

Группа 14. Физика

Дата: 15.11.2021

Уроки № 39, 40, 41

Тип урока: комбинированный урок

Темы уроков:

Абсолютная температура. Температура – мера средней кинетической энергии молекул.

Измерение скоростей молекул газа.

Практическая работа №5: Решение задач по теме «Температура – мера кинетической энергии молекул»

Задание:

Ознакомиться с текстом по теме урока. Написать в тетради краткий конспект. Ответить на контрольные вопросы. Решить задачи.

План конспекта:

1. Средняя кинетическая энергия молекул газа
 2. Газы в состоянии теплового равновесия
 3. Определение температуры
 4. Абсолютная температура
 5. Абсолютный ноль температур
 6. Температура – мера средней кинетической энергии молекул
 7. Закон Авогадро
-

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 $\frac{V}{N} = \text{const}$.

Газы в состоянии теплового равновесия. Рассмотрим следующий опыт. Возьмём несколько сосудов, заполненных различными газами, например водородом, гелием и кислородом. Сосуды имеют определённые объёмы и снабжены манометрами. Это позволяет измерить давление в каждом сосуде. Массы газов известны, тем самым известно число молекул в каждом сосуде.

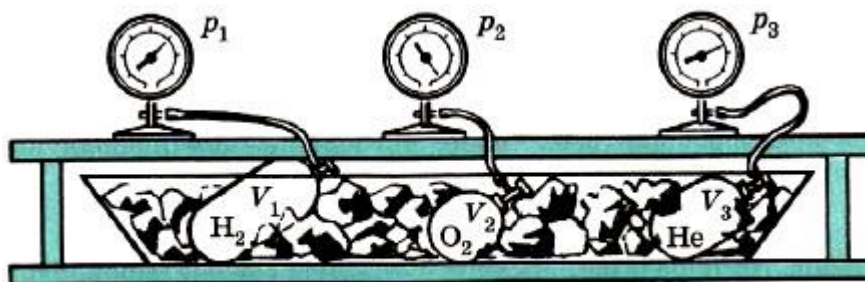


Рис. 9.4

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°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 $V_{\text{H}_2} = 0,1 \text{ м}^3$, то при температуре 0°C давление оказывается равным $p_{\text{H}_2} = 2,265 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Отсюда

$$\frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{A}}} = \frac{2,265 \cdot 10^4 \cdot 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}^3}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ м}^2} = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.} \quad (9.9)$$

Если взять водород в объёме, равном kV_{H_2} , то и число молекул будет равно kN_{A} и

отношение $\frac{p_{\text{H}_2} kV_{\text{H}_2}}{kN_{\text{A}}}$ 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

$$\frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{A}}} = \frac{p_{\text{He}} V_{\text{He}}}{N_{\text{He}}} = \frac{p_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}}{N_{\text{O}_2}} = \Theta_0. \quad (9.10)$$

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 $\frac{pV}{N} = \text{const.}$

ИНТЕРЕСНО

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.

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 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 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.

Запомни
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.

Запомни
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.

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:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT.$$

(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, выдвинутая 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.



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

Зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры. Учítывая, что $\frac{N}{V} = n$, из формулы (9.13) получим выражение, показывающее зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$p = nkT.$$

(9.17)



Выведите закон Авогадро, используя соотношение (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.

Закон Авогадро

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

Примеры решения задач:

Задача 1. Чему равно отношение произведения давления газа на его объём к числу молекул при температуре $t = 300\text{ }^\circ\text{C}$?

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 $0\text{ }^\circ\text{C}$. 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 $V = 10$ см³ 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 °С.

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 сосуд постоянной, определим

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

Контрольные вопросы

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 нуль температуры по шкале Цельсия?
4. Какие преимущества имеет абсолютная шкала температур по сравнению со шкалой Цельсия?
5. Почему концентрация молекул всех газов одна и та же при одинаковых давлениях и температурах?
6. Как зависит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул от их массы?

:

Задачи для самостоятельного решения

1. Какое значение имела бы постоянная Больцмана, если бы единица температуры в СИ — кельвин — была равна не $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а $2\text{ }^{\circ}\text{C}$?
2. Современные вакуумные насосы позволяют понижать давление до $1,3 \cdot 10^{-10}\text{ Па}$ ($10^{-12}\text{ мм рт. ст.}$). Сколько молекул газа содержится в 1 см^3 при указанном давлении и температуре $27\text{ }^{\circ}\text{C}$?
3. Средняя квадратичная скорость молекулы газа, находящегося при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Литература:

Мякишев Г. Я. Физика 10 класс. Учебник для общеобразовательных учреждений. М., 2010. §66 упр. 1-6; §67 упр. 1-3; стр. 181-182