

Раздел II. ТЕПЛОВАЯ ФИЗИКА

Глава 6. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

§ 26. Основные положения молекулярно-кинетической теории газов и ее опытное обоснование



Ключевые понятия: микрочастицы, атом, молекула, давление газа, диффузия, броуновское движение.

На этом уроке вы: познакомитесь с основными положениями молекулярно-кинетической теории и опытами, подтверждающими их.

В создание современной молекулярно-кинетической теории внесли свой вклад М.В. Ломоносов, который опытным путем опроверг теорию теплорода, а также Р. Клаузиус, Л. Больцман, Д.И. Менделеев, Д.К. Максвелл. Перечислим ее основные положения.

1. Все тела состоят из микрочастиц (атомов или молекул), причем масса тела равна сумме масс микрочастиц, из которых оно состоит:

$$m = m_0 N.$$

2. Микрочастицы в теле непрерывно и хаотично движутся, причем скорость этого движения связана с температурой тела, поэтому его называют *тепловым движением*. Количественно связь скорости движения молекул с температурой тела установил австрийский физик Людвиг Больцман (1844—1906): $v_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$, где m_0 — масса молекулы; T — абсолютная температура тела; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — *постоянная Больцмана*.

3. Микрочастицы в теле взаимодействуют друг с другом, причем силы взаимодействия носят электромагнитный характер. Между частицами тела одновременно действуют и силы отталкивания, и силы притяжения.

Приведем опытные факты, которые подтверждают основные положения молекулярно-кинетической теории.

1. Делимость вещества. При этом физические и химические свойства вещества не изменяются.

2. Сжимаемость газов. Это свидетельствует о наличии больших расстояний между молекулами тела.

3. Свойство газа занимать любой объем. Этот факт говорит как о движении молекул, так и о наличии расстояний между ними, которые легко меняются.

4. Закон кратных отношений. Согласно этому закону, при образовании любых химических соединений массы реагирующих веществ находятся в определенных отношениях. Это доказывает, хотя и косвенно, что тела должны состоять из атомов.

5. Давление газа на стенки сосуда, в котором он находится. Это говорит о движении молекул.

6. *Диффузия* — проникновение молекул одного вещества в межмолекулярное пространство другого. Диффузию можно наблюдать и в газах (запахи одеколона, бензина и т. д. в воздухе), и в жидкостях (растекание краски, чернил, туши, молока в воде), и в твердых телах (свинцовый и золотой цилиндры были плотно прижаты друг к другу в течение длительного времени, при этом произошло взаимное проникновение молекул золота в межмолекулярное пространство свинца, и наоборот). Скорость протекания диффузии зависит от температуры тела и фазового состояния вещества: в газах она протекает значительно быстрее, чем в жидкостях и твердых телах.

7. Наблюдение молекул в электронный микроскоп или ионный проектор (прибор, дающий увеличение в несколько миллионов раз). В настоящее время можно увидеть изображения атомов с помощью сложных туннельных микроскопов, обеспечивающих увеличение в 100 млн. раз.

8. Опыт с маслом, помещенным в стальной цилиндр: заключенное в стальной цилиндр масло при большом давлении просачивалось сквозь стенки цилиндра, а сам цилиндр оставался при этом целым. Это говорит о том, что между молекулами стали есть промежутки, т. е. тело не сплошное.

9. Слипание двух свинцовых цилиндров, предварительно обработанных специальным ножом, чтобы убрать крупные шероховатости поверхности и сравнять их (в идеале) с размерами атомов. В этом случае цилиндры становятся как бы единым целым. Если теперь, предварительно закрепив один цилиндр, подвесить тяжелый груз ко второму, то цилиндры не оторвутся друг от друга. Они, сцепившись, могут удерживать довольно тяжелый груз (порядка 20 кг). После проведения опыта свинцовые цилиндры легко разъединяются.

10. Прочность тел доказывает, что микрочастицы в теле притягиваются друг к другу.

11. Способность тел к упругим деформациям тоже говорит о наличии сил взаимодействия (как сил притяжения, так и сил отталкивания) между микрочастицами тела.

12. *Броуновское движение* — это беспорядочное непрерывное движение мельчайших, взвешенных в жидкости или газе частиц какого-либо твердого тела под ударами молекул жидкости или газа. Это движение является ярким доказательством хаотического движения молекул в

теле. Впервые это движение в 1827 г. наблюдал английский ботаник Роберт Броун (1773—1858). Рассматривая под микроскопом споры плауна, попавшие в воду, он заметил, что они совершают хаотичное движение (рис. 26.1, а, б). Ученый обратил внимание на то, что это движение не прекращается и происходит непрерывно; его можно наблюдать сутками, месяцами, и интенсивность его менялась только при изменении температуры.

Броуновское движение — это тепловое движение, и оно не может прекратиться, так как связано с температурой тела.

Объяснить броуновское движение можно только на основе молекулярно-кинетической теории. Причина броуновского движения состоит в том, что удары молекул о броуновскую частицу не компенсируют друг друга. Качественно броуновское движение можно объяснить так: когда с частицей сталкивается большое число молекул, обладающих малым импульсом, но двигающихся случайно в одном направлении, то они могут вызвать заметное смещение этой частицы. Количественную теорию броуновского движения создали Альберт Эйнштейн (1879—1955) и польский физик-теоретик Мариан Смолуховский (1872—1917) в 1905—1906 гг. Работы французского физика Жана Перрена (1870—1942) окончательно доказали верность молекулярно-кинетической теории.

13. Опыт немецкого физика Отто Штерна (1888—1969) по определению скорости молекул был проведен в 1920 г. Экспериментальная установка, помещенная в непрерывно откачиваемый вакуумный сосуд, состояла из двух коаксиальных цилиндров А и В (рис. 26.2, а), скрепленных между собой. По оси цилиндров протянута тонкая платиновая проволока О, покрытая слоем серебра. При пропускании электрического тока проволока нагревается, и серебро начинает испаряться. Испарившиеся молекулы летят прямолинейно, и некоторая их часть, пролетев сквозь щель К во внутреннем цилиндре, оседает на охлаждаемой поверхности внешнего цилиндра, образуя на ней четкую полоску 1 металлического серебра. Если цилиндры привести во вращение с постоянной угловой скоростью ω , то полоска осажденных атомов оказывается смещенной от прежнего положения на некоторое расстояние 2 и заметно размытой (рис. 26.2). Смещение вызвано тем, что за время полета атома серебра от внутреннего цилиндра к внешнему вся система успевает по-

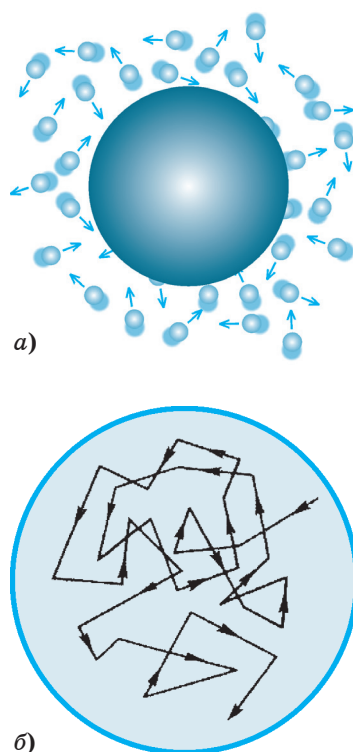


Рис. 26.1

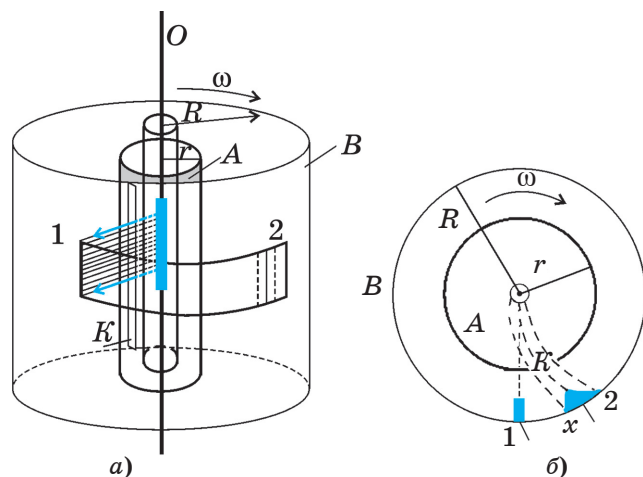


Рис. 26.2

вернуться на некоторый угол φ . По величине смещения полоски судят о величине скорости атомов серебра. Время пролета атомов между цилиндрами $\tau = \frac{R_B - R_A}{v_0}$ равно времени поворота системы цилиндров $\tau = \frac{x}{\omega R_B}$. Отсюда имеем: $v_0 = \frac{(R_B - R_A)\omega R_B}{x}$.

Штерн получил, что скорости молекул серебра в условиях опыта составляли порядка 650 м/с. Меняя силу тока в проводнике, ученый изменял температуру и показал, что скорость атомов пропорциональна \sqrt{T} . Размытость полоски объясняется тем, что атомы серебра имеют разные скорости. И поэтому самые быстрые атомы достигают стенок внешнего цилиндра раньше, а самые медленные — позже. По толщине слоя судят о числе атомов, обладающих данной скоростью. Опыт показал, что дей-

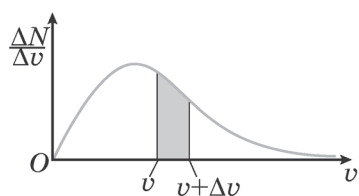


Рис. 26.3

ствительно существует распределение молекул по скоростям. Характер такого распределения был теоретически рассчитан Максвеллом еще в 1859 г. (рис. 26.3), а опыт Штерна его полностью подтвердил. Опыт Штерна также обосновал справедливость формулы средней квадратичной скорости молекул:

$$v_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Недостаток опыта состоял в том, что Штерн рассматривал молекулярный пучок. В дальнейшем его опыт улучшили и получили более точные результаты.

Мы с вами рассмотрели только некоторые факты, полученные в ходе опытов и подтверждающие основные положения молекулярно-кинетической теории. Сами же положения молекулярно-кинетической теории

очень важны как для описания тепловых процессов, происходящих с телами (нагрев, охлаждение, фазовые переходы), так и при создании теории теплопроводности тел.

Масса и размеры молекул. Все вышеприведенные примеры доказывают, что молекулы существуют реально. Они же свидетельствуют и о том, что размеры и масса молекул и атомов очень малы. Как же определить эти величины?

Размеры молекул. Для определения размера молекулы можно провести очень простой опыт, даже в домашних условиях. С помощью пипетки капнем на поверхность воды каплю оливкового масла. Под действием силы тяжести она растечется по поверхности слоем толщиной в одну молекулу. Тогда диаметр молекулы масла будет равен $d_0 = \frac{V}{S}$, где V — объем капли; $S = \pi R^2$ — площадь растекшейся капли (площадь круга). Расчеты показывают, что диаметр молекулы оливкового масла $\approx 1,7 \cdot 10^{-9}$ м. Эти размеры так малы, что их трудно себе представить. В таких случаях лучше всего прибегнуть к сравнениям. Если вашу голову увеличить до размеров Солнца, то молекула при этом увеличится до размеров головы. Если представить себе, что все размеры в мире возросли в 100 млн. раз, то молекула водорода ($2,3 \cdot 10^{-9}$ м) будет выглядеть как шарик диаметром 2,3 см, рост человека стал бы равным 170 000 км, толщина волоса — 10 км.

Число молекул. Понятно, что при таких малых размерах число молекул, например, в капле воды массой 1 г, огромно. Подсчитаем число молекул в этой капле, учитывая тот факт, что ее объем равен 1 см³. Диаметр молекулы воды равен $\approx 3 \cdot 10^{-10}$ м (это можно определить таким же способом, как указано выше). Объем молекулы приблизительно будет равен $(3 \cdot 10^{-10})^3$ м³. Будем считать, что молекулы плотно упакованы. Тогда число молекул найдем, разделив объем капли на объем молекулы: $N = \frac{V_{\text{капли}}}{V_0} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{27 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3} \approx 3,7 \cdot 10^{22}$. Чтобы представить себе число молекул, можно привести такое сравнение: при каждом вдохе вы захватываете столько молекул, что если бы они после выдоха равномерно распределились в атмосфере Земли, то каждый житель планеты при вдохе получил бы две-три молекулы, побывавших в ваших легких.

Масса молекул. Теперь становится ясным, что масса молекулы невероятно мала. Для того чтобы ее рассчитать, можно воспользоваться данными опыта, проведенного с оливковым маслом. Объем одной молекулы масла приблизительно равен $(1,7 \cdot 10^{-9})^3$ м³. При плотной упаковке молекул в одной капле масла массой 1 мг содержится

$$N = \frac{V_{\text{капли}}}{V_0} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{5 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ молекул.}$$
 Тогда масса одной молекулы масла будет равна: $m_0 = \frac{m_{\text{капли}}}{N} = \frac{10^{-6}}{2 \cdot 10^{20}} = 5 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$ Видно, что масса

молекул действительно очень мала. Приведем размеры и массы молекул некоторых веществ:

водород: $d_0 = 2,3 \cdot 10^{-9}$ м; $m_0 = 3,3 \cdot 10^{-27}$ кг;

кислород: $d_0 = 3 \cdot 10^{-9}$ м; $m_0 = 5,1 \cdot 10^{-27}$ кг;

вода: $d_0 = 3 \cdot 10^{-9}$ м; $m_0 = 3 \cdot 10^{-26}$ кг.

Для того, чтобы удобнее производить расчеты, в 1961 г. по международному соглашению ввели понятие *относительные массы молекул*. Ученые исходили из того, что человеческий мозг не в состоянии представить себе как столь малые ($\approx 10^{-27}$), так и столь большие ($\approx 10^{22}$) числа. Массы молекул стали сравнивать с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$. Главная причина выбора углеродной шкалы состоит в том, что углерод входит в огромное количество органических соединений.

Относительной молекулярной (или атомной) массой вещества M_r называют физическую величину, показывающую, во сколько раз масса молекулы (или атома) данного вещества больше $\frac{1}{12}$ массы атома углерода:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_{0c}}. \quad (26.1)$$

Относительные атомные массы всех химических элементов точно измерены. Складывая атомные массы химических элементов, входящих в состав молекулы, можно получить относительную молекулярную массу вещества. Например, для серной кислоты H_2SO_4 имеем:

$$M_r = 1 \cdot 2 + 32 \cdot 1 + 16 \cdot 4 = 98.$$

Количество вещества. Так как число молекул в любых телах огромно, логично сравнивать их с числом молекул в некой порции вещества. За такую порцию вещества принято число атомов в 12 г углерода.

Количество вещества ν — это физическая величина, показывающая, во сколько раз число молекул в данном теле больше, чем число атомов в 12 г углерода:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \quad (26.2)$$

Количество вещества измеряется в **молях**. **1 моль** — это такое количество вещества, которое содержит столько же молекул, сколько атомов содержится в 12 г углерода.

Постоянная Авогадро. Как видно из вышесказанного, в одном моле любого вещества содержится одинаковое число молекул или атомов. Это число получило название *число Авогадро* в честь итальянского физика и химика XIX в. Амедео Авогадро (1776—1856), внесшего большой вклад в молекулярную физику. Для того чтобы определить число Авогадро, необходимо воспользоваться определением моля и

знать массу атома углерода. Опыты показали, что масса атома углерода равна $1,995 \cdot 10^{-26}$ кг, тогда *число Авогадро будет равно*:

$$N_A = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \cdot \text{моль}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Число Авогадро является универсальной постоянной и играет важную роль в молекулярной физике.

Молярная масса. В молекулярной физике и химии широко используется понятие *молярная масса M вещества*. **Молярная масса вещества** — это масса вещества, взятого в количестве одного моля:

$$M = m_0 N_A. \quad (26.3)$$

Молярная масса вещества связана с относительной молекулярной массой вещества следующим соотношением: $M = M_r \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Массу произвольного количества вещества можно выразить так:

$$m = m_0 N = m_0 N_A \cdot \nu = M \cdot \nu. \quad (26.4)$$

Концентрация молекул. В мире микрочастиц важной характеристикой является *концентрация молекул*, которая показывает, какое число частиц содержится в единичном объеме вещества:

$$n = \frac{N}{V}. \quad (26.5)$$

С учетом этого плотность тела будет равна:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 \cdot n. \quad (26.6)$$



Вопросы для самоконтроля

1. Как вы понимаете утверждение о хаотичности теплового движения?
2. Какие основные положения молекулярно-кинетической теории вы знаете?
3. Какие примеры подтверждают сам факт существования молекул?
4. Как доказать, что молекулы в теле находятся в непрерывном хаотичном движении?
5. Какое движение называется *броуновским*?
6. От каких факторов зависит интенсивность броуновского движения?
7. Что вы понимаете под *диффузией*? Как можно изменить характер ее протекания?
8. Почему опыт Штерна по определению скорости молекул имеет такое важное значение?
9. Как можно доказать, что атомы и молекулы в теле взаимодействуют?
10. Что вы знаете о размерах молекул? Каким образом можно вычислить их диаметр?
11. Расскажите о том, как можно рассчитать число молекул в теле.
12. Как определить массу молекул?
13. Для чего была введена относительная молекулярная масса вещества? Каков физический смысл этой величины?
14. Что показывает число Авогадро?
15. Какая масса называется *молярной*?



Творческая мастерская

Наблюдайте

Рассмотрите явление диффузии в газах и жидкостях и подумайте, в каких агрегатных состояниях диффузия протекает быстрее? Почему?

Экспериментируйте

Проверьте прочность обыкновенной палки, пытаясь сломать ее, и убедитесь, что между молекулами существуют силы притяжения.

Объясните

1. Почему открытие броуновского движения оказалось так важно для физики?
2. Опишите особенности движения, расположения и взаимодействия частиц в различных агрегатных состояниях вещества.
3. Расскажите, каким образом вы определили скорость молекул газа.

Исследуйте

Выполните опыт, результаты которого могут послужить обоснованием молекулярно-кинетической теории.

Анализируйте

1. Скорость диффузии увеличивается при повышении температуры. Объясните это.
2. При накачивании воздуха в велосипедную шину насос заметно нагревается. Почему?

Творите

Предложите свои методы для определения скоростей молекул.

Решайте

1. Броуновская частица в опытах Перрена имела размер 1 мкм. Во сколько раз она больше молекулы воды, диаметр которой 10^{-8} см?
(Ответ: в 10^4 раз)
2. Какое количество вещества содержится в медном бруске массой 6 кг?
(Ответ: 93,75 моль)
3. В сосуде находится $5,418 \cdot 10^{26}$ молекул кислорода. Какое количество вещества, выраженное в молях, находится в этом сосуде?
(Ответ: 900 моль)
4. Какова масса 200 моль азота?
(Ответ: 5,6 кг)
- *5. Радоновые ванны содержат $1,8 \cdot 10^6$ атомов радона на объем воды 1 дм³. На сколько молекул воды приходится один атом радона?
(Ответ: $1,85 \cdot 10^{22}$)

Рефлексия

1. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
2. Пригодятся ли вам знания, приобретенные на этом уроке, в дальнейшей жизни?
3. Что нового вы узнали на уроке?
4. Что вы считаете нужным запомнить?
5. Над чем еще надо поработать?

§ 27. Силы взаимодействия молекул



Ключевые понятия: Ван-дер-ваальсовы силы, ориентационные силы, дисперсионные и индукционные силы, потенциальная яма, кристаллические решетки.

На этом уроке вы: изучите характер взаимодействия молекул в теле; узнаете природу этих сил; научитесь описывать модели твердых тел, жидкостей и газов на основе молекулярно-кинетической теории, объяснять структуры кристаллических, аморфных тел и полимеров.

Силы взаимодействия молекул. Между молекулами в телах есть взаимодействие. Мы уже привели некоторые факты, доказывающие существование этих сил и то, что между молекулами одновременно действуют и силы отталкивания, и силы притяжения. На малых расстояниях преобладают силы отталкивания, а на больших — силы притяжения, хотя действуют одновременно и те, и другие.

Силы межмолекулярного взаимодействия исследовал нидерландский физик Йоханнес Ван-дер-Ваальс (1837—1923), поэтому их часто называют *ван-дер-ваальсовыми силами*. Очень трудно было исследовать природу и характер молекулярных сил, так как мало что было известно о самих атомах и молекулах. К началу XX в. ученые определили, что молекула и атом — это сложная система, состоящая из большого числа заряженных частиц: электронов и атомных ядер. И хотя в целом атом и молекула электрически нейтральны, между ними действуют значительные электрические силы. Описать, как взаимодействуют частицы внутри атомов, очень трудно. Это проблема атомной физики. В курсе физики для 10 классов мы ограничимся качественным описанием молекулярных сил.

Как оказалось, существует несколько видов межмолекулярных сил, и у каждого из них имеются свои особенности. Так, у молекул-диполей электрические силы зависят от ориентации диполя, и поэтому они называются *ориентационными*. Кроме ориентационных сил, существуют *дисперсионные* и *индукционные силы*. Необходимо отметить, что все три перечисленных вида сил притяжения одинаковым образом убывают с расстоянием пропорционально $\frac{1}{r^7}$.

Для сил отталкивания характерны следующие особенности: 1) они очень быстро увеличиваются при уменьшении расстояния между молекулами или атомами; 2) зависят от индивидуальности каждой молекулы, а это трудно учесть и распространить на другие молекулы. Расчеты показали, что силы отталкивания возрастают при сближении молекул пропорционально $\frac{1}{r^9}$.

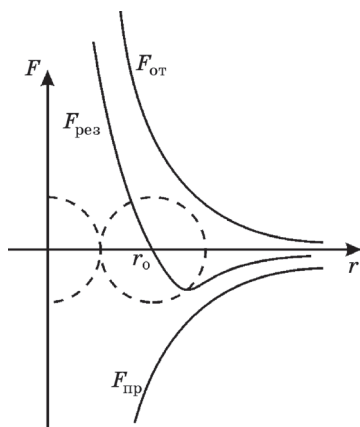


Рис. 27.1

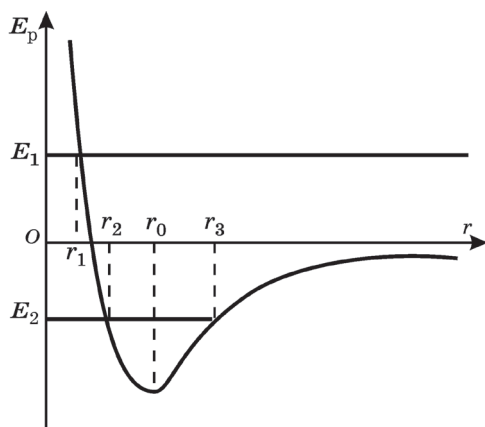


Рис. 27.2

С учетом вышесказанного можно дать примерную зависимость молекулярных сил от расстояния и построить график этой зависимости (рис. 27.1). Из графика видно, что при $r > r_0$ между молекулами преобладают силы притяжения, при $r < r_0$ — силы отталкивания, а при $r = r_0$ силы отталкивания и силы притяжения примерно равны. В точке r_0 результирующая сила взаимодействия молекул обращается в нуль, а их потенциальная энергия имеет минимальное значение.

Потенциальная энергия взаимодействия. Расстояние r_0 (рис. 27.2) соответствует устойчивому положению равновесия атомов. Атомы совершают хаотические колебания вблизи точки r_0 . Сама потенциальная энергия молекул определяется расстоянием между ними, причем чем оно больше, тем большую работу будут совершать силы притяжения молекул, втягивающие их в “потенциальную яму”. Поэтому потенциальная энергия молекул отрицательна.

Молекулы и атомы, находящиеся бесконечно далеко друг от друга, практически не взаимодействуют, следовательно, их потенциальная энергия равна нулю. Тогда при приближении молекул (уменьшении расстояния r между ними) потенциальная энергия будет уменьшаться, т. е. становиться отрицательной. Молекулы вещества как бы попадают в “потенциальную яму” (рис. 27.3). При дальнейшем сближении молекул ($r < r_0$) появляются быстрорастущие силы отталкивания, и потенциальная энергия снова растет. Сами же атомы и молекулы вещества будут совершать колебательное движение в окрестностях r_0 . То есть график зависимости потенциальной энергии от расстояния между атомами или молекулами позволяет определить характер поведения частиц в теле, а соотношение кинетической и потенциальной энергий молекул в теле дает возможность определить агрегатное состояние вещества. Поэтому с единых позиций можно объяснить наличие агрегатных состояний вещества.

Строение газообразных, жидких и твердых тел. Попробуем объяснить тот факт, что вещество может находиться в трех агрегатных состояниях, используя молекулярно-кинетическую теорию строения вещества.

Газы. В газах расстояния между молекулами огромны и во много раз превышают размеры молекул. Потенциальная энергия взаимодействия молекул очень мала — во много раз меньше их кинетической энергии. Поэтому молекулы в газах легко перемещаются по всему объему. Сталкиваясь друг с другом, они

постоянно изменяют направление своего перемещения. В газах царит и ближний, и дальний беспорядок, т. е. полный хаос. Сталкиваясь со стенками сосуда, в котором находится газ, молекулы передают им свой импульс. Возникает давление газа на стенки сосуда.

Газ не сохраняет ни объема, ни формы, так как слабые силы взаимодействия не в состоянии удерживать молекулы друг возле друга.

Жидкости. Молекулы жидкости расположены вплотную друг к другу. Они как бы зажаты молекулами-соседями. Сталкиваясь с ними, молекула совершает колебательное движение около положения равновесия. Тепловая энергия молекул в жидкости соизмерима с минимальной потенциальной энергией, которую обуславливают силы взаимодействия. Тепловое движение молекул расстраивает это расположение молекул. Рентгеноструктурный анализ показал, что молекулы в жидкости располагаются группами по 10—12 штук. Силы взаимодействия между молекулами способны удерживать рядом друг с другом определенное количество молекул, обеспечивая *ближний порядок*. Изредка молекула может совершать “перескоки” из своей группы в другую, попав в которую, она будет продолжать совершать колебательное движение. Из-за “перескоков” молекул в жидкой фазе присутствует *дальний беспорядок*. С повышением температуры возрастает число “перескоков” молекул и уменьшается время их “оседлой жизни”. Про молекулы жидкости можно сказать, что они “ведут полукочевой образ жизни”. Молекулярное движение в жидкости было изучено советским физиком-теоретиком Я. И. Френкелем (1894—1952).

Так как молекулы жидкости плотно упакованы, то жидкости практически несжимаемы и поэтому хорошо передают давление. Все жидкости текучи, т. е. они не сохраняют форму, зато сохраняют

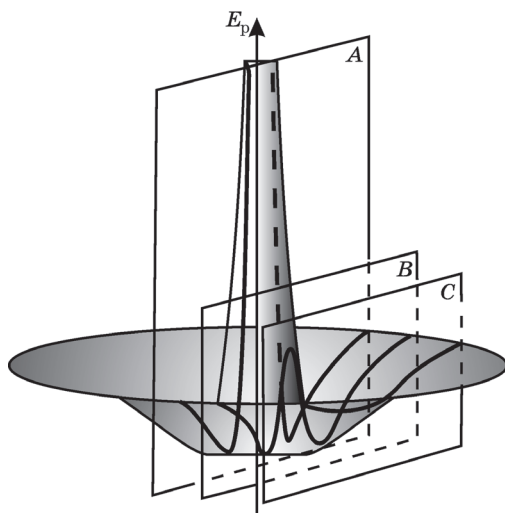


Рис. 27.3

объем. Кинетическая энергия молекул жидкости соизмерима с их потенциальной энергией.

Съемки с частотой 10 млн. кадров в секунду установили, что *жидкость обладает хрупкостью*, т. е. при падении на твердую поверхность капля жидкости раскалывается на осколки, которые сразу же собираются в более крупные капли.

Твердые тела. Силы взаимодействия между молекулами твердого тела так велики, что молекулы могут только колебаться около определенных положений, которые называются *узлами кристаллической решетки*. Поэтому твердые тела сохраняют и форму, и объем. Про молекулы твердого тела говорят, что они образуют ближний и дальний порядки. **Кристаллические решетки разных твердых тел различны, так как различны силы взаимодействия между молекулами и различно расположение самих молекул или атомов в телах.**

Можно отметить следующие типы кристаллических решеток.

1. **Ионные**, в узлах которых находятся положительные и отрицательные ионы.
2. **Атомные**, содержащие в узлах нейтральные атомы.
3. **Молекулярные**, в узлах которых находятся молекулы.
4. **Металлические**, в их узлах содержатся положительные ионы.

Если кристаллу не мешать расти, то внутренний порядок расположения атомов приводит к правильным геометрическим формам — образуются *монокристаллы*.

В твердых телах кинетическая энергия молекул гораздо меньше их потенциальной энергии.



Вопросы для самоконтроля

1. Каков характер сил взаимодействия между молекулами и атомами вещества?
2. Как изменяются силы притяжения и силы отталкивания между молекулами в зависимости от расстояния?
3. Что вы понимаете под “потенциальной ямой”?
4. Как объяснить характер зависимости результирующей силы взаимодействия между молекулами вещества от расстояния между ними?
5. Дайте характеристику газообразного состояния вещества с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
6. Расскажите о поведении молекул в жидкости.
7. Дайте характеристику твердой фазы вещества.



Рефлексия

1. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
2. Пригодятся ли вам знания, приобретенные на этом уроке, в дальнейшей жизни?
3. Что нового вы узнали на уроке?
4. Что вы считаете нужным запомнить?
5. Над чем еще надо поработать?

§ 28. Термодинамические системы и термодинамические параметры. Равновесное и неравновесное состояния термодинамических систем



Ключевые понятия: макротела, микротела, термодинамическая система, термодинамические параметры, термодинамический процесс, давление газа, равновесное состояние, неравновесное состояние.

На этом уроке вы: познакомитесь с основными понятиями, характеризующими свойства макроскопических тел, научитесь различать равновесное и неравновесное состояния термодинамических систем и описывать эти состояния.

Основные понятия термодинамики вводились не с помощью представлений о внутренней структуре изучаемой системы, а на основе эксперимента. В термодинамике оперируют только макроскопическими величинами: температурой, объемом, давлением, внутренней энергией тела и т. д.

Одним из основных понятий термодинамики является понятие *термодинамическая система*, под которой понимают совокупность тел любого химического состава и любой физической природы, характеризуемую определенным числом макроскопических параметров. Если термодинамическая система переходит из одного состояния (с одним набором параметров) в другое, то говорят, что произошел *термодинамический процесс*, т. е. *всякое изменение состояния термодинамической системы и есть термодинамический процесс, который сопровождается изменением термодинамических параметров*.

Под термодинамическими параметрами понимают физические величины, которые характеризуют свойства макроскопических тел (макросистемы) в целом. К ним относятся: давление газа, объем, температура.

Все макротела состоят из *микротел* (атомов и молекул). Микротела тоже имеют свои характеристики (*микропараметры*). К ним относятся: *объем V_0 молекулы (атома), масса m_0 молекулы (атома), скорость v_0 молекулы (атома), концентрация n молекул (атомов)*. Понятно, что процессы, происходящие с макротелами, обусловлены изменением параметров микротел, из которых данное макротело состоит.

Напоминаем, что *каждая физическая величина несет определенную информацию, т. е. имеет физический смысл*. Так, например, *масса макротела* показывает нам, какое количество вещества содержится в данном теле, *объем* — количественная характеристика пространства, занимаемого телом или веществом, *давление газа* характеризуется силой, с которой он действует на единицу площади.

Всякая система может находиться в различных состояниях, отличающихся температурой, давлением, объемом и т. д. Когда термодинамические параметры (термопараметры) макротела (макросистемы) не изменяются, то говорят об определенном состоянии этого тела. При переходе тела из одного состояния в другое его термопараметры изменяются.

Представим себе, что у нас имеется система тел, где в разных точках параметры состояния или хотя бы один из них, например, температура, имеют различные значения. В этом случае мы не можем приписать всей системе какую-то определенную температуру. Состояние такой системы называют **неравновесным**. Если такую систему изолировать и предоставить самой себе, то произойдет процесс выравнивания температуры, после чего процесс теплообмена прекратится — наступит термодинамическое равновесие. **Равновесным** называется такое состояние, при котором параметры системы имеют определенные значения, одинаковые для всех ее частей.

Процесс перехода макросистемы из неравновесного состояния в равновесное называется **релаксацией**, а промежуток времени, требующийся для такого перехода, — **временем релаксации**. Для различных процессов время релаксации может принимать значения от долей секунды (установление равновесного давления в газе) до нескольких лет (выравнивание концентрации в твердых сплавах).



Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под *термодинамической системой*? Какими параметрами она характеризуется?
2. Что называется *термодинамическим процессом*?
3. Что понимают под *термодинамическими параметрами*? Что к ним относится?
4. Какое состояние системы называют *равновесным*? Какие значения имеют при этом параметры системы?
5. Какое состояние системы называют *неравновесным*? Какие значения имеют при этом параметры системы?
6. Что называется *релаксацией*?



Рефлексия

1. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
2. Пригодятся ли вам знания, приобретенные на этом уроке, в дальнейшей жизни?
3. Что нового вы узнали на уроке?
4. Что вы считаете нужным запомнить?
5. Над чем еще надо поработать?

§ 29. Температура — как мера средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества



Ключевые понятия: температура, тепловое равновесие, средняя кинетическая энергия молекул, постоянная Больцмана.

На этом уроке вы: познакомитесь с физической величиной — температурой, занимающей особое место в молекулярной физике, научитесь описывать связь температуры со средней кинетической энергией поступательного движения молекул, применять основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов и формулу для давления газа при решении задач.

Температура. Особое место в молекулярной физике, и в термодинамике в частности, занимает такая физическая величина, как *температура*. Изначально физический смысл температуры сводился к тому, чтобы показать степень нагретости тела. О различной степени нагретости судят по процессу теплопередачи, происходящему при соприкосновении тел. То тело, которое отдает тепло, обладает большей степенью нагретости, а, следовательно, его температура выше. В результате теплообмена температура обоих тел становится одинаковой, и наступает *тепловое равновесие*.

Тепловым равновесием называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными. Это означает, что в системе *не меняются объем и давление*, не происходит теплообмен, отсутствуют взаимные превращения газов, жидкостей, твердых тел и т. д. В частности, не меняется объем столбика ртути в термометре. Это означает, что *температура системы остается постоянной*.

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

Тепловое равновесие устанавливается не только в случае соприкосновения двух тел, но и при контакте нескольких тел. Так, *при тепловом равновесии температура всех тел одинакова, ее можно считать характеристикой состояния теплового равновесия*. То, что в состоянии теплового равновесия температура тел одинакова, используется для ее измерения. Для этого тело и прибор, измеряющий температуру — *термометр* (рис. 29.1), приводят в непосредственный контакт. При этом их температуры приходят в состояние теплового равновесия (сравниваются).

Вещества, которые используются для измерения температуры тел, называются термометрическими.

В устройстве термометра использовано свойство тел изменять объем при нагревании или охлаждении. Термо-

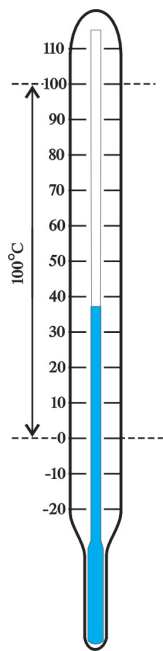


Рис. 29.1

метр никогда не покажет температуру тела сразу же после того, как он с ним соприкоснулся. Необходимо некоторое время для того, чтобы температуры тела и термометра выровнялись, и между телами установилось *тепловое равновесие*.

При изучении таких физических явлений, как диффузия, броуновское движение, неоднократно подчеркивалась зависимость их протекания от температуры. При этом предполагалось, что температура связана со скоростью движения молекул.

К определению физического смысла температуры можно прийти на основании следующих соображений. Повседневные опыты и наблюдения показывают, что при *тепловом контакте* двух различно нагретых тел они обмениваются энергией и при этом *происходят изменения физических параметров контактирующих тел*.

Процесс передачи энергии, происходящий при контакте более нагретого тела с менее нагретым и сопровождающийся изменением ряда физических параметров, называется теплопередачей.

Таким образом, температура как макроскопический физический параметр определяет возможность теплопередачи от одного тела к другому и направление теплопередачи. Кроме того, температура характеризует внутреннее состояние изолированной системы тел, находящихся в термодинамическом равновесии.

Следует учесть, что при установлении теплового равновесия термометр фиксирует свою собственную температуру, равную температуре тела.

Для теоретических исследований в физике используют так называемую *термодинамическую шкалу температур*, или *абсолютную температурную шкалу*. Впервые такую шкалу в 1848 г. предложил английский физик Уильям Томсон. За нулевую точку на этой шкале принята температура, при которой прекратилось бы тепловое движение молекул. Данную температуру называли *абсолютным нулем*. Это самая низкая температура из всех возможных ее значений. На абсолютной шкале температур нет отрицательных значений.

Абсолютного нуля практически невозможно достичь, так как тепловое поступательное движение молекул никогда не прекращается. К нему можно лишь приблизиться. В настоящее время в лабораторных условиях получены температуры, отличающиеся от абсолютного нуля всего на несколько миллионных долей градуса.

За вторую точку в абсолютной температурной шкале принята температура, при которой вода одновременно находится в трех состояниях (твердом, жидком и газообразном). Такое состояние получило название *тройная точка*, и оно соответствует температуре по шкале Цельсия $t = 0,01^{\circ}\text{C}$.

По термодинамической шкале температуру тройной точки воды приняли равной 273,16 единиц. За единицу абсолютной температуры

условились принимать один *Кельвин* (1 К), размер которого равен одному градусу Цельсия (1°C):

$$1 \text{ К} = 1^\circ\text{С}.$$

Так как температура тройной точки по Международной шкале температур равна $T = 273,16 \text{ К}$, а по шкале Цельсия $t = 0,01^\circ\text{С}$ и, учитывая, что $1^\circ\text{С} = 1 \text{ К}$, то соотношение между температурами будет равно:

$$T - t = 273,15^\circ.$$

Отсюда найдем формулы, выражающие связь между термодинамической (или абсолютной) температурой T и температурой t , отсчитываемой по шкале Цельсия:

$$T = (t + 273,15) \text{ К} \quad \text{или} \quad t = (T - 273,15)^\circ\text{С}.$$

На рисунке 29.2 показана простая сравнительная таблица между шкалами Цельсия и Кельвина.

Очевидно, что нуль по абсолютной шкале (абсолютный нуль) равен:

$$0 \text{ К} = -273,15^\circ\text{С}.$$

Поскольку тела состоят из молекул, а температура характеризует внутреннее состояние тел, то можно предположить, что температура каким-то образом связана с движением молекул. Это предположение подтверждает и ряд опытных фактов. Так, броуновское движение частиц тем более интенсивно, чем выше температура жидкости. Увеличение скорости диффузии также зависит от повышения температуры среды.

Итак, *чем выше температура тела, тем быстрее движутся его молекулы и тем больше их кинетическая энергия*. Это означает, что кинетическую энергию движения молекул, как и температуру, можно рассматривать в качестве меры теплового движения молекул.

Теперь выясним, какова же связь между средней кинетической энергией молекул и температурой газа. Для этого рассмотрим описание следующих двух процессов.

1. Если привести в соприкосновение два газа с различными значениями средней кинетической энергии молекул, то в результате беспорядочного движения молекулы сталкиваются между собой. При этом молекулы газа с большой кинетической энергией передают часть своей энергии молекулам газа с меньшей кинетической энергией. Этот процесс передачи энергии продолжается до тех пор, пока средние кинетические энергии молекул не сравняются. Тогда между газами устанавливается тепловое равновесие, хотя столкновения хаотически движущихся молекул продолжают.

2. Но, как известно, аналогично ведут себя тела, имеющие неодинаковую температуру. При соприкосновении двух тел, нагретых до различных температур, происходит передача энергии от одного тела к другому. При этом температура более нагретого тела уменьшается, а менее нагретого — увеличивается. Тепловое равновесие наступает, когда температуры обоих тел становятся одинаковыми.

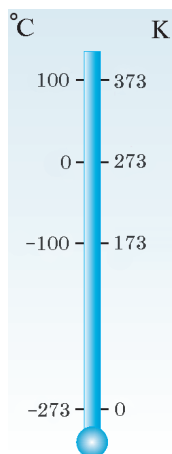


Рис. 29.2

Из сопоставления этих двух описаний процесса перехода к тепловому равновесию можно сделать следующее заключение: *средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул и температура одинаково характеризуют процесс перехода к тепловому равновесию тел: первая — микроскопически, вторая — макроскопически*. При соприкосновении тел обе эти величины выравниваются, т. е. устанавливается тепловое равновесие тел. Следовательно, между абсолютной температурой идеального газа и средней кинетической энергией молекулы существует количественная связь:

$$\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} \sim T. \quad (29.1)$$

Средняя кинетическая энергия молекул \bar{W}_k пропорциональна абсолютной температуре газа T .

Чтобы пропорциональную зависимость в выражении (29.1) записать в виде равенства, вводят размерный коэффициент $\frac{3}{2}k$. Тогда:

$$\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}k \quad \text{или} \quad \bar{W}_k = \frac{3}{2}kT.$$

Коэффициент k называют *постоянной Больцмана*. Он показывает, насколько изменится кинетическая энергия одной молекулы при изменении температуры на один градус. Постоянная Больцмана является важнейшей постоянной в молекулярно-кинетической теории. С помощью различных методов экспериментально было определено *численное значение постоянной Больцмана*:

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

Итак, *абсолютная температура тела является мерой средней кинетической энергии движения молекул*.

В этом заключается молекулярно-кинетический смысл температуры. Этот вывод справедлив не только для идеального газа, но и для вещества в любом состоянии.



Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под *тепловым*, или *термодинамическим равновесием тел*?
2. Чем отличаются горячие и холодные тела?
3. На чем основан метод измерения температуры?
4. Какая величина одинакова для газов, находящихся в состоянии теплового равновесия друг с другом?
5. Какие свойства тел используются в термометрах?
6. В чем заключается принцип построения абсолютной температурной шкалы? Какова единица абсолютной (термодинамической) температуры?
7. Что такое *абсолютный нуль температуры*?
8. Каково соотношение между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия?
9. Какая связь существует между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул газа?



Экспериментируйте

Рассмотрите примеры установления теплового равновесия тел, окружающих вас в повседневной жизни.

Объясните

1. Измерьте температуру тела и объясните принцип действия ртутного термометра.
2. Можно ли говорить о температуре одной или нескольких молекул? Ответ обоснуйте.
3. В чем отличие между абсолютной шкалой температур и шкалой Цельсия? Что у них общего?

Исследуйте

Воспользовавшись справочником по физике, определите интервалы температур, в которых можно использовать ртутный и спиртовой термометры.

Анализируйте

1. Каковы отличительные признаки состояний теплового равновесия?
2. Как выразить в кельвинах следующие температуры: 27°C ; -175°C ; 100°C ; 0°C ? Приведите расчеты.
3. Как записать в $^{\circ}\text{C}$ следующие температуры: 4 K; 180 K; 310 K; 420 K? Приведите расчеты.

Творите

Придумайте задачу на определение связи между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул газа.

Решайте

1. Во сколько раз изменится средняя кинетическая энергия атома неона при уменьшении его абсолютной температуры на 30%?
(Ответ: уменьшится в 1,43 раза)
2. Определите кинетическую энергию 10^5 атомов гелия при температуре 47°C .
(Ответ: $6,62 \cdot 10^{-16}$ Дж)
3. Гелий находится при температуре 27°C . Кинетическая энергия теплового движения всех молекул газа 10 Дж. Определите число молекул гелия.
(Ответ: $1,6 \cdot 10^{21}$)
4. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа 480 м/с при температуре 296 K. Сколько молекул содержится в 10 г этого газа?
(Ответ: $1,88 \cdot 10^{25}$)

Рефлексия

1. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
2. Пригодятся ли вам знания, приобретенные на этом уроке, в дальнейшей жизни?
3. Что нового вы узнали на уроке?
4. Что вы считаете нужным запомнить?
5. Над чем еще надо поработать?

§ 30. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов



Ключевые понятия: идеальный газ, основное уравнение молекулярно-кинетической теории, закон Авогадро.

На этом уроке вы: познакомитесь с основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов и научитесь применять его при решении задач.

Для того чтобы найти количественную связь между макромиром и микромиром, необходимо максимально упростить задачу. Молекулы различных газов отличаются друг от друга и размерами, и массой, и соединениями. Кроме того, силы взаимодействия между молекулами разных газов тоже различны. Если учитывать все эти факторы, то наша задача значительно усложнится. Поэтому для упрощения расчетов в молекулярно-кинетической теории была введена простейшая физическая модель реального газа — *идеальный газ*. Такого газа не существует, но он необходим нам для установления связи между микро- и макромирами. В то же время идеальный газ должен отражать наиболее характерные свойства реального газа.

Идеальный газ — это газ, молекулы которого представляют собой абсолютно упругие шарики бесконечно малого объема, взаимодействие между которыми проявляется только при непосредственном столкновении их друг с другом или со стенками сосуда. Между столкновениями молекулы движутся по инерции. Удары молекул друг о друга и о стенки сосуда, в котором находится газ, рассчитываются по законам упругого взаимодействия.

Проще всего установить связь между состоянием макротела и поведением микрочастиц в нем, рассчитав среднее давление газа на стенки сосуда, в котором он находится. Выделим в сосуде $ABCD$ стенку площадью S , перпендикулярную координатной оси Ox (рис. 30.1). Каждая молекула массой m_0 , подлетающая к стенке со скоростью, обладает импульсом $m_0 v_x$. Так как удар абсолютно упругий, то импульс молекулы изменится на противоположный, следовательно,

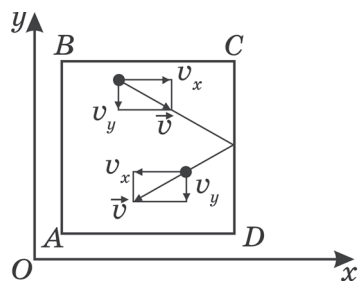


Рис. 30.1

изменение импульса молекулы будет равно $-2m_0 v_x$. Точно такой же по модулю импульс молекула передает стенке: $2m_0 v_x$. Молекул много, и каждая из них передает стенке при столкновении такой же импульс. За время t они передадут стенке импульс $2m_0 v_x zt$, где z — число столкновений всех молекул со стенкой в единицу времени. Число столкновений прямо пропорционально концентрации

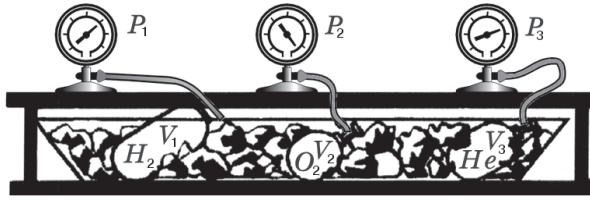


Рис. 30.2

молекул $n = \frac{N}{V}$. Кроме того, число z пропорционально скорости молекул. Чем больше эта скорость, тем большее число молекул успеет столкнуться со стенкой. Кроме того, число столкновений пропорционально площади поверхности стенки S . Помимо этого, надо учесть, что в среднем только половина всех молекул движется к стенке. Другая же половина движется от нее в обратном направлении. Поэтому $z = \frac{1}{2} n v_x S$, и полный импульс, переданный стенке за время t , будет: $2m_0 v_x z t = m_0 n v_x^2 S t$. Согласно второму закону Ньютона: *импульс силы равен изменению импульса тела*, т. е. $Ft = m_0 n v_x^2 S t$. Учтем и тот факт, что не все молекулы имеют одинаковую скорость v_x . В действительности средняя сила, действующая на стенку, пропорциональна не v_x^2 , а среднему квадрату скорости \bar{v}_x^2 , который равен $\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3} \bar{v}^2$. Тогда $F = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 S$. Давление газа на стенки сосуда будет равно: $p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2$. Уравнение:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2, \quad (30.1)$$

или

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2, \quad (30.2)$$

называется *основным уравнением молекулярно-кинетической теории*. Его называли так потому, что: 1) оно связывает между собой микро- и макромиры; 2) позволяет теоретически получить все газовые законы, открытые экспериментально; 3) дает информацию о процессах, происходящих в микромирах.

Основное уравнение можно записать и так:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{2}{3} n \bar{W}_{к0}. \quad (30.3)$$

Из этого уравнения следует, что *давление идеального газа пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема, т. е. плотности кинетической энергии*.

Для того чтобы получить еще одну форму записи основного уравнения молекулярно-кинетической теории, обратимся к опыту. Возьмем несколько сосудов, заполненных различными газами, например, водородом, гелием и кислородом. Сосуды имеют определенные объемы и снабжены манометрами, которые позволяют следить за изменением давления в сосудах. Известна масса газов в сосудах, а, следовательно, и число молекул в каждом из них. Приведем газы в состояние теплового равновесия. Для этого поместим сосуды в тающий лед и подождем, пока давление на манометрах перестанет изменяться (рис. 30.2). После этого можно будет утверждать, что температура всех газов равна 0°С. Давление газов p , их объемы V и число молекул N различны.

Найдем отношение $\frac{pV}{N}$ для водорода. Если, к примеру, 1 моль водорода занимает объем 0,1 м³, то при температуре 0°С давление водорода будет равным 22,65 кПа. Отсюда получаем, что:

$$\frac{pV}{N_A} = \frac{22,35 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \text{ Па} \cdot \text{м}^3}{6,02 \cdot 10^{23}} = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

Расчеты показали, что и для других газов величина $\frac{pV}{N}$ получается точно такой же. Обозначим эту величину $\theta_0 = \frac{pV}{N}$.

Теперь поместим сосуды с этими же газами в кипящую воду при нормальном атмосферном давлении и найдем, что величина $\frac{pV}{N}$ по-прежнему будет одной и той же для различных газов, но немного большей: $\theta_{100} = \frac{pV}{N} = 5,14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$. Величина θ называется *энергетической температурой*. Она измеряется в джоулях.

Мы с вами привыкли, что температура измеряется в градусах. Тогда можно считать, что энергетическая температура и температура, измеряемая в градусах, связаны прямо: $\theta = kT$, где k — коэффициент пропорциональности.

Вычислим численное значение этого коэффициента:

$$\theta_{100} - \theta_0 = k(T_2 - T_1), \text{ где } T_2 = 373 \text{ К, а } T_1 = 273 \text{ К}.$$

Отсюда получим, что

$$\frac{\theta_{100} - \theta_0}{T_2 - T_1} = \frac{5,14 - 3,76}{100} \cdot 10^{-21} \text{ Дж/К} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Коэффициент $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ является *постоянной Больцмана*. Она связывает энергетическую температуру с температурой, измеряемой в кельвинах.

Обратимся теперь к основному уравнению молекулярно-кинетической теории:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{W}_{k_0} = \frac{2}{3} \frac{N \overline{W}_{k_0}}{V},$$

где \overline{W}_{k_0} — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа. Отсюда получим, что $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \overline{W}_{k_0}$. Так как нами только что было доказано, что $\frac{pV}{N} = kT$, то получим, что левые части последних уравнений равны, значит, равны и их правые части. Следовательно,

$$\overline{W}_{k_0} = \frac{3}{2} kT. \quad (30.4)$$

Формула (30.4) показывает, что *средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа пропорциональна его абсолютной температуре*. Подставим это значение средней кинетической энергии поступательного движения молекулы идеального газа в основное уравнение молекулярно-кинетической теории и получим:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{W}_{k_0} = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT = nkT. \quad (30.5)$$

Это еще одна форма записи основного уравнения молекулярно-кинетической теории. Из уравнения $p = nkT = \frac{N}{V} kT$ следует, что *в равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул — закон Авогадро*.



Вопросы для самоконтроля

1. Для какой цели было введено понятие *идеальный газ*? Опишите модель идеального газа.
2. Как вывести основное уравнение молекулярно-кинетической теории?
3. Что называется *энергетической температурой*?
4. Назовите три формы записи основного уравнения молекулярно-кинетической теории.
5. Как средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул связана с температурой системы?

Примеры решения задач

1. Капелька воды имеет массу 1 нг. Из скольких молекул она состоит?

Решение. Число молекул в капле найдем по формуле: $N = \nu N_A$, где $\nu = \frac{m}{M}$ — количество вещества, N_A — число Авогадро, M — молярная масса воды, тогда $N = \frac{m}{M} N_A = \frac{10^{-12} \text{ кг} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 3,3 \cdot 10^3 \text{ молекул.}$

2. Плотность неизвестного газа $\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$. При этом в объеме $V = 0,1 \text{ м}^3$ содержится $N = 2,7 \cdot 10^{24}$ молекул. Какой это газ? Определить его молярную массу.

Решение. Массу газа можно найти, используя следующие две формулы: $m = \rho V$ и $m = m_0 N$, где $m_0 = \frac{m}{N_A}$ — масса молекулы газа. Тогда $\rho V = \frac{m}{N_A} \cdot N$, отсюда $M = \frac{\rho V \cdot N_A}{N}$. $M = \frac{0,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,1 \text{ м}^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}}{2,7 \cdot 10^{24}} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. Это водород H_2 .

3. Современные вакуумные насосы позволяют понижать давление до $p = 10^{-12} \text{ мм рт. ст.}$ Сколько молекул газа содержится в объеме $V = 1 \text{ см}^3$ при этом давлении и температуре $t = 48^\circ\text{C}$?

Решение. Согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории газов, давление идеального газа равно:

$$p = nkT, \text{ где } n = \frac{N}{V} \text{ — концентрация молекул.}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \text{ — постоянная Больцмана.}$$

$$T = (t^\circ + 273)\text{К} \text{ — абсолютная температура газа.}$$

$$\text{Тогда } p = \frac{N}{V} kT. \text{ Отсюда } N = \frac{pV}{kT}; N = \frac{10^{-12} \cdot 133 \text{ Па} \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 321 \text{ К}} \approx 30000 \text{ шт.}$$

4. Давление газа в закрытом сосуде увеличилось после его нагревания в 16 раз ($p_2 = 16p_1$). Во сколько раз изменилась средняя квадратичная скорость его молекул?

Решение. Запишем основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов для двух состояний газа: $p_1 = \frac{1}{3} m_0 n v_{01}^2$ и $p_2 = \frac{1}{3} m_0 n v_{02}^2$;

$$\text{так как } p_2 = 16p_1, \text{ то } \frac{1}{3} m_0 n v_{02}^2 = 16 \cdot \frac{1}{3} m_0 n v_{01}^2.$$

Отсюда $v_{02} = 4v_{01}$, т. е. средняя квадратичная скорость молекул газа возросла в 4 раза.



Объясните

1. Поясните, почему при выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории учет столкновений между молекулами не влияет на окончательный результат?
2. Каков физический смысл постоянной Больцмана?
3. Почему основное уравнение молекулярно-кинетической теории называется основным уравнением?

Исследуйте

Сравните давление кислорода и водорода при одинаковых концентрациях молекул и равных средних квадратичных скоростях их движения.

Анализируйте

1. О чем говорит закон Авогадро?
2. Какие упрощающие предположения были использованы при выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории для идеального газа?

Решайте

1. Каким может быть наименьший объем баллона, содержащего кислород массой 6,4 кг, если его стенки при температуре 20°C выдерживают давление 1568 Н/см²?

(Ответ: 31 л)

2. До какой температуры T_1 при постоянном давлении $p = 10^5$ Па надо нагреть кислород, чтобы его плотность стала равна плотности водорода при том же давлении и температуре $T_2 = 200$ К?

(Ответ: 3200 К)

3. Найдите формулу соединения углерода с кислородом, если известно, что это вещество в газообразном состоянии массой $m = 1$ г при температуре $t = 27^\circ\text{C}$ и давлении $p = 5,6 \cdot 10^4$ Па занимает объем $V = 1$ дм³.

(Ответ: CO₂)

Рефлексия

1. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
2. Пригодятся ли вам знания, приобретенные на этом уроке, в дальнейшей жизни?
3. Что нового вы узнали на уроке?
4. Что вы считаете нужным запомнить?
5. Над чем еще надо поработать?

Молекулярно-кинетическая теория — раздел молекулярной физики, изучающий тепловые явления с учетом внутреннего строения вещества.

Основные положения молекулярно-кинетической теории:

- 1) все тела состоят из микрочастиц;
- 2) микрочастицы в теле непрерывно и хаотично движутся;
- 3) микрочастицы в теле взаимодействуют друг с другом, причем силы эти электромагнитной природы.

Эти положения имеют экспериментальное подтверждение (например, диффузия, броуновское движение, опыт Штерна).

Термодинамические параметры — это физические величины, которые характеризуют состояние макросистемы в целом. К ним относятся давление газа, объем, температура.

Температура характеризует внутреннее состояние изолированной системы тел, находящихся в термодинамическом равновесии.

Чем выше температура тела, тем быстрее движутся его молекулы и тем больше их кинетическая энергия.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул прямо пропорциональна абсолютной температуре тела:

$$\overline{W}_{к_0} = \frac{3}{2} kT,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/к — постоянная Больцмана. Она связывает энергетическую температуру с абсолютной температурой.

Средняя квадратичная скорость хаотичного движения молекул пропорциональна абсолютной температуре тела:

$$v_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Идеальный газ — это газ, молекулы которого представляют собой абсолютно упругие шарики бесконечно малого объема, не взаимодействующие друг с другом.

Связь микромира с макромиром устанавливает основное уравнение молекулярно-кинетической теории: $p = \frac{1}{3} n m_0 v_0^2$, или $p = \frac{2}{3} n \overline{W}_k$, или $p = nkT$.

Из уравнения $p = nkT = \frac{N}{V} kT$ следует, что в равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул — **закон Авогадро**.