



Температура, тепловое расширение и закон идеального газа

В этой главе и следующих трех главах мы будем изучать тесно связанные между собой понятия температуры и теплоты, а также основы термодинамики и кинетической (атомной) теории. Во многих случаях мы будем рассматривать конкретную систему, которая представляет собой некоторое тело или некоторую группу тел; все остальное вокруг этой системы называется окружающей средой. Чтобы описать *состояние* (или условие существования) конкретной системы, например газа в сосуде, мы можем использовать либо микроскопическую, либо макроскопическую точку зрения. **Микроскопическое** описание – это когда мы рассматриваем детали движения всех атомов или молекул, образующих систему, и такое описание может быть очень сложным; это удел кинетической теории (и статистической механики), которую мы обсудим главным образом в следующей главе. **Макроскопическое** же описание дается через величины, в той или иной степени измеряемые непосредственно нашими органами чувств; к ним относятся объем, масса, давление и температура. Изучением процессов с помощью макроскопических величин занимается **термодинамика**. Число макроскопических переменных, необходимое для определения состояния системы в любой момент времени, зависит от вида системы. Например, чтобы описать состояние чистого газа в сосуде, нам потребуются всего лишь три переменные, которыми могут быть объем, давление и температура; такого рода величины, которые можно использовать для описания состояния системы, называются *параметрами состояния*.

В настоящей главе мы уделим основное внимание понятию температуры. Однако сначала обсудим кратко теорию, согласно которой вещество состоит из атомов, совершающих непрерывное хаотическое движение. Эта теория называется *кинетической теорией* («кинетический», как вы помните, происходит от греческого слова «движущийся»). Более детально эту теорию мы рассмотрим в гл. 18.

17.1. Атомы

Представление о том, что вещество состоит из атомов, принадлежит древним грекам. Согласно древнегреческому философу Демокриту, если данное вещество, скажем кусок железа, делить на все более мелкие части, то когда-нибудь мы получим мельчайшую частицу вещества, которую разделить уже будет невозможно. Эта мельчайшая частица была названа атомом, что происходит от греческого слова «атомос», т. е. «неделимый»¹⁾. Альтернативой атомной теории вещества является представление о том, что вещество можно непрерывно делить на сколь угодно мелкие части и этот процесс бесконечен.

В наше время все ученые признают атомную теорию. Однако экспериментальные подтверждения справедливости этой теории появились лишь в восемнадцатом и девятнадцатом столетиях, причем большинство подтверждений было получено из анализа химических реакций. Важнейшим элементом доказательства был закон постоянства состава веществ, который представлял собой обобщение экспериментальных результатов, собранных за полвека к началу 1800 г. Согласно этому закону, если два или более элементов образуют соединение, то они всегда входят в соединение в одинаковых весовых пропорциях. Например, поваренная соль всегда состоит из 23 долей натрия и 35 долей хлора, а вода образуется из одной доли водорода и восьми долей кислорода. Теория непрерывной делимости вещества с трудом согласовывалась с законом постоянства состава, а атомная теория, на что указал Джон Дальтон (1766–1844), вполне была способна объяснить этот закон: соотношение весов каждого элемента, необходимое для образования соединения, соответствовало относительным весам соединяющихся атомов. Например, один атом натрия (Na) может соединяться с одним атомом хлора (Cl) и образовывать одну молекулу поваренной соли (NaCl), и в то же время вес одного атома натрия составляет 23/35 веса атома хлора. Измеряя относительные количества каждого элемента, необходимые для получения большого числа соединений, экспериментаторы установили относительные веса атомов. Самому легкому атому – водороду – был произвольно приписан относительный вес, равный единице; в этой

¹⁾ В настоящее время, разумеется, атом уже не считается неделимым. Он состоит из ядра (содержащего протоны и нейтроны) и электронов (гл. 40–43, т. 2 настоящей книги).

шкале вес атома углерода близок к 12, кислорода – к 16, натрия – к 23 и т. д.¹⁾

В настоящее время принято говорить не об относительных весах, а об относительных массах атомов и молекул, которые мы называем **атомной массой** и **молекулярной массой** соответственно²⁾. Эти величины устанавливаются так, что обычному атому углерода C^{12} приписывается значение 12,0000 атомных единиц массы (а. е. м.). Тогда атомная масса водорода равна 1,0078 а. е. м., а значения для других атомов приведены в приложении Г.

Другим важнейшим экспериментальным подтверждением атомной теории служит так называемое *броуновское движение*, названное в честь биолога Роберта Броуна, который совершил свое открытие в 1827 г. Наблюдая в микроскоп за мельчайшими частицами пыльцы растений, взвешенными в воде, Броун заметил, что мелкие частицы перемещаются по извилистым траекториям, хотя окружающая их вода совершенно неподвижна. Атомная теория легко объясняет броуновское движение; для этого достаточно сделать еще одно логичное предположение о том, что атомы вещества находятся в состоянии непрерывного движения. Тогда становится ясно, что мельчайшие частицы пыльцы Броуна беспорядочно движутся под влиянием энергичного «обстрела» со стороны быстро движущихся молекул воды.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн исследовал³⁾ броуновское движение с теоретической точки зрения и смог на основе экспериментальных данных вычислить приблизительные размеры и массы атомов и молекул. Эти расчеты показали, что диаметр типичного атома равен приблизительно 10^{-10} м.

В начале гл. 12 мы установили различия между тремя обычными состояниями вещества – твердым, жидким и газообразным – на основании его *макроскопических*, или «крупномасштабных», свойств. Теперь рассмотрим, чем

¹⁾ Однако все обстоит не так просто. Например, исходя из различных соединений, образуемых кислородом, решено было, что его масса равна 16; но это не согласовывалось с отношением масс кислорода и водорода в воде (всего лишь 8 к 1). Эта трудность была разрешена, когда предположили, что для образования молекулы воды два атома Н должны соединиться с одним атомом О. Для того чтобы создать непротиворечивую схему, пришлось признать, что и многие другие молекулы содержат более одного атома данного сорта.

²⁾ Для обозначения этих величин иногда по-прежнему применяют термины *атомный вес* и *молекулярный вес*, однако правильно говорить следует о сравнении не весов, а масс.

³⁾ Возможно, что Эйнштейн не был знаком с работой Броуна, и поэтому исходя из теоретических представлений независимо предсказал существование броуновского движения.

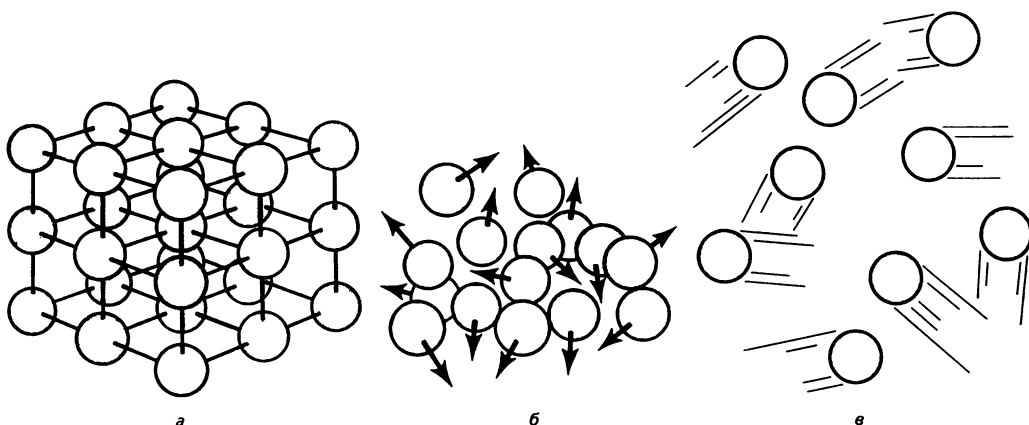


Рис. 17.1. Расположение атомов в кристаллическом твердом теле (а), жидкости (б) и газе (в).

эти три состояния вещества отличаются друг от друга с атомной, или микроскопической, точки зрения. Ясно, что атомы и молекулы притягиваются друг к другу. Иначе, каким же образом кусок алюминия мог бы сохраняться в виде монолитного куска? Эти силы (притяжения молекул) имеют электрическую природу (подробнее об этом мы расскажем в следующих главах). Однако если молекулы слишком близко подходят друг к другу, то сила их взаимодействия становится силой отталкивания, обусловленной отталкиванием их внешних атомных электронов. Таким образом, молекулы размещаются на некотором минимальном расстоянии друг от друга. В твердом веществе силы притяжения достаточно велики, так что атомы и молекулы удерживаются в более или менее фиксированных положениях, обычно в виде структуры, известной как кристаллическая решетка (рис. 17.1, а). Атомы и молекулы твердого тела находятся в движении – они колеблются около своих, почти фиксированных положений в кристаллической решетке. В жидкости атомы и молекулы движутся быстрее, т. е. силы взаимодействия между ними слабее, так что в жидкости эти частицы достаточно свободны и могут двигаться одна вокруг другой, как показано на рис. 17.1, б. В газе силы взаимодействия молекул и атомов столь слабы, а их скорости столь велики, что молекулы вообще не задерживаются близко друг от друга. Они быстро движутся, каждая по своей траектории (рис. 17.1, в), заполняя объем любого сосуда и иногда сталкиваясь друг с другом. Средние скорости молекул в газе настолько велики, что, когда молекулы сталкиваются, сила притяжения между ними оказывается недостаточно большой для того, чтобы удержать их вместе, и они разлетаются в направлениях, отличных от тех, которые они имели до столкновений.

17.2. Температура; термометры и температурные шкалы

В повседневной жизни с температурой мы связываем представление о горячем и холодном. О горячей печи говорят, что она имеет высокую температуру, в то время как холодный кусок льда имеет низкую температуру.

Многие свойства вещества изменяются в зависимости от температуры. Например, большинство материалов при нагревании расширяется. Нагретая железная балка длиннее холодной; при изменении температуры бетонные дороги и тротуары немного расширяются или сокращаются, и поэтому в них через правильные промежутки помещают упругие прокладки. С изменением температуры меняется электрическое сопротивление проводника (гл. 26, т. 2 настоящей книги). Изменяется также цвет тел, по крайней мере при высоких температурах; вы могли заметить, например, что нагревательный элемент электрической печи светится красным цветом, если он нагрет. При более высоких температурах твердые тела (например, железо) светятся оранжевым и даже белым. Белый свет от обычной лампочки накаливания излучается сильно раскаленным вольфрамовым проводником.

Прибор, предназначенный для измерения температуры, называется **термометром**. Имеется множество типов термометров, однако действие всех термометров основывается на одном и том же принципе, состоящем в том, что свойства вещества меняются при изменении температуры. Действие наиболее распространенных термометров основывается на расширении вещества с ростом температуры. В первом термометре, изобретенном Галилеем, использовалось расширение газа. В настоящее время широко распространены термометры, которые состоят из полой стеклянной трубки, заполненной ртутью или спиртом с добавленным в них красителем. При росте температуры жидкость расширяется сильнее, чем стекло; поэтому уровень жидкости в трубке повышается. Хотя металлы также расширяются при нагревании, изменение длины металлических предметов (например, железного стержня) обычно слишком мало для того, чтобы точно измерять обычные изменения температуры. Однако можно изготовить удобный в обращении термометр, соединив вместе два различных металла, которые с ростом температуры расширяются по-разному. Когда температура повышается, различная степень расширения этих металлов приводит к тому, что такая биметаллическая пластинка искривляется. Часто используется биметаллическая пластинка в виде спирали, один конец которой жестко закреплен, а другой присоединен к самописцу. Термометры такого типа используются обычно для измерения температуры воздуха в печах, а также в автомобилях в роли автоматической заслонки.

Чтобы измерить температуру количественно, необхо-

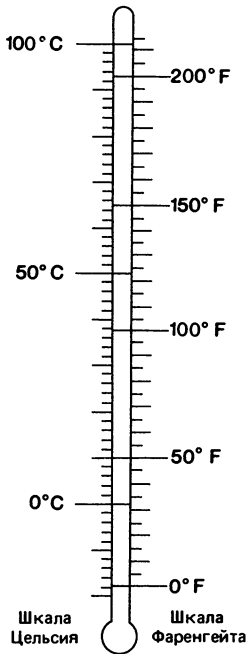


Рис. 17.2. Сравнение шкал Цельсия и Фаренгейта.

димо определить ту или иную числовую шкалу. В настоящее время наиболее употребительной является шкала *Цельсия*, иногда называется *стоградусной* шкалой. В США широко используется также шкала *Фаренгейта*. Основной шкалой, применяемой в физике, является абсолютная шкала, или шкала Кельвина (мы рассмотрим ее в разд. 17.7).

Один из способов создания температурной шкалы состоит в том, чтобы приписать произвольные значения двум легко воспроизводимым температурам. Как для шкалы Цельсия, так и для шкалы Фаренгейта этими фиксированными точками являются точка замерзания и точка кипения¹⁾ воды при атмосферном давлении. На шкале Цельсия точка замерзания воды выбрана равной 0°C («нуль градусов Цельсия»), а точка кипения 100°C . На шкале Фаренгейта точка замерзания равна 32°F , а точка кипения 212°F . Для практических целей термометр калибруют, помещая его в тщательно подготовленную окружающую среду, имеющую одну из этих температур, и отмечая положение столбика ртути или указателя в виде стрелки. На шкале Цельсия расстояние между обеими отметками делят затем на 100 равных интервалов, разделенных небольшими метками, соответствующими градусам Цельсия между 0 и 100°C (поэтому название «стоградусная шкала» означает «сто шагов»). На шкале Фаренгейта эти точки соответствуют 32 и 212°F , а расстояние между ними делится на 180 равных интервалов. Для температур, лежащих ниже точки замерзания и выше точки кипения воды, шкалы могут быть продолжены в ту или другую сторону с использованием тех же расположенных через равные промежутки интервалов. Однако обычные термометры можно применять только в ограниченном диапазоне температур из-за присущих им собственных ограничений; например, ртуть в стеклянном термометре становится твердой в некоторой точке (-39°C), ниже которой ртутный термометр применять бесполезно. Он также будет бесполезен при температурах, при которых жидкость испаряется (для ртути это 357°C). Чтобы можно было измерять очень низкие и очень высокие температуры, требуются специальные термометры; некоторые из них мы упомянем ниже.

¹⁾ Точнее говоря, точка замерзания вещества определяется как такая температура, при которой твердая и жидкая фазы находятся в равновесии, т.е. без перехода жидкости в твердое состояние или наоборот. Экспериментально установлено, что при данном давлении такое состояние достигается лишь при одной определенной температуре. Аналогично точка кипения определяется как температура, при которой жидкость и газ находятся в состоянии равновесия. Поскольку эти температуры с изменением давления меняются, необходимо также зафиксировать и давление (обычно оно выбирается равным 1 атм).

Каждой температуре на шкале Цельсия соответствует определенная температура на шкале Фаренгейта (рис. 17.2). Нетрудно перейти от температуры на одной шкале к температуре на другой, если вспомнить, что 0°C соответствуют 32°F , а также то, что 100 градусов по шкале Цельсия соответствуют 180 градусам по шкале Фаренгейта. Таким образом, один градус Фаренгейта (1°F) соответствует $100/180 = 5/9$ градуса Цельсия. Получается, что $1^{\circ}\text{F} = (5/9)^{\circ}\text{C}$.

Пример 17.1. Нормальная температура тела человека равна $98,6^{\circ}\text{F}$. Чему равна эта температура по шкале Цельсия?

Решение. Заметим сначала, что $98,6^{\circ}\text{F}$ на $98,6 - 32,0 = 66,6^{\circ}\text{F}$ выше точки замер-

зания воды. Поскольку каждый градус Фаренгейта равен $(5/9)^{\circ}\text{C}$, это соответствует $66,6 \cdot (5/9) = 37,0$ градусам Цельсия над точкой замерзания. Поскольку точка замерзания соответствует 0°C , температура человеческого тела равна $37,0^{\circ}\text{C}$.

17.3. Газовый термометр постоянного объема

Различные вещества расширяются в широком диапазоне температур не совсем одинаковым образом. Следовательно, если откалибровать различного рода термометры в точном соответствии с описанным выше способом, то их показания не совпадут полностью. Благодаря способу калибровки этих термометров их показания будут совпадать в точках 0 и 100°C . Однако при промежуточных температурах из-за различной способности к расширению их показания могут быть неодинаковыми (вспомните, что мы произвольно разделили шкалу термометра на 100 равных промежутков между 0 и 100°C). Таким образом, тщательно откалиброванный стеклянный термометр с ртутью может регистрировать температуру, например, $52,0^{\circ}\text{C}$, в то время как тоже тщательно откалиброванный термометр другого типа может показывать $52,6^{\circ}\text{C}$.

Из-за этого расхождения в показаниях необходимо выбрать некоторый стандартный тип термометра таким образом, чтобы эти промежуточные температуры можно было измерить точно. Применяемый для этих целей стандартный термометр называется *газовым термометром постоянного объема*. Этот термометр схематически показан на рис. 17.3; он состоит из колбы, заполненной разреженным газом, соединенной тонкой трубкой с ртутным манометром¹⁾. Поднимая или опуская трубку манометра, расположенную справа, можно поддерживать постоянным объем газа таким образом, чтобы ртуть в трубке слева совпадала с опорной меткой. Повышение температуры приводит к соответствующему росту дав-

¹⁾ В действительности этот термометр устроен значительно сложнее, чем показанный здесь. Кроме того, в его показания приходится вводить множество поправок (например, на расширение или сжатие содержащей газ колбы).

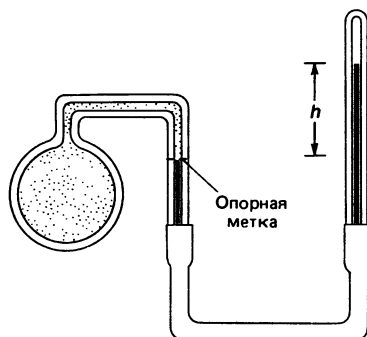


Рис. 17.3. Газовый термометр постоянного объема.

ления в колбе, и для поддержания постоянного объема газа колбу нужно поднять выше. При этом высота столбика ртути в правой трубке покажет значение температуры. Откалибровав этот термометр, мы получим термометр со стандартной шкалой температур. Главное достоинство такого термометра заключается в том, что при низких плотностях и давлениях все газы ведут себя одинаковым образом, и в пределе, когда давление газа стремится к нулю, газовый термометр постоянного объема при заполнении его любым газом позволяет измерять одну и ту же точную температуру. Таким образом, газовый термометр постоянного объема дает одинаковые показания независимо от используемого газа. Именно поэтому он был выбран для точного определения шкалы температур. Термометры и стандартную шкалу температур мы рассмотрим в разд. 17.11.

* 17.4. Тепловое равновесие; нулевое начало термодинамики

Несмотря на то что понятием температуры мы часто пользуемся в повседневной жизни, в физике не вполне очевидно, насколько точно определенной и необходимой величиной является температура. Поэтому рассмотрим этот вопрос более подробно.

Говорят, что система находится в состоянии **теплового равновесия**, если переменные, которые описывают систему, одинаковы для всей системы¹⁾ и не меняются во времени. Действительно, если в данный момент времени система не находится в тепловом равновесии, то мы даже не можем приписать системе определенное значение температуры или давления. Например, если горшок с водой нагревать на кухонной плите, то температура воды в разных местах в горшке будет различной (она не будет вполне определенной и будет меняться) и мы не сможем определить температуру воды в целом, до тех пор пока

¹⁾ Иногда в этом случае говорят, что система находится в «тепловом равновесии сама с собой».

нагревание горшка не прекратится и вода постепенно не приобретет постоянную температуру. Только после этого вода в горшке придет в состояние теплового равновесия. Рассмотрим еще один пример, а именно длинную, заполненную воздухом трубу, закрытую с одного конца и снабженную подвижным поршнем с другого. Если вы быстро толкнете поршень на небольшое расстояние, то в этот момент давление прямо перед цилиндром будет выше, чем в остальных местах трубы; затем это сжатие распространится по трубе в виде волны давления. Поскольку такая волна движется по трубе туда и обратно, она в конечном счете затухает, и во всей трубе вновь установится постоянное давление; только тогда воздух в трубе придет в состояние теплового равновесия.

Рассмотрим теперь две различные системы, которые имеют разные давления и температуры. Если они отделены друг от друга так, что не взаимодействуют и поэтому не влияют друг на друга, то их различные давления и температуры могут сохраняться. Однако если между ними устанавливается контакт таким образом, что они воздействуют друг на друга, то говорят, что системы находятся в тепловом контакте¹⁾. Два куска металла, один из которых имеет температуру 300 °С, а другой 50 °С, влияют друг на друга, если находятся в состоянии теплового контакта: температура более горячего куска будет снижаться, в то время как температура более холодного будет расти до тех пор, пока температуры обоих кусков не станут одинаковыми. При этом два тела окажутся в состоянии *теплового равновесия друг с другом*. Предположим теперь, что имеются две отдельные системы, между которыми нет теплового контакта, и если бы между ними мы установили тепловой контакт, то каких-либо заметных перемен в их параметрах состояния не обнаружили бы. Про такие две отдельные системы говорят, что они находятся тоже в состоянии теплового равновесия. Таким образом, даже в отсутствие контакта друг с другом две системы могут находиться в состоянии теплового равновесия, если при возникновении теплового контакта между ними их состояние не изменится.

Для того чтобы определить, находятся ли две системы

¹⁾ Считается, что идеально разделить две системы так, чтобы они не могли воздействовать друг на друга, можно при помощи *адиабатической стенки*; адиабатическая стенка, по существу, представляет собой идеальный тепловой изолятор, который не пропускает никаких потоков тепла. Однако если две системы приведены в состояние теплового контакта так, что они влияют друг на друга, то про них говорят, что они соединены *диатермальной стенкой*; диатермальная стенка является хорошим проводником тепла. Хорошей диатермальной стенкой была бы, например, тонкая металлическая пластинка.

А и В в состоянии теплового равновесия, нужно воспользоваться третьей системой С (которую можно рассматривать как термометр). Предположим, что С и А находятся в состоянии теплового равновесия и, кроме того, в состоянии теплового равновесия находятся системы С и В. Означает ли это, что А и В обязательно должны быть в состоянии теплового равновесия друг с другом? Очевидно, ответ на этот вопрос будет утвердительным. В действительности это не вполне очевидно; в конце концов, если Джейн любит Джорджа и Жанна любит Джорджа, то это не значит, что Джейн любит Жанну. Тем не менее наш повседневный опыт и великое множество экспериментов показывают, что для теплового равновесия это все-таки верно: если две системы находятся в состоянии теплового равновесия с третьей системой, то они пребывают в состоянии теплового равновесия и друг с другом. Этот постулат иногда называют нулевым началом термодинамики¹⁾. (Это начало имеет такой странный номер потому, что лишь после того, как были открыты великие первое и второе начала термодинамики, ученые осознали, что этот практически очевидный постулат нужно поставить впереди.)

Величина, которую мы назвали температурой, является свойством системы, которое определяет, будет ли система находиться в состоянии теплового равновесия с другими системами. Если две системы находятся в состоянии теплового равновесия, то их температуры по определению одинаковы. Это согласуется с нашими повседневными представлениями о температуре, поскольку, если горячее и холодное тела привести в состояние теплового контакта, они постепенно приобретут одну и ту же температуру. Таким образом, важная роль нулевого начала термодинамики состоит в том, что оно позволяет дать удобное определение температуры. Предположим, что нулевое начало термодинамики не выполняется. Это означает, что если системы А и С находятся в состоянии теплового равновесия и в таком же равновесии находятся системы В и С, то системы А и В не будут в состоянии теплового равновесия. Данное обстоятельство приведет к тому, что при $T_A = T_C$ и $T_B = T_C$ мы будем иметь $T_A \neq T_B$, что, конечно, не имеет большого смысла, так что температура станет бесполезной переменной. Однако не существует ни одного эксперимента, противоречащего нулевому началу термодинамики, поэтому мы считаем, что оно выполняется, и, следовательно, использование температуры весьма полезно.

¹⁾ Или свойством транзитивности состояния теплового равновесия.— *Прим. ред.*

17.5. Тепловое расширение

Большинство веществ при нагревании расширяется, а при охлаждении сокращается. Однако каждое вещество имеет свою, отличную от других степень расширения или сжатия.

Эксперименты показывают, что для большинства твердых тел изменение их длины ΔL в очень хорошем приближении прямо пропорционально изменению температуры ΔT . Кроме того, можно ожидать, что изменение длины пропорционально также исходной длине тела L_0 . Это значит, что при одинаковом изменении температуры железный стержень длиной 4 м удлинится в два раза больше, чем стержень длиной 2 м. Такую зависимость можно записать в виде уравнения

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T, \quad (17.1)$$

где α (коэффициент пропорциональности) называется *коэффициентом линейного расширения* для данного материала и имеет единицу измерения $(\text{C}^\circ)^{-1}$, что читается «на градус». В табл. 17.1 приведены значения α для различных материалов¹⁾ при температуре 20°C. Следует заметить, что коэффициент α также немного меняется с изменением температуры (поэтому показания термометров, изготовленных из различных материалов, точно не согласуются друг с другом). Однако если диапазон изменения температуры не слишком велик, то этим изменением можно пренебречь.

Таблица 17.1. Коэффициенты расширения при температуре 20°C (10^{-6}C^{-1})

Вещество	Коэффициент линейного расширения α	Коэффициент объемного расширения β	Вещество	Коэффициент линейного расширения α	Коэффициент объемного расширения β
<i>Твердые тела</i>			<i>Жидкости</i>		
Алюминий	25	75	Бензин		950
Латунь	19	56	Ртуть		180
Железо и сталь	12	35	Этиловый спирт		1100
Свинец	29	87	Глицерин		500
Стекло (пирекс)	3	9	Вода		210
Стекло (обычное)	9	27	<i>Газы</i>		
Кварц	0,4	1	Воздух (и большин- ство других га- зов при ат- мосферном давлении)		3400
Бетон и кирпич	≈ 12	≈ 36			
Мрамор	1,4–3,5	4–10			

¹⁾ В некоторых кристаллических веществах коэффициент α имеет разные значения в разных направлениях, но этот вопрос мы рассматривать не будем.

Пример 17.2. На цилиндрический железный стержень нужно надеть плотно железное кольцо. При температуре 20°C диаметр стержня равен $6,453\text{ см}$, а внутренний диаметр кольца $6,420\text{ см}$. До какой температуры нужно довести кольцо, чтобы отверстие в нем стало достаточно широким и кольцо налезло на стержень?

Решение. Диаметр отверстия в кольце должен быть увеличен с $6,420$ до $6,453\text{ см}$. Поскольку диаметр отверстия будет линейно увеличиваться с ростом температуры, кольцо нужно нагреть. [Заметим, что,

расширяясь, вещество *не* заполняет отверстие. В твердом теле без отверстия все части тела (и кольца тоже) увеличивают в равной мере свой объем с ростом температуры. Наличие отверстия не влияет на ход этого процесса, поэтому при повышении температуры диаметр отверстия увеличивается.] Из выражения (17.1) находим

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{\alpha L_0} = \frac{6,453\text{ см} - 6,420\text{ см}}{(12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})(6,420\text{ см})} = 430^\circ\text{C}.$$

Это означает, что кольцо нужно нагреть по крайней мере до температуры 450°C .

Изменение объема вещества при изменении температуры определяется выражением, аналогичным (17.1):

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T, \quad (17.2)$$

где ΔT – изменение температуры, V_0 – исходный объем, ΔV – изменение объема, а β – коэффициент объемного расширения. Величина β измеряется в $(^\circ\text{C})^{-1}$. Значения β для некоторых веществ приведены в табл. 17.1. Заметим, что в твердых телах коэффициент объемного расширения β , как правило, равен приблизительно 3α (причина такой взаимосвязи станет ясной, если решить задачу 18 в конце настоящей главы), но это соотношение не выполняется, если твердое тело не является изотропным («изотропный» означает, что тело имеет одинаковые свойства во всех направлениях). Заметим также, что в жидкостях и газах из-за того, что они не имеют постоянной формы, понятие линейного расширения теряет смысл.

Выражения (17.1) и (17.2) выполняются точно только в том случае, когда ΔL или ΔV малы по сравнению с L_0 или V_0 . Это особенно касается жидкостей и тем более газов, поскольку у них значения β довольно велики. Кроме того, в газах так же велико изменение величины β с температурой. Поэтому, когда имеют дело с газами, необходимо применять более удобные выражения; рассмотрим этот вопрос в конце главы, начиная с разд. 17.7.

Пример 17.3. Стальной бензобак автомобиля емкостью 70 л полностью заполнен бензином при температуре 20°C . После этого автомобиль поставили на солнце, и бак разогрелся до 50°C . Сколько бензина вытечет из бака?

Решение. Бензин расширится на величину

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T =$$

$$= (950 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})(70\text{ л})(30^\circ\text{C}) = 2,0\text{ л}.$$

Но бак при этом тоже расширится. Мы можем рассматривать бак как некоторую

оболочку, которая претерпевает объемное расширение ($\beta \approx 3\alpha = 36 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$); но если эта оболочка изготовлена из твердого вещества, то ее внешний поверхностный слой должен также расширяться. Таким образом, объем бака увеличится на

$$\Delta V = (36 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})(70\text{ л})(30^\circ\text{C}) = 0,075\text{ л},$$

что представляет собой незначительную величину. Таким образом, если такой полный бак оставить на солнце, то паров бензина вытечет на дорогу.

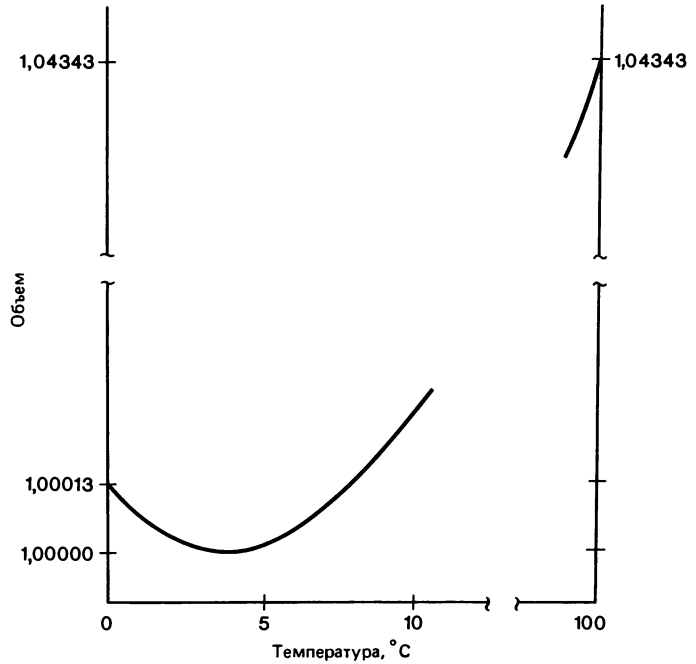


Рис. 17.4. Зависимость объема 1,00000 кг воды (в единицах 10^{-3} м^3) от температуры. (Обратите внимание на изменение масштаба шкалы.)

Большинство веществ при повышении температуры расширяется более или менее равномерно. Однако вода ведет себя необычно. Если нагревать воду при температуре 0°C , то ее объем будет *уменьшаться* до тех пор, пока температура не достигнет 4°C . При температурах выше 4°C вода ведет себя нормальным образом и при повышении температуры расширяется (рис. 17.4). Таким образом, вода имеет наибольшую плотность при температуре 4°C . Именно поэтому лед в озерах образуется сначала на поверхности воды. Когда вода охлаждается до температуры ниже 4°C , более холодная вода, имеющая меньшую плотность, поднимается на поверхность (или остается там), в то время как более плотная вода с температурой 4°C располагается внизу. Более холодная вода на поверхности водоемов замерзает первой, поскольку раньше достигает температуры ниже 0°C .

Как можно объяснить тепловое расширение с микроскопической точки зрения? Предположим, что атомы в твердых телах постоянно движутся, совершая колебания около своих положений равновесия. Предположим также, что при повышении температуры их средняя кинетическая энергия увеличивается, как мы покажем в следующей главе. Означает ли это, что повышение температуры будет приводить к увеличению расстояния между атомами? Экспериментально показано, что твердый стержень, если повышать его температуру, становится длиннее; поэтому можно сделать вывод, что среднее расстояние между атомами должно увеличиваться. Чтобы понять это, рассмотрим типичную упрощенную кривую потен-

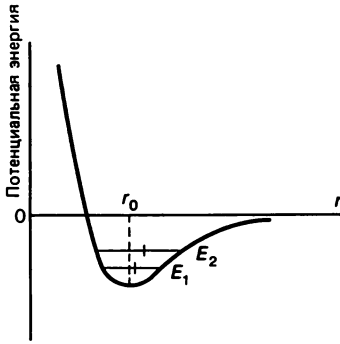


Рис. 17.5. Типичная кривая потенциальной энергии в зависимости от расстояния между атомами r для атомов в кристаллическом твердом теле (упрощенное представление).

диальной энергии на рис. 17.5, которая описывает зависимость потенциальной энергии взаимодействия двух атомов от расстояния r между ними. Мы считаем, что при больших r потенциальная энергия приблизительно равна 0, а при уменьшении r потенциальная энергия также уменьшается, указывая на наличие силы притяжения, о чем было упомянуто в разд. 17.6. Когда r становится меньше r_0 (положение равновесия), кривая потенциальной энергии идет вверх, указывая на наличие силы отталкивания. Горизонтальные линии на рис. 17.5, отмеченные буквами E_2 и E_1 , показывают значения полной энергии при двух различных температурах T_2 и T_1 , где $T_2 > T_1$. Короткие вертикальные линии на уровнях E_1 и E_2 соответствуют средним положениям атомов при этих температурах. Поскольку кривая потенциальной энергии не является симметричной, при более высоких температурах среднее расстояние между атомами будет больше, что и показано на рис. 17.5. Таким образом, тепловое расширение связано с несимметричностью кривой потенциальной энергии. Если бы кривая потенциальной энергии была симметричной, то тепловое расширение отсутствовало бы вовсе. Интересно, как выглядит кривая потенциальной энергии для воды при температурах от 0 до 4°C?

* 17.6. Тепловые напряжения

В некоторых случаях бывает так, что изготовленные из какого-либо материала стержни или пластинки жестко закреплены на концах, так что расширение или сжатие здесь невозможно. Если в этих случаях температура будет изменяться, то возникнут большие напряжения сжатия или растяжения, которые называют иногда *тепловыми напряжениями*. Величина этих напряжений может быть вычислена, если использовать выражения для модуля упругости, рассмотренные в гл. 11. Чтобы вычислить внутреннее напряжение, представим себе, что процесс расширения происходит в два этапа. Стержень расширяется (или сокращается) на ΔL в соответствии с выражением (17.1), после чего необходимо приложить силу, чтобы сжать (или растянуть) материал до его первоначальной длины. Эту силу F можно вычислить с помощью формулы (11.4):

$$\Delta L = \frac{1}{E} \frac{F}{A} L_0,$$

где E — модуль Юнга данного материала. Чтобы вычислить внутреннее напряжение F/A , подставим это выражение для ΔL (в 17.1) и найдем

$$\alpha L_0 \Delta T = \frac{1}{E} \frac{F}{A} L_0.$$

Пример 17.4. Блоки из бетона длиной 10 м расположены вплотную друг к другу, так что между ними отсутствуют зазоры для расширения. Если блоки разместить таким образом при температуре 10°C , то чему будет равна сила сжатия, когда температура повышается до 40°C ? Площадь контакта двух блоков равна $0,20\text{ м}^2$. Выдержит ли бетон такую нагрузку или произойдет его разрушение?

Решение. Преобразуем выражение, записанное перед этим примером, таким образом, чтобы получить выражение для F , и подставим в него значение E из

табл. 11.1:

$$F = \alpha \Delta T E A = [12 \cdot 10^{-6} (\text{C}^\circ)^{-1}] (30^\circ\text{C}) \times \\ \times (20 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2) (0,20 \text{ м}^2) = 1,4 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Напряжение F/A равно $(1,4 \cdot 10^6 \text{ Н}) / (0,20 \text{ м}^2) = 7,0 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$. Это значение близко к предельной прочности бетона при сжатии (табл. 11.2) и превосходит прочность бетона на растяжение и сдвиг. Следовательно, учитывая то, что бетонные блоки расположены не вполне параллельно, часть силы будет создавать напряжение сдвига, и весьма вероятно, что бетон разрушится.

17.7. Газовые законы и абсолютная температура

Выражение (17.2) не всегда подходит для описания расширения газа, поскольку газы могут расширяться весьма значительно и, кроме того, газы расширяются, как правило, до полного заполнения содержащего их сосуда. И в самом деле, ведь выражение (17.2) применимо только в том случае, когда давление поддерживается постоянным. Объем же газа существенно зависит от давления и от температуры. Поэтому необходимо найти соотношение между объемом, давлением, температурой и массой газа. Такое соотношение называется **уравнением состояния**¹⁾.

Если состояние системы изменяется, мы будем ждать до тех пор, пока давление и температура выравниваются, т. е. пока они не достигнут одинаковых значений во всей системе. Таким образом, мы рассматриваем только равновесные состояния газа. Заметим также, что результаты, полученные в этом разделе, выполняются точно только для газов с достаточно низкой плотностью (давление не слишком велико, порядка 1 атм или меньше) и находящиеся не слишком близко к их точке конденсации (кипения).

Экспериментально было обнаружено, что для данного количества газа в хорошем приближении выполняется следующее соотношение: *при постоянной температуре объем газа обратно пропорционален приложенному к нему давлению*. Таким образом,

$$V \sim 1/P \quad [\text{постоянная температура}].$$

¹⁾ Можно придумать уравнение состояния также для твердых тел и жидкостей, поскольку их объем тоже зависит от массы, температуры и внешнего давления (хотя воздействие температуры и давления значительно слабее, чем в газах). Однако, поскольку твердые тела и жидкости имеют сложное строение, вопрос об уравнении состояния для них оказывается значительно более сложным.

Например, если давление, действующее на газ, увеличится вдвое, то объем уменьшится до половины первоначального. Это соотношение известно как *закон Бойля*,¹⁾ оно названо в честь Роберта Бойля (1627–1691), который первым установил его на основании своих собственных экспериментов. Закон Бойля можно также записать в следующем виде:

$$PV = \text{const} \quad [\text{постоянная температура}].$$

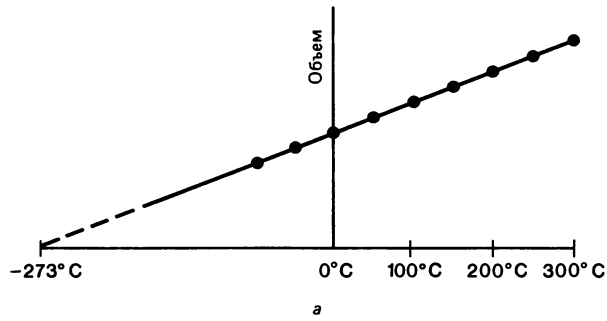
Это означает, что при постоянной температуре, если изменится либо давление, либо объем газа, другая величина также изменится, но при этом произведение PV останется постоянным.

Температура также влияет на объем газа, однако количественное соотношение между V и T не было установлено на протяжении более чем столетия после открытия закона Бойля. Французский ученый Жак Шарль (1746–1823) обнаружил, что, если давление не слишком велико и поддерживается постоянным, объем газа увеличивается с ростом температуры примерно по линейному закону, как показано на рис. 17.6, *a*. Однако при низких температурах все газы становятся жидкостями (например, кислород сжижается при температуре -183°C), и поэтому график на рис. 17.6, *a* нельзя продолжить за точку, при которой происходит сжижение, или конденсация. Тем не менее этот график является, по существу, прямой линией, и если продолжить его до более низких температур (что показано на рисунке штриховой линией), то он пересечет ось при температуре около -273°C .

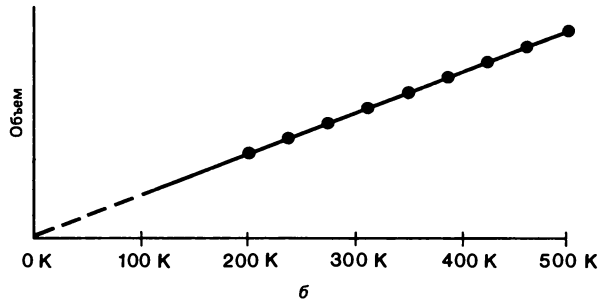
Такого рода графики могут быть построены для любого газа, и во всех случаях продолжение прямой пересечет линию нулевого объема (ось температур) при температуре -273°C . Отсюда можно было бы сделать вывод, что если бы газ удалось охладить до температуры -273°C , то его объем стал бы равен нулю, а при более низких температурах газ имел бы отрицательный объем (что, разумеется, лишено физического смысла). Это привело к предположению о том, что температура -273°C является, возможно, наименьшей достижимой температурой. Множество современных экспериментов свидетельствует о том, что это действительно так. Эту температуру называют *абсолютным нулем* температуры. Согласно измерениям его значение равно приблизительно $-273,15^\circ\text{C}$.

Абсолютный нуль температуры лежит в основе шкалы температур, называемой *абсолютной* или *шкалой Кельвина*. Эта шкала широко применяется в научных исследованиях. По этой шкале температура измеряется в граду-

¹⁾ Этот закон называют также законом Бойля–Мариотта. Э. Мариотт (1620–1684) – французский физик, член Парижской Академии наук, который независимо от Р. Бойля (1662 г.) пришел к этому закону в 1676 г. – *Прим. ред.*



а



б

Рис. 17.6. Объем газа как функция температуры по шкале Цельсия (а) и температуры по шкале Кельвина при постоянном давлении (б).

сах Кельвина, а правильное просто в кельвинах (К) без знака градуса. Интервалы на этой шкале те же самые, что и на шкале Цельсия, т.е. цена деления (или градус) у них одинакова, однако нуль на шкале Кельвина (0 К) выбран равным абсолютному нулю температуры. Таким образом, точка замерзания воды (0 °С) имеет температуру 273,15 К, а точка кипения – температуру 373,15 К. Действительно, любая температура по шкале Цельсия может быть переведена в кельвины простым добавлением к ней числа 273,15:

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15.$$

Позднее мы обсудим эту шкалу более подробно.

Рассмотрим теперь график на рис. 17.6, б, где можно видеть, что зависимость объема газа от абсолютной температуры представляет собой, по существу, прямую линию. Таким образом, в хорошем приближении выполняется следующее соотношение: *при постоянном давлении объем данного количества газа прямо пропорционален абсолютной температуре*. Это называется *законом Шарля* и может быть записано следующим образом:

$$V \sim T \quad [\text{постоянное давление}].$$

Третий газовый закон, известный как *закон Гей-Люссака*, назван в честь Жозефа Гей-Люссака (1778–1850). Этот закон гласит, что *при постоянном объеме давление газа прямо пропорционально абсолютной температуре*:

$$P \sim T \quad [\text{постоянный объем}].$$

Хорошо известным примером действия этого закона является то, что если закрытый сосуд или баллон аэрозоля бросить в огонь, он взорвется, потому что давление газа внутри возрастет. На этом соотношении основано также действие газового термометра постоянного объема (разд. 17.3).

Законы Бойля, Шарля и Гей-Люссака в действительности не являются законами в том смысле, в котором этим термином пользуются в настоящее время. Эти «законы» являются всего лишь приближениями, хорошо выполняющимися в реальных газах только до тех пор, пока давление и плотность газа не слишком велики, а температура газа не слишком близка к температуре, когда газ переходит в конденсированное состояние; к сожалению, слово «закон» в применении к этим трем соотношениям стало традиционным, и мы будем его придерживаться.

17.8. Закон идеального газа

Газовые законы Бойля, Шарля и Гей-Люссака были получены с помощью очень полезного научного метода, состоящего в том, что одна или более переменных поддерживаются постоянными, чтобы четко проследить за тем, к чему приводит изменение лишь одной переменной. Теперь эти законы можно объединить в одно более общее соотношение между давлением, объемом и температурой, которое справедливо для определенного количества газа:

$$PV \sim T.$$

Это соотношение показывает, как любая из величин P , V и T будет изменяться при изменении остальных двух величин. Оно переходит в законы Бойля, Шарля и Гей-Люссака в том случае, когда фиксируются соответственно температура, давление и объем.

Наконец, мы должны учесть влияние количества (или массы) газа. Каждому, кто хоть однажды надувал воздушный шарик, известно, что, чем больше воздуха вдувается в шарик, тем больше становятся его размеры. Действительно, точные эксперименты показывают, что при постоянной температуре и постоянном давлении замкнутый объем V увеличивается прямо пропорционально массе газа. Следовательно, можно записать

$$PV \sim mT.$$

Эта пропорциональная зависимость связывает между собой все существенные для газа величины. Если включить сюда коэффициент пропорциональности, то мы получим определенное равенство. Эксперименты показывают, что в разных газах этот коэффициент различен. Однако коэффициент пропорциональности станет одинаковым для всех газов, если вместо массы m использовать число

молей; один моль определяется как количество вещества, которое содержит столько атомов или молекул, сколько их содержится в 0,012 кг углерода-12 (углерода, масса которого точно равна 12 а. е. м.). Согласно более простому, но полностью эквивалентному данному выше определению моля, число граммов вещества, содержащееся в одном моле, равно молекулярной массе вещества. Например, молекулярная масса водорода (H_2) равна 2,0 а. е. м. (поскольку каждая молекула содержит два атома водорода и каждый атом имеет атомную массу 1,0 а. е. м.). Таким образом, один моль H_2 равен 0,0020 кг. Аналогично масса 1 моля газа неона равна 0,010 кг, а масса 1 моля CO_2 равна $(12 + 2 \cdot 16) \cdot 10^{-3}$ кг = 0,044 кг. Моль является официальной единицей системы СИ. Иногда используется единица киломоль (кмоль), а именно количество килограммов, численно равное молекулярной массе вещества: 1 кмоль = 10^3 моль.

Представим теперь записанную выше пропорциональную зависимость в виде следующего равенства:

$$PV = nRT, \quad (17.3)$$

где n – число молей, а R – коэффициент пропорциональности. Величина R называется *универсальной газовой постоянной*, поскольку эксперимент показывает, что ее значение является одинаковым для всех газов; на сегодняшний день самое точное значение этой величины равно

$$R = 8,31441 \pm 0,00026 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

В других (иногда используемых) системах единиц универсальная газовая постоянная имеет следующие (округленные) значения:

$$\begin{aligned} R &= 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = && [\text{единицы СИ}] \\ &= 0,0821 \text{ л} \cdot \text{атм}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = \\ &= 1,986 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Здесь лишь значение в первой строке дается в единицах СИ. Равенство (17.3) называется **законом идеального газа** или **уравнением состояния идеального газа**. Здесь слово «идеальный» используется потому, что реальные газы не подчиняются этому закону полностью, особенно при высоких давлениях или в том случае, когда газ близок к точке перехода в жидкое состояние. Однако при давлениях порядка 1 атм или ниже и при температурах, далеких от точки кипения вещества, уравнение (17.3) можно считать достаточно точным. (Более точное уравнение состояния реальных газов мы рассмотрим в разд. 18.6.)

Закон идеального газа играет очень важную роль в физике и является чрезвычайно полезным в различного рода исследованиях. Рассмотрим теперь некоторые примеры его применения. Мы часто будем употреблять выражение «нормальные условия» или «нормальные температура и давление», что означает $T = 273 \text{ К} (0^\circ\text{C})$ и $P = 1,00 \text{ атм} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^2$.

Пример 17.5. Определите объем 1 моля любого газа в нормальных условиях, считая, что газ ведет себя как идеальный.

Решение. Найдем V из уравнения (17.3):

$$\begin{aligned} V &= \frac{nRT}{P} = \\ &= \frac{(1,00 \text{ моль})(8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К})(273 \text{ К})}{(1,01 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2)} = \\ &= 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Поскольку 1 л равен $1000 \text{ см}^3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, то объем 1 моля любого газа при нормальных условиях равен 22,4 л.

Следует запомнить значение объема одного моля газа при нормальных условиях (22,4 л), поскольку в некоторых случаях это упрощает расчеты, как видно из следующего примера.

Пример 17.6. Сосуд с гибкими стенками, содержащий кислород (O_2) при нормальных условиях, имеет объем $10,0 \text{ м}^3$. Чему равна масса газа, заключенного в сосуде?

объем $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, объем $10,0 \text{ м}^3$ соответствует $(10,0)/(22,4 \cdot 10^{-3}) = 446$ моль кислорода. Так как масса одного моля кислорода равна 0,0320 кг, масса кислорода в сосуде равна $(446 \text{ моль})(0,0320 \text{ кг/моль}) = 14,3 \text{ кг}$.

Решение. Поскольку 1 моль занимает

Во многих случаях объем измеряется в литрах, а давление – в атмосферах. Вместо того чтобы переводить эти единицы в систему СИ, можно пользоваться приведенным выше значением $R = 0,0821 \text{ л} \cdot \text{атм/моль} \cdot \text{К}$. Во многих случаях пользоваться значением R совсем не обязательно. Так обстоит дело, например, во многих задачах, в которых рассматриваются изменения давления, температуры и объема при постоянном количестве газа. В этом случае $PV/T = nR = \text{const}$, поскольку величины n и R остаются постоянными. Если теперь обозначить параметры, описывающие начальное состояние газа, через P_1 , V_1 и T_1 , а параметры состояния газа после происшедшего изменения через P_2 , V_2 и T_2 , то можно написать следующее соотношение:

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2.$$

Если нам известны любые пять величин в этом уравнении, то нетрудно найти и шестую.

Пример 17.7. Шина автомобиля была накачена при температуре 10°C до избыточного давления 200 кПа. После того как автомобиль проехал 100 км, температура в шине повысилась до 40°C . Каким теперь стало давление внутри шины?

Решение. Поскольку объем шины остается практически постоянным, т.е.

$$V_1 = V_2, \text{ имеем}$$

$$P_1 / T_1 = P_2 / T_2.$$

Это один из видов записи закона Гей-Люссака. Поскольку измеряемое давление в шине представляет собой избыточное давление, нужно добавить атмосферное давление 101 кПа, чтобы получить абсо-

лютное давление $P_1 = 301$ кПа. Тогда

$$P_2 = \frac{P_1}{T_1} T_2 = \frac{(3,01 \cdot 10^5 \text{ Па})(313 \text{ К})}{283 \text{ К}} = 3,33 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Вычитая атмосферное давление, мы найдем новое значение избыточного давления, а именно 232 кПа, что на 15% выше первоначального. Этот пример показывает, почему рекомендуется измерять давление в шинах, когда они холодные.

17.9. Закон идеального газа на молекулярном уровне; число Авогадро

То, что постоянная R имеет одно и то же значение для всех газов, представляет собой замечательное отражение простоты природы. Это впервые осознал, хотя и в несколько другой форме, итальянский ученый Амедео Авогадро (1776–1856). Авогадро установил, что *равные объемы газа при одинаковых давлении и температуре содержат одинаковое число молекул*. Это положение иногда называют *гипотезой Авогадро*. То, что это положение связано с постоянством R во всех газах, мы покажем ниже. Во-первых, из формулы (17.3) видно, что если различные газы содержат одно и то же число молей n и имеют одинаковые давления и температуры, то при условии постоянного R газы будут занимать один и тот же объем. Во-вторых, число молекул в одном моле для всех газов одно и то же, что непосредственно следует из определения моля¹⁾. Таким образом, гипотеза Авогадро эквивалентна утверждению о том, что величина R постоянна для всех газов.

Число молекул в одном моле называется **числом Авогадро** N_A . Хотя Авогадро и сделал такое наблюдение, определить значение N_A реально он не мог. Действительно, с точными измерениями пришлось подождать до двадцатого столетия. Для измерения N_A применяется несколько методов, и в настоящее время установлено, что число Авогадро равно

$$N_A = (6,022045 \pm 0,000031) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1},$$

или округленно

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Поскольку общее число молекул N газа равно числу молекул в одном моле, умноженному на число молей

¹⁾ Например, молекулярная масса водорода H_2 равна 2,0 а.е.м., в то время как масса кислорода O_2 равна 32,0 а.е.м. Таким образом, масса одного моля H_2 равна 0,0020 кг, а масса одного моля O_2 равна 0,032 кг. Число молекул в одном моле равно общей массе M моля, деленной на массу m одной молекулы, а поскольку по определению моля отношение M/m одинаково для всех газов, моль любого вещества должен содержать одно и то же число молекул.

($N = nN_A$), закон идеального газа (17.3) можно переписать через число молекул, содержащихся в газе:

$$PV = nRT = \frac{N}{N_A} RT,$$

или

$$PV = NkT, \quad (17.4)$$

где $k = R/N_A$ называется *постоянной Больцмана* и имеет значение

$$k = \frac{R}{N_A} = (1,380662 \pm 0,000044) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К},$$

или округленно

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Пример 17.8 Используя значение числа Авогадро, определите массу атома водорода.

Решение. Один моль водорода (атомная масса водорода равна 1,008) имеет массу $1,008 \cdot 10^{-3}$ кг и содержит $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов. Поэтому масса одного атома равна

$$m = \frac{1,008 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Исторически получилось так, что обрат-

ный расчет стал одним из методов определения N_A на основании измеренного значения массы атома водорода.

Пример 17.9. Сколько молекул вы вдыхаете, если при одном вдохе получаете 1,0 л воздуха?

Решение. Объем одного моля равен 22,4 л (см. пример 17.5). Следовательно, 1,0 л воздуха равен $1/22,4 = 0,045$ моль. Тогда 1,0 л воздуха содержит $(0,045 \text{ моль}) \times (6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}) = 2,7 \cdot 10^{22}$ молекул.

17.10. Парциальное давление

В случае когда один и тот же объем занимают два или более газов, полное давление равно сумме парциальных давлений отдельных газов. *Парциальное давление* газа определяется как давление этого газа, если бы он один занимал весь объем. Этот экспериментальный закон был получен Дальтоном и называется *законом Дальтона для парциальных давлений*. Согласно этому закону, *каждый газ в смеси создает парциальное давление, пропорциональное его молекулярной концентрации*. Это положение согласуется с законом идеального газа (17.4). Предположим, что у нас есть смесь трех газов, состоящая из N_1 , N_2 и N_3 молекул каждого газа соответственно. Полное давление запишется в виде

$$P = NkT/V,$$

где N – общее число молекул $N = N_1 + N_2 + N_3$. При этом мы имеем

$$P = N_1 kT/V + N_2 kT/V + N_3 kT/V = P_1 + P_2 + P_3,$$

где P_1 , P_2 и P_3 – парциальные давления каждого из трех газов,

а отношения N_1/V , N_2/V и N_3/V —их концентрации. Таким образом, полное давление равно сумме парциальных давлений, а каждое парциальное давление пропорционально молекулярной концентрации.

Например, сухой воздух состоит из 78% (по объему) азота, 21% кислорода и из очень небольшого количества аргона и других газов. При общем давлении воздуха 1 атм парциальное давление кислорода равно 0,21 атм, а азота—0,78 атм.

* 17.11. Температурная шкала идеального газа; стандартный термометр

Очень важно иметь точно определенную шкалу температур, чтобы измерения температуры, выполненные в различных лабораториях, давали однозначные результаты и их можно было сравнить. Рассмотрим такую шкалу, которая принята учеными большинства стран.

Стандартным термометром для определения этой шкалы является газовый термометр постоянного объема, рассмотренный в разд. 17.3. Сама шкала называется *температурной шкалой идеального газа*, поскольку она основана на том свойстве идеального газа, согласно которому давление газа прямо пропорционально его абсолютной температуре (закон Гей-Люссака). При низких плотностях реальный газ, если его использовать в любом реальном газовом термометре постоянного объема, по своим свойствам приближается к идеальному газу. Иными словами, температура в любой точке пространства *определяется* как величина, пропорциональная давлению (почти) идеального газа, используемого в термометре. Чтобы создать шкалу, нам потребуются две фиксированные точки. Одна фиксированная точка соответствует $P = 0$ при $T = 0$ К, а в качестве второй фиксированной точки выбирают *тройную точку* воды, которая может быть воспроизведена в различных лабораториях с большой точностью. Тройная точка воды представляет собой точку, в которой вода в твердом, жидком и газообразном состояниях может находиться в равновесии. Это имеет место только при определенных значениях температуры и давления¹⁾. Давление в тройной точке воды равно 4,58 мм рт.ст., а температура равна приблизительно 0,01°С. Эта температура соответствует примерно 273,16 К (поскольку абсолютный нуль—это около —273,15°С). Действительно тройная точка теперь *определяется* как такая, температура которой равна точно 273,16 К. (Заметьте снова, что знак градуса у буквы К отсутствует.)

¹⁾ Жидкая вода и пар могут сосуществовать (точка кипения) в целом интервале температур, зависящем от давления. При низком давлении вода кипит при более низкой температуре, как это происходит, например, в горах. Тройная точка представляет собой более точно воспроизводимую точку отсчета, чем точка замерзания или кипения воды при давлении, например, 1 атм.

Абсолютная температура, или температура по шкале Кельвина T , в любой точке определяется при помощи газового термометра постоянного объема следующим образом:

$$T = (273,16 \text{ К}) \left(\frac{P}{P_{\text{тр.т}}} \right) \quad [\text{идеальный газ, постоянный объем}]. \quad (17.5a)$$

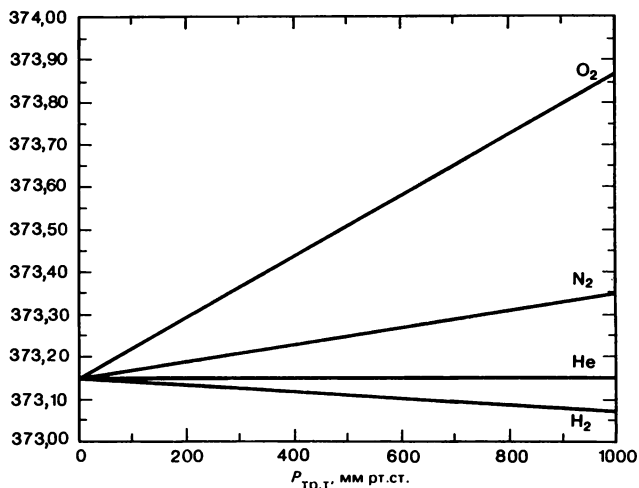
В этом соотношении $P_{\text{тр.т}}$ есть не что иное, как давление в термометре при температуре тройной точки воды, а P представляет собой давление в термометре, когда он находится в точке, где нужно определить температуру T . Заметим, что если в этом соотношении положить $P = P_{\text{тр.т}}$ то $T = 273,16 \text{ К}$, как и должно быть.

Если пользоваться определением температуры в соответствии с формулой (17.5a) и измерять температуру газовым термометром постоянного объема, заполненным реальным газом (это единственное, что мы можем сделать, поскольку полностью идеальный газ в природе не существует), то обнаружим, что в зависимости от сорта газа, применяемого в термометре, будут получаться различные значения температуры. Температуры, определяемые этим способом, зависят также от количества газа в колбе термометра; например, если использовать газовый термометр, заполненный кислородом O_2 , то с помощью формулы (17.5a) мы найдем, что температура точки кипения воды при давлении 1,00 атм равна 373,87 К, если $P_{\text{тр.т}} = 1000 \text{ мм рт.ст.}$ Если количество кислорода в колбе уменьшить таким образом, чтобы в тройной точке $P_{\text{тр.т}}$ равнялось 500 мм рт.ст., то расчеты по формуле (17.5a) дадут температуру кипения воды 373,15 К. Если же вместо кислорода использовать водород H_2 , то соответствующие значения температуры кипения воды окажутся равными 373,07 и 373,11 К (рис. 17.7). Предположим теперь, что мы используем конкретный реальный газ и выполняем серии измерений, в которых количество газа в колбе термометра постепенно уменьшается таким образом, что $P_{\text{тр.т}}$ становится все меньше и меньше. Экспериментально было обнаружено, что экстраполяция результатов этих измерений до $P_{\text{тр.т}} = 0$ всегда дает одно и то же значение температуры данной системы (например, $T = 373,15 \text{ К}$ для точки кипения воды при давлении 1,00 атм), как показано на рис. 17.7. Таким образом, температура в любой точке пространства, измеряемая при помощи газового термометра постоянного объема, содержащего реальный газ, определяется через это предельное значение:

$$T = (273,16 \text{ К}) \lim_{P_{\text{тр.т}} \rightarrow 0} (P/P_{\text{тр.т}}) \quad [\text{постоянный объем}]. \quad (17.5b)$$

Это определение *температурной шкалы идеального газа*. Одно из самых больших преимуществ этой шкалы заклю-

Рис. 17.7. Показания температуры (отложены по оси ординат в кельвинах) газового термометра постоянного объема для точки кипения воды при давлении 1,00 атм для различных газов как функция давления газа в термометре в тройной точке ($P_{тр.т}$). Обратите внимание, что количество газа в термометре сокращается так, что при $P_{тр.т} \rightarrow 0$ все газы дают одно и то же показание, а именно 373,15 К. При давлениях меньше 0,10 атм (76 мм рт. ст.) показанные изменения температуры меньше чем 0,07 К.



чается в том, что значение температуры T не зависит от вида применяемого в термометре газа. Однако шкала, вообще говоря, все же зависит от свойств газов. Из всех газов гелий имеет самую низкую температуру конденсации. При очень низких давлениях он становится жидким при температуре около 1 К, поэтому на этой шкале нельзя определить более низкие температуры.

Было бы удобно иметь шкалу, которую можно было бы использовать при температурах ниже 1 К и которая была бы также независима от свойств любого применяемого вещества. Такая шкала имеется; она основана на некоторых термодинамических свойствах, которые мы рассмотрим в гл 21. Она называется абсолютной термодинамической шкалой, и, строго говоря, только эта шкала может называться шкалой Кельвина и указывать температуру в кельвинах. Однако она совпадает с температурной шкалой идеального газа почти во всем интервале температур, в котором ее можно использовать (> 1 К).

Заметим в заключение, что определение температуры при помощи температурной шкалы идеального газа весьма затруднительно и требует много времени. Поэтому создана «Международная практическая температурная шкала», которой проще пользоваться на практике и которая дает результаты, с достаточно высокой точностью совпадающие с температурной шкалой идеального газа. Эта шкала состоит из большого числа фиксированных температур различных точек (таких, как температуры кипения и замерзания различных веществ), и для нее указаны способы определения промежуточных температур.

Заклучение

Атомная теория вещества постулирует, что все вещества состоят из мельчайших частиц, называемых *атомами*. Средний диаметр атома равен 10^{-10} м. *Атомные и молекулярные массы* измеряются при помощи единиц, в которых обычному атому углерода ^{12}C произвольно приписано значение 12,0000 а.е.м. (атомных единиц массы). Различие между твердым, жидким и газообразным состояниями данного вещества объясняется тем, что вещество в этих состояниях имеет различные силы притяжения между атомами и молекулами, а также различные средние скорости атомов и молекул.

Температура является мерой того, в какой степени тело является горячим или холодным. Для измерения температуры используются *термометры* со шкалами Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) и Кельвина (К). На каждой из этих шкал выбираются две точки отсчета, одна из которых представляет собой точку замерзания воды (0°C , 32°F , 273,15 К), а другая – точку кипения воды (100°C , 212°F , 373,15 К). Изменение температуры на один кельвин равно изменению на один градус Цельсия или на $9/5$ градуса Фаренгейта.

Изменение длины ΔL твердого тела при изменении температуры на ΔT прямо пропорционально изменению температуры и первоначальной длине твердого тела L_0 . Таким образом, $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$, где α – коэффициент линейного расширения. Изменение объема большинства твердых тел, жидкостей и газов пропорционально изменению температуры и исходному объему V_0 : $\Delta V = \beta V_0 \Delta T$; в твердых телах коэффициент объемного расширения β равен приблизительно 3α . Вода является необычным веществом, поскольку в отличие от большинства веществ, объем которых увеличивается при повышении температуры, ее объем уменьшается с температурой в интервале от 0 до 4°C .

Закон идеального газа, или *уравнение состояния идеального газа*, связывает между собой давление P , объем V и температуру T (в кельвинах) n молей газа соотношением $PV = nRT$,

где $R = 8,314$ Дж/моль·К для всех газов. Реальные газы подчиняются закону идеального газа достаточно точно в том случае, если их давление не слишком высоко и они находятся далеко от точки конденсации, или сжижения. Один *моль* вещества определяется как число граммов, которое численно равно его атомной или молекулярной массе. *Число Авогадро* $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ представляет собой число атомов или молекул в 1 моле любого чистого вещества. Закон идеального газа можно записать через число молекул N газа следующим образом:

$$PV = NkT,$$

где $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Закон парциальных давлений Дальтона утверждает,

что каждый газ в смеси создает парциальное давление, пропорциональное молекулярной концентрации этого газа; полное давление является суммой парциальных давлений.

Вопросы

1. Что содержит больше атомов: 1 кг алюминия или 1 кг железа (см. приложение Г в т. 2 настоящей книги)?
2. Предположим, что шкала температур определена не линейно, а через квадрат какого-либо свойства вещества: $T = ax^2$. Пусть x — это длина L столба ртути в ртутном термометре. Обсудите проблемы, с которыми придется столкнуться при использовании такой шкалы.
- *3. Допустим, что система C не находится в равновесии ни с системой A , ни с системой B . Означает ли это, что системы A и B не находятся в равновесии между собой? Что вы думаете о температурах систем A , B и C ?
4. Если система A находится в равновесии с системой B , но B не находится в равновесии с системой C , то что можно сказать о температурах систем A , B и C ?
5. На рис. 17.8 показан типичный термостат, используемый для контроля температуры в печи (или в другом нагревающем или охлаждающем устройстве). Биметаллическая пластинка представляет собой соединенные вместе две пластины из различных металлов. Объясните, почему эта пластинка при изменении температуры искривляется и каким образом это искривление используется для контроля за температурой в печи.
6. Круглое кольцо нагрели от 20 до 80°C . Станет ли отверстие в кольце больше или меньше? Объясните это с микроскопической (молекулярной) точки зрения.
7. Чему соответствует параметр L_0 в соотношении $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$, начальной длине или конечной длине, или это не имеет значения?
8. Объясните, почему порой снять плотно закрытую крышку сосуда бывает проще после прогрева ее под струей горячей воды.

9. Длинные паровые трубы часто имеют участок U-образной формы. Почему?
10. Почему неправильно говорить, что воздух расширяется со скоростью $3,4$ мл/л на градус Цельсия? Когда это утверждение верно?
11. Известно, что камни нагреваются, когда в них поддерживают огонь. Почему дымоходы не используются в качестве каркаса зданий или сооружений?
12. Объясните, почему добавлять воду в перегретый автомобильный двигатель следует очень медленно и только при работающем двигателе.
13. Стекланный сосуд может расколоться, если одну из его частей нагреть или охладить быстрее, чем другие части. Объясните.
14. Основным преимуществом тугоплавкого стекла (пирекса) является то, что коэффициент линейного расширения у него значительно меньше, чем у обычного стекла (табл. 17.1). Объясните, почему это приводит к повышению термостойкости тугоплавкого стекла.
15. Почему можно считать, что спиртовой термометр определяет температуру с более высокой точностью, чем ртутный термометр?
16. Если холодный ртутный термометр поместить в емкость с горячей водой, то уровень ртути сначала немного снизится, а затем будет расти. Объясните.
17. Плоская биметаллическая пластинка состоит из алюминиевой пластинки, прикрепленной к железной. Какой из металлов при нагревании окажется на внешней стороне изгиба?
18. Объясните, почему реки замерзают сначала на поверхности.
19. Как вы думаете, какая температура будет у воды на дне глубокого холодного озера? (Подсказка: см. рис. 17.4.)
20. Увеличится или уменьшится выталкивающая сила, действующая на алюминиевую сфе-

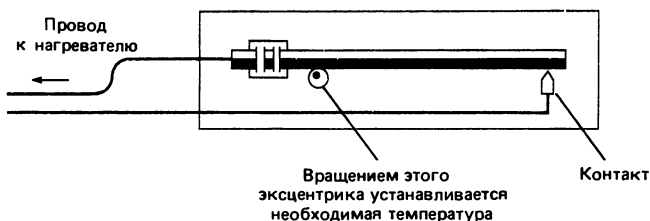


Рис. 17.8. Типичный термостат.

ру, погруженную в воду, если температура воды увеличится с 20 до 40 °С?

21. При температуре 0 °С плоский однородный цилиндр из свинца плавает в ртути. Погрузится или всплывет цилиндр, если температура увеличится?

22. Какая шкала Фаренгейта, Цельсия или Кельвина может считаться наиболее «естественной» с научной точки зрения? Поясните ваш ответ.

23. Если, согласно измерениям, масса атома равна $6,7 \cdot 10^{-27}$ кг, то какой это атом, по вашему мнению?

* 24. Имеет ли существенное значение с практической точки зрения то, какой газ используется в газовом термометре постоянного объема? Если имеет, то объясните почему. (Подсказка: см. рис. 17.7.)

Задачи

Раздел 17.1

1. (I) Определите массу золотого слитка, в котором содержится то же количество атомов, что и в слитке железа массой 1 кг.

Раздел 17.2

2. (I) а) «Комнатную температуру» часто принимают равной 68 °F. Чему равна эта температура в градусах Цельсия? б) Температура нити в лампе накаливания приблизительно равна 1800 °С; какова эта температура по шкале Фаренгейта?

3. (I) Первоначальная температурная шкала Цельсия [согласно Андерсу Цельсию (1701–1744)] была установлена таким образом, что температура замерзания воды равнялась 100°, а температура кипения воды была равна 0°. Какой температуре на этой шкале соответствует температура 25 °С?

4. (I) При температуре 0,0 °С столбик спирта в стеклянном термометре имеет длину 12,45 см, а при температуре 100,0 °С – длину 21,30 см. Определите температуру в случае, когда длина столбика равна а) 15,10 см; б) 22,95 см.

5. (II) При какой температуре шкала Фаренгейта и стоградусная шкала дадут одно и то же численное значение?

Раздел 17.5

6. (I) Бетонная автострада уложена из блоков длиной 26 м. Какой ширины должны быть зазоры между блоками, чтобы за счет теплового расширения автострада не искривля-

лась, если температура может изменяться в пределах от –20 до +50 °С?

7. (I) Стальная рулетка для точных измерений откалибрована при температуре 20 °С. а) Какие показания будет давать такая рулетка при температуре 40 °С – завышенные или заниженные? б) Какова ошибка в процентах?

8. (I) Во сколько раз изменятся коэффициенты линейного расширения в табл. 17.1, если температуру измерять по шкале Фаренгейта?

9. (II) Чтобы избежать разрывов частей механизмов, часто используют заклепки, размер которых больше размеров отверстий. Для этого перед помещением заклепки в отверстие ее охлаждают (обычно при помощи сухого льда). Стальную заклепку диаметром 2,385 см нужно вставить в отверстие диаметром 2,382 см. До какой температуры нужно охладить заклепку, чтобы она подошла к отверстию, имеющему температуру 20 °С?

10. (II) Плотность ртути при температуре 20 °С равна $13,59 \cdot 10^3$ кг/м³. Какова ее плотность при температуре 65 °С?

11. (II) Однородная прямоугольная пластинка длиной l и шириной w имеет коэффициент линейного расширения α . Покажите, что если пренебречь очень малыми величинами, то изменение площади пластинки, обусловленное изменением температуры ΔT , дается выражением $\Delta A = 2\alpha lw \Delta T$.

12. (II) Железная сфера имеет диаметр 28,0 см. На сколько изменится ее объем, если сферу нагреть от 20 до 200 °С?

13. (II) Маятник часов изготовлен из твердой латуни. При температуре 25 °С период его колебаний равен 1,12 с и часы показывают правильное время. Пока владельцы часов были в зимнем отпуске в течение двух недель, средняя температура в доме была равна –5 °С. На сколько ошибочными будут показания часов к моменту возвращения владельцев? Будут часы отставать или уйдут вперед?

14. (II) а) Покажите, что изменение плотности ρ вещества при изменении температуры на ΔT дается выражением $\Delta \rho = -\beta \rho \Delta T$. б) Чему равно относительное изменение плотности свинцовой сферы, температура которой понизилась от 30 до –30 °С?

15. (II) Температура стержня, имеющего начальную длину L_1 , изменяется от T_1 до T_2 . Выведите выражение для его новой длины L_2 через T_1 , T_2 и α . Предположите, что а) величина α постоянна, б) величина α является некоторой функцией температуры, т.е. $\alpha = \alpha(T)$, и в) $\alpha = \alpha_0 + bT$, где α_0 и b – постоянные.

16. (II) Латунная втулка помещена в кольцо, сделанное из железа. При комнатной температуре диаметр втулки равен 9,12 см, а внут-

ренный диаметр кольца $-9,095$ см. Какова должна быть температура этих деталей, чтобы втулка точно вписалась в кольцо?

17. (II) Жидкость заключена в длинный узкий сосуд так, что она может расширяться, по существу, лишь в одном направлении. Покажите, что в этом случае коэффициент линейного расширения α приблизительно равен коэффициенту объемного расширения β .

18. (II) Покажите, что в изотропном твердом теле при малой величине расширения выполняется соотношение $\beta = 3\alpha$, где β и α — коэффициенты объемного и линейного расширения соответственно.

19. (II) В обычном, наполненном до краев стакане находится $288,3$ мл воды при температуре 10°C . Сколько воды вытечет из стакана (если вообще вытечет), если температура увеличится до 30°C ?

20. (II) Получите формулу для изменения площади поверхности однородной твердой сферы радиусом r , если коэффициент ее линейного расширения равен α (он считается постоянным), а температура ее изменилась на величину ΔT . б) На сколько увеличится площадь поверхности твердой железной сферы радиусом $88,0$ см, если температура ее возрастет от 20 до 200°C ?

21. (III) При температуре 0°C железный куб плавает в чаше с жидкой ртутью. а) Если температура повысилась до 30°C , то погрузится или всплывет куб в ртуть? б) На сколько процентов изменится объем погруженной части куба?

22. (III) В подшипнике без трения твердое железное цилиндрическое колесо массой $12,4$ кг и радиусом $0,45$ м вращается вокруг своей оси с угловой скоростью $\omega = 32,8$ рад/с. Каково будет относительное изменение ω , если температура повысится от 20 до 80°C ?

23. (III) а) Внутренний диаметр трубки ртутного термометра равен $0,120$ мм. Его колба имеет объем $0,250$ см³. На сколько передвинется уровень ртути, если температура повысится от 10 до 20°C ? Учтите в ваших расчетах расширение стекла (пирекса). б) Выведите формулу для длины столба ртути через соответствующие переменные.

*Раздел 17.6

24. (I) При какой температуре сила сжатия бетона превзойдет предельное значение в блоках, рассмотренных в примере 17.4?

25. (II) а) Горизонтальная стальная двутавровая балка площадью поперечного сечения $0,016$ м² жестко соединена с двумя вертикальными стальными фермами. Балка была смон-

тирована при температуре 25°C . Какое напряжение возникнет в балке, когда температура упадет до -14°C ? б) Будет ли превышен предел прочности стали? в) Какое напряжение возникнет в балке, если она сделана из бетона, а поперечное сечение ее равно $0,13$ м²? Складывается ли балка?

26. (II) Винную бочку диаметром $122,860$ см нужно стянуть железным ободом при температуре 20°C . Внутренний диаметр обода равен $122,848$ см при температуре 20°C . Ширина его равна $8,7$ см, а толщина $-0,55$ см. а) До какой температуры нужно нагреть обод, чтобы он наделся на бочку? б) Каково будет напряжение в ободке, когда он охладится до температуры 20°C ?

Раздел 17.7

27. (I) Определите значения следующих температур по шкале Кельвина: а) 37°C ; б) 80°F ; в) -196°C .

28. (I) Шкала температур Ренкина соотносится со шкалой Фаренгейта так же, как шкала Кельвина со шкалой Цельсия. Это значит, что величина градуса на этой шкале такая же, как на шкале Фаренгейта, а нуль сдвинут так, что 0°R совпадает с абсолютным нулем температур. Определите температуру а) точки замерзания и б) точки кипения воды в градусах Ренкина. в) Какова температура абсолютного нуля в градусах Фаренгейта?

29. (II) Типичные температуры внутри Земли и Солнца приблизительно равны $4 \cdot 10^3$ и $1,5 \cdot 10^7$ °C соответственно. а) Каковы эти температуры в кельвинах? б) Если человек забыл заменить градусы Цельсия на кельвины, то какую относительную ошибку (в процентах) он совершил?

Раздел 17.8

30. (I) Газ, занимающий объем $5,00$ м³, сначала находился при нормальных условиях, затем давление было увеличено до $4,0$ атм, а температура возросла до 25°C . Чему теперь будет равен объем газа?

31. (I) Давление гелия, находящегося в цилиндре, первоначально было равно 30 атм. После того как этим гелием надули множество баллонов, его давление уменьшилось до 6 атм. Какая доля первоначального количества газа осталась в цилиндре?

32. (II) Запишите закон идеального газа через плотность газа.

33. (II) Вычислите плотность кислорода при нормальных условиях, пользуясь законом идеального газа.

34. (II) Емкость для хранения азота N_2 содержит 25,7 кг этого газа при абсолютном давлении 2,60 атм. Определите давление в емкости, если азот будет замещен равным по массе количеством углекислого газа (CO_2).

35. (II) Емкость содержит 28,0 кг кислорода (O_2) при избыточном давлении 6,70 атм. Кислород заменен на гелий. Сколько килограммов последнего потребуется для создания избыточного давления 8,25 атм?

36. (II) Газообразный гелий количеством 8,10 моль находится при температуре $20^\circ C$ и избыточном давлении 0,190 атм. Вычислите: а) объем газообразного гелия при этих условиях; б) температуру в случае, когда объем газа уменьшится в два раза при избыточном давлении 2,10 атм.

37. (II) Дом имеет объем 600 м^3 . а) Какова полная масса воздуха внутри дома при температуре $0^\circ C$? б) Если температура повысилась до $25^\circ C$, то какая масса воздуха войдет в дом или выйдет из него?

38. (II) Определите давление внутри сосуда емкостью 20 л, содержащего 24 кг аргона при температуре $20^\circ C$.

39. (II) Шина заполнена воздухом при температуре $15^\circ C$ с избыточным давлением 190 кПа. Если температура шины повысилась до $40^\circ C$, то какую долю исходного количества воздуха нужно удалить из шины, чтобы поддерживать первоначальное давление 190 кПа?

40. (II) Если 50,0 л кислорода, находящегося при температуре $10^\circ C$ и абсолютном давлении 1,88 атм, сжать до объема 36,6 л и в то же время повысить его температуру до $80^\circ C$, то чему будет равно его новое давление?

41. (II) Аквалангист, находясь на глубине 12 м от поверхности воды, вдохнул воздух и заполнил весь объем своих легких, равный 5,5 л. До какого объема расширятся его легкие, если

он быстро вынырнет на поверхность? Благо-разумно ли поступать таким образом?

42. (II) Морская декомпрессионная камера для ныряльщиков представляет собой простой перевернутый цилиндр, открытый снизу. Эта камера показана на рис. 17.9. Когда она полностью погружена вблизи поверхности воды, объем заключенного в камере воздуха равен $8,2 \text{ м}^3$, а температура равна $25^\circ C$. а) Какова должна быть минимальная масса цилиндра, чтобы он не всплывал? б) Предположите, что реальная масса цилиндра равна его минимальной массе, определенной в п. „а“. Цилиндр опустили на глубину 50 м, где температура равна $12^\circ C$. Каково будет напряжение удерживающего цилиндр кабеля? (Воздух в цилиндре не добавлялся и не выходил из него.) Считайте, что воздух (в действительности специальная газовая смесь для ныряльщика) ведет себя как идеальный газ, что его весом можно пренебречь, а морская вода имеет постоянную плотность $1,025 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

43. (II) Получите формулу для коэффициента объемного расширения β идеального газа при постоянном давлении через величины P , V , T и (или) n .

44. (II) Подъемная сила воздушного шара достигается за счет того, что воздух внутри баллона нагревают и плотность его становится меньше плотности окружающего воздуха. Допустим, что объем воздушного шара равен 1500 м^3 , а необходимая подъемная сила равна 2500 Н (согласно грубой оценке веса оборудования и пассажира). Вычислите температуру воздуха внутри воздушного шара, при которой создается необходимая подъемная сила. Считайте, что температура окружающего воздуха равна $0^\circ C$ и воздух при этих условиях является идеальным газом. Какие факторы ограничивают максимальную высоту подъема шара при таком методе создания подъемной силы и при данной нагрузке? (Изменениям состояния воздуха, например ветром, пренебрегите.)

45. (II) Воздушный пузырек на дне озера глубиной 16 м имеет объем $1,10 \text{ см}^3$. Температура на дне равна $5^\circ C$, а на поверхности $16^\circ C$. Определите объем пузырька в тот момент, когда он достигнет поверхности воды.

46. (II) Сравните значение плотности водяного пара при температуре $100^\circ C$ и давлении 1 атм со значением, полученным на основании закона идеального газа. Почему эти значения должны отличаться друг от друга?

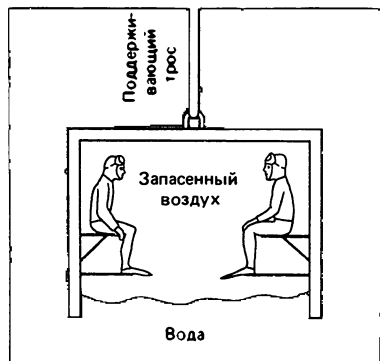


Рис. 17.9.

Раздел 17.9

47. (I) Вычислите число молекул в 1 м^3 идеального газа при нормальных условиях.

48.(I) Сколько молей содержится в 1,000 л воды? А сколько молекул?

49.(II) Самое низкое давление, получаемое с помощью самой совершенной вакуумной техники, приблизительно равно 10^{-12} Н/м². Сколько молекул содержится при таком давлении в 1 см³ при температуре 0 °С?

50.(II) Если известно значение атмосферного давления на поверхности Земли, то чему будет равно полное число молекул воздуха в земной атмосфере?

51.(II) Кубический сосуд объемом $8,0 \cdot 10^{-3}$ м³ заполнен воздухом при атмосферном давлении и температуре 20 °С. Сосуд закрыт и нагрет до температуры 150 °С. Какая результирующая сила будет действовать на каждую из граней кубического сосуда?

Раздел 17.10

52.(II) Парциальное давление углекислого газа (CO₂) в легких приблизительно равно 35 мм рт. ст., что несколько выше давления окружающего воздуха. Каково процентное содержание CO₂ в воздухе в легких?

*Раздел 17.11

*53.(I) В точке кипения серы (444,6 °С) давление в газовом термометре постоянного

объема равно 187 мм рт. ст. Оцените: а) давление в тройной точке воды; б) температуру в тот момент, когда давление в термометре равно 112 мм рт. ст.

*54.(I) Каково предельное отношение давления в точке кипения воды при давлении 1 атм к давлению в тройной точке в газовом термометре постоянного объема? (Сделайте пять необходимых рисунков.)

*55.(II) С помощью рис. 17.7 определите ошибку в показаниях газового термометра постоянного объема, в котором используется кислород, если в точке кипения воды при давлении 1 атм он показывает давление $P = 268$ мм рт. ст. Выразите ответ а) в кельвинах; б) в процентах.

56.(II) Газовый термометр постоянного объема используется для определения температуры плавления вещества. Давление в термометре при этой температуре равно 218 мм рт. ст. В тройной точке воды давление в термометре стало равным 286 мм рт. ст. Некоторое количество газа удалено теперь из колбы термометра, и в тройной точке воды он показывает давление 163 мм рт. ст. При температуре плавления вещества давление в термометре равно 128 мм рт. ст. Оцените с максимальной возможной точностью температуру точки плавления вещества.