

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

ПОЧЕМУ ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ИЗУЧАЮТСЯ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

Дадим ряд определений и понятий, которые в дальнейшем будем использовать и уточнять. Сформулируем основные задачи молекулярной физики.

Макроскопические тела. Мы живём в мире макроскопических тел. Наше тело — это тоже макроскопическое тело.

Запомни

В физике **макроскопическими телами** называются тела, состоящие из огромного числа молекул.

Газ в баллоне, вода в стакане, песчинка, камень, стальной стержень, земной шар — всё это примеры макроскопических тел.

Механика и механическое движение.

Механика изучает движение тел, но она не в состоянии объяснить, почему существуют твёрдые, жидкие и газообразные тела и почему эти тела могут переходить из одного состояния в другое. Исследование внутренних свойств тел не входит в задачу механики.

В механике говорят о силах как причинах изменения скоростей тел, но природа этих сил, их происхождение не выясняются. Остаётся непонятным, почему при сжатии тел появляются силы упругости, почему возникает трение. На многие, очень многие вопросы механика Ньютона ответов не даёт. Это хорошо понимал и сам Ньютон.

В механике Ньютона имеют **ИНТЕРЕСНО** дело с механическим движением макроскопических тел — перемещением одних тел относительно других в пространстве с течением времени.

«Я не знаю, чем я кажусь миру; мне самому кажется, что я был только мальчишкой, играющим на берегу моря и развлекающимся тем, что от времени до времени находил более гладкие камушки или более красивую раковину, чем обыкновенно, в то время как Великий океан истины лежал передо мной совершенно неразгаданным». И. Ньютон.

Тепловые явления.

Запомни

Явления, связанные с нагреванием или охлаждением тел, с изменением их температуры, называются **тепловыми**.

Механическое движение не вызывает в теле каких-либо существенных изменений, если не происходит катастрофических столкновений. Но нагревание или охлаждение тела способно изменить его до неузнаваемости. Сильно нагрев прозрачную, но всё же видимую воду, мы превратим её в невидимый пар. Сильное охлаждение превратит воду в кусок льда. Если вдуматься, то эти явления загадочны и удивительны, они не вызывают нашего изумления лишь потому, что мы привыкли к ним с детства.

Важно

Надо найти законы, которые могли бы объяснить изменения в телах, когда сами тела неподвижны и когда с точки зрения механики с ними не происходит ничего. Эти законы описывают особый вид движения материи — **тепловое движение**, присущее всем макроскопическим телам независимо от того, перемещаются они в пространстве или нет.

Тепловое движение молекул. Все тела состоят из атомов и молекул. Тепловые явления происходят внутри тел и всецело определяются движением этих частиц. Движение атомов и молекул мало напоминает движение собаки или автомобиля. Атомы и молекулы вещества совершают беспорядочное движение, в котором трудно усмотреть следы какого-либо порядка и регулярности.

Запомни

Беспорядочное движение молекул называют **тепловым движением**.

Движение молекул беспорядочно из-за того, что число их в телах, которые нас окружают, необозримо велико. Каждая молекула беспрестанно меняет свою скорость при столкновениях с другими молекулами. В результате траектория её движения оказывается чрезвычайно запутанной, само движение — хаотичным, несравненно более хаотичным, чем движение муравьёв в разорённом муравейнике.

Беспорядочное движение огромного числа молекул качественно отличается от упорядоченного механического перемещения тел. Оно представляет собой особый вид движения материи со своими особыми свойствами. Об этих свойствах и пойдёт речь в дальнейшем.

Значение тепловых явлений. Привычный облик нашей планеты существует и может существовать только в довольно узком интервале температур. Если бы температура превысила $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, то на Земле при обычном атмосферном давлении не было бы рек, морей и океанов, не было бы воды вообще. Вся вода превратилась бы в пар. А при понижении температуры на несколько десятков градусов океаны превратились бы в громадные ледники.

Даже изменение температуры лишь на $20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ при смене времён года меняет на средних широтах облик этого участка Земли.

С наступлением весны начинается пробуждение природы. Леса одеваются листвой, начинают зеленеть луга. Зимой же жизнь растений замирает. Толстый слой снега покрывает поверхность Земли.

Температура животных и человека поддерживается внутренними механизмами терморегуляции на строго определённом уровне. При этом интервал возможных значений температуры в данном случае очень мал. Достаточно температуре повыситься на несколько десятых градуса, как мы уже чувствуем себя нездоровыми. Изменение же температуры на несколько градусов ведёт к гибели организмов. Поэтому неудивительно, что тепловые явления привлекали внимание людей с древнейших времён. Умение добывать и поддерживать огонь сделало человека относительно независимым от колебаний температуры окружающей среды. Это было одним из величайших изобретений человечества.

Изменение температуры оказывает влияние на все свойства тел. Так, при нагревании или охлаждении изменяются размеры твёрдых тел и объёмы



жидкостей. Значительно меняются механические свойства тел, например упругость. Кусок резиновой трубки уцелеет, если ударить по нему молотком. Но при охлаждении до температуры ниже $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ резина становится хрупкой, как стекло, и от лёгкого удара резиновая трубка разбивается на мелкие кусочки. Лишь после нагревания резина вновь обретает свои упругие свойства.

Кроме механических свойств, при изменении температуры меняются и другие свойства тел, например сопротивление проводника, магнитные свойства, цвет тела и др. Так, если сильно нагреть постоянный магнит, то он перестанет притягивать железные предметы, остывающие угли изменяют цвет от голубого до жёлтого, постепенно становясь красными.

Все перечисленные выше и многие другие тепловые явления подчиняются определённым законам. Открытие законов, определяющих тепловые явления, позволяет эффективно применять эти явления на практике и использовать в технике. Современные тепловые двигатели, установки для сжижения газов, холодильные аппараты и многие другие устройства конструируют на основе этих законов.

Молекулярно-кинетическая теория. Ещё философы древности догадывались о том, что теплота — это вид внутреннего движения. Но только в XVIII в. начала развиваться последовательная *молекулярно-кинетическая теория*.

Важно

Молекулярно-кинетическая теория даёт объяснение свойств макроскопических тел и тепловых процессов, происходящих в них, на основе представлений о том, что все тела состоят из отдельных беспорядочно движущихся частиц.

Большой вклад в развитие молекулярно-кинетической теории был сделан М. В. Ломоносовым. Он рассматривал теплоту как вращательное движение частиц тела.

Важность этой теории для объяснения многих явлений природы трудно переоценить.



М. В. Ломоносов
(1711—1765)





ГЛАВА 8 ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ



§ 53

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. РАЗМЕРЫ МОЛЕКУЛ

Какие физические объекты (системы) изучает молекулярная физика?
Как различить механические и тепловые явления?

Приведите примеры тепловых явлений, происходящих в классе, дома, на улице.

В основе молекулярно-кинетической теории строения вещества лежат три утверждения:

Важно

- 1) вещество состоит из частиц; 2) эти частицы беспорядочно движутся;
- 3) частицы взаимодействуют друг с другом.

Каждое утверждение строго доказано с помощью опытов.

Свойства и поведение всех без исключения тел определяются движением взаимодействующих друг с другом частиц: молекул, атомов или ещё более малых образований — элементарных частиц.

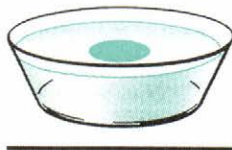


Рис. 8.1

Оценка размеров молекул. Для полной уверенности в существовании молекул надо определить их размеры. Проще всего это сделать, наблюдая расплывание капельки масла, например оливкового, по поверхности воды. Масло никогда не займёт всю поверхность, если мы возьмём достаточно широкий сосуд (рис. 8.1). Нельзя заставить капельку объёмом 1 мм^3 расплыться так, чтобы она заняла площадь поверхности более $0,6 \text{ м}^2$. Предположим,

что при растекании масла по максимальной площади оно образует слой толщиной всего лишь в одну молекулу — «мономолекулярный слой». Толщину этого слоя нетрудно определить и тем самым оценить размеры молекулы оливкового масла.

Объём V слоя масла равен произведению его площади поверхности S на толщину d слоя, т. е. $V = Sd$. Следовательно, линейный размер молекулы оливкового масла равен:

$$d = \frac{0,001 \text{ см}^3}{6000 \text{ см}^2} \approx 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ см.}$$



Обсудите с одноклассником, можно ли доказать первое утверждение, проведя опыт по окрашиванию воды кристалликом марганцовокислого калия? Подумайте, о чём свидетельствует явление распространения запахов ароматических веществ в помещении. Подумайте, как экспериментально доказать, что частицы вещества притягиваются и отталкиваются.



Рис. 8.2

Современные приборы позволяют увидеть и даже измерить отдельные атомы и молекулы. На рисунке 8.2 показана микрофотография поверхности кремниевой пластины, где бугорки — это отдельные атомы кремния. Подобные изображения впервые научились получать в 1981 г. с помощью сложных туннельных микроскопов.



Размеры молекул, в том числе и оливкового масла, больше размеров атомов. Диаметр любого атома примерно равен 10^{-8} см. Эти размеры так малы, что их трудно себе представить. В таких случаях прибегают к помощи сравнений.

Вот одно из них. Если пальцы сжать в кулак и увеличить его до размеров земного шара, то атом при том же увеличении станет размером с кулак.

Число молекул. При очень малых размерах молекул число их в любом макроскопическом теле огромно. Подсчитаем примерное число молекул в капле воды массой 1 г и, следовательно, объёмом 1 см^3 .

Диаметр молекулы воды равен примерно $3 \cdot 10^{-8}$ см. Считая, что каждая молекула воды при плотной упаковке молекул занимает объём $(3 \cdot 10^{-8} \text{ см})^3$, можно найти число молекул в капле, разделив объём капли (1 см^3) на объём, приходящийся на одну молекулу:

$$N = \frac{1 \text{ см}^3}{(3 \cdot 10^{-8})^3} \approx 3,7 \cdot 10^{22}.$$

Масса молекул. Массы отдельных молекул и атомов очень малы. Мы вычислили, что в 1 г воды содержится $3,7 \cdot 10^{22}$ молекул. Следовательно, масса одной молекулы воды (H_2O) равна:

$$m_{0\text{H}_2\text{O}} = \frac{1 \text{ г}}{3,7 \cdot 10^{22}} \approx 2,7 \cdot 10^{-23} \text{ г}. \quad (8.1)$$

Массу такого же порядка имеют молекулы других веществ, исключая огромные молекулы органических веществ; например, белки имеют массу, в сотни тысяч раз большую, чем масса отдельных атомов. Но всё равно их массы в макроскопических масштабах (граммах и килограммах) чрезвычайно малы.

Относительная молекулярная масса. Так как массы молекул очень малы, удобно использовать в расчётах не абсолютные значения масс, а относительные.

Важно

По международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода (так называемая углеродная шкала атомных масс).

Запомни

Относительной молекулярной (или атомной) массой M_r вещества называют отношение массы m_0 молекулы (или атома) данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы $m_{0\text{C}}$ атома углерода:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0\text{C}}}. \quad (8.2)$$

Относительные атомные массы всех химических элементов точно измерены. Складывая относительные атомные массы элементов, входящих в состав молекулы вещества, можно вычислить относительную молекулярную массу вещества. Например, относительная молекулярная масса углекислого газа CO_2 приближённо равна 44, так как относительная атом-



При каждом вдохе вы захватываете столько молекул, что если бы все они после выдоха равномерно распределились в атмосфере Земли, то каждый житель планеты при вдохе получил бы две-три молекулы, побывавшие в ваших лёгких.



ная масса углерода практически равна 12, а кислорода примерно 16: $12 + 2 \cdot 16 = 44$.

ИНТЕРЕСНО

Сравнение атомов и молекул с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода было принято в 1961 г. Главная причина такого выбора состоит в том, что углерод входит в огромное число различных химических соединений. Множитель $\frac{1}{12}$ введён для того, чтобы относительные массы атомов были близки к целым числам.



Откройте в электронном приложении таблицу Менделеева и посчитайте относительную молекулярную массу некоторых известных вам молекул.

Количество вещества и постоянная Авогадро. Количество вещества наиболее естественно было бы измерять числом молекул или атомов в теле. Но число молекул в любом макроскопическом теле так

велико, что в расчётах используют не абсолютное число молекул, а относительное их число.

В Международной системе единиц количество вещества выражают в *молях*.

ЗАПОМНИ

Один моль — это количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько атомов содержится в углероде массой 0,012 кг.

Значит, в одном моле любого вещества содержится одно и то же число атомов или молекул.

ЗАПОМНИ

Число атомов или молекул, содержащихся в веществе, взятом в количестве 1 моль, обозначают N_A и называют **постоянной Авогадро** в честь итальянского учёного (XIX в.).



Для определения постоянной Авогадро надо найти массу одного атома углерода. Приблизжённая оценка массы может быть произведена так, как это было сделано выше для массы молекулы воды (наиболее точные методы основаны на отклонении пучков ионов электромагнитным полем).

Для массы атома углерода измерения дают: $m_{\text{OC}} = 1,995 \cdot 10^{-26}$ кг.

Постоянную Авогадро N_A можно определить, разделив массу углерода, взятого в количестве одного моля, на массу одного атома углерода:

$$N_A = 0,012 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{1}{m_{\text{OC}}} = 0,012 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{1}{1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

$$N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}. \quad (8.3)$$

Наименование моль^{-1} указывает на то, что N_A — число атомов в одном моле любого вещества. Если, например, количество вещества $\nu = 2,5$ моль, то число молекул в теле $N_A = \nu N_A = 1,5 \cdot 10^{24}$. Отсюда видно, что

Важно

количество вещества равно отношению числа N молекул в данном теле к постоянной Авогадро N_A , т. е. к числу молекул в одном моле вещества:

$$\nu = N/N_A. \quad (8.4)$$



Огромное числовое значение постоянной Авогадро показывает, насколько малы микроскопические масштабы по сравнению с макроскопическими.

Тело, обладающее количеством вещества 1 моль, имеет привычные для нас макроскопические размеры и массу порядка нескольких десятков граммов.

Молярная масса. Наряду с относительной молекулярной массой M_r в физике и химии широко используют понятие *молярная масса*.



Подумайте, можно ли по числу молей сравнивать массы двух разных веществ.

ЗАПОМНИ

Молярной массой M вещества называют массу вещества, взятого в количестве 1 моль.

Согласно такому определению молярная масса вещества равна произведению массы молекулы на постоянную Авогадро:

$$M = m_0 N_A. \quad (8.5)$$

Масса m любого количества вещества равна произведению массы одной молекулы на число молекул в теле:

$$m = m_0 N. \quad (8.6)$$

Заменив N_A и N в формуле (8.4) их выражениями из формул (8.5) и (8.6), получим

$$\nu = m/M. \quad (8.7)$$

ВАЖНО

Количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе.

Именно такое определение количества вещества дано в учебнике химии. Число молекул любого количества вещества массой m и молярной массой M согласно формулам (8.4) и (8.7) равно:

$$N = \nu N_A = N_A m/M. \quad (8.8)$$

Молекулярная и молярная массы. Количество вещества

Найти



1. Какие измерения надо произвести, чтобы оценить размеры молекулы оливкового масла?
2. Если бы атом увеличился до размеров макового зёрнышка (0,1 мм), то размеров какого тела при том же увеличении достигло бы зёрнышко?
3. Перечислите известные вам доказательства существования молекул, не упомянутые в тексте.
4. Чему равна относительная молекулярная масса воды?
5. Заполните таблицу.

**Основные формулы МКТ**

Количество вещества (через число частиц)	
Количество вещества (через массу тела)	
Масса одной молекулы	
Концентрация молекул	



При решении большей части задач нужно уметь определять молярные массы веществ. Для этого по известным из таблицы Менделеева относительным атомным массам надо определить относительную молекулярную массу, а затем и молярную массу по формуле $M = 10^{-3} M_r$ кг/моль, где M — молярная масса, M_r — относительная молекулярная масса.

Во многих задачах требуется по известной массе m тела определить количество вещества ν или число молекул (атомов) N в нём. Для этого используют формулы $\nu = \frac{m}{M}$ и $N = \frac{m}{M} N_A$. Постоянную Авогадро N_A лучше запомнить. Массы отдельных молекул определяются по формуле $m_0 = \frac{M}{N_A}$. В некоторых задачах массу вещества нужно выразить через его плотность ρ и объём V .

Задача 1. Определите молярную массу воды и затем массу одной молекулы воды.

Решение. Относительная атомная масса водорода равна 1,00797, а кислорода равно 15,9994. Химическая формула воды — H_2O . Следовательно, относительная молекулярная масса воды равна:

$$M_r = 2 \cdot 1,00797 + 15,9994 = 18,01534 \approx 18.$$

Молярная масса воды

$$M \approx 10^{-3} \cdot 18 \text{ кг/моль} = 0,018 \text{ кг/моль}.$$

В любом веществе, взятом в количестве 1 моль, содержится N_A молекул, где N_A — число Авогадро; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$. Тогда масса одной молекулы

$$\text{воды } m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{0,018 \text{ кг/моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Задача 2. Определите количество вещества и число молекул, содержащихся в углекислом газе массой 1 кг.

Решение. Так как молярная масса углекислого газа $M = 0,044$ кг/моль,

$$\text{то количество вещества } \nu = \frac{m}{M} = \frac{1}{0,044} \frac{\text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{кг}} \approx 23 \text{ моль}.$$

$$\text{Число молекул } N = \frac{m}{M} N_A = 23 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 1,4 \cdot 10^{25}.$$

Задача 3. Из блюдца испаряется вода массой 50 г за 4 сут. Определите среднюю скорость испарения — число молекул воды, вылетающих из блюдца за 1 с.

Решение. Молекула воды H_2O состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Молярная масса воды $M = 0,018$ кг/моль.

$$\text{Число молекул воды в блюдце } N = \frac{m}{M} N_A. \text{ Средняя скорость испарения } \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N}{t} = \frac{m}{M} N_A \frac{1}{t} = 4,8 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}.$$



Задача 4. Определите толщину серебряного покрытия пластинки площадью 1 см^2 , если оно содержит серебро в количестве $0,02$ моль. Плотность серебра равна $1,05 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$.

Решение. Объём слоя серебра, покрывающего пластинку, $V = Sd$. Масса серебряного покрытия равна $m = \rho Sd = \nu M$. Молярная масса серебра $M = 0,108 \text{ кг/моль}$.

$$\text{Тогда } d = \frac{\nu M}{\rho S} = 2 \text{ мм.}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Какую площадь может занять капля оливкового масла объёмом $0,02 \text{ см}^3$ при расплывании её на поверхности воды?
2. Определите молярные массы водорода и гелия.
3. Во сколько раз число атомов в углероде массой 12 кг превышает число молекул в кислороде массой 16 кг ?
4. Чему равно количество вещества (в молях), содержащегося в воде массой 1 г ?
5. Молярная масса азота равна $0,028 \text{ кг/моль}$. Чему равна масса молекулы азота?
6. Определите число атомов в меди объёмом 1 м^3 . Молярная масса меди $M = 0,0635 \text{ кг/моль}$, её плотность $\rho = 9000 \text{ кг/м}^3$.
7. Плотность алмаза 3500 кг/м^3 . Какой объём займут 10^{22} атомов этого вещества?
8. Определите число атомных слоёв серебряного покрытия толщиной 15 мкм . Плотность серебра $1,05 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$.

С1. На поверхность воды капают раствор подсолнечного масла в бензине. Сначала на поверхности воды образуется круглое радужное пятно, затем бензин испаряется, пятно исчезает. Посыпание поверхности воды тальком через тонкое ситечко позволяет обнаружить границы невидимого до того масляного пятна диаметром 20 см . Оцените по этим данным размер молекулы масла, если концентрация масла в бензине $0,1 \%$ (по объёму), а объём капли бензина $0,05 \text{ мл}$. Плотность бензина и масла примерно равны.

С2. Определите массу золотого слитка, содержащего то же количество атомов, что и железный брусок массой $0,5 \text{ кг}$. Молярные массы золота и железа определите по периодической таблице Менделеева.

С3. Определите объём золотого слитка, содержащего то же количество атомов, что и железный брусок объёмом 1 дм^3 . Плотность золота $\rho_1 = 19,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность железа $\rho_2 = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.





§ 55 БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Вспомните из курса физики основной школы явление диффузии. Чем может быть объяснено это явление?

Ранее вы узнали, что такое *диффузия*, т. е. проникновение молекул одного вещества в межмолекулярное пространство другого вещества. Это явление определяется беспорядочным движением молекул. Этим можно объяснить, например, тот факт, что объём смеси воды и спирта меньше объёма составляющих её компонентов.



Вырежьте из бумаги кружочки разных диаметров и покажите, что площадь, которую занимают кружочки, расположенные вперемешку, меньше суммы площадей, занимаемых этими кружочками в отдельности.

Но самое очевидное доказательство движения молекул можно получить, наблюдая в микроскоп мельчайшие, взвешенные в воде частицы какого-либо твёрдого вещества. Эти частицы совершают беспорядочное движение, которое называют *броуновским*.

Запомним

Броуновское движение — это тепловое движение взвешенных в жидкости (или газе) частиц.



Наблюдение броуновского движения. Английский ботаник Р. Броун (1773—1858) впервые наблюдал это явление в 1827 г., рассматривая в микроскоп взвешенные в воде споры плауна.

Позже он рассматривал и другие мелкие частицы, в том числе частички камня из египетских пирамид. Сейчас для наблюдения броуновского движения используют частички краски гуммигут, которая нерастворима в воде. Эти частички совершают беспорядочное движение. Самым поразительным и непривычным для нас является то, что это движение никогда не прекращается. Мы ведь привыкли к тому, что любое движущееся тело рано или поздно останавливается. Броун вначале думал, что споры плауна проявляют признаки жизни.

Важно

Броуновское движение — тепловое движение, и оно не может прекратиться. С увеличением температуры интенсивность его растёт.



На рисунке 8.3 приведены траектории движения броуновских частиц. Положения частиц, отмеченные точками, определены через равные промежутки времени — 30 с. Эти точки соединены прямыми линиями. В действительности траектория частиц гораздо сложнее.



Проведите эксперимент по определению скорости распространения запаха духов в вашем классе. Можно ли будет считать эту скорость скоростью движения молекул пахучего вещества?

Объяснение броуновского движения. Объяснить броуновское движение можно только на основе молекулярно-кинетической теории.

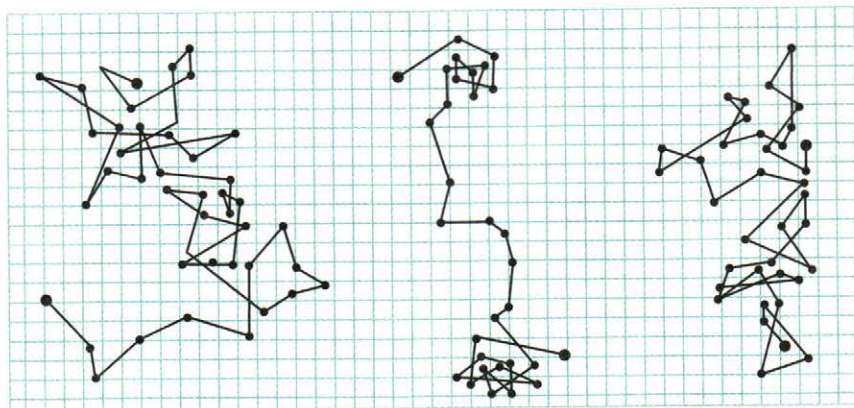


Рис. 8.3

«Немногие явления способны так увлечь наблюдателя, как броуновское движение. Здесь наблюдателю позволяет заглянуть за кулисы того, что совершается в природе. Перед ним открывается новый мир — безостановочная сутолока огромного числа частиц. Быстро пролетают в поле зрения микроскопа мельчайшие частицы, почти мгновенно меняя направление движения. Медленнее продвигаются более крупные частицы, но и они постоянно меняют направление движения. Большие частицы практически толкуются на месте. Их выступы явно показывают вращение частиц вокруг своей оси, которая постоянно меняет направление в пространстве. Нигде нет и следа системы или порядка. Господство слепого случая — вот какое сильное, подавляющее впечатление производит эта картина на наблюдателя». Р. Поль (1884—1976).

ИНТЕРЕСНО

Важно Причина броуновского движения частицы заключается в том, что удары молекул жидкости о частицу не компенсируют друг друга.

На рисунке 8.4 схематически показано положение одной броуновской частицы и ближайших к ней молекул. При беспорядочном движении молекул передаваемые ими броуновской частице импульсы, например слева и справа, неодинаковы. Поэтому отлична от нуля результирующая сила давления молекул жидкости на броуновскую частицу. Эта сила и вызывает изменение движения частицы.

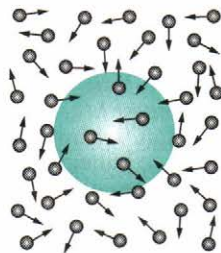


Рис. 8.4

Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана в 1905 г. А. Эйнштейном (1879—1955). Построение теории броуновского движения и её экспериментальное подтверждение французским физиком Ж. Перреном окончательно завершили победу молекулярно-кинетической теории. В 1926 г. Ж. Перрен получил Нобелевскую премию за исследование структуры вещества.

ИНТЕРЕСНО

Опыты Перрена. Идея опытов Перрена состоит в следующем.

Известно, что концентрация молекул газа в атмосфере уменьшается с высотой. Если бы не было теплового движения, то все





молекулы упали бы на Землю и атмосфера исчезла бы. Однако если бы не было притяжения к Земле, то за счёт теплового движения молекулы покидали бы Землю, так как газ способен к неограниченному расширению. В результате действия этих противоположных факторов устанавливается определённое распределение молекул по высоте, т. е. концентрация молекул довольно быстро уменьшается с высотой. Причём чем больше масса молекул, тем быстрее с высотой убывает их концентрация.

Броуновские частицы участвуют в тепловом движении. Так как их взаимодействие пренебрежимо мало, то совокупность этих частиц в газе или жидкости можно рассматривать как идеальный газ из очень тяжёлых молекул. Следовательно, концентрация броуновских частиц в газе или жидкости в поле тяжести Земли должна убывать по тому же закону, что и концентрация молекул газа. Закон этот известен.

Перрен с помощью микроскопа большого увеличения и малой глубины поля зрения (малой глубины резкости) наблюдал броуновские частицы в очень тонких слоях жидкости. Подсчитывая концентрацию частиц на разных высотах, он нашёл, что эта концентрация убывает с высотой по тому же закону, что и концентрация молекул газа. Отличие в том, что за счёт

большой массы броуновских частиц убывание происходит очень быстро.

Все эти факты свидетельствуют о правильности теории броуновского движения и о том, что броуновские частицы участвуют в тепловом движении молекул.

ИНТЕРЕСНО Подсчёт броуновских частиц на разных высотах позволил Перрену определить постоянную Авогадро совершенно новым методом. Значение этой постоянной совпало с ранее известным.

Броуновское движение. Опыты Перрена

Найти



1. Чем определяется скорость распространения ароматических веществ в воздухе?
2. Что является причиной броуновского движения частиц?
3. Можно ли сказать, что движение броуновской частицы — это тепловое движение, аналогичное движению молекул?



A1. Учительница вошла в класс. Ученик, сидящий на последней парте, почувствовал запах её духов через 10 с. Скорость распространения запаха духов в комнате определяется в основном скоростью

- 1) испарения
- 2) диффузии
- 3) броуновского движения
- 4) конвекционного переноса воздуха

A2. Явление диффузии в жидкостях свидетельствует о том, что молекулы жидкостей

- 1) движутся хаотично
- 2) притягиваются друг к другу
- 3) состоят из атомов
- 4) колеблются около своих положений равновесия



§ 56

СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ. СТРОЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ, ЖИДКИХ И ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Подумайте, можно ли объяснить свойства вещества во всех его агрегатных состояниях строением вещества, движением и взаимодействием его частиц.

Силы взаимодействия молекул. Молекулы взаимодействуют друг с другом. Без этого взаимодействия не было бы ни твёрдых, ни жидких тел.

Доказать существование значительных сил взаимодействия между атомами или молекулами несложно. Попробуйте-ка сломать толстую палку! А ведь она состоит из молекул. Но одни *силы притяжения* не могут обеспечить существования устойчивых образований из атомов и молекул. На очень малых расстояниях между молекулами обязательно действуют *силы отталкивания*. Благодаря этому молекулы не проникают друг в друга и куски вещества никогда не сжимаются до размеров порядка размеров одной молекулы.

ЗАПОМНИ

Молекула — это сложная система, состоящая из отдельных заряженных частиц: электронов и атомных ядер.

ВАЖНО

В целом молекулы электрически нейтральны, тем не менее между ними на малых расстояниях действуют значительные электрические силы: происходит взаимодействие электронов и атомных ядер соседних молекул.

Если молекулы находятся на расстояниях, превышающих их размеры в несколько раз, то силы взаимодействия практически не сказываются.

На расстояниях, превышающих 2—3 диаметра молекул, действуют силы притяжения. По мере уменьшения расстояния между молекулами сила их взаимного притяжения сначала увеличивается, но одновременно увеличивается и сила отталкивания. При определённом расстоянии r_0 сила притяжения становится равной силе отталкивания. Это расстояние считается равным диаметру молекулы.

При дальнейшем уменьшении расстояния электронные оболочки атомов начинают перекрываться и быстро увеличивается сила отталкивания. На рисунке 8.5 показаны графики зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул (рис. 8.5, а) и сил притяжения (1) и отталкивания (2) (рис. 8.5, б) от расстояния между молекулами. При $r = r_0$ потенциальная энергия минимальна, сила притяжения равна силе отталкивания. При $r > r_0$ сила притяжения больше силы отталкивания; при $r < r_0$ сила притяжения меньше силы отталкивания.

Молекулярно-кинетическая теория даёт возможность понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твёрдом состояниях.

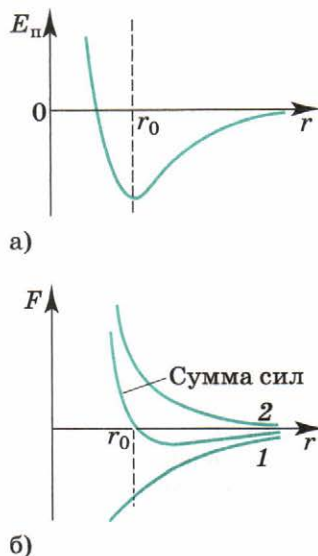


Рис. 8.5



Создайте механическую модель взаимодействия молекул. Возьмите два шарика и прикрепите их к концам пружины. Изменяйте расстояние между шариками и наблюдайте за изменением силы взаимодействия. Сделайте выводы.

во много раз больше размеров самих молекул. Например, при атмосферном давлении объём сосуда в десятки тысяч раз превышает объём находящихся в нём молекул.

Газы легко сжимаются, при этом уменьшается среднее расстояние между молекулами, но форма молекулы не изменяется.

Важно

Газы могут неограниченно расширяться. Они не сохраняют ни формы, ни объёма. Многочисленные удары молекул о стенки сосуда создают давление газа.

Молекулы газа с огромными скоростями — сотни метров в секунду — движутся в пространстве. Сталкиваясь, они отскакивают друг от друга в разные стороны подобно бильярдным шарам. Слабые силы притяжения молекул газа не способны удержать их друг возле друга.

В газах средняя кинетическая энергия теплового движения молекул больше средней потенциальной энергии их взаимодействия, поэтому часто потенциальной энергией взаимодействия молекул мы можем пренебречь.

Жидкости. Молекулы жидкости расположены почти вплотную друг к другу, поэтому молекула жидкости ведёт себя иначе, чем молекула газа.

В жидкостях существует так называемый *ближний порядок*, т. е. упорядоченное расположение молекул сохраняется на расстояниях, равных нескольким молекулярным диаметрам.

Молекула колеблется около своего положения равновесия, сталкиваясь с соседними молекулами. Лишь время от времени она совершает очередной «прыжок», попадая в новое положение равновесия.

В положении равновесия сила отталкивания равна силе притяжения, т. е. суммарная сила взаимодействия молекулы равна нулю.

Характер молекулярного движения в жидкостях, впервые установленный советским физиком Я. И. Френкелем, позволяет понять основные свойства жидкостей. По образному выражению учёного: «...молекулы жидкости ведут кочевой образ жизни...» При этом время *оседлой жизни* молекулы воды, т. е. время её колебаний около одного определённого положения равновесия при комнатной температуре, равно в среднем 10^{-11} с. Время же одного колебания значительно меньше (10^{-12} — 10^{-13} с). С повышением температуры время оседлой жизни молекул уменьшается.

Молекулы жидкости находятся непосредственно друг возле друга. При уменьшении объёма силы отталкивания становятся очень велики. Этим и объясняется *малая сжимаемость жидкостей*.



Я. И. Френкель
(1894—1952)

Важно

Жидкости: 1) малосжимаемы; 2) текучи, т. е. не сохраняют своей формы.

Объяснить текучесть жидкостей можно так. Внешняя сила заметно не меняет числа перескоков молекул в секунду. Но перескоки молекул из одного оседлого положения в другое происходят преимущественно в направлении действия внешней силы. Вот почему жидкость течёт и принимает форму сосуда.

В жидкостях средняя кинетическая энергия теплового движения молекул сравнима со средней потенциальной энергией их взаимодействия. Наличие поверхностного натяжения доказывает, что силы взаимодействия молекул жидкостей существенны, и ими пренебрегать нельзя.

Твёрдые тела. Атомы или молекулы твёрдых тел, в отличие от атомов и молекул жидкостей, колеблются около определённых положений равновесия. По этой причине

Важно

твёрдые тела сохраняют не только объём, но и форму.

В твёрдых телах средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул много больше средней кинетической энергии их теплового движения.

Запомни

Если соединить центры положений равновесия атомов или ионов твёрдого тела, то получится правильная пространственная решётка, называемая **кристаллической**.

На рисунках 8.6 и 8.7 изображены кристаллические решётки поваренной соли и алмаза. Внутренний порядок в расположении атомов кристаллов приводит к правильным внешним геометрическим формам.

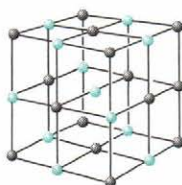


Рис. 8.6

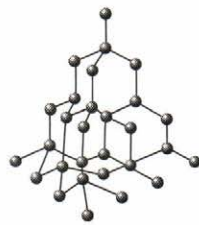


Рис. 8.7

Строение газообразных, жидких и твёрдых тел

Найти

- ?
1. Почему два свинцовых бруска с гладкими чистыми срезами слипаются, если их прижать друг к другу, а кусочки мела не слипаются?
 2. Газ способен к неограниченному расширению. Почему существует атмосфера у Земли?
 3. Чем различаются траектории движения молекул газа, жидкости и твёрдого тела? Нарисуйте примерные траектории молекул веществ, находящихся в этих состояниях.

ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 8 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.



ГЛАВА 9 МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА



§ 57

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Вспомните, что такое физическая модель.
Приведите примеры физических моделей.
Можно ли определить скорость одной молекулы?

Идеальный газ. У газа при обычных давлениях расстояние между молекулами во много раз превышает их размеры. В этом случае силы взаимодействия молекул пренебрежимо малы и кинетическая энергия молекул много больше потенциальной энергии взаимодействия. Молекулы газа можно рассматривать как материальные точки или очень маленькие твёрдые шарики. Вместо *реального газа*, между молекулами которого действуют силы взаимодействия, мы будем рассматривать его *модель* — *идеальный газ*.

ЗАПОМНИ

Идеальный газ — это теоретическая модель газа, в которой не учитываются размеры молекул (они считаются материальными точками) и их взаимодействие между собой (за исключением случаев непосредственного столкновения).

Естественно, при столкновении молекул идеального газа на них действует сила отталкивания. Так как молекулы газа мы можем согласно модели считать материальными точками, то размерами молекул мы пренебрегаем, считая, что объём, который они занимают, гораздо меньше объёма сосуда.

ВАЖНО

Напомним, что в физической модели принимают во внимание лишь те свойства реальной системы, учёт которых совершенно необходим для объяснения исследуемых закономерностей поведения этой системы.

Ни одна модель не может передать все свойства системы. Сейчас нам предстоит решить задачу: вычислить с помощью молекулярно-кинетической теории давление идеального газа на стенки сосуда. Для этой задачи модель идеального газа оказывается вполне удовлетворительной. Она приводит к результатам, которые подтверждаются опытом.

Давление газа в молекулярно-кинетической теории. Пусть газ находится в закрытом сосуде. Манометр показывает давление газа p_0 . Как возникает это давление?

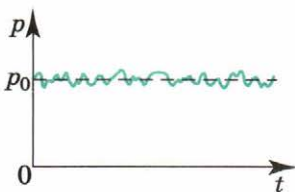


Рис. 9.1

Каждая молекула газа, ударяясь о стенку, в течение малого промежутка времени действует на неё с некоторой силой. В результате беспорядочных ударов о стенку давление быстро меняется со временем примерно так, как показано на рисунке 9.1. Однако действия, вызванные ударами отдельных молекул, настолько слабы, что манометром они не регистрируются. Манометр фиксирует среднюю по времени силу, действующую на каждую единицу площади поверхности его чувствительного элемента — мем-



браны. Несмотря на небольшие изменения давления, среднее значение давления p_0 практически оказывается вполне определённой величиной, так как ударов о стенку очень много, а массы молекул очень малы.

Среднее давление имеет определённое значение как в газе, так и в жидкости. Но всегда происходят незначительные случайные отклонения от этого среднего значения. Чем меньше площадь поверхности тела, тем заметнее относительные изменения силы давления, действующей на данную площадь. Так, например, если участок поверхности тела имеет размер порядка нескольких диаметров молекулы, то действующая на неё сила давления меняется скачкообразно от нуля до некоторого значения при попадании молекулы на этот участок.

Среднее значение квадрата скорости молекул. Для вычисления среднего давления надо знать значение средней скорости молекул (точнее, среднее значение квадрата скорости). Это не простой вопрос. Вы привыкли к тому, что скорость имеет каждая частица. Средняя же скорость молекул зависит от того, каковы скорости движения всех молекул.



Чем отличается определение средней скорости тела в механике от определения средней скорости молекул газа?

С самого начала нужно отказаться от попыток проследить за движением всех молекул, из которых состоит газ. Их слишком много, и движутся они очень сложно. Нам и не нужно знать, как движется каждая молекула. Мы должны выяснить, к какому результату приводит движение всех молекул газа.

Характер движения всей совокупности молекул газа известен из опыта. Молекулы участвуют в беспорядочном (тепловом) движении. Это означает, что скорость любой молекулы может оказаться как очень большой, так и очень малой. Направление движения молекул беспрестанно меняется при их столкновениях друг с другом.

Скорости отдельных молекул могут быть любыми, однако *среднее* значение модуля этих скоростей вполне определённое.

В дальнейшем нам понадобится среднее значение не самой скорости, а квадрата скорости — средняя квадратичная скорость. От этой величины зависит средняя кинетическая энергия молекул. А средняя кинетическая энергия молекул, как мы вскоре убедимся, имеет очень большое значение во всей молекулярно-кинетической теории. Обозначим модули скоростей отдельных молекул газа через $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$. Среднее значение квадрата скорости определяется следующей формулой:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}, \quad (9.1)$$

где N — число молекул в газе.

Но квадрат модуля любого вектора равен сумме квадратов его проекций на оси координат Ox, Oy, Oz .

Из курса механики известно, что при движении на плоскости $v^2 = v_x^2 + v_y^2$. В случае, когда тело движется в пространстве, квадрат скорости равен:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2. \quad (9.2)$$



Проведите числовой эксперимент. Пусть скорости молекул некоторого газа распределены так, как показано в таблице.

Число молекул	10	10	10	5
Скорость, м/с	10	20	40	50

Определите среднее значение модуля скорости и среднее значение квадрата скорости молекул этого газа. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Средние значения величин v_x^2 , v_y^2 и v_z^2 можно определить с помощью формул, подобных формуле (9.1). Между средним значением $\overline{v^2}$ и средними значениями квадратов проекций существует такое же соотношение, как соотношение (9.2):

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \quad (9.3)$$

Действительно, для каждой молекулы справедливо равенство (9.2). Сложив такие равенства для отдельных молекул и разделив обе части полученного уравнения на число молекул N , мы придём к формуле (9.3).

Важно

Внимание! Так как направления трёх осей Ox , Oy и Oz вследствие беспорядочного движения молекул равноправны, средние значения квадратов проекций скорости равны друг другу:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}. \quad (9.4)$$

Учитывая соотношение (9.4), подставим в формулу (9.3) $\overline{v_x^2}$ вместо $\overline{v_y^2}$ и $\overline{v_z^2}$. Тогда для среднего квадрата проекции скорости на ось Ox получим

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}, \quad (9.5)$$

т. е. средний квадрат проекции скорости равен $\frac{1}{3}$ среднего квадрата самой скорости. Множитель $\frac{1}{3}$ появляется вследствие трёхмерности пространства и соответственно существования трёх проекций у любого вектора.

Важно

Скорости молекул беспорядочно меняются, но *средний квадрат скорости* вполне определённая величина.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) газов. Строгий вывод уравнения молекулярно-кинетической теории газов довольно сложен. Поэтому мы ограничимся упрощённым выводом уравнения.



Предположим, что газ идеальный и взаимодействие молекул со стенкой абсолютно упругое.

Вычислим давление газа, находящегося в сосуде, на боковую стенку площадью S , перпендикулярную координатной оси Ox (рис. 9.2).

Интересно

Уравнение молекулярно-кинетической теории — первое количественное соотношение, полученное в МКТ, поэтому оно называется основным. После вывода этого уравнения в XIX в. и экспериментального доказательства его справедливости началось быстрое развитие количественной теории, продолжающееся по сегодняшний день.



При ударе молекулы о стенку её импульс изменяется: $\Delta p_x = m_0(v_x - v_{0x})$. При абсолютно упругом взаимодействии модули скорости молекулы до и после удара равны, и тогда изменение импульса $\Delta p_x = 2m_0v_x$. Согласно второму закону Ньютона изменение импульса молекулы равно импульсу подействовавшей на неё силы со стороны стенки сосуда, а согласно третьему закону Ньютона импульс силы, с которой молекула подействовала на стенку, будет иметь то же значение. Следовательно, в результате удара молекулы на стенку подействовала сила, импульс которой равен $2m_0|v_x|$.

Молекул много, и каждая из них передаёт стенке при столкновении такой же импульс. За время t они передадут стенке импульс $2m_0|v_x|Z$, где Z — число ударов всех молекул о стенку за это время. Число Z , очевидно, прямо пропорционально концентрации молекул, т. е. числу молекул в единице объёма, а также скорости молекул $|v_x|$. Чем больше эта скорость, тем больше молекул за время t успеют столкнуться со стенкой. Если бы молекулы «стояли на месте», то столкновений их со стенкой не было бы совсем. Кроме того, число столкновений молекул со стенкой пропорционально площади S поверхности стенки: $Z \sim n|v_x|St$. Надо ещё учесть, что в среднем только половина всех молекул движется к стенке. Благодаря хаотичному движению направления движения молекул по и против оси OX равновероятны, поэтому вторая половина молекул движется в обратную сторону. Значит, число ударов молекул о стенку за время t $Z = \frac{1}{2}n|v_x|St$ и полный импульс силы, подействовавшей на стенку, $Ft = 2m_0|v_x|Zt$. Отсюда $F = nm_0v_x^2S$.

Учтём, что не все молекулы имеют одно и то же значение квадрата скорости v_x^2 . В действительности средняя сила, действующая на стенку, пропорциональна не v_x^2 , а среднему значению квадрата скорости $\overline{v_x^2}$: $\overline{F} = nm_0\overline{v_x^2}S$. Так как согласно формуле (9.5) $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$, то $\overline{F} = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}S$. Таким образом, давление газа на стенку сосуда равно:

$$p = \frac{\overline{F}}{S} = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}. \quad (9.6)$$

Важно Уравнение (9.6) и есть основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.

Формула (9.6) связывает макроскопическую величину — давление, которое может быть измерено манометром, — с микроскопическими параметрами, характеризующими молекулы: их массой, концентрацией, скоростью хаотичного движения.

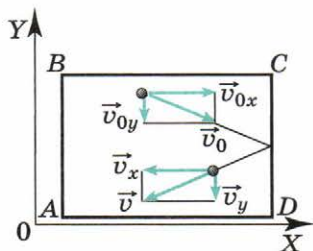


Рис. 9.2



Связь давления со средней кинетической энергией молекул. Если через \overline{E} обозначить среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы $\overline{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$, то уравнение (9.6) можно записать в виде

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E}. \quad (9.7)$$

ВАЖНО

Давление идеального газа пропорционально произведению концентрации молекул и средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

Основное уравнение МКТ. Средний квадрат скорости

Найти



1. Чем пренебрегают, когда реальный газ рассматривают как идеальный?
2. Газ оказывает давление на стенки сосуда. А давит ли один слой газа на другой?
3. Всегда ли равноправны средние значения проекций скорости движения молекулы?
4. Чему равно среднее значение проекции скорости молекул на ось Ox ?
5. Почему молекула при соударении со стенкой действует на неё с силой, пропорциональной скорости, а давление пропорционально квадрату скорости молекулы?
6. Почему и как в основном уравнении молекулярно-кинетической теории появляется множитель $\frac{1}{3}$?
7. Как средняя кинетическая энергия молекул связана с концентрацией газа и его давлением на стенки сосуда?



A1. Давление 100 кПа создаётся молекулами газа массой $m_0 = 3 \cdot 10^{-26}$ кг при концентрации $n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Чему равен средний квадрат скорости молекул?

- 1) 1 (мм/с)² 2) 100 (м/с)² 3) 3000 (м/с)² 4) 1 000 000 (м/с)²

A2. При неизменной концентрации молекул идеального газа в результате охлаждения давление газа уменьшилось в 4 раза. Средний квадрат скорости теплового движения молекул газа при этом

- 1) уменьшился в 16 раз 3) уменьшился в 4 раза
2) уменьшился в 2 раза 4) не изменился

A3. При неизменной концентрации частиц идеального газа средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул увеличилась в 3 раза. При этом давление газа

- 1) уменьшилось в 3 раза 3) увеличилось в 9 раз
2) увеличилось в 3 раза 4) не изменилось

A4. Давление газа при нагревании в закрытом сосуде увеличивается. Это можно объяснить увеличением

- 1) концентрации молекул
2) расстояния между молекулами
3) средней кинетической энергии молекул
4) средней потенциальной энергии молекул

**ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ»**

Обратим внимание на то, что в задачах, как правило, имеется в виду средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул. Связь этой скорости с макропараметрами, такими, как давление и температура, и устанавливает основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

Именно поступательное движение молекул определяет их удары о стенку и силу, действующую на неё.

Задача 1. Плотность газа в баллоне электрической лампы $\rho = 0,9 \text{ кг/м}^3$. При горении лампы давление в ней возросло с $p_1 = 8 \cdot 10^4 \text{ Па}$ до $p_2 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$. На сколько увеличилось при этом значение среднего квадрата скорости молекул газа?

Решение. Произведение массы m_0 одной молекулы на концентрацию молекул (число молекул в единице объёма) равно массе молекул, заключённых в единице объёма, т. е. плотности газа $\rho = m_0 n$. Следовательно, основное уравнение молекулярно-кинетической теории (9.6) можно записать в виде $p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$.

$$\text{Поэтому } \overline{v_2^2} - \overline{v_1^2} = \frac{3}{\rho} (p_2 - p_1) = 10^5 \text{ (м/с)}^2.$$

Задача 2. Определите плотность кислорода ρ_0 при давлении $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, если средний квадрат скорости его молекул равен 10^6 (м/с)^2 .

Решение. Давление кислорода $p = n m_0 \overline{v^2} / 3$, где n — концентрация молекул. Очевидно, что $\rho = m_0 n$, где m_0 — масса молекулы кислорода.

$$\text{Окончательно имеем } p = \rho_0 \overline{v^2} / 3, \text{ или } \rho_0 = \frac{3p}{\overline{v^2}} = 0,6 \text{ кг/м}^3.$$

Задача 3. Два одинаковых сосуда, содержащие одинаковое число молекул азота, соединены краном. В первом сосуде средний квадрат скорости молекул $\overline{v_1^2} = 1,6 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}^2$, во втором сосуде — $\overline{v_2^2} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}^2$. Кран открывают. Чему будет равен средний квадрат скорости молекул после того, как установится равновесие?

Решение. Разные скорости молекул в сосудах объясняются разными температурами азота в них. Так как по условию задачи число молекул, имеющих скорость v_1 , равно числу молекул, имеющих скорость v_2 ($N_1 = N_2$), то квадрат средней скорости

$$\overline{v^2} = \frac{N_1 \overline{v_1^2} + N_2 \overline{v_2^2}}{N_1 + N_2} = \frac{\overline{v_1^2} + \overline{v_2^2}}{2} = 2,05 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}^2.$$

Задача 4. С какой скоростью растёт толщина покрытия стенки серебром при напылении, если атомы серебра, обладая энергией $\overline{E} = 10^{-17} \text{ Дж}$, производят



на стенку давление $p = 0,1$ Па? Атомная масса серебра $A = 1,108$ г/моль, его плотность $\rho = 10,5$ г/см³.

Решение. Если за время Δt толщина слоя серебра стала равной Δl , то скорость роста толщины покрытия есть $\Delta l/\Delta t$. Объём напылённого слоя $\Delta V = S\Delta l$, где S — площадь поверхности стенки. Этот объём можно выразить иначе:

$$\Delta V = \frac{m}{\rho} = \frac{m_0 N}{\rho},$$

где m — масса серебряного покрытия, напылённого за время Δt , m_0 — масса атома, N — число атомов. Определим суммарную массу атомов серебра, осевших на стенку.

Изменение импульса атома, осевшего на стенку со скоростью v , равно импульсу силы, действовавшей на стенку со стороны атома:

$$f\tau = m_0\Delta v = m_0(0 - v) = -m_0v.$$

На стенку действует импульс силы $f_{ст}\tau = +m_0v$. Если на стенку за время Δt оседет N атомов, то импульс силы, действовавший на стенку в результате ударов о неё N атомов, будет $F\Delta t = Nv m_0$.

Давление на стенку $p = F/S$, или

$$p = Nv m_0 / S\Delta t. \quad (1)$$

Средняя кинетическая энергия атома $\bar{E} = m_0 v^2 / 2$, отсюда скорость атома $v = \sqrt{2\bar{E}/m_0}$.

Подставив выражение для скорости в формулу (1), получим $p = N\sqrt{2\bar{E}m_0} / S\Delta t$.

Отсюда имеем $N = pS\Delta t / \sqrt{2m_0\bar{E}}$, $\Delta l = \frac{\Delta V}{S} = \frac{m_0 N}{\rho S} = \frac{m_0 p \Delta t S}{\rho S \sqrt{2m_0\bar{E}}} = \frac{m_0 p \Delta t}{\rho \sqrt{2m_0\bar{E}}}$, тогда

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{p\sqrt{m_0}}{\rho\sqrt{2\bar{E}}}. \quad (2)$$



Масса атома серебра $m_0 = A/N_A$, где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Подставив это выражение в формулу (2), получим

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{p}{\rho} \sqrt{\frac{A}{N_A \cdot 2\bar{E}}} \approx 9 \cdot 10^{-10} \text{ м/с.}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Температура воздуха в комнате изменилась от 7 до 27 °С. На сколько процентов уменьшилось число молекул в комнате?

2. Под каким давлением находится газ в сосуде, если средний квадрат скорости его молекул $\bar{v}^2 = 10^6$ (м/с)², концентрация молекул $n = 3 \cdot 10^{25}$ м⁻³, масса каждой молекулы $m_0 = 5 \cdot 10^{-26}$ кг?

3. В колбе объёмом 1,2 л содержится $3 \cdot 10^{22}$ атомов гелия. Чему равна средняя кинетическая энергия каждого атома? Давление газа в колбе 10⁵ Па.

4. Вычислите средний квадрат скорости движения молекул газа, если его масса $m = 6$ кг, объём $V = 4,9$ м³ и давление $p = 200$ кПа.



§ 59 ТЕМПЕРАТУРА И ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ

Что измеряют термометры?

Что означают слова: «Я измерил температуру тела»?

Что именно характеризует температура?

Макроскопические параметры. Состояние макроскопических тел, в частности газов, и процессы изменения их состояний можно охарактеризовать немногим числом физических величин, относящихся не к отдельным молекулам, из которых состоят тела, а ко всем молекулам в целом. К числу таких величин относятся объём V , давление p , температура t .

Так, газ данной массы, находящийся в сосуде, всегда занимает объём этого сосуда и имеет определённые давление и температуру. Объём и давление представляют собой механические величины, которые помогают описывать состояние газа. Температура в механике не рассматривается, так как она характеризует внутреннее состояние тела.

ЗАПОМНИ

Величины, характеризующие состояние макроскопических тел без учёта их молекулярного строения (V , p , t), называют **макроскопическими параметрами**.

Однако макроскопические параметры не исчерпываются объёмом, давлением и температурой.

Например, для описания состояния смеси газов нужно ещё знать концентрации отдельных компонентов или их массы. Обычный атмосферный воздух представляет собой смесь газов.

Холодные и горячие тела. Центральное место во всём учении о тепловых явлениях занимает понятие *температура*. Все мы хорошо знаем различие между холодными и горячими телами. На ощупь мы определяем, какое тело нагрето сильнее, и говорим, что это тело имеет более высокую температуру. Таким образом,

ВАЖНО

температура характеризует степень нагретости тела (холодное, тёплое, горячее).

Для её измерения был создан прибор, называемый *термометром*. Его устройство основано на свойстве тел изменять объём при нагревании или охлаждении.

Тепловое равновесие. Термометр никогда не покажет температуру тела сразу же после того, как он соприкоснулся с ним. Необходимо некоторое время для того, чтобы температуры тела и термометра стали равны и между телами установилось *тепловое равновесие*, при котором температура перестаёт изменяться.

Тепловое равновесие с течением времени устанавливается между любыми телами, имеющими различную температуру.



Бросьте в стакан с водой кусочек льда и закройте стакан плотной крышкой. Лёд начнёт плавиться, а вода охлаждаться. Когда лёд растает, вода начнёт нагреваться. Измерьте несколько раз температуру воздуха и температуру воды в стакане. Когда закончится изменение состояния воды в стакане?



Обсудите с одноклассником следующий вопрос: «Зачем в данном опыте нужно закрывать стакан крышкой?»

Из простых наблюдений можно сделать вывод о существовании очень важного общего свойства тепловых явлений.

Важно

Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия.

Запомни

Тепловым равновесием называют такое состояние тел, при котором температура во всех точках системы одинакова.



Но микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии: меняются положения молекул, их скорости при столкновениях.

Температура. Система макроскопических тел может находиться в различных состояниях. В каждом из этих состояний температура имеет своё строго определённое значение. Другие физические величины в состоянии теплового равновесия системы могут иметь разные значения, которые с течением времени не меняются. Так, например, объёмы различных частей системы и давления внутри их при наличии твёрдых перегородок могут быть разными. Если вы внесёте с улицы мяч, наполненный сжатым воздухом, то спустя некоторое время температура воздуха в мяче и температура в комнате выравняются. Давление же воздуха в мяче всё равно будет больше, чем в комнате.

Важно

Температура характеризует состояние теплового равновесия системы тел: все тела системы, находящиеся друг с другом в тепловом равновесии, имеют одну и ту же температуру.



При одинаковых температурах двух тел между ними не происходит теплообмена. Если же температуры тел различны, то при установлении между ними теплового контакта будет происходить обмен энергией. При этом опыт учит, что тело с большей температурой будет отдавать энергию телу с меньшей температурой. Разность температур тел указывает направление теплообмена между ними — от более нагретого тела к менее нагретому.

Измерение температуры. Термометры. Для измерения температуры можно воспользоваться изменением любой макроскопической величины в зависимости от температуры: объёма, давления, электрического сопротивления и т. д.

Чаще всего на практике используют зависимость объёма жидкости (ртути или спирта) от температуры. При градуировке термометра обычно за начало отсчёта (0) принимают температуру тающего льда; второй постоянной точкой (100) считают температуру кипения воды при нормальном атмосферном давлении (шкала Цельсия). Шкалу между точками 0 и 100 делят на 100 равных частей, называемых градусами (рис. 9.3). Перемещение столбика жидкости на одно деление соответствует изменению температуры на 1°C .



Рис. 9.3



В 1742 г. А. Цельсий опубликовал работу с описанием стоградусной шкалы термометра, в которой температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении была принята за 0° , а температура таяния льда — за 100° . Позже шведский биолог К. Линней «перевернул» эту шкалу, приняв за 0° температуру таяния льда. Этой шкалой мы пользуемся до сих пор, называя её шкалой Цельсия.

ИНТЕРЕСНО



Так как различные жидкости расширяются при нагревании неодинаково, то установленная таким образом шкала будет зависеть от свойств данной жидкости и расстояния на шкале между 0 и 100°C будут различны. Поэтому градусы (расстояние между двумя соседними отметками) спиртового и ртутного термометров будут разными.



Наполните частично узкий сосуд подсолнечным маслом и отметьте верхний уровень масла. Измерьте термометром температуру воздуха. Затем поместите сосуд в горячую воду и снова отметьте верхний уровень масла. Измерьте температуру воды тем же термометром. Затем наполните этот же сосуд другой жидкостью и проведите аналогичные измерения. Сравните расстояния между отметками на сосуде в двух опытах. Сделайте вывод.

Какое же вещество выбрать для того, чтобы избавиться от этой зависимости?

ВАЖНО

Было замечено, что в отличие от жидкостей все разреженные газы — водород, гелий, кислород — расширяются при нагревании одинаково и одинаково меняют своё давление при изменении температуры.

По этой причине в физике для установления рациональной температурной шкалы используют изменение давления определённого количества разреженного газа при постоянном объёме или изменение объёма газа при постоянном давлении. Такую шкалу иногда называют *идеальной газовой шкалой температур*.

При установлении идеальной газовой шкалы температур удаётся избавиться ещё от одного существенного недостатка шкалы Цельсия — произвольности выбора начала отсчёта, т. е. нулевой температуры.

ИНТЕРЕСНО

Далее мы подробно рассмотрим, как можно использовать газы для определения температуры.

Макроскопические параметры. Тепловое равновесие

Найти



1. Какие величины характеризуют состояния макроскопических тел?
2. Каковы отличительные признаки состояний теплового равновесия?
3. Наблюдали ли вы примеры установления теплового равновесия тел, окружающих вас в повседневной жизни?
4. В чём преимущество использования разреженных газов для измерения температуры?
5. Как зависит интенсивность теплообмена между двумя телами от разности их температур?

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.
ЭНЕРГИЯ ТЕПЛОвого ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ**

Какие макропараметры используют для описания состояния газа? Справедливо ли утверждение: «Чем быстрее движутся молекулы газа, тем выше его температура»?

Средняя кинетическая энергия молекул газа при тепловом равновесии. Возьмём сосуд, разделённый пополам перегородкой, проводящей тепло. В одну половину сосуда поместим кислород, а в другую — водород, имеющие разную температуру. Спустя некоторое время газы будут иметь одинаковую температуру, не зависящую от рода газа, т. е. будут находиться в состоянии теплового равновесия. Для определения температуры выясним, какая физическая величина в молекулярно-кинетической теории обладает таким же свойством.

Из курса физики основной школы известно, что, чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура тела. При нагревании газа в замкнутом сосуде давление газа возрастает. Согласно же основному уравнению молекулярно-кинетической теории (9.7) давление газа p прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул: $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$.

Так как концентрация молекул газа $n = \frac{N}{V}$, то из уравнения (9.7) получаем $p = \frac{2N}{3V} \bar{E}$, или $p \frac{V}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}$, или, согласно формуле (8.8), $\frac{pMV}{mN_A} = \frac{2}{3} \bar{E}$.

При тепловом равновесии, если давление и объём газа массой m постоянны и известны, то средняя кинетическая энергия молекул газа должна иметь строго определённое значение, как и температура.

Можно предположить, что

Важно

при тепловом равновесии именно средние кинетические энергии молекул всех газов одинаковы.

Конечно, это пока только предположение. Его нужно экспериментально проверить. Практически такую проверку произвести непосредственно невозможно, так как измерить среднюю кинетическую энергию молекул очень трудно. Но с помощью основного уравнения молекулярно-кинетической теории её можно выразить через макроскопические параметры:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{pV}{N} = \frac{3}{2} \frac{pMV}{mN_A}. \quad (9.8)$$

Если кинетическая энергия действительно одинакова для всех газов в состоянии теплового равновесия, то и значение давления p должно быть тоже одинаково для всех газов при $\frac{V}{N} = \text{const}$. Только опыт может подтвердить или опровергнуть данное предположение.

Газы в состоянии теплового равновесия. Рассмотрим следующий опыт. Возьмём несколько сосудов, заполненных различными газами, например водородом, гелием и кислородом. Сосуды имеют определённые объёмы и

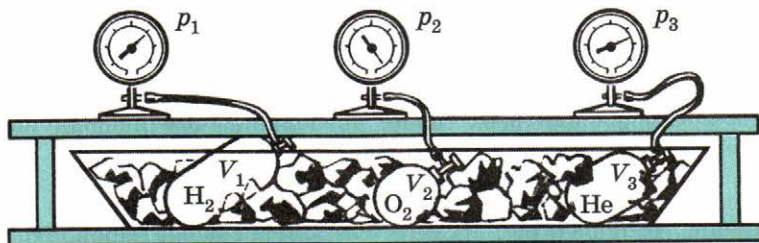


Рис. 9.4

снабжены манометрами. Это позволяет измерить давление в каждом сосуде. Массы газов известны, тем самым известно число молекул в каждом сосуде.

Приведём газы в состояние теплового равновесия. Для этого поместим их в тающий лёд и подождём, пока не установится тепловое равновесие и давление газов перестанет меняться (рис. 9.4). После этого можно утверждать, что все газы имеют одинаковую температуру $0\text{ }^\circ\text{C}$. Давления газов p , их объёмы V и число молекул N различны. Найдём отношение $\frac{pV}{N}$ для водорода. Если, к примеру, водород, количество вещества которого равно 1 моль, занимает объём $V_{H_2} = 0,1\text{ м}^3$, то при температуре $0\text{ }^\circ\text{C}$ давление оказывается равным $p_{H_2} = 2,265 \cdot 10^4\text{ Па}$. Отсюда

$$\frac{p_{H_2} V_{H_2}}{N_A} = \frac{2,265 \cdot 10^4 \cdot 0,1\text{ Н} \cdot \text{м}^3}{6,02 \cdot 10^{23}\text{ м}^2} = 3,76 \cdot 10^{-21}\text{ Дж.} \quad (9.9)$$

Если взять водород в объёме, равном kV_{H_2} , то и число молекул будет равно kN_A и отношение $\frac{p_{H_2} kV_{H_2}}{kN_A}$ останется равным $3,76 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$.

Такое же значение отношения произведения давления газа на его объём к числу молекул получается и для всех других газов при температуре тающего льда. Обозначим это отношение через Θ_0 . Тогда

$$\frac{p_{H_2} V_{H_2}}{N_A} = \frac{p_{He} V_{He}}{N_{He}} = \frac{p_{O_2} V_{O_2}}{N_{O_2}} = \Theta_0. \quad (9.10)$$

Таким образом, наше предположение оказалось верным.

ВАЖНО

Средняя кинетическая энергия \bar{E} , а также давление p в состоянии теплового равновесия одинаковы для всех газов, если их объёмы и количества вещества одинаковы или если отношение $\frac{pV}{N} = \text{const}$.

Соотношение (9.10) не является абсолютно точным. При давлениях в сотни атмосфер, когда газы становятся весьма плотными, отношение $\frac{pV}{N}$ перестаёт быть строго определённым, не зависящим от занимаемых газами объёмов. Оно выполняется для газов, когда их можно считать идеальными.

ИНТЕРЕСНО



Если же сосуды с газами поместить в кипящую воду при нормальном атмосферном давлении, то согласно эксперименту отношение $\frac{pV}{N}$ по-прежнему будет одним и тем же для всех газов, но больше, чем предыдущее:

$$\frac{pV}{N} = \Theta_{100} = 5,14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.} \quad (9.11)$$

Определение температуры. Можно, следовательно, утверждать, что величина Θ растёт с повышением температуры. Более того, Θ ни от чего, кроме температуры, не зависит. Ведь для идеальных газов Θ не зависит ни от рода газа, ни от его объёма или давления, а также от числа частиц в сосуде. Этот опытный факт позволяет рассматривать величину Θ как естественную меру температуры, как параметр газа, определяемый через другие макроскопические параметры газа. В принципе можно было бы считать температурой и саму величину Θ и измерять температуру в энергетических единицах — джоулях. Однако, во-первых, это неудобно для практического использования (температуре 100°C соответствовало бы очень малое значение — порядка 10^{-21} Дж), а во-вторых, и это главное, уже давно

Важно

температуру принято выражать в градусах.

Абсолютная температура.

Вместо температуры Θ , выражаемой в энергетических единицах, введём температуру, выражаемую в привычных для нас градусах.

Будем считать величину Θ прямо пропорциональной температуре T , измеряемой в градусах:

$$\Theta = kT, \quad (9.12)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Запомним

Определяемая равенством (9.12) температура называется **абсолютной**.

Такое название, как мы сейчас увидим, имеет достаточные основания.

Учитывая определение (9.12), получим

$$\frac{pV}{N} = kT. \quad (9.13)$$

По этой формуле вводится температурная шкала (в градусах), не зависящая от вещества, используемого для измерения температуры.

Температура, определяемая формулой (9.13), очевидно, не может быть отрицательной, так как все величины, стоящие в левой части этой формулы, заведомо положительны. Следовательно, наименьшим возможным значением температуры T является значение $T = 0$, если давление p или объём V равны нулю.

Запомним

Предельную температуру, при которой давление идеального газа обращается в нуль при фиксированном объёме или при которой объём идеального газа стремится к нулю при неизменном давлении, называют **абсолютным нулём температуры**.



Это самая низкая температура в природе, та «наибольшая или последняя степень холода», существование которой предсказывал Ломоносов.

Английский учёный У. Томсон (лорд Кельвин) (1824—1907) ввёл абсолютную шкалу температур. Нулевая температура по абсолютной шкале (её называют также *шкалой Кельвина*) соответствует абсолютному нулю, а каждая единица температуры по этой шкале равна градусу по шкале Цельсия.

ЗАПОМНИ Единица абсолютной температуры в СИ называется **кельвином** (обозначается буквой К).

Постоянная Больцмана. Определим коэффициент k в формуле (9.13) так, чтобы изменение температуры на один кельвин (1 К) было равно изменению температуры на один градус по шкале Цельсия (1 °С).

Мы знаем значения величины Θ при 0 °С и 100 °С (см. формулы (9.9) и (9.11)). Обозначим абсолютную температуру при 0 °С через T_1 , а при 100 °С через T_2 . Тогда согласно формуле (9.12)

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k(T_2 - T_1),$$

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k \cdot 100 \text{ К} = (5,14 - 3,76) \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

Отсюда
$$k = \frac{5,14 - 3,76}{100} \cdot 10^{-21} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

ЗАПОМНИ Коэффициент

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \quad (9.14)$$

называется **постоянной Больцмана** в честь Л. Больцмана, одного из основателей молекулярно-кинетической теории газов.

ВАЖНО Постоянная Больцмана связывает температуру Θ в энергетических единицах с температурой T в кельвинах.

Это одна из наиболее важных постоянных в молекулярно-кинетической теории.

Зная постоянную Больцмана, можно найти значение абсолютного нуля по шкале Цельсия. Для этого найдём сначала значение абсолютной температуры, соответствующее 0 °С. Так как при 0 °С $kT_1 = 3,76 \cdot 10^{-21}$ Дж, то

$$T_1 = \frac{3,76 \cdot 10^{-21}}{1,38 \cdot 10^{-23}} \text{ К} \approx 273 \text{ К.}$$

Один кельвин и один градус шкалы Цельсия совпадают. Поэтому любое значение абсолютной температуры T будет на 273 градуса выше соответствующей температуры t по Цельсию:

$$T \text{ (К)} = (t + 273) \text{ (°С)}. \quad (9.15)$$



Л. Больцман
(1844—1906)



ВАЖНО Изменение абсолютной температуры ΔT равно изменению температуры по шкале Цельсия Δt : $\Delta T \text{ (К)} = \Delta t \text{ (°С)}$.



Следует ли из фразы «Один кельвин и один градус шкалы Цельсия совпадают», что $27^\circ\text{C} = 27\text{ K}$?

На рисунке 9.5 для сравнения изображены абсолютная шкала и шкала Цельсия. Абсолютному нулю соответствует температура $t = -273^\circ\text{C}$.

ИНТЕРЕСНО

В США используется шкала Фаренгейта. Точка замерзания воды по этой шкале 32°F , а точка кипения 212°F . Пересчёт температуры из шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия производится по формуле $t(^{\circ}\text{C}) = 5/9 (t(^{\circ}\text{F}) - 32)$.

Отметим важнейший факт: абсолютный нуль температуры недостижим!

Температура — мера средней кинетической энергии молекул. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории (9.8) и определения температуры (9.13) вытекает важнейшее следствие:

ВАЖНО

абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии движения молекул.

Докажем это.

Из уравнений (9.7) и (9.13) следует, что $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}$ и $\frac{pV}{N} = kT$. Отсюда вытекает связь между средней кинетической энергией поступательного движения молекулы и температурой:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (9.16)$$

ВАЖНО

Средняя кинетическая энергия хаотичного поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.



Рис. 9.5

Чем выше температура, тем быстрее движутся молекулы. Таким образом, выдвигая ранее догадка о связи температуры со средней скоростью молекул получила надёжное обоснование. Соотношение (9.16) между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул установлено для идеальных газов. Однако оно оказывается справедливым для любых веществ, у которых движение атомов или молекул подчиняется законам механики Ньютона. Оно верно для жидкостей, а также и для твёрдых тел, где атомы могут лишь колебаться возле положений равновесия в узлах кристаллической решётки. При приближении температуры к абсолютному нулю энергия теплового движения молекул приближается к нулю, т. е. прекращается поступательное тепловое движение молекул.

Зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры. Учитывая, что $\frac{N}{V} = n$,



Обсудите с одноклассником, можно ли считать, что средняя кинетическая энергия теплового движения молекул — мера температуры.



из формулы (9.13) получим выражение, показывающее зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$p = nkT. \quad (9.17)$$

Из формулы (9.17) вытекает, что при одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одна и та же.

Отсюда следует закон Авогадро, известный вам из курса химии.



Выведите закон Авогадро, используя соотношение (9.17).

В равных объёмах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.

Закон Авогадро

Абсолютная температура. Постоянная Больцмана. Закон Авогадро

Найти



1. На каком основании можно предполагать существование связи между температурой и кинетической энергией молекул?
2. Как связаны объём, давление и число молекул различных газов в состоянии теплового равновесия?
3. Чему равен абсолютный ноль температуры по шкале Цельсия?
4. Какие преимущества имеет абсолютная шкала температур по сравнению со шкалой Цельсия?
5. Каков физический смысл постоянной Больцмана? Можно ли её определить теоретически, не обращаясь к эксперименту?
6. Как зависит от температуры средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа?
7. Почему концентрация молекул всех газов одна и та же при одинаковых давлениях и температурах?
8. Как зависит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул от их массы?

A1. Температура газа в сосуде равна 2°C . По абсолютной шкале температур это составляет

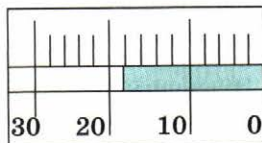
- 1) $136,5\text{ K}$ 2) 271 K 3) 275 K 4) 546 K

A2. На рисунке показана часть шкалы комнатного термометра. Определите абсолютную температуру воздуха в комнате.

- 1) 22°C 2) 18°C 3) 295 K 4) 291 K

A3. Как изменится средняя кинетическая энергия теплового движения одноатомного идеального газа при повышении его температуры в 2 раза?

- 1) увеличится в 4 раза 3) уменьшится в 2 раза
2) увеличится в 2 раза 4) уменьшится в 4 раза



A4. В закрытом сосуде абсолютная температура идеального газа уменьшилась в 3 раза. При этом давление газа на стенки сосуда

- 1) увеличилось в 9 раз 3) уменьшилось в $\sqrt{3}$ раза
2) уменьшилось в 3 раза 4) не изменилось





§ 61 ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Можно ли, зная температуру, вычислить среднюю кинетическую энергию молекул газа? среднюю скорость молекулы?
А можно ли эту скорость измерить?

Средняя скорость теплового движения молекул. Уравнение (9.16) даёт возможность найти средний квадрат скорости движения молекулы. Подставив в это уравнение $\bar{E} = \frac{m_0 v^2}{2}$, получим выражение для среднего значения квадрата скорости:

$$\bar{v}^2 = 3 \frac{kT}{m_0}. \quad (9.18)$$

ЗАПОМНИ

Средней квадратичной скоростью называется величина

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (9.19)$$

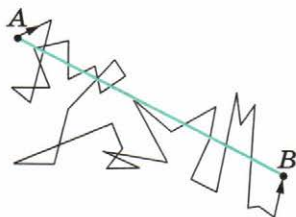


Рис. 9.6

Вычисляя по формуле (9.19) скорость молекул, например азота при $t = 0^\circ \text{C}$, получаем $\bar{v}_{\text{кв}} \approx 500$ м/с. Молекулы водорода при той же температуре имеют среднюю квадратичную скорость $\bar{v}_{\text{кв}} \approx 1800$ м/с. Эти скорости велики, но так как молекулы газа движутся хаотично, непрерывно сталкиваясь друг с другом, и время между двумя столкновениями мало, то расстояние, которое пролетают молекулы также невелико. Из-за столкновения траектория каждой молекулы представляет собой запутанную ломаную линию (рис. 9.6). Большие скорости молекула имеет на прямолинейных отрезках ломаной. Как видно из рисунка, при перемещении молекулы из точки *A* в точку *B* пройденный ею путь оказывается гораздо больше расстояния *AB*. При атмосферном давлении это расстояние порядка 10^{-5} см.

ИНТЕРЕСНО

Когда впервые были получены эти числа (вторая половина XIX в.), многие физики были ошеломлены. Скорости молекул газа по расчётам оказались больше, чем скорости артиллерийских снарядов! На этом основании высказывали даже сомнения в справедливости кинетической теории. Ведь известно, что запахи распространяются довольно медленно: нужно время порядка десятков секунд, чтобы запах духов, пролитых в одном углу комнаты, распространился до другого угла.

Экспериментальное определение скоростей молекул. Опыты по определению скоростей молекул доказали справедливость формулы (9.19). Один из опытов был предложен и осуществлён О. Штерном в 1920 г.

Прибор Штерна состоит из двух коаксиальных цилиндров *A* и *B*, жёстко связанных друг с другом (рис. 9.7, а). Цилиндры могут вра-



Подумайте, что определяет среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул и от чего зависит средняя квадратичная скорость этого движения.



щаться с постоянной угловой скоростью. Вдоль оси малого цилиндра натянута тонкая платиновая проволочка C , покрытая слоем серебра.

По проволочке пропускают электрический ток. В стенке этого цилиндра имеется узкая щель O . Воздух из цилиндров откачан. Цилиндр B находится при комнатной температуре. Вначале прибор неподвижен. При прохождении тока по нити она нагревается и при температуре 1200°C атомы серебра испаряются. Внутренний цилиндр заполняется газом из атомов серебра. Некоторые атомы пролетают через щель O и, достигнув внутренней поверхности цилиндра B , осаждаются на ней. В результате прямо против щели образуется узкая полоска D серебра (рис. 9.7, б).

Затем цилиндры приводят во вращение с большим числом оборотов n в секунду (до $1500 \frac{1}{\text{с}}$).

Теперь за время t , необходимое атому для прохождения пути, равного разности радиусов цилиндров $R_B - R_A$, цилиндры повернутся на некоторый угол φ . В результате атомы, движущиеся с постоянной скоростью, попадают на внутреннюю поверхность большого цилиндра не прямо против щели O (рис. 9.7, в), а на некотором расстоянии s от конца радиуса, проходящего через середину щели (рис. 9.7, г): ведь атомы движутся прямолинейно.

Если через v_B обозначить модуль скорости вращения точек поверхности внешнего цилиндра, то

$$s = v_B t = 2\pi n R_B t. \quad (9.20)$$

В действительности атомы серебра имеют разные скорости. Поэтому расстояния s для различных атомов будут несколько различаться. Под s следует понимать расстояние между участками на полосках D и D' с наибольшей толщиной слоя серебра. Этому расстоянию будет соответствовать средняя скорость атомов, которая равна $\bar{v} = \frac{R_B - R_A}{t}$.

Подставляя в эту формулу значение времени t из выражения (9.20), получаем

$$\bar{v} = \frac{2\pi n (R_B - R_A)}{s} R_B.$$

ИНТЕРЕСНО
В 1943 г. О. Штерн был удостоен Нобелевской премии по физике «за вклад в развитие методов молекулярных пучков и открытие и измерение магнитного момента протона».



Как вы думаете, почему проволочка сделана из платины?

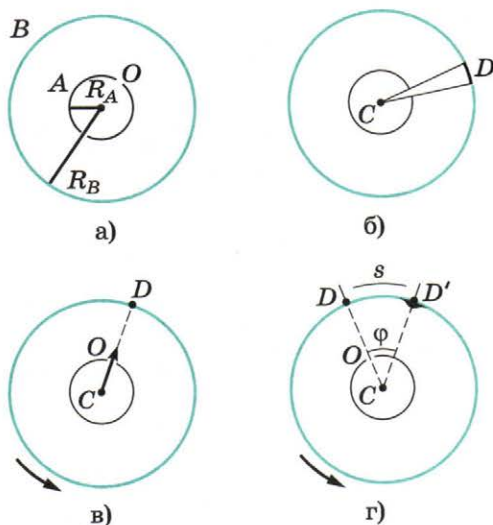


Рис. 9.7



Обсудите с товарищем, почему скорость вращения цилиндров должна быть большой.

Зная n , R_A и R_B и измеряя среднее смещение полоски серебра, вызванное вращением прибора, можно найти среднюю скорость атомов серебра.

Модули скоростей, определённые из опыта, совпадают с теоретическим значением средней квадратичной скорости. Это служит экспериментальным доказательством справедливости формулы (9.19), а следовательно, и формулы (9.16), согласно которой средняя кинетическая энергия молекулы прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Средняя квадратичная скорость молекул. Опыт Штерна

Найти



- Почему толщина слоя полоски серебра на поверхности внешнего вращающегося цилиндра в опыте Штерна неодинакова по ширине полоски?
- Как изменится средняя квадратичная скорость движения молекул при уменьшении температуры в 4 раза?
- Какие молекулы в атмосфере движутся быстрее: молекулы азота или молекулы кислорода?



A1. В сосуде находится газ. Масса каждой молекулы газа равна m , средняя квадратичная скорость молекул $\bar{v}_{\text{кв}}$, абсолютная температура газа T . Если абсолютная температура газа увеличится до $2T$, средняя квадратичная скорость молекул газа будет равна

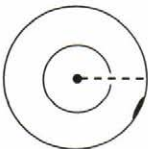
- 1) $4\bar{v}_{\text{кв}}$ 2) $2\bar{v}_{\text{кв}}$ 3) $\sqrt{2}\bar{v}_{\text{кв}}$ 4) $0,5\bar{v}_{\text{кв}}$

A2. Как соотносятся средние квадратичные скорости молекул кислорода $\bar{v}_{\text{кв. кисл}}$ и $\bar{v}_{\text{кв. вод}}$ в смеси этих газов в состоянии теплового равновесия, если отношение молярных масс кислорода и водорода равно 16?

- 1) $\bar{v}_{\text{кв. кисл}} = \bar{v}_{\text{кв. вод}}$ 3) $\bar{v}_{\text{кв. кисл}} = 4\bar{v}_{\text{кв. вод}}$
2) $\bar{v}_{\text{кв. кисл}} = 16\bar{v}_{\text{кв. вод}}$ 4) $\bar{v}_{\text{кв. кисл}} = \bar{v}_{\text{кв. вод}}/4$

A3. В двух сосудах находятся различные газы. Масса каждой молекулы газа в первом сосуде равна m , во втором сосуде $3m$. Средняя квадратичная скорость молекул газа в первом сосуде равна $\bar{v}_{\text{кв}}$, во втором сосуде $\bar{v}_{\text{кв}}/3$. Абсолютная температура газа в первом сосуде равна T , во втором сосуде она равна

- 1) $3T$ 2) T 3) $T/3$ 4) $T/9$



A4. На рисунке показана схема опыта Штерна по определению скорости молекул. Пунктиром обозначена траектория атомов серебра, летящих от проволоки в центре установки через щель во внутреннем цилиндре к внешнему цилиндру при неподвижных цилиндрах. Чёрным отмечено место, куда попадали атомы серебра при вращении цилиндров. Какое утверждение верно? Пятно образовалось, когда

- только внешний цилиндр вращался по часовой стрелке
- только внутренний цилиндр вращался по часовой стрелке
- оба цилиндра вращались по часовой стрелке
- оба цилиндра вращались против часовой стрелки



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЭНЕРГИЯ ТЕПЛОвого ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ»

При решении задач этой главы используются формула (9.13), определяющая абсолютную температуру, формула (9.16), связывающая энергию беспорядочного движения с температурой, и формула (9.19) для средней квадратичной скорости молекул. Некоторые задачи удобно решать, используя формулу (9.17). Для расчётов надо знать значение постоянной Больцмана (9.14).

Задача 1. Чему равно отношение произведения давления газа на его объём к числу молекул при температуре $t = 300$ °С?

Решение. Согласно формуле (9.13) $pV/N = kT$, где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана. Так как абсолютная температура $T = t + 273$ (К) = 573 К, то $pV/N = 7,9 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Задача 2. Определите среднюю квадратичную скорость молекулы газа при 0 °С. Молярная масса газа $M = 0,019$ кг/моль.

Решение. Средняя квадратичная скорость молекул вычисляется по формуле (9.19). Учитывая, что $m_0 = M/N_A$ и $T = 273$ К, получим

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kN_A T}{M}} \approx 600 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Задача 3. Некоторое количество водорода находится при температуре $T_1 = 200$ К и давлении $p_1 = 400$ Па. Газ нагревают до температуры $T_2 = 10\,000$ К, при которой молекулы водорода практически полностью распадаются на атомы. Определите значение давления p_2 газа при температуре T_2 , если его объём и масса остались без изменения.

Решение. Согласно формуле (9.17) давление газа при температуре T_1 равно $p_1 = n_1 k T_1$, где n_1 — концентрация молекул водорода.

При расщеплении молекул водорода на атомы число частиц в сосуде увеличивается в 2 раза. Следовательно, концентрация атомов водорода равна $n_2 = 2n_1$. Давление атомарного водорода $p_2 = n_2 k T_2 = 2n_1 k T_2$.

Разделив почленно второе уравнение на первое, получим

$$p_2 = p_1 \frac{2T_2}{T_1} = 40 \text{ кПа}.$$

Задача 4. В опыте Штерна источник атомов серебра создаёт узкий пучок, который падает на внутреннюю поверхность неподвижного цилиндра радиуса $R = 30$ см и образует на ней пятно. Цилиндр начинает вращаться с угловой скоростью $\omega = 314$ рад/с. Определите скорость атомов серебра, если пятно отклонилось на угол $\varphi = 0,314$ рад от первоначального положения.

Решение. Угол, на который отклонилось пятно, $\varphi = \omega t$, средняя скорость атомов серебра $\bar{v} = \frac{R}{t}$. Выразив из первого уравнения время t и подставив во второе, получим $\bar{v} = \frac{R\omega}{\varphi} = 300$ м/с.

Задача 5. Средняя энергия молекулы идеального газа $\bar{E} = 6,4 \cdot 10^{-21}$ Дж. Давление газа $p = 4$ мПа. Определите число молекул газа в единице объёма.

Решение. Средняя энергия поступательного движения молекул идеального газа

$$\bar{E} = (3/2)kT.$$

Давление

$$p = nkT,$$

где n — концентрация молекул, k — постоянная Больцмана и T — абсолютная температура газа. Решая совместно эти два уравнения, получаем

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{3}{2} \frac{p}{\bar{E}} = 9,38 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 6. Откачанная лампа накаливания объёмом $V = 10 \text{ см}^3$ имеет трещину, в которую проникает $\Delta N = 10^6$ частиц газа за время $\Delta t = 1$ с. Сколько времени понадобится, чтобы в лампе установилось нормальное давление ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па)? Температура 0°C .

Решение. Определим, сколько молекул газа N_0 должно быть в лампе при нормальном давлении: $N_0 = n_0 V$, где n_0 — концентрация молекул, определяемая из уравнения $p_0 = n_0 kT$, $n_0 = p_0 / kT$.

Число молекул будет равно $N_0 = n_0 V = p_0 V / kT$.

Следовательно, считая скорость проникновения молекул в со-

суд постоянной, определим t : $t = \frac{N_0}{\Delta N / \Delta t} = \frac{p_0 V \Delta t}{kT \Delta N} = 2,69 \cdot 10^{14}$ с, $t = 8,53 \cdot 10^6$ лет.

Задачи для самостоятельного решения

1. Какое значение имела бы постоянная Больцмана, если бы единица температуры в СИ — кельвин — была равна не 1°C , а 2°C ?

2. Современные вакуумные насосы позволяют понижать давление до $1,3 \cdot 10^{-10}$ Па (10^{-12} мм рт. ст.). Сколько молекул газа содержится в 1 см^3 при указанном давлении и температуре 27°C ?

3. Средняя квадратичная скорость молекулы газа, находящегося при температуре 100°C , равна 540 м/с. Определите массу молекулы.

4. На сколько процентов увеличивается средняя квадратичная скорость молекул воды в нашей крови при повышении температуры от 37 до 40°C ?



ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 9 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.



ГЛАВА 10 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

В этой главе вы не встретите принципиально новых сведений о газах. Речь пойдёт о следствиях, которые можно извлечь из понятия температуры и других макроскопических параметров. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов вплотную приблизило нас к установлению связей между этими параметрами.



§ 63 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Как можно рассчитать массу воздуха в кабинете физики?
Какие параметры воздуха будут необходимы для определения этой массы?

Мы детально рассмотрели поведение идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Была определена зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры (см. формулу (9.17)).

Заметим, что формулой (9.17) можно пользоваться только до давления порядка 10 атм.

ИНТЕРЕСНО

На основе этой зависимости можно получить уравнение, связывающее все три макроскопических параметра p , V и T , характеризующие состояние идеального газа данной массы.

ЗАПОМНИ

Уравнение, связывающее три макроскопических параметра p , V и T , называют **уравнением состояния идеального газа**.

Подставим в уравнение $p = nkT$ выражение для концентрации молекул газа. Учитывая формулу (8.8), концентрацию газа можно записать так:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{V} \frac{m}{M} N_A, \quad (10.1)$$

где N_A — постоянная Авогадро, m — масса газа, M — его молярная масса. После подстановки формулы (10.1) в выражение (9.17) будем иметь

$$pV = \frac{m}{M} kN_A T. \quad (10.2)$$

ЗАПОМНИ

Произведение постоянной Больцмана k и постоянной Авогадро N_A называют **универсальной (молярной) газовой постоянной** и обозначают буквой R :

$$R = kN_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль} = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}. \quad (10.3)$$

Подставляя в уравнение (10.2) вместо kN_A универсальную газовую постоянную R , получаем

ВАЖНО

уравнение состояния идеального газа произвольной массы

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (10.4)$$

Единственная величина в этом уравнении, зависящая от рода газа, — это его молярная масса.

Из уравнения состояния вытекает связь между давлением, объёмом и температурой идеального газа, который может находиться в двух любых состояниях.

Если индексом 1 обозначить параметры, относящиеся к первому состоянию, а индексом 2 — параметры, относящиеся ко второму состоянию, то согласно уравнению (10.4) для газа данной массы

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R \quad \text{и} \quad \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R.$$

Правые части этих уравнений одинаковы, следовательно, должны быть равны и их левые части:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const.} \quad (10.5)$$

Известно, что один моль любого газа при нормальных условиях ($p_0 = 1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ или $T = 273 \text{ К}$) занимает объём 22,4 л. Для одного моля газа, согласно соотношению (10.5), запишем:

Д. И. Менделеев
(1834—1907)

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3}}{273} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{моль} \cdot \text{К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$



Мы получили значение универсальной газовой постоянной R .

Таким образом, для одного моля любого газа $\frac{pV}{T} = R$.

Запомни

Уравнение состояния в форме (10.4) было впервые получено великим русским учёным Д. И. Менделеевым. Его называют **уравнением Менделеева—Клапейрона**.

Уравнение состояния в форме (10.5) называется **уравнением Клапейрона** и представляет собой одну из форм записи уравнения состояния.

Интересно

Б. Клапейрон в течение 10 лет работал в России профессором в институте путей сообщения. Вернувшись во Францию, участвовал в постройке многих железных дорог и составил множество проектов по постройке мостов и дорог.

Его имя внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни.

Уравнение состояния не надо выводить каждый раз, его надо запомнить. Неплохо было бы помнить и значение универсальной газовой постоянной:

$$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

До сих пор мы говорили о давлении идеального газа. Но в природе и в технике мы очень часто имеем дело со смесью нескольких газов, которые при определённых условиях можно считать идеальными.

Самый важный пример смеси газов — воздух, являющийся смесью азота, кислорода, аргона, углекислого газа и других газов. Чему же равно давление смеси газов?

Для смеси газов справедлив **закон Дальтона**.



Давление смеси химически не взаимодействующих газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_i + \dots,$$

где p_i — парциальное давление i -й компоненты смеси.

ЗАКОН ДАЛЬТОНА**ЗАПОМНИ**

Парциальное давление — давление отдельно взятого компонента газовой смеси, равное давлению, которое он будет оказывать, если занимает весь объём при той же температуре.

Уравнение состояния. Универсальная газовая постоянная

Найти

- ?
1. Что называют уравнением состояния?
 2. Какая форма уравнения состояния содержит больше информации: уравнение Клапейрона или уравнение Менделеева — Клапейрона?
 3. Почему газовая постоянная R называется универсальной?
 4. Сформулируйте закон Дальтона.

A1. Уравнение Менделеева—Клапейрона

- 1) связывает между собой макропараметры газа
- 2) связывает между собой микропараметры газа
- 3) связывает макропараметры газа с его микропараметрами
- 4) не связано ни с микропараметрами, ни с макропараметрами

A2. Кислород находится в сосуде вместимостью $0,4 \text{ м}^3$ под давлением $8,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и при температуре 320 К . Чему равна масса кислорода? Молярная масса кислорода $0,032 \text{ кг/моль}$.

- 1) 2 кг
- 2) $0,4 \text{ кг}$
- 3) 4 кг
- 4) $2 \cdot 10^{-23} \text{ кг}$

A3. Азот массой $0,3 \text{ кг}$ при температуре 280 К оказывает давление на стенки сосуда, равное $8,3 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Чему равен объём газа? Молярная масса азота $0,028 \text{ кг/моль}$.

- 1) $0,3 \text{ м}^3$
- 2) $3,3 \text{ м}^3$
- 3) $0,6 \text{ м}^3$
- 4) 60 м^3

A4. В сосуде находится жидкий азот N_2 массой 10 кг . Какой объём займёт этот газ при нормальных условиях (273 К ; 100 кПа)? Молярная масса азота $0,028 \text{ кг/моль}$.

- 1) $4,05 \text{ м}^3$
- 2) $8,1 \text{ м}^3$
- 3) $16,2 \text{ м}^3$
- 4) $24,3 \text{ м}^3$

A5. В баллоне вместимостью $1,66 \text{ м}^3$ находится азот массой 2 кг при давлении 100 кПа . Чему равна температура этого газа? Молярная масса азота $0,028 \text{ кг/моль}$.

- 1) $280 \text{ }^\circ\text{C}$
- 2) $140 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3) $7 \text{ }^\circ\text{C}$
- 4) $-13 \text{ }^\circ\text{C}$



**ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ
«УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА»**

При решении задач по данной теме надо чётко представлять себе начальное состояние системы и какой процесс переводит её в конечное состояние. Одна из типичных задач на использование уравнения состояния идеального газа: требуется определить параметры системы в конечном состоянии по известным макроскопическим параметрам в её начальном состоянии.

Задача 1. Воздух состоит из смеси газов (азота, кислорода и т. д.). Плотность воздуха ρ_0 при нормальных условиях (температура $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и атмосферное давление $p_0 = 101\,325\text{ Па}$) равна $1,29\text{ кг/м}^3$. Определите среднюю (эффективную) молярную массу M воздуха.

Решение. Уравнение состояния идеального газа при нормальных условиях имеет вид $p_0 V_0 = \frac{m}{M} RT_0$. Здесь $R = 8,31\text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ и $T_0 = 0^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C} = 273\text{ К}$, M — эффективная молярная масса воздуха. Эффективная молярная масса смеси газов — это молярная масса такого воображаемого газа, который в том же объёме и при той же температуре оказывает на стенки сосуда то же давление, что и смесь газов, в данном случае воздух. Отсюда $M = \frac{mRT_0}{p_0 T_0} = \frac{\rho_0 RT_0}{p_0} = 0,029\text{ кг/моль}$.

Задача 2. Определите температуру кислорода массой 64 г , находящегося в сосуде объёмом 1 л при давлении $5 \cdot 10^6\text{ Па}$. Молярная масса кислорода $M = 0,032\text{ кг/моль}$.

Решение. Согласно уравнению Менделеева—Клапейрона $pV = \frac{m}{M} RT$.

Отсюда температура кислорода $T = \frac{pVM}{mR} = 300\text{ К}$.

Задача 3. Определите плотность азота при температуре 300 К и давлении 2 атм . Молярная масса азота $M = 0,028\text{ кг/моль}$.

Решение. Запишем уравнение Менделеева—Клапейрона: $pV = \frac{m}{M} RT$.

Разделив на объём левую и правую части равенства, получим

$$p = \frac{m}{VM} RT = \frac{\rho}{M} RT, \text{ откуда } \rho = \frac{pM}{RT} \approx 2,28\text{ кг/м}^3.$$

Задача 4. Определите, на сколько масса воздуха в комнате объёмом 60 м^3 зимой при температуре 290 К больше, чем летом при температуре 27°C . Давление зимой и летом равно 10^5 Па .

Решение. Запишем уравнение Менделеева—Клапейрона: $pV = \frac{m}{M} RT$.

Из этого уравнения выразим массу газа: $m = \frac{pVM}{RT}$, где T принимает значения



T_1 и T_2 — температуры воздуха зимой и летом. Молярная масса воздуха $M = 0,029$ кг/моль. Температура воздуха летом $T_2 = 27^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C} = 300$ К.

$$\text{Таким образом, } \Delta m = m_1 - m_2 = \frac{pVM}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = 2,4 \text{ кг.}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Чему равен объём идеального газа в количестве одного моля при нормальных условиях?
2. Определите массу воздуха в классе размером $6 \times 8 \times 3$ м при температуре 20°C и нормальном атмосферном давлении. Молярную массу воздуха примите равной $0,029$ кг/моль.
3. В баллоне вместимостью $0,03$ м³ находится газ под давлением $1,35 \cdot 10^6$ Па при температуре 455°C . Какой объём занимал бы этот газ при нормальных условиях ($t_0 = 0^\circ\text{C}$, $p = 101\,325$ Па)?
4. Выразите среднюю квадратичную скорость молекулы через универсальную газовую постоянную и молярную массу.
5. При переходе газа определённой массы из одного состояния в другое его давление уменьшается, а температура увеличивается. Как изменяется его объём?

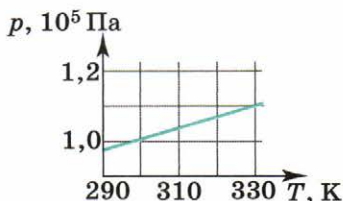
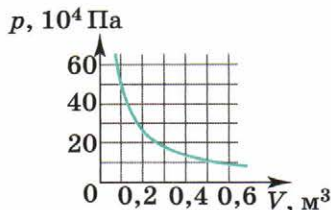
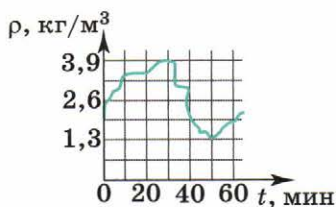
С1. При температуре 240 К и давлении 166 кПа плотность газа равна 2 кг/м³. Чему равна молярная масса этого газа?

С2. Плотность идеального газа меняется с течением времени так, как показано на рисунке. Температура газа при этом постоянна. Во сколько раз давление газа при максимальной плотности больше, чем при минимальной?

С3. Газ находится в баллоне вместимостью $8,31$ л при температуре 127°C и давлении 100 кПа. Какое количество вещества содержится в газе?

С4. На рисунке показан график изменения давления идеального газа при его расширении. Какое количество газообразного вещества (в молях) содержится в этом сосуде, если температура газа постоянна и равна 300 К?

С5. На рисунке показан график зависимости давления газа в запаянном сосуде от его температуры. Объём сосуда равен $0,4$ м³. Сколько молей газа содержится в этом сосуде?





§ 65 ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Вспомните, состояние какого газа описывает уравнение Менделеева—Клапейрона.

Можно ли универсальную газовую постоянную считать фундаментальной постоянной?

С помощью уравнения состояния идеального газа можно исследовать процессы, в которых масса газа и один из трёх параметров — давление, объём или температура — остаются неизменными.

Запомни

Количественные зависимости между двумя параметрами газа при фиксированном значении третьего называют **газовыми законами**.

Процессы, протекающие при неизменном значении одного из параметров, называют **изопроцессами**.

Интересно

Слово «изопроцесс» — сложное слово, первая часть которого происходит от греческого слова *isos* — равный, одинаковый.

Отметим, что в действительности ни один процесс не может протекать при строго фиксированном значении какого-либо параметра. Всегда имеются те или иные воздействия,

нарушающие постоянство температуры, давления или объёма. Лишь в лабораторных условиях удаётся поддерживать постоянство того или иного параметра с высокой точностью, но в действующих технических устройствах и в природе это практически неосуществимо. Изопроцесс — это идеализированная модель реального процесса, которая только приближённо отражает действительность.

Изотермический процесс.**Запомни**

Процесс изменения состояния системы макроскопических тел (*термодинамической системы*) при постоянной температуре называют **изотермическим**.

Интересно

Слово «изотермический» происходит от греческих слов *isos* — равный, одинаковый и *therme* — теплота.

Для поддержания температуры газа постоянной необходимо, чтобы он мог обмениваться теплом с большой системой — термостатом.

Иначе при сжатии или расширении температура газа будет меняться. Термостатом может служить атмосферный воздух, если температура его заметно не меняется на протяжении всего процесса. Согласно уравнению состояния идеального газа (10.4), если масса газа не изменяется, в любом состоянии с неизменной температурой произведение давления газа на его объём остаётся постоянным:

$$pV = \text{const при } T = \text{const.} \quad (10.6)$$

Этот вывод был сделан английским учёным Р. Бойлем (1627—1691) и несколько позже французским учёным Э. Мариоттом (1620—1684) на основе эксперимента. Поэтому он носит название *закона Бойля—Мариотта*.

Закон Бойля—Мариотта

Для газа данной массы при постоянной температуре произведение давления газа на его объём постоянно.



Закон Бойля—Мариотта справедлив обычно для любых газов, а также и для их смесей, например для воздуха. Лишь при давлениях, в несколько сотен раз больших атмосферного, отклонения от этого закона становятся существенными.



Запомни Кривую, изображающую зависимость давления газа от объёма при постоянной температуре, называют **изотермой**.

Изотерма газа изображает обратно пропорциональную зависимость между давлением и объёмом. Кривую такого рода в математике называют *гиперболой* (рис. 10.1).

Различным постоянным температурам соответствуют различные изотермы. При повышении температуры газа давление согласно уравнению состояния (10.4) увеличивается, если $V = \text{const}$. Поэтому изотерма, соответствующая более высокой температуре T_2 , лежит выше изотермы, соответствующей более низкой температуре T_1 (см. рис. 10.1).

Для того чтобы процесс происходил при постоянной температуре, сжатие или расширение газа должно происходить очень медленно. Дело в том, что, например, при сжатии газ нагревается, так как при движении поршня в сосуде скорость и соответственно кинетическая энергия молекул после ударов о поршень увеличиваются, а следовательно, увеличивается и температура газа. Именно поэтому для реализации изотермического процесса надо после небольшого смещения поршня подождать, когда температура газа в сосуде опять станет равной температуре окружающего воздуха.

Кроме этого, отметим, что при быстром сжатии давление под поршнем сразу становится больше, чем во всём сосуде. Если значения давления и температуры в различных точках объёма разные, то в этом случае газ находится в неравновесном состоянии и мы не можем назвать значения температуры и давления, определяющие в данный момент состояние системы. Если систему предоставить самой себе, то температура и давление постепенно выравниваются, система приходит в равновесное состояние.

Запомни **Равновесное состояние** — это состояние, при котором температура и давление во всех точках объёма одинаковы.

Параметры состояния газа могут быть определены, если он находится в равновесном состоянии.

Запомни Процесс, при котором все промежуточные состояния газа являются равновесными, называют **равновесным процессом**.

Очевидно, что на графиках зависимости одного параметра от другого мы можем изображать только равновесные процессы.

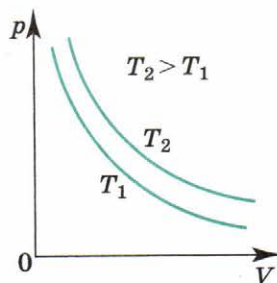


Рис. 10.1



Начертите изотермы в осях p , T и V , T .

**Изобарный процесс.**

ЗАПОМНИ Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют **изобарным**.

ИНТЕРЕСНО Слово «изобарный» происходит от греческих слов *isos* — равный, одинаковый и *baros* — вес, тяжесть.

Согласно уравнению (10.4) в любом состоянии газа с неизменным давлением отношение объёма газа к его температуре остаётся постоянным:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \text{ при } p = \text{const}. \quad (10.7)$$



Этот закон был установлен экспериментально в 1802 г. французским учёным Ж. Гей-Люссаком (1778—1850) и носит название *закона Гей-Люссака*.

ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА Для газа данной массы при постоянном давлении отношение объёма к абсолютной температуре постоянно.



Согласно уравнению (10.7) объём газа при постоянном давлении пропорционален температуре:

$$V = \text{const} \cdot T. \quad (10.8)$$

ЗАПОМНИ Прямую, изображающую зависимость объёма газа от температуры при постоянном давлении, называют **изобарой**.

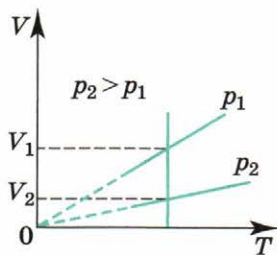


Рис. 10.2

Разным давлениям соответствуют разные изобары (рис. 10.2). Проведём на рисунке произвольную изотерму. С ростом давления объём газа при постоянной температуре согласно закону Бойля—Мариотта уменьшается. Поэтому изобара, соответствующая более высокому давлению p_2 , лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению p_1 .

В области низких температур все изобары *идеального* газа сходятся в точке $T = 0$. Но это не означает, что объём *реального* газа обращается в нуль. Все газы при сильном охлаждении превращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение состояния (10.4) неприменимо.



Начертите изобары в осях p , T и p , V .

Именно поэтому, начиная с некоторого значения температуры, зависимость объёма от температуры проводится на графике штриховой линией. В действительности таких значений температуры и давления у вещества в газообразном состоянии быть не может.

Изобарным можно считать расширение газа при нагревании его в цилиндре с подвижным поршнем, если внешнее давление постоянно. Давление в цилиндре постоянно и равно сумме атмосферного давления и давления $m_n g/S$ поршня.



Изохорный процесс.

ЗАПОМНИ

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объёме называют **изохорным**.

Из уравнения состояния (10.4) вытекает, что в любом состоянии газа с неизменным объёмом отношение давления газа к его температуре остаётся постоянным:

$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const.} \quad (10.9)$$

Слово «изохорный» происходит от греческих слов *isos* — равный, одинаковый и *chora* — место, пространство, занимаемое чем-нибудь.

ИНТЕРЕСНО

Этот газовый закон был установлен в 1787 г. французским физиком Ж. Шарлем (1746—1823) и носит название *закона Шарля*.



Для газа данной массы отношение давления к абсолютной температуре постоянно, если объём не меняется.

ЗАКОН ШАРЛЯ

Согласно уравнению (10.9) давление газа при постоянном объёме пропорционально температуре:

$$p = \text{const} \cdot T. \quad (10.10)$$

ЗАПОМНИ

Прямую, изображающую зависимость давления газа от температуры при постоянном объёме, называют **изохорой**.

Разным объёмам соответствуют разные изохоры. Также проведём на рисунке произвольную изотерму (рис. 10.3). С ростом объёма газа при постоянной температуре давление его, согласно закону Бойля—Мариотта, падает. Поэтому изохора, соответствующая большему объёму V_2 , лежит ниже изохоры, соответствующей меньшему объёму V_1 .

В соответствии с уравнением (10.10) все изохоры идеального газа начинаются в точке $T = 0$. Значит, давление идеального газа при абсолютном нуле равно нулю.

Увеличение давления газа в любом сосуде или в электрической лампочке при нагревании можно считать изохорным процессом. Изохорный процесс используется в газовых термометрах постоянного объёма.

В заключение составим опорную схему (рис. 10.4) и покажем логические переходы, связывающие различные законы и уравнения.

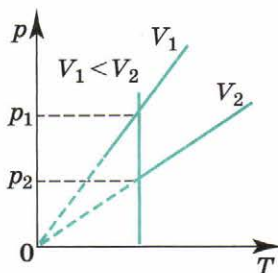
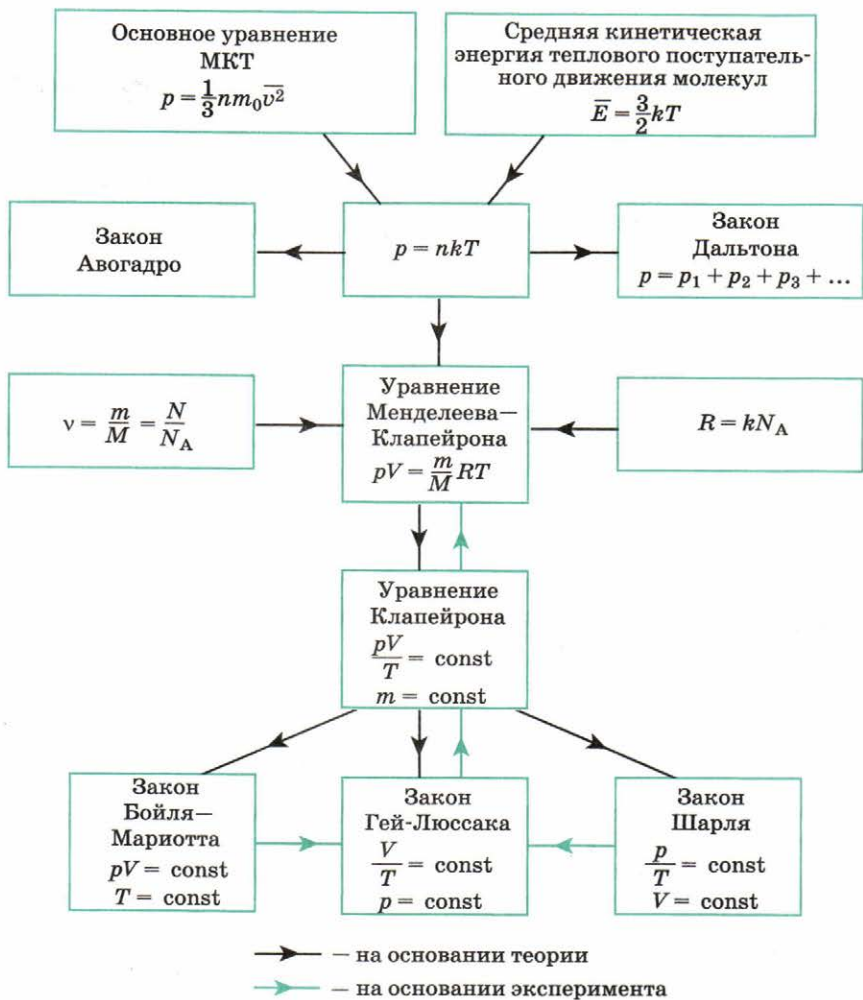


Рис. 10.3



Можно ли утверждать, что изохорный процесс равновесный? С какими процессами вы встречаетесь в повседневной жизни?

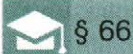


Изопроцессы. Законы Бойля—Мариотта, Гей-Люссака, Шарля

Найти



1. Вы надули щёки. При этом и объём, и давление воздуха у вас во рту увеличиваются. Как это согласовать с законом Бойля—Мариотта?
2. Как можно осуществить изотермический, изобарный и изохорный процессы?
3. Какое состояние системы (газа) считается равновесным?
4. Как качественно объяснить газовые законы на основе молекулярно-кинетической теории?



§ 66 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ»

Если при переходе газа из начального состояния в конечное один из параметров не меняется, то разумно использовать один из газовых законов (10.6), (10.7) или (10.9).

Для этого нужно знать зависимость параметров друг от друга, которая в общем случае даётся уравнением состояния, а в частных — газовыми законами.

Задача 1. Баллон вместимостью $V_1 = 0,02 \text{ м}^3$, содержащий воздух под давлением $p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$, соединяют с баллоном вместимостью $V_2 = 0,06 \text{ м}^3$, из которого воздух выкачан. Определите давление p , которое установится в сосудах. Температура постоянна.

Решение. Воздух из первого баллона займёт весь предоставленный ему объём $V_1 + V_2$. По закону Бойля—Мариотта $p_1 V_1 = p(V_2 + V_1)$.

$$\text{Отсюда искомое давление } p = \frac{p_1 V_1}{V_2 + V_1} = 10^5 \text{ Па.}$$

Задача 2. В запаянной пробирке находится воздух при атмосферном давлении и температуре 300 К. При нагревании пробирки на 100°C она лопнула. Определите, какое максимальное давление выдерживает пробирка.

Решение. Объём воздуха при нагревании остаётся постоянным.

Для определения давления в пробирке при нагревании до 100°C применяем закон Шарля $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$.

По условию $T_2 = 400 \text{ К}$. Заметим, что изменение температуры по шкале Кельвина равно изменению температуры по шкале Цельсия.

$$\text{Тогда давление } p_2 = \frac{p_1}{T_1} T_2 = 1,25 \text{ атм.}$$

Однако разорваться пробирке мешает атмосферное давление. Тогда окончательно давление, которое может выдержать пробирка, $p_{\text{max}} = p_{\text{атм}} + p_2 \approx 2,25 \text{ атм}$.

Задача 3. При нагревании газа при постоянном объёме на 1 К давление увеличилось на 0,2%. Чему равна начальная температура газа?

Решение. Газ нагревается при постоянном объёме — процесс изохорный. По закону Шарля $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$, где $T_2 = T_1 + \Delta T$. Из условия задачи следует, что $p_2 = p_1 \cdot 1,002$, т. е. $\frac{p_1}{p_1 \cdot 1,002} = \frac{T_1}{T_1 + \Delta T}$, откуда $T_1 = \Delta T / 0,002 = 500 \text{ К}$.

Задача 4. Давление воздуха внутри бутылки, закрытой пробкой, равно 0,1 МПа при температуре $t_1 = 7^\circ \text{C}$. На сколько градусов нужно нагреть воздух в бутылке, чтобы пробка вылетела? Без нагревания пробку можно



вынуть, прикладывая к ней силу 30 Н. Площадь поперечного сечения пробки 2 см^2 .

Решение. Чтобы пробка вылетела из бутылки, необходимо, чтобы давление воздуха в бутылке было равно $p = \frac{F}{S} + p_0$.



При нагревании объём не изменяется. По закону Шарля $\frac{p_0}{T_1} = \frac{p}{T_2}$, откуда $T_2 = \frac{pT_1}{p_0}$. Следовательно, $\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{T_1 F}{p_0 S} = 420 \text{ К}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Компрессор, обеспечивающий работу отбойных молотков, засасывает из атмосферы воздух объёмом $V = 100 \text{ л}$ в 1 с. Сколько отбойных молотков может работать от этого компрессора, если для каждого молотка необходимо обеспечить подачу воздуха объёмом $V_1 = 100 \text{ см}^3$ в 1 с при давлении $p = 5 \text{ МПа}$? Атмосферное давление $p_0 = 100 \text{ кПа}$.

2. Определите температуру газа, находящегося в закрытом сосуде, если давление газа увеличивается на 0,4 % от первоначального давления при нагревании на 1 К.

3. Высота пика Ленина на Памире равна 7134 м. Атмосферное давление на этой высоте равно $3,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Определите плотность воздуха на вершине пика при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$, если плотность воздуха при нормальных условиях $1,29 \text{ кг/м}^3$.



С1. Идеальный газ изотермически сжали из состояния с объёмом 6 л так, что давление газа изменилось в 3 раза. На сколько уменьшился объём газа в этом процессе?

С2. Поршень площадью 10 см^2 и массой 5 кг может без трения перемещаться в вертикальном цилиндрическом сосуде, обеспечивая при этом его герметичность. Сосуд с поршнем, заполненный газом, покоится на полу неподвижного лифта при атмосферном давлении 100 кПа, при этом расстояние от нижнего края поршня до дна сосуда 20 см. Каким станет это расстояние, когда лифт поедет вверх с ускорением, равным 2 м/с^2 ? Изменение температуры газа не учитывайте.

С3. С идеальным газом происходит изобарный процесс, в котором для увеличения объёма газа на 150 дм^3 его температуру увеличивают в 2 раза. Масса газа постоянна. Каким был первоначальный объём газа?

С4. Идеальный одноатомный газ в количестве $\nu = 0,09$ моль находится в равновесии в вертикальном цилиндре под поршнем массой 5 кг. Трение между поршнем и стенками цилиндра отсутствует. Внешнее атмосферное давление $p_0 = 100 \text{ кПа}$. В результате нагревания газа поршень поднялся на высоту $\Delta h = 4 \text{ см}$, а температура газа повысилась на $\Delta T = 16 \text{ К}$. Чему равна площадь поршня?

С5. Идеальный газ изохорно нагревают так, что его температура изменяется на $\Delta T = 240 \text{ К}$, а давление — в 1,8 раза. Масса газа постоянна. Определите начальную температуру газа по шкале Кельвина.



§ 67

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗА ПО ГРАФИКАМ ИЗОПРОЦЕССОВ»

При решении многих задач на газовые законы требуется построение графиков, изображающих разного рода процессы. На графиках обозначаем точки, определяющие состояния системы. Имеем в виду, что можно изобразить только равновесные процессы, при которых каждое промежуточное состояние равновесное, т. е. температура и давление одинаковы во всех точках данного объёма.

Задача 1. Постройте изобары для водорода массой 2 г при нормальном атмосферном давлении p_0 в координатах p, T ; p, V ; V, T .

Решение. На графиках зависимости p от T и p от V изобара представляет собой прямую, параллельную либо оси T , либо оси V (рис. 10.5, а и б).

Так как $V = \frac{mR}{Mp_0} T$, то графиком зависимости V от T является прямая, проходящая через начало отсчёта. Учитывая, что $m = 0,002$ кг, $M = 0,002$ кг/моль, $R = 8,31$ Дж/(моль · К) и $p_0 = 10^5$ Па, можно записать: $V = BT$, где $B = \frac{mR_0}{Mp_0} \approx 8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{К}}$. В частности, при $T = 100$ К $V \approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

График зависимости V от T показан на рисунке 10.5, в.

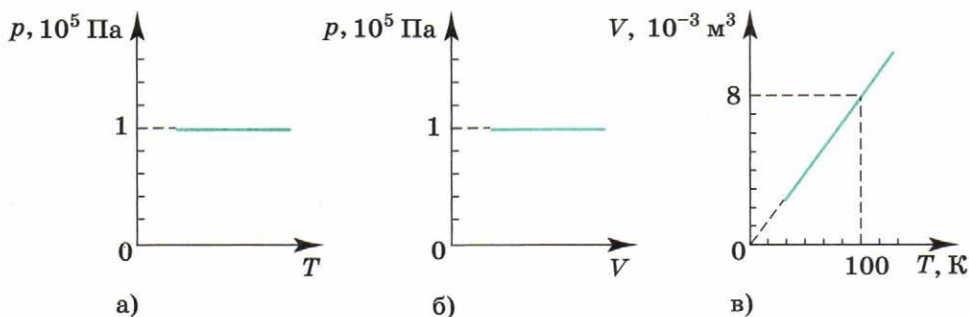


Рис. 10.5

Задача 2. Выведите уравнение Клапейрона при переходе газа из состояния 1 (p_1, V_1, T_1) в состояние 2 (p_2, V_2, T_2) (рис. 10.6, а).

Решение. Переведём газ из состояния 1 в состояние 2, совершив два процесса: изотермический из состояния 1 в состояние 1', поддерживая постоянную температуру T_1 , и изобарный из состояния 1' в состояние 2, поддерживая постоянным давлением p_2 (рис. 10.6, б).

Согласно закону Бойля—Мариотта запишем: $p_1 V_1 = p_2 V'$, согласно закону Гей-Люссака $\frac{V'}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$. Выразив из первого и второго уравнений V' и при-

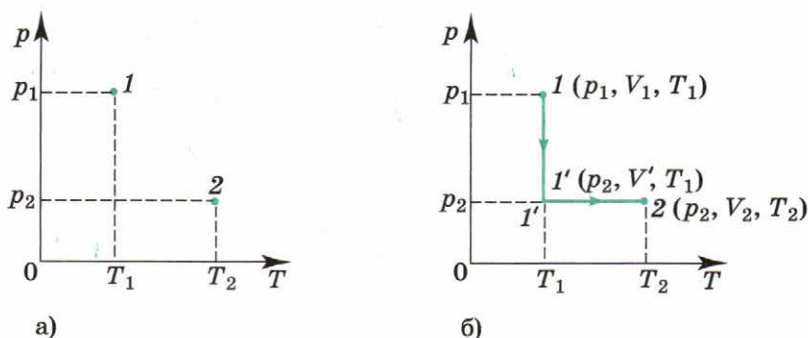


Рис. 10.6

равняв правые части полученных равенств, запишем: $\frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{V_2 T_1}{T_2}$. Перенеся параметры с индексом 1 в левую часть, а параметры с индексом 2 в правую, получим уравнение Клапейрона $\frac{p_1 V_1}{T_2} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$. Для вывода уравнения мы использовали два экспериментально установленных закона: изотермический и изобарный.

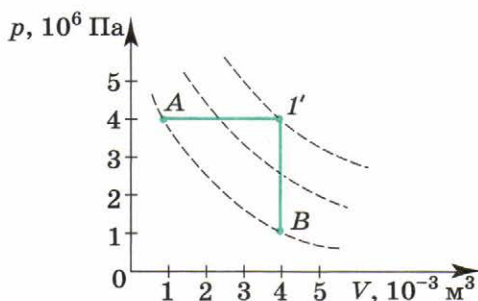


Рис. 10.7

Задача 3. На графике (рис. 10.7) показан переход газа, взятого в количестве 2 моль, из состояния A в состояние B. Определите изменение температуры газа, а также максимальное значение температуры при этом переходе.

Решение. По графику видно, что сначала газ нагревался при постоянном давлении, а затем давление уменьшалось при постоянном объёме, при этом температура уменьшалась.

Обратим внимание на то, что произведение давления на объём в состояниях A и B одно и то же и равно $4000 \text{ Па} \cdot \text{м}^3$.

Согласно закону Менделеева—Клапейрона $T = \frac{pV}{\nu R} = 241 \text{ К}$, $\Delta T = 0$.

Начертим изотермы, проходящие через отмеченные состояния. Согласно графикам максимальная температура соответствует промежуточному состоянию I', для которого $V = 4 \text{ л}$, а давление $4 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Тогда $T = 962 \text{ К}$.

Задача 4. На рисунке 10.8, a изображён график перехода газа из состояния A в состояние B в координатах p, V . Постройте график этого перехода в координатах p, T и V, T .

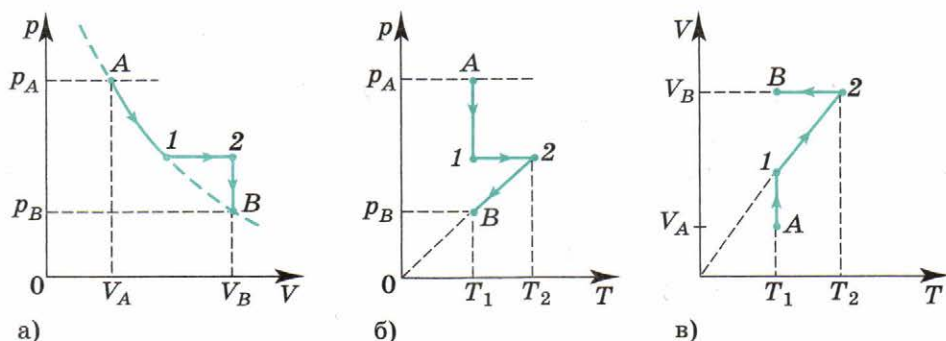


Рис. 10.8

Решение. Сначала построим график перехода в координатах p, T . Поставим точку, соответствующую состоянию A газа (рис. 10.8, б). Процесс $A-1$ изотермический. При этом давление газа уменьшается. Процесс $1-2$ изобарный. Построим отрезок, параллельный оси абсцисс. Процесс $2-B$ изохорный, при этом температура газа уменьшается. Начертим изохору, проходящую через точку 2 . Конечное состояние соответствует давлению p_B .

Аналогично строим переход в координатах V, T (рис. 10.8, в). При процессе $A-1$ объём газа увеличивается при постоянной начальной температуре. При процессе $1-2$ объём увеличивается при постоянном давлении. Изобара проходит через начало координат. Конечное состояние соответствует объёму V_B . Затем процесс изохорный, при этом температура газа понижается.

Задачи для самостоятельного решения

1. Постройте изохоры для кислорода массой 16 г и объёмом 1 л в координатах p, V ; V, T и p, T .

2. На рисунке 10.9 представлен график изменения состояния идеального газа в координатах V, T . Представьте этот процесс на графиках в координатах p, V и p, T .

3. Газ перешёл из состояния 1 в состояние 2 (рис 10.10). Масса газа постоянна. Как изменилось давление газа?

4. Начертите графики зависимости плотности газа от температуры при изобарном процессе и плотности газа от давления при изохорном процессе. Масса газа постоянна.

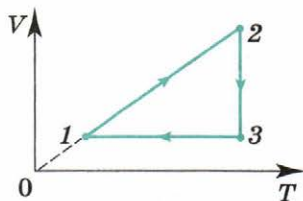


Рис. 10.9

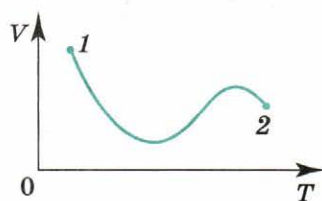
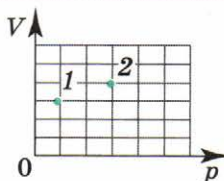


Рис. 10.10



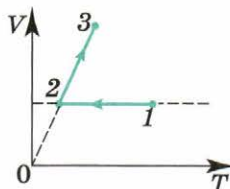
A1. В сосуде находится некоторое количество идеального газа. Какой станет температура газа, если он перейдет из состояния 1 в состояние 2 (см. рис.)?

1) $T_2 = 4T_1$

2) $T_2 = \frac{T_1}{4}$

3) $T_2 = \frac{4T_1}{3}$

4) $T_2 = T_1$



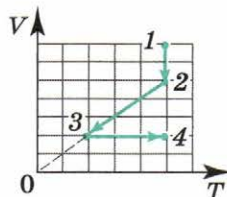
A2. В координатах V, T представлена зависимость объема идеального газа постоянной массы от абсолютной температуры. Как изменяется давление в процессе 1—2—3?

1) на участках 1—2 и 2—3 увеличивается

2) на участках 1—2 и 2—3 уменьшается

3) на участке 1—2 уменьшается, на участке 2—3 остается неизменным

4) на участке 1—2 не изменяется, на участке 2—3 увеличивается



A3. В координатах V, T показано, как изменялись объем и температура некоторого разреженного газа, количество которого не изменялось, при его переходе из начального состояния 1 в состояние 4. Как изменялось давление газа на участке 2—3?

1) увеличивалось

2) уменьшалось

3) не изменялось

4) определить нельзя



ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 10 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.



«Основное уравнение МКТ и основное уравнение состояния идеального газа»

1. Статистические закономерности. Подходы к изучению поведения большого числа частиц. Средние значения.
2. Распределение молекул по скоростям — распределение Максвелла. Опыт Штерна.
3. Открытие газовых законов. Роберт Бойль, Эдм Мариотт, Жак Шарль, Жозеф Луи Гей-Люссак.



«Экспериментальное подтверждение газовых законов (схемы опытов, предложенные вами)»

«Моделирование и изготовление газового термометра, основанного на изобарном или изохорном процессе»

**ГЛАВА 11 ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ**

Молекулярно-кинетическая теория позволяет не только понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твёрдом состояниях, но и объяснить процесс перехода вещества из одного состояния в другое.

**§ 68 НАСЫЩЕННЫЙ ПАР**

Вспомните, что представляет собой модель идеального газа. Можно ли с помощью этой модели объяснить явление конденсации?

Идеальный газ нельзя превратить в жидкость. В жидкость превращается реальный газ.

Испарение и конденсация. Молекулы жидкости движутся беспорядочно. Чем выше температура жидкости, тем больше кинетическая энергия молекул. Среднее значение кинетической энергии молекул при заданной температуре имеет определённое значение. Но у каждой молекулы кинетическая энергия в данный момент времени может оказаться как меньше, так и больше средней. В какой-то момент времени кинетическая энергия отдельных молекул может стать настолько большой, что они окажутся способными вылететь из жидкости, преодолев силы притяжения остальных молекул.

Запомни

Процесс превращения жидкости в пар называется **испарением**.

При этом процессе число молекул, покидающих жидкость за определённый промежуток времени, больше числа молекул, возвращающихся в неё.



Плотно закрытый флакон с духами может стоять очень долго, и количество духов в нём не изменится. Если же флакон оставить открытым, то через достаточно продолжительное время вы увидите, что жидкости в нём нет. Жидкость, в которой растворены ароматические вещества, испарилась. Гораздо быстрее испаряется (высыхает) лужа на асфальте, особенно если высока температура воздуха и дует ветер.

Интересно

Если поток воздуха над сосудом уносит с собой образовавшиеся пары жидкости, то жидкость испаряется быстрее, так как у молекулы пара уменьшается возможность вновь вернуться в жидкость. Чем выше температура жидкости, тем большее число молекул имеет достаточную для вылета из жидкости кинетическую энергию, тем быстрее идёт испарение.

При испарении жидкость покидают более быстрые молекулы, поэтому средняя кинетическая энергия молекул жидкости уменьшается.

Процесс испарения происходит со свободной поверхности жидкости. Если лишить жидкость возможности испаряться, то охлаждение её будет происходить гораздо медленнее.

Смочив руку какой-нибудь быстро испаряющейся жидкостью (например, бензином или ацетоном), вы тут же почувствуете сильное охлаждение смоченного места. Охлаждение этого места усилится, если на руку подуть.

Интересно

ИНТЕРЕСНО вспомните, как долго остывает жирный бульон. Слой жира на его поверхности мешает выходу быстрых молекул воды. Жидкость почти не испаряется, и её температура падает медленно (сам жир испаряется крайне медленно, так как его большие молекулы более прочно сцеплены друг с другом, чем молекулы воды).

Вылетевшая молекула принимает участие в беспорядочном тепловом движении газа. Беспорядочно двигаясь, она может навсегда удалиться от поверхности жидкости, находящейся в открытом сосуде, но может и вернуться снова в жидкость.

ЗАПОМНИ Процесс превращения пара в жидкость называется **конденсацией**.



При этом процессе число молекул, возвращающихся в жидкость за определённый промежуток времени, больше числа молекул, покидающих её.



Обсудите с товарищем, как можно ускорить процессы испарения жидкости и конденсации пара.

Как и почему изменяется температура поверхности, на которой происходит конденсация пара?

Насыщенный пар. Если сосуд с жидкостью плотно закрыть, то сначала количество жидкости уменьшится, а затем будет оставаться постоянным. При неизменной температуре система жидкость—пар придёт в состояние теплового равновесия и будет находиться в нём сколь угодно долго.

Одновременно с процессом испарения происходит и конденсация, оба процесса в среднем компенсируют друг друга.

В первый момент, после того как жидкость нальют в сосуд и закроют его, жидкость будет испаряться и плотность пара над ней будет увеличиваться. Однако одновременно с этим будет расти и число молекул, возвращающихся в жидкость. Чем больше плотность пара, тем большее число его молекул возвращается в жидкость. В результате в закрытом сосуде при постоянной температуре установится *динамическое* (подвижное) *равновесие* между жидкостью и паром.

ЗАПОМНИ **Динамическое равновесие** — это состояние, при котором число молекул, покидающих поверхность жидкости за некоторый промежуток времени, будет равно в среднем числу молекул пара, возвратившихся за то же время в жидкость.

Для воды при комнатной температуре это число приблизительно равно 10^{22} молекул за время, равное 1 с (на 1 см^2 площади поверхности).

ЗАПОМНИ Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют **насыщенным паром**.



Согласно этому определению в данном объёме при данной температуре не может находиться большее количество пара.

Если воздух из сосуда с жидкостью предварительно откачан, то в сосуде над поверхностью жидкости будет находиться только её насыщенный пар.



Испарение. Конденсация. Насыщенный пар

Найти

- ?
1. Почему в жару собака высовывает язык?
 2. Приведите примеры динамического равновесия, подобного динамическому равновесию насыщенного пара и жидкости.
 3. Какой пар называется насыщенным?

A1. При какой температуре молекулы могут покидать поверхность воды?

- 1) только при температуре кипения
- 2) только при температуре выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 3) только при температуре выше $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4) при любой температуре выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

A2. Хаотичность теплового движения молекул жидкости приводит к тому, что

- 1) жидкость в открытом сосуде испаряется при любой температуре
- 2) температура жидкости во время её кипения не изменяется
- 3) жидкость трудно сжать
- 4) жидкость при охлаждении кристаллизуется

A3. Вода может испаряться

- 1) только при кипении
- 2) только при нагревании
- 3) при любой температуре, если пар в воздухе над поверхностью воды является ненасыщенным
- 4) при любой температуре, если пар в воздухе над поверхностью воды является насыщенным

A4. Часть воды испарилась из чашки при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Температура воды, оставшейся в чашке,

- 1) увеличилась
- 2) уменьшилась
- 3) не изменилась
- 4) увеличилась или уменьшилась в зависимости от скорости испарения

A5. Закупоренную бутылку, которая наполовину заполнена квасом, из тёплой комнаты переносят на холодный балкон. Через некоторое время устанавливается тепловое равновесие. Какое из приведённых ниже утверждений верно? В начальном состоянии водяной пар в бутылке являлся

- 1) насыщенным паром, в конечном состоянии — ненасыщенным
- 2) ненасыщенным паром, в конечном состоянии — насыщенным
- 3) насыщенным паром, в конечном состоянии — тоже насыщенным
- 4) ненасыщенным паром, в конечном состоянии — тоже ненасыщенным





§ 69 ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННОГО ПАРА

Как вы думаете, что будет происходить с насыщенным паром, если уменьшить занимаемый им объём: например, если сжимать пар, находящийся в равновесии с жидкостью в цилиндре под поршнем, поддерживая температуру содержимого цилиндра постоянной?

При сжатии пара равновесие начнёт нарушаться. Плотность пара в первый момент немного увеличится, и из газа в жидкость начнёт переходить большее число молекул, чем из жидкости в газ. Ведь число молекул, покидающих жидкость в единицу времени, зависит только от температуры, и сжатие пара это число не меняет. Процесс продолжается до тех пор, пока вновь не установится динамическое равновесие и плотность пара, а значит, и концентрация его молекул не примут прежних своих значений. Следовательно,

Важно концентрация молекул насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от его объёма.

Так как давление пропорционально концентрации молекул ($p = nkT$), то из этого определения следует, что

Важно давление насыщенного пара не зависит от занимаемого им объёма.

Запомни Давление $p_{н.п}$ пара, при котором жидкость находится в равновесии со своим паром, называют **давлением насыщенного пара**.

При сжатии насыщенного пара всё большая часть его переходит в жидкое состояние. Жидкость данной массы занимает меньший объём, чем пар той же массы. В результате объём пара при неизменной его плотности уменьшается.

Отметим ещё один важный факт.

Важно Газовые законы для насыщенного пара несправедливы (при любом объёме при постоянной температуре давление насыщенного пара одинаково). В то же время состояние насыщенного пара достаточно точно описывается уравнением Менделеева—Клапейрона.

Ненасыщенный пар.

Запомни Если пар постепенно сжимают при постоянной температуре, а превращение его в жидкость не происходит, то такой пар называют **ненасыщенным**.

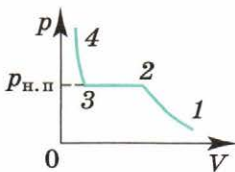


Рис. 11.1

При уменьшении объёма (рис. 11.1) давление ненасыщенного пара увеличивается (участок 1—2) подобно тому, как изменяется давление при уменьшении объёма идеального газа. При определённом объёме пар становится насыщенным, и при дальнейшем его сжатии происходит превращение его в жидкость (участок 2—3). В этом случае над жидкостью уже будет находиться насыщенный пар.



Как только весь пар превратится в жидкость, дальнейшее уменьшение объёма вызовет резкое увеличение давления (жидкость малосжимаема).

Однако пар превращается в жидкость не при любой температуре. Если температура выше некоторого значения, то, как бы мы ни сжимали газ, он никогда не превратится в жидкость.



Предположите, как ведут себя молекулы пара и жидкости на разных участках кривой (см. рис. 11.1).

Запомни Максимальная температура, при которой пар ещё может превратиться в жидкость, называется **критической температурой**.

Каждому веществу соответствует своя критическая температура, у гелия $T_{кр} = 4 \text{ К}$, у азота $T_{кр} = 126 \text{ К}$.

Запомни Состояние вещества при температуре выше критической называется **газом**; при температуре ниже критической, когда у пара есть возможность превратиться в жидкость, — **паром**.

Свойства насыщенного и ненасыщенного пара различны.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Состояние насыщенного пара, как показывает опыт, приближённо описывается уравнением состояния идеального газа (10.4), а его давление определяется формулой

$$p_{н. п} = nkT. \quad (11.1)$$

С ростом температуры давление растёт.

Важно Так как давление насыщенного пара не зависит от объёма, то, следовательно, оно зависит только от температуры.

Однако зависимость давления $p_{н. п}$ от температуры T , найденная экспериментально, не является прямо пропорциональной, как у идеального газа при постоянном объёме. С увеличением температуры давление реального насыщенного пара растёт быстрее, чем давление идеального газа (рис. 11.2, участок кривой AB). Это становится очевидным, если провести изохоры идеального газа через точки A и B (штриховые прямые). Почему это происходит?

При нагревании жидкости в закрытом сосуде часть жидкости превращается в пар. В результате согласно формуле (11.1)

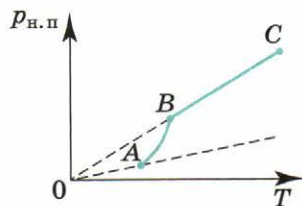


Рис. 11.2

Важно давление насыщенного пара растёт не только вследствие повышения температуры жидкости, но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара.

В основном увеличение давления при повышении температуры определяется именно увеличением концентрации. Главное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара состоит в том, что

Важно при изменении температуры пара в закрытом сосуде (или при изменении объёма при постоянной температуре) изменяется масса пара.



Почему составляются таблицы зависимости давления насыщенного пара от температуры и нет таблиц зависимости давления газа от температуры?

перестанет быть насыщенным и его давление при постоянном объёме будет возрастать прямо пропорционально абсолютной температуре (см. рис. 11.2, участок кривой *BC*).

Кипение. По мере увеличения температуры жидкости интенсивность испарения увеличивается. Наконец, жидкость начинает кипеть. При кипении по всему объёму жидкости образуются быстро растущие пузырьки пара, которые всплывают на поверхность.

Запомни

Кипение — это процесс парообразования, происходящий по всему объёму жидкости при температуре кипения.



Понаблюдайте внимательно за процессом нагрева, закипания и кипения воды в чайнике. Вы обнаружите, что перед закипанием чайник почти перестаёт шуметь.



При каких условиях начинается кипение?
На что расходуется при кипении подводимое к жидкости тепло с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

являются насыщенными. С увеличением температуры давление насыщенных паров возрастает и пузырьки увеличиваются в размерах. Под действием выталкивающей силы они всплывают вверх. Если верхние слои жидкости имеют более низкую температуру, то в этих слоях происходит конденсация пара в пузырьках. Давление стремительно падает, и пузырьки захлопываются. Захлопывание происходит настолько быстро, что стенки пузырька, сталкиваясь, производят нечто вроде взрыва. Множество таких микровзрывов создаёт характерный шум. Когда жидкость достаточно прогреется, пузырьки перестанут захлопываться и всплывут на поверхность. Жидкость закипит.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры объясняет, почему температура кипения жидкости зависит от давления на её поверхность. Пузырёк пара может расти, когда давление насыщенного пара внутри его немного превосходит давление в жидкости, которое складывается из давления воздуха на поверхность жидкости (внешнее давление) и гидростатического давления столба жидкости.

Обратим внимание на то, что

Важно

испарение жидкости происходит и при температурах, меньших температуры кипения, но только с поверхности жидкости, при кипении же образование пара происходит по всему объёму жидкости.

Жидкость частично превращается в пар, или, напротив, пар частично конденсируется. С идеальным газом ничего подобного не происходит.

Когда вся жидкость испарится, пар при дальнейшем нагревании

Температура кипения жидкости остаётся постоянной. Это происходит потому, что вся подводимая к жидкости энергия расходуется на превращение её в пар.

В жидкости всегда присутствуют растворённые газы, выделяющиеся на дне и стенках сосуда, а также на взвешенных в жидкости пылинках, которые являются центрами парообразования. Пары жидкости, находящиеся внутри пузырьков, яв-



Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках сравнивается и становится чуть больше давления в жидкости.

ВАЖНО

Чем больше внешнее давление, тем выше температура кипения.

Так, в паровом котле при давлении, достигающем $1,6 \cdot 10^6$ Па, вода не кипит и при температуре 200°C . В медицинских учреждениях в герметически закрытых сосудах — автоклавах (рис. 11.3) кипение воды также происходит при повышенном давлении. Поэтому температура кипения жидкости значительно выше 100°C . Автоклавы применяют, например, для стерилизации хирургических инструментов, ускорения приготовления пищи (скороварка), консервации пищи, проведения химических реакций.

И наоборот,

ВАЖНО

уменьшая внешнее давление, мы тем самым понижаем температуру кипения.

Откачивая насосом воздух и пары воды из колбы, можно заставить воду кипеть при комнатной температуре. При подъёме в горы атмосферное давление уменьшается, поэтому уменьшается температура кипения. На высоте 7134 м (пик Ленина на Памире) давление приближённо равно $4 \cdot 10^4$ Па (300 мм рт. ст.). Вода кипит там примерно при 70°C . Сварить мясо в этих условиях невозможно.

У каждой жидкости своя температура кипения, которая зависит от свойств жидкости. При одной и той же температуре давление насыщенного пара разных жидкостей различно.

Например, при температуре 100°C давление насыщенных паров воды равно 101 325 Па (760 мм рт. ст.), а паров ртути — всего лишь 117 Па (0,88 мм рт. ст.). Так как кипение происходит при той же температуре, при которой давление насыщенного пара равно внешнему давлению, то вода при 100°C закипает, а ртуть нет. Кипит ртуть при температуре 357°C при нормальном давлении.

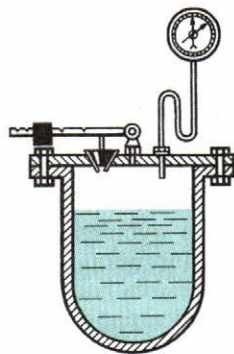


Рис. 11.3



Различаются ли значения удельной теплоты испарения и удельной теплоты парообразования?

Давление насыщенного пара. Критическая температура

Найти



1. Почему давление насыщенного пара не зависит от его объёма?
2. Почему температура кипения возрастает с увеличением давления?
3. Почему для кипения существенно повышение давления насыщенного пара в пузырьках, а не повышение давления имеющегося в них воздуха?
4. Как заставить закипеть жидкость, охлаждая сосуд? (Вопрос этот непростой.)





§ 70 ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Вспомните, что такое пар и каковы его основные свойства.

Можно ли считать воздух газом?

Применимы ли законы идеального газа для воздуха?

ИНТЕРЕСНО

Вода занимает около 70,8% поверхности земного шара. Живые организмы содержат от 50 до 99,7% воды. Образно говоря, живые организмы — это одушевлённая вода. В атмосфере находится около 13—15 тыс. км³ воды в виде капель, кристаллов снега и водяного пара. Атмосферный водяной пар влияет на погоду и климат Земли.

Водяной пар в атмосфере. Водяной пар в воздухе, несмотря на огромные поверхности океанов, морей, озёр и рек, далеко не всегда является насыщенным. Перемещение воздушных масс приводит к тому, что в одних местах нашей планеты в данный момент испарение воды преобладает над конденсацией, а в других, наоборот, преобладает конденсация. Но в воздухе практически всегда имеется некоторое количество водяного пара.

Содержание водяного пара в воздухе, т. е. его влажность, можно характеризовать несколькими величинами.

ЗАПОМНИ

СТЬЮ.

Плотность водяного пара в воздухе называется **абсолютной влажностью**.

Абсолютная влажность выражается, следовательно, в килограммах на метр кубический (кг/м³).

Парциальное давление водяного пара. Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов и водяного пара. Каждый из газов вносит свой вклад в суммарное давление, производимое воздухом на находящиеся в нём тела.

ЗАПОМНИ

Давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называют **парциальным давлением водяного пара**.

Парциальное давление водяного пара принимают за один из показателей влажности воздуха. Его выражают в единицах давления — паскалях или миллиметрах ртутного столба.



Подумайте, что определяет парциальное давление одного из компонент смеси газов в данном сосуде.

Так как воздух представляет собой смесь газов, то атмосферное давление определяется суммой парциальных давлений всех компонент сухого воздуха (кислорода, азота, углекислого газа и т. д.) и водяного пара.

Относительная влажность. По парциальному давлению водяного пара и абсолютной влажности ещё нельзя судить о том, насколько водяной пар в данных условиях близок к насыщению. А именно от этого зависит интенсивность испарения воды и потеря влаги живыми организмами. Вот почему вводят величину, показывающую, насколько водяной пар при данной температуре близок к насыщению, — *относительную влажность*.



Запомни **Относительной влажностью воздуха** называют отношение парциального давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению $p_{н.п}$ насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_{н.п}} \cdot 100 \% . \quad (11.2)$$

Относительная влажность воздуха обычно меньше 100 %.

При понижении температуры парциальное давление паров воды в воздухе может стать равным давлению насыщенного пара. Пар начинает конденсироваться, и выпадает роса.

Запомни Температура, при которой водяной пар становится насыщенным, называется **точкой росы**.

По точке росы можно определить относительную влажность воздуха.

Психрометр. Влажность воздуха измеряют с помощью специальных приборов. Мы расскажем об одном из них — *психрометре*.

Психрометр состоит из двух термометров (рис. 11.4). Резервуар одного из них остаётся сухим, и он показывает температуру воздуха. Резервуар другого окружён полоской ткани, конец которой опущен в воду. Вода испаряется, и благодаря этому термометр охлаждается. Чем больше относительная влажность, тем менее интенсивно идёт испарение и температура, показываемая термометром, окружённым влажной тканью, ближе к температуре, показываемой сухим термометром.

При относительной влажности, равной 100 %, вода вообще не будет испаряться и показания обоих термометров будут одинаковы. По разности температур этих термометров с помощью специальных таблиц можно определить влажность воздуха.

Значение влажности. От влажности зависит интенсивность испарения влаги с поверхности кожи человека. А испарение влаги имеет большое значение для поддержания температуры тела постоянной. В космических кораблях поддерживается наиболее благоприятная для человека относительная влажность воздуха (40—60 %).

Очень важно знать влажность в метеорологии — в связи с предсказанием погоды. Хотя относительное количество водяного пара в атмосфере сравнительно невелико (около

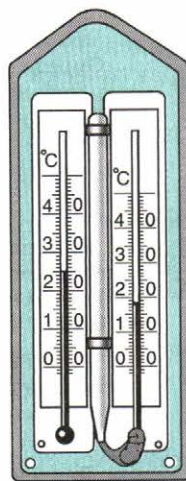


Рис. 11.4



Как вы думаете, при каких условиях выпадает роса? Почему перед дождливым днём вечером на траве нет росы?



Повесьте в классной комнате психрометр и наблюдайте за изменением влажности. Постройте график изменения влажности на протяжении учебного дня. Объясните, чем определяется это изменение.



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «НАСЫЩЕННЫЙ ПАР. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА»

При решении задач надо иметь в виду, что давление и плотность насыщенного пара не зависят от его объёма, а зависят только от температуры. Уравнение состояния идеального газа приближённо применимо и для описания насыщенного пара. Но при сжатии или нагревании насыщенного пара его масса не остаётся постоянной.

При решении некоторых задач могут понадобиться значения давления насыщенного пара при некоторых температурах. Эти данные нужно брать из таблицы.

Задача 1. Закрытый сосуд объёмом $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ содержит воду массой $m = 0,5 \text{ кг}$. Сосуд нагрели до температуры $t = 147 \text{ }^\circ\text{C}$. На сколько следует изменить объём сосуда, чтобы в нём содержался только насыщенный пар? Давление насыщенного пара $p_{\text{н.п}}$ при температуре $t = 147 \text{ }^\circ\text{C}$ равно $4,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Решение. Насыщенный пар при давлении $p_{\text{н.п}}$ занимает объём, равный $V = \frac{mRT}{p_{\text{н.п}}M} \approx 0,2 \text{ м}^3$, где $M = 0,018 \text{ кг/моль}$ — молярная масса воды. Объём сосуда $V_1 > V$, а значит, пар не является насыщенным. Для того чтобы пар стал насыщенным, объём сосуда следует уменьшить на

$$\Delta V = V_1 - V = V_1 - \frac{mRT}{p_{\text{н.п}}M} = 0,3 \text{ м}^3.$$

Задача 2. Относительная влажность воздуха в закрытом сосуде при температуре $t_1 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ равна $\varphi_1 = 84 \%$, а при температуре $t_2 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ равна $\varphi_2 = 30 \%$. Во сколько раз давление насыщенного пара воды при температуре t_2 больше, чем при температуре t_1 ?

Решение. Давление водяного пара в сосуде при $T_1 = 278 \text{ К}$ равно $p_1 = \frac{\varphi_1}{100 \%} p_{\text{н.п}1}$, где $p_{\text{н.п}1}$ — давление насыщенного пара при температуре T_1 . При температуре $T_2 = 295 \text{ К}$ давление $p_2 = \frac{\varphi_2}{100 \%} p_{\text{н.п}2}$.

Так как объём постоянен, то по закону Шарля $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

Отсюда $\frac{p_{\text{н.п}2}}{p_{\text{н.п}1}} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \frac{T_2}{T_1} \approx 3$.

Задача 3. В комнате объёмом 40 м^3 температура воздуха $20 \text{ }^\circ\text{C}$, его относительная влажность $\varphi_1 = 20 \%$. Сколько надо испарить воды, чтобы относительная влажность φ_2 достигла 50% ? Известно, что при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ давление насыщающих паров $p_{\text{н.п}} = 2330 \text{ Па}$.

Решение. Относительная влажность $\varphi_1 = \frac{p_{\text{п}1}}{p_{\text{н.п}}} 100 \%$ отсюда

$$\varphi_1 = \frac{p_{\text{п}1}}{p_{\text{н.п}}} 100 \%, \quad \varphi_2 = \frac{p_{\text{п}2}}{p_{\text{н.п}}} 100 \%.$$

Давление пара при относительной влажности φ_1 и φ_2

$$p_{п1} = \frac{\varphi_1 p_{н.п}}{100\%}, \quad p_{п2} = \frac{\varphi_2 p_{н.п}}{100\%}.$$

Плотность связана с давлением равенством $\rho = Mp/RT$, откуда

$$\rho_1 = \frac{Mp_{п1}}{RT}, \quad \rho_2 = \frac{Mp_{п2}}{RT}.$$

Массы воды в комнате при влажности φ_1 и φ_2

$$m_1 = \rho_1 V = \frac{Mp_{п1}}{RT} V, \quad m_2 = \rho_2 V = \frac{Mp_{п2}}{RT} V.$$

Масса воды, которую надо испарить:

$$m = m_2 - m_1 = \frac{MV}{RT} (p_{п2} - p_{п1}) = \frac{Mp_{н.п}V}{RT 100\%} (\varphi_2 - \varphi_1) = 0,208 \text{ кг}.$$

Задача 4. В комнате с закрытыми окнами при температуре 15°C относительная влажность $\varphi_1 = 10\%$. Чему станет равна относительная влажность, если температура в комнате повысится на 10°C ? Давление насыщенного пара при 15°C $p_{н.п1} = 12,8$ мм рт. ст., а при 25°C $p_{н.п2} = 23,8$ мм рт. ст.

Решение. Так как пар ненасыщенный, то парциальное давление пара изменяется по закону Шарля $p_1/T_1 = p_2/T_2$. Из этого уравнения можно определить давление ненасыщенного пара p_2 при T_2 : $p_2 = p_1 T_2/T_1$. Относительная влажность при T_1 равна:

$$\varphi_1 = \frac{p_1}{p_{н.п1}} 100\%. \quad (1)$$

Относительная влажность при $T_2 = 25^\circ\text{C}$ равна:

$$\varphi_2 = \frac{p_2}{p_{н.п2}} 100\% = \frac{p_1 T_2}{p_{н.п2} T_1} 100\%. \quad (2)$$

Из уравнения (1) получим $p_1 = \frac{\varphi_1 p_{н.п1}}{100\%}$, следовательно, $\varphi_2 = \frac{\varphi_1 p_{н.п1} T_2}{p_{н.п2} T_1} = 5,6\%$.

Задача 5. Относительная влажность воздуха в помещении 60% , температура 18°C . До какой температуры надо охладить металлический предмет, чтобы его поверхность запотела?

Решение. Относительная влажность воздуха $\varphi = (p/p_{н.п}) 100\%$.

Для конденсации пара необходимо, чтобы он стал насыщенным, т. е. температура достигла точки росы. Давление пара при 18°C должно стать равным давлению насыщенного пара при искомой температуре:

$$p = \frac{\varphi p_{н.п}}{100\%} = 1,24 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Давление насыщенного пара $p_{н.п} = 1,23 \cdot 10^4$ Па при температуре $t_2 = 10^\circ\text{C}$ (определяем по таблице). Следовательно, $t_2 \approx 10^\circ\text{C}$.





Задачи для самостоятельного решения

1. Как будет меняться температура кипения воды, если сосуд с водой опускать в глубокую шахту?

2. Чему равна плотность пара в пузырьках, поднимающихся к поверхности воды, кипящей при атмосферном давлении?

3. На улице моросит холодный осенний дождь. В комнате развешано выстиранное бельё. Высохнет ли бельё быстрее, если открыть форточку?

4. При температуре $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная влажность в комнате $\varphi_1 = 20\%$. Определите массу воды, которую нужно испарить для увеличения влажности до $\varphi_2 = 50\%$, если объём комнаты $V = 40\text{ м}^3$. Плотность насыщенного пара воды при температуре $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна $\rho_{\text{н.п}} = 1,73 \cdot 10^{-2}\text{ кг/м}^3$.

5. Смешали воздух объёмом 5 м^3 и относительной влажностью 22% при температуре $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ с воздухом с относительной влажностью 46% при температуре $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите относительную влажность смеси, если её объём 8 м^3 .

6. Температура воздуха вечером была $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 65% . Ночью температура воздуха понизилась до $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выпала ли роса? Если выпала, то сколько водяного пара конденсировалось из воздуха объёмом 1 м^3 ? При $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ плотность насыщенного пара $15,4\text{ г/м}^3$, при $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $8,8\text{ г/м}^3$.

С1. Человек в очках вошёл с улицы в тёплую комнату и обнаружил, что его очки запотели. Какой должна быть температура на улице, чтобы наблюдалось это явление? В комнате температура воздуха $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность 50% . Поясните, как вы получили ответ. (Для ответа на вопрос воспользуйтесь таблицей давления насыщенных паров воды.)



Давление насыщенных паров воды при различных температурах

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	0	2	4	6	8	10	12	14
$p, \text{ кПа}$	0,611	0,705	0,813	0,934	1,07	1,23	1,4	1,59

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	16	18	20	22	24	26	28	30
$p, \text{ кПа}$	1,81	2,06	2,19	2,64	2,99	3,17	4,24	7,37

ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 11 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.



ГЛАВА 12 ТВЁРДЫЕ ТЕЛА

Мы живём на поверхности твёрдого тела — земного шара, в домах, построенных из твёрдых тел. Различные приборы, орудия труда сделаны из твёрдых тел. Знать свойства твёрдых тел необходимо.



§ 72 КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Вспомните, что такое твёрдое тело. Чем мы пренебрегали, когда в механике считали, что тело абсолютно твёрдое?

Каковы физические свойства твёрдых тел?

Какие физические величины характеризуют свойства твёрдых тел?

Твёрдые тела сохраняют не только свой объём, как жидкости, но и форму. Они находятся преимущественно в кристаллическом состоянии.

ЗАПОМНИ

Кристаллы — это твёрдые тела, атомы или молекулы которых занимают определённые, упорядоченные положения в пространстве.



Поэтому кристаллы имеют плоские грани. Например, крупинка обычной поваренной соли имеет плоские грани, составляющие друг с другом прямые углы (рис. 12.1). Это можно заметить, рассматривая соль с помощью лупы. А как геометрически правильна форма снежинки! В ней также отражена геометрическая правильность внутреннего строения кристаллического твёрдого тела — льда (рис. 12.2).

Анизотропия кристаллов. Однако правильная внешняя форма не единственное и даже не самое главное следствие упорядоченного строения кристалла.

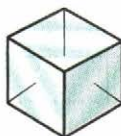


Рис. 12.1



Рис. 12.2

ВАЖНО

Главное следствие упорядоченного строения — это зависимость физических свойств кристалла от выбранного в кристалле направления.

ЗАПОМНИ

Зависимость физических свойств от направления внутри кристалла называют **анизотропией**.



Рис. 12.3

Прежде всего бросается в глаза различная механическая прочность кристаллов по разным направлениям. Например, кусок слюды легко расслаивается в одном из направлений на тонкие пластинки (рис. 12.3), но разорвать его в направлении, перпендикулярном пластинкам, гораздо труднее. Так же легко расслаивается в одном направлении кристалл графита.

Это происходит потому, что кристаллическая решётка графита имеет слоистую структуру. Слои образованы рядом параллельных сеток, состоящих из атомов углерода (рис. 12.4). Атомы располагаются в вершинах правильных шестиугольников. Расстояние между слоями сравнительно велико — примерно в 2 раза больше, чем длина стороны шестиугольника, поэтому связи между слоями менее прочны, чем связи внутри их.

Многие кристаллы по-разному проводят тепло и электрический ток в различных направлениях. От направления зависят и оптические свойства кристаллов.

Все кристаллические тела анизотропны.

Монокристаллы и поликристаллы. Кристаллическую структуру имеют металлы.

ИНТЕРЕСНО
Когда вы пишете карандашом, такое расслоение графита происходит непрерывно и его тонкие слои остаются на бумаге.

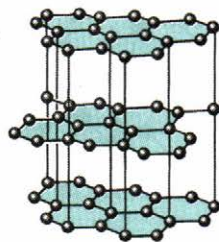


Рис. 12.4

При падении света на кристалл кварца световой поток распадается на два потока, идущие в кристалле по разным направлениям. Это явление получило название двойного лучепреломления. **ИНТЕРЕСНО**

Если взять сравнительно большой кусок металла, то на первый взгляд его кристаллическое строение никак не проявляется ни во внешнем виде этого куска, ни в его физических свойствах. Металлы в обычном состоянии не обнаруживают анизотропии.

Дело здесь в том, что обычно металл состоит из огромного количества сросшихся друг с другом маленьких кристалликов. Под микроскопом или даже с помощью лупы их нетрудно рассмотреть, особенно на свежем изломе металла (рис. 12.5). Свойства каждого кристаллика зависят от направления, но кристаллики ориентированы по отношению друг к другу беспорядочно. В результате в объёме, значительно превышающем объём отдельных кристалликов, все направления внутри металлов равноправны и свойства металлов одинаковы по всем направлениям.



Рис. 12.5

ЗАПОМНИ

Твёрдое тело, состоящее из большого числа маленьких кристалликов, называют **поликристаллическим**. Одиночные кристаллы называют **монокристаллами**.



Растворите в стакане с водой соль, сделайте концентрированный раствор. Опустите в насыщенный раствор несколько кристалликов соли и оставьте, пока вода не испарится. Посмотрите, что останется в стакане. Сделайте выводы.

В обычных условиях поликристаллическое тело образуется в результате того, что начавшийся рост многих кристаллов продолжается до тех пор, пока они не приходят в соприкосновение друг с другом, образуя единое тело.

К поликристаллам относятся не только металлы. Кусок сахара, например, также имеет поликристаллическую структуру.

ИНТЕРЕСНО Соблюдая большие предосторожности, можно вырастить металлический кристалл больших размеров — монокристалл.

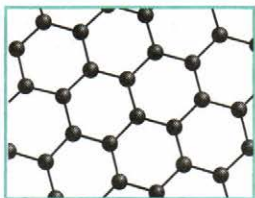


Рис. 12.6

(рис. 12.6). В 30-х годах прошлого века было доказано, что двумерные кристаллы неустойчивы и легко разрушаются.

Однако графен имеет волнообразную структуру, что определяет его устойчивость. Графен обладает уникальными свойствами — он прочен, имеет высокую проводимость и прозрачен. Из него можно собрать трёхмерный кристалл графита.

ИНТЕРЕСНО За «перевые опыты с двумерным материалом — графеном» Андрею Константиновичу Гейму и Константину Сергеевичу Новосёлову была присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 год.

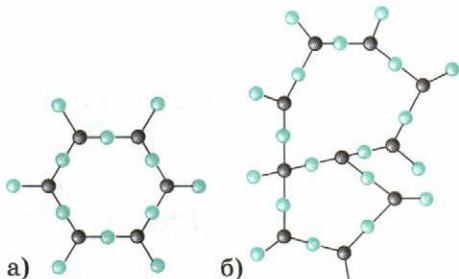


Рис. 12.7

Аморфные тела. Кроме твёрдых тел, имеющих кристаллическую структуру, которая характеризуется строгим порядком в расположении атомов, существуют аморфные твёрдые тела.

У аморфных тел нет строгого порядка в расположении атомов. Только ближайшие атомы-соседи располагаются в некотором порядке. Но строгой повторяемости по всем направлениям одного и того же элемента структуры, которая характерна для кристаллов, в аморфных телах нет.

По расположению атомов и по их поведению аморфные тела аналогичны жидкостям. Часто одно и то же вещество может находиться как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии. Например, кварц SiO_2 может быть как в кристаллической, так и в аморфной форме (кремнезём). Кристаллическую форму кварца схематически можно представить в виде решётки из правильных шестиугольников (рис. 12.7, а). Аморфная структура кварца также имеет вид решётки, но неправильной формы. Наряду с шестиугольниками в ней встречаются пяти- и семиугольники (рис. 12.7, б).

Свойства аморфных тел.

ВАЖНО Все аморфные тела изотропны, т. е. их физические свойства одинаковы по всем направлениям.

ИНТЕРЕСНО Слово «аморфный» происходит от греческого слова *morphos* — форма и частицы *a*, имеющей смысл отрицания.

При внешних воздействиях аморфные тела обнаруживают одновременно упругие свойства, подобно твёрдым телам, и текучесть, подобно жидкости. Так, при кратковре-



менных воздействиях (ударах) они ведут себя как твёрдые тела и при сильном ударе раскалываются на куски. Но при очень продолжительном воздействии аморфные тела текут.

Атомы или молекулы аморфных тел, подобно молекулам жидкости, имеют определённое время «оседлой жизни» — время колебаний около положения равновесия. Но в отличие от жидкостей это время у них весьма велико.

В этом отношении аморфные тела близки к кристаллическим, так как перескоки атомов из одного положения равновесия в другое происходят сравнительно редко.

Аморфные тела при низких температурах по своим свойствам напоминают твёрдые тела. Текучестью они почти не обладают, но по мере повышения температуры постепенно размягчаются и их свойства всё более и более приближаются к свойствам жидкостей. Это происходит потому, что с ростом температуры постепенно учащаются перескоки атомов из одного положения равновесия в другое.

Важно Определённой температуры плавления у аморфных тел, в отличие от кристаллических, нет.

Жидкие кристаллы. В природе встречаются вещества, обладающие одновременно основными свойствами кристалла и жидкости, а именно анизотропией и текучестью.

Запомни Состояние вещества, обладающего одновременно анизотропией и текучестью, называется **жидкокристаллическим**.

Жидкими кристаллами являются в основном органические вещества, молекулы которых имеют длинную нитевидную форму или форму плоских пластин.

Рассмотрим наиболее простой случай, когда жидкий кристалл образуется нитевидными молекулами. Эти молекулы расположены параллельно друг другу, однако беспорядочно сдвинуты, т. е. порядок, в отличие от обычных кристаллов, существует только в одном направлении.

При тепловом движении центры этих молекул движутся хаотично, однако ориентация молекул не изменяется, и они остаются параллельны самим себе.

Важно Строгая ориентация молекул существует не во всём объёме кристалла, а в небольших областях, называемых **доменами**.

На границе доменов происходит преломление и отражение света, поэтому жидкие кристаллы непрозрачны. Однако в слое жидкого кристалла, помещённом между двумя тонкими пластинами, расстояния между которыми 0,01—0,1 мм, с параллельными углублениями 10—100 нм, все молекулы

К аморфным телам относятся **ИНТЕРЕСНО** стекло, смола, канифоль, сахарный леденец и др.



Проследите за куском смолы, который лежит на твёрдой поверхности. Постепенно смола по ней растекается, и, чем выше температура смолы, тем быстрее это происходит.

Для вара при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ время **ИНТЕРЕСНО** «оседлой жизни» примерно 0,1 с.



будут параллельны и кристалл станет прозрачным. Если на какие-то участки жидкого кристалла подать электрическое напряжение, то жидкокристаллическое состояние нарушается. Эти участки становятся непрозрачными и начинают светиться, а участки без напряжения остаются тёмными.

ИНТЕРЕСНО Явление свечения жидких кристаллов используется при создании жидкокристаллических экранов телевизоров. Сам экран состоит из огромного числа элементов, и электронная схема управления таким экраном чрезвычайно сложна.

Физика твёрдого тела. Теоретические исследования приводят к получению твёрдых тел, свойства которых совершенно необычны. Получить такие тела методом проб и ошибок было бы невозможно. Создание транзисторов, о которых пойдёт речь в дальнейшем, — яркий пример того, как понимание структуры твёрдых тел привело к революции во всей радиотехнике.

Получение материалов с заданными механическими, магнитными, электрическими и другими свойствами — одно из основных направлений современной физики твёрдого тела.

Кристаллы. Аморфные тела. Жидкие кристаллы

Найти



1. Все ли кристаллические тела анизотропны?
2. Древесина анизотропна. Является ли она кристаллическим телом?
3. Приведите примеры монокристаллических и поликристаллических тел, не упомянутых в тексте.
4. Чем отличаются аморфные тела от кристаллических?
5. Приведите примеры аморфных тел.
6. Возникла бы профессия стеклодува, если бы стекло было кристаллическим телом, а не аморфным?



ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 12 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.



«Физика твёрдого тела»

1. Создание новых материалов по заданным свойствам.
2. Дефекты в кристаллах.
3. Жидкие кристаллы в технике.
4. Резина и её физические свойства. Полимеры и их использование.
5. Искусственные алмазы.



«Исследование условий роста кристаллов»

ГЛАВА 13 ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Тепловые явления можно описывать с помощью величин (макроскопических параметров), измеряемых такими приборами, как манометр и термометр. Эти приборы не реагируют на воздействие отдельных молекул. Теория тепловых процессов, в которой не учитывается молекулярное строение тел, называется *термодинамикой*. В термодинамике рассматриваются процессы с точки зрения превращения теплоты в другие виды энергии.



§ 73 ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Вспомните из курса физики основной школы, что такое внутренняя энергия. Какие способы изменения внутренней энергии вы знаете?

Термодинамика была создана в середине XIX в. после открытия закона сохранения энергии. В её основе лежит понятие *внутренняя энергия*. Само название «внутренняя» предполагает рассмотрение системы как ансамбля движущихся и взаимодействующих молекул. Остановимся на вопросе о том, какая связь существует между термодинамикой и молекулярно-кинетической теорией.

Термодинамика и статистическая механика. Первой научной теорией тепловых процессов была не молекулярно-кинетическая теория, а термодинамика.

Термодинамика возникла при изучении оптимальных условий использования теплоты для совершения работы. Это произошло в середине XIX в., задолго до того, как молекулярно-кинетическая теория получила всеобщее признание. Тогда же было доказано, что наряду с механической энергией макроскопические тела обладают ещё и энергией, заключённой внутри самих тел.

ИНТЕРЕСНО

Сейчас в науке и технике при изучении тепловых явлений используется как термодинамика, так и молекулярно-кинетическая теория. В теоретической физике молекулярно-кинетическую теорию называют *статистической механикой*.

ВАЖНО

Термодинамика и статистическая механика изучают различными методами одни и те же явления и взаимно дополняют друг друга.

ЗАПОМНИ

Термодинамической системой называют совокупность взаимодействующих тел, обменивающихся энергией и веществом.

Главное содержание термодинамики состоит в двух основных её законах, касающихся преобразования энергии. Эти законы установлены опытным путём. Они справедливы для всех веществ независимо от их внутреннего строения.

Внутренняя энергия в молекулярно-кинетической теории.

Основным понятием в термодинамике является понятие внутренней энергии.

**Запомни**

Внутренняя энергия тела (системы) — это сумма кинетической энергии хаотичного теплового движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия.

Механическая энергия тела (системы) как целого не входит во внутреннюю энергию. Например, внутренняя энергия газов в двух одинаковых сосудах при равных условиях одинакова независимо от движения сосудов и их расположения относительно друг друга.

Вычислить внутреннюю энергию тела (или её изменение), учитывая движение отдельных молекул и их положения относительно друг друга, практически невозможно из-за огромного числа молекул в макроскопических телах. Поэтому необходимо уметь определять значение внутренней энергии (или её изменение) в зависимости от макроскопических параметров, которые можно непосредственно измерить.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа. Вычислим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа.

Согласно модели молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, следовательно, потенциальная энергия их взаимодействия равна нулю. Вся внутренняя энергия идеального газа определяется кинетической энергией беспорядочного движения его молекул.

Для вычисления внутренней энергии идеального одноатомного газа массой m нужно умножить среднюю кинетическую энергию одного атома на число атомов. Учитывая, что $kN_A = R$, получим формулу для внутренней энергии идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (13.1)$$

Важно

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Она не зависит от объёма и других макроскопических параметров системы.

Важно

$$\text{Изменение внутренней энергии идеального газа } \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1),$$

т. е. определяется температурами начального и конечного состояний газа и не зависит от процесса.

Если идеальный газ состоит из более сложных молекул, чем одноатомный, то его внутренняя энергия также пропорциональна абсолютной температуре, но коэффициент пропорциональности между U и T другой. Объясняется это тем, что сложные молекулы не только движутся поступательно, но ещё и вращаются и колеблются относительно своих положений равновесия. Внутренняя энергия таких газов равна сумме энергий поступательного, вращательного и колебательного движений молекул. Следовательно, внутренняя энергия многоатомного газа больше энергии одноатомного газа при той же температуре.



Выведите выражение (13.1).



Зависимость внутренней энергии от макроскопических параметров. Мы установили, что внутренняя энергия идеального газа зависит от одного параметра — температуры.



Объясните, почему внутренняя энергия идеального газа не зависит от объёма.

У реальных газов, жидкостей и твёрдых тел средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул *не равна нулю*. Правда, для газов она много меньше средней кинетической энергии молекул, но для твёрдых и жидких тел сравнима с ней.

Средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул газа зависит от объёма вещества, так как при изменении объёма меняется среднее расстояние между молекулами. Следовательно,

Важно

внутренняя энергия реального газа в термодинамике в общем случае зависит наряду с температурой T и от объёма V .

Значения макроскопических параметров (температуры T , объёма V и др.) однозначно определяют состояние тел. Поэтому они определяют и внутреннюю энергию макроскопических тел.



Подумайте, можно ли утверждать, что внутренняя энергия реального газа зависит от давления, основываясь на том, что давление можно выразить через температуру и объём газа.

Внутренняя энергия U макроскопических тел однозначно определяется параметрами, характеризующими состояние этих тел: температурой и объёмом.

Внутренняя энергия реального и идеального газов

Найти



1. Приведите примеры превращения механической энергии во внутреннюю и обратно в технике и быту.
2. От каких физических величин зависит внутренняя энергия тела?
3. Чему равна внутренняя энергия идеального одноатомного газа?

A1. Внутренняя энергия идеального газа в герметично закрытом сосуде уменьшается при

- 1) его охлаждении
- 2) его нагревании
- 3) уменьшении потенциальной энергии сосуда
- 4) уменьшении кинетической энергии сосуда

A2. В каком тепловом процессе внутренняя энергия идеального газа постоянной массы **НЕ** изменяется при переходе его из одного состояния в другое?

- 1) в изобарном
- 2) в изохорном
- 3) в адиабатном
- 4) в изотермическом

A3. Как изменяется внутренняя энергия одноатомного идеального газа при повышении его абсолютной температуры в 2 раза?

- 1) увеличивается в 4 раза
- 2) увеличивается в 2 раза
- 3) уменьшается в 2 раза
- 4) уменьшается в 4 раза





§ 74 РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

В результате каких процессов может изменяться внутренняя энергия? Как определяется работа в механике?

Работа в механике и термодинамике. В *механике* работа определяется как произведение модуля силы, модуля перемещения точки её приложения и косинуса угла между векторами силы и перемещения. При действии силы на движущееся тело работа этой силы равна изменению его кинетической энергии.

Работа в *термодинамике* определяется так же, как и в механике, но она равна не изменению кинетической энергии тела, а изменению его внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии при совершении работы. Почему при сжатии или расширении тела меняется его внутренняя энергия? Почему, в частности, нагревается воздух при накачивании велосипедной шины?

Причина изменения температуры газа в процессе его сжатия состоит в следующем:

Важно

при упругих соударениях молекул газа с движущимся поршнем изменяется их кинетическая энергия.



Понаблюдайте за изменением температуры насоса при накачивании велосипедной камеры.

Интересно

При сжатии или расширении меняется и средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул, так как при этом меняется среднее расстояние между молекулами.

Так, при движении навстречу молекулам газа поршень во время столкновений передаёт им часть своей механической энергии, в результате чего увеличивается внутренняя энергия газа и он нагревается. Поршень действует подобно футболисту, встречающему летящий на него мяч ударом ноги. Нога футболиста сообщает мячу скорость, значительно большую той, которой он обладал до удара.

И наоборот, если газ расширяется, то после столкновения с удаляющимся поршнем скорости молекул уменьшаются, в результате чего газ охлаждается.

Так же действует и футболист, для того чтобы уменьшить скорость летящего мяча или остановить его, — нога футболиста движется от мяча, как бы уступая ему дорогу.

Вычисление работы. Вычислим работу силы \vec{F} , действующей на газ со стороны внешнего тела (поршня), в зависимости от изменения объёма на примере газа в цилиндре под поршнем (рис. 13.1), при этом давление газа поддерживается постоянным. Сначала вычислим работу, которую совершает сила давления газа, действуя на поршень с силой \vec{F}' . Если поршень поднимается медленно и равномерно, то, согласно третьему закону Ньютона, $\vec{F} = \vec{F}'$. В этом случае газ расширяется изобарно.

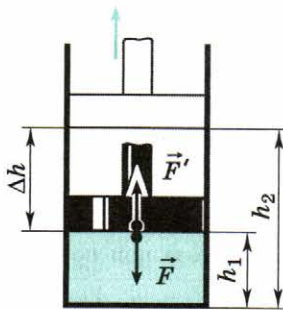


Рис. 13.1



Модуль силы, действующей со стороны газа на поршень, равен $F' = pS$, где p — давление газа, а S — площадь поверхности поршня.

При подъёме поршня на малое расстояние $\Delta h = h_2 - h_1$ работа газа равна:

$$A' = F'\Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1). \quad (13.2)$$

Начальный объём, занимаемый газом, $V_1 = Sh_1$, а конечный $V_2 = Sh_2$. Поэтому можно выразить работу газа через изменение объёма $\Delta V = (V_2 - V_1)$:

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V > 0. \quad (13.3)$$

При расширении газ совершает положительную работу, так как направление силы и направление перемещения поршня совпадают.

Если газ сжимается, то формула (13.3) для работы газа остаётся справедливой. Но теперь $V_2 < V_1$, и поэтому $A < 0$.

Работа A , совершаемая внешними телами над газом, отличается от работы A' самого газа только знаком:

$$A = -A' = -p\Delta V. \quad (13.4)$$

При сжатии газа, когда $\Delta V = V_2 - V_1 < 0$, работа внешней силы оказывается положительной. Так и должно быть: при сжатии газа направления силы и перемещения точки её приложения совпадают.

Если давление не поддерживать постоянным, то при расширении газ теряет энергию и передаёт её окружающим телам: поднимающемуся поршню, воздуху и т. д. Газ при этом охлаждается. При сжатии газа, наоборот, внешние тела передают ему энергию и газ нагревается.

Геометрическое истолкование работы. Работе A' газа для случая постоянного давления можно дать простое геометрическое истолкование.

При постоянном давлении график зависимости давления газа от занимаемого им объёма — прямая, параллельная оси абсцисс (рис. 13.2). Очевидно, что площадь прямоугольника $abdc$, ограниченная графиком $p_1 = \text{const}$, осью V и отрезками ab и cd , равными давлению газа, численно равна работе, определяемой формулой (13.3):

$$A' = p_1(V_2 - V_1) = |ab| \cdot |ac|.$$

В общем случае давление газа не остаётся неизменным. Например, при изотермическом процессе оно убывает обратно пропорционально объёму (рис. 13.3). В этом случае для вычисления работы нужно разделить общее изменение объёма на малые части и вычислить элементарные (малые) работы, а потом все их сложить. Работа газа по-прежнему численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависи-



Объясните, почему процесс расширения газа должен происходить очень медленно.



Обсудите с одноклассниками справедливость формулы (13.4). Может ли работа внешних сил быть больше или меньше работы силы давления газа?

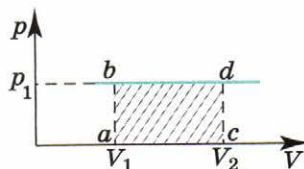


Рис. 13.2

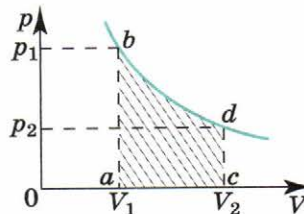


Рис. 13.3



Объясните нагревание и охлаждение газа при изменении его объёма при постоянном давлении с точки зрения МКТ.

мости p от V , осью V и отрезками ab и cd , длина которых численно равна давлениям p_1, p_2 в начальном и конечном состояниях газа.

Работа газа при различных процессах

Найти



- Почему газы при сжатии нагреваются?
- Положительную или отрицательную работу совершают внешние силы при изотермическом процессе, изображённом на рисунке 13.3?

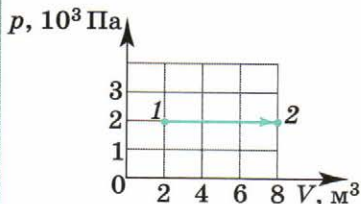


A1. Объём газа, расширяющегося при постоянном давлении 100 кПа, увеличился на 2 л. Работа, совершённая газом в этом процессе, равна

- 1) 2000 Дж 2) 20 000 Дж 3) 200 Дж 4) 50 МДж

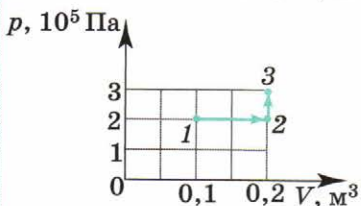
A2. Какая работа была совершена при изобарном сжатии водорода, взятого в количестве 6 моль, если его температура изменилась на 50 К?

- 1) 1 Дж 2) 69,25 Дж 3) 138,5 Дж 4) 2493 Дж



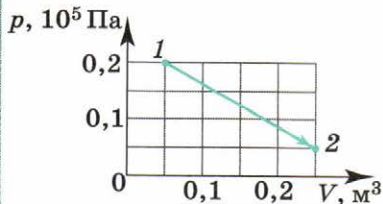
A3. Какая работа совершается газом при переходе его из состояния 1 в состояние 2 (см. рис.)?

- 1) 8 кДж 3) 8 Дж
2) 12 кДж 4) 6 Дж



A4. Какую работу совершает газ при переходе из состояния 1 в состояние 3 (см. рис.)?

- 1) 10 кДж 3) 30 кДж
2) 20 кДж 4) 40 кДж



A5. Какую работу совершил одноатомный газ в процессе, изображённом на рисунке в координатах p, V ?

- 1) 2,5 кДж 3) 3 кДж
2) 1,5 кДж 4) 4 кДж

**ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ
«ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ. РАБОТА»**

Для решения задач нужно уметь вычислять внутреннюю энергию и работу, пользуясь формулами (13.1) и (13.4). Надо ещё иметь в виду, что величины A , Q , ΔU могут быть как положительными, так и отрицательными.

Задача 1. Аэростат объёмом $V = 500 \text{ м}^3$ наполнен гелием под давлением $p = 10^5 \text{ Па}$. В результате солнечного нагрева температура газа в аэростате поднялась от $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. На сколько увеличилась внутренняя энергия газа?

Решение. Гелий является одноатомным газом, поэтому его внутренняя энергия определяется формулой (13.1). При температуре T_1 эта энергия равна $U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1$, а при температуре T_2 равна $U_2 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2$. Изменение энергии равно:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Масса гелия неизвестна, но её можно выразить с помощью уравнения Менделеева—Клапейрона через начальную температуру, давление и объём газа: $\frac{mR}{M} = \frac{pV}{T_1}$. Подставляя значение $\frac{mR}{M}$ в уравнение для изменения энергии, получаем $\Delta U = \frac{3}{2} pV \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \approx 4 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Задача 2. В цилиндре под тяжёлым поршнем находится углекислый газ ($M = 0,044 \text{ кг/моль}$) массой $m = 0,20 \text{ кг}$. Газ нагревается на $\Delta T = 88 \text{ К}$. Какую работу он при этом совершает?

Решение. Газ расширяется при некотором постоянном давлении p , которое создаётся атмосферой и поршнем. В этом случае работа газа $A' = p(V_2 - V_1)$, где V_1 и V_2 — начальный и конечный объёмы газа. Используя уравнение Менделеева—Клапейрона, выразим произведения pV_2 и pV_1 через $\frac{m}{M} RT_2$ и $\frac{m}{M} RT_1$. Тогда $A' = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1) \approx 3,3 \text{ Дж}$.

Задача 3. Чему равна работа, совершённая газом в количестве 3 моль при сжатии, если температура увеличилась на 100 К? Потери тепла не учитывайте.

Решение. При сжатии внешняя сила совершает положительную работу, за счёт которой происходит изменение внутренней энергии и соответственно температуры газа, т. е. $A = \Delta U$. Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T.$$

Работа, совершённая силой давления газа:

$$A' = -\frac{3}{2} \nu R \Delta T \approx -1250 \text{ Дж}.$$

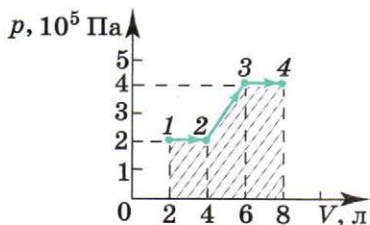


Рис. 13.4

Задача 4. На рисунке 13.4 показана зависимость давления газа от объёма при его переходе из состояния 1 в состояние 4. Определите работу газа.

Решение. Работа газа численно равна площади заштрихованной фигуры. Процессы 1—2 и 3—4 изобарные, поэтому работа газа в этих процессах

$$A'_{1-2} = p_1(V_2 - V_1), \quad A'_{3-4} = p_2(V_4 - V_3).$$

В процессе 2—3 изменяются все три параметра газа. Работа газа в этом

$$\text{процессе } A'_{2-3} = \frac{p_1 + p_2}{2} (V_3 - V_2).$$

Таким образом, учтя, что $V_2 - V_1 = V_3 - V_2 = V_4 - V_3 = \Delta V$, получим

$$A' = (p_1 + p_2 + \frac{p_1 + p_2}{2}) \Delta V = \frac{3}{2} (p_1 + p_2) \Delta V = 1800 \text{ Дж.}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Как изменится внутренняя энергия одноатомного идеального газа, если его давление увеличится в 3 раза, а объём уменьшится в 2 раза?

2. Стержень отбойного молотка приводится в движение сжатым воздухом. Масса воздуха в цилиндре за время хода поршня меняется от 0,1 до 0,5 г. Считая давление воздуха в цилиндре и температуру (27°C) постоянными, определите работу газа за один ход поршня ($M_{\text{возд}} = 0,029 \text{ кг/моль}$).

3. При изобарном расширении одноатомного газа, взятого в количестве 4 моль, его температура увеличилась на 100°C . Определите изменение внутренней энергии и работу, совершённую силой давления газа.



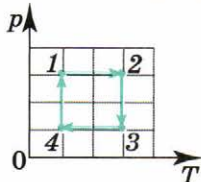
С1. Объём идеального одноатомного газа, масса которого постоянна, увеличился при постоянном давлении 500 кПа на $0,03 \text{ м}^3$. На сколько увеличилась внутренняя энергия газа?

С2. Идеальный одноатомный газ находится в сосуде с жёсткими стенками объёмом $0,5 \text{ м}^3$. При нагревании его давление возросло на 4 кПа. На сколько увеличилась внутренняя энергия газа?

С3. Во время опыта объём воздуха в цилиндре, закрытом подвижным поршнем, и его абсолютную температуру увеличили в 2 раза. Оказалось, однако, что воздух мог просачиваться сквозь зазор вокруг поршня, и за время опыта его давление в цилиндре не изменилось. Во сколько раз изменилась внутренняя энергия воздуха в цилиндре? (Воздух считайте идеальным газом.)

С4. В сосуде с небольшой трещиной находится газ, который может просачиваться сквозь трещину. Во время опыта давление газа уменьшилось в 8 раз, а его абсолютная температура уменьшилась в 4 раза при неизменном объёме. Во сколько раз изменилась внутренняя энергия газа в сосуде? (Газ считайте идеальным.)

С5. В координатах p, T показан цикл тепловой машины, у которой рабочим телом является идеальный газ. На каком участке цикла работа газа наибольшая по модулю?





§ 76

**КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ.
УРАВНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА**

Вспомните, какие агрегатные состояния вещества вы знаете. Назовите процессы, при которых происходят агрегатные превращения вещества.

Как можно изменить агрегатное состояние вещества?

Изменить внутреннюю энергию любого тела можно, совершая работу, нагревая или, наоборот, охлаждая его. Так, при ковке металла совершается работа, и он разогревается, в то же время металл можно разогреть над горящим пламенем.

Также если закрепить поршень (рис. 13.5), то объём газа при нагревании не меняется и работа не совершается. Но температура газа, а следовательно, и его внутренняя энергия возрастают.

Внутренняя энергия может увеличиваться и уменьшаться, поэтому количество теплоты может быть положительным и отрицательным.

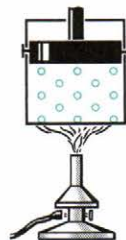


Рис. 13.5

ЗАПОМНИ

Процесс передачи энергии от одного тела другому без совершения работы называют **теплообменом**.

Количественную меру изменения внутренней энергии при теплообмене называют **количеством теплоты**.

Молекулярная картина теплообмена. При теплообмене на границе между телами происходит взаимодействие медленно движущихся молекул холодного тела с быстро движущимися молекулами горячего тела. В результате кинетические энергии молекул выравниваются и скорости молекул холодного тела увеличиваются, а горячего уменьшаются.

При теплообмене не происходит превращения энергии из одной формы в другую, часть внутренней энергии более нагретого тела передаётся менее нагретому телу.



Количество теплоты и теплоёмкость. Вам уже известно, что для нагревания тела массой m от температуры t_1 до температуры t_2 необходимо передать ему количество теплоты:

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t. \quad (13.5)$$

При остывании тела его конечная температура t_2 оказывается меньше начальной температуры t_1 и количество теплоты, отдаваемой телом, отрицательно.

Коэффициент c в формуле (13.5) называют *удельной теплоёмкостью* вещества.



Посмотрите таблицу значений теплоёмкостей различных веществ. Сравните значения удельной теплоёмкости, например воды и железа. Подумайте, почему теплоёмкости жидкостей больше, чем теплоёмкости твёрдых веществ.

ЗАПОМНИ

Удельная теплоёмкость — это величина, численно равная количеству теплоты, которую получает или отдаёт вещество массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К.

Удельная теплоёмкость газов зависит от того, при каком процессе осуществляется теплопередача. Если нагревать газ при постоянном давлении, то он будет расширяться и совершать работу. Для нагревания газа на 1°C при постоянном давлении ему нужно передать большее количество теплоты, чем для нагревания его при постоянном объёме, когда газ будет только нагреваться.

Жидкие и твёрдые тела расширяются при нагревании незначительно. Их удельные теплоёмкости при постоянном объёме и постоянном давлении мало различаются.

Удельная теплота парообразования. Для превращения жидкости в пар в процессе кипения необходима передача ей определённого количества теплоты. Температура жидкости при кипении не меняется. Превращение жидкости в пар при постоянной температуре не ведёт к увеличению кинетической энергии молекул, но сопровождается увеличением потенциальной энергии их взаимодействия. Ведь среднее расстояние между молекулами газа много больше, чем между молекулами жидкости.



Посмотрите кривую зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними (см. рис. 8.5) и убедитесь в справедливости данного утверждения.

Эту величину обозначают буквой r и выражают в джоулях на килограмм (Дж/кг).

ЗАПОМНИ

Величину, численно равную количеству теплоты, необходимой для превращения при постоянной температуре жидкости массой 1 кг в пар, называют **удельной теплотой парообразования**.

ИНТЕРЕСНО

Процесс испарения жидкости происходит при любой температуре, при этом жидкость покидают самые быстрые молекулы, и она при испарении охлаждается. Удельная теплота испарения равна удельной теплоте парообразования.

Очень велика удельная теплота парообразования воды: $r_{\text{H}_2\text{O}} = 2,256 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$ при температуре 100°C . У других жидкостей, например у спирта, эфира, ртути, керосина, удельная теплота парообразования меньше в 3—10 раз, чем у воды.

Для превращения жидкости массой m в пар требуется количество теплоты, равное:

$$Q_{\text{п}} = rm. \quad (13.6)$$



При конденсации пара происходит выделение такого же количества теплоты:

$$Q_{\text{к}} = -rm. \quad (13.7)$$

Удельная теплота плавления. При плавлении кристаллического тела всё подводимое к нему тепло идёт на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул. Кинетическая энергия молекул не меняется, так как плавление происходит при постоянной температуре.

ЗАПОМНИ

Величину, численно равную количеству теплоты, необходимой для превращения кристаллического вещества массой 1 кг при температуре плавления в жидкость, называют **удельной теплотой плавления** и обозначают буквой λ .



При кристаллизации вещества массой 1 кг выделяется точно такое же количество теплоты, какое поглощается при плавлении.

Удельная теплота плавления льда довольно велика: $3,34 \cdot 10^5$ Дж/кг.

«Если бы лёд не обладал большой теплотой плавления, то тогда весной вся масса льда должна была бы растаять в несколько минут или секунд, так как теплота непрерывно передаётся льду из воздуха. Последствия этого были бы ужасны; ведь и при существующем положении возникают большие наводнения и сильные потоки воды при таянии больших масс льда или снега». Р. Блек, XVIII в. ИНТЕРЕСНО

Для того чтобы расплавить кристаллическое тело массой m , необходимо количество теплоты, равное:

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m. \quad (13.8)$$

Количество теплоты, выделяемой при кристаллизации тела, равно:

$$Q_{\text{кр}} = -\lambda m. \quad (13.9)$$



Уравнение теплового баланса. Рассмотрим теплообмен внутри системы, состоящей из нескольких тел, имеющих первоначально различные температуры, например теплообмен между водой в сосуде и опущенным в воду горячим железным шариком. Согласно закону сохранения энергии количество теплоты, отданной одним телом, численно равно количеству теплоты, полученной другим.

Отданное количество теплоты считается отрицательным, полученное количество теплоты — положительным. Поэтому суммарное количество теплоты $Q_1 + Q_2 = 0$.

Если в изолированной системе происходит теплообмен между несколькими телами, то

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0. \quad (13.10)$$

ЗАПОМНИ

Уравнение (13.10) называется **уравнением теплового баланса**.

Здесь Q_1, Q_2, Q_3 — количества теплоты, полученной или отданной телами. Эти количества теплоты выражаются формулой (13.5) или формулами (13.6)—(13.9), если в процессе теплообмена происходят различные фазовые превращения вещества (плавление, кристаллизация, парообразование, конденсация).

Плавление. Кристаллизация. Парообразование. Конденсация

Найти



1. Что называют количеством теплоты?
2. От чего зависит удельная теплоёмкость вещества?
3. Что называют удельной теплотой парообразования?
4. Что называют удельной теплотой плавления?
5. В каких случаях количество теплоты — положительная величина, а в каких случаях отрицательная?
6. Как следует записать уравнение теплового баланса для изолированной системы из трёх тел, переходящей в равновесное состояние?



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА»

Для решения задач нужно чётко выделять начальное и конечное состояния системы, а также характеризующие эти состояния параметры. Кроме этого, нужно уметь вычислять количество теплоты по формулам (13.5)—(13.9) и ещё помнить, что величина Q может быть как положительной, так и отрицательной.

Задача 1. В калориметре находится лёд массой 1 кг при температуре $t_1 = -40$ °С. В калориметр пускают пар массой 1 кг при температуре $t_2 = 120$ °С. Определите установившуюся температуру и фазовое состояние системы. Нагреванием калориметра пренебрегите. ($c_{\text{л}} = 2,1 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $c_{\text{в}} = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $c_{\text{п}} = 2,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $\lambda_{\text{л}} = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг, $r_{\text{п}} = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг.)

Решение. Прежде чем составлять уравнение теплового баланса, $|Q_{\text{отд}}| = Q_{\text{пол}}$, оценим, какое количество теплоты могут отдать одни элементы системы, а какое количество теплоты могут получить другие. Очевидно, что тепло отдают: пар 1) при охлаждении до 100 °С и 2) при конденсации; вода, сконденсировавшаяся из пара, при остывании от 100 °С. Тепло получают: лёд 1) при нагревании и 2) при плавлении; вода, полученная из льда, нагревается от 0 °С до какой-то температуры. Определим количество теплоты, отданной паром при процессах 1 и 2:

$$|Q_{\text{отд}}| = c_{\text{п}} m_{\text{п}} (t_2 - 100) + r_{\text{п}} m_{\text{п}} = 23,0 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Количество теплоты, полученной льдом при процессах 1 и 2:

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{л}} m_{\text{л}} (0 - t_1) + \lambda_{\text{л}} m_{\text{л}} = 4,14 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Из расчётов ясно, что $|Q_{\text{отд}}| > Q_{\text{пол}}$. Растаявший лёд затем нагревается. Определим, какое количество теплоты нужно дополнительно, чтобы вода, образовавшаяся из льда ($m_{\text{л}} = m_{\text{в}}$), нагрелась до 100 °С:

$$Q'_{\text{пол}} = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (100 - 0) = 4,2 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Следовательно, суммарное количество теплоты, которую может получить лёд, перешедший в воду, которая затем нагрелась до 100 °С, есть $Q_{\text{пол}\Sigma} = 8,34 \cdot 10^5$ Дж. Мы видим, что $Q_{\text{пол}\Sigma} < |Q_{\text{отд}}|$.

Из последнего соотношения следует, что не весь пар будет конденсироваться. Массу оставшегося пара можно определить из соотношения $m'_{\text{п}} = (|Q_{\text{отд}}| - Q_{\text{пол}\Sigma})/r_{\text{п}} = 0,65$ кг.

Окончательно в калориметре будут находиться пар и вода при температуре $t = 100$ °С, при этом $m'_{\text{п}} = 0,65$ кг, $m_{\text{в}} = 1,35$ кг.

Задача 2. На сколько температура воды у основания водопада высотой 1200 м больше, чем у его вершины? На нагревание воды затрачивается 70 % выделившейся энергии. Удельная теплоёмкость воды $c_{\text{в}} = 4200$ Дж/(кг · К).

Решение. При ударе падающей воды у основания водопада часть потенциальной энергии $E_{\text{п}} = mgh$ идёт на нагревание воды: $\eta mgh = mc_{\text{в}} \Delta t$, откуда $\Delta t = \eta gh/c_{\text{в}} = 1,96$ °С.

Задача 3. Постройте график зависимости температуры в калориметре от времени, если количество теплоты, сообщаемой системе, постоянно и равно $q = 100$ Дж/с. В калориметре находился лёд массой 1 кг при $t_1 = -20$ °С.

Решение. Количество теплоты, необходимой для нагревания льда до $t = 0$ °С,

$$Q_1 = c_{\text{л}}m(0 - (-20)) \text{ Дж} = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

Промежуток времени, за который лёд нагреется до 0 °С, $\Delta t_1 = Q_1/q = 4,2 \cdot 10^2 \text{ с} = 0,12 \text{ ч.}$

Количество теплоты, необходимой для таяния льда,

$$Q_2 = \lambda m = 3,3 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Промежуток времени, за который лёд полностью растает, $\Delta t_2 = Q_2/q = 3,3 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 0,92 \text{ ч, } t_2 = 1,04 \text{ ч.}$

Количество теплоты, необходимой для нагревания воды от 0 до 100 °С,

$$Q_3 = c_{\text{в}}m(100 - 0) \text{ Дж} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Промежуток времени, за который произойдёт нагревание, $\Delta t_3 = Q_3/q = 4,2 \times 10^3 \text{ с} \approx 1,2 \text{ ч, } t_3 = 2,24 \text{ ч.}$

Для испарения воды требуется количество теплоты

$$Q_4 = rm = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Промежуток времени, за который произойдёт полное испарение, $\Delta t_4 = 2,26 \cdot 10^4 \text{ с} \approx 6,3 \text{ ч, } t_4 = 8,54 \text{ ч.}$

Затем будет происходить нагревание пара. Количество теплоты, необходимой для нагревания пара до 120 °С,

$$Q_5 = c_{\text{п}}m(120 - 100) \text{ Дж} = 4,4 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Промежуток времени, за который произойдёт нагревание пара, $\Delta t_5 = 4,4 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 1,2 \text{ ч, } t_5 = 9,74 \text{ ч.}$

По полученным данным построен график зависимости t (°С) = $f(t)$ (рис. 13.6).

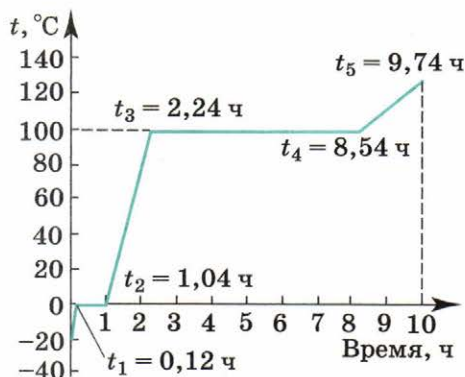


Рис. 13.6

Задачи для самостоятельного решения

1. В воду объёмом 1 л, температура которой 20 °С, бросают кусок железа массой 100 г, нагретый до 500 °С. При этом температура воды повышается до 24 °С и некоторое количество её обращается в пар. Определите массу обравившейся в пар воды.

2. К чайнику с кипящей водой подводится ежесекундно энергия, равная 1,13 кДж. Определите скорость истечения пара из носика чайника, площадь поперечного сечения которого равна 1 см². Плотность водяного пара считайте равной 1 кг/м³.

3. Определите массу снега, который растает при температуре 0 °С под колёсами автомобиля, если автомобиль буксует в течение 20 с, а на буксовку идёт 50 % всей мощности? Мощность автомобиля $1,7 \cdot 10^4$ Вт, удельная теплота плавления льда $3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг.



4. Свинцовая пуля массой $0,01$ кг, летящая горизонтально со скоростью 500 м/с, попадает в неподвижный стальной кубик массой 90 г, лежащий на гладком горизонтальном столе. Чему будет равна температура обоих тел после удара? Удар считайте абсолютно неупругим, температура пули в момент удара 30 °С, кубика — 20 °С. Потерями тепла можно пренебречь. Удельная теплоёмкость свинца 126 Дж/(кг · К), стали — 460 Дж/(кг · К).

5. Пар массой 1 кг при 100 °С выпускают в холодную воду массой 12 кг. Температура воды после конденсации в ней пара поднялась до 70 °С. Чему была равна первоначальная температура воды? Удельная теплота парообразования воды $22,6 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплоёмкость воды 4200 Дж/(кг · К).

6. С помощью механического молота массой 600 кг обрабатывается железная поковка массой 205 кг. За 35 ударов поковка нагрелась от 10 до 18 °С. Чему равна скорость молота в момент удара? Считайте, что на нагревание поковки затрачивается 70 % энергии молота. Удельная теплоёмкость железа 460 Дж/(кг · К).

7. В калориметре находится вода массой $0,4$ кг при температуре 10 °С. В воду положили лёд массой $0,6$ кг при температуре -40 °С. Какая температура установится в калориметре, если его теплоёмкость ничтожно мала?

8. Водород, взятый в количестве 1 моль, первоначально имевший температуру 0 °С, нагревается при постоянном давлении. Какое количество теплоты необходимо сообщить водороду, чтобы его объём удвоился?

9. Водород, объём которого 1 м³, находится при 0 °С в цилиндрическом сосуде, закрытом сверху легко скользящим поршнем массой 1 т и площадью поперечного сечения $0,5$ м². Атмосферное давление $97,3$ кПа. Какое количество теплоты потребуется на нагревание водорода до 300 °С? Определите изменение его внутренней энергии.



С1. Воду массой 100 г при температуре 12 °С поместили в калориметр, где находился лёд при температуре -5 °С. После установления теплового равновесия температура льда повысилась до 0 °С, но масса льда не изменилась. Пренебрегая потерями тепла, оцените, чему была равна начальная масса льда в калориметре. Удельная теплоёмкость льда равна 2100 Дж/(кг · К), удельная теплоёмкость воды равна 4200 Дж/(кг · К).

С2. Для охлаждения лимонада массой 200 г в него бросают кубики льда при 0 °С. Масса каждого кубика 8 г. Первоначальная температура лимонада 30 °С. Сколько целых кубиков надо бросить в лимонад, чтобы установилась температура 15 °С? Тепловые потери не учитывайте. Удельная теплоёмкость лимонада такая же, как у воды. Удельная теплоёмкость воды 4200 Дж/(кг · К), удельная теплота плавления льда 330 кДж/кг.

С3. В сосуд с водой опущена трубка. По трубке через воду пропускают пар при температуре 100 °С. Вначале масса воды увеличивается, но в некоторый момент, масса воды перестаёт увеличиваться, хотя пар по-прежнему пропускают. Первоначальная масса воды 230 г, а её первоначальная температура 0 °С. На сколько увеличилась масса воды? Удельная теплоёмкость воды 4200 Дж/(кг · К), удельная теплота парообразования воды 2300 кДж/кг.

С4. При какой скорости пули из свинца полностью расплавится при ударе о стенку, если 80 % её энергии будет затрачено на нагревание пули? Начальная температура пули 27 °С, температура плавления свинца 327 °С, удельная теплоёмкость 130 Дж/(кг · К), удельная теплота плавления 25 кДж/кг.



§ 78 ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Как формулируется закон сохранения полной механической энергии?
При каких условиях внутренняя энергия сохраняется?

Первый закон термодинамики — это частный случай закона сохранения энергии, главного закона природы. Он показывает, от каких причин зависит изменение внутренней энергии.

Закон сохранения энергии. К середине XIX в. многочисленные опыты доказали, что

ВАЖНО

механическая энергия никогда не пропадает бесследно.

Падает, например, молот на кусок свинца, и свинец нагревается. Силы трения тормозят тела, которые при этом разогреваются.

На основании множества подобных наблюдений и обобщения опытных фактов был сформулирован *закон сохранения энергии*.

Энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: **ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ**
количество энергии неизменно, она только переходит из одной формы в другую.

Закон сохранения энергии управляет всеми явлениями природы и связывает их воедино. Он всегда выполняется абсолютно точно, неизвестно ни одного случая, когда бы этот великий закон не выполнялся. Этот закон был открыт в середине XIX в. немецким учёным, врачом по образованию Р. Майером (1814—1878), английским учёным Дж. Джоулем (1818—1889) и получил наиболее точную формулировку в трудах немецкого учёного Г. Гельмгольца (1821—1894).

**Первый закон термодинамики.**

Закон сохранения и превращения энергии, распространённый на тепловые явления, носит название

первого закона термодинамики. В термодинамике рассматриваются тела, положение центра тяжести которых практически не меняется, т. е. тела, изменение механической энергии которых много меньше изменения их внутренней энергии. Механическая энергия таких тел остаётся постоянной, изменяться может лишь внутренняя энергия каждого тела.

До сих пор мы рассматривали процессы, в которых внутренняя энергия системы изменялась либо за счёт совершения работы, либо за счёт теплообмена с окружающими телами.

В *общем случае* при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется одновременно как за счёт совершения работы, так и за счёт передачи теплоты. Первый закон термодинамики формулируется именно для таких общих случаев.



Как вы понимаете фразу «переход системы из одного состояния в другое»?

Изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданной системе: **ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ**

$$\Delta U = A + Q. \quad (13.11)$$

ИНТЕРЕСНО Систему, которая не обменивается с внешней средой ни энергией, ни веществом, называют изолированной.

В этом случае согласно первому закону термодинамики

или

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0,$$

$$U_1 = U_2.$$

Важно Внутренняя энергия изолированной системы остаётся неизменной (сохраняется).

Часто вместо работы A внешних тел над системой рассматривают работу A' системы над внешними телами. Учитывая, что $A' = -A$, первый закон термодинамики (13.11) можно записать так:

$$Q = \Delta U + A'. \quad (13.12)$$

Количество теплоты, переданной системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

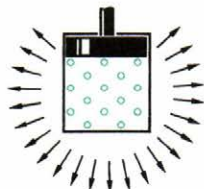
Невозможность создания вечного двигателя. Из первого закона термодинамики следует невозможность создания вечного двигателя первого рода, т. е. устройства, способного совершать неограниченную работу без затрат топлива или каких-либо других материалов. Если к системе не поступает тепло ($Q = 0$), то работа A' согласно уравнению (13.12) может быть совершена только за счёт убыли внутренней энергии:

$$A' = -\Delta U.$$

После того как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать.

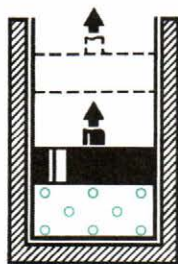
Работа и количество теплоты — характеристики процесса изменения внутренней энергии. В данном состоянии система всегда обладает определённой внутренней энергией.

Но нельзя говорить, что в системе содержится определённое количество теплоты или работы. Как работа, так и количество теплоты являются величинами, характеризующими *изменение внутренней энергии* системы в результате того или иного процесса.



Передаваемое
тепло

Рис. 13.7



Теплоизолирующая
оболочка

Рис. 13.8

Если система является изолированной, то работа внешних сил равна нулю ($A = 0$) и система не обменивается теплотой с окружающими телами ($Q = 0$).

Внутренняя энергия системы может измениться на одно и то же значение как за счёт совершения системой работы, так и за счёт передачи окружающим телам какого-либо количества теплоты. Например, нагретый газ в цилиндре может уменьшить свою энергию остывая, без совершения работы (рис. 13.7). Но он может потерять точно такое же количество энергии, поднимая поршень, без отдачи теплоты окружающим телам. Для этого стенки цилиндра и поршень должны быть теплонепроницаемыми (рис. 13.8).

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К РАЗЛИЧНЫМ ПРОЦЕССАМ**

Перечислите известные вам изопроцессы, происходящие с газом. Как записать первый закон термодинамики для различных процессов?

С помощью первого закона термодинамики можно делать важные заключения о характере протекающих процессов. Рассмотрим различные процессы, при которых одна из физических величин, характеризующих состояние газа, остаётся неизменной (изопроцессы). При этом газ будем считать идеальным.

Изохорный процесс. При изохорном процессе объём газа не меняется, и поэтому работа газа равна нулю. Изменение внутренней энергии газа согласно уравнению (13.12) равно количеству переданной ему теплоты:

$$\Delta U = Q. \quad (13.13)$$

Если газ нагревается, то $Q > 0$ и $\Delta U > 0$, его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении газа $Q < 0$ и $\Delta U = U_2 - U_1 < 0$, изменение внутренней энергии отрицательно и внутренняя энергия газа уменьшается.

Для одноатомного газа можно записать: $Q = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$.



Удельная теплоёмкость газа при изохорном процессе $c_V = \frac{Q}{m \Delta T} = \frac{3}{2} \frac{R}{M}$.

Изотермический процесс. При изотермическом процессе ($T = \text{const}$) внутренняя энергия идеального газа (см. формулу (13.1)) не меняется. Согласно формуле (13.12) всё переданное газу количество теплоты идёт на совершение работы:

$$Q = A'. \quad (13.14)$$

Если газ получает тепло ($Q > 0$), то он совершает положительную работу ($A' > 0$). Если, напротив, газ отдаёт тепло окружающей среде (термостату), то $Q < 0$ и $A' < 0$. Работа же внешних сил над газом в последнем случае положительна.

Удельная теплоёмкость при изотермическом процессе стремится к бесконечности: $c_T \rightarrow \infty$.



Выведите выражение для количества теплоты через изменение температуры газа и удельную теплоёмкость газа ($p = \text{const}$).

Изобарный процесс. При изобарном процессе согласно формуле (13.12) передаваемое газу количество теплоты идёт на изменение его внутренней энергии и на совершение им работы при постоянном давлении:

$$Q = \Delta U + A' = \Delta U + p \Delta V.$$

Адиабатный процесс. Газ может совершать работу и без сообщения ему теплоты.

ЗАПОМНИ

Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называется **адиабатным процессом**.

Так, если сосуд с газом теплоизолировать от окружающей среды и предотвратить возможность газу расширяться, то сила давления газа будет совершать положительную работу.



Согласно первому закону термодинамики количество теплоты, сообщенной системе (газу), идёт на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой механической работы. В данном случае система теплота не сообщает и работа равна изменению внутренней энергии, взятому с обратным знаком:

$$A' = -\Delta U \quad (Q = 0).$$

Если газ расширяется, то положительная работа совершается газом за счёт уменьшения внутренней энергии: $A' > 0$, $\Delta U < 0$. Внутренняя энергия газа является функцией температуры, следовательно, изменение температуры газа также отрицательно: $\Delta T < 0$. При адиабатном расширении газ охлаждается.

При сжатии газа, когда внешние силы совершают положительную работу, а соответственно газ — отрицательную, внутренняя энергия газа увеличивается: $A' < 0$, $\Delta U > 0$. При адиабатном сжатии газ нагревается.

Удельная теплоёмкость газа при адиабатном процессе равна нулю, так как $Q = 0$.

Адиабатный процесс вы можете наблюдать, накачивая насосом велосипедную камеру, насос быстро нагревается. **ИНТЕРЕСНО**

На горлышке бутылки с охлаждённой газированной водой при открывании образуется облачко тумана. При адиабатном расширении уменьшается температура, что приводит к конденсации пара.

Распространение звуковых волн, при котором происходит сжатие и разрежение воздуха, также является адиабатным процессом.

Повышение температуры при адиабатном сжатии наблюдается в дизельных двигателях. В них отсутствует система зажигания горючей смеси, необходимая для обычных карбюраторных двигателей внутреннего сгорания. В цилиндр засасывается не горючая смесь, а атмосферный воздух. К концу такта сжатия в цилиндр с помощью специальной форсунки впрыскивается жидкое топливо. К этому моменту температура воздуха так велика, что горючее воспламеняется.

Адиабатный процесс может быть реализован и при отсутствии теплоизоляции. Если процесс расширения или сжатия газа происходит настолько быстро, что за время процесса не успевает произойти теплообмен с внешней средой, то такой процесс также можно считать адиабатным.

На рисунке 13.9 показаны процессы расширения газа от объёма V_1 до объёма V_2 при изотермическом и адиабатном процессах. Мы видим, что начальное состояние газа одно и то же. Так как при адиабатном процессе происходит понижение температуры, то кривая зависимости давления от температуры идёт ниже изотермы.

Мы знаем, что работа газа может быть вычислена по площади фигуры, ограниченной графиком зависимости $p(V)$, осью V и отрезками, численно равными давлениям при начальном и конечном состояниях газа. Из рисунка видно, что работа при адиабатном расширении меньше, чем при таком же изотермическом расширении.

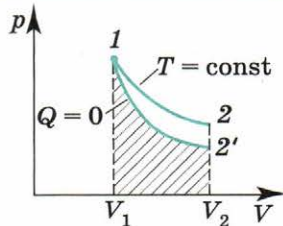


Рис. 13.9



Понаблюдайте и подумайте, с какими ещё адиабатными процессами вы встречаетесь в повседневной жизни.



Начертите серию изотерм и серию адиабат в координатах p, V . Убедитесь, что у каждой адиабаты только одна точка пересечения с каждой изотермой.

Заметим, что адиабата пересекает изотермы, при этом точка пересечения адиабаты с определённой изотермой может быть только одна.

Первый закон термодинамики. Изопроцессы

Найти



1. В каком случае работа газа больше: при изотермическом расширении от объёма V_1 до объёма V_2 или при изобарном расширении от объёма V_1 до объёма V_2 ?
2. Как можно изменить температуру газа?
3. Какой из процессов является самым выгодным для получения максимальной механической работы при данном затраченном количестве теплоты?
4. Почему удельная теплоёмкость при постоянном давлении больше, чем удельная теплоёмкость при постоянном объёме?



A1. Идеальный газ переходит изотермически из одного состояния в другое. При увеличении объёма газа

- 1) ему сообщают некоторое количество теплоты
- 2) его внутренняя энергия возрастает
- 3) работа, совершённая внешними телами, положительна
- 4) давление увеличивается

A2. Идеальный одноатомный газ находится в сосуде с жёсткими стенками объёмом $0,6 \text{ м}^3$. При нагревании его внутренняя энергия увеличилась на 18 кДж . На сколько возросло давление газа?

- 1) 10 кПа
- 2) 20 кПа
- 3) 30 кПа
- 4) 40 кПа

A3. Идеальный одноатомный газ совершает переход из состояния 1 в состояние 2 изобарно. Количество теплоты, подведённой к системе в этом процессе, равно 225 кДж . При этом внутренняя энергия газа

- 1) увеличилась на 315 кДж
- 2) уменьшилась на 225 кДж
- 3) увеличилась на 135 кДж
- 4) уменьшилась на 90 кДж

B4. Установите соответствие между названием закона и формулой, соответствующей закону. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Название закона	Формула
А) Первый закон термодинамики для адиабатного процесса	1) $p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}$
Б) Основное уравнение МКТ газов	2) $Q = \Delta U + A'$
	3) $\Delta U = \frac{2}{3} m R \Delta T$
	4) $\Delta U = -A'$

А)	Б)



§ 80

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ»

В большей части задач используется не общая форма первого закона термодинамики, а его различные частные формулировки, применимые к определённым процессам. Задачи на теплообмен в изолированной системе решаются с помощью уравнения теплового баланса (13.10).

При решении задач надо чётко выделять начальное и конечное состояния системы, а также характеризующие её параметры.

Задача 1. Во время расширения газа, вызванного его нагреванием, в цилиндре с площадью поперечного сечения $S = 200 \text{ см}^2$ газу было передано количество теплоты $Q = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Дж}$, причём давление газа оставалось постоянным и равным $p = 2 \cdot 10^7 \text{ Па}$. На сколько изменилась внутренняя энергия газа, если поршень передвинулся на расстояние $\Delta h = 30 \text{ см}$?

Решение. Согласно первому закону термодинамики в форме (13.12) $Q = \Delta U + A'$, где $A' = pS\Delta h$ — работа, совершённая газом. Отсюда $\Delta U = Q - pS\Delta h = 30 \text{ кДж}$.

Задача 2. Газ расширяется от объёма V_1 до объёма V_2 один раз изотермически, другой изобарно и третий адиабатно. При каком процессе газ совершает большую работу и при каком газу передаётся большее количество теплоты?

Решение. На диаграмме p — V (рис. 13.10) изобразим все три процесса. Работа численно равна площади криволинейной трапеции. Из рисунка очевидно, что работа при изобарном процессе будет максимальной, при адиабатном минимальной, т. е. $A'_{1-2'} > A'_{1-2} > A'_{1-2''}$.

Температура газа в состоянии $2'$ больше, чем в состоянии 2 , а температура в состоянии 2 больше, чем в состоянии $2''$ ($T_{2'} > T_2 > T_{2''}$). В этом легко убедиться, начертив изотермы, проходящие через точки $2'$ и $2''$. При процессе $1-2'$ изменение внутренней энергии $\Delta U > 0$, при процессе $1-2$ $\Delta U = 0$. Очевидно, что поскольку $Q = \Delta U + A'$ (первый закон термодинамики), то $Q_{1-2'} > Q_{1-2} > Q_{1-2''}$ ($Q_{1-2''} = 0$).

Задача 3. Пусть азот нагревается при постоянном давлении. Зная, что масса азота $m = 280 \text{ г}$, количество затраченной теплоты $Q = 600 \text{ Дж}$ и удельная теплоёмкость азота при постоянном объёме $c_V = 745 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, определите, на сколько повысилась температура азота. Молярная масса азота $M = 0,028 \text{ кг/моль}$.

Решение. Согласно первому закону термодинамики $Q = \Delta U + A'$.

Изменение внутренней энергии $\Delta U = c_V m \Delta T$.

Работа при изобарном процессе $A' = p\Delta V = (m/M)R\Delta T$.

Следовательно, $Q = m\Delta T(c_V + R/M)$, откуда $\Delta T = \frac{Q}{m(c_V + R/M)} \approx 2,1 \text{ К}$.

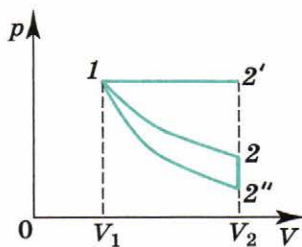


Рис. 13.10

Задачи для самостоятельного решения

1. Для изобарного нагревания газа, взятого в количестве 800 моль, на 500 К газу сообщили количество теплоты $9,4 \cdot 10^6$ Дж. Определите работу газа и изменение его внутренней энергии.

2. В цилиндрическом сосуде с площадью основания 250 см^2 находится азот массой 10 г, сжатый поршнем, на котором лежит гиря массой 12,5 кг. Какую работу совершит азот при нагревании его от 25 до $625 \text{ }^\circ\text{C}$. На какую высоту при этом поднимется поршень? Атмосферное давление равно 1 атм.

3. Идеальный одноатомный газ в количестве 2 моль, находящийся при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$, сначала изохорно перевели в состояние, в котором давление в 2 раза больше первоначального, а затем изобарно в состояние, в котором объём в 2 раза больше первоначального. Определите изменение внутренней энергии газа.

4. В цилиндре под поршнем находится воздух. На его нагревание при постоянном давлении затрачено количество теплоты, равное 5 кДж. Определите работу, совершённую при этом воздухом. Теплоёмкость воздуха при постоянном давлении $c_p = 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, молярная масса 29 г/моль.

5. Положительна или отрицательна работа газа в процессах 1—2, 2—3 и 3—1 на рисунке 10.9? Получает газ тепло или отдаёт в этих процессах?

6. Какое количество теплоты необходимо для изохорного нагревания гелия массой 4 кг на 100 К?

7. Вычислите увеличение внутренней энергии водорода массой 2 кг при изобарном его нагревании на 10 К. (Удельная теплоёмкость водорода при постоянном давлении равна $14 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.)

8. В цилиндре компрессора сжимают идеальный одноатомный газ, количество вещества которого 4 моль. Определите, насколько поднялась температура газа за один ход поршня, если при этом была совершена работа 500 Дж. Процесс считайте адиабатным.

9. На одинаковые газовые горелки поставили два одинаковых плотно закупоренных сосуда вместимостью по 1 л. В одном сосуде находится вода, а в другом — воздух. Какой сосуд быстрее нагревается на $50 \text{ }^\circ\text{C}$? Почему?

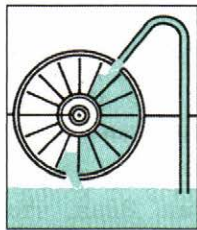


Рис. 13.11

10. Предложен следующий проект вечного двигателя (рис. 13.11). Закрытый сосуд разделён на две половинки герметичной перегородкой, сквозь которую пропущены трубка и водяная турбина в кожухе с двумя отверстиями. Давление воздуха в нижней части больше, чем в верхней. Вода поднимается по трубке и наполняет открытую камеру. В нижней части очередная порция воды выливается из камеры турбины, подошедшей к отверстию кожуха. Почему данная машина не будет работать вечно?

11. В вакууме закреплён горизонтальный цилиндр, в котором слева находится гелий в количестве 0,1 моль, запертый поршнем. Поршень массой 90 г удерживается упорами и может скользить влево вдоль стенок цилиндра без трения. В поршень попадает пуля массой 10 г, летящая горизонтально со скоростью 400 м/с, и застревает в нём. Как изменится температура гелия в момент остановки поршня в крайнем левом положении? Считайте, что газ не успевае́т обменяться теплом с поршнем и цилиндром.



§ 81 ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Вспомните формулировку первого закона термодинамики. Допускает ли первый закон термодинамики самопроизвольный переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому? Наблюдаются ли такие процессы в природе?

Мы уже отмечали, что первый закон термодинамики — это частный случай закона сохранения энергии.

Закон сохранения энергии утверждает, что количество энергии при любых её превращениях остаётся неизменным. Между тем многие процессы, вполне допустимые с точки зрения закона сохранения энергии, никогда не протекают в действительности. Например, с точки зрения первого закона термодинамики в изолированной системе возможен переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому, если количество теплоты, полученной горячим телом, точно равно количеству теплоты, отданной холодным телом. В то же время наш опыт подсказывает, что это невозможно.

Важно

Первый закон термодинамики не указывает направление процессов.

Второй закон термодинамики. Второй закон термодинамики указывает направление возможных энергетических превращений, т. е. направление процессов, и тем самым выражает необратимость процессов в природе. Этот закон был установлен путём непосредственного обобщения опытных фактов.

Есть несколько формулировок второго закона, которые, несмотря на внешнее различие, выражают, в сущности, одно и то же и поэтому равноценны.

Немецкий учёный Р. Клаузиус (1822—1888) сформулировал этот закон так:



Невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах. **ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ**

Здесь констатируется опытный факт определённой направленности теплопередачи: тепло само собой переходит всегда от горячих тел к холодным. Правда, в холодильных установках осуществляется теплопередача от холодного тела к более тёплому, но эта передача связана с другими изменениями в окружающих телах: охлаждение достигается за счёт работы.

Важность этого закона в том, что из него можно вывести заключение о необратимости не только процесса теплопередачи, но и других процессов в природе.



Как вы понимаете термин «направление процесса»?

Запомни

Необратимыми называются такие процессы, которые могут самопроизвольно протекать лишь в одном определённом направлении; в обратном направлении они могут протекать только при внешнем воздействии.

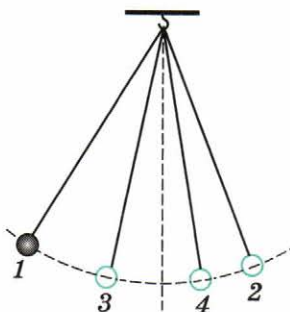


Рис. 13.12

Рассмотрим пример. Колебания маятника, выведенного из положения равновесия, затухают (рис. 13.12; 1, 2, 3, 4 — последовательные положения маятника при максимальных отклонениях от положения равновесия). За счёт работы сил трения механическая энергия маятника убывает, а температура маятника и окружающего воздуха (а значит, и их внутренняя энергия) слегка повышается.

Можно вновь увеличить размах колебаний маятника, подтолкнув его рукой. Но это увеличение возникает не само собой, а становится возможным в результате более сложного процесса, включающего движение руки.

ВАЖНО

Механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю, но не наоборот. При этом энергия упорядоченного движения тела как целого превращается в энергию неупорядоченного теплового движения составляющих его молекул.



Какие необратимые процессы вы наблюдаете в повседневной жизни?

Ещё один пример — процесс диффузии. Открыв пузырёк с духами, мы быстро почувствуем запах духов. Молекулы ароматического

вещества благодаря тепловому движению проникают в пространство между молекулами воздуха. Трудно представить, чтобы все они вновь собрались в пузырёке.

Число подобных примеров можно увеличивать практически неограниченно. Все они говорят о том, что процессы в природе имеют определённую направленность, никак не отражённую в первом законе термодинамики.

ВАЖНО

Все макроскопические процессы в природе протекают только в одном определённом направлении.

В обратном направлении они самопроизвольно протекать не могут. Все процессы в природе необратимы.

Раньше при рассмотрении процессов мы предполагали, что они являются обратимыми.

ЗАПОМНИ

Обратимый процесс — это процесс, который можно провести в прямом и обратном направлениях через одни и те же промежуточные состояния без изменений в окружающих телах.

Обратимый процесс должен протекать очень медленно, чтобы каждое промежуточное состояние было равновесным.

ЗАПОМНИ

Равновесное состояние — это состояние, при котором температура и давление во всех точках системы одинаковы.

Следовательно, чтобы система пришла в равновесное состояние, необходимо время.



Можно ли на графиках зависимости макропараметров газа изображать неравновесные состояния?

При изучении изопроцессов мы предполагали, что переход из начального состояния в конечное проходит через равновесные состояния, и считали изотермический, изобарный и изохорный процессы обратимыми.

Идеальных обратимых процессов в природе не существует, однако реальные процессы можно с определённой степенью точности рассматривать как обратимые, что является очень важным для теории.

Яркой иллюстрацией необратимости явлений в природе служит просмотр кинофильма в обратном направлении. Например, прыжок в воду будет при этом выглядеть следующим образом. Спокойная вода в бассейне начинает бурлить, появляются ноги, стремительно движущиеся вверх, а затем и весь ныряльщик. Поверхность воды быстро успокаивается. Постепенно скорость ныряльщика уменьшается, и вот уже он спокойно стоит на вышке. Такой процесс, как вознесение ныряльщика на вышку из воды, не противоречит ни закону сохранения энергии, ни законам механики, ни вообще каким-либо законам, кроме *второго закона термодинамики*.

ИНТЕРЕСНО

Статистический характер второго закона термодинамики. Второй закон термодинамики определяет направление процессов в изолированной системе, однако этот закон носит статистический (вероятностный) характер.

Любое макросостояние системы, характеризующееся некоторыми макропараметрами, определяется его микросостояниями. Например, для газа давление и температура определяются числом молекул, их скоростью, распределением молекул по объёму сосуда. Если система предоставлена самой себе и она изолирована, то, как мы знаем, постепенно достигается равновесное состояние, при котором давление и температура во всех точках одинаковы. Процесс перехода системы из неравновесного состояния в равновесное — необратимый процесс.

Равновесное состояние соответствует хаотичному движению молекул, т. е. система с точки зрения микросостояний приходит к полному хаосу. Хаотичное движение предполагает непрерывное перемещение молекул газа по объёму, обмен скоростями. Естественно, если мы сможем проследить за отдельными молекулами, то они в разные моменты времени оказываются в разных частях сосуда. Число молекул, находящихся в выделенном объёме, также может быть различным и т. д. В то же время макропараметры газа не меняются.

Движение молекул — это механическое движение, которое является обратимым. В то же время все необратимые процессы, такие, как теплообмен, происходят вследствие механического движения атомов и молекул, так как столкновения молекул обеспечивают передачу энергии. Итак, необратимые процессы являются следствием обратимого механического движения.

Чтобы соединить эти два неоспоримых факта, Л. Больцман использовал понятие вероятности. Так, состояние газа, при котором молекулы движутся хаотично, является наиболее вероятным, наиболее вероятным является и равномерное распределение молекул по объёму сосуда.

Однако возможно, что благодаря случайным перемещениям молекул все они окажутся в какой-то части сосуда, но вероятность такого состояния чрезвычайно мала.

Соответственно не противоречит законам природы даже такой процесс, в результате которого при случайном движении молекул воздуха все они соберутся в одной половине класса, а учащиеся в другой половине класса задохнутся. Но реально это событие никогда не происходило в прошлом и не произойдёт в будущем. Слишком мала вероятность подобного события, чтобы оно когда-либо случилось за всё время существования Вселенной в современном её состоянии — около нескольких миллиардов лет.

По приблизительным оценкам, эта вероятность примерно такого же порядка, как и вероятность того, что 20 000 обезьян, хаотично ударяя по клавишам пишущих машинок, напечатают без единой ошибки «Войну и мир» Л. Н. Толстого. В принципе это возможно, но реально никогда не произойдёт.

Границы применимости второго закона термодинамики. Вероятность обратных процессов перехода от равновесных состояний к неравновесным для макроскопических систем в целом очень мала. Но для малых объёмов, содержащих небольшое число молекул, вероятность отклонения от равновесия становится заметной.

ЗАПОМНИ

Такие случайные отклонения системы от равновесия называются **флуктуациями**.

Именно флуктуациями плотности газа в областях порядка длины световой волны объясняются рассеяние света в атмосфере Земли и голубой цвет неба. Флуктуации давления в малых объёмах объясняют броуновское движение.

Наблюдение флуктуации служит важнейшим доказательством правильности созданной Больцманом статистической теории необратимости макропроцессов. *Второй закон термодинамики выполняется только для систем с огромным числом частиц.* В малых объёмах уже становятся существенными отклонения от этого закона.

Второй закон термодинамики. Обратимость процессов

Найти

- ?
1. Какие процессы называются необратимыми? Назовите наиболее типичные необратимые процессы.
 2. Как формулируется второй закон термодинамики?
 3. Какое состояние газа является наиболее вероятным и соответствует равновесному состоянию?



§ 82

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ (КПД) ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Вспомните, что такое термодинамическая система и какими параметрами характеризуется её состояние.

Сформулируйте первый и второй законы термодинамики.

Запасы внутренней энергии в земной коре и океанах можно считать практически неограниченными. Но для решения практических задач располагать запасами энергии ещё недостаточно. Необходимо так же уметь за счёт энергии приводить в движение станки на фабриках и заводах, средства транспорта, тракторы и другие машины, вращать роторы генераторов электрического тока и т. д. Человечеству нужны двигатели — устройства, способные совершать работу. Большая часть двигателей на Земле — это *тепловые двигатели*.

Отметим, что именно создание **ИНТЕРЕСНО** теории тепловых двигателей привело к формулированию второго закона термодинамики.

ЗАПОМНИ

Тепловые двигатели — это устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую работу.

Принцип действия тепловых двигателей. Для того чтобы двигатель совершал работу, необходима разность давлений по обе стороны поршня двигателя или лопастей турбины. Во всех тепловых двигателях эта разность давлений достигается за счёт повышения температуры *рабочего тела* (газа) на сотни или тысячи градусов по сравнению с температурой окружающей среды. Такое повышение температуры происходит при сгорании топлива.



Одна из основных частей двигателя — сосуд, наполненный газом, с подвижным поршнем. Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ, который совершает работу при расширении. Обозначим начальную температуру рабочего тела (газа) через T_1 . Эту температуру в паровых турбинах или машинах приобретает пар в паровом котле. В двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри самого двигателя. Температуру T_1 называют *температурой нагревателя*.

Роль холодильника. По мере совершения работы газ теряет энергию и неизбежно охлаждается до некоторой температуры T_2 , которая обычно несколько выше температуры окружающей среды. Её называют *температурой холодильника*. Холодильником является атмосфера или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара — *конденсаторы*. В последнем случае температура холодильника может быть немного ниже температуры окружающего воздуха.

Таким образом, в двигателе рабочее тело при расширении не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы. Часть тепла неизбежно передаётся холодильнику (атмосфере) вместе с отработанным паром или выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин.

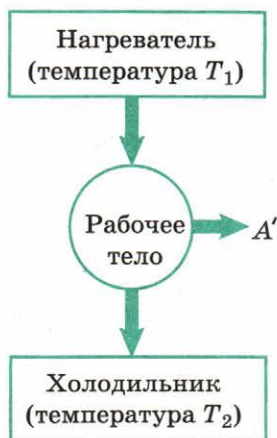


Рис. 13.13

Эта часть внутренней энергии топлива теряется. Тепловой двигатель совершает работу за счёт внутренней энергии рабочего тела. Причём в этом процессе происходит передача теплоты от более горячих тел (нагревателя) к более холодным (холодильнику). Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке 13.13.

Рабочее тело двигателя получает от нагревателя при сгорании топлива количество теплоты Q_1 , совершает работу A' и передаёт холодильнику количество теплоты $Q_2 < Q_1$.

Для того чтобы двигатель работал непрерывно, необходимо рабочее тело вернуть в начальное состояние, при котором температура рабочего тела равна T_1 . Отсюда следует, что работа двигателя происходит по периодически повторяющимся замкнутым процессам, или, как говорят, по циклу.

ЗАПОМНИ

Цикл — это ряд процессов, в результате которых система возвращается в начальное состояние.



Предположите, при какой температуре рабочее тело (газ) следует возвращать в исходное состояние, чтобы работа за цикл была больше нуля.

Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя. Невозможность полного превращения внутренней энергии газа в работу тепловых двигателей обусловлена необратимостью процессов в

природе. Если бы тепло могло самопроизвольно возвращаться от холодильника к нагревателю, то внутренняя энергия могла бы быть полностью превращена в полезную работу с помощью любого теплового двигателя. Второй закон термодинамики может быть сформулирован следующим образом:

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

невозможно создать вечный двигатель второго рода, т. е. двигатель, который полностью превращал бы теплоту в механическую работу.

Согласно закону сохранения энергии работа, совершаемая двигателем, равна:

$$A' = Q_1 - |Q_2|, \quad (13.15)$$

где Q_1 — количество теплоты, полученной от нагревателя, а Q_2 — количество теплоты, отданной холодильнику.

ЗАПОМНИ

Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя называют отношение работы A' , совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученной от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}. \quad (13.16)$$

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передаётся холодильнику, то $\eta < 1$.

Максимальное значение КПД тепловых двигателей. Законы термодинамики позволяют вычислить максимально возможный КПД теплового двигателя, работающего с нагревателем, имеющим температуру T_1 , и холодильником с температурой T_2 , а также определить пути его повышения.

Впервые максимально возможный КПД теплового двигателя вычислил французский инженер и учёный Сади Карно (1796—1832) в труде «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824).

ИНТЕРЕСНО

Карно придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. Идеальная тепловая машина Карно работает по циклу, состоящему из двух изотерм и двух адиабат, причём эти процессы считаются обратимыми (рис. 13.14). Сначала сосуд с газом приводят в контакт с нагревателем, газ изотермически расширяется, совершая положительную работу, при температуре T_1 , при этом он получает количество теплоты Q_1 .

Затем сосуд теплоизолируют, газ продолжает расширяться уже адиабатно, при этом его температура понижается до температуры холодильника T_2 . После этого газ приводят в контакт с холодильником, при изотермическом сжатии он отдаёт холодильнику количество теплоты Q_2 , сжимаясь до объёма $V_4 < V_1$. Затем сосуд снова теплоизолируют, газ сжимается адиабатно до объёма V_1 и возвращается в первоначальное состояние. Для КПД этой машины было получено следующее выражение:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

(13.17)

Как следует из формулы (13.17), КПД машины Карно прямо пропорционален разности абсолютных температур нагревателя и холодильника.

Важно

Главное значение этой формулы состоит в том, что в ней указан путь увеличения КПД, для этого надо повышать температуру нагревателя или понижать температуру холодильника.

Любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем, имеющим температуру T_1 , и холодильником с температурой T_2 , не может иметь КПД, превышающий

КПД идеальной тепловой машины: $\frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$. Процессы, из которых состоит цикл реальной тепловой машины, не являются обратимыми.

Формула (13.17) даёт теоретический предел для максимального значения КПД тепловых двигателей. Она показывает, что тепловой двигатель тем эффективнее, чем больше разность температур нагревателя и холодильника.

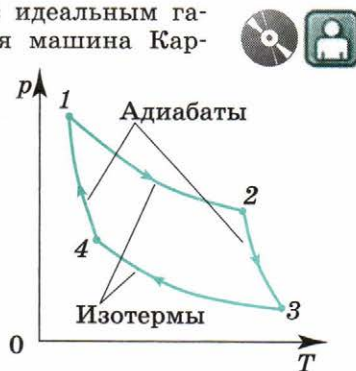


Рис. 13.14



Как вы думаете, почему для получения максимальной положительной работы С. Карно выбрал изотермический процесс?



Лишь при температуре холодильника, равной абсолютному нулю, $\eta = 1$. Кроме этого доказано, что КПД, рассчитанный по формуле (13.17), не зависит от рабочего вещества.

Но температура холодильника, роль которого обычно играет атмосфера, практически не может быть ниже температуры окружающего воздуха. Повышать температуру нагревателя можно. Однако любой материал (твёрдое тело) обладает ограниченной теплостойкостью, или жаропрочностью. При нагревании он постепенно утрачивает свои упругие свойства, а при достаточно высокой температуре плавится.

Сейчас основные усилия инженеров направлены на повышение КПД двигателей за счёт уменьшения трения их частей, потерь топлива вследствие его неполного сгорания и т. д.

ИНТЕРЕСНО Для паровой турбины начальные и конечные температуры пара примерно таковы: $T_1 = 800$ К и $T_2 = 300$ К. При этих температурах максимальное значение коэффициента полезного действия равно 62 % (отметим, что обычно КПД измеряют в процентах). Действительное же значение КПД из-за различного рода энергетических потерь приблизительно равно 40 %. Максимальный КПД — около 44 % — имеют двигатели Дизеля.

Охрана окружающей среды. Трудно представить современный мир без тепловых двигателей. Именно они обеспечивают нам комфортную жизнь. Тепловые двигатели приводят в движение транспорт. Около 80 % электроэнергии, несмотря на наличие атомных станций, вырабатывается с помощью тепловых двигателей.

Однако при работе тепловых двигателей происходит неизбежное загрязнение окружающей среды. В этом заключается противоречие: с одной стороны, человечеству с каждым годом необходимо всё больше энергии, основная часть которой получается за счёт сгорания топлива, с другой стороны, процессы сгорания неизбежно сопровождаются загрязнением окружающей среды.

При сгорании топлива происходит уменьшение содержания кислорода в атмосфере. Кроме этого, сами продукты сгорания образуют химические соединения, вредные для живых организмов. Загрязнение происходит не только на земле, но и в воздухе, так как любой полёт самолёта сопровождается выбросами вредных примесей в атмосферу.

Одним из следствий работы двигателей является образование углекислого газа, который поглощает инфракрасное излучение поверхности Земли, что приводит к повышению температуры атмосферы. Это так называемый парниковый эффект. Измерения показывают, что температура атмосферы за год повышается на 0,05 °С. Такое непрерывное повышение температуры может вызвать таяние льдов, что, в свою очередь, приведёт к изменению уровня воды в океанах, т. е. к затоплению материков.

Отметим ещё один отрицательный момент при использовании тепловых двигателей. Так, иногда для охлаждения двигателей используется вода из рек и озёр. Нагретая вода затем возвращается обратно. Рост температуры в водоёмах нарушает природное равновесие, это явление называют тепловым загрязнением.

Для охраны окружающей среды широко используются различные очистительные фильтры, препятствующие выбросу в атмосферу вредных веществ,



совершенствуются конструкции двигателей. Идёт непрерывное усовершенствование топлива, дающего при сгорании меньше вредных веществ, а также технологии его сжигания. Активно разрабатываются альтернативные источники энергии, использующие ветер, солнечное излучение, энергию ядра. Уже выпускаются электромобили и автомобили, работающие на солнечной энергии.

Тепловой двигатель. КПД теплового двигателя

Найти



1. Какое устройство называют тепловым двигателем?
2. Какова роль нагревателя, холодильника и рабочего тела в тепловом двигателе?
3. Что называется коэффициентом полезного действия двигателя?
4. Чему равно максимальное значение коэффициента полезного действия теплового двигателя?

A1. Тепловая машина

- 1) совершает механическую работу по увеличению внутренней энергии тела
- 2) производит тепло
- 3) совершает механическую работу за счёт подводимого количества теплоты
- 4) производит электроэнергию за счёт совершения работы

A2. Рабочее тело тепловой машины получило количество теплоты, равное 70 кДж. При этом холодильнику передано количество теплоты, равное 52,5 кДж. КПД такой машины

- 1) 1,7 %
- 2) 17,5 %
- 3) 25 %
- 4) >100 %

A3. Чему равен коэффициент полезного действия паровой турбины, если полученное ею количество теплоты равно 1000 МДж, а полезная работа составляет 400 МДж?

- 1) 4 %
- 2) 25 %
- 3) 40 %
- 4) 60 %

A4. Тепловая машина за цикл получает от нагревателя 50 Дж и совершает полезную работу, равную 100 Дж. Чему равен КПД тепловой машины?

- 1) 200 %
- 2) 67 %
- 3) 50 %
- 4) такая машина невозможна

A5. Горячий пар поступает в турбину при температуре 500 °С, а выходит из неё при температуре 30 °С. Чему равен КПД турбины? Паровую турбину считайте идеальной тепловой машиной.

- 1) 1 %
- 2) 61 %
- 3) 94 %
- 4) 100 %





Для решения задач надо воспользоваться известными выражениями для определения КПД тепловых машин и иметь в виду, что выражение (13.17) справедливо только для идеальной тепловой машины.

Задача 1. В котле паровой машины температура 160°C , а температура холодильника 10°C . Какую максимальную работу может теоретически совершить машина, если в топке, коэффициент полезного действия которой 60% , сожжён уголь массой 200 кг с удельной теплотой сгорания $2,9 \cdot 10^7\text{ Дж/кг}$?

Решение. Максимальную работу может совершить идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, КПД которой $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$, где T_1 и T_2 — абсолютные температуры нагревателя и холодильника. Для любой тепловой машины КПД определяется по формуле $\eta = A/Q_1$, где A — работа, совершаемая тепловой машиной, Q_1 — количество теплоты, полученной машиной от нагревателя. Из условия задачи ясно, что Q_1 — это часть количества теплоты, выделившейся при сгорании топлива: $Q_1 = \eta_1 mg$.

Тогда $\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{A}{\eta_1 mg}$, откуда $A = \eta_1 mg(1 - T_2/T_1) = 1,2 \cdot 10^9\text{ Дж}$.

Задача 2. Паровая машина мощностью $N = 14,7\text{ кВт}$ потребляет за 1 ч работы топливо массой $m = 8,1\text{ кг}$, с удельной теплотой сгорания $q = 3,3 \cdot 10^7\text{ Дж/кг}$. Температура котла 200°C , холодильника 58°C . Определите КПД этой машины и сравните его с КПД идеальной тепловой машины.

Решение. КПД тепловой машины равен отношению совершённой механической работы A к затраченному количеству теплоты Q_1 , выделяющейся при сгорании топлива. Количество теплоты $Q_1 = mq$.

Совершённая за это же время работа $A = Nt$.

Таким образом, $\eta = A/Q_1 = Nt/qm = 0,198$, или $\eta \approx 20\%$.

Для идеальной тепловой машины $\eta_{\text{ид}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\% = 30\%$, $\eta < \eta_{\text{ид}}$.

Итак, КПД идеальной тепловой машины, как и следовало ожидать, больше КПД реальной машины.



Задача 3. Идеальная тепловая машина с КПД η работает по обратному циклу (рис. 13.15). Какое максимальное количество теплоты можно забрать от холодильника, совершив механическую работу A ?

Решение. Поскольку холодильная машина работает по обратному циклу, то для перехода тепла от менее нагретого тела к более нагретому необходимо, чтобы внешние силы совершили положительную работу. Прин-

Рис. 13.15



ципальная схема холодильной машины: от холодильника отбирается количество теплоты Q_2 , внешними силами совершается работа и нагревателю передаётся количество теплоты Q_1 . Следовательно, $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$, откуда $Q_2 = Q_1(1 - \eta)$, $Q_1 = A/\eta$.

Окончательно $Q_2 = (A/\eta)(1 - \eta)$.



Задачи для самостоятельного решения

1. Какой должна быть температура нагревателя, для того чтобы стало возможным достижение значения КПД тепловой машины 80 %, если температура холодильника 27 °С?

2. В процессе работы тепловой машины за некоторое время рабочим телом было получено от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 1,5 \cdot 10^6$ Дж, передано холодильнику количество теплоты $Q_2 = -1,2 \cdot 10^6$ Дж. Вычислите КПД машины и сравните его с максимально возможным КПД, если температуры нагревателя и холодильника соответственно равны 250 °С и 30 °С.

3. В паровой турбине для получения пара с температурой 250 °С сжигают дизельное топливо массой 0,35 кг. При этом пар совершает работу 1 кВт · ч. Температура холодильника 30 °С. Вычислите КПД турбины. Удельная теплота сгорания дизельного топлива 42 МДж/кг.

4. В цилиндре находится газ, для нагревания которого сжигают нефть массой 2 кг с удельной теплотой сгорания $4,3 \cdot 10^7$ Дж/кг. Расширяясь, газ совершает работу 10 кВт · ч. На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Чему равен КПД установки?

5. Двигатель автомобиля развивает мощность 25 кВт. Определите КПД двигателя, если при скорости 60 км/ч он потребляет 12 л бензина на 100 км пути. Плотность бензина 700 кг/м³. При сгорании 1 кг бензина выделяется количество теплоты, равное $4,5 \cdot 10^7$ Дж.



ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 13 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.



«Тепловые двигатели и их роль в жизни человека»

1. Модели вечных двигателей. Их разоблачение.
2. Двигатели внутреннего сгорания. Дизельный двигатель.
3. С. Карно — создатель термодинамики.
4. Проблемы и пути повышения КПД тепловых двигателей.
5. Применение тепловых двигателей.
6. Экологические проблемы использования тепловых двигателей.



«Проектирование и моделирование теплового двигателя»