ R12 кипит, поглощая теплоту через стенки сосуда из пространства, где температура 5°C . Пар, содержащий эту теплоту, уходит через открытое выпускное отверстие. Температура жидкости остается постоянной в течение всего процесса кипения, в связи с чем охлаждение происходит непрерывно, пока не выкипит вся жидкость.

Любой сосуд, например показанный на рис. 6-5, в котором происходит кипение хладагента в течение процесса охлаждения, называется испарителем. Испаритель — один из основных узлов любой машинной холодильной установки.

Регулирование температуры кипения

Температуру, при которой жидкость кипит в испарителе, регулируют, изменяя давление пара над жидкостью. Давление можно поддерживать, регулируя интенсивность выхода пара из испарите-

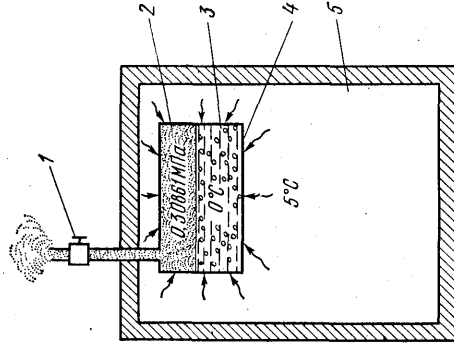


Рис. 6-6. Регулирование температуры кипения жидкого хладагента в испарителе изменением давления пара над жидкостью с помощью дроссельного вентиля в выпускном патрубке:

1 — дроссельный вентиль; 2 — пар хладагента (при давлении выше атмосферного); 3 — жидкий хладагент; 4 — испаритель; 5 — шкаф

ля (см. главу 4). Например, если в выходном патрубке смонтирован ручной вентиль и патрубок частично перекрыт — пар не может свободно выходить из испарителя и собирается над жидкостью, то давление в испарителе, а также температура насыщения хладагента увеличатся (рис. 6-6). Тщательной настройкой выходного вентиля для регулирования потока пара из испарителя можно получить нужное давление пара над жидкостью, в результате чего R12 будет кипеть при любой желаемой температуре в диапазоне между $-29,8^{\circ}\text{C}$ и температурой в пространстве. Если выходной вентиль полностью закрыт и пар не может выходить из испарителя, то давление в испарителе повышается до такой величины, что температура насыщения жидкости уравнивается с температурой пространства, т. е. станет равной 5°C . Когда это происходит, нет разности температур и теплота не переходит из шкафа в хладагент. Кипение прекращается, и хладагент не поглощает теплоту из пространства.

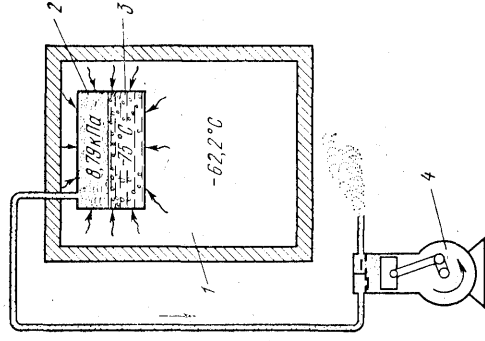


Рис. 6-7. Снижение давления хладагента в испарителе (ниже атмосферного) с помощью парового насоса:

1 — шкаф; 2 — пар хладагента; 3 — жидкий хладагент; 4 — паровой насос

Когда требуется температура кипения ниже температуры насыщения хладагента, соответствующей атмосферному давлению, необходимо понизить давление в испарителе до какого-то уровня ниже атмосферного. Это осуществляют с помощью парового насоса (рис. 6-7). Таким образом, жидкий R12 может кипеть при очень низкой температуре в соответствии с зависимостями давления от температуры, указанными в табл. 16-2.

Поддержание постоянного количества жидкости в испарителе

Непрерывное кипение жидкости в испарителе требует восполнения ее количества, если в испарителе должен поддерживаться постоянный уровень. Одним из способов восполнения жидкости в испарителе является использование поплавкового вентиля (рис. 6-8). Поплавковый вентиль, предназначенный для поддержания постоянного уровня в испарителе, позволяет жидкости посту-

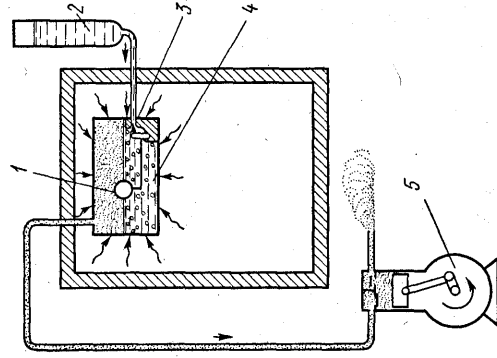


Рис. 6-8. Поддержание постоянного уровня жидкого хладагента в испарителе с помощью поплавкового вентиля (давление хладагента понижается при прохождении через игольчатый клапан вентил):

1 — шарик поплавка; 2 — баллон с жидким хладагентом высокого давления; 3 — игольчатый клапан; 4 — жидкий хладагент низкого давления; 5 — паровой насос

пать в испаритель из резервуара или баллона с той же интенсивностью, с которой она кипит. Любое повышение интенсивности кипения вызывает некоторое снижение уровня жидкости в испарителе, при этом игольчатый клапан открывается шире и больше жидкости течет в испаритель. Подобным же образом при уменьшении интенсивности кипения повышается уровень жидкости и игольчатый клапан прикрывается, уменьшая поток жидкости в испаритель. Когда кипение прекращается полностью, повышение уровня жидкости приводит к плотному закрытию поплавкового вентиля и жидкость в испарителе не поступает. Когда кипение возобновляется, уровень жидкости уменьшается, поплавковый вентиль открывается и жидкость заполняет испаритель.

Жидкий хладагент не кипит в баллоне для хранения и трубопроводе подачи, так как давление в них таково, что

температура насыщения хладагента равна температуре окружающей среды. Под воздействием высокого давления в баллоне жидкость поступает через трубопровод и поплавковый вентиль в испаритель с более низким давлением. В поплавковом вентиле давление хладагента снижается до давления в испарителе и он кипит в испарителе при требуемой низкой температуре.

Любое устройство, например поплавковый вентиль (см. рис. 6-8), позволяющее регулировать поток жидкого хладагента в испаритель, называется регулятором расхода хладагента. Регулятор расхода хладагента является важной частью любой системы машинного охлаждения.

В настоящее время применяется в той или иной степени пять различных типов регуляторов расхода хладагента, которые подробно рассматриваются в главе 17. Поплавковый тип регулятора

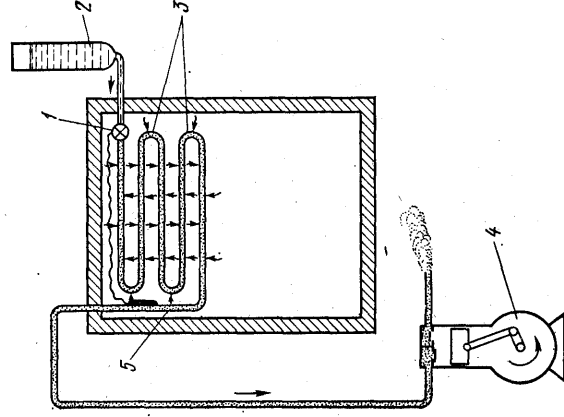


Рис. 6-9. Испаритель с параллельными трубками в одной плоскости, подача хладагента в который регулируется с помощью ТРВ: 1 — ТРВ; 2 — баллон с жидким хладагентом высокого давления; 3 — парожидкостная смесь хладагента низкого давления; 4 — паровой насос; 5 — пар хладагента низкого давления

(см. рис. 6-8) имеет некоторые недостатки, главный из которых — это его громоздкость, ограничивающая возможности использования. Широко распространённым типом регулятора является терморегулирующий вентиль (ТРВ). Схема, показывающая использование ТРВ для питания хладагентом испарителя с параллельными трубками в одной плоскости, дана на рис. 6-9.

Рециркуляция хладагента

Совершенно непрактично, если пар хладагента вытекает наружу и диффундирует в окружающую атмосферу. Пар необходимо собирать и конденсировать для повторного использования его в качестве хладагента, чтобы исключить тем самым необходимость восполнения хладагента в системе.

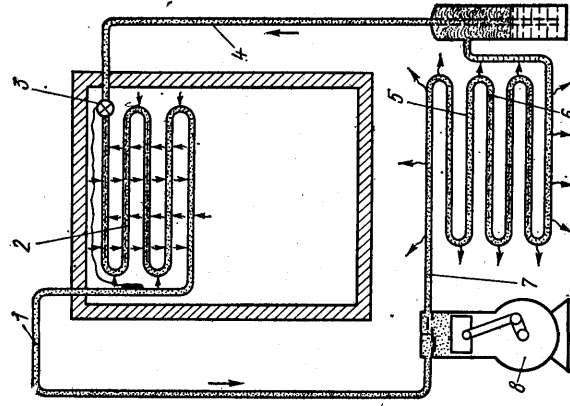


Рис. 6-10. Отвод и конденсация пара хладагента (хладагент поглощает теплоту в испарителе и отдает ее в конденсаторе): 1 — пар с низкой температурой и давлением; 2 — парожидкостная смесь с низкой температурой и давлением; 3 — регулятор температуры и давления; 4 — жидкость с высокой температурой и давлением; 5 — конденсатор; 6 — парожидкостная смесь с высокой температурой и давлением; 7 — пар с высокой температурой и давлением; 8 — компрессор

агента в системе. Для этой цели в систему введен конденсатор (рис. 6-10).

Хладагент кипит в испарителе, так как он поглощает требуемое пространство теплоту из охлаждаемого пространства. Для конденсирования пара необходимо, чтобы скрытая теплота перешла из пара в другое тело. Среда, которая поглощает скрытую теплоту из пара, что приводит к его конденсации, называется охлаждающей средой. Наиболее распространенными охлаждающими средами являются воздух и вода. Вода обычно поступает в конденсатор из городского водопровода или градирни. Воздух, используемый в качестве охлаждающей среды, должен иметь температуру 5°C и выше.

Температура охлаждающей среды должна быть ниже температуры пара хладагента для того, чтобы теплота перешла из пара в охлаждающую среду. Однако давление и температура насыщенного пара на выходе из испарителя равны давлению и температуре кипящей жидкости, а температура пара всегда значительно ниже температуры охлаждающей среды. Поэтому для осуществления передачи теплоты от пара хладагента к воздуху или воде нужно пар сжать до такого давления, чтобы его температура насыщения была выше температуры охлаждающей среды. Для этой цели предназначен паровой насос, или компрессор (см. рис. 6-10).

Перед сжатием пар хладагента находится при температуре и давлении кипения. Давление пара низкое, а следовательно, и соответствующая ему температура насыщения низкая. При сжатии давление пара повышается до такой величины, что температура насыщения становится выше температуры охлаждающей среды. Для повышения давления пара необходимо совершить определенную механическую работу. При этом увеличивается внутренняя энергия и повышается температура пара.

Сжатый пар, имеющий высокое давление и температуру, нагревается в

конденсатор, где он отдает теплоту охлаждающей среде, имеющей более низкую температуру. Пар охлаждается до температуры насыщения и, продолжая отдавать теплоту в конденсаторе, сжимается при более высоких давлениях и температуре насыщения. Теплота, отданная паром в конденсаторе, уносится охлаждающей средой. Полученная жидкая температура и давление которой одинаковы с температурой и давлением конденсирующегося пара, вытекает из конденсатора и поступает в ресивер, а затем в испаритель.

Обратите внимание на то, что хладагент, называемый иногда рабочим телом, — это просто вещество, которое переносит теплоту из охлаждаемого пространства в окружающую среду. Хладагент, находящийся в испарителе, поглощает теплоту из охлаждаемого пространства, уносит ее и отдает охлаждающей среде в конденсаторе.

ТИПИЧНАЯ ПАРОВАЯ КОМПРЕССИОННАЯ УСТАНОВКА

Схема простой паровой компрессионной установки показана на рис. 6-11. Одним из основных узлов установки является испаритель, имеющий теплопередающую поверхность, через которую

теплота из охлаждаемого пространства или продукта поглощается хладагентом, вследствие чего он кипит. Через всасывающий трубопровод пар низкого давления подается из испарителя ко всасывающему патрубку компрессора. Компрессор отсасывает пар из испарителя и сжимает его. В результате этого повышается температура и давление пара до такой величины, что он может конденсироваться под воздействием охлаждающей среды. По трубопроводу «горячего газа», или нагнетательному трубопроводу, пар с высокими давлением и температурой нагнетается компрессором и подается в конденсатор. Через поверхность конденсатора теплота от горячего пара хладагента передается к охлаждающей среде, вследствие чего пар сжимается. Ресивер, в котором хранится жидкий хладагент, служит для обеспечения непрерывной подачи жидкости в испаритель в зависимости от потребности. По жидкостному трубопроводу жидкий хладагент проходит из ресивера к регулятору расхода хладагента. Регулятор расхода хладагента дозирует соответствующее количество хладагента, поступающего в испаритель, и понижает его давление для кипения при требуемой низкой температуре.

Компрессор и ресивер обычно снабжены ручными запорными вентилями, которыми пользуются при эксплуатации: всасывающим, нагнетательным и ресивера. Ресиверы больших установок часто имеют вентили на входе и выходе.

Две части системы

Холодильную систему можно условно разделить на две части, давление хладагента в которых разное. Сторона низкого давления системы содержит регулятор расхода хладагента, испаритель и всасывающий трубопровод. Давление хладагента в этих узлах низкое, при котором хладагент кипит в испарителе. Это давление называют по-разному: давление на стороне всасывания, давление в

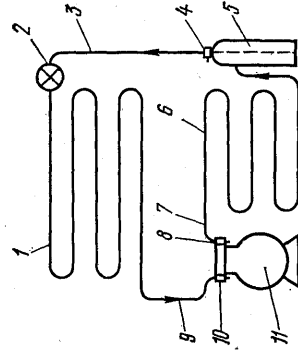


Рис. 6-11. Схема простой паровой компрессионной машины:

1 — испаритель; 2 — регулятор расхода хладагента; 3 — жидкостный трубопровод; 4 — вентиль ресивера; 5 — ресивер; 6 — конденсатор; 7 — нагнетательный трубопровод; 8 — нагнетательный вентиль; 9 — всасывающий трубопровод; 10 — всасывающий вентиль; 11 — компрессор

испарителе, давление всасывания. Его обычно измеряют при обслуживании путем установки мановакуумметра на манометровом штуцере всасывающего вентиля на компрессоре.

Сторона высокого давления, или сторона нагнетания, системы состоит из компрессора, нагнетательного трубопровода, или трубопровода «горячего газа», конденсатора, ресивера и жидкостного трубопровода. В этой части системы давление, при котором происходит конденсация хладагента в конденсаторе, высокое. Это давление называют давлением нагнетания, или давлением конденсации.

Точками деления сторон высокого и низкого давления системы являются регулятор расхода хладагента, где давление хладагента понижается от давления конденсации до давления кипения, и нагнетательные клапаны компрессора, через которые проходит пар после сжатия в цилиндрах.

Нельзя путать между собой всасывающий и нагнетательный клапаны компрессора со всасывающими и нагнетательными вентилями. Всасывающий и нагнетательный клапаны поршневого компрессора выполняют те же функции, что и впускной и выпускной клапаны автомобильного двигателя, и имеют важнейшее значение для работы компрессора. Всасывающий и нагнетательный вентили используются только для облегчения операций обслуживания.

Обратите внимание на то, что, хотя компрессор относится к стороне высокого давления системы, давление в его картере низкое. Давление хладагента меняется в цилиндре в процессе сжатия.

Компрессорно-конденсаторные агрегаты

Компрессор, нагнетательный трубопровод, конденсатор и ресивер вместе с приводом компрессора (обычно это электродвигатель) часто объединяют в один компактный агрегат. Такой агрегат называют компрессорно-конденса-

торным, так как его функция в системе заключается в сжатии, охлаждении пара и его конденсации.

Компрессорно-конденсаторные агрегаты часто классифицируются в зависимости от охлаждающей среды, используемой для конденсации хладагента. Компрессорно-конденсаторный агрегат, в котором в качестве охлаждающей среды применяют воздух, называют агрегатом с воздушным охлаждением, а если охлаждающей средой является вода, — агрегатом с водяным охлаждением.

Компрессорно-конденсаторные агрегаты небольшой производительности (150 Вт — 30 кВт) часто оборудованы герметичными компрессорами со встроенными электродвигателями. Компрессор имеет непосредственный привод, т. е. общий вал с ротором электродвигателя, который размещен в герметичном стальном сварном кожухе (рис. 6-12).

Компрессорно-конденсаторный агрегат с герметичным компрессором (со встроенным электродвигателем) называют герметичным компрессорно-конденсаторным агрегатом. Его используют в небольших торговых холодильных шкафах и почти во всех домашних холодильниках, морозильниках и оконных кондиционерах. Многие герметичные компрессорно-конденсаторные агрегаты не имеют ресиверов, а причина этого рассматривается ниже.

Вариантом герметичного компрессора со встроенным электродвигателем является бессальниковый компрессор с разъемным корпусом. Он полностью состоит из герметичного компрессора со встроенным электродвигателем, за исключением того, что корпус стягивается болтами, а не сваривается (рис. 6-13). Конструкция на болтах позволяет вскрывать корпус на месте эксплуатации для обслуживания. Мощность этих агрегатов достигает нескольких сотен киловатт.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦИКЛА

При циркуляции через систему состояние хладагента претерпевает ряд изме-

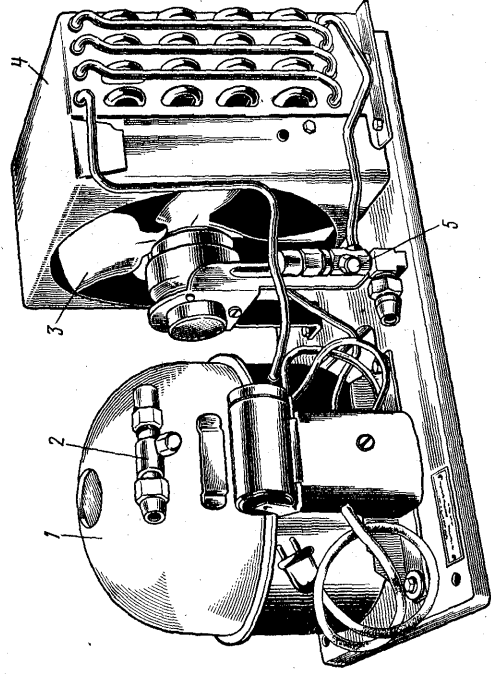


Рис. 6-12. Компрессорно-конденсаторный агрегат с герметичным компрессором со встроенным электродвигателем (воздух для обдува конденсатора подается с помощью отдельного вентилятора):
 1 — компрессор; 2 — всасывающий вентиль; 3 — вентилятор; 4 — конденсатор; 5 — жидкостный вентиль

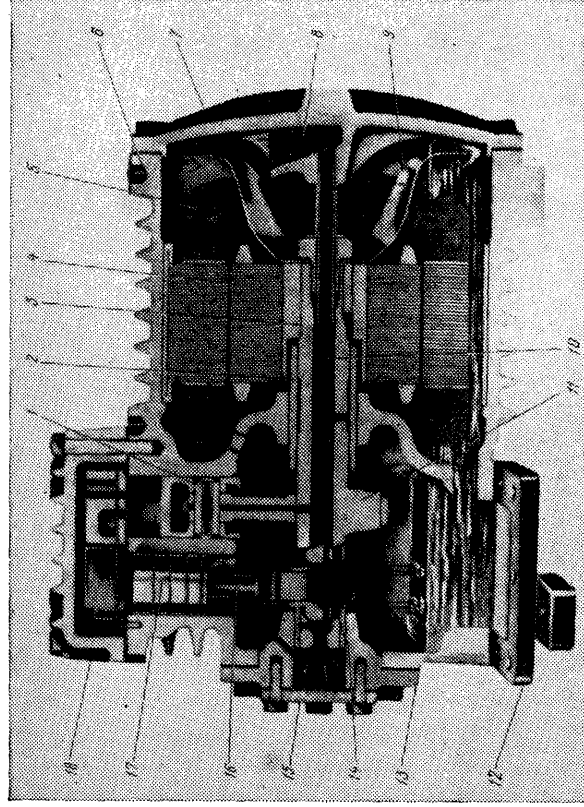


Рис. 6-13. Типовой двухцилиндровый бессальниковый компрессор (с разъемным корпусом и встроенным электродвигателем):
 1 — поршневой палец; 2 — передний подшипник; 3 — эксцентриковый вал; 4 — ротор; 5 — статор; 6 — клеммы электродвигателя; 7 — крышка электродвигателя; 8 — полость для масла; 9 — разбрызгиватель масла; 10 — проход для масла; 11 — эксцентрик; 12 — плита основания; 13 — крышка корпуса; 14 — задний подшипник; 15 — крышка подшипника; 16 — шатун; 17 — поршень; 18 — крышка цилиндра

нений, каждое из которых называется процессом. Параметры хладагента, участвующего в ряде процессов, меняются в определенной последовательности. Этот ряд процессов называется циклом. Цикл простой паровой компрессионной машины состоит из четырех основных процессов: дросселирования, кипения, сжатия, конденсации.

Для правильного понимания холодильного цикла необходимо рассмотреть каждый процесс в отдельности и во взаимосвязи со всем циклом. Любое изменение параметра хладагента в одном из процессов цикла приводит к изменениям других параметров во всех процессах данного цикла.

СТАНДАРТНЫЙ ЦИКЛ ПАРОВОЙ КОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Стандартный цикл паровой компрессионной холодильной машины показан на рис. 6-14. Из ресивера через жидкостный трубопровод жидкий хладагент с высокой температурой и давлением поступает в регулятор расхода хладагента. Давление жидкости понижается при

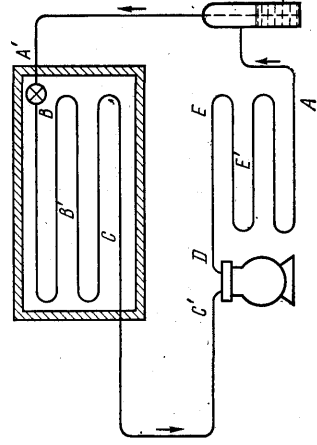


Рис. 6-14. Типичная холодильная установка на которой показано состояние хладагента в различных точках:

A — насыщенная жидкость ($t=40^{\circ}\text{C}$, $p=0,961$ МПа); A' — переохлажденная жидкость ($t=30^{\circ}\text{C}$, $p=0,961$ МПа); B — парожидкостная смесь ($t=-5^{\circ}\text{C}$, $p=0,261$ МПа); B' — парожидкостная смесь ($t=-5^{\circ}\text{C}$, $p=0,261$ МПа); C — насыщенный пар ($t=-5^{\circ}\text{C}$, $p=0,261$ МПа); C' — перегретый пар ($t=10^{\circ}\text{C}$, $p=0,261$ МПа); D — перегретый пар ($t=61,7^{\circ}\text{C}$, $p=0,961$ МПа); E — насыщенная смесь ($t=40^{\circ}\text{C}$, $p=0,961$ МПа).

прохождении через регулятор расхода до давления в испарителе, в результате чего температура насыщения хладагента на входе в испаритель ниже температуры в охлаждаемом пространстве. Далее будет показано, что часть жидкости испаряется при прохождении через регулятор расхода, а температура остающейся жидкости понижается до температуры кипения.

Жидкость кипит в испарителе при постоянных давлении и температуре по мере того, как теплота, подаваемая в виде скрытой теплоты парообразования, поступает из охлаждаемого пространства через стенки испарителя к кипящей жидкости. Компрессор отсасывает образующийся в испарителе пар через всасывающий трубопровод. Пар выходит из испарителя в насыщенном состоянии, а его температура и давление равны температуре и давлению кипящей жидкости. При прохождении через всасывающий трубопровод от испарителя к компрессору пар обычно поглощает теплоту из воздуха, окружающего всасывающий трубопровод, и становится перегретым. Температура пара в трубопроводе несколько повышается за счет перегрева, но давление пара не изменяется, и поэтому на входе в компрессор оно равно давлению кипения¹.

Температура и давление пара повышаются в компрессоре при сжатии, и пар с высокой температурой и давлением нагнетается из компрессора в нагнетательный трубопровод. Пар через нагнетательный трубопровод поступает в конденсатор, где он отдает теплоту относительно холодному воздуху, обдувающему конденсатор с помощью его вентилятора. Когда горячий пар отдает теплоту более холодному воздуху, его температура понижается до температуры насыщения, соответствующей его новому, бо-

¹ В действительности давление пара несколько снижается в линии между испарителем и компрессором из-за трения во всасывающем трубопроводе.

лее высокому давлению, и пар конденсируется при продолжении отвода теплоты. Пар конденсируется в нижней части конденсатора, а образовавшаяся жидкость перетекает в ресивер, откуда она затем снова поступает в жидкостный трубопровод.

Процесс сжатия

В современных высокоскоростных компрессорах сжатие происходит очень быстро и пар контактирует с цилиндром компрессора в течение короткого промежутка времени. Средняя разность температур между паром хладагента и стенкой цилиндра относительно невелика, в результате чего поток теплоты к хладагенту при всасывании или от него в процессе сжатия незначителен. Поэтому сжатие пара в холодильном компрессоре обычно происходит адиабатно.

Вспомним, что в любом адиабатном процессе сжатия внутренняя энергия газа повышается на величину, равную количеству работы, совершаемой при его сжатии. Следовательно, когда пар хладагента сжимается адиабатно в холодильном компрессоре, температура и энтальпия пара повышаются пропорционально количеству совершенной работы. Чем больше работа сжатия, тем значительно повышение температуры и энтальпии.

Энергетический эквивалент совершенной работы в процессе сжатия называется теплотой сжатия. Энергия для совершения работы подается приводом компрессора. Ниже будет показано, что теоретическую мощность, требуемую для привода компрессора, можно определить непосредственно, зная теплоту сжатия.

Теплота сжатия

Не следует путать температуру нагнетаемого пара с температурой конденсации. Температура нагнетания — это температура, при которой пар выталкивается из компрессора, а температура конденсации — это температура, при ко-

торой происходит сжижение пара в конденсаторе, и одновременно температура насыщения пара, соответствующая давлению в конденсаторе.

Природа процесса сжатия в компрессоре такова, что температура пара, нагнетаемого из компрессора, всегда выше температуры насыщения, соответствующей давлению пара, т. е. пар, нагнетаемый из компрессора, всегда находится в перегретом состоянии. Пар охлаждается до температуры насыщения (конденсации) при прохождении через нагнетательную линию и верхнюю часть конденсатора, а дальнейший отвод теплоты от пара вызывает его конденсацию при температуре насыщения, соответствующей давлению в конденсаторе.

Температура конденсации

Для создания непрерывного процесса охлаждения пар хладагента должен конденсироваться в конденсаторе с той же интенсивностью, с которой жидкий хладагент испаряется в испарителе. Это означает, что теплота должна уходить из системы через конденсатор с той же интенсивностью, с какой она поступает в систему через испаритель и всасывающий трубопровод, а также в результате работы сжатия в компрессоре. Очевидно, что любое увеличение интенсивности кипения обуславливает повышение интенсивности теплопередачи в конденсаторе.

Интенсивность теплопередачи через стенки конденсатора от пара хладагента к охлаждающей среде является функцией трех факторов: площади поверхности конденсатора; коэффициента теплопередачи конденсатора; разности между температурами пара хладагента и охлаждающей среды. Каждый конденсатор имеет определенную площадь поверхности и коэффициент теплопередачи. Поэтому отвод теплоты через стенки конденсатора зависит только от разности температур между паром хладагента и охлаждающей средой.

Температура конденсации всегда равна температуре охлаждающей среды плюс разность температур между конденсующимся хладагентом и охлаждающей средой. Из этого следует, что температура конденсации изменяется пропорционально изменению температуры охлаждающей среды и интенсивности теплопередачи в конденсаторе.

Давление конденсации

Давление насыщения, соответствующее температуре парожидкостной смеси хладагента в конденсаторе.

Когда компрессор не работает, температура хладагента в конденсаторе равна температуре окружающей среды, а соответствующее давление насыщения будет относительно низким. При пуске компрессора пар перекачивается в конденсатор и не конденсируется, так как нег разности температур между хладагентом и охлаждающей средой, а следовательно, и теплопередачи между ними. Вследствие дросселирующего действия регулятора расхода хладагента конденсатор можно рассматривать как закрытый сосуд, и при дальнейшей подаче пара в конденсатор давление в нем повышается до такой точки, при которой температура насыщения пара становится достаточно высокой для создания требуемой разности температур и теплопередачи между хладагентом и охлаждающей средой. Когда достигнута требуемая интенсивность теплопередачи, пар конденсируется с той же скоростью, с которой он перекачивается в конденсатор, в результате чего давление в конденсаторе стабилизируется и остается более или менее постоянным в течение всего цикла.

Удельная холодопроизводительность

Количество теплоты, поглощаемое единицей массы хладагента из охлаждаемого пространства, называется удельной

холодопроизводительностью. Например, 1 кг льда при таянии поглощает из окружающего воздуха и близко расположенных предметов такое количество теплоты, которое равно его скрытой теплоте плавления. Если лед массой 1 кг тает при 0° С, то он поглощает 335 кДж теплоты, что является его удельной холодопроизводительностью.

Подобным образом жидкий хладагент кипит при прохождении через испаритель, так как он поглощает такое количество теплоты, которое требуется для его кипения. Итак, удельная холодопроизводительность единицы массы жидкого хладагента потенциально равна ее скрытой теплоте парообразования. Если температура жидкости, поступающей из жидкостного трубопровода, на входе в регулятор расхода хладагента точно равна температуре парообразования в испарителе, то вся масса жидкости кипит в испарителе и создает полезное охлаждение. В данном случае удельная холодопроизводительность единицы массы циркулирующего хладагента равна общему количеству скрытой теплоты парообразования. Однако в действительном цикле температура жидкости на входе в регулятор расхода всегда значительно выше температуры парообразования в испарителе, и сначала она должна быть понижена до температуры в испарителе. По этой причине только часть каждого килограмма жидкости в действительности кипит в испарителе и создает полезное охлаждение. Следовательно, удельная холодопроизводительность единицы массы циркулирующей жидкости всегда меньше общего количества скрытой теплоты парообразования.

На рис. 6-14 показано, что давление пара, конденсирующегося в конденсаторе, равно 0,961 МПа, а температура конденсации (температура насыщения) пара R12, соответствующая этому давлению, составляет 40° С. Жидкость, проходя через нижнюю часть конденсатора, продолжает отдавать теплоту более холодной охлаждающей среде, в результа-

те чего температура жидкости на выходе из конденсатора обычно несколько ниже температуры конденсации. Эта жидкость называется переохлажденной жидкостью. Температура, при которой жидкость выходит из конденсатора, зависит от температуры охлаждающей среды, а также от продолжительности контакта жидкости с охлаждающей средой после конденсации.

Жидкость может еще больше переохладиться в ресивере и в жидкостном трубопроводе вследствие отдачи теплоты в окружающую среду. Температура жидкости перед регулятором расхода хладагента часто довольно близка температуре воздуха вокруг жидкостного трубопровода, что объясняется наличием теплообмена между хладагентом в жидкостном трубопроводе и окружающим воздухом. На рис. 6-14 жидкость перед регулятором расхода хладагента имеет температуру 30°C , а ее давление равно давлению конденсации, т. е. $0,961\text{ МПа}$. Температура насыщения, соответствующая этому давлению, равна 40°C , и поэтому жидкость на входе в регулятор расхода переохлаждена, т. е. ее температура на 10°C ($40^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$), ниже температуры насыщения.

Давление насыщения, соответствующее 30°C , равно $0,745\text{ МПа}$, и R12 будет находиться в жидком состоянии до тех пор, пока его давление не станет ниже этой величины. Однако при прохождении через регулятор расхода давление жидкости понижается с $0,961\text{ МПа}$ до давления насыщения $0,261\text{ МПа}$, что соответствует температуре парообразования в испарителе -5°C . Поэтому в тот момент, когда давление жидкости понижается при прохождении через регулятор расхода хладагента, она отдает теплоту и охлаждается от 30 до -5°C .

В табл. 16-2 дано, что энтальпия жидкости при 30 и -5°C равна $228,540$ и $195,395\text{ кДж/кг}$ соответственно. Следовательно, для охлаждения от 30 до -5°C каждый килограмм жидкости должен отдавать $33,145\text{ кДж}$ ($228,540 - 195,395$).

Хладагент дросселируется в регуляторе расхода мгновенно, в связи с чем теплопередачи между хладагентом и охлаждающей средой не происходит. Следовательно, это адиабатный процесс, и требуемое понижение температуры хладагента происходит при передаче энергии в форме теплоты, которая протекает полностью в самом хладагенте.

По этой причине часть каждого килограмма циркулирующей жидкости мгновенно переходит в парообразное состояние в регуляторе расхода. Скрытая теплота для кипения части жидкости отдается из остальной массы среды, температура которой снижается до температуры в испарителе. В данном случае часть каждого килограмма хладагента выпадает при прохождении через отверстие регулятора расхода, поглощая $33,145\text{ кДж}$ теплоты. Она необходима для снижения температуры хладагента, циркулирующего через жидкостный трубопровод при 30°C , до температуры в испарителе, равной -5°C .

Как указывалось ранее, хладагент поступает в испаритель из регулятора расхода в виде парожидкостной смеси, и потому только часть каждого килограмма циркулирующего хладагента в действительности кипит в испарителе и производит полезное охлаждение. Кипение другой части хладагента в регуляторе расхода не производит полезного охлаждения, и потому удельная холодопроизводительность снижается в испарителе.

Из сказанного очевидно, что удельная холодопроизводительность 1 кг циркулирующего хладагента равна общему количеству скрытой теплоты парообразования при температуре кипения минус скрытая теплота той части 1 кг хладагента, которая кипит в регуляторе расхода для понижения температуры хладагента до температуры в испарителе.

В табл. 16-2 дано, что скрытая теплота парообразования R12 при -5°C равна $153,926\text{ кДж/кг}$. Потеря удельной холодопроизводительности в данном

случае составит 33,145 кДж/кг, следовательно, удельная холодопроизводительность будет равна (153,926 — 33,135) 120,781 кДж/кг.

Долю каждого килограмма жидкого хладагента, испаряющегося в регуляторе, определяют делением общего количества скрытой теплоты парообразования на количество теплоты, поглощенной той частью килограмма, которая испаряется в регуляторе расхода. В данном случае количество хладагента, испаряющегося в регуляторе расхода, равно $[(33,145/153,926)100] = 21,5\%$. Только 78,5% циркулирующего хладагента в действительности кипит в испарителе и производит полезное охлаждение.

Часть циркулирующей массы хладагента испаряется при прохождении через регулятор расхода, однако теплотепердачи с окружающей средой не происходит, и поэтому не совершается внешняя работа. Следовательно, в процессе дросселирования не изменяется энтальпия хладагента, и поэтому энтальпия парожидкостной смеси на входе в испаритель равна энтальпии жидкого хладагента, приближающегося к регулятору расхода. В связи с этим разность между энтальпией хладагента на выходе из испарителя и энтальпией жидкости, приближающейся к регулятору расхода, зависит от количества теплоты, поглощенной в испарителе, т. е. от удельной холодопроизводительности. По этой причине удельную холодопроизводительность каждой единицы массы всегда можно определить, вычитая энтальпию жидкости, приближающейся к регулятору расхода, из энтальпии пара хладагента на выходе из испарителя.

Пример 6-1. Определить удельную холодопроизводительность 1 кг хладагента, если температура жидкого R12 перед регулятором расхода равна 30°С, а температура насыщенного пара на выходе из испарителя —5°С.

Решение. По табл. 16-2 находим энтальпию насыщенного пара хладагента R12 при —5°С (349,321 кДж/кг), энтальпию жидкого R12 при 30°С (228,540 кДж/кг). Удель-

ная холодопроизводительность 1 кг хладагента равна $349,321 - 228,540 = 120,781$ кДж/кг.

Заметьте, что удельная холодопроизводительность единицы массы циркулирующего хладагента зависит от разности между температурой в испарителе и температурой жидкости перед регулятором расхода. При увеличении этой разности температур удельная холодопроизводительность единицы массы хладагента понижается, так как большая часть жидкости испаряется в регуляторе расхода температур хладагента. И наоборот, при уменьшении этой разности удельная холодопроизводительность увеличивается. Поэтому перед регулятором расхода всегда желательно переохладение жидкости, так как в результате повышается холодопроизводительность 1 кг хладагента и улучшается КПД системы.

Холодопроизводительность установок

Производительность любой холодильной установки — это интенсивность отвода теплоты из охлаждаемого пространства. Обычно ее выражают в килоджоулях в секунду, или в киловаттах.

Обратите внимание, что холодопроизводительность — это в действительности интенсивность передачи энергии в форме теплоты.

Производительность холодильной машины, т. е. интенсивность отвода теплоты из охлаждаемого пространства, зависит от массы циркулирующего хладагента в единицу времени и удельной холодопроизводительности единицы циркулирующей массы. Производительность выражается в виде следующего уравнения:

$$Q_0 = m q_0, \quad (6-1)$$

где Q_0 — холодопроизводительность, кДж/с, или кВт; m — массовый расход хладагента, кг/с; q_0 — удельная холодопроизводительность, кДж/кг.

Пример 6-2. Холодильная установка работает при температуре кипения —5°С

и температуре жидкости перед регулятором расхода 30° С. Определить холодопроизводительность машины, если R12 циркулирует в системе с интенсивностью 0,3 кг/с.

Решение. В примере 6-1 указано, что удельная холодопроизводительность равна 120,78 кДж/кг. Следовательно, холодопроизводительность равна

$$Q_0 = 0,3 \text{ кг/с} \times 120,78 \text{ кДж/кг} = 36,234 \text{ кДж/с (кВт)}.$$

Массовый расход хладагента

Массовый расход хладагента при любых данных рабочих условиях определяют делением холодопроизводительности на удельную холодопроизводительность 1 кг хладагента.

Пример 6-3. Установка производительностью 10 кВт работает при температуре кипения R12 —10° С и температуре конденсации 40° С. Жидкий хладагент не переохлаждается, и его температура на входе в регулятор расхода также составляет 40° С. Определить удельную холодопроизводительность, массовый расход хладагента на 1 кВт холодопроизводительности и массу циркулирующего хладагента.

Решение. По табл. 16-2 находим, что энтальпия насыщенного пара хладагента при —10° С равна 347,134 кДж/кг; энтальпия насыщенного жидкого R12 при 40° С составляет 238,535 кДж/кг.

Удельная холодопроизводительность 1 кг R12 $q_0 = 347,134 - 238,535 = 108,599$ кДж/кг.

Массовый расход хладагента на 1 кВт холодопроизводительности равен

$$m = 1 \text{ кВт} : 108,599 \text{ кДж/кг} = 0,0092 \text{ кг/с,}$$

или 9,2 г/с.

Масса циркулирующего хладагента в системе

$$m = 10 \text{ кВт} \times 0,0092 \text{ кг/(с} \cdot \text{кВт)} = 0,092 \text{ кг/с, или } 92 \text{ г/с.}$$

Объемный расход пара

Когда кипит 1 кг хладагента, получаемый объем насыщенного пара зависит от температуры парообразования и повышается при понижении температуры (и давления). Когда температура паро-

образования хладагента известна, объем произведенного пара на единицу массы (удельный объем) определяют непосредственно из таблиц насыщенного пара.

Если известен удельный объем пара, то общий объем образовавшегося в испарителе пара в единицу времени вычисляют умножением массового расхода пара хладагента на удельный объем пара, т. е.

$$V = mv, \quad (6-2)$$

где V — общий объем пара, м³/с; m — массовый расход пара хладагента, кг/с; v — удельный объем пара при температуре парообразования, м³/кг.

Пример 6-4. Определить, приняв расходные условия примера 6-3, объем образовавшегося пара на 1 кВт холодопроизводительности.

Решение. В примере 6-3 определено, что массовый расход хладагента R12 равен 0,0092 кг/с на 1 кВт холодопроизводительности. По табл. 16-2 находим, что удельный объем насыщенного пара при —10° С составляет 76,65 л/кг. По уравнению (6-2) рассчитываем объемный расход образовавшегося пара на 1 кВт холодопроизводительности

$$V = 0,0092 \text{ кг/с} \times 76,65 \text{ л/кг} = 0,70518 \text{ л/с.}$$

Производительность компрессора

Производительность компрессора в любой холодильной установке должна быть такой, чтобы отсасывать пар из испарителя с той же интенсивностью, с которой он образуется в результате кипения жидкого хладагента. Если хладагент кипит быстрее, чем компрессор может отводить пар, то избыточное количество пара накапливается в испарителе, давление увеличивается, и в результате повышается температура кипения. Если производительность компрессора такова, что пар отводится из испарителя слишком быстро, то давление в испарителе уменьшается, вследствие чего снижается температура кипения жидкости. В любом случае расчетные условия не будут соблюдаться и работа холодильной установки будет неудовлетворительной.

Следовательно, для поддержания расчетных условий и хорошей работы холодильной установки требуется выбирать компрессор производительностью, достаточной для отвода такого объема пара, который образовался в испарителе за это время. Например, для поддержания равновесия и обеспечения холодопроизводительности 1 кВт при рабочих условиях, описанных в примере 6-4, компрессор должен иметь производительность 0,70518 л/с.

ЗАДАЧИ

6-1. Определить удельную холодопроизводительность 1 кг R12, если температура

жидкости — перед регулятором расхода хладагента 32°C , а температура насыщенного пара в испарителе -20°C .

6-2. Холодильная установка работает при температуре R12 в испарителе -15°C , температуре жидкости на входе в регулятор расхода 27°C и интенсивности потока массы хладагента в системе 0,78 кг/с. Определить удельную холодопроизводительность на 1 кг циркулирующего хладагента и холодопроизводительность установки.

6-3. Холодильная установка на R12 работает при температуре в испарителе -18°C , температуре жидкости перед регулятором расхода 41°C . Холодопроизводительность установки 15 кВт. Определить удельную холодопроизводительность 1 кг циркулирующего хладагента; интенсивность потока массы хладагента и объемный расход потока на 1 кВт; массовый и объемный расходы хладагента.

Глава 7

ДИАГРАММА ЦИКЛА И ПРОСТОЙ ЦИКЛ ПАРОВОЙ КОМПРЕССИОННОЙ МАШИНЫ

ДИАГРАММА ЦИКЛА

Для понимания цикла паровой компрессионной машины необходимо тщательно изучить отдельные процессы, входящие в него, а также связи, существующие между отдельными процессами, и влияние изменений в каком-либо процессе цикла на все другие процессы данного цикла. Это изучение в значительной степени можно упростить, используя диаграммы и схемы с графическим изображением цикла. Графическое изображение холодильного цикла позволяет рассматривать одновременно различные изменения в состоянии хладагента, происходящие в течение цикла, и влияние этих изменений на цикл без воспроизведения в памяти различных цифровых величин, связанных с циклом.

Наиболее часто применяемыми для анализа холодильного цикла являются диаграмма энтальпия — давление ($i, \lg p$ -диаграмма) и диаграмма энтропия — температура (s, T -диаграмма), из которых диаграмма энтальпия — давление наи-

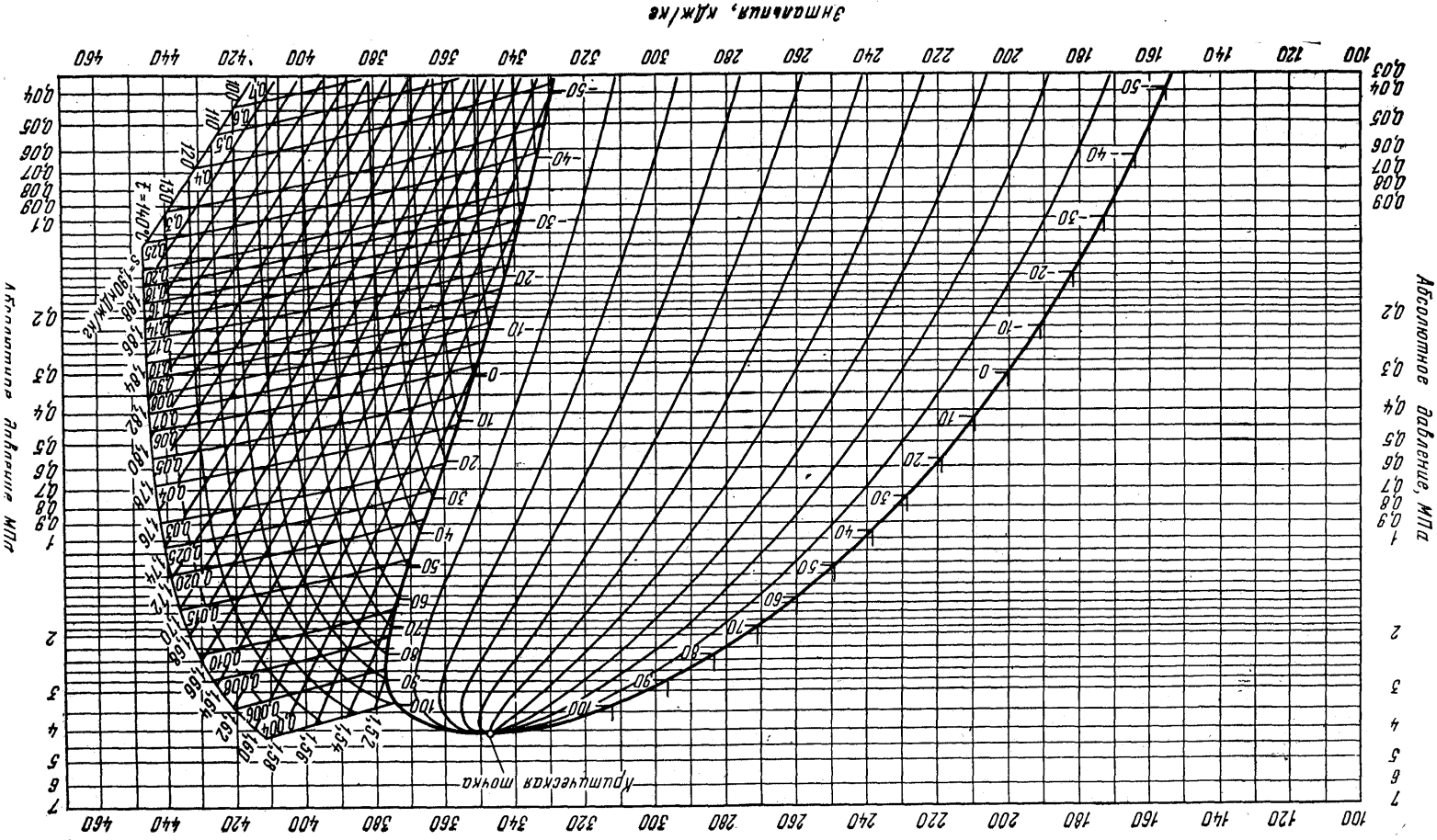
более полезна, и именно она рассматривается в данной книге.

Диаграмма энтальпия — давление

Диаграмма энтальпия — давление для R12 приведена на рис. 7-1. Параметры хладагента, находящегося в любом термодинамическом состоянии, могут быть выражены на диаграмме в виде точки. Точка на диаграмме может быть определена, если известны два любых параметра хладагента в данном состоянии.

На рис. 7-2 показано, что диаграмма разделена на три зоны, отделенные друг от друга кривыми насыщенной жидкости и насыщенного пара. Поле на диаграмме, находящееся слева от кривой насыщенной жидкости, обозначает зону переохлаждения. В любой точке зоны переохлаждения хладагент находится в жидком состоянии при температуре ниже точки насыщения, соответствующей его давлению. Поле, расположенное справа от кривой насыщенного пара, является

Рис. 7-1. Диаграмма энтальпия — давление хладагента R12



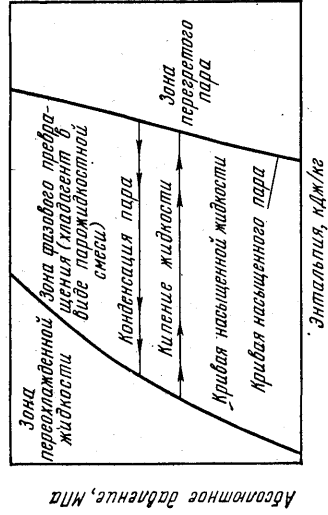


Рис. 7-2. Часть диаграммы энтальпия — давление, показывающая три зоны и направление фазового превращения хладагента

зоной перегретого пара. Часть диаграммы между кривыми насыщенной жидкости и насыщенного пара является зоной смещения и показывает изменение состояния хладагента при переходе из одной фазы (жидкой) в другую (пар). Любая точка между двумя кривыми насыщения хладагента характеризует парожидкостную смесь. Расстояние между двумя кривыми вдоль любой кривой постоянного давления, считываемое на шкале энтальпии в низу диаграммы, — это скрытая теплота парообразования хладагента при данном давлении. Кривые насыщенной жидкости и насыщенного пара не совсем параллельны друг другу, так как скрытая теплота парообразования хладагента зависит от изменения давления, при котором происходит фазовое превращение.

Фазовый переход от жидкости к пару на диаграмме проходит слева направо, а из пара в жидкость — справа налево. Парожидкостная смесь вблизи кривой насыщенной жидкости состоит в основном из жидкости, а вблизи кривой насыщенного пара — из пара. Кривые постоянного паросодержания (рис. 7-3), идущие сверху вниз через центр диаграммы и примерно параллельно кривым насыщенной жидкости, показывают массовую долю (в %) пара в смеси. Например, в любой точке на кривой постоянного паросодержания, которая бли-

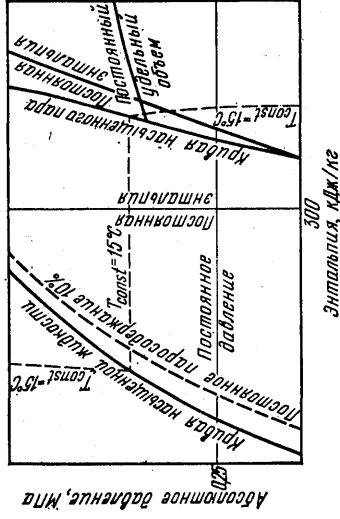


Рис. 7-3. Часть диаграммы энтальпия — давление, на которой показаны кривые постоянного давления, температуры, объема, сухости пара, энтальпии и энтропии хладагента R12

же всего расположена к кривой насыщенной жидкости, массовая доля пара в парожидкостной смеси 10%. Подобным образом в любой точке на кривой постоянного паросодержания, ближе всего расположенной к кривой насыщенного пара, массовая доля пара в парожидкостной смеси составляет 90%. В любой точке на левой пограничной кривой хладагент представляет собой насыщенную жидкость, а в любой точке на правой пограничной кривой — насыщенный пар. Горизонтальные линии, проходящие поперек диаграммы, — это линии постоянного давления, а вертикальные линии — линии постоянной энтальпии.

Кривые постоянной температуры в зоне переохлаждения почти вертикальны на диаграмме и параллельны кривым постоянной энтальпии. В центральной части диаграммы, в связи с тем что фазовое состояние хладагента меняется при постоянных температуре и давлении, линии постоянной температуры параллельны линиям постоянного давления. На кривой насыщенного пара линии постоянной температуры снова изменяют свое направление и в зоне перегретого пара резко идут вниз.

Прямые линии, которые проходят по диагонали и почти вертикально в зоне перегретого пара, являются кривы-

ми постоянной энтропии. Почти горизонтальные линии, пересекающие зону перегретого пара, — это кривые постоянного объема.

Значение любых параметров хладагента, которые играют определенную роль в холодильном цикле, считается непосредственно на диаграмме в любой точке, где значение данного параметра особенно важно. В целях упрощения на диаграмму нанесено минимальное количество кривых. По этой причине значения параметров хладагента, которые не имеют особой важности в некоторых точках цикла, на диаграмме опущены. Например, в зоне изменения параметров жидкого хладагента и в зоне фазового перехода (в центре диаграммы) значения энтропии и объема не представляют особого интереса и поэтому не указаны.

На диаграмме энthalпия — давление приведены удельные значения основных параметров. Например, объем выражен в виде удельного объема в $\text{м}^3/\text{кг}$, энthalпия — в $\text{кДж}/\text{кг}$, а энтропия — в $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Значения энthalпии находятся на горизонтальной шкале внизу диаграммы, а значения энтропии и объема приведены рядом с кривыми энтропии и объема соответственно. Исходная точка энthalпии установлена произвольно на $200 \text{ кДж}/\text{кг}$ для жидкости при 0°C . Подобным же образом исходная точка для шкалы энтропии — это $1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ для жидкости при 0°C .

Величина абсолютного давления в Па $\cdot 10^5$ считается на вертикальной шкале, находящейся слева диаграммы. Значения температуры в градусах Цельсия расположены рядом с кривыми постоянной температуры в зонах перегрева, охлаждения и перегрева, а также на кривых насыщенной жидкости и пара.

Простой цикл паровой компрессионной холодильной машины

Простым циклом паровой компрессионной холодильной машины считается

теоретический цикл, в котором пар хладагента выходит из испарителя и подается в компрессор в состоянии насыщения при температуре и давлении парообразования, а жидкость выходит из конденсатора и поступает в регулятор расхода хладагента в состоянии насыщения при температуре и давлении конденсации. Холодильный цикл действующей холодильной машины несколько отличается от простого цикла паровой компрессионной холодильной машины, но тем не менее его анализ представляет интерес. В таком цикле процессы, которые являются основой каждого действующего цикла паровой компрессионной машины, легко поддаются определению и пониманию. Кроме того, простой цикл можно считать типичным для сравнения с действительным циклом, относительную эффективность которого легко определить при различных условиях.

На рис. 7-4 показан простой цикл паровой компрессионной машины на R12, нанесенный на диаграмму энthalпия — давление. Принимается, что машина работает при температуре кипения хладагента -5°C и температуре конденсации 40°C . Точки A, B, C, D и E на диаграмме энthalпия — давление соответствуют точкам на схеме холо-

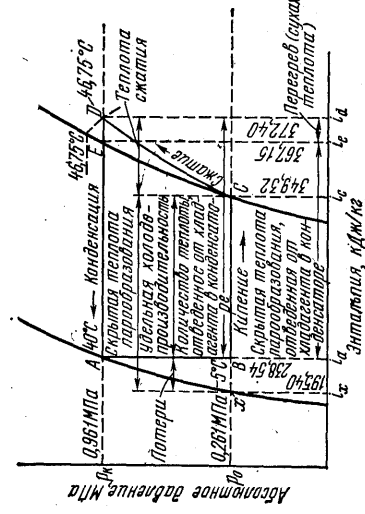


Рис. 7-4. Диаграмма энthalпия — давление простой паровой компрессионной машины, работающей при температуре кипения -5°C и температуре конденсации 40°C

дильной машины, показанной на рис. 7-5.

Точка A — это некоторая точка в нижней части конденсатора, где завершается процесс конденсации и хладагент является насыщенной жидкостью при температуре и давлении конденсации.

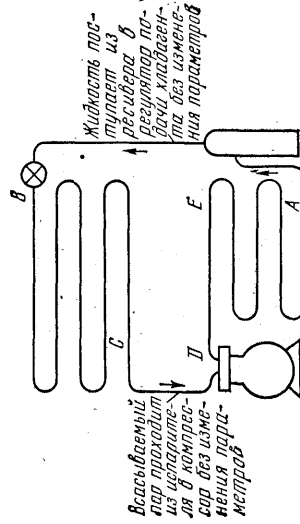


Рис. 7-5. Точки цикла на схеме простого парового компрессионной машины:

A — пар полностью скопелсировался; B — хладагент после регулятора расхода; C — вся жидкость выкипела; D — нагнетание пара компрессором; E — начало конденсации

Свойства хладагента в этой точке, как указано в табл. 16-2, следующие: $p = 0,961$ МПа; $T = 40^\circ\text{C}$; $i = 238,535$ кДж/кг; $s = 1,12984$ кДж/(кг · К); $v = 0,79802$ л/кг.

В точке A значения p , T и i могут считываться непосредственно на диаграмме. Хладагент в точке A всегда представляет собой насыщенную жидкость. Если известны значения p и T , то из точки A следует опустить вертикальную линию до пересечения с горизонтальной шкалой и определить значение i . На практике легко замерить значения p и T .

Процесс дросселирования

Считается, что в простом цикле паровой компрессионной машины параметры (состояние) жидкого хладагента не изменяются при прохождении через жидкостный трубопровод от конденсатора к регулятору расхода и состояние жидкости на входе в регулятор такое же,

как в точке A (см. рис. 7-4 и 7-5). Процесс, обозначенный линией $A-B$, которая ограничена точками начального и конечного состояний хладагента, происходит в регуляторе расхода, при прохождении через который давление жидкости понижается от давления конденсации до давления кипения¹. Когда жидкость дросселируется в отверстия регулятора и поступает в испаритель, ее температура понижается от температуры конденсации до температуры кипения путем мгновенного испарения части жидкости.

Процесс, обозначенный линией $A-B$, — это дроссельный вид адиабатного расширения, при котором энтальпия рабочего тела не изменяется в течение всего процесса. Предполагается, что процесс происходит без притока или потери теплоты через трубы или регулятор, а также без совершения полезной работы.

Энтальпия хладагента не меняется во время процесса $A-B$. Поэтому точку B определяют на диаграмме энтальпия—давление, проводя от точки A вертикальную линию (постоянной энтальпии) до пересечения с линией постоянного давления, соответствующей давлению кипения. Чтобы найти на диаграмме точку B , необходимо знать давление или температуру кипения хладагента.

В результате частичного испарения жидкости в процессе $A-B$ в точке B хладагент представляет собой парожидкостную смесь со следующими характеристиками: $p = 0,261$ МПа; $T = -5^\circ\text{C}$; $i = 238,535$ кДж/кг (та же, что и в точке A); $v = 18,696$ л/кг; $s = 1,438$ кДж/(кг · К).

Изменение энтропии в процессе $A-B$ происходит в результате того, что жид-

¹ Процесс $A-B$ — это процесс не обратимого адиабатного расширения, во время которого параметры хладагента изменяются неравномерно. Следовательно, нельзя нанести действительный ход процесса, и кривая $A-B$ просто изображает процесс, который начинается в точке состояния A и заканчивается в точке состояния B .

кий хладагент драсселируется без совершения полезной работы, а также в результате передачи энергии в форме теплоты в самой жидкости. При передаче теплоты энthalпия жидкости остается той же, а изменяется только энтропия.

В точке B на диаграмме энthalпия—давление кроме значений p , T , i можно определить приблизительно содержание пара в смеси. В рассматриваемом случае паросодержание, определенное с помощью диаграммы, примерно составляет 28%.

Точка B характеризует хладагент, находящийся в состоянии парожидкостной смеси, и поэтому в табл. 16-2 можно определить только значения p и T . Однако энthalпия хладагента в точках A и B одинакова, и поэтому энthalпию в точке B можно найти по табл. 16-2 как энthalпию хладагента с параметрами в точке A . Паросодержание в точке B можно определить, как указывалось выше, используя значения энthalпии, приведенные в табл. 16-2 или на диаграмме давление — энthalпия.

Значения s и v в точке B обычно не представляют интереса, и потому они не приведены ни на диаграмме, ни в таблицах. Если эти значения необходимы, то их вычисляют, как описывалось ранее.

Процесс кипения хладагента

Линия $B-C$ характеризует процесс кипения хладагента в испарителе. Кипение происходит при постоянной температуре и давлении, следовательно, процесс $B-C$ является одновременно как изотермическим, так и изобарическим. Поэтому точку C можно определить на диаграмме, если провести горизонтальную линию из точки B до пересечения с кривой насыщенного пара. В точке C хладагент выкипает полностью и превращается в насыщенный пар при температуре и давлении кипения. Параметры хладагента в точке C , которые можно определить по табл. 16-2 или на

диаграмме энthalпия — давление, следующие: $p = 0,261$ МПа (то же, что и в точке B); $T = -5^\circ\text{C}$ (та же, что и в точке B); $i = 349,321$ кДж/кг; $v = 64,963$ л/кг; $s = 1,5571$ кДж/(кг · К).

Энthalпия хладагента в процессе, обозначенном линией $B-C$, повышается, так как он проходит через испаритель и поглощает теплоту из охлаждаемого пространства. Количество поглощенной хладагентом в испарителе теплоты (удельная холодопроизводительность) — это разность между энthalпией хладагента в точках B и C . Таким образом, если i_a , i_b , i_c , i_d , i_e и i_x обозначают энthalпию хладагента в точках A , B , C , D , E и x соответственно, то

$$q_0 = i_c - i_b, \quad (7-1)$$

где q_0 — удельная холодопроизводительность, кДж/кг.

Но так как

$$i_b = i_a, \text{ то } q_0 = i_c - i_a. \quad (7-2)$$

Сделав подстановку соответствующих значений в уравнение (7-2) для рассматриваемого примера, находим $q_0 = 349,32 - 238,54 = 110,78$ кДж/кг.

На диаграмме расстояние между точками x и C обозначает общее количество скрытой теплоты парообразования 1 кг R12 при давлении кипения 0,261 МПа (r определяем по табл. 16-2). Поэтому расстояние от точки B до точки C — это полезная удельная холодопроизводительность, а разность между x — C и B — C , т. е. расстояние от точки x до точки B , — это потери удельной холодопроизводительности.

Процесс сжатия

В простом цикле паровой компрессионной машины предполагается, что состояние хладагента не меняется при прохождении через всасывающий трубопровод от испарителя к компрессору. Процесс в компрессоре, протекающий по линии $C-D$, характеризует сжатие пара от давления кипения до давления

конденсации. В простом цикле принимается, что процесс сжатия по линии $C-D$ изотропный¹. Изотропное сжатие — это особый адиабатный процесс, который происходит без трения². Иногда этот процесс описывается как процесс адиабатного сжатия без трения или сжатия при постоянной энтропии.

В процессе, протекающем по линии $C-D$, энтропия пара не изменяется, т. е. энтропия хладагента в точке D та же, что и в точке C . Поэтому точку D можно определить на диаграмме энтропия—давление, если из точки C провести линию, параллельную линии постоянной энтропии, до пересечения с линией постоянного давления, соответствующей давлению конденсации.

В точке D хладагент находится в виде перегретого пара при давлении конденсации 0,961 МПа, соответствующем температуре конденсации (насыщения) 40°C. Процесс сжатия изотропичен (при постоянной энтропии), т. е. энтропия перегретого пара та же, что и у насыщенного пара в точке C , т. е. 1,5571 кДж/(кг · К). Интерполяцией (см. табл. 16-3) можно определить, что температура, энтропия и удельный объем перегретого пара R12 при температуре насыщения 40°C и энтропии 1,5571 кДж/(кг · К) равны 46,75°C, 372,4 кДж/кг и 18,9447 л/кг соответственно (табл. 7-1).

По диаграмме энтропия — давление можно определить также все параметры

¹ Позднее будет показано, что действительное сжатие пара в холодильном компрессоре несколько отличается от изотропного сжатия.

² Термин «адиабатный» используется для описания любых процессов, происходящих без передачи энергии в форме теплоты к рабочему веществу или от него. Так, изотропный процесс — это только один из процессов, которые можно называть адиабатными. Например, сравните процесс, обозначенный линией $C-D$, с процессом, обозначенным линией $A-B$. Оба являются адиабатными процессами, но процесс по линии $C-D$ происходит без трения и обратим, в то время как процесс по линии $A-B$ — это процесс дроселирования, который сопровождается трением и необратим.

Таблица 7-1

Параметры перегретого пара R12 при температуре конденсации 40°C и давлении 0,961 МПа

Температура T , °C	Удельный объем v , м³/кг	Энтальпия h , кДж/кг	Энтропия s , кДж/(кг · К)
40	18,1706	367,146	1,5405
45	18,7495	371,054	1,5529
46,75	18,9447	372,403	1,5571
50	19,3072	374,904	1,5649
55	19,8469	378,708	1,5766
60	20,3711	382,475	1,5880

хладагента в точке D . Однако значения T , h и v требуют интерполяции и несколько менее точны, чем приведенные в табл. 16-3.

В течение процесса сжатия (линия $C-D$) компрессор совершает работу. Поэтому энергия (энтальпия) пара увеличивается пропорционально количеству совершенной механической работы. Энергетический эквивалент работы, совершенной в процессе сжатия, часто называют теплотой сжатия, и он равен разности между энтальпиями хладагента в точках D и C , где q_l — это работа (теплота) сжатия, отнесенная к 1 кг циркулирующего хладагента:

$$q_l = h_d - h_c \quad (7-3)$$

Для рассматриваемого примера $q_l = 372,4 - 349,32 = 23,08$ кДж/кг.

Поглощая теплоту сжатия, горячий пар, нагретаемый компрессором, находится в перегретом состоянии, т. е. его температура выше температуры насыщения. В данном случае пар выходит из компрессора с температурой 46,75°C, а температура насыщения, соответствующая его давлению в 0,961 МПа, составляет 40°C. Чтобы создать условия для конденсации пара, его температуру необходимо снизить до температуры насыщения.

Процесс конденсации

Обычно процессы, обозначенные на диаграмме линиями $D-E$ и $E-A$, про-

исходят в конденсаторе. Здесь горячий пар, нагнетаемый компрессором, охлаждается до температуры конденсации и конденсируется. Линия $D-E$ характеризует процесс, происходящий в верхней части конденсатора и в некоторой степени в нагнетательном трубопроводе. Пар охлаждается от температуры нагнетания до температуры конденсации, передавая тепло охлаждающей среде. В процессе по линии $D-E$ давление пара остается постоянным, и точку E можно определить на диаграмме энтальпии—давление, если провести горизонтальную линию из точки D до пересечения с кривой насыщенного пара.

В точке E хладагент находится в состоянии насыщенного пара при температуре и давлении конденсации. Ниже приведены его данные, определенные на диаграмме или по табл. 16-2: $p = 0,961$ МПа (то же, что и в точке D); $T = 40^\circ\text{C}$; $i = 367,146$ кДж/кг; $s = 1,54051$ кДж/(кг · °C); $v = 18,171$ л/кг.

Теплота перегрева, отведенная от 1 кг пара в конденсаторе при его охлаждении от температуры нагнетания до температуры конденсации, — это разность между энтальпией хладагента в точке D и энтальпией в точке E ($i_d - i_e$).

Линия $E-A$ характеризует процесс конденсации пара в конденсаторе. Конденсация происходит при постоянной температуре и давлении. Поэтому процесс характеризуется линией $E-A$, параллельной горизонтальной шкале. Теплота, отведенная от охлаждающей среды в процессе, протекающем по $E-A$, — это разность между энтальпией хладагента в точках E и A ($i_e - i_a$).

Возвращаясь в точку A , хладагент совершил один полный цикл, и его параметры те же, что и ранее в той же точке A .

Оба процесса, характеризующие линиями $D-E$ и $E-A$, происходят в конденсаторе, и общее количество теплоты, отданной хладагентом в конденсаторе охлаждающей среде, — это сумма теплоты

ты, отведенной в процессах, протекаемых по линиям $D-E$ и $E-A$. Общее количество отданной хладагентом в конденсаторе теплоты — это разность между энтальпией перегретого пара в точке D и насыщенной жидкости в точке A . Следовательно,

$$q_k = i_d - i_a, \quad (7-4)$$

где q_k — теплота, отведенная в конденсаторе от 1 кг циркулирующего хладагента, кДж/кг.

В данном случае $q_k = 372,4$ кДж/кг — $238,54$ кДж/кг = $133,86$ кДж/кг.

Если хладагент должен достичь точки A в конце цикла при тех же параметрах, которые он имел в начале цикла (точка A), то общее количество отданной хладагентом в конденсаторе теплоты должно быть точно равно количеству теплоты, поглощенной хладагентом во всех других точках цикла. В простом цикле паровой компрессионной машины энергия хладагента в виде теплоты увеличивается, во-первых, за счет теплоты, поглощенной из охлаждаемого пространства при кипении хладагента в испарителе (q_0), во-вторых, за счет механической работы сжатия в компрессоре, учитываемой энергетическим эквивалентом (q_l).

Поэтому

$$q_k = q_0 + q_l. \quad (7-5)$$

В данном случае $q_k = 110,78$ кДж/кг + $23,08$ кДж/кг = $133,86$ кДж/кг.

Массовый расход циркулирующего хладагента для обеспечения холодопроизводительности Q_0 1 кВт равен

$$m = Q_0 / q_0. \quad (7-6)$$

Для рассматриваемого цикла $m = 1$ кВт : $110,78$ кДж/кг = $0,00903$ кг/с, или $9,03$ г/с.

Тогда общее количество отведенной в конденсаторе теплоты на 1 кВт холодопроизводительности составит

$$Q_k = m q_k, \quad (7-7)$$

или

$$Q_k = m(i_d - i_a). \quad (7-8)$$

Применяя уравнение (7-7) для рассматриваемого цикла, получим

$$Q_k = 0,00903 \text{ кг/с} \times 133,86 \text{ кДж/кг} = 1,209 \text{ кДж/с}.$$

Интенсивность теплопередачи, эквивалентная теплоте сжатия на 1 кВт холодопроизводительности, равна

$$Q_1 = m(i_d - i_c), \quad (7-9)$$

или

$$Q_1 = m q_1. \quad (7-10)$$

Для рассматриваемого цикла определяем

$$Q_1 = 0,00903 \text{ кг/с} \times 23,08 \text{ кДж/кг} = 0,20841 \text{ кДж/с}.$$

Теоретическая мощность

Обратите внимание, что Q_1 — это в действительности теоретическая мощность N_T (в кВт), требуемая для получения определенной холодопроизводительности (в данном случае для холодопроизводительности 1 кВт). Другими словами, это теоретическая мощность, которая требуется для получения 1 кВт холодопроизводительности, с КПД 100%. При этом не учитывается мощность на преодоление трения в компрессоре и другие потери. Действительная мощность на валу N_e , расходуемая на 1 кВт холодопроизводительности, обычно на 30—50% больше расчетной теоретической мощности в зависимости от КПД компрессора. Факторы, влияющие на КПД компрессора, рассматриваются ниже.

Холодильный коэффициент

Холодильный коэффициент цикла — это КПД цикла, который выражается в виде отношения поглощенной в охлаждаемом пространстве теплоты к теплотому эквиваленту энергии, израсходованной компрессором, т. е.

$$\text{Холодильный коэффициент} =$$

$$\frac{\text{Теплота, поглощенная из охлаждаемого пространства}}{\text{Тепловой эквивалент энергии, израсходованной компрессором}}$$

$$= \frac{\text{Теплота сжатия}}{\text{Холодильный коэффициент}}$$

Для простого теоретического цикла паровой компрессионной машины это может быть записано следующим образом:

$$\frac{\text{Холодильный коэффициент}}{\text{Удельная холодопроизводительность}} = \frac{\text{Теплота сжатия}}{\text{Теплота сжатия}}$$

$$\epsilon = (i_c - i_a)/(i_d - i_c) = q_0/q_1. \quad (7-11)$$

$$\epsilon = 110,78 \text{ кДж/кг} : 23,08 \text{ кДж/кг} = 4,8.$$

Следовательно, для рассматриваемого цикла

$$\epsilon = 110,78 \text{ кДж/кг} : 23,08 \text{ кДж/кг} = 4,8.$$

Влияние температуры кипения на КПД цикла

Коэффициент полезного действия цикла паровой компрессионной холодильной машины зависит от температур кипения и конденсации, причем температура кипения имеет большее влияние.

Для демонстрации влияния изменения температуры кипения на КПД цикла на рис. 7-6 показаны схемы двух простых циклов, нанесенные на диаграмму энтальпия — давление. В одном цикле, обозначенном точками А, В, С, Д и Е, температура кипения —10°С и температура кипения —10°С и температура

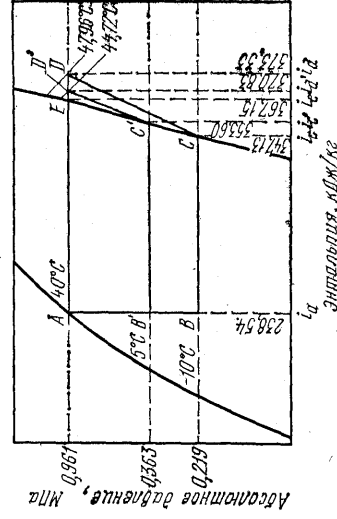


Рис. 7-6. Сравнение двух простых циклов при различных температурах кипения хладагента R12

тура конденсации 40° С. Подобный цикл с такой же температурой конденсации, но с температурой кипения 5°С обозначен точками A, B', C', D' и E .

Для облегчения сравнения двух циклов определим следующие значения описанными ранее способами:

а. Для цикла при $t_0 = -10^\circ\text{C}$

$$q_h = i_c - i_a = 347,13 \text{ кДж/кг} - 238,54 \text{ кДж/кг} = 108,59 \text{ кДж/кг};$$

$$q_e = i_d - i_c = 373,33 \text{ кДж/кг} - 347,13 \text{ кДж/кг} = 26,2 \text{ кДж/кг};$$

$$q_k = i_d - i_a = 373,33 \text{ кДж/кг} - 238,54 \text{ кДж/кг} = 134,79 \text{ кДж/кг}.$$

б. Для цикла при $t_0 = 5^\circ\text{C}$

$$q_h = i_c' - i_a = 353,6 \text{ кДж/кг} - 238,54 \text{ кДж/кг} = 115,06 \text{ кДж/кг};$$

$$q_e = i_d' - i_c' = 370,83 \text{ кДж/кг} - 353,6 \text{ кДж/кг} = 17,23 \text{ кДж/кг};$$

$$q_k = i_d' - i_a = 370,83 \text{ кДж/кг} - 238,54 \text{ кДж/кг} = 132,29 \text{ кДж/кг}.$$

При сравнении двух циклов обратите внимание на то, что удельная холодопроизводительность на единицу массы циркулирующего хладагента больше для цикла с более высокой температурой кипения. Удельная холодопроизводительность цикла с температурой кипения -10°C равна 108,59 кДж/кг. Когда температура кипения в цикле повышается до 5°C , удельная холодопроизводительность увеличивается и становится равной 115,06 кДж/кг. Повышение удельной холодопроизводительности составляет

$$\begin{aligned} & \{[(i_c' - i_a) - (i_c - i_a)]/(i_c - i_a)\} 100 = \\ & = [(115,06 - 108,59)/108,59] 100 = 5,96\%. \end{aligned}$$

Большая удельная холодопроизводительность (на единицу массы циркулирующего хладагента) при более высокой температуре кипения является результатом меньшей разности между температурами кипения и жидкости перед регулятором расхода хладагента. Следова-

тельно, при более высокой температуре кипения в регуляторе расхода испаряется меньшая часть хладагента, а большая часть его кипит в испарителе и создает полезное охлаждение.

Удельная холодопроизводительность (на единицу массы) больше, и потому массовый расход хладагента на 1 кВт холодопроизводительности меньше при более высокой температуре всасывания, чем при более низкой. Следовательно, массовый расход хладагента (на 1 кВт холодопроизводительности) в цикле при $t_0 = -10^\circ\text{C}$ равен $m = 1 \text{ кВт} : 108,59 \text{ кДж/кг} = 0,00921 \text{ кг/с}$, или 9,21 г/с, а массовый расход хладагента на 1 кВт в цикле при $t_0 = 5^\circ\text{C}$ составляет $m = 1 \text{ кВт} : 115,06 \text{ кДж/кг} = 0,00869 \text{ кг/с}$, или 8,69 г/с.

Массовый расход хладагента при более высокой температуре кипения уменьшается на величину $\Delta m = [0,00921 - 0,00869]/0,00921 \cdot 100 = 5,65\%$.

Разность между давлениями кипения и конденсации меньше в цикле с более высокой температурой кипения, и поэтому работа сжатия на единицу массы, требуемая для сжатия пара от давления кипения до давления конденсации, меньше в высокотемпературном цикле, чем в низкотемпературном. Следовательно, теплота сжатия на единицу массы в цикле с более высокой температурой кипения также меньше, чем в цикле с более низкой температурой кипения. Теплота сжатия в цикле при $t_0 = -10^\circ\text{C}$ равна 26,2 кДж/кг, а теплота сжатия в цикле при $t_0 = 5^\circ\text{C}$ составляет только 17,23 кДж/кг. Теплота сжатия уменьшается на следующую величину:

$$\begin{aligned} & [(i_d - i_c) - (i_d' - i_c')]/(i_d - i_c) = \\ & = [(26,2 - 17,23)/26,2] 100 = 34,2\%. \end{aligned}$$

Работа сжатия на единицу массы и массовый расход хладагента на 1 кВт холодопроизводительности меньше при более высокой температуре кипения, и поэтому работа сжатия на 1 кВт, а следовательно, и теоретическая мощность на 1 кВт меньше при более высокой тем-

пературе кипения. Теоретическая мощность на 1 кВт холодопроизводительности в цикле при $t_0 = -10^\circ\text{C}$ равна

$$N_T = m(i_d - i_c) = 0,00921 \text{ кг/с} \times$$

$$\times 26,2 \text{ кДж/кг} = 0,2413 \text{ кВт.}$$

Теоретическая мощность в цикле при $t_0 = 5^\circ\text{C}$ будет

$$N_T = m(i_{d'} - i_{c'}) = 6,00869 \text{ кг/с} \times$$

$$\times 17,23 \text{ кДж/кг} = 0,1497 \text{ кВт.}$$

В данном случае повышение температуры кипения в цикле с $t_0 = -10^\circ\text{C}$ до $t_0 = 5^\circ\text{C}$ уменьшает требуемую теоретическую мощность: $[(0,2413 - 0,1497)/0,2413]100 = 36,7\%$.

Ниже при рассмотрении КПД компрессора будет показано, что разность действительной мощности на единицу холодопроизводительности при различных температурах кипения даже больше, чем получается в теоретических расчетах.

Холодильный коэффициент является показателем холодопроизводительности на единицу мощности и в таком виде характеризует КПД цикла. Следовательно, относительный КПД двух циклов можно определить путем сравнения их холодильных коэффициентов. Холодильный коэффициент цикла при $t_0 = -10^\circ\text{C}$ равен

$$\varepsilon = (i_c - i_d)/(i_d - i_c) =$$

$$= 108,59 \text{ кДж/кг} : 26,2 \text{ кДж/кг} = 4,14,$$

а та же величина при $t_0 = 5^\circ\text{C}$ составит

$$\varepsilon = (i_{c'} - i_{d'})/(i_{d'} - i_{c'}) =$$

$$= 115,06 \text{ кДж/кг} : 17,23 \text{ кДж/кг} = 6,68.$$

Очевидно, что холодильный коэффициент, а следовательно, и КПД цикла значительно улучшаются при повышении температуры кипения. В данном случае увеличение температуры кипения с -10°C до 5°C улучшает КПД цикла: $[(6,68 - 4,14)/4,14]100 = 61,4\%$.

Массовый расход на 1 кВт холодопроизводительности при различных тем-

пературах кипения обычно изменяется мало. Объемный расход пара на 1 кВт холодопроизводительности зависит от температуры кипения. Это, вероятно, один из наиболее важных факторов, влияющих на производительность и КПД паровой компрессионной холодильной машины, и один из тех, который чаще всего пропускают при изучении диаграмм циклов. Разность в объемных расходах пара на 1 кВт холодопроизводительности при различных температурах всасывания четко проявляется при сравнении двух рассматриваемых циклов.

Объемный расход пара на 1 кВт холодопроизводительности в цикле при $t_0 = -10^\circ\text{C}$ равен

$$m = 0,00921 \text{ кг/с} \times 76,65 \text{ л/кг} = 0,7059 \text{ л/с.}$$

При температуре кипения 5°C объемный расход пара на 1 кВт холодопроизводительности составит

$$m = 0,00869 \text{ кг/с} \times 47,49 \text{ л/кг} = 0,4127 \text{ л/с.}$$

Интересно отметить, что если уменьшение массового расхода хладагента при более высокой температуре кипения равно только 5,65%, то уменьшение объемного расхода пара, обрабатываемого компрессором, на 1 кВт холодопроизводительности составляет $[(0,7059 - 0,4127)/0,7059]100 = 41,5\%$.

В значительно большей степени уменьшение объемного расхода на единицу холодопроизводительности можно объяснить более низким удельным объемом всасываемого пара при более высокой температуре и давлении кипения (0,04749 л/кг при 5°C по сравнению с 0,07665 л/кг при $t_0 = -10^\circ\text{C}$). Влияние температуры кипения на холодопроизводительность компрессора рассматривается подробнее в главе 12.

Количество отведенной в конденсаторе теплоты в секунду на единицу холодопроизводительности значительно меньше в цикле с более высокой температурой кипения, хотя количество отведенной в конденсаторе теплоты на еди-

ницу массы циркулирующего хладагента почти одинаково в обоих циклах. Интенсивность отвода теплоты в конденсаторе в цикле при $t_0 = -10^\circ\text{C}$ равна

$$m(i_d - i_a) = 0,00921 \text{ кг/с} \times \\ \times 134,79 \text{ кДж/кг} = 1,241 \text{ кДж/с},$$

а в цикле при $t_0 = 5^\circ\text{C}$:

$$m(i_d' - i_a) = 0,00869 \text{ кг/с} \times \\ \times 132,29 \text{ кДж/кг} = 1,150 \text{ кДж/с}.$$

Интенсивность отвода теплоты в конденсаторе ниже при более высокой температуре кипения из-за меньших массового расхода хладагента и теплоты сжатия (на единицу массы).

Ранее было показано, что отведенная в конденсаторе теплота на единицу массы циркулирующего хладагента является суммой теплоты, поглощенной в испарителе на единицу массы (удельная холодопроизводительность), и теплоты сжатия на единицу массы. Повышение температуры кипения в цикле обуславливает увеличение удельной холодопроизводительности, а также уменьшение теплоты сжатия. В связи с этим количество отведенной в конденсаторе теплоты на единицу массы остается почти одинаковым в обоих циклах (134,79 кДж/кг при $t_0 = -10^\circ\text{C}$ по сравнению с 132,29 кДж/кг при $t_0 = 5^\circ\text{C}$). Это действительно для всех температур кипения, так как любое увеличение или уменьшение теплоты сжатия обычно сопровождается увеличением или уменьшением удельной холодопроизводительности.

Влияние температуры конденсации на КПД цикла

Изменения КПД цикла при изменении температуры конденсации не столь велики, как под влиянием изменений температуры кипения, однако они имеют определенное значение. Вообще, если температура кипения постоянна, то КПД цикла уменьшается при повышении температуры конденсации.

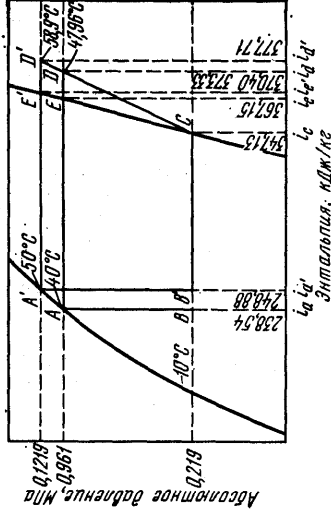


Рис. 7-7. Сравнение двух простых циклов при различных температурах конденсации хладагента R12

В целях сравнения влияния температуры конденсации на КПД цикла на диаграмме энthalпии — давление (рис. 7-7) нанесены два цикла паровых компрессионных машин, работающих при различных температурах конденсации. В цикле A, B, C, D и E температура конденсации $t_k = 40^\circ\text{C}$, а в другом цикле A', B', C', D' и E' $t_k = 50^\circ\text{C}$. В обоих циклах температура кипения $t_0 = -10^\circ\text{C}$. Параметры хладагента для цикла A—B—C—D—E были определены в предыдущем разделе. Ниже даны значения параметров для цикла A'—B'—C'—D'—E':

$$\begin{aligned} q_0 &= i_c - i_a' = 347,13 \text{ кДж/кг} - \\ &- 248,88 \text{ кДж/кг} = 98,25 \text{ кДж/кг}; \\ q_e &= i_d' - i_c = 377,71 \text{ кДж/кг} - \\ &- 347,13 \text{ кДж/кг} = 30,58 \text{ кДж/кг}; \\ q_k &= i_d' - i_a' = 377,71 \text{ кДж/кг} - \\ &- 248,88 \text{ кДж/кг} = 128,83 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

В простом цикле паровой компрессионной машины жидкий хладагент поступает к регулятору расхода с температурой конденсации. Поэтому при повышении температуры конденсации температура жидкости на входе в регулятор расхода увеличивается и удельная холодопроизводительность на единицу массы уменьшается. В данном случае удельная холодопроизводительность снижается со

108,58 до 98,25 кДж/кг при повышении температуры конденсации с 40 до 50°C. Это снижение составляет $[(108,58 - 98,25)/108,58]100 = 9,51\%$.

Удельная холодопроизводительность на единицу массы меньше для цикла с более высокой температурой конденсации, и поэтому массовый расход хладагента на единицу холодопроизводительности должен быть больше. В цикле с температурой конденсации 40°C массовый расход хладагента составляет 0,00921 кг/(с · кВт). Если температура конденсации повышается до 50°C, то массовый расход также повышается: 1 кВт:98,25 кДж/кг = 0,01018 кг/с.

Это увеличение равно $[(0,01018 - 0,00921)/0,00921]100 = 10,53\%$.

Если массовый расход хладагента (на единицу холодопроизводительности) больше при высокой температуре конденсации, то объем сжимаемого пара (на единицу холодопроизводительности) также увеличивается. В простом цикле паровой компрессионной машины удельный объем всасываемого пара изменяется только при изменении температуры кипения. Если температура кипения в обоих циклах одинакова, то удельный объем пара на выходе из испарителя также одинаков в обоих циклах. Поэтому разность объемов пара хладагента на единицу холодопроизводительности прямо пропорциональна разности массовых расходов на единицу холодопроизводительности. При $t_k = 40^\circ\text{C}$ объемный расход на 1 кВт равен 0,7059 л/с, а при $t_k = 50^\circ\text{C}$ расход повышается: $0,01018 \text{ кг/с} \times 76,65 \text{ л/кг} = 0,7803 \text{ л/с}$. При этом увеличение объемного расхода на 1 кВт составит $[(0,7803 - 0,7059)/0,7059]100 = 10,53\%$.

Обратите внимание на то, что процентное увеличение объемного расхода пара равно процентному увеличению массового расхода хладагента. Сравните это явление с тем, что происходит при изменении температуры кипения.

Если разность между давлениями кипения и конденсации увеличивается,

то в цикле с более высокой температурой конденсации работа сжатия на единицу циркулирующего хладагента также растет. В данном случае теплота сжатия увеличивается с 26,2 кДж/кг при $t_k = 40^\circ\text{C}$ до 30,58 кДж/кг при $t_k = 50^\circ\text{C}$ и рост составит $[(30,58 - 26,2)/26,2]100 = 16,72\%$.

В результате большей работы сжатия на единицу массы и большего массового расхода хладагента на единицу холодопроизводительности теоретическая мощность на единицу холодопроизводительности увеличивается при повышении температуры конденсации. Если теоретическая мощность при температуре конденсации 40°C составляет только 241,3 Вт/кВт, то при повышении температуры конденсации до 50°C она будет 0,01018 кг/с $\times$ 30,58 кДж/кг = 0,3313 кДж/(с · кВт), или 331,3 Вт/кВт.

Увеличение потребляемой мощности для выработки 1 кВт холодопроизводительности составляет: $[(331,3 - 241,3)/241,3]100 = 29\%$.

Следует подчеркнуть, что увеличение потребляемой мощности на 1 кВт холодопроизводительности при более высокой температуре конденсации больше, чем увеличение работы сжатия на единицу массы. Это объясняется тем, что кроме увеличения теплоты сжатия на единицу массы (на 29%) также увеличивается и масса циркулирующего хладагента (на 10,53%), отнесенная к единице производительности.

Холодильный коэффициент цикла равен 4,14 при температуре конденсации 40°C. Если температура конденсации повышается до 50°C, то холодильный коэффициент снижается: $\varepsilon = 98,25 \text{ кДж/кг} : 30,58 \text{ кДж/кг} = 3,21$.

Так как холодильный коэффициент характеризует полученную холодопроизводительность при затратах единицы мощности, то уменьшение холодопроизводительности (на единицу мощности) в данном случае равно $[(4,14 - 3,21)/4,14]100 = 22,46\%$.

Очевидно, что влияние повышения температуры конденсации на КПД цикла обратно влиянию повышения температуры кипения. При повышении температуры кипения увеличивается удельная холодопроизводительность и уменьшается работа сжатия, в результате чего увеличивается холодопроизводительность на единицу мощности, а повышение температуры конденсации уменьшает удельную холодопроизводительность и увеличивает работу сжатия, вследствие этого холодопроизводительность на единицу мощности снижается.

Количество отведенной в конденсаторе теплоты на единицу массы циркулирующего хладагента изменяется незначительно при изменении температуры конденсации, так как любое изменение теплоты сжатия совершается с одновременным изменением удельной холодопроизводительности. Общее количество отведенной в конденсаторе теплоты на единицу холодопроизводительности меняется значительно при изменении температуры конденсации из-за массы циркулирующего хладагента на единицу производительности. Выше было указано, что общее количество отведенной в конденсаторе теплоты Q_k является суммой поглощенной в испарителе теплоты Q_0 и теплоты сжатия Q_1 . В связи с тем, что Q_0 — постоянная величина (1 кВт), Q_k изменяется только при изменении Q_1 , т.е. теплоты сжатия. Кроме того, Q_1 всегда увеличивается при повышении температуры конденсации, и потому Q_k также увеличивается при повышении температуры конденсации.

В рассматриваемых двух циклах отведенная в конденсаторе теплота (на 1 кВт холодопроизводительности) при температуре конденсации 40°C равна 1,241 кДж/с. Теплоотдача в конденсаторе (на 1 кВт холодопроизводительности) при $t_k = 50^\circ\text{C}$ увеличивается: $0,01018 \text{ кг/с} \times 128,83 \text{ кДж/кг} = 1,311 \text{ кДж/с}$.

Процентное увеличение равно $\{(1,311 - 1,241)/1,241\}100 = 5,64\%$.

Интересно отметить также, что коли-

чество отведенной в конденсаторе теплоты перегрева значительно увеличивается при более высокой температуре конденсации, а количество отведенной скрытой теплоты при этом несколько уменьшается. Это указывает на то, что при более высокой температуре конденсации большая часть поверхности конденсатора используется для снижения температуры нагретого пара до температуры конденсации.

ВЫВОДЫ

Производительность и КПД холодильной системы значительно улучшаются при повышении температуры кипения, и очевидно, что систему всегда следует конструировать для работы при максимально возможной температуре кипения. Влияние температуры конденсации на производительность и КПД холодильного цикла значительно меньше, чем температуры кипения, однако поддерживать ее необходимо на практически возможном минимальном уровне.

Влияние температур кипения и конденсации на КПД цикла в любом случае столь велико, что требует более глубокого изучения. Соотношения между удельной холодопроизводительностью, массой циркулирующего хладагента (в секунду на 1 кВт холодопроизводительности), удельным объемом всасываемого пара, объемом сжимаемого (в секунду) пара, потребляемой мощностью (на 1 кВт холодопроизводительности) и холодильным коэффициентом цикла вычислены для этой цели при различных температурах кипения и приведены в табл. 7-2.

ЗАДАЧИ

7-1. Холодильная установка на R12 работает при температурах кипения 4°C и конденсации 42°C (цикл простой). Определить величины p , T , v , i и s для точек состояния A, B, C, D и E, как описывалось ранее; объемную производительность компрессора

Циклы паровой компрессонной машины при температуре конденсации R12 40°C, давлении конденсации 0,961 МПа и различных температурах кипения

Абсолютное давление кипения, 10 ⁵ Па	Температура кипения, °C	Удельная холодопроизводительность, кДж/кг	Массовый расход, г/(с·кВт)	Удельный объем всасываемого пара, л/кг	Объемный расход, л/(с·кВт)	Теплота сжигания, кДж/кг	Потребляемая мощность, л/кВт	Холодильный коэффициент
4,23	10	116,85	8,56	40,91	0,350	14,79	126,60	7,90
3,63	5	115,07	8,69	47,49	0,412	17,23	149,73	6,68
3,09	0	112,94	8,85	55,39	0,490	20,10	177,89	5,62
2,61	-5	110,79	9,03	64,96	0,586	23,08	208,41	4,80
2,19	-10	108,60	9,21	76,65	0,705	26,19	241,21	4,15
1,83	-15	106,39	9,40	91,02	0,855	29,43	276,64	3,62
1,51	-20	104,15	9,60	108,85	1,044	32,81	314,98	3,17
1,24	-25	101,89	9,82	131,17	1,286	36,36	357,06	2,80
1,00	-30	99,61	10,04	159,38	1,600	40,07	402,30	2,49
0,81	-35	97,31	10,28	195,40	2,008	43,97	452,01	2,21
0,64	-40	95,01	10,53	241,91	2,547	48,07	506,18	1,98

(в л/с на 1 кВт холодопроизводительности); теоретическую мощность (в Вт на 1 кВт холодопроизводительности); общее количество

во отведенной в конденсаторе теплоты (в кВт на 1 кВт холодопроизводительности); холодильный коэффициент цикла.

Глава 8

ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ

ОТЛИЧИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ХОЛОДИЛЬНОГО ЦИКЛА ОТ ЦИКЛА СО ВСАСЫВАНИЕМ НАСЫЩЕННОГО ПАРА

Действительные (реальные) холодильные циклы несколько отличаются от цикла со всасыванием насыщенного пара. Для цикла со всасыванием насыщенного пара принимаются допущения, которые неприемлемы для действительных циклов. Например, в цикле со всасыванием насыщенного пара не учитывается снижение давления в трубопроводах и испарителе, а также в конденсаторе при циркуляции через них хладагента. Не учитывается и влияние пере-

охлаждения жидкости и перегрева всасываемого пара. Кроме того, условно принимается, что в компрессоре происходит изотропное сжатие. Далее рассматриваются все эти моменты и подробно описывается их влияние на цикл.

Влияние перегрева всасываемого пара

В указанном выше цикле принимается, что всасываемый пар поступает к входному патрубку компрессора в виде

¹ Действительное изотропное сжатие и его влияние на цикл рассматривается в главе 12.

в цикле перегрева: $[(25,43 - 23,08)/23,08]100 = 10\%$;

— при одинаковых температуре и давлении конденсации температура нагнетаемого пара на выходе из компрессора значительно выше в цикле перегрева, чем в цикле насыщения. В данном случае она равна $66,7^\circ\text{C}$ в цикле перегрева по сравнению с $46,75^\circ\text{C}$ в цикле насыщения; — в цикле перегрева необходимо отвести в конденсаторе большее количество теплоты от 1 кг хладагента, чем в цикле насыщения вследствие дополнительного количества теплоты, поглощаемой паром при перегреве, а также из-за незначительного увеличения теплоты сжатия. В цикле перегрева количество отведенной теплоты от 1 кг хладагента составляет $i_d' - i_a = 387,47$ кДж/кг — $238,54$ кДж/кг = $148,93$ кДж/кг.

В цикле насыщения количество отведенной теплоты равно $i_d - i_a = 372,4$ кДж/кг — $238,54$ кДж/кг = $133,86$ кДж/кг.

Для цикла перегрева это увеличение будет $[(148,93 - 133,86)/133,86]100 = 11,26\%$.

Обратите внимание, что дополнительное количество отведенной в конденсаторе теплоты — это полностью теплота перегрева. Количество отведенной скрытой теплоты на 1 кг хладагента одинаково в обоих циклах. Следовательно, в цикле перегрева необходимо отдать охлаждающей среде большее количество теплоты до начала процесса конденсации, большая часть конденсатора используется для охлаждения нагнетаемого пара до температуры насыщения.

Принимая, что давление всасываемого пара остается постоянным при его перегреве, объем пара увеличивается с повышением температуры в соответствии с законом Шарля¹. Поэтому удель-

ный объем перегретого пара всегда больше объема насыщенного пара при том же давлении. Например, удельный объем всасываемого пара (см. рис. 8-2) при насыщении составляет $64,96$ л/кг, а при перегреве до 15°C он увеличивается до $71,29$ л/кг. Это означает, что, если пар перегрет, компрессор должен сжимать больший объем пара на 1 кг циркулирующего хладагента, чем в случае с насыщенным паром. По этой причине при перегреве пара до компрессора масса хладагента, нагнетаемая им, всегда меньше массы хладагента, если всасываемый пар поступает в компрессор в насыщенном состоянии при том же давлении.

Влияние перегрева всасываемого пара на холодопроизводительность машины и холодильный коэффициент зависит от способа и места перегрева пара в цикле, а также от того, создает ли полезное охлаждение теплота, поглощенная паром при его перегреве.

Перегрев пара без полезного охлаждения

Допустим сначала, что перегрев пара во всасывающем трубопроводе происходит таким образом, что не создается полезного охлаждения. Если это так, то удельная холодопроизводительность на единицу массы циркулирующего хладагента одинакова для циклов перегрева и насыщения, в которых температуры кипения и конденсации не изменяются. Поэтому массовый расход хладагента на единицу холодопроизводительности также же одинаков для циклов перегрева и насыщения. Для обоих циклов массовый расход хладагента на 1 кВт холодопроизводительности составляет (см. рис. 8-2) $m = 1 \text{ кВт} / (i_c - i_a) = 1 \text{ кВт} : 110,79 \text{ кДж/кг} = 0,00903 \text{ кг/с}$.

Удельный объем пара на входе в компрессор больше в цикле перегрева, чем в цикле насыщения, следовательно, объемный расход пара на единицу холодопроизводительности больше в цикле пе-

¹ Температура и объем не изменяются точно в соответствии с законом Шарля, так как пар хладагента не является идеальным газом.

регрева, чем в цикле насыщения. Для цикла, параметры которого показаны на рис. 8-2, удельный объем всасываемого пара в цикле насыщения составляет $v = 64,96$ л/кг.

Объем сжатого пара на 1 кВт $V = mv = 0,00903$ кг/с $\times 64,96$ л/кг $= 0,5866$ л/с. Удельный объем всасываемого пара в цикле перегрева $v = 71,29$ л/кг. Объем сжатого пара на 1 кВт $V = mv = 0,00903$ кг/с $\times 71,29$ л/кг $= 0,6438$ л/с. Увеличение объемного расхода пара в цикле перегрева равно $[(0,6438 - 0,5866)/0,5866]100 = 9,75\%$.

Это означает, что компрессор, работающий в цикле перегрева, должен иметь на 9,75% больше объемную холодопроизводительность, чем работающий в цикле насыщения.

Если массовый расход хладагента на единицу холодопроизводительности одинаков для обоих циклов и теплота сжатия на единицу массы больше в цикле перегрева, то мощность, расходуемая на единицу холодопроизводительности, больше в цикле перегрева, а холодильный коэффициент меньше. В цикле на рис. 8-2 мощность, расходуемая на 1 кВт в цикле насыщения, $N_e = m(i_d - i_c) = 0,00903$ кг/с $\times 23,08$ кДж/кг $= 0,20841$ кВт.

Холодильный коэффициент $\varepsilon = (i_c - i_a)/(i_d - i_c) = 110,79$ кДж/кг/23,08 кДж/кг $= 4,8$.

Мощность, расходуемая на 1 кВт в цикле перегрева, $N_e = m(i_d' - i_c') = 0,00903$ кг/с $\times 25,43$ кДж/кг $= 0,22963$ кВт.

Холодильный коэффициент $\varepsilon = (i_c - i_a)/(i_d' - i_c') = 110,79$ кДж/кг/25,43 кДж/кг $= 4,3$.

Таким образом, если пар перегревается и при этом не сопровождается полезным охлаждением, то его объемный расход, потребляемая мощность, а также количество отведенной в конденсаторе теплоты на единицу холодопроизводительности больше в цикле перегрева, чем в цикле насыщения. Это означает, что компрессор, его привод и конденсатор должны быть соответственно боль-

шей холодопроизводительности, мощности и поверхности в цикле перегрева, чем в цикле насыщения.

Перегрев пара, при котором происходит полезное охлаждение

Допустим теперь, что в процессе поглощения теплоты всасываемым паром происходит полезное охлаждение. При этом удельная холодопроизводительность больше на величину, равную величине перегрева. Удельная холодопроизводительность (см. рис. 8-2) для цикла перегрева равна

$$\begin{aligned} i_c' - i_a &= 362,04 \text{ кДж/кг} - \\ &- 238,54 \text{ кДж/кг} = 123,5 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Если удельная холодопроизводительность на единицу массы больше в цикле перегрева, чем в цикле насыщения, то массовый расход хладагента на единицу холодопроизводительности меньше. При массовом расходе циркулирующего хладагента на 1 кВт в цикле насыщения 0,00903 кг/с массовый расход на 1 кВт в цикле перегрева составит

$$\begin{aligned} 1 \text{ кВт}/(i_c' - i_a) &= 1 \text{ кВт}/123,50 \text{ кДж/кг} = \\ &= 0,0081 \text{ кг/с}. \end{aligned}$$

Несмотря на то что удельный объем всасываемого пара и теплота сжатия на единицу массы больше в цикле перегрева, чем в цикле насыщения, объем сжимаемого пара на единицу холодопроизводительности и потребляемая мощность на единицу холодопроизводительности меньше в цикле перегрева, чем в цикле насыщения из-за снижения массового расхода. Объем всасываемого пара и потребляемая мощность на 1 кВт холодопроизводительности в цикле насыщения составляют 0,5866 л/с и 0,20841 кВт соответственно. В цикле перегрева объем сжимаемого пара на 1 кВт холодопроизводительности равен:

$$mv_c' = 0,0081 \text{ кг/с} \times 71,29 \text{ л/кг} = 0,5775 \text{ л/с}.$$

Мощность, потребляемая на 1 кВт холодопроизводительности, равна

$$N_e = m(i_d' - i_{c'}) = 0,0081 \text{ кг/с} \times \\ \times 25,43 \text{ кДж/кг} = 0,20598 \text{ кВт}.$$

Удельная холодопроизводительность и теплота сжатия в цикле перегрева больше, чем в цикле насыщения. Однако если в цикле перегрева увеличение удельной холодопроизводительности превышает увеличение теплоты сжатия, то холодильный коэффициент больше, чем в цикле насыщения. Холодильный коэффициент цикла насыщения равен 4,8, а в цикле перегрева он следующий:

$$\varepsilon = (i_c' - i_a)/(i_d' - i_c') = \\ = 123,46 \text{ кДж/кг} : 25,43 \text{ кДж/кг} = 4,85.$$

Ниже будет показано, что перегрев всасываемого пара в действительном цикле обычно осуществляется таким образом, что часть теплоты, поглощаемой паром при перегреве, отбирается из охлаждаемого объема и дополнительно его охлаждает. Другую часть теплоты пар получает после того, как он уходит из охлаждаемого объема, и поэтому не происходит полезного охлаждения. Повышение производительности машины в цикле перегрева примерно пропорционально произведенному полезному охлаждению.

Перегрев пара хладагента в линии всасывания обычно неизбежен и в большинстве случаев не влияет на холодопроизводительность машины, за исключением некоторых особых случаев. Некоторые частицы неиспарившейся жидкости уносятся всасываемым паром, если он без перегрева или с незначительным перегревом поступает непосредственно из испарителя во всасывающий патрубок компрессора. Этот пар называется влажным. Ниже показано, что влажный пар, всасываемый в цилиндр компрессора, отрицательно влияет на производительность компрессора. Если в компрессор всасывается значительное количество неиспарившейся жидкости из всасывающего трубопровода, то компрессор может быть серьезно поврежден вследствие гидравлического удара. Пе-

регрев исключает возможность всасывания влажного пара в компрессор. Величина перегрева всасываемого пара в каждом случае зависит от того, где и как происходит перегрев, а также от используемого хладагента.

Перегрев всасываемого пара может происходить в одном из следующих мест или в нескольких из них одновременно в конце испарителя: во всасывающем трубопроводе, смонтированном в охлаждаемом объеме; во всасывающем трубопроводе, смонтированном снаружи охлаждаемого объема; в регенеративном теплообменнике.

Перегрев пара во всасывающем трубопроводе вне охлаждаемого объема

Когда холодный пар хладагента, выходящий из испарителя, перегревается во всасывающем трубопроводе вне охлаждаемого объема, то он поглощает теплоту из окружающего воздуха и полезного охлаждения не происходит. Уже указывалось, что перегрев всасываемого пара без производства полезного охлаждения снижает КПД цикла. Очевидно, что необходимо избегать перегрева пара во всасывающем трубопроводе вне охлаждаемого пространства.

Перегрев пара во всасывающем трубопроводе предотвращается теплоизоляцией. Будет ли сохранение КПД цикла достаточным основанием для дополнительных расходов на изоляцию всасывающего трубопровода, зависит в основном от производительности машины и температуры всасывания.

Перегрев обычно незначителен и его влияние на КПД цикла пренебрежимо мало при относительно высокой температуре кипения (4 или 5°C). Однако при низкой температуре кипения перегрев становится довольно значительным и возрастает его влияние на КПД цикла.

При низкой температуре кипения, когда КПД цикла уже мал, каждый градус перегрева вызывает большее снижение

ние КПД, чем при повышении температуры кипения. Совершенно очевидно, что значительный перегрев во всасывающих трубопроводах установок, работающих при низких температурах кипения, вызывает существенное снижение КПД цикла, и в таких случаях следует изолировать всасывающий трубопровод, чтобы поддержать КПД цикла на рациональном уровне.

Независимо от производительности машины при высоких температурах кипения часто требуется изолировать всасывающий трубопровод для предотвращения обмерзания или запотевания линии. При прохождении холодного пара через всасывающий трубопровод температура трубопровода обычно становится ниже температуры точки росы окружающего воздуха. Влага конденсируется из воздуха на поверхность трубопровода, вызывая тем самым его обмерзание или запотевание. В любом случае обмерзание или запотевание трубопровода нежелательны и должны быть предотвращены изоляцией трубопровода.

Перегрев пара в охлаждаемом объеме

Перегрев пара в охлаждаемом объеме происходит в конце испарителя или во всасывающем трубопроводе, смонтированном в этом пространстве, или в том и другом месте сразу.

Для обеспечения нормальной работы регулятора расхода хладагента и предотвращения поступления жидкого хладагента в компрессор необходимо отладить регулятор таким образом, чтобы жидкость выкипела полностью до выхода из испарителя. Холодный пар в таких случаях продолжает поглощать теплоту и перегревается в конце испарителя. Теплота для перегрева пара отводится из охлаждаемого объема, и поэтому производится полезное охлаждение, увеличивается удельная холодопроизводительность (на единицу массы хладагента).

та) на величину, равную количеству поглощенной теплоты при перегреве.

Ранее указывалось, что полезное охлаждение происходит при перегреве всасываемого пара, и КПД цикла несколько улучшается¹. Необходимо подчеркнуть, что независимо от повышения КПД цикла перегрев всасываемого пара в испарителе неэкономичен и его всегда необходимо ограничить до величины, требуемой для нормальной работы регулятора расхода.

Теплопередача через стенки испарителя на один градус разности температур не столь велика для пара по сравнению с жидкостью, и производительность испарителя всегда снижается. Поэтому избыточный перегрев всасываемого пара в испарителе излишне снижает его производительность и приводит к работе испарителя при более низкой температуре кипения или к необходимости применения более крупного испарителя для обеспечения требуемой производительности. Нежелательность снижения температуры кипения очевидна из-за ее влияния на КПД цикла.

Определенный участок всасывающего трубопровода часто монтируют в охлаждаемом пространстве, единственным назначением которого является перегрев всасываемого пара (рис. 8-3). Этот участок трубопровода позволяет больше заполнить испаритель жидким хладагентом, а также избежать его поступления во всасывающий трубопровод и компрессор. Таким образом создается возможность перегрева всасываемого пара в охлаждаемом пространстве с увеличением КПД цикла и более полного использования поверхности испарителя. Кроме того, в некоторых случаях, в особенности когда температура кипения высокая, а относительно влажность наружного воздуха относительно низкая, перегрев всасываемого пара в

¹ Это действительно для машин на R12. Далее показано, что это имеет место не для всех хладагентов.

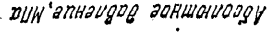


Рис. 8-3. Схема коллидной установки с перегревом всасываемого пара в охлаждаемом пространстве

охлаждаемом пространстве повышает температуру всасывающего трубопровода и предотвращает запотевание, исключая тем самым необходимость его изоляции. Однако перегрев всасываемого пара в охлаждаемом пространстве ограничивается температурой в данном пространстве. Обычно при достаточной длине трубопровода всасываемый пар может быть нагрет до температуры на два-три градуса ниже пространства с температурой 5°С всасываемый пар может быть нагрет примерно до 2°С.

Влияние переохлаждения жидкости

На диаграмме энтальпия — давление (рис. 8-4) цикл насыщения сравнивается с циклом, в котором жидкость переохлаждается от 40 до 30°C перед регенератором расхода хладагента. Точки A, B, C, D и E обозначают цикл насыщения, а точки A', B', C, D и E — цикл переохлаждения.

Ранее указывалось, что удельная холодопроизводительность на единицу массы увеличивается, если жидкость переохлаждается до регулятора расхода. На рис. 8-4 увеличение удельной холодопроизводительности из-за пере-

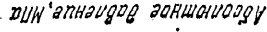


Рис. 8-4. Сравнение цикла с переохлаждением и простого цикла с насыщением R12 на диаграмме энтальпия — давление

охлаждения — это разность между i_b и $i_{b'}$, равная разности между i_a и $i_{a'}$, обозначающей количество теплоты, отведенной от 1 кг жидкости при переохлаждении.

Удельная холодопроизводительность
в цикле насыщения составляет

$$q_0 = 349,32 \text{ кДж/кг} - 238,53 \text{ кДж/кг} = 110,79 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная холодопроизводительность
в цикле переохлаждения равна

$$q_0 = 349,32 \text{ кДж/кг} - 228,54 \text{ кДж/кг} = 120,78 \text{ кДж/кг}.$$

Массовый расход хладагента на единицу производимости меньше в цикле охлаждения, чем в цикле насыщения вследствие большей удельной холодопроизводительности на единицу массы.

Массовый расход хладагента на 1 кВт холодопроизводительности в цикле насыщения равен

$$m = 1 \text{ кВт} : 110,79 \text{ кДж/кг} = 0,00903 \text{ кг/с.}$$

Массовый расход в цикле переохлаждения составляет,

$$m = 1 \text{ кВт} : 120,78 \text{ кДж/кг} = 0,00828 \text{ кг/с.}$$

Обратите внимание на то, что пар хладагента на входе в компрессор имеет одинаковые параметры в обоих циклах. Поэтому удельный объем пара на входе в компрессор одинаков в циклах насыщения и переохлаждения. Так как

массовый расход хладагента на единицу холодопроизводительности меньше в цикле переохлаждения, чем в цикле насыщения, то следует, что объем всасываемого компрессором пара на единицу производительности также меньше в цикле переохлаждения, чем в цикле насыщения.

В цикле насыщения удельный объем всасываемого пара $v_c = 64,96$ л/кг, а объем всасываемого пара на 1 кВт холодопроизводительности $V = mv_c = 0,00903$ кг/с $\times 64,96$ л/кг $= 0,5866$ л/с.

В цикле переохлаждения удельный объем всасываемого пара $v_c = 64,96$ л/кг, а объем пара на 1 кВт производительности $V = mv_c = 0,00828$ кг/с $\times 64,96$ л/кг $= 0,5379$ л/с.

Объемная производительность компрессора в цикле переохлаждения меньше, чем в цикле насыщения, так как объем сжимаемого пара на единицу холодопроизводительности меньше в цикле переохлаждения.

Обратите внимание, что теплота сжатия на единицу массы в цикле насыщения такая же, как и в цикле переохлаждения. Это означает, что увеличение удельной холодопроизводительности на единицу массы при переохлаждении происходит без увеличения расхода энергии на привод компрессора. Любое изменение в холодильном цикле, увеличивающее поглощение теплоты из охлаждаемого пространства без увеличения расхода энергии, повышает холодильный коэффициент цикла и снижает потребляемую мощность на единицу холодопроизводительности.

Ранее было определено, что холодильный коэффициент цикла насыщения равен 4,8, а потребляемая мощность на 1 кВт холодопроизводительности составляет 0,20841 кВт.

Холодильный коэффициент цикла переохлаждения

$$\varepsilon = (i_c - i_{d'}) / (i_d - i_c) = (349,32 \text{ кДж/кг} - 228,54 \text{ кДж/кг}) / (372,4 \text{ кДж/кг} - 349,32 \text{ кДж/кг}) = 5,23.$$

Мощность, потребляемая на 1 кВт холодопроизводительности,

$$N_e = m(i_d - i_c) = 0,00828 \text{ кг/с} \times 23,08 \text{ кДж/кг} = 0,1911 \text{ кВт}.$$

В данном случае холодильный коэффициент цикла переохлаждения больше, чем цикла насыщения [(5,23 — 4,8)/4,8] $\times 100 = 9\%$.

Жидкий хладагент переохлаждается несколькими способами. Жидкий хладагент может переохлаждаться в ресивере или при прохождении через жидкостный трубопровод, отдавая теплоту окружающему воздуху (рис. 8-5). В некоторых случаях применяют специальный переохладитель (рис. 8-6). Увеличение производительности и КПД машины вследствие переохлаждения жидкости компенсирует дополнительные расходы на переохладитель, в особенности в низкотемпературных машинах.

Переохладитель жидкости может быть смонтирован последовательно или параллельно водяному конденсатору. При последовательном монтаже переохладителя охлаждающая вода сначала проходит через переохладитель, а затем через конденсатор, в результате чего самая холодная вода контактирует с переохлаждаемой жидкостью (см. рис. 8-6). Существуют некоторые сомнения в

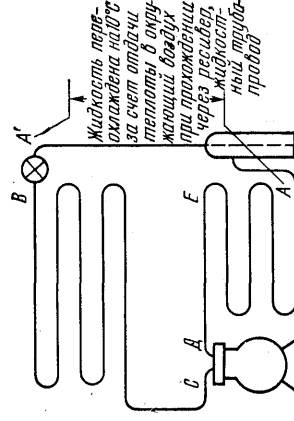


Рис. 8-5. Схема переохладения жидкого R12 в жидкостном трубопроводе:

A — насыщенная жидкость ($p=0,961$ МПа, $t=40^\circ\text{C}$); A' — переохлажденная жидкость ($p=0,961$ МПа, $t=30^\circ\text{C}$); B — парожидкостная смесь ($p=0,261$ МПа, $t=-5^\circ\text{C}$); C — насыщенный пар ($p=0,261$ МПа, $t=-5^\circ\text{C}$); D — перегретый пар ($p=0,961$ МПа, $t=-46,8^\circ\text{C}$); E — насыщенный пар ($p=0,961$ МПа, $t=40^\circ\text{C}$)

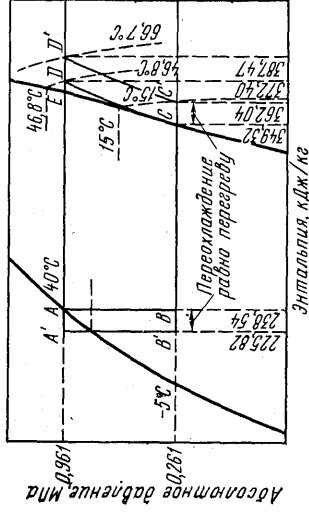


Рис. 8-9. Сравнение цикла насыщения с циклом с регенеративным теплообменником на диаграмме энтальпия — давление (величина переохлаждения жидкости равна величине перегрева пара R12)

бопровод к регулятору расхода (рис. 8-8). Проходя через теплообменник, холодный всасываемый пар поглощает теплоту от теплой жидкости. Она переохлаждается, перегревая пар, а так как теплота, поглощенная паром при перегреве, отбирается у жидкости, то ее количество равно количеству теплоты, отобранной паром. В каждом из рассмотренных до сих пор способов переохлаждения теплота, отданная переохлаждающейся жидкостью, передается внешней для машины среде. В регенеративном теплообменнике теплота, отдаваемая переохлаждающейся жидкостью, поглощается всасываемым паром и остается в системе.

На диаграмме энтальпия — давление (рис. 8-9) цикл насыщения сравнивается с циклом, в котором используется регенеративный теплообменник. Точки A, B, C, D и E обозначают цикл насыщения, а точки A', B', C', D' и E' — цикл с теплообменником, в котором всасываемый пар перегревается от -5 до 15°C .

Количество теплоты, поглощаемое в теплообменнике одним килограммом пара, равно

$$q_{10} = i_{c'} - i_c = 362,04 \text{ кДж/кг} - -349,32 \text{ кДж/кг} = 12,72 \text{ кДж/кг}.$$

Количество теплоты, отданной жид-

костью в теплообменнике при переохлаждении $i_a - i_{a'}$, равно количеству теплоты, поглощенной паром при перегреве $i_{c'} - i_c$, т. е. $12,72 \text{ кДж/кг}$. Удельная холодопроизводительность цикла с теплообменником составляет

$$q_0 = i_c - i_{a'} = 349,32 \text{ кДж/кг} - -225,82 \text{ кДж/кг} = 123,5 \text{ кДж/кг}.$$

Теплота сжатия цикла с теплообменником

$$q = i_{d'} - i_{c'} = 387,47 \text{ кДж/кг} - -362,04 \text{ кДж/кг} = 25,43 \text{ кДж/кг}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = (i_c - i_{a'}) / (i_{d'} - i_{c'}) = 123,50 \text{ кДж/кг} : 25,43 \text{ кДж/кг} = 4,86.$$

Холодильный коэффициент цикла насыщения равен 4,8, поэтому холодильный коэффициент цикла с теплообменником отличается от цикла насыщения только на $1,25\%$: $[(4,86 - 4,8) / 4,8] 100 = 1,25\%$.

В зависимости от обстоятельств холодильный коэффициент цикла с теплообменником может быть больше, меньше или равен коэффициенту цикла насыщения в одинаковом диапазоне давлений. В любом случае разность пренебрежимо мала, и очевидно, что преимущества от переохлаждения жидкости в теплообменнике почти сводятся на нет из-за отрицательного влияния перегрева пара. Теоретически использование теплообменника не может быть оправдано увеличением холодопроизводительности и КПД системы. Однако в действительности холодильная машина не может работать в цикле насыщения.

Всасываемый пар в действительном цикле всегда перегревается до начала процесса сжатия. Это происходит даже в том случае, если нет перегрева ни в испарителе, ни во всасывающем трубопроводе, и пар подается в компрессор при температуре парообразования. Когда холодный пар всасывается в компрессор, он также перегревается, поглощая

теплоту от горячих стенок цилиндра. Это влияет на КПД цикла почти в такой же степени, как и перегрев во всасывающем трубопроводе без полезного охлаждения¹.

Ранее перечислялись недостатки перегрева всасываемого пара без полезного охлаждения. Если перегрев пара в действительном цикле неизбежен независимо от того, применяется теплообменник или нет, то любые средства, обеспечивающие перегрев пара с полезным охлаждением, целесообразны. Следовательно, ценность теплообменника заключается в том, что он обеспечивает перегрев пара с полезным охлаждением. Влияние теплообменника на КПД оценивается поэтому только сравнением цикла с регенеративным теплообменом с циклом, в котором пар перегревается без полезного охлаждения.

Максимальная величина теплообмена между жидкостью и паром в теплообменнике зависит от начальных температур жидкости и пара на входе в теплообменник и длительности их контакта друг с другом.

Чем больше разность температур, тем выше величина теплообмена. Так, чем ниже температура кипения и выше температура конденсации, тем больше величина возможного теплообмена. Теоретически, если две среды находятся в контакте достаточно длительное время, они выйдут из теплообменника с одинаковой температурой. В практических условиях это невозможно. Однако чем больше времени две среды находятся в контакте друг с другом, тем больше сблизятся их температуры. Удельная теп-

лоемкость пара меньше, чем у жидкости, и потому температура пара всегда повышается больше, чем снижается температура жидкости. Например, удельная теплоемкость жидкого R12 приблизительно равна $1,04 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, а удельная теплоемкость пара — $0,64 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Это означает, что понижение температуры жидкости приблизительно составляет 62% ($0,64/1,04$) от повышения температуры пара, т. е. на каждые 20°C повышения температуры пара температура жидкости понижается на $12,2^\circ\text{C}$.

В цикле с теплообменником (см. рис. 8-9) пар, перегреваясь от -5 до 15°C , поглощает $12,72 \text{ кДж/кг}$. Допуская, что весь перегрев происходит в теплообменнике, количество теплоты, отданной жидкости, равно $12,72 \text{ кДж/кг}$, и поэтому температура жидкости ($12,72/1,04$) при прохождении ее через теплообменник понижается на $12,2^\circ\text{C}$.

Влияние снижения давления из-за трения хладагента

Давление хладагента снижается при прохождении через трубопроводы, испаритель, конденсатор, ресивер, вентили и компрессор из-за внутреннего (в самой жидкости) и внешнего (о поверхности) трения (рис. 8-10).

Диаграмма энтальпия — давление действительного цикла (рис. 8-11) показывает потери давления в различных частях системы. Цикл насыщения представлен для сравнения, в целях упрощения не показаны ни перегрев, ни переохлаждение.

Линия $B'-C'$ характеризует процесс кипения в испарителе, в котором из-за трения давление хладагента снижается на $0,035 \text{ МПа}$. Если давление и температура насыщения парожидкостной смеси на входе в испаритель $0,279 \text{ МПа}$ и -3°C соответственно, то давление насыщенного пара на выходе из испарителя составляет $0,244 \text{ МПа}$, что соответствует температуре насыщения

¹ Некоторые преимущества проявляются и при перегреве пара в компрессоре: когда всасываемый пар поглощает теплоту от стенок цилиндра, их температура несколько снижается. Это изменение незначительно, и его трудно оценить; когда используется герметичный компрессор со встроенным электродвигателем, пар должен всасываться в компрессор при относительно низкой температуре для охлаждения обмотки электродвигателя.

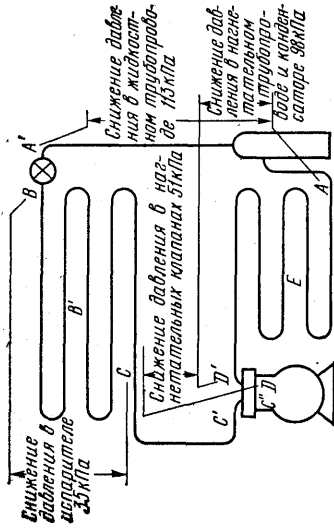


Рис. 8-10. Схема, показывающая влияние снижения давления в различных точках системы (величины снижения давления для наглядности увеличены):

$A-p=0,961$ МПа (температура насыщения, соответствующая этому давлению, $t_s=40^\circ\text{C}$); $A'-p=0,848$ МПа ($t_s=35^\circ\text{C}$); $B-p=0,279$ МПа ($t_s=-3^\circ\text{C}$); B' — среднее давление кипения $p_0=0,261$ МПа (средняя температура кипения $t_0=-5^\circ\text{C}$); $C-p=0,244$ МПа ($t_s=-7^\circ\text{C}$); $D-p=1,11$ МПа ($t_s=46^\circ\text{C}$); $D'-p=1,059$ МПа ($t_s=44^\circ\text{C}$); E — среднее давление конденсации $p_K=1,009$ МПа (средняя температура конденсации $t_K=42^\circ\text{C}$)

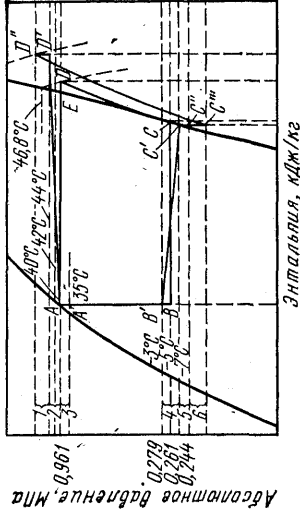


Рис. 8-11. Диаграмма энтальпия— давление холодильного цикла, показывающая влияние снижения давления хладагента R12 в различных узлах системы (цикл насыщения приведен для сравнения):

1 — в нагнетательных клапанах компрессора; 2 — в нагнетательном трубопроводе и конденсаторе; 3 — в жидкостном трубопроводе; 4 — в испарителе; 5 — во всасывающем трубопроводе; 6 — во всасывающих клапанах компрессора

— 7°C . Средняя температура кипения хладагента в испарителе (-5°C) в цикле со снижением давления всасывания равна температуре кипения в цикле насыщения.

В результате снижения давления в испарителе пар выходит из него при более низких давлении и температуре насыщения и с большим удельным объемом.

Удельная холодопроизводительность на единицу массы и массовый расход хладагента на единицу производительности приблизительно одинаковы в обоих циклах, но объемный расход пара на единицу производительности больше в цикле со снижением давления из-за большего удельного объема. Кроме того, степень сжатия пара выше вследствие более низкого давления пара на выходе из испарителя. Поэтому потребляемая мощность на единицу производительности также больше.

Кривая $C'-C''$ обозначает снижение давления всасываемого пара во всасывающем трубопроводе от испарителя до входа в компрессор. Пар всасывается в компрессор также при более низком давлении и с меньшей плотностью вследствие снижения давления во всасывающем трубопроводе. При этом увеличиваются объемный расход пара и потребляемая мощность на единицу производительности.

Очевидно, что снижение давления в испарителе и во всасывающем трубопроводе должно быть минимальным, чтобы получить оптимальный КПД цикла. Это относится также к теплообменникам и любым другим вспомогательным устройствам, монтируемым на всасывающем трубопроводе.

Снижения давлений на рис. 8-11 увеличены для четкости. В хорошо сконструированном испарителе снижение давления обычно ограничивается диапазоном от 10 до 20 кПа. В идеальном сконструированном всасывающем трубопроводе снижение давления не должно вызывать понижения температуры насыщения более чем на 1 К.

Кривая $C''-C'''$ характеризует снижение давления всасываемого пара при прохождении через всасывающие клапаны и каналы в компрессоре до

цилиндра. Равные величины снижения давления в клапанах и каналах на стороне всасывания компрессора и во всасывающем трубопроводе влияют одинаковым образом на КПД цикла. Хорошая конструкция характеризуется минимально возможным уровнем снижения давления.

Кривая $C''' - D''$ соответствует процессу сжатия в цикле со снижением давления. Обратите внимание, что пар сжимается в цилиндре до давления, величина которого значительно выше среднего давления конденсации. Ниже показано, что пар выталкивается из цилиндра, преодолевая давление конденсации и дополнительное давление, создаваемое пружинами нагнетательных клапанов.

Кривая $D' - D'$ обозначает снижение давления пара, обусловленное открытием нагнетательных подпружиненных клапанов и трением пара в нагнетательных каналах компрессора.

Кривая $D' - A$ характеризует снижение давления хладагента в нагнетательном трубопроводе и конденсаторе. Часть кривой $D' - A$, обозначающей проходжение пара через нагнетательный трубопровод, может быть различной длины, так как нагнетательный трубопровод монтируют длинным или коротким в зависимости от условий. Любое снижение давления на стороне нагнетания компрессора (в нагнетательных клапанах и каналах, в нагнетательном трубопроводе и в конденсаторе) повышает давление нагнетания, увеличивая тем самым теплоту сжатия и потребляемую мощность на единицу производительности.

Кривая $A - A'$ соответствует снижению давления хладагента, проходящего через ресивер и жидкостный трубопровод. Хладагент находится в точке A в виде насыщенной жидкости, и поэтому температура жидкости понижается с уменьшением давления. Если жидкость не переохлаждается с передачей теплоты внешней среде при снижении ее давления, то часть жидкости мгновенно испаряется.

рится в жидкостном трубопроводе для соответствующего охлаждения остальной массы жидкости. Обратите внимание на то, что точка A' находится в зоне фазового изменения хладагента. Это свидетельствует о том, что часть хладагента в указанной точке находится в виде пара.

Снижение давления в жидкостном трубопроводе не влияет на КПД цикла, несмотря на мгновенное испарение жидкости и перепад температуры, совпадающие со снижением давления в жидкостном трубопроводе. В любом случае давление и температура жидкости должны быть понижены до состояния паровозобования на входе в испаритель. Тот факт, что это частично происходит в жидкостном трубопроводе, а не в регуляторе расхода хладагента, не влияет непосредственно на КПД системы. Однако производительность жидкостного трубопровода и регулятора расхода снижаются. Кроме того, проход пара через регулятор расхода хладагента может вызвать эрозию иглы и седла клапана.

Обычно в жидкостном трубопроводе происходит достаточное переохлаждение жидкости даже без использования теп-

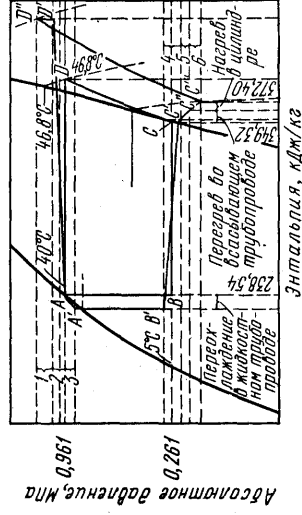


Рис. 8-12. Диаграмма энтальпия—Давление действующего холодильного цикла, показывающая влияние переохлаждения, перегрева, а также снижения давления хладагента R12 (цикл насыщения приведен для сравнения):

1 — в нагнетательных клапанах компрессора; 2 — в нагнетательном трубопроводе и конденсаторе; 3 — в жидкостном трубопроводе; 4 — в испарителе; 5 — во всасывающем трубопроводе; 6 — во всасывающих клапанах компрессора

лообменника для предотвращения многократного испарения жидкости, если снижение давления в трубопроводе не слишком велико. Жидкость обычно не испаряется в жидкостном трубопроводе, если давление снижается не более чем на 35 кПа.

Влияние снижения давления в трубопроводах и других частях системы

Глава 9

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДА И ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ИСТОРИЯ И МАСШТАБЫ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДА

На начальной стадии машинного охлаждения оборудование было громоздким, дорогостоящим и малоэффективным. Кроме того, оно требовало постоянного присутствия механика или инженера по эксплуатации, что ограничивало применение машинного охлаждения только на заводах по производству мяса, мясоперерабатывающих предприятиях и на больших холодильниках для хранения продуктов.

В течение нескольких десятилетий холодильная техника превратилась в гигантскую и быстрорастущую промышленность, какой она является сегодня. Несколькими способами этому бурному росту. Во-первых, при развитии высокоточных методов производства стало возможно изготовление более эффективного оборудования с меньшими габаритными размерами. Создание «безопасных» хладагентов и изобретение электродвигателя мощностью менее 0,7 кВт привело к разработке небольших холодильных агрегатов, которые в настоящее время широко используются, например в домашних холодильниках и морозильниках, небольших кондиционерах и торговых холодильном оборудовании.

Мало людей вне сферы холодильной промышленности представляют себе значительную роль холодильной техники в создании высокотехнического общества, и они не представляют себе степени зависимости общества от машинного холода для самого его существования. Например, без машинного охлаждения было бы невозможно сохранить достаточное количество продуктов для питания растущего городского населения. Кроме того,

рассматривается более подробно в соответствующих главах.

Диаграмма энтальпия — давление стандартного холодильного цикла на рис. 8-12, показывающая совместное влияние снижения давления, переохлаждения и перегрева, сравнивается с диаграммой энтальпия — давление цикла насыщения.

Невозможно было бы находиться в летние месяцы из-за жары во многих больших зданиях, в которых располагаются торговые и промышленные предприятия, если бы в них не было кондиционирования воздуха, осуществляемого с помощью холодильного оборудования.

В дополнение к хорошо известным случаям применения холода, как, например, для комфортного кондиционирования воздуха, для обработки, замораживания, хранения, перевозки и демонстрации скоропортящихся продуктов, машинное охлаждение используется также при обработке и производстве почти всех товаров. Новых процессов и изделий, появившихся в результате применения машинного холода, множество. Например, с помощью холода стало возможным строительство крупных плотин, которые необходимы для создания ирригационных систем и гидроэлектростанций. Холод позволяет осуществлять строительство дорог и туннелей, а также фундаментных и шахтных колодцев в неустойчивых грунтах. Применение холода способствовало началу производства пластмасс и синтетического каучука, а также многих новых и полезных материалов и изделий. С помощью машинного охлаждения пекари выпускают больше батонов хлеба из одного килограмма муки, изготовители текстильных изделий и бумаги повышают эффективность работы оборудования и выпускают больше продукции; улучшилась закладка стали для производства стоек. Существование сотни способов использования машинного холода, и их количество увеличивается с каждым годом. Единственный сдерживающий фактор, замедляющий в настоящее время развитие холодильной промышленности, — это недостаточное количество квалифицированного персонала.

КЛАССИФИКАЦИЯ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для удобства изучения холодильное оборудование делят на шесть общих типов: бытовое, торговое, промышленное, морское и транспортное, оборудование для комфортабельного кондиционирования воздуха, оборудование для промышленного кондиционирования воздуха. В последующем материале книги показано, что границы этих групп точно не определены.

Бытовое холодильное оборудование

Бытовое холодильное оборудование ограничивается в основном домашними холодильниками и морозильниками. Однако вследствие большого количества работающих агрегатов бытовое холодильное оборудование представляет значительную часть холодильной промышленности.

Бытовые агрегаты обычно небольшого размера с номинальной мощностью от 35 до 375 Вт. Это оборудование герметичного типа. Применение этого оборудования не будет рассматриваться здесь подробно, так как оно знакомо всем, но вопросы, связанные с конструкцией и обслуживанием этих агрегатов, освещены в соответствующих главах.

Торговое холодильное оборудование

Торговое холодильное оборудование включает вопросы конструирования, монтажа и обслуживания агрегатов, используемых в магазинах, ресторанах, гостиницах и других предприятиях для хранения, демонстрации, обработки и продажи всех видов скоропортящихся продуктов. Торговое оборудование описывается несколько подробнее в конце этой главы.

Промышленное холодильное оборудование

Промышленное холодильное оборудование часто путают с торговым, так как нет четкого их подразделения. Как правило, промышленное оборудование крупнее торгового, и его отличительной чертой является необходимость постоянного присутствия инженера по эксплуатации. Промышленное оборудование применяется на льдоделательных заводах, крупных предприятиях по переработке продуктов (мяса, рыбы, птицы, замороженных продуктов и т. д.), на пиво-

варенных предприятиях, молокозаводах, а также на промышленных предприятиях, например нефтеперерабатывающих и химических заводах, на заводах по производству резинотехнических изделий и др. Промышленное холодильное оборудование используется также в строительной промышленности.

Морское и транспортное холодильное оборудование

Оборудование этой категории можно отнести частично к группе торгового и частично к группе промышленного оборудования. Однако специализация в этих областях достигла такого развития, что требует особого рассмотрения.

Морское холодильное оборудование, конечно, включает оборудование на борту морских судов, например на рыболовных судах, судах, транспортирующих скоропортящиеся продукты, а также холодильное оборудование для хранения продуктов на судах всех типов.

Транспортное холодильное оборудование включает оборудование авторефрижераторного транспорта для дальних и местных перевозок, а также холодильного железнодорожного транспорта (типовой кузов авторефрижератора см. на рис. 11-5).

КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА

Кондиционирование воздуха предназначено для регулирования состояния воздуха в определенном ограниченном пространстве, включая не только температуру воздуха, но и влажность, циркуляцию, фильтрацию и очистку воздуха.

Оборудование для кондиционирования воздуха делится на два типа в зависимости от назначения, т. е. для комфортного или промышленного кондиционирования. Комфортное кондиционирование воздуха — это кондиционирование в целях создания комфортных условий для организма человека, например, в жилых домах, школах, конторах, гостиницах, магазинах, общественных зданиях, на фабриках и заводах, в автомобилях, автобусах, поездах, самолетах, на судах и т. д.

Кондиционирование воздуха, которое не предназначено для создания комфортных условий, называется промышленным кондиционированием. Это не означает, что оно не может служить также для создания комфортных условий одновременно со своим основным назначением.

Разнообразие применения промышленного кондиционирования почти не ограниче-

во. Оно применяется для регулирования влажности, регулирования гигроскопичных материалов, регулирования интенсивности химических и биохимических реакций, ограничения температурного расширения и сжатия различных изделий в процессе прецизионного изготовления, подачи чистого отфильтрованного воздуха, который часто является важнейшим фактором обеспечения надежной работы в производстве высококачественных изделий и продуктов.

ХРАНЕНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Машинное охлаждение используется наиболее широко для хранения скоропортящихся товаров, в частности пищевых продуктов, в связи с чем этому вопросу необходимо уделить особое внимание при изучении холодильной техники.

Хранение пищевых продуктов в настоящее время является более важной проблемой, чем когда-либо ранее в истории человечества. Современное огромное городское население требует колоссального количества пищевых продуктов, которые в подавляющем объеме производятся и обрабатываются в отдаленных сельских районах. Естественно, эти продукты необходимо сохранить при перевозке и последующем длительном хранении до их потребления. Хранение может продолжаться часы, сутки, недели, месяцы, а иногда даже годы. Многие продукты, в частности фрукты и овощи, отличаются сезонным характером, так как они производятся только в определенное время года. Необходимо предусмотреть соответствующее хранение для круглогодичного снабжения ими населения.

Вопрос сохранения пищевых продуктов уже с давних времен является важнейшей проблемой, так как это вопрос жизни или смерти. Почти с самого начала существования человечества проводился поиск способов сохранения продуктов в сезоны изобилия для того, чтобы выжить в периоды их недостатка. Естественно, что человек нашел и развил такие способы сохранения продуктов, как сушка, копчение, маринование и засолка, хотя он не знал причин порчи продуктов. Эти довольно простые способы все еще широко используются в настоящее время не только в отсталых обществах, не имеющих других средств, но также в высокоразвитых, в которых они дополняют более современные способы сохранения пищевых продуктов. Например, миллионы килограммов обезжиренных (сушеных) фруктов, молока, яиц, рыбы, мяса, картофеля и др. потребляются ежегодно наряду с копченостями, маринованными и солеными продуктами, такими, как окорок, бекон, колбаса и т. д. Несмотря на то что эти старые способы пригодны для сохранения некоторых

видов пищевых продуктов и часто приводят к созданию необычных и вкусных продуктов, которые иначе были бы недоступны, они тем не менее имеют некоторые недостатки, которые ограничивают их применение. В результате обработки этими способами внешний вид и вкус продуктов часто резко меняются, что во многих случаях делает их непригодными, и потому эти способы нельзя считать универсальными для сохранения всех видов пищевых продуктов. Кроме того, качество продуктов, обработанных этими способами, ограничено во времени. Если продукт должен быть сохранен в течение неопределенного или длительного времени, необходимо использовать другие способы хранения.

Изобретение микроскопа и последующее обнаружение микроорганизмов в качестве основной причины порчи продуктов привело к развитию консервирования еще в начале XIX века. Изобретение консервирования дало возможность сохранять продукты в течение длительного времени. Преимуществом консервированных продуктов является почти полное отсутствие порчи, легкость обработки, удобство в перевозке и хранении. В настоящее время способ консервирования занимает первое место среди всех других способов сохранения продуктов. Главный недостаток консервирования заключается в том, что консервированные продукты должны быть подвергнуты стерилизации, в результате чего они прохладят через процесс тепловой обработки. Поэтому, хотя консервированные продукты нередко отличаются своеобразным и приятным вкусом, они значительно отличаются от свежих.

Единственным средством сохранения продукта в его первоначальном свежем состоянии является его охлаждение. Это, конечно, принципиальное преимущество холода перед всеми другими способами сохранения продуктов. Охлаждение, однако, тоже имеет определенные недостатки. Например, когда продукт сохраняется с помощью холода, процесс охлаждения должен быть начат сразу после уборки урожая или забоя скота или птицы. Причем он должен продолжаться до потребления продуктов. Для осуществления этого требуется относительно дорогостоящее и громоздкое оборудование, что во многих случаях неудобно и неэкономично.

Очевидно, нет ни одного способа, который был бы оптимальным во всех случаях. Выбор способа зависит от ряда факторов, например вида продукта, длительности его хранения, наличия транспортных средств и оборудования для хранения. Очень часто для получения требуемых результатов необходимо применение нескольких способов одновременно.

УХУЖДЕНИЕ КАЧЕСТВА И ПОРЧА ПРОДУКТОВ

Глубокие знания причин ухудшения качества и порчи являются обязательной предпосылкой к изучению способов сохранения продуктов, для предотвращения или замедления ухудшения качества и порчи независимо от способа хранения.

В самом начале следует признать, что существуют неодинаковые степени качества и все продукты проходят через разные стадии его ухудшения до того, как они станут непригодными для употребления. В большинстве случаев необходимо не только сохранить продукт годным для употребления, но и его внешний вид, запах, вкус и содержание витаминов, т. е. с оптимальным уровнем качества. За исключением некоторых обработанных продуктов, это означает сохранение продукта в свежем виде.

Любое ухудшение качества, которое приводит к заметному изменению внешнего вида, запаха или вкуса свежих продуктов, снижает их коммерческую ценность и приносит экономический ущерб. Пищевые качества таких продуктов, как являе овощи или перезрелые фрукты, ухудшились noticeably, но нежелательное изменение их внешнего вида вынуждает продавать их по сниженным ценам. Кроме того, они уже начали портиться, сохранность их значительно снизилась, и потому их необходимо незамедлительно обработать или использовать, иначе они испортятся окончательно.

По совершенно очевидным причинам сохранение содержания витаминов на возможно более высоком уровне всегда является важным фактором при обработке и хранении всех пищевых продуктов. В настоящее время, например, пекари и работники молочной промышленности добавляют витамины для замещения тех, которые были утрачены при обработке. Если свежие овощи, фрукты и фруктовые соки не обрабатываются и не хранятся соответствующим образом, то они быстро теряют витамины. Потери витаминов не всегда заметны, но во многих свежих продуктах это обычно сопровождается заметным изменением внешнего вида, запаха или вкуса, например при увядании листовых зеленых овощей.

В большинстве случаев ухудшение качества и последующая порча пищевых продуктов обусловлены рядом сложных химических изменений, происходящих в продукте после уборки урожая или забоя скота и птицы. Эти химические изменения вызываются внутренними и внешними возбудителями. Первые — это естественные ферменты, наличие которых присуще всем органическим веществам, а вторые — микроорганизмы, размножающиеся как внутри продукта, так

и на его поверхности. Любой из этих возбудителей может вызвать полную порчу продукта, однако в большинстве случаев она происходит в результате их совместного действия. Если необходимо соответствующим образом сохранить продукт, то в любом случае надо исключить или эффективно контролировать активность возбудителей порчи.

Ферменты

Ферменты — это сложные белковые химические вещества. Роль ферментов еще не выяснена полностью, но можно утверждать, что они катализируют химические изменения в органических веществах. Существует много различных видов ферментов, и каждый из них характеризуется тем, что вызывает одну особую химическую реакцию. Например, фермент лактаза известен тем, что преобразует лактозу (молочный сахар) в молочную кислоту.

Ферменты активно участвуют во всех химических процессах, происходящих в живых организмах, и нормально присутствуют во всех органических веществах (в клеточной ткани всех растений и животных, живых и неживых). Они вырабатываются всеми живыми клетками и способствуют выполнению различных функций, например дыхания, пищеварения, роста, воспроизводства. Ферменты имеют важное значение для прорастания семян, роста растений и животных, созревания фруктов и течения пищеварительных процессов животных и человека. Однако существуют катаболические и анаболические ферменты, которые разрушают мертвую и поддерживают живую клеточную ткань. Ферменты в первую очередь ответственны за распад и разложение всех органических веществ, например гниение мяса и рыбы, порчу фруктов и овощей.

Независимо от катаболического или анаболического действия ферменты почти всегда разрушающе действуют на скоропортящиеся продукты. Поэтому, за исключением некоторых особых случаев, когда ферментация является частью обработки, ферментное действие должно быть полностью исключено или жестко ограничено. Ферменты очень чувствительны к состоянию окружающей среды, в особенности к температуре, кислотности или щелочности, что обуславливает практическую возможность контроля ферментной активности.

Ферменты разрушаются полностью под действием высокой температуры, изменяющей состав органического вещества, в котором они существуют. Большинство ферментов разрушается при температуре выше 71° С, и поэтому при варке продуктов они инактивируются. Ферменты очень стойки к низким

температурам, и они полностью не теряют активности даже при температуре ниже -20°C . Хорошо известно, однако, что интенсивность химической реакции замедляется с понижением температуры. Следовательно, несмотря на то что ферменты не разрушились, их активность значительно уменьшается при низкой температуре, в особенности при температурах ниже точки замораживания воды.

Ферментная деятельность максимальна в присутствии свободного кислорода (например, в воздухе) и уменьшается при снижении его притока.

Одни ферменты наиболее активны в кислой среде, а другие предпочитают нейтральную или щелочную среду. Ферменты, которые активны в кислой среде, разрушаются под действием щелочи, и наоборот, те, которые активны в щелочной среде, разрушаются под действием кислоты.

Органические вещества могут быть полностью разрушены или разложены своими собственными естественными ферментами. Это процесс автолиза (саморазрушения), который происходит редко. Более часто ферменты, выделяемые микроорганизмами, усиливают разрушительную активность естественных ферментов.

Микроорганизмы

К микроорганизмам относится большая группа мельчайших живых существ микроскопического и субмикроскопического размера, из которых следующие три представляют наибольший интерес при изучении вопросов сохранения пищевых продуктов: бактерии, дрожжи, микроскопические грибы (плесени). Микроорганизмы содержатся в воздухе, земле, воде, внутри и на поверхности растений и животных и в любом другом месте, где условия жизни пригодны для их выживания. Они одновременно полезны и вредны для человека. С одной стороны, их рост внутри и на поверхности скоропортящихся продуктов вызывает сложные химические превращения, следствием которых являются нежелательные изменения вкуса, запаха, внешнего вида. Кроме того, некоторые микроорганизмы выделяют ядовитые вещества (токсины), которые исключительно опасны для здоровья человека.

С другой стороны, микроорганизмы обладают многими полезными и необходимыми свойствами. Если бы не было микроорганизмов, то жизнь не была бы возможной. Разложение и распад всей мертвой животной ткани крайне важны для создания достаточного пространства для новой жизни и ее развития. Разлагающее действие микроорганизмов является составной частью цикла

жизни. Из всех живых организмов только зеленые растения (содержащие хлорофилл) могут потреблять неорганический материал в качестве пищи для создания клеточной ткани. Зеленые растения потребляют лучистую энергию солнца в процессе фотосинтеза для соединения двуокиси углерода воздуха с водой и минеральными солями почвы, создавая органические соединения из неорганических веществ.

И наоборот, для жизнедеятельности всех животных и растений, не содержащих хлорофилла (грибов), необходим органический материал. Следовательно, они должны питаться клеточной тканью других растений и животных и поэтому непосредственно или косвенно зависимы от зеленых растений как источника органического материала для своей жизни и развития.

Всем микроорганизмам необходим органический материал для жизнедеятельности, за исключением нескольких видов почвенных бактерий. В большинстве случаев они получают этот материал при разложении живых животных отходов и тканей мертвых животных и растений. Сложные органические соединения, составляющие ткань животных и растений, распадаются в процессе разложения и превращаются в простой неорганический материал, который возвращается в почву в качестве питания для зеленых растений.

Микроорганизмы, кроме роли, которую они играют в «пищевой цепи», поддерживая циркуляцию важнейших веществ, необходимы при обработке некоторых ферментных и других продуктов. Например, бактерии являются причиной молочнокислого брожения при обработке мясных продуктов, оливок, олив, какао, кофе, казенной капусты, сылоса и некоторых молочных продуктов, например масла, сыра, сливок и йогурта, а также уксуснокислого брожения при производстве уксуса из различных спиртов. Бактериальное воздействие полезно также при обработке некоторых других изделий, например кожи, льна, конопли, табака и промышленных отходов органического происхождения.

Способность к спиртовому брожению делают дрожжи неоценимыми в пивоварении и виноделии, а также при производстве спиртов всех видов. Всем несомненно известна необходимость применения дрожжей в хлебопечении.

В промышленном масштабе микроскопические грибы используют при выработке некоторых видов сыра и, что более важно, в производстве антибиотиков, например пенициллина и ауреомицина.

Несмотря на их полезное и необходимое действие, микроорганизмы оказывают разрушающее влияние на скоропортящиеся про-

дукты. Следовательно, необходимо эффективно контролировать их деятельность, как и активность естественных ферментов, для предотвращения ухудшения качества и порчи пищевых продуктов.

Необходимо изучить каждый вид микроорганизмов в отдельности, так как они отличаются друг от друга по своей природе и поведению.

Бактерии

Бактерия, состоящая из одной живой клетки, является очень простой формой растительной жизни. Размножение осуществляется делением клеток. При достижении стадии зрелости бактерия делится на две отдельные и равные клетки, каждая из которых растет до состояния зрелости и снова делится на две клетки. Бактерии растут и размножаются с огромной скоростью. В идеальных условиях бактерия растет до состояния зрелости и размножается менее чем за 20—30 мин. При такой скорости размножения одна бактерия в течение 24 ч может произвести 34 триллиона потомков. Однако жизненный цикл бактерий относительно короток и продолжится от нескольких минут до нескольких часов, и потому даже в идеальных условиях они не могут размножаться с такой скоростью.

Скорость роста и размножения бактерий и других микроорганизмов зависит от таких условий окружающей среды, как температура, свет и степень кислотности или щелочности, а также от наличия кислорода, влаги и соответствующего питания. Существуют, однако, много видов бактерий, и они значительно отличаются друг от друга в борьбе окружающей среды и в своем влиянии на нее. Стойкость бактерий к выживанию в тяжелых условиях окружающей среды различна. Не все виды бактерий одинаково развиваются в одних и тех же условиях окружающей среды. Одни виды предпочитают условия, которые совершенно легальны для других. Некоторые бактерии образуют споры. Спор возникает в клетке бактерии и защищена прочной оболочкой. В споровом состоянии, которая является фазой покоя или спячки, бактерия исключительно стойка к неблагоприятным условиям окружающей среды и может находиться в этом состоянии неопределенное время. Споры обычно начинают развиваться, когда условия становятся благоприятными для продолжения жизнедеятельности.

Большинство бактерий — сапрофиты, т. е. они «свободноживущие» и питаются только животными отходами и мертвой тканью животных и растений. Некоторые, однако, являются паразитами и развиваются только

на живом организме. Большинство патогенных бактерий (вызывающих заражение и болезни) паразитического типа. В отсутствие живого организма такие бактерии могут развиваться как сапрофиты. Если же возникает необходимость, некоторые сапрофиты существуют как паразиты.

Отдельные бактерии не могут переваривать нерастворимые пищевые вещества и потребляют растворимую пищу. Большинство бактерий по этой причине выделяют ферменты, которые перерабатывают нерастворимые соединения в растворимое состояние, превращая их в пригодную для бактерий пищу. Разложение скоропортящихся продуктов с ростом бактерий является прямым результатом действия этих бактериальных ферментов.

Бактериям для продолжения жизнедеятельности, как и всем другим живым существам, нужна влага и пища. Как и во многом другом, бактерии характеризуются различной стойкостью к отсутствию влаги. Большинство видов гибнет в течение нескольких часов при сушке, но более стойкие выдерживают отсутствие влаги в течение нескольких суток. Бактериальные споры выдерживают отсутствие влаги длительное время, но в этот период они находятся в состоянии покоя.

По потребности в кислороде бактерии делятся на две группы: живущие в присутствии свободного кислорода (воздуха); живущие без свободного кислорода. Некоторые бактерии могут жить в присутствии или в отсутствие свободного кислорода. Бактерии, живущие в отсутствие свободного кислорода, получают его в результате химической реакции восстановления одного соединения при окислении другого. Разложение в присутствии свободного кислорода называется расщеплением, а разложение в отсутствие свободного кислорода — гниением. Одним из продуктов распада является сероводород, который представляет собой газ с неприятным запахом, возникающим при разложении туш животных.

Бактерии очень чувствительны к кислотности и щелочности и не выживают в высококислотной или высокощелочной среде. Большинство бактерий существуют в нейтральной или слегка щелочной окружающей среде, хотя некоторые виды предпочитают слегка кислотные условия. В связи с тем что бактерии существуют в нейтральной или слегка щелочной среде, не кислые озониды больше других подвержены бактериальной осемененности.

Свет, в особенности прямое солнечное облучение, вреден для всех бактерий. Видимый свет только задерживает их рост, а при ультрафиолетовом облучении они гибнут. Лучи света, ультрафиолетовые и другие лучи не имеют проникающей силы и потому эффективны только для воздействия на бакте-

рии, имеющиеся на поверхности. Ультрафиолетовое облучение (прямое солнечное облучение) в соединении с сушкой, однако, является отличным средством регулирования роста бактерий.

Для каждого вида бактерий существует оптимальная температура, при которой они растут с максимальной скоростью. Кроме того, существует максимальная и минимальная температура, при которых происходит рост того или иного вида бактерий. Бактерии гибнут при температуре выше максимальной, а при температуре ниже минимальной переходят в состояние бездеятельности или спячки. Оптимальная температура для большинства сапрофитов обычно 24—30°C, а для паразитов — около 37 или 38°C. Оптимальный рост некоторых видов происходит при температуре вблизи точки кипения воды, а другие развиваются при температуре вблизи точки замерзания воды. Большинство видов, однако, гибнут или в значительной степени задерживаются в своем развитии при этих температурах.

Данные о влиянии температуры на скорость роста бактерий в молоке при различных температурах приведены в табл. 9-1

Таблица 9-1
Рост числа бактерий в молоке

Температура, °C	Продолжительность, ч		
	24	48	96
0	2400	2100	1850
4	2500	3600	218000
8	3100	12000	1480000
10	11600	540000	
16	180000	28000000	
30	1400000000		

Вообще, скорость роста бактерий значительно снижается при понижении температуры.

Дрожжи

Дрожжи — простейшие одноклеточные организмы семейства грибов. Имея микроскопический размер, дрожжевые клетки все же несколько больше и сложнее бактериальных клеток. Всего несколько видов дрожжей размножаются делением или половым способом, а обычно дрожжи размножаются поч-

кованием. На зрелой клетке появляется небольшой выступ, который увеличивается в размере и наконец отделяется от материнской клетки.

В идеальных условиях почкование часто происходит так быстро, что новые почки формируются до отделения, и образуются дрожжевые пучки.

Дрожжи, как и бактерии, участвуют в процессах ферментации и разложения. Они выделяют ферменты, в результате чего в продукте происходят химические изменения. Дрожжи отличаются способностью трансформировать сахар в спирт и углекислоту. Спиртовое брожение, создаваемое дрожжами, очень важно в хлебопечном производстве, пивоварении и виноделии, хотя и разрушительно действует на свежие продукты, в частности на фрукты, ягоды и соки из них.

Дрожжи образуют до восьми спор в одной клетке. Они широко распространены в природе, постоянно находятся в воздухе, на коже фруктов и поверхности ягод. Зимой они обычно находятся в почве, а весной переносятся на новые фрукты ветром или насекомыми.

Дрожжи, как и бактерии, нуждаются в воздухе, пище и влаге для своего роста. Они чувствительны к изменениям температуры и степени кислотности или щелочности окружающей среды. В большинстве случаев дрожжи предпочитают умеренную температуру и незначительную кислотность. Вообще, дрожжи не столь стойки к неблагоприятным условиям, как бактерии, хотя они растут в кислотной среде, которая задерживает рост большинства бактерий. Дрожжевые споры, как и бактериальные, очень стойки и выживают длительное время в тяжелых условиях.

Микроскопические грибы (плесени)

Плесени, как и дрожжи, входят в группу растительных микроорганизмов. Они, однако, имеют более сложную структуру, чем бактерии или дрожжи. Отдельные бактерии или дрожжевые растения состоят из одной клетки, а плесень содержит ряд клеток, которые располагаются последовательно и образуют длинные ниточки волокон, называемые гифами. Сеть, образованная этими ниточками волокон, называется мицелием и легко видна невооруженным глазом. Гифы плесени могут быть двух видов. Первые из них — это растительные волокна, которые растут под поверхностью в виде корней для сбора питания, а другие, называемые воздушными гифами, растут на поверхности и образуют разноразличную плесень.

Плесень размножается спорами.

Спores — это семена, которые в соответствующих условиях прорастают и образуют плесень на любых пищевых продуктах, с которыми они контактируют. Споры плесени находятся везде и особенно их много в воздухе, который переносит их с места на место.

Плесень обладает меньшей стойкостью к высоким температурам, чем бактерии, но легче переносит низкую температуру и свободно развивается при температуре вблизи точки заморозания воды. Развитие плесени замедляется при температуре ниже 0°C и полностью прекращается при температуре —12°C и ниже.

Плесень хорошо развивается в темной влажной среде, в особенности в неподвижном воздухе. Для роста плесени требуется значительное количество кислорода. В отсутствие кислорода развивается очень мало видов плесени. Условия в холодильных камерах иногда идеальны для развития плесени. Эта проблема несколько разрешается поддержанием хорошей циркуляции воздуха в камерах хранения, использованием бактерицидных красок, ультрафиолетового облучения и пр.

Плесень в отличие от бактерий может развиваться на продуктах, содержащих относительно большое количество сахара или кислоты. Они часто растут на кислых фруктах и на поверхности емкостей для маринования. Яблоки и цитрусовые чаще всего портятся из-за плесени.

Контроль возбудителей порчи

Регулирование условий окружающей среды является единственным средством предупреждения порчи продуктов. Все способы хранения продуктов обязательно должны включать регулирование состава окружающей среды, т. е. необходимо создать условия, неблагоприятные для активной жизнедеятельности микроорганизмов.

Все возбудители порчи разрушаются под действием высокой температуры в течение определенного времени. Этот принцип используется при сохранении продуктов консервированием. Температуру продукта повышают до величин, при которой происходит гибель микроорганизмов, и поддерживают на этом уровне до полного их разрушения. Затем продукт закатывают и стерилизуют в воздушнопроницаемых сосудах для предотвращения повторного обсеменения. Обработанный таким образом продукт может храниться длительное время.

Продолжительность разрушения всех агентов порчи зависит от уровня температуры, и чем она выше, тем меньше требуется времени. Во влажной среде обработка может

происходить при более низкой температуре и с меньшей продолжительностью. Ферменты и все живые микроорганизмы разрушаются примерно в течение 5 мин при обработке в кипящей воде, но более стойкие бактерии — споры выживают в этих условиях в течение нескольких часов. Поэтому некоторые продукты, в особенности мясные и некие овощи подвергают длительной варке. Эти продукты обычно обрабатывают под давлением, в результате чего повышается температура и сокращается длительность варки.

Другой способ подавления активности возбудителей порчи заключается в их обезвоживании. Ферменты и микроорганизмы нуждаются во влаге для своей жизнедеятельности. Следовательно, удаление свободной влаги из продукта в значительной степени снижает их активность. Процесс удаления влаги называется сушкой (обезвоживанием) и является одним из самых старых способов сохранения пищевых продуктов. Сушку осуществляют естественным способом на солнце и на воздухе или искусственно в печах.

Маринование — это в основном процесс брожения, конечный результат которого заключается в уничтожении веществ, служащих пищей для дрожжей и бактерий. Продукт, сохраняемый маринованием, погружается в маринад. В процессе брожения сахар в продукте превращается в молочную кислоту в основном под действием молочнокислых бактерий.

Конечные продукты сохраняются частично но под воздействием сушки в дыме и частично антисептиков, поглощаемых из дыма.

Некоторые продукты «консервируют» сахаром или солью, которые создают неблагоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов.

ХОЛОДИЛЬНОЕ ХРАНЕНИЕ ПРОДУКТОВ

Под хранением скоропортящихся продуктов в холоде понимается использование низкой температуры для инактивации или замедления жизнедеятельности микроорганизмов и ферментов, вызывающих порчу. Низкие температуры не разрушают возбудителей порчи столь эффективно, как высокие, однако хранение скоропортящихся продуктов при низкой температуре значительно снижает активность ферментов и микроорганизмов, создавая тем самым практическую возможность сохранения продуктов в свежем состоянии в течение длительного времени. Выбор температуры для хранения продуктов зависит от вида продукта и длительности его хранения.

Сохраняемые продукты могут быть разделены на две категории: продукты, кото-

рые находятся в «живом» состоянии ко времени хранения; продукты, которые находятся в «неживом» состоянии. «Неживые» продукты, например мясо, птица и рыба, более восприимчивы к микробному обсеменению и порче, чем «живые», и обычно требуют более жестких режимов хранения.

При хранении «неживых» продуктов проблема заключается в защите мертвой ткани от гниения как ферментного, так и микробного характера. Жизненная активность других продуктов, например фруктов и овощей, является значительной защитой против бактериальной инвазии, и проблема заключается в основном в сохранении продуктов в «живом» состоянии, уменьшении естественной активности ферментов в целях замедления процесса созревания.

Овощи и фрукты после сбора настолько же активны, как и в период роста. До сбора они непрерывно получают питание от растущего растения и часть его откладывается в овощи или фрукте. После уборки, когда прекращается естественный приток питания, процесс жизнедеятельности продолжается за счет потребления накопленных питательных веществ. Это вызывает изменения в овоще или фрукте, в результате которых возникает разложение и полный распад продукта. Основная цель холодильного хранения таких продуктов заключается в замедлении процессов жизнедеятельности посредством подавления ферментной активности, что позволяет хранить продукты более длительное время.

Активность естественных ферментов отрицательно сказывается также на продуктах животного происхождения. Наиболее неблагоприятно действие ферментов, которые катализируют гидролиз и окисление, связанные с разложением животного жира. Прогорклость является основным фактором, ограничивающим срок хранения продуктов животного происхождения в замороженном и несомленном состоянии. Прогорклость обусловлена окислением животного жира, а так как некоторые виды его менее стойки, чем другие, то срок хранения этих продуктов зависит частично от состава жира. Например, из-за относительной стойкости говяжьего жира срок хранения у говядины значительно больше, чем у свинины или рыбы.

Процессы окисления и гидролиза регулируются за счет уменьшения активности естественных ферментов посредством охлаждения. Скорость окисления еще больше снижается при упаковке продуктов животного происхождения в газонепроницаемую упаковку, предотвращающую поступление воздуха (кислорода) к поверхности продукта. Неправильно хранение фруктов и овощей в газонепроницаемой упаковке в замороженном состоянии. Это «живые» продукты, и газонепроницаемая упаковка вызовет их ги-

бель. «Мертвые» фрукты и овощи разлагаются очень быстро.

В целом можно утверждать, что при низких температурах обеспечивается более длительный срок хранения пищевых продуктов.

Классификация холодильного хранения

Холодильное хранение можно разделить на три общие категории: кратковременное хранение, длительное хранение, низкотемпературное хранение. При кратковременном и длительном хранении продукт охлаждается и хранится при температуре выше точки его замораживания, а при низкотемпературном хранении продукт замораживается и хранится при температуре от -12 до -23°C , но чаще всего при -18°C .

Кратковременное хранение обычно связано с торговыми предприятиями, где осуществляется быстрый сбыт продуктов. Длительность хранения в зависимости от продукта колеблется от 1 или 2 дней до 1 нед и редко бывает более 15 дней.

Длительное хранение обычно практикуется на промышленных холодильниках. Продолжительность хранения зависит от вида продукта и его состояния при поступлении на хранение. Максимальный период длительного хранения составляет 7—10 дней для скоропортящихся продуктов, например зрелых помидоров, и 6—8 мес для других, более стойких к хранению продуктов, например лука, копченого мяса. Когда необходимо хранить скоропортящиеся продукты более продолжительное время, они должны быть заморожены и помещены на низкотемпературное хранение. Некоторые свежие продукты, однако, не закладываются на низкотемпературное хранение, так как они повреждаются в процессе замораживания, например помидоры. При необходимости длительного хранения таких продуктов следует применять другие способы.

Условия хранения

Оптимальные условия при кратковременном или длительном хранении зависят от природы каждого отдельного продукта, срока хранения, находится ли он в упакованном или неупакованном виде. Вообще, условия, требуемые для кратковременного хранения более гибкие, чем для длительного хранения, и обычно продукты можно хранить при более высокой температуре. Рекомендуемые условия для кратковременного и длительного хранения, приближительный срок хранения различных продуктов и другие характеристики приведены в таблицах

10-7—10-10. Указанные в таблицах значения являются результатами экспериментальной работы и опыта, и необходимо точно следовать им, в особенности при длительном хранении, если требуется сохранить высокий уровень качества продукта в течение всего срока хранения.

Температура хранения

Анализ таблиц показывает, что оптимальная температура хранения большинства продуктов — это температура несколько выше точки их замораживания. Имеются, однако, некоторые исключения.

Неправильная температура хранения ухудшает качество продукта и сокращает срок хранения. Некоторые фрукты и овощи очень чувствительны к температуре хранения и восприимчивы к так называемым заболеваниям при холодном хранении, когда температура хранения выше или ниже их критической температуры хранения. Например, на цитрусовых часто развивается «ямчатость» кожуры при относительно высоко-температурном хранении. Они подвергаются ожогу (покоричневению кожуры) и водянистой порче при хранении ниже критической температуры. Кожира бананов повреждается при хранении ниже 13°C, а сельдерей портится при хранении выше 1°C. Лук прорастает при температуре выше 0°C, а ирландский картофель становится сладким при температуре хранения ниже 4°C. На зеленой фасоле и перце появляются пятна при температуре хранения около 0°C. Оптимальная температура хранения большинства сортов яблок находится в диапазоне —1—0°C, но некоторые сорта подвергаются мягкому ожогу или влажностному распаду при температуре хранения ниже 2°C. В одних сортах развивается коричневая сердцевина при температуре ниже 2°C, а в других — внутреннее покоричневение во время хранения при температуре ниже 4°C.

Влажность и циркуляция воздуха

Хранение всех скоропортящихся продуктов в их естественном (неупакованном) состоянии требует точного регулирования не только температуры, но также влажности и скорости движения воздуха в охлаждаемом объеме. Одной из главных причин ухудшения качества неупакованных свежих продуктов, например мяса, птицы, рыбы, фруктов, овощей, сыра и яиц, является обезвоживание продукта при испарении влаги в окружающую среду. Обезвоживание фруктов и овощей сопровождается сморщиванием, увяданием, значительной потерей массы и содержания витаминов. Обезвоживание мяса, сыра и др.

вызывает обезвечивание, усушку и значительные потери при последующей их обработке. Обезвоживание способствует увеличению интенсивности окисления. Яйца теряют влагу через пористую скорлупу, и их качество снижается.

Обезвоживание происходит в том случае, когда давление пара в продукте выше давления пара в окружающей среде. Интенсивность потери влаги пропорциональна разности давлений пара и площади открытой поверхности продукта.

Разность давлений пара в продукте и в воздухе является в основном функцией относительной влажности и скорости движения воздуха в холодильной камере. Чем ниже относительная влажность и выше скорость движения воздуха, тем больше разность давлений пара и интенсивность потери влаги из продукта. И наоборот, потери влаги минимальны, когда влажность в камере хранения поддерживается на высоком уровне при низкой скорости движения воздуха. Следовательно, 100%-ная влажность и неподвижный воздух являются идеальными условиями для предотвращения обезвоживания хранимого продукта. Однако такие условия способствуют быстрому росту микроскопических грибов и образованию бактериальной слизи на мясе. Кроме перечисленного для соответствующего охлаждения продукта требуется хорошая циркуляция воздуха в охлаждаемом объеме. По этим причинам влажность должна поддерживаться в камере несколько ниже 100%, а скорость движения воздуха быть достаточной для создания соответствующей циркуляции. Значения относительной влажности и скорости движения воздуха, рекомендуемые для хранения различных продуктов, имеются в таблицах 10-9—10-12.

Влажность и скорость движения воздуха не являются определяющими факторами, если продукт хранится в паронепроницаемой упаковке. Некоторые продукты, например сухие фрукты, гигроскопичны и должны поэтому храниться при относительно низкой влажности.

Смешанное хранение

Для поддержания оптимальных условий целесообразно хранить большинство продуктов раздельно, но обычно это экономически невыгодно. Поэтому практические соображения требуют смешанного хранения охлажденных продуктов. Естественно, разница в условиях хранения различных продуктов создает проблему их смешанного размещения в холодильной камере.

Условия хранения в таких камерах предусматривают компромисс, и обычно рекомендуется температура хранения несколько выше

оптимальной. Более высокую температуру применяют при смешанном хранении с целью предотвратить вероятность повреждения более восприимчивых к заболеваниям при холодильном хранении продуктов, когда они хранятся при температурах ниже их критической температуры. Более высокая температура сокращает срок хранения некоторых продуктов, однако это не представляет серьезной проблемы.

При необходимости длительного хранения в большинстве распределительных (оптовых) и производственных холодильников имеются холодильные камеры для раздельного хранения продуктов. Общепринятой практикой при смешанном хранении является группировка различных продуктов, требующих примерно одинаковых условий.

Другая проблема, связанная со смешанным хранением, заключается в поглощении продуктами посторонних запахов. Некоторые продукты поглощают или выделяют запахи при хранении. Необходимо избежать совместного хранения таких продуктов даже в течение короткого времени. В частности, молочные продукты очень чувствительны к запахам и аромату других продуктов, хранящихся вместе с ними. Картофель выделяет самое большое количество неприятных запахов и его нельзя хранить с фруктами, яйцами, молочными продуктами или орехами.

Состояние продукта при закладке на хранение

Состояние продукта при закладке на хранение является важнейшим фактором, определяющим срок его хранения в охлажденном состоянии. Охлаждение прекращает или замедляет естественные процессы порчи. На хранение необходимо закладывать овощи и фрукты только высокого качества. Поврежденные овощи и фрукты (особенно с повреждением кожуры) в значительной степени теряют свою естественную защиту от воздействия микроорганизмов, в результате чего происходит порча продуктов. Созревание овощей и фруктов продолжается и после уборки урожая. Поэтому их необходимо собирать до наступления полного созревания. Срок хранения полностью созревших, но поврежденных овощей и фруктов чрезвычайно короток даже при оптимальных условиях хранения. Такие продукты следует направлять в торговую сеть для предотвращения избыточных экономических потерь.

Пищевые продукты начинают портиться немедленно после уборки урожая или забоя, и поэтому необходимо принимать незамедлительные меры к их сохранению. Максимальный срок хранения с минимальным ухудшением качества обеспечивается при возможно

более быстрое охлаждение продукта до температуры хранения. Если необходимо перевозить продукты на значительное расстояние до места хранения, то необходимо предварительно их охладить и перевозить холодильным транспортом.

ОХЛАЖДЕНИЕ ПРОДУКТОВ

Процесс охлаждения продуктов состоит в том, что продукт при высокой температуре (обычно это температура продукта при уборке урожая или забое) направляют в остывочную, или камеру предварительного охлаждения, где он должен быть охлажден возможно быстрее до температуры хранения, а затем продукт перемещают из остывочной в холодильную камеру. Обращение с продуктом на стадии охлаждения заметно сокращается на его конечном качестве и сроке хранения.

Рекомендуемые условия в остывочных камерах приведены в таблицах 10-8—10-11. Температура в остывочной камере до поступления теплого продукта должна быть понижена до конечной температуры охлаждения. При загрузке и в начальный период охлаждения разница температур и давлений пара в продукте и воздухе в остывочной камере значительны, и продукт быстро отдает теплоту и влагу. Температура и влажность воздуха в остывочной камере поднимаются в этот период до пикового уровня¹. В конце процесса охлаждения температура в остывочной камере снова понизится до конечной величины. Очень важно, чтобы производительность холодильного оборудования была достаточной для предотвращения избыточного повышения температуры в остывочной камере в пиковый период охлаждения.

Относительная влажность и скорость циркуляции воздуха в остывочных камерах

Требуемый уровень относительной влажности в остывочных камерах зависит от продукта, в частности от того, упакован продукт или нет. Естественно, если продукт охлаждается в паронепроницаемой упаковке, уровень влажности в остывочной не имеет значения. Однако при загрузке и на начальных стадиях

¹ Температуры начала охлаждения, указанные в таблицах, являются средними значениями, и ими необходимо пользоваться при выборе холодильного оборудования. Действительные температуры в остывочной камере в пиковый период охлаждения обычно на 2—3°C выше указанных.

охлаждения влажность будет высокой, если контейнеры с продуктами мокрые, но она вскоре понизится при испарении свободной влаги.

Продукты, охлаждаемые в своем естественном (неупакованном) виде, теряют влагу очень быстро, вследствие чего на начальной стадии в остывающей образуется туман. Подобное явление наблюдается, когда температура продукта и давление пара высокие. В это время желательны быстрое охлаждение и высокая скорость циркуляции воздуха для максимального снижения температуры и давления пара в продукте, чтобы предотвратить избыточную потерю влаги и усушку. Высокая скорость циркулирующего воздуха необходима также для уноса пара и предотвращения конденсации влаги на поверхности продукта.

Высокая скорость циркуляции воздуха увеличивает интенсивность испарения влаги из продукта, однако она значительно ускоряет и интенсивность охлаждения, в результате чего быстрее понижаются температура и давление пара в продукте. Снижение давления пара из-за более высокой интенсивности охлаждения с избытком компенсирует повышение интенсивности испарения вследствие более высокой скорости циркуляции воздуха. Значение более высокой скорости циркуляции воздуха на начальной стадии охлаждения заключается в понижении общей потери влаги из продукта. На конечной стадии охлаждения, когда температура и давление пара продукта уже снижены, высокая скорость циркулирующего воздуха в остывочной камере увеличивает потери влаги из продукта. Поэтому на конечной стадии охлаждения необходимо снизить скорость циркулирующего в остывочной камере воздуха.

Влажность в камере должна быть высокой при охлаждении продуктов, подверженных усушке. Для снижения потерь влаги при охлаждении некоторые исключительно чувствительные продукты, например птицу и рыбу, часто охлаждают в ледяной шуге. По этой же причине яйца иногда погружают в светлое минеральное масло до охлаждения и хранения. Кроме того, птица, рыба и некоторые овощи часто пересыпаются льдом в целях охлаждения и хранения. Когда пересыпанные льдом продукты помещают в холодильную камеру, медленно тающий лед удерживает влагу на поверхности продукта и предотвращает избыточную усушку.

Отдельные овощи и фрукты обрабатывают с помощью гидроохлаждения, которое включает опрошение продукта охлажденной водой или погружение в ванну с перемешиваемой охлажденной водой. Погружение заключается в омывании продукта большим количеством подаваемой самотеком воды, а

орошение производится из расположенных сверху сопел.

Некоторые свежие овощи, в частности овощи, имеющие высокое отношение площади поверхности к объему, предварительно охлаждают посредством быстрого испарения воды с поверхности продукта под вакуумом. Этот процесс называется вакуумным охлаждением. Предварительное охлаждение осуществляется в вакуумном охладителе при понижении давления в нем до такого уровня, при котором соответствующая температура насыщения воды ниже температуры охлаждаемого продукта. При этом происходит испарение воды с поверхности продукта с отводом соответствующей скрытой теплоты. Охлаждение продолжается до требуемой температуры при дальнейшем понижении давления.

Комбинированное охлаждение и хранение

Не рекомендуется использовать одну и ту же камеру для охлаждения и хранения мясных и других подобных продуктов, которые исключительно чувствительны к колебаниям температуры, относительной влажности и скорости циркуляции воздуха. Эти ограничения не относятся, однако, к остывочным камерам для фруктов, например яблок и груш. Опыт показывает, что их можно обрабатывать в комбинированных камерах охлаждения и хранения без вредных последствий для продукта. Это происходит из-за относительно короткого интервала времени закладки продукта, а также незначительного или полного отсутствия колебаний температуры в камере. Исключениями являются также низкотемпературные камеры, в которые продукт поступает при температуре до 7°C.

ЗАМОРАЖИВАНИЕ

Если продукт должен быть сохранен в его первоначальном свежем состоянии в течение относительно длительного времени, то его обычно замораживают и хранят примерно при температуре -18°C или ниже. Обычно замораживают не только продукты, которые сохраняются в свежем состоянии, например фрукты, фруктовые соки, ягоды, мясо, птицу, продукты моря и яйца (без скорлупы), но также многие готовые изделия, например хлеб, булочки, мороженое и целый ассортимент специально приготовленных и готовых к употреблению блюд, включая полные обеды.

На конечное качество и срок хранения замороженного продукта влияют следующие факторы: природа и состав замора-

живаемого продукта; выбор способов обработки и приготовления продукта для замораживания; способ замораживания; условия хранения.

Замораживать можно только высококачественные продукты в хорошем состоянии. При замораживании овощей очень важным является выбор соответствующего сорта. Некоторые сорта непригодны для замораживания, а результатом замораживания других может быть низкое качество или ограниченная стойкость при хранении.

Замораживаемые овощи и фрукты должны быть собраны при полной степени зрелости, обрабатываться и замораживаться сразу, можно быстрее после уборки урожая с тем, чтобы избежать нежелательных химических изменений вследствие ферментной или микробной активности.

Овощи и фрукты требуют значительной обработки до замораживания. После чистки и промывки для удаления с поверхности листьев, грязи и др. овощи бланшируют в горячей воде или паре при 100°C для инaktivации естественных ферментов. Необходимо помнить, что ферменты не разрушаются при низкой температуре, хотя их активность значительно уменьшается и продолжается с низкой интенсивностью при хранении продуктов даже при —18°C и ниже. Следовательно, бланширование, которое разрушает большинство ферментов, значительно увеличивает срок хранения замороженных овощей. Продолжительность бланширования зависит от сорта овощей и колеблется от 1 до 1,5 мин для зеленой фасоли и до 11 мин для кукурузы. Большая часть бактериальной популяции разрушается вместе с ферментами в процессе бланширования, но многие бактерии выживают. Для предотвращения порчи из-за этих жизнеспособных бактерий овощи должны быть охлаждены до 10°C немедленно после бланширования и до упаковки перед загрузкой в морозильный аппарат.

Фрукты, как и овощи, должны быть очищены и промыты для удаления корней, листьев, грязи и снижения микробного загрязнения. Фрукты больше подвержены ферментной порче, чем овощи, однако их нельзя бланшировать, так как это привело бы к ухудшению их свежести, которая столь желательна.

Ферменты, которые являются катализаторами окисления и вызывают быстрое порчиение мякоти, обуславливают небольшие повреждения замороженных фруктов. Для предотвращения окисления замораживаемый фрукт покрывают сахарным сиропом. Иногда для этой цели используют аскорбиновую кислоту, лимонную кислоту или сернистый ангидрид.

Мясные продукты, как правило, не требуют специальной обработки до замораживания.

вания. В связи с увеличивающимся спросом все большее количество специально приготовленного мяса и мясных продуктов в настоящее время замораживают. Это относится также к птице и продуктам моря.

Свинину и рыбу обычно замораживают как можно быстрее после охлаждения из-за относительной нестойкости их жировой ткани. С другой стороны, говядина часто «дозревает» в остьвойчной камере в течение нескольких дней до замораживания, т. е. несколько смягчается под действием ферментов. Если созревание говядины продолжается более 6—7 дней, это сокращает срок ее хранения.

Опыты показывают, что птица, замороженная через 12—24 ч после забоя, более нежна, чем замороженная сразу. Заморозка в замораживании более 24 ч приводит к сокращению срока хранения без заметного увеличения нежности мяса.

Способы замораживания

Пищевые продукты могут быть подвергнуты медленному или быстрому замораживанию. Медленное замораживание осуществляется при загрузке продукта в низкотемпературную камеру без принудительной циркуляции воздуха. Температура в этих камерах поддерживается в диапазоне —18 ÷ —40°C. Циркуляция воздуха осуществляется за счет естественной конвекции, а теплопередача от продукта продолжается от 3 ч до 3 сут в зависимости от количества продукта и условий в камере. В таких камерах замораживают говяжьи и свиные полушки, птицу в ящиках, разделанную и целую рыбу, фрукты в бочках, яйца (белки, желтки или целые) в упаковке по 5 и 15 кг.

Быстрое замораживание осуществляется одним способом или любой комбинацией из трех способов: погружением; контактным замораживанием упакованных продуктов; в интенсивном потоке воздуха.

Замораживание в интенсивном потоке воздуха

При замораживании в интенсивном потоке воздуха используется комбинированный эффект низкой температуры и высокой скорости циркулирующего воздуха для создания теплового потока большой плотности от продукта. Крайне важно, чтобы воздух свободно циркулировал в морозильном аппарате во круг всего продукта.

Агрегатированные скороморозильные аппараты с интенсивным движением воздуха могут быть подвесными или напольными. Примеры типового применения этих аппаратов показаны на рис. 9-1 — 9-3. Заморажива-

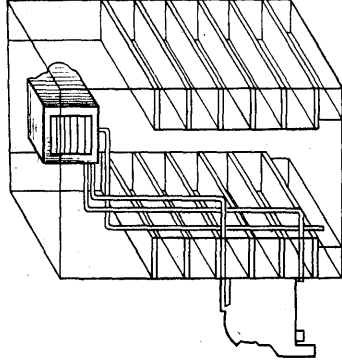


Рис. 9-1. Малая холодильная камера (подвесной скороморозильный аппарат с интенсивным движением воздуха создает высокоскоростной поток воздуха для быстрого замораживания продуктов)

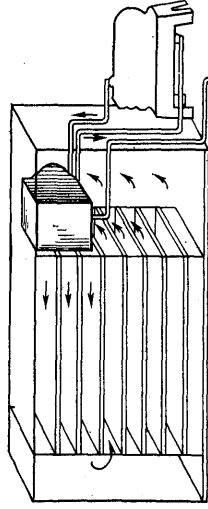


Рис. 9-2. Подвесной скороморозильный аппарат с интенсивным движением воздуха через полки

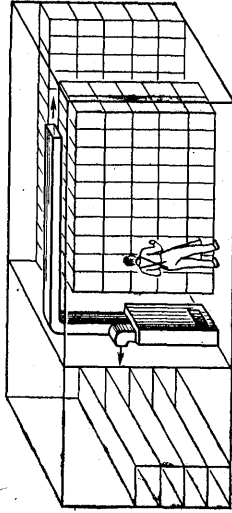


Рис. 9-3. Напольный скороморозильный аппарат с интенсивным движением воздуха (продукты замораживаются в одной камере, а хранятся в другой)

ние в интенсивном потоке воздуха часто осуществляется в изолированных туннелях, в особенности при необходимости замораживания большого количества продуктов (рис. 9-4 и 9-5). В некоторых случаях продукт проходит через морозильный туннель и замораживается на медленно движущихся решетчатых конвейерах. Незамороженный продукт

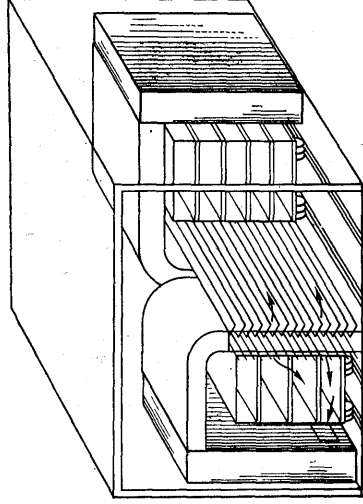


Рис. 9-4. Агрегатированный скороморозильный аппарат с интенсивным движением воздуха используется в морозильных туннелях (поток воздуха при температуре -26°C с высокой скоростью проходит через тележки)

укладывают на конвейер на одном конце туннеля, и он замораживается ко времени выхода с другого конца. Другой способ заключается в укладке продуктов на полочных тележках, где они замораживаются ко времени выхода из туннеля, а затем помещаются в камеру хранения (см. рис. 9-5).

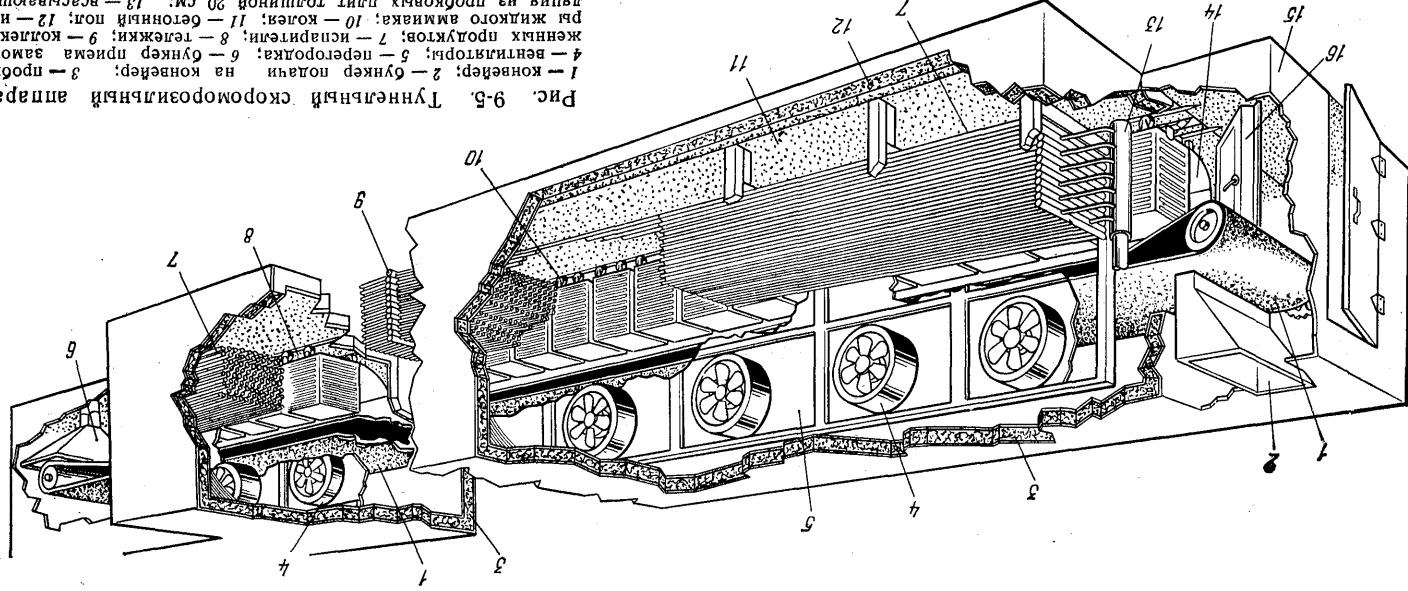
В интенсивном потоке воздуха замораживают почти все продукты, но в особенности этот способ приемлем для замораживания продуктов неодинакового размера и неправильной формы, например птицы.

Контактное замораживание упакованных продуктов

Контактное замораживание обычно осуществляется в плиточных скороморозильных аппаратах с укладкой упакованных продуктов на металлические плиты, через которые циркулирует хладагент (рис. 9-6). Продукт находится в непосредственном тепловом контакте с охлаждаемой плитой, и теплопередача от продукта осуществляется за счет проводимости. Поэтому КПД аппарата зависит в основном от площади поверхности контакта. Этот тип аппарата наиболее эффективен при замораживании небольших партий продуктов.

Плиточный скороморозильный аппарат применяют в больших низкотемпературных холодильниках для замораживания небольших плоских прямоугольных упаковок потребительского размера. Аппарат имеет ряд горизонтальных параллельных охлаждаемых плит. С помощью гидравлических приводов плиты раскрываются, продукт помещается между ними, и затем плиты закрываются под

Рис. 9-5. Туннельный скороморозильный аппарат:
1 — конвейер; 2 — бункер подачи на конвейер; 3 — пробка;
4 — вентилятор; 5 — передодка; 6 — бункер приема заморо-
женных продуктов; 7 — испаритель; 8 — тележки; 9 — коллекто-
ры жидкого аммиака; 10 — колеса; 11 — бетонный пол; 12 — изо-
ляция из прокладок 20 см; 13 — всасывающий;
ного аппарата; 14 — отражатель; 15 — тамбур; 16 — дверь морозиль-



действием любого заданного дав-
ления. Когда плиты закрыты,
упаковки прочно удерживаются
между ними. Упаковки нахо-
дятся в хорошем тепловом кон-
такте с охлаждаемыми плитами,
интенсивность теплопередачи вы-
сокая, и продукт быстро замо-
раживается.

Замораживание погружением

Продукт погружают в низ-
котемпературный водный раствор
хлористого натрия или сахара.
Охлаждающая жидкость явля-
ется хорошим проводником теп-
лоты и находится в непосредст-
венном контакте с продуктом,
в связи с чем теплопередача
осуществляется быстро, и про-
дукт замораживается в очень
короткое время. Другое преиму-
щество замораживания погруже-
нием заключается в том, что
продукт замораживается отдель-
ными единицами и смерзается в
большие блоки.

Основной недостаток замора-
живания погружением состоит
в том, что из продукта выде-
ляется сок под действием осмо-
са, в результате чего рассол
разавляется и становится сла-
бым. При использовании рассола
хлористого натрия может прои-
зойти избыточное проникнове-
ние соли в продукт. При за-

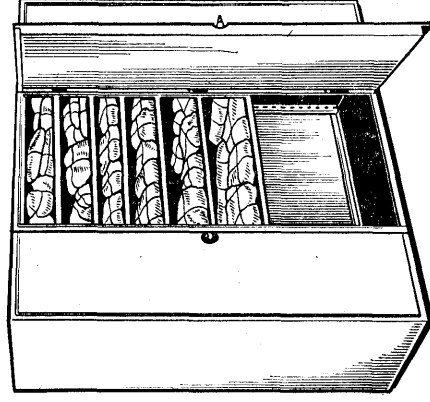


Рис. 9-6. Плиточный скороморозиль-
ный аппарат для замораживания
упакованных продуктов

морозивании фруктов в сахарном растворе проникновение сахара во фрукт является положительным фактором.

Чаще всего способом погружения замораживают рыбу и креветки, в особенности на борту судна, так как морозильный аппарат этого типа занимает очень мало крайне ценной площади на палубе. Кроме того, при замораживании погружением образуется глазурь (тонкий слой льда) на поверхности продукта, что способствует предупреждению усушки неупакованных продуктов в период хранения.

Быстрое и медленное замораживание

Быстрозамороженные продукты почти всегда лучше тех, которые замораживают медленно. Имеются следующие основные преимущества быстрого замораживания по сравнению с медленным:

— образующиеся кристаллы льда значительно меньше величины, в связи с чем повреждение клеток уменьшается;

— длительность замораживания намного сокращается, и поэтому диффузия соли и отделение воды снижаются;

— продукт быстро охлаждается ниже температуры, при которой происходит рост бактерий, плесени и дрожжей, чем предотвращается порча продукта при замораживании.

Основная разница между быстрым и медленным замораживанием заключается в раз- мере, количестве и расположении кристаллов льда, образуемых в продукте при замерзании клеточной жидкости. При медленном замораживании продукта образуются большие кристаллы, которые серьезно повреждают ткань, разрывая клетки. При быстром замораживании в клетках образуются мелкие кристаллы льда, и повреждение последних уменьшается. Продукт со значительным повреждением клеток теряет избыточное количество сока при размораживании, что ухудшает его качество.

Образование кристаллов льда в продукте начинается примерно при -1°C , и большая часть жидкости замерзает при понижении температуры продукта до -4°C , хотя часть концентрированной жидкости не замораживается даже при температуре ниже -45°C . Диапазон температур от -1 до -4°C часто называют зоной максимального кристаллообразования, в связи с чем для сохранения качества продукта желателен быстрый отбор теплоты от него в этом интервале температур. Это в особенности относится к фруктам и овощам, так как в них происходит значительное повреждение ткани при медленном замораживании.

Ткань животного происхождения более грубая и эластичная, чем растительная. Поэтому скорость замораживания не является определяющим фактором при замораживании мяса и мясных продуктов, как это имеет место при замораживании фруктов и овощей. Последние эксперименты показали, что при медленном замораживании повреждение клеток в мясе птицы и рыбы крайне незначительно. Это, конечно, не означает, что быстрозамороженное мясо менее высокого качества, чем медленно замороженное, но с точки зрения повреждения клеток быстрое замораживание не столь важно для мяса, как для фруктов и овощей. Например, птица, замороженная медленно, приобретает темный оттенок, что ухудшает внешний вид. Кроме того, быстрое замораживание во всех случаях уменьшает продолжительность обработки и, следовательно, бактериальную порчу. Это особенно важно при обработке рыбы.

УПАКОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Соответствующая упаковка значительно уменьшает обезвоживание, которое является одним из главных факторов ограничения срока хранения замороженных продуктов. Неупакованные продукты теряют много влаги не только в процессе замораживания, но и в период хранения. При хранении неупакованных замороженных продуктов происходит непрерывная сублимационная передача влаги от продукта воздуху, в результате чего появляется «морозный ожог», и продукт приобретает беловатый оттенок. «Морозный ожог» обычно сопровождается окислением, изменением запаха и снижением содержания витаминов.

За некоторым исключением все продукты упаковывают до закладки на низкотемпературное хранение. Большинство продуктов упаковывают до процесса замораживания, но некоторые, например зеленый горошек и фасоль, — в замороженном виде.

Для защиты от усушки и окисления упаковочный материал должен быть практически на 100% газо- и влагонепроницаемым и плотным, но облегающим продукт, чтобы в упаковке оставалось минимальное количество воздуха. Воздух в упаковке имеет изоляционный эффект, который замедляет скорость замораживания и увеличивает стоимость этого процесса.

Замороженные продукты конкурируют с продуктами, сохранившими другими способами, в связи с чем необходимо учитывать некоторые факторы при выборе упаковочного материала. Если продукт продается непосредственно потребителю, упаковка должна иметь привлекательный вид и быть удобной для стимулирования сбыта. Упаковочный материал должен быть относительно недоро-

гем и эффективным, чтобы снизить расходы на процесс упаковки.

Широко распространенными упаковочными материалами являются алюминиевая фольга, жестяные банки, пропитанные картонные коробки, простые картонные коробки во влагопроницаемой обертке, вощеная бумага, целлофан и другие пластические пленки.

Замороженную рыбу часто покрывают ледяной глазурью (тонким слоем льда), создающей отличную защиту. Ледяная глазурь, однако, очень хрупка, и необходимо осторожно обращаться с такой рыбой. Ледяная глазурь, кроме того, постепенно сублимируется в воздух, и рыбу необходимо повторно глазировать по крайней мере один раз в месяц погружением в свежую воду или путем орошения.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ХРАНЕНИЕ

Поддержание точной температуры при низкотемпературном хранении не является определяющим фактором, если она достаточно низка и постоянна. Для кратковременного хранения обычно достаточно -18°C , но оптимальная температура для длительного хранения оптовых запасов продуктов — это -21°C . При хранении продуктов с нестойким жиром (окисляющимся, со свободными жирными кислотами) температура хранения должна быть -24°C или ниже для обеспечения максимального срока хранения.

При хранении продуктов при температуре выше -29°C , что является нормальным уровнем, температура в камере хранения должна быть постоянной с колебаниями не более $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Значительные колебания в температуре хранения вызывают попеременное размораживание и замораживание продукта, в результате чего увеличиваются размеры кристаллов льда с одновременным повреждением клеток, как при медленном замораживании.

Многие упаковочные материалы не обеспечивают полной защиты от усушки, в связи с чем относительная влажность должна поддерживаться на высоком уровне (85—90%) в низкотемпературных камерах, в особенности при длительном хранении.

Крайне важно также правильно складировать продукты с тем, чтобы обеспечить достаточную циркуляцию воздуха возле продукта. Очень важно сохранить достаточное воздушное пространство между продуктом и стенами камеры хранения, что не только способствует циркуляции воздуха возле продукта, но и исключает возможность поглощения продуктом теплоты непосредственно от теплых стен.

ТОРГОВОЕ ХОЛОДИЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Термин «торговое холодильное оборудование» обычно обозначает небольшое холодильное оборудование заводской готовности, которое используется в магазинах и на рынках, в гостиницах, ресторанах и на предприятиях по обработке, хранению, демонстрации и продаже скоропортящихся продуктов. Этот термин обозначает также иногда большие по размеру, собранные на месте эксплуатация холодильные устройства и камеры, используемые для этих целей.

Ряд холодильных устройств специального назначения не поддается классификации, но торговое холодильное оборудование группируется в три основных типа: холодильные шкафы, малые холодильные камеры, охлаждаемые прилавки и витрины.

Холодильные шкафы

Холодильные шкафы относятся к группе наиболее универсального и широко используемого торгового оборудования. Они применяются в продуктовых магазинах, на мясных рынках, в пекарнях, барах и кафе, ресторанах, цветочных магазинах, гостиницах и т. д. Некоторые виды шкафов используются только для хранения, а другие применяются для хранения и демонстрации продуктов (рис. 9-7). Шкафы для хранения обычно имеют прочные двери, а шкафы для демонстрации продуктов снабжены стеклянными дверями.

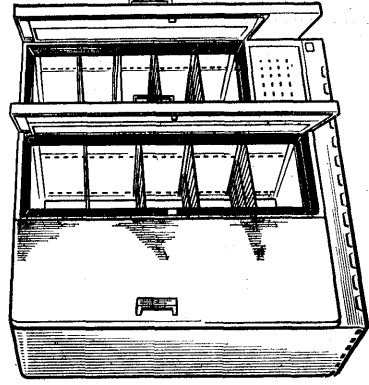


Рис. 9-7. Холодильный шкаф

Малые холодильные камеры

Малые холодильные камеры в основном предназначены для хранения продуктов и выпускаются в большом диапазоне размеров для удовлетворения любых потребностей. Почти все продуктовые магазины, рынки, гостиные, рестораны используют малые холодильные камеры для хранения скоропортящихся продуктов. Некоторые камеры снабжены стеклянными дверями, что особенно удобно для хранения, демонстрации и продажи молочных продуктов, яиц и напитков. Указанные малые холодильные камеры широко используются в продуктовых магазинах, в особенности в таких, в которые можно въехать на автомобиле.

Охлаждаемые прилавки и витрины

Эта группа оборудования предназначена для возможно более привлекательной демонстрации продуктов для стимулирования их продажи. Поэтому основное внимание в конструкции уделяется вопросу демонстрации продукта. Это несовместимо во многих случаях с сохранением оптимальных условий хранения. Срок хранения в прилавке и витрине часто крайне ограничен, т. е. от нескольких часов до недели или несколько больше в зависимости от продукта и типа оборудования.

Это оборудование делится на два типа: витрины самообслуживания и прилавки с продацами для обслуживания покупателей. Витрины самообслуживания находят широкое применение в универсамках и других больших продуктовых магазинах и магазинах самообслуживания, а прилавки используются

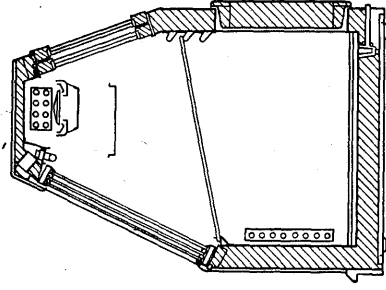


Рис. 9-9. Прилавок-витрина для мясных продуктов.

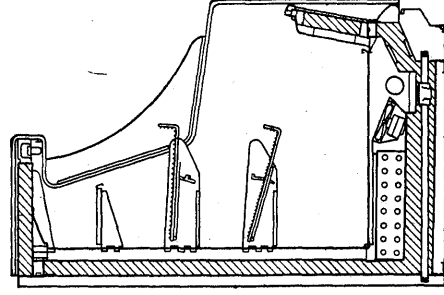


Рис. 9-10. Многоярусная витрина

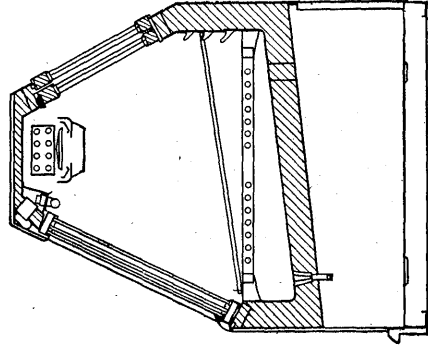


Рис. 9-8. Витрина для мясных продуктов

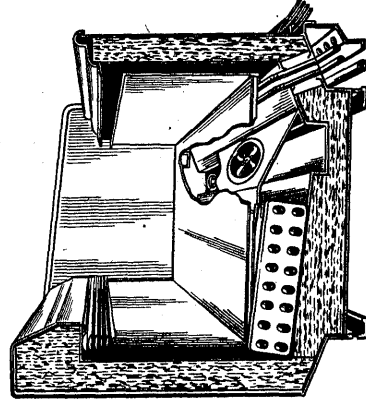


Рис. 9-11. Открытая витрина для продажи замороженных продуктов и замороженного

в небольших продуктовых магазинах, булочных-кондитерских и др. (рис. 9-8 и 9-9).

Этот вид торгового оборудования выпускается открытого и закрытого типов, причем открытый тип получает все большее распространение. С появлением универсамов растет использование открытых витрин самообслуживания, а закрытые витрины становятся устаревшим типом оборудования. Некоторые наиболее распространенные типы открытых витрин самообслуживания показаны на рис. 9-10 и 9-11. Эти витрины используются для демонстрации мяса, овощей, фруктов, замороженных продуктов, мороженого, молочных и деликатесных продуктов. Конструкции этих витрин несколько различаются в зависимости от продуктов. Витрины выпускаются для монтажа у стены или в виде островного оборудования. В некоторых витринах имеется емкость для хранения.

Оборудование специального назначения

Торговое оборудование, рассмотренное в предыдущих разделах, выпускается различной конструкции для отдельных видов продуктов и в зависимости от применения. Выпускается также оборудование специального назначения. В группу наиболее широко используемого оборудования специального назначения входят охладители напитков и молока (последние используются, например, на молочных фермах), охлаждаемые автоматы для продажи молока и напитков, охлаждаемые прилавки для продажи напитков и газированной воды, холодильные шкафы, монтируемые за стойкой в барах, шкафы для цветов, замедлители роста теста, витрины для

кондитерских изделий, холодильные камеры для сохранения трупов.

Выводы

Глубокое знание вопросов применения соответствующего оборудования является условием хорошего конструирования и выбора. В данной главе представлен краткий обзор некоторых возможностей применения машинного холодильного оборудования, причем особое внимание уделялось торговому холодильному оборудованию.

Имеется множество вариантов применения машинного холодильного оборудования, и они слишком разнообразны для того, чтобы можно было рассмотреть их подробно. В этом нет необходимости, и это нежелательно, так как методы конструирования и выбор оборудования практически одинаковы для всех видов применения. Торговое холодильное оборудование рассматривалось здесь потому, что оно применяется широко. Проблемы, возникающие в этой области, характерны и для других типов оборудования. В данной и в следующих главах рассматриваются в основном вопросы, касающиеся торгового холодильного оборудования, однако принципы конструирования и способы выбора могут быть отнесены ко всем случаям применения машинного холодильного оборудования.

В книге не делается попыток рассматривать вопросы кондиционирования воздуха, за исключением очень общих моментов. Необходимо, однако, подчеркнуть, что при использовании торгового холодильного оборудования требуется кондиционирование воздуха для точного регулирования температуры, влажности, движения и чистоты воздуха в охлаждаемом объеме.

Глава 10

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

ТЕПЛОВАЯ НАГРУЗКА

Тепловая нагрузка на холодильное оборудование состоит из нескольких теплопритоков: теплоприток в охлаждаемое пространство из окружающей среды за счет теплопроводности изолированных стен; теплоприток в результате непосредственной радиации через стекло или другие прозрачные материалы; поступление теплого воздуха через откры-

тые двери, щели вокруг окон и дверей; теплота от продуктов, охлаждаемых до требуемой температуры; теплоотдача от людей, находящихся в охлаждаемом пространстве; теплоприток от теплоизлучающего оборудования, установленного в помещении, например от электродвигателей, ламп освещения, электронного оборудования, аппаратов, работающих на паре, кофеварок и пр.

Ниже показано, что не все эти виды

теплоприборов участвуют в каждом рассматриваемом случае и роль конкретного теплоприбора в общей тепловой нагрузке различна.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ

Холодильная установка, работающая в нормальном режиме, включающая частое оттаивание испарителя, должна справляться с тепловой нагрузкой, периодически выходящаяся. В большинстве случаев воздух, циркулирующий через испаритель, охлаждается до температуры ниже точки росы, и влага из воздуха конденсируется на его поверхности. Когда температура поверхности испарителя выше точки заморозания воды, влага, конденсируемая на нем, стекает и отводится из камеры. Однако если температура испарителя ниже точки заморозания воды, то конденсируемая влага замерзает и на его поверхности образуется слой инея. Накапливающийся слой инея изолирует испаритель и снижает его производительность. Поэтому иней необходимо периодически оттаивать, повышая температуру поверхности испарителя выше точки заморозания воды. Температуру поддерживают на этом уровне до полного оттаивания инея и удаления талой воды из камеры.

Для процесса оттаивания независимо от применяемого способа требуется определенное время, в течение которого прекращается охлаждающее действие испарителя¹.

Один из способов оттаивания испарителя заключается в остановке компрессора. При этом испаритель постепенно нагревается до температуры в камере, и эта температура поддерживается до полного оттаивания инея. Теплота для оттаивания поступает из воздуха ох-

лаждаемого пространства. Поэтому оттаивание происходит довольно медленно и требует значительного времени. Опыт показывает, что при этом способе оттаивания максимальная продолжительность работы оборудования в сутки составляет 16 ч, а на процесс оттаивания требуется 8 ч. Следовательно, холодильное оборудование должно иметь такую производительность, чтобы за 16 ч работы вырабатывалось достаточное количество холода.

При поддержании в охлаждаемой камере температуры ниже 1,5°C при остановке оборудования оттаивания полностью не происходит. В случае повышения температуры в камере в нерабочую часть цикла входящие в ней продукты могут испортиться. Поэтому при температуре в камере ниже 1,5°C необходимо дополнительно обогреть испаритель. Обычно поверхность змеевика обгревают искусственно с помощью электрического нагревателя, воды или горячего пара хладагента, поступающего из нагнетательного трубопровода компрессора (см. главу 20).

Процесс оттаивания любым из этих способов протекает значительно быстрее, чем при остановке оборудования. Следовательно, при дополнительном обогреве продолжительность остановки оборудования меньше, а продолжительность работы оборудования может быть более длительной. Установки с дополнительным обогревом при оттаивании характеризуются максимальной продолжительностью работы от 18 до 24 ч в сутки в зависимости от того, как часто требуется оттаивать испаритель в каждом конкретном случае.

Интересно отметить, что при комфортном кондиционировании воздуха температура испарителя обычно около 4,5°C, в связи с чем иней на его поверхности не образуется, и поэтому не требуется останавливать оборудование для оттаивания. По этой причине оборудование для кондиционирования воздуха обычно рассчитано на непрерывную работу.

¹ Исключением является способ оттаивания испарителя непрерывным орошением распылом. В данном случае оборудование может работать постоянно.

Это действительно также и для других случаев применения холодильного оборудования, на охлаждающей поверхности испарителя которого иней не образуется.

Если неудобно рассчитывать тепловую среднечасовую нагрузку за сутки, то нагрузку определяют за час с увеличением полученного результата на соответствующий коэффициент. Например, при желательной продолжительности работы оборудования в сутки 16 ч, тепловую нагрузку умножают на коэффициент 1,5 (24/16). Это увеличивает требуемую производительность оборудования на 50% с тем, чтобы оно могло справиться с 24-часовой тепловой нагрузкой за 16 ч работы. Коэффициенты для других желательных сроков работы можно определить по следующей формуле:

$$Q_0 = (24/\tau) Q, \quad (10-1)$$

где Q_0 — требуемая холодопроизводительность оборудования, кВт; τ — продолжительность работы, ч; Q — общая тепловая нагрузка, кВт.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Для упрощения расчета общую тепловую нагрузку разбивают на ряд отдельных нагрузок в зависимости от количества источников теплоты.

Общая тепловая нагрузка на торговое холодильное оборудование состоит из четырех отдельных нагрузок: теплопритока от окружающей среды, проходящего через стены; тепловой нагрузки от воздухообмена; тепловой нагрузки от продуктов; различных дополнительных тепловых нагрузок.

Теплоприток через стены

Теплоприток через стены — это тепловой поток в охлаждаемую камеру из окружающей среды за счет теплопроводности. В природе не существует абсолютной изоляции, и поэтому, когда температура в помещении ниже, чем температура окружающей среды, всегда имеется

некоторый приток теплоты. Теплоприток через стены характерен для всех случаев применения холода и обычно составляет значительную часть общей тепловой нагрузки. Исключение составляет жидкостное охлаждение, когда наружная поверхность охладителя небольшая, а стенки аппарата хорошо изолированы. В данном случае теплоприток через стенки охладителя настолько мал, относительно общей тепловой нагрузки, что им можно пренебречь. Однако в торговых холодильных камерах и шкафах, а также в установках кондиционирования воздуха в жилых домах теплоприток через стены часто составляет основную часть общей тепловой нагрузки.

Тепловая нагрузка от воздухообмена

Когда открывают дверь охлаждаемой камеры, теплый наружный воздух поступает в нее, замещая более плотный холодный воздух, который выходит через дверь. Теплота, которую необходимо отвести от теплого наружного воздуха для снижения его температуры и влагосодержания до расчетных параметров в охлаждаемом пространстве, составляет часть общей тепловой нагрузки на оборудование.

Величина отношения тепловой нагрузки в результате воздухообмена к общей тепловой нагрузке зависит от конкретных условий. В некоторых случаях тепловая нагрузка от воздухообмена ничтожно мала, а в других составляет значительную часть общей нагрузки. Например, при использовании жидкостных охладителей нет дверей или других неплотностей, через которые может поступать теплый воздух, следовательно, нет и воздухообмена. Совершенно обратное явление наблюдается при кондиционировании воздуха, когда кроме воздухообмена через открытые двери имеется значительный приток воздуха в кондиционируемое пространство через щели вокруг окон и дверей. Кроме того,

при кондиционировании воздуха очень часто наружный воздух специально вводится в кондиционируемое пространство в целях его вентиляции. Если в кондиционируемом пространстве находится большое количество людей, то необходимо подавать большое количество свежего воздуха, и тепловая нагрузка в результате охлаждения и осушения этого воздуха до расчетных параметров в помещении часто составляет значительную часть общей тепловой нагрузки.

При кондиционировании воздуха тепловая нагрузка от воздухообмена является тепловой нагрузкой от вентиляции или тепловой нагрузкой от инфильтрации. Термин «тепловая нагрузка от вентиляции» используют в том случае, когда воздухообмен в помещении — это результат намеренной подачи наружного воздуха в целях вентиляции. Термин «тепловая нагрузка от инфильтрации» применяют, когда воздухообмен — это результат естественной инфильтрации воздуха в помещение через щели вокруг дверей и другие неплотности. В каждом случае кондиционирования воздуха имеется тепловая нагрузка от инфильтрации или от вентиляции, но редко они имеют место одновременно.

Двери в торговом оборудовании снабжены прокладками и хорошо уплотнены, вследствие чего приток воздуха, если он имеется, крайне незначителен. Следовательно, в торговом оборудовании воздухообмен ограничивается тем, что воздух поступает в охлаждаемый объем при открывании и закрывании дверей.

Невозможно переоценить необходимость сведения к минимуму или полного исключения притока наружного воздуха в холодильные и низкотемпературные камеры через щели вокруг дверей и другие неплотности. Приток наружного воздуха может по-разному влиять на величину тепловой нагрузки. Однако водяной пар, который конденсируется из теплого воздуха в щелях, часто замерзает в них, может вызвать повреждения оборудования.

По периметру двери прокладывают нагревательный элемент, который предотвращает конденсацию влаги на этих поверхностях, поддерживая их температуру выше точки росы поступающего теплого воздуха. Кроме того, важно наличие небольшого обогреваемого отверстия для уравнивания давления воздуха внутри и снаружи холодильной или низкотемпературной камеры. Без такого регулируемого уравнивания в холодильной или низкотемпературной камере может возникнуть пониженное давление, когда температура теплого воздуха, поступающего в камеру при открывании и закрывании дверей, снижается до расчетной величины. Естественно, что разность давлений воздуха внутри и снаружи камеры значительно увеличивает вероятность притока теплого воздуха через уплотнения дверей и через другие отверстия в ограждениях, например в местах прохода трубопроводов хладагента и слива талой воды, электропроводки.

Тепловая нагрузка от продуктов

Данная нагрузка создается тепловой, которая отводится от продуктов для понижения их температуры до заданной. Под термином «продукт» понимается любой материал, температура которого понижается с помощью холодильного оборудования, и включает не только скоропортящиеся пищевые продукты, но и бетонную массу, резину, жидкости всех видов. В некоторых случаях продукт замораживается и отводимая скрытая теплота является частью тепловой нагрузки от продуктов.

Иногда продукты поступают в камеру при температуре ниже их нормальной температуры хранения. Например, в процессе закладки мороженое часто охлаждают до -18°C или -23°C , а хранят при -12°C , что является идеальной температурой для глазирования. Когда такой продукт поступает на хранение при температуре ниже температуры в камере хранения, он поглощает

теплоту из воздуха в камере и нагревается до температуры хранения, создавая некоторое охлаждающее действие. Другими словами, он образует так называемую отрицательную тепловую нагрузку, которую теоретически можно вычесть из общей тепловой нагрузки. Этого, однако, никогда не делают, так как охлаждающее действие незначительно и непродолжительно.

Тепловая нагрузка на холодильное оборудование вследствие охлаждения продукта может быть периодической или постоянной в зависимости от конкретных условий. Нагрузка от продуктов является частью общей тепловой нагрузки только тогда, когда температура продуктов понижается до температуры хранения или когда они замораживаются. В том случае, если продукты охлаждены до температуры хранения, они перестают быть источником теплоты, и тепловую нагрузку от продуктов в общей нагрузке на оборудование не учитывают. Исключение составляют фрукты и овощи, которые в процессе хранения при температуре выше температуры замораживания отдают теплоту дыхания¹.

Существует, конечно, ряд случаев, когда охлаждение продукта — это более или менее постоянный процесс, а тепловая нагрузка от продукта — это постоянная нагрузка на оборудование. Подобное явление имеет место, например, в остывочных камерах, предназначенных для охлаждения теплого продукта до температуры хранения². Продукт, охлажденный до температуры хранения, из остывочной камеры перевозится в холодильную, а остывочную камеру снова загружают теплым про-

дуктом. В таких случаях тепловая нагрузка от продукта непрерывна и обычно составляет значительную часть общей тепловой нагрузки на оборудование.

Охлаждение жидкости — это другой случай постоянной нагрузки на холодильное оборудование. Охлаждаемая жидкость проходит через охладитель непрерывно. В данном случае тепловая нагрузка от продукта является практически единственной нагрузкой на оборудование, так как нагрузки от воздухообмена и теплоприток через стены и другие дополнительные нагрузки не имеют места.

При кондиционировании воздуха не существует тепловой нагрузки от продуктов, но имеется некоторая нагрузка, которая при понижении температуры исчезает, когда достигаются устойчивые расчетные условия.

Различные тепловые нагрузки

Тепловые нагрузки, иногда называемые дополнительными нагрузками, образуются за счет различных источников теплоты. Главным источником такой теплоты являются люди, работающие или находящиеся в охлаждаемом пространстве, а также освещение и другое электрооборудование, функционирующее в этом помещении.

В торговом холодильном оборудовании эти нагрузки относительно малы. Их источником являются только освещение и электродвигатели вентиляторов.

При кондиционировании воздуха таких нагрузок нет вообще. Однако нельзя утверждать, что тепловая нагрузка от пребывания людей и работы оборудования в данном случае не составляет части общей тепловой нагрузки. Наоборот, люди и оборудование создают такую большую часть тепловой нагрузки на оборудование для кондиционирования воздуха, что часто рассматриваются как отдельные нагрузки и соответствующим образом рассчитываются. Напротив, при кондиционировании воздуха

¹ При проектировании холодильных камер для кратковременного хранения общепринято предусматривать понижение температуры продукта на 5°C.

² В отдельных случаях в остывочной камере продукт не охлаждается до конечной температуры хранения, а некоторое дополнительное охлаждение осуществляется в холодильной камере хранения.

в помещении, где находятся большое количество людей (театры, рестораны и пр.), тепловая нагрузка от пребывания людей составляет основную часть общей тепловой нагрузки. Кроме того, многие системы кондиционирования воздуха монтируются с единственной целью отвода теплоты от электрического, электронного и других типов тепловыделяющего оборудования. В этих случаях теплота от работающего оборудования является основной частью тепловой нагрузки.

Факторы, определяющие теплоприток через стены

Количество теплоты, передаваемой через стены охлаждаемого пространства в единицу времени, является функцией трех факторов, соотношение которых выражается следующим уравнением:

$$Q = Fk\Delta T, \quad (10-2)$$

где Q — интенсивность теплопередачи, Вт; F — площадь наружной поверхности стены, м^2 ; k — коэффициент теплопередачи $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$; ΔT — разность температур по обе стороны стены, К .

Коэффициент теплопередачи — это количество теплоты, проходящей через 1 м^2 площади поверхности стены от воздуха с одной стороны стены к воздуху на другой стороне при разности температур по обе стороны стены 1 К . Величина коэффициента теплопередачи зависит от толщины стены и материала, из которого она сделана. Материал должен обладать хорошими теплоизолирующими свойствами (теплопроводность минимальна), так как теплоприток в охлаждаемое пространство и тепловая нагрузка на холодильное оборудование должны быть наименьшими.

Пример 10-1. Определить интенсивность теплового потока через стену размером $3 \text{ м} \times 6 \text{ м}$, если коэффициент теплопередачи стены равен $0,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура с одной стороны стены равна 4°С , а с другой составляет 35°С .

Решение.

Общая площадь стены $F = 3 \times 6 = 18 \text{ м}^2$. Разность температур по обе стороны стены $\Delta T = 35^\circ\text{С} - 4^\circ\text{С} = 31^\circ\text{С}$.

Применяя уравнение (10-2), находим величину теплопритока через стену

$$Q = 18 \text{ м}^2 \times 0,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \cdot 31 \text{ К} = 206 \text{ Вт} = 0,206 \text{ кВт}.$$

Определение коэффициента теплопередачи

При необходимости коэффициент теплопередачи можно рассчитать для любой стены, если известна теплопроводность каждого из видов материала, использованного в строительстве. Теплопроводность некоторых наиболее часто используемых при строительстве стен холодильников материалов приведена в табл. 10-1.

Теплопроводность материала λ — это количество теплоты, проходящей через 1 м^2 поперечного сечения материала толщиной 1 м при разности температур 1 К по обе стороны материала. Единица измерения теплопроводности $1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Пример 10-2. Определить теплопроводность слоя пенополиуретана толщиной 125 мм .

Решение.

По табл. 10-1 находим, что теплопроводность пенополиуретана равна $0,025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Интенсивность теплопередачи через ограждение из неоднородных материалов, например через строительный бетонный блок (рис. 10-1), неодинакова в разных его частях. Поэтому теплопроводность ограждения из неоднородных ма-

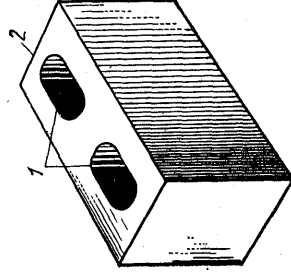


Рис. 10-1. Строительный блок:
1 — воздушная полость; 2 — бетон

Теплотехнические характеристики материалов стен холодильников

Ограждение	Материал	Теплопроводность λ , $Вт/(м \cdot К)$	Коэффициент теплопередачи k , $Вт/(м^2 \cdot К)$
Кладка	Обычный кирпич	0,72	
	Облицовочный кирпич	1,3	
	Гипсобетон	0,72	
	Шлакобетон	1,73	
	Бетонные блоки толщиной		
	100 мм с песчаным заполнителем		7,95
	200 мм с песчаным заполнителем		5,11
	300 мм с песчаным заполнителем		4,43
	100 мм со шлаковым заполнителем		5,11
	200 мм со шлаковым заполнителем		3,29
Деревянные панели	300 мм со шлаковым заполнителем		3,01
	Алебастр толщиной 13 мм		17,72
	Пустотелый кирпич толщиной		
	100 мм		5,11
	150 мм		3,75
	200 мм		3,07
	Клен, дуб, другая древесина твердых пород	0,16	
	Пихта, сосна, древесина других хвойных пород	0,12	
	Фанера толщиной 13 мм		9,09
	Фанера толщиной 19 мм		6,08
Кровля	Рулонный кровельный толь		36,91
Изоляция	Готовая кровля толщиной 9 мм		17,03
	Минеральная вата, стекловолокно	0,039	
	Плиточный материал		
	пеностекло	0,058	
	пробка	0,043	
	стекловолокно	0,036	
	пенополиуретан (гладкий)	0,029	
	пенополиуретан (ячеистый)	0,036	
	пенополиуретан	0,025	
	Засыпной материал		
Воздушная прослойка	резная бумага или древесная масса	0,039	
	древесные опилки или стружка	0,065	
	минеральные вата, шерсть, шлак	0,039	
	кора красного дерева	0,037	
	древесное волокно из древесины хвойных пород	0,043	
	Неподвижная		9,37
	Подвижная		
	скорость движения 3,35 м/с		22,70
	скорость движения 6,7 м/с		34,10
	Однослойное		6,42
Остекление	Двухслойное		2,61
	Четырехслойное		1,65
			1,19

териалов определяется экспериментальным путем. щее термическое сопротивление стены можно выразить как величину, обратную коэффициенту теплопередачи, а термическое сопротивление каждого материала — как величину, обратную его

Сопроотивление стены или материала ную пропорционально обратному отношению теплопередачи к коэффициенту теплопередачи, а термическое сопротивление каждого материала — как величину, обратную его

теплопроводности, т. е. общее термическое сопротивление стены $R = 1/k$, а термическое сопротивление отдельного материала равно $1/\alpha$ или δ/λ . Значение $1/\alpha$ характеризует сопротивление тепловому потоку только через материал и не учитывает термического сопротивления тонкого слоя воздуха открытой поверхности материала. Необходимо принимать во внимание сопротивление воздуха на обеих сторонах стены при определении общего термического сопротивления потоку теплоты. В табл. 10-1 приведены коэффициенты теплопередачи слоя воздуха на поверхности стены при средней скорости ветра.

Если стена состоит из нескольких слоев различных материалов, то общее термическое сопротивление равно сумме термических сопротивлений этих материалов, включая сопротивление слоя воздуха, т. е.

$$R = 1/k = 1/\alpha_n + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n + 1/\alpha_{вн} \quad (10-3)$$

Поэтому коэффициент теплопередачи равен

$$k = 1/(1/\alpha_n + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n + 1/\alpha_{вн}), \quad (10-4)$$

где α_n — коэффициент теплопередачи с внешней поверхности стены, пола или потолка; $\alpha_{вн}$ — коэффициент теплопередачи с внутренней поверхности стены, пола или потолка.

Пример 10-3. Понимая, что скорость ветра равна 3,35 м/с, вычислить коэффициент

теплопередачи стены, состоящей из блоков песчаника толщиной 200 мм, слоя теплоизоляции из пенополиуретана толщиной 75 мм в отделанной изнутри цементной штукатуркой толщиной 13 мм.

Решение. По табл. 10-1 находим для блока песчаника толщиной 200 мм $\lambda = 5,11$ Вт/(м·К);

пенополиуретана $\lambda = 0,025$ Вт/(м·К); цементной штукатурки $\lambda = 0,72$ Вт/(м·К); коэффициент теплопередачи с внутренней поверхности стены $\alpha_{вн} = 9,37$ Вт/(м²·К); коэффициент теплопередачи с наружной поверхности стены $\alpha_n = 22,7$ Вт/(м²·К).

Применяя уравнение (10-4), рассчитываем общее термическое сопротивление стены

$$R = 1/k = 1/22,7 + 1/5,11 + 0,075/0,025 + 0,013/0,72 + 1/9,37 = 0,044 + 0,196 + 3,0 + 0,018 + 0,107 = 3,37 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}.$$

Поэтому $k = 1/3,37 = 0,297$ Вт/(м²·К).

В большинстве случаев теплоизоляционный материал, используемый в конструкции стены холодильника, обуславливает величину ее коэффициента теплопередачи. Коэффициент теплопередачи и теплопроводность других материалов в конструкции стены незначительно влияют на величину коэффициента теплопередачи стены, т. е. термическое сопротивление изоляционного материала значительно больше термического сопротивления слоя воздуха и строительных материалов. Поэтому при расчете коэффициента теплопередачи ограждений небольших холодильных камер достаточно использовать теплопроводность изоляционного материала.

Т а б л и ц а 10-2

Коэффициент теплопередачи стен, потолка и пола холодильника, Вт/(м²·К)

Толщина теплоизоляции, мм	Теплопроводность изоляции, Вт/(м·К)						
	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055
25	0,732	0,834	0,931	1,013	1,091	1,163	1,229
50	0,42	0,489	0,556	0,617	0,675	0,731	0,784
75	0,295	0,346	0,397	0,443	0,489	0,533	0,576
100	0,227	0,267	0,308	0,346	0,383	0,420	0,455
125	0,182	0,218	0,252	0,283	0,315	0,346	0,376
150	0,153	0,184	0,213	0,240	0,267	0,294	0,326
175	0,136	0,159	0,185	0,208	0,232	0,256	0,279
200	0,119	0,14	0,163	0,184	0,206	0,227	0,247

Коэффициенты теплопередачи определены для различных конструкций стен и для удобства сведены в таблицу (табл. 10-2).

Пример 10-4. Определить из табл. 10-2 коэффициент теплопередачи стены из пустотелого кирпича толщиной 150 мм с изоляцией из пробковых плит толщиной 150 мм. Решение. В табл. 10-1 находим, что теплопроводность пробковой плиты равна $0,043 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. В табл. 10-2 в колонке на левой стороне находим толщину изоляции 150 мм. Перемещаясь вниз по колонке соответствующего коэффициента теплопроводности 0,045 мм, находим коэффициент теплопередачи, который равен $0,267 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Использование теплоизоляционных показателей стен и материалов, указанных в табл. 10-1 и 10-2, зависит от их устройства и качества изготовления. Например, многие изоляционные материалы пропускаемы для водяного пара, и если не имеется соответствующей пароизоляции на теплой стороне изоляционного материала, то вследствие более высокого давления пара с более теплой стороны ограждения будет наблюдаться миграция водяного пара через изоляцию в сторону более низкого давления пара на более холодной стороне. В результате миграции температура пара станет ниже

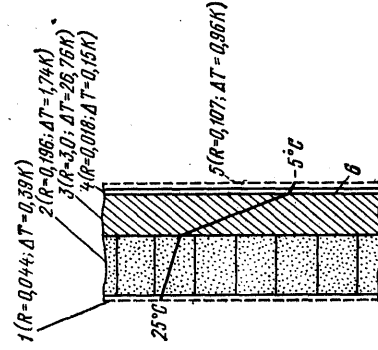


Рис. 10-2. Стена холодильника (см. пример 10-4);

1 — наружный слой воздуха; 2 — бетонный блок толщиной 200 мм; 3 — слой пенополиуретана толщиной 75 мм; 4 — слой бетонной штукатурки толщиной 13 мм; 5 — внутренний слой воздуха; 6 — пароизоляционный слой на теплой стороне изоляции

температуры насыщения, соответствующей давлению, вызывая конденсацию пара в изоляции, которая постепенно насыщается водой. Кроме того, если температура изоляции ниже точки замерзания воды, то сконденсировавшийся пар превращается в лед. В любом случае вода и лед являются хорошими проводниками теплоты, и свойства изоляционного материала полностью утрачиваются.

Градиент температуры стены холодильника показан на рис. 10-2. Обратите внимание, что разность температур по обе стороны каждого из элементов стены пропорциональна термическому сопротивлению данного элемента, а общая разность температур (градиент) по обе стороны стены — это сумма разности температур по обе стороны каждого из элементов стены.

Разность температур по обе стороны стены холодильной камеры

Расчетная разность температур по обе стороны стены холодильной камеры обычно принимается равной разности внутренней и наружной расчетных температур. Внутренняя расчетная температура — это температура, которая поддерживается в охлаждаемом пространстве и зависит в основном от вида продукта и продолжительности его хранения. Рекомендуемые температуры хранения различных продуктов даны в табл. 10-7—10-10.

Наружная расчетная температура зависит от места расположения холодильной камеры. Для стен холодильной камеры, находящейся в здании, наружная расчетная температура принимается равной температуре внутри здания. Когда стены холодильной камеры являются наружными, в качестве наружной расчетной температуры принимается температура для данного географического района, где расположено здание.