

Тема: Макро- и микропараметры. Идеальный газ. Основное уравнение МКТ идеального газа. Тепловое равновесие. Абсолютная температура. Температура – мера средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества. Давление смеси газов.

Атомы и молекулы взаимодействуя друг с другом, образуют разнообразные вещества (системы).

Микросистема - это система в которой число частиц невелико (десятки, сотни).

Макросистема – это система в которой число частиц во много раз больше (миллионы и более).

Например газ, состоящий из очень большого числа молекул – это макросистема. Большое число молекул приводит к появлению у нее новых свойств, которыми отдельные частицы не обладают.

Например давление газа есть результат непрерывного действия всех молекул на стенки сосуда, хотя не каждая молекула сталкивается со стенками.

Для описания состояния макросистемы вводят параметры, которые называются **параметрами состояния**. Различают микропараметры и макропараметры.

Микропараметры – это параметры, характеризующие одну частицу. Например, масса молекулы, её скорость и энергия.

Макропараметры

Макропараметры – это параметры, характеризующие систему в целом не учитывая, что система состоит из молекул.

Например, объём V , давление p , средняя скорость молекул $\langle v \rangle$, температура T , концентрация n и т.д.

Объём газа V – это объём сосуда, в котором газ находится. $[m^3]$ в СИ.

$$1л = 10^{-3} м^3$$

Концентрация молекул n - это число молекул N в единице объёма, т.е.

$$n = \frac{N}{V}$$

$$\text{В СИ } 1/м^3 = м^{-3}$$

Сегодня мы свами установим связь между макроскопическими и микроскопическими состояниями системы. Эта связь будет называться основное уравнение МКТ.

Идеальный газ

При наблюдении и изучении явлений в природе и технике практически невозможно учесть все факторы, влияющие на ход того или иного явления. Однако из опыта всегда

можно установить важнейшие из них. Тогда всеми другими факторами, не имеющими решающего влияния на ход явления, можно пренебречь. На этой основе создается идеализированное (упрощенное) представление о таком явлении. Созданная на этой основе модель явления помогает изучать реально происходящие процессы и предвидеть их ход в различных ситуациях. Рассмотрим одно из таких идеализированных понятий.

Рассмотрим модель разреженного газа. Для этого введем физическую **модель идеального газа в которой приняты следующие допущения:**

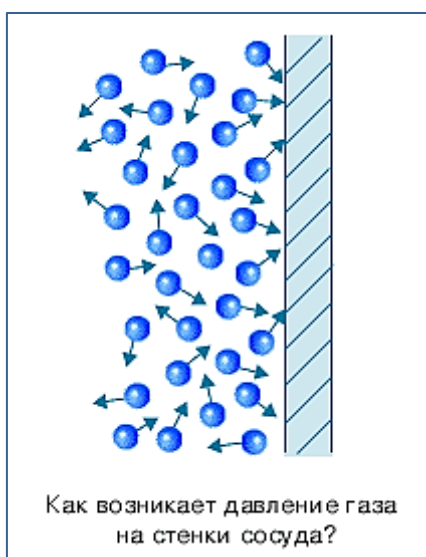
- 1. Размеры молекул малы по сравнению со средним расстоянием между ними; молекулы можно принимать за материальные точки.*
- 2. Силы притяжения между молекулами не учитываются, а силы отталкивания возникают только при соударениях.*
- 3. Молекулы сталкиваются друг с другом как абсолютно упругие шары, движение которых описывается законами механики.*

Таким образом, **идеальным называется газ, в котором можно пренебречь собственным объёмом молекул и межмолекулярным взаимодействием (кроме столкновений).**

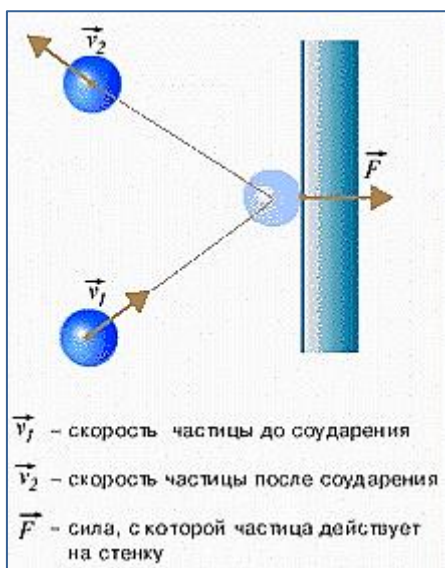
При небольших давлениях и не очень низких температурах реальные газы близки к идеальному газу. Например, водород, кислород при нормальных условиях в атмосфере можно рассматривать как идеальные газы.

Нормальные физические условия – физические условия при которых давление $p=0,1013 \text{ Мпа}=760\text{мм рт.ст.}$ (нормальная атмосфера) и температурой $T=273,15 \text{ К}=0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

При высоких давлениях молекулы газа находятся так близко, что между ними возникают заметные силы взаимодействия. Пренебречь их собственным объёмом нельзя, и газ уже не является идеальным.



Внутренняя энергия газа, скорость движения молекул



Поскольку молекулы движутся, значит они обладают энергией.

Внутренняя энергия тел и веществ представляет собой сумму кинетических энергий его молекул и потенциальной энергии их взаимодействия. Т.е. в формульном виде это можно записать так:

$$W = N\langle W_k \rangle + W_n$$

Где N - число молекул в веществе, $\langle W_k \rangle$ - средняя кинетическая энергия одной молекулы, W_n - потенциальная энергия взаимодействия молекул.

Выведем формулу, для расчета внутренней энергии идеального газа. *Что для этого необходимо сделать в первую очередь?* Для начала прочтем еще раз определение идеального газа, видим, что мы пренебрегаем взаимодействием между молекулами, а значит, *что произойдет с формулой?* Компонента представляющая собой потенциальную энергию «уйдет», и формула запишется в виде:

$$W = N\langle W_k \rangle$$

Т.о. в идеальном газе внутренняя энергия непосредственно зависит от кинетической энергии движения молекул.

Движение молекул газа подчиняется законам статистической физики. В каждый момент времени скорости движения отдельных молекул могут значительно отличаться друг от друга, но их средние значения одинаковы и при расчётах используются не мгновенные скорости отдельных молекул, а некоторые средние значения.

Различают **среднюю арифметическую** $\langle v \rangle$ и **среднюю квадратичную** $\langle v_{кв} \rangle$ скорости движения молекул.

Пусть имеется N молекул, скорости которых соответственно $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$

Средняя арифметическая скорость хаотического движения молекул (при грубом приближении) по модулю определяется как сумма модулей скоростей молекул газа, делённая на их общее число:

$$\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_N}{N}$$

Среднее значение квадрата скорости определится следующей формулой:

$$\langle v^2 \rangle = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} \quad (1)$$

Где N-число молекул в газе.

Но квадрат модуля любого вектора равен сумме квадратов его проекций на оси координат Ох, Оу, Oz. Поэтому:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Средние значения v_x^2, v_y^2, v_z^2 можно определить с помощью формул, подобных формуле (1). Тогда получим:

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$$

Внимание! Так как направления Ох, Оу, Oz вследствие беспорядочного движения молекул, равноправны, средние значения квадратов проекций скорости равны друг другу:

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

Видите, из хаоса выплывает определенная закономерность. Учитывая соотношение (2), подставим в формулу (1), подставив $\overline{v_x^2}$, вместо $\overline{v_y^2}, \overline{v_z^2}$. Тогда средний квадрат проекции скорости:

$$\boxed{\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}}$$

Т.е. средний квадрат проекции скорости равен 1/3 среднего квадрата самой скорости. Множитель 1/3 появляется вследствие трехмерности пространства и, соответственно, существования трех проекций у любого вектора.

Откуда средняя квадратичная скорость движения молекул может определяться

$$\langle v_{KB} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}}$$

Где $\langle v^2 \rangle$ – средний квадрат скорости движения молекул. Его не следует смешивать с квадратом средней скорости!

$$\langle v^2 \rangle \neq \langle v \rangle^2$$

Как показывают расчёты

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8R \cdot T}{\pi M}}$$

$$\langle v_{KB} \rangle = \sqrt{\frac{3R \cdot T}{M}}$$

Где R – универсальная газовая постоянная $R=8,314 \text{ м}^2\text{кг/с}^2\text{КМоль}$

M – молярная масса

Одной из основных задач молекулярно-кинетической теории газа является установление количественных соотношений между макроскопическими параметрами, характеризующими состояние газа (давлением, температурой), и величинами, характеризующими хаотическое тепловое движение молекул газа (скоростью молекул, их кинетической энергией). Одним из таких соотношений является зависимость между давлением идеального газа и средней кинетической энергией поступательного движения его молекул. Эту зависимость называют основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа:

Давайте найдём давление газа, зная его микроскопические величины для идеального газа.

Давление p – скалярная физическая величина, равная отношению силы *F* к значению площади *S* площадки, на которую эта сила действует

$$p = \frac{F}{S}$$

В СИ единица давления $1\text{Н/м}^2=1\text{Па}$ (Паскаль).

Внесистемные единицы измерения - 1 мм.рт.ст. и 1 атмосфера.

Нормальное давление равно 1 атмосфере

1 атмосфера=1 атм=760 мм. рт. ст.

1 мм.рт.ст.=133Па

Вспомним почему газы создают давление на стенки сосуда. За счёт ударов о стенки сосуда.

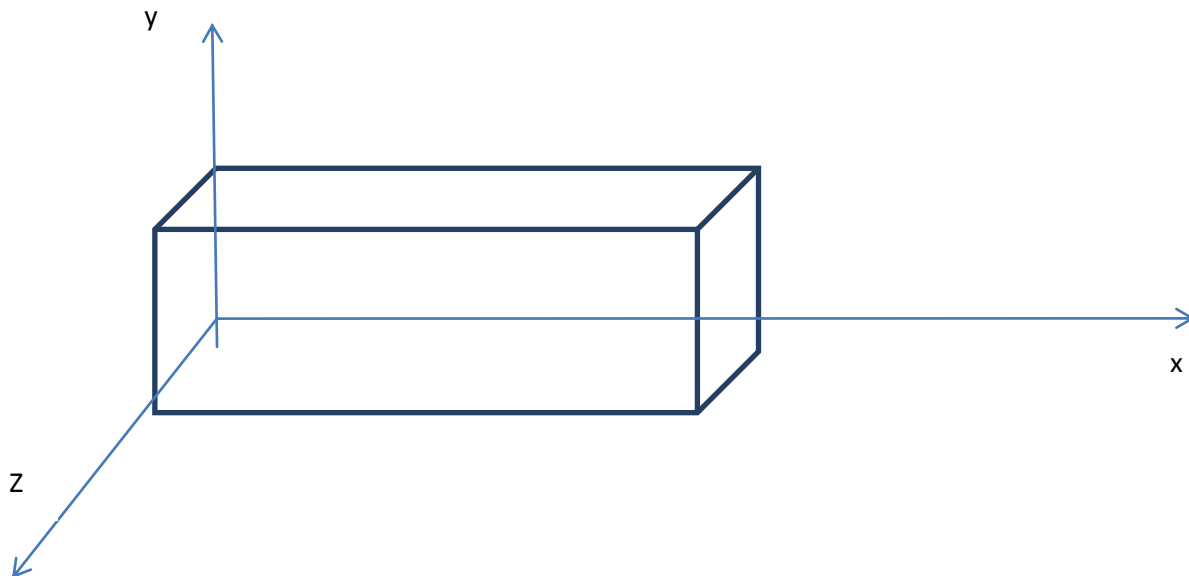
С помощью какого прибора измеряется давление газа? Манометр показывает давление газа p_0 . Как возникает это давление?

Каждая молекула газа, ударяясь о стенку, в течение малого промежутка времени действует на нее с определенной силой. Манометр фиксирует среднюю по времени силу,

действующую на каждую единицу площади поверхности его чувствительного элемента – мембраны.

Но давление газа можно рассчитать не используя манометр.

Пусть газ находится в закрытом сосуде.



Внутри этого сосуда находится идеальный газ. Найдём давление на боковую стенку.

Каждая молекула массой m_0 подлетающая к стенке сосуда со скоростью \vec{v} , проекция которой на ось Ox равна v_x , передает стенке при ударе импульс $p = m_0 v_x$. Отскакивая от стенки с той же скоростью по модулю, молекула опять передает импульс $p = m_0 v_x$. Всего за время столкновения молекула передает стенке импульс $p = 2m_0 v_x$.

Молекул много, и каждая из них передает стенке при столкновении такой же импульс. За секунду они передадут стенке импульс $p = 2m_0 v_x Z$. Где Z – число столкновений всех молекул со стенкой за это время. Число Z , очевидно прямо пропорционально концентрации молекул, т.е. числу молекул в единице объема $n = \frac{N}{V}$. Кроме того число Z пропорционально скорости молекул v_x . Чем больше эта скорость, тем больше молекул за секунду успеет столкнуться со стенкой. Если бы молекулы не двигались, то столкновений со стенкой не было бы вообще. Кроме того, число столкновений молекул со стенкой пропорционально площади поверхности стенки S : $Z \sim n v_x S$. Надо еще учесть, что в среднем только половина всех молекул движется к стенке. Другая половина движется в обратную сторону. Поэтому $n v_x S$ надо разделить пополам. Тогда $Z = \frac{1}{2} n v_x S$ и полный импульс, переданный стенке за 1с равен:

$$p = 2m_0 v_x Z = m_0 n v_x^2 S.$$

Согласно второму закону Ньютона изменение импульса любого тела за единицу времени равно действующей на него силе:

$$\Delta p = \overrightarrow{F \Delta t} \quad \text{2 закон Ньютона в импульсной форме}$$

$$F = m_0 n v_x^2 S.$$

Учтем, что не все молекулы имеют одну и ту же скорость v_x , но среднее значение квадрата скорости будет единственно для данного случая. тогда: $F = m_0 n \overline{v_x^2} S.$

Учтем формулу для расчета квадрата средней скорости $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2},$

$$F = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2} S$$

Таким образом давление на стенки сосуда равно:

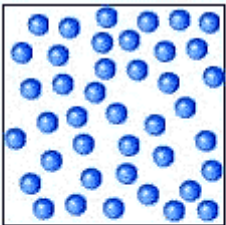
$$\boxed{p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}} \text{ – основное уравнение МКТ.}$$

Запишем это уравнение с учетом средней кинетической энергии молекул.

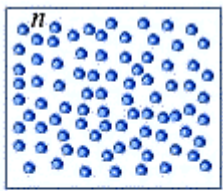
Учтем, что $\overline{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2},$ тогда

$$\boxed{p = \frac{2}{3} n \overline{E}} \text{ - основное уравнение МКТ.}$$

Давление идеального газа пропорционально произведению концентрации молекул на среднюю энергию поступательного движения молекулы.



m – масса газа
 V – объём газа
 T – температура газа
 p – давление газа
 n – концентрация



$$p = \frac{2}{3} n \overline{E_K}$$

Основное уравнение МКТ
идеального газа

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E_K}$$

$$p = \frac{2}{3} n \cdot \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$$

$$p = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$$

$$p = \frac{2}{3} \cdot \frac{m}{m_0 V} \cdot \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$$

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{V} \cdot \overline{v^2}$$

$$\boxed{p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}}$$

Тепловое равновесие. Температура.

Кто из вас смотрит и слушает прогноз погоды?

На сегодняшнем занятии вы узнаете нечто новое о физической величине, которую каждый день упоминают в прогнозах погоды, т.е. о температуре; о том, как она строго научно определяется в физике, каков ее истинный физический смысл.

На прошлых занятиях мы с вами много говорили о молекулах, определяли их размер, массу и т.д., но уже на прошлом занятии мы стали говорить о том, что нас может не интересовать каждая молекула в отдельности, а интересует вся совокупность молекул. Для описания процессов в газах и других макроскопических телах нет необходимости все время обращаться к молекулярно-кинетической теории. Поведение макроскопических тел, в частности газов, можно охарактеризовать немногим числом физических величин, относящихся не к отдельным молекулам, составляющим тела, а ко всем молекулам в целом. К числу таких величин относятся: объем, давление, температура и др.

Холодные и горячие тела

Центральное место во всем учении о тепловых явлениях занимает понятие *температура*. *Что же такое температура?* На ощупь мы определяем, какое тело нагрето сильнее, и говорим, что это тело имеет более высокую температуру. Т.о., температура характеризует степень нагретости тела (холодное, теплое, горячее). Для ее измерения был создан прибор, называемый термометром.

Тепловое равновесие

Как измеряется температура тела человека? Для измерения температуры тела человека нужно подержать термометр под мышкой 5-8мин. *А почему именно столько?* За это время ртуть в термометре нагревается и объем ее увеличивается, а следовательно уровень ее повышается. По длине столбика ртути можно определить температуру. То же самое происходит при измерении температуры любого тела любым термометром. Термометр никогда не покажет температуру тела сразу же после того, как он соприкоснулся с ним. Необходимо некоторое время, для того, чтобы температура тела и термометра выровнялись и между телами установилось *тепловое равновесие*, при котором температура перестает изменяться. *Как же это происходит? Приведите примеры установления теплового равновесия вокруг нас.*

Тепловым равновесием называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры остаются сколь угодно 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.

Температура – это физическая величина, которая 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 тело с большей температурой будет отдавать энергию телу с меньшей температурой.

Чем обусловлено наличие температуры тела? Движением молекул внутри этого тела.

При тепловом равновесии средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул всех газов одинакова.

Не все в мире относительно. Так, существует абсолютный нуль температуры. Есть и абсолютная шкала температур. Сейчас вы узнаете об этом, а так же о том, какова точная связь между температурой и средней кинетической энергией молекул. Но предварительно надо преодолеть нелегкий психологический барьер. Вы привыкли переводить километры в метры, часы в секунды и т.д. А здесь энергия, выраженная в джоулях, переводится в градусы температуры.

Температура в джоулях обозначается буквой θ , для того чтобы перевести ее в температуру в градусах необходимо воспользоваться формулой:

$$\theta = kT$$

Где k -коэффициент пропорциональности. Определенная этим равенством температура называется абсолютной.

Поскольку $\theta = \frac{pV}{N}$ получим: $\frac{pV}{N} = kT$

Обратите внимание, что все величины, стоящие в правой части не могут быть меньше нуля, а следовательно температура никогда не бывает отрицательной. Наименьшее значение, которое может принимать температура $T=0$, если давление или объем $=0$.

Предельную температуру, при которой давление газа обращается в нуль при фиксированном объеме или объем идеального газа стремиться к нулю при неизменном давлении называют абсолютным нулем температуры.

Какой шкалой температур мы с вами привыкли пользоваться?

Английский ученый У.Кельвин (1824-1907) ввел абсолютную шкалу температур. Нулевая температура по абсолютной шкале (ее называют также шкалой Кельвина) соответствует абсолютному нулю, а каждая единица температуры по этой шкале равна градусу по шкале Цельсия.

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

Постоянная Больцмана

Определим коэффициент k в формуле (1) так чтобы $1K=1C$.

Из табличных данных известно, что

$$\theta(0^{\circ}C) = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж и}$$

$$\theta(100^{\circ}\text{C}) = 5,14 * 10^{-21} \text{ Дж}$$

Обозначим абсолютную температуру при 0°C через T_1 , а при 100°C через T_2 . Тогда, согласно (1):

$$\theta_{100} - \theta_0 = k(T_2 - T_1)$$

Или

$$\theta_{100} - \theta_0 = k(5,14 - 3,76) * 10^{-21} \text{ Дж}$$

Отсюда:

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

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

Постоянная Больцмана связывает температуру энергетических единиц с температурой в кельвинах.

Связь абсолютной шкалы и шкалы Цельсия

Зная постоянную Больцмана, можно найти значение абсолютного нуля по шкале Цельсия.

Для этого найдем сначала значение абсолютной температуры, соответствующее 0°C .

Т.к. при 0°C $kT_1 = 3,76 * 10^{-21} \text{ Дж}$, то $T_1 = 273 \text{ К}$

Тогда температуру в кельвинах, через температуру в Цельсиях можно найти по формуле:

$$T = t + 273 \quad \text{и} \quad t = (T - 273)^{\circ}\text{C}$$

Температура – мера средней кинетической энергии молекул

Из основного уравнения МКТ и определения температуры вытекает важнейшее следствие:

Абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии движения молекул.

Докажем это: $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \overline{E}$ и $\frac{pV}{N} = kT$ их левые части одинаковы, приравняем их правые части и получим

$$\overline{E} = \frac{2}{3} kT$$

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

Учтем, что $n = \frac{N}{V}$ и из основного уравнения МКТ получим:

$$p = nkT$$

В равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул
упр.2(1-3), упр.3(1-4)]

Д/З [1, §3,4

1. Магдебургские полушария растягивали 8 лошадей с каждой стороны. Как изменится сила тяги, если одно полушарие прикрепить к стене, а другое будут тянуть 16 лошадей?
2. Идеальный газ оказывает на стенки сосуда давление $1,01 \cdot 10^5$ Па. Тепловая скорость молекул 500 м/с. Найдите плотность газа. [1,21 кг/м³]
3. Под каким давлением находится кислород, если тепловая скорость его молекул 550 м/с, а их концентрация 1025 м⁻³? [9,7 кПа]
4. Азот занимает объем 1 л при нормальном атмосферном давлении. Определите энергию поступательного движения молекул газа [15,15 Дж]
5. Воздух состоит из смеси азота, кислорода и аргона. Их концентрация соответственно равна $7,8 \cdot 10^{24}$ м⁻³, $2,1 \cdot 10^{24}$ м⁻³, 10^{23} м⁻³. Средняя кинетическая энергия молекул смеси одинакова и равна $3 \cdot 10^{-21}$ Дж. Найдите давление воздуха. [20 кПа]