

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?



Ответьте на 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 таящего 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



ИНТЕРЕСНО

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.

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*.

ИНТЕРЕСНО

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

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

ЗАДАНИЕ

1. Изучить тему, составить краткий конспект.

2. Вопросы (уметь отвечать устно)

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

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.

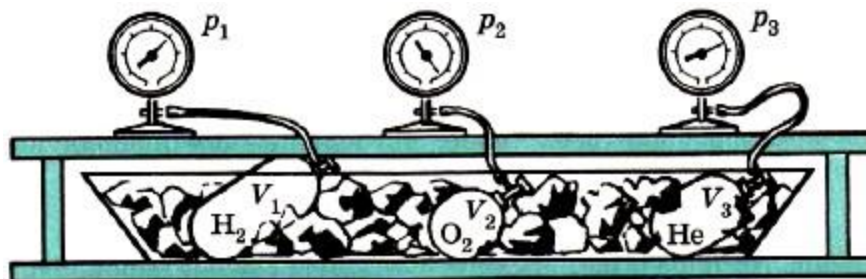


Рис. 9.4

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 p газов, 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 °С 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.

Запомни

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



Л. Больцман
(1844—1906)

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

Мы знаем значения величины Θ при 0 °C и 100 °C (см. формулы (9.9) и (9.11)). Обозначим абсолютную температуру при 0 °C 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:

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

Важно

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



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



Рис. 9.5

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

ИНТЕРЕСНО

В США используется шкала Фаренгейта. Точка заморзания воды по этой шкале $32 \text{ }^\circ\text{F}$, а точка кипения $212 \text{ }^\circ\text{F}$. Пересчет 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:

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

(9.16)

Важно

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

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.

Зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры.

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

$$p = nkT.$$

(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.

ЗАДАНИЕ

1. Изучить тему, составить краткий конспект.

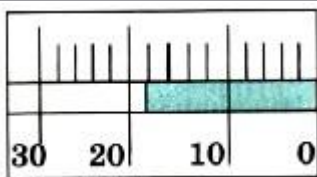
2. Вопросы (уметь отвечать устно)

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. 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?

3. Посмотреть видеоролик по ссылке: <https://youtu.be/IjFjawJXZTY>

4. Задание (для желающих)



Образцы заданий ЕГЭ

A1. Температура газа в сосуде равна $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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) $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2) $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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

Сфотографировать конспект, подписать Ф.И. и выслать его на почту преподавателя до 27 марта.