

ЛЕКЦИЯ 3

1. Температура и её свойства
2. Измерение температуры и её физический смысл
3. Абсолютная шкала температур и абсолютный нуль
4. Физический смысл температуры
5. Скорость теплового движения молекул
6. Распределение молекул по скоростям
7. Опыт Штерна. Средняя скорость броуновской частицы.

1. Температура и ее свойства

Основное уравнение МКТ для идеального газа устанавливает связь легко измеряемого макроскопического параметра - давления- с микроскопическими - средней кинетической энергией и концентрацией.

Но измерив только давление газа, мы не можем указать ни среднее значение кинетической энергии молекул, ни их концентрации.

Следовательно, для нахождения микроскопических параметров газа нужны измерения величины связанной со средней кинетической энергией молекул. Такой величиной является - температура.

Из повседневного опыта мы знаем, что бывают тела горячие и холодные. При контакте двух этих тел, происходят изменения физических параметров. Через некоторое время после установления контакта между телами изменения макроскопических параметров прекращается.

Такое состояние называется тепловым равновесием или термодинамическим равновесием.

Величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия называется температурой.

2. Измерение температуры и её физический смысл

Чтобы измерить температуру какого-либо тела необходимо:

- привести тело в тепловой контакт с термометром,
- термометр должен иметь массу значительно меньше массы тела,
- показания термометра следует отсчитывать после наступления теплового равновесия.

Жидкостные термометры.

В повседневной практике наиболее распространен способ измерения температур с помощью жидкостного термометра.

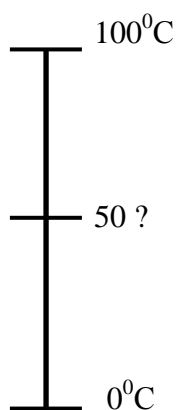
В устройстве жидкостного термометра используется свойство расширения жидкости при нагревании.

В качестве рабочего тела применяют ртуть, спирт, глицерин;

-ртуть:температура от -38 до 260 град.С,

-спирт:температура от -114 до 78 град.С,

-глицерин:температура от-50 до 2300 град.С



При градуировке термометра обычно за начало отсчета принимают температуру тающего льда (0 град.С). Второй постоянной точкой (100 град.С) считают температуру кипения воды.

Шкалу между точками 0 и 100 делят на 100 равных частей, называемых градусами.

Жидкости при нагревании расширяются не одинаково, поэтому установленная шкала зависит от свойств жидкости.

0 и 100 градусов будут конечно совпадать у всех термометров, но 50 градусов совпадать не будут.

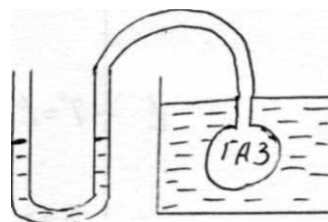
Газовые термометры.

Было замечено, что все разреженные газы - водород, гелий, кислород - расширяются при нагревании одинаково.

В газовых термометрах используется зависимость давления газа от температуры. Точными опытами установлено, что давление газа, заключенного в замкнутый сосуд пропорционально температуре.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Газовый термометр-это небольшой баллон, заполненный газом. Баллон соединяется с манометром. Баллон приводят в контакт со средой, температуру которой надо измерить. Через некоторое время происходит выравнивание температур.



Обозначим давление P_1 , а температуру T_1 . Если среду подогреть, то ее температура повысится до T_2 , а давление газа увеличится до P_2 , т.е. измерение температуры сводится к измерению давления газа в баллоне.

3. Абсолютная шкала температур и абсолютный нуль температур

У термометра есть шкала, а у температуры единица измерения. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

Градуировка термометра, описанная ранее введена Цельсием. Такая шкала носит название шкалы Цельсия. Градус по шкале Цельсия обозначают С. В Международной системе единиц принята термодинамическая шкала температур или абсолютная шкала температур.

За нулевую температуру на абсолютной шкале температур приняли температуру, при которой должно прекращаться поступательное движение молекул и следовательно кинетическая энергия поступательного движения молекул должна стать равной нулю.

Эта температура получила название **абсолютного нуля**.

Абсолютный нуль-это самая низкая температура, поэтому на абсолютной шкале температур нет отрицательных температур.

Достичь абсолютного нуля невозможно. К нему - лишь можно приблизиться. В настоящее время получены температуры всего на несколько миллионных долей градуса выше абсолютного нуля.

Температуру, отсчитываемую по термодинамической шкале, иногда называют **абсолютной температурой**.

За единицу температуры на абсолютной шкале температур принят Кельвин (1К) в честь английского физика У.Томсона, которому за большие заслуги было присвоено звание лорда Кельвина.

За вторую опорную точку принята температура, при которой вода находится одновременно в трех состояниях (в твердом, жидком, газообразном). Это состояние получило название тройной точки. Его температура по шкале Цельсия равна 0.01С.

Найдем температуру таяния льда по абсолютной шкале температур. Обозначим $T_{пл}$.- температура плавления льда, $T_{к}$. - температура кипения воды.

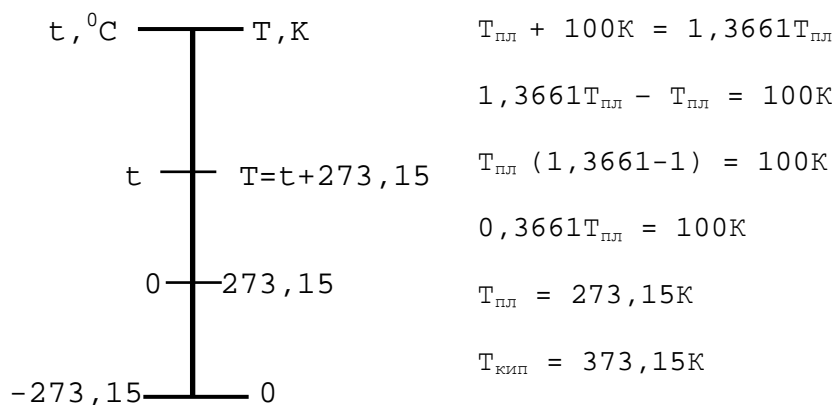
Так как давление газа пропорционально температуре, то

$$\frac{T_{к.}}{T_{пл.}} = \frac{P_{к.}}{P_{пл.}}$$

$P_{к.}$ и $P_{пл.}$ – соответствующие давления газа в газовом термометре.

Известно, что $T_{к} = T_{пл} + 100 \text{ К}$

или $\frac{T_{пл}+100\text{К}}{T_{пл}} = \frac{P_{к.}}{P_{пл.}} = 1,3661$ (отношение $\frac{P_{к.}}{P_{пл.}}$ было найдено экспериментально)



4.Физический смысл температуры

Известно, что при откачивании газа из сосуда давление будет уменьшаться, а так как температура газа и объем остались неизменными, то следует, что

$$p \sim n$$

кроме того, известно

$$P \sim T \text{ или } P \sim nT$$

Чтобы записать эту зависимость в виде равенства, необходимо ввести коэффициент пропорциональности

$$P = nkT$$

С другой стороны известно, что

$$P = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \bar{V}^2}{2}$$

приравняем правые части двух равенств

$$knT = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \bar{V}^2}{2}$$

отсюда получаем

$$T = \frac{1}{k} \frac{2}{3} \frac{m_0 \bar{V}^2}{2}$$

$$T = \frac{2}{3} \frac{1}{k} \bar{E}$$

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

Температура прямо пропорциональна средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

Температурой называют скалярную величину, характеризующую интенсивность теплового движения молекул изолированной системы в условиях термодинамического равновесия, пропорциональную средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

Постоянная Больцмана.

Постоянный коэффициент k называют постоянной Больцмана (в честь австрийского физика Людвика Больцмана).

Рассмотрим физический смысл этой постоянной

$$k = \frac{2/3 \frac{m_0 \bar{V}^2}{2}}{T}$$

Здесь числитель – величина, выраженная в джоулях и названная энергетической температурой, а знаменатель – соответствующая ей температура в кельвинах.

Следовательно, постоянная Больцмана равна отношению температуры, выраженной в единицах энергии (джоулях), к той же температуре, выраженной в кельвинах, эта величина может быть найдена только экспериментально.

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

5.Скорость теплового движения молекул

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT, \text{ но } \bar{E} = \frac{m_0 \bar{V}^2}{2}, \text{ тогда } \frac{m_0 \bar{V}^2}{2} = \frac{3}{2} kT;$$

$$\bar{V}^2 = \frac{3kT}{m_0} - \text{«три кота на мясо» - Шутка!}$$

$$\sqrt{\bar{V}^2} \approx \bar{V} \approx \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} - \text{средняя квадратичная скорость.}$$

Средняя квадратичная скорость теплового движения молекул не равна их средней

скорости, т.е. $\bar{V} \neq \sqrt{\bar{V}^2}$

Вычисляя по формуле скорость молекул, например азота и водорода, при $t=0^\circ\text{C}$, получим соответственно $\bar{V}_{\text{азота}} \approx 1800 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $\bar{V}_{\text{водорода}} \approx 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Физики XIX века были ошемлены!

Скорости молекул газа по расчетам оказались больше, чем скорости артиллерийских снарядов!

Высказывались сомнения в справедливости кинетической энергии. Ведь известно, что диффузия в газах протекает очень медленно.

Это нетрудно объяснить. Из-за столкновений молекул траектория каждой молекулы представляет собой запутанную линию. Большие скорости молекула имеет на прямолинейных участках.

6. Распределение молекул по скоростям

Развитию МКТ газов способствовала работа английского физика Дж. Максвелла "Пояснения к динамической теории газов". (1860г.)

В этой работе Максвелл пришел к фундаментальному выводу: молекулы газа движутся с различными скоростями (ранее считалось, что скорости молекул одинаковые).

При столкновении молекул направления и модули их скоростей изменяются, но распределение молекул по скоростям остается неизменным.

Исходя из основных положений МКТ, Дж. Максвелл вывел закон распределения молекул газа по скоростям.

Проанализируем график, иллюстрирующий максвелловское распределение по скоростям.

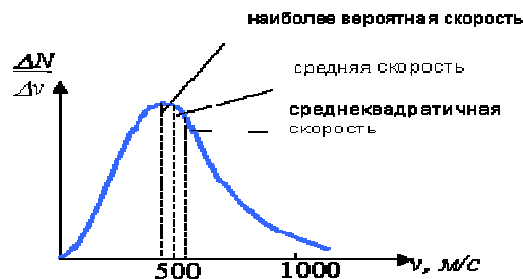


Рис.1. Распределение молекул O_2 по скоростям при 300K

На оси абсцисс отложен модуль скорости, на оси ординат - относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале значений от V до $V + \Delta V$.

1. Из рисунка 1 видно, что значительное число молекул движется со скоростью близкой к значению V_B (несмотря на хаотическое движение), которая называется наиболее вероятной скоростью.

Данная скорость является своеобразным рубежом: молекулы, движущиеся со скоростями как большими, так и меньшими, встречаются реже молекул, движущихся с наиболее вероятной скоростью. Значение этой скорости равно,

$$V_B = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

Сопоставим формулы наиболее вероятной скорости со средней квадратичной скоростью и со средней скоростью.

$$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

$$\bar{v}_{KB} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

$$\bar{v}_{cp} = \sqrt{\frac{2,55kT}{m_0}}$$

Средняя скорость больше вероятной. Причина ясна из вида кривой распределения : так как кривая распределения уходит далеко вправо, то туда же сдвинуты и средние значения скорости.

2. Хотя молекулы могут двигаться с любыми скоростями, фактическое число молекул, скорость которых значительно отличается от наиболее вероятной, весьма мало.

Нулю равно число молекул, скорость которых равна нулю - это значит, что в веществе нет покоящихся молекул.

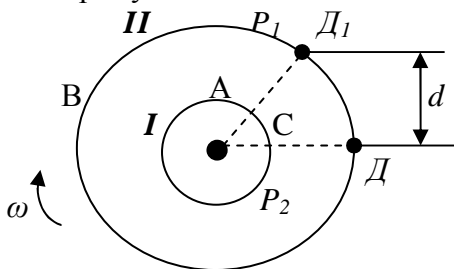
3. Конкретный вид вид кривой зависит от рода газа (от массы молекулы m_0) и температуры.



4. С повышением температуры (рис.2) максимум распределения сдвигается в сторону больших скоростей, а кривая становится более полой ($T_2 > T_1$).

7. Опыт Штерна

Метод определения скоростей молекул был предложен в 1920г. Штерном. Измерение скоростей молекул было проведено на установке, схема которой показана на рисунке.



Установка состоит из двух концентрических цилиндров **A** и **B**, имеющих различные диаметры и общую ось. Воздух из цилиндров откачан.

В цилиндре **A** имеется узкая щель **C**. По оси цилиндра протянута платиновая проволока, покрытая слоем серебра, по которой пропускают электрический ток. При нагревании проволоочки током серебро испаряется, атомы его вылетают через щель **C** и попадают на внутреннюю поверхность цилиндра **B**. Если оба цилиндра неподвижны, то все атомы серебра независимо от их скорости, попадают в одно и то же место **D**. При одновременном вращении обих цилиндров с угловой скоростью ω атомы серебра попадают в другую точку **D1**. Зная расстояние d , угловую скорость ω , радиусы R и r цилиндров, можно вычислить скорость молекулы.

$d = Ut$; U – скорость внешнего цилиндра ($U = \omega R$)

$$d = \omega R t; \quad t = \frac{d}{\omega R}; \quad V = (R - r)t;$$

$$V = \frac{\omega R(R - r)}{d}$$

Средняя скорость серебра оказалась равной 650 м/с.

Но слой серебра на внешнем цилиндре получился размытым. Это означало, что скорости движения атомов различны.

P.S. В подобных опытах определяется функция распределения молекул по скоростям не в самом сосуде, а в молекулярном пучке, вылетающем из сосуда. Поэтому, наиболее вероятной скоростью молекул в пучке будет средняя скорость потока. Скорость истечения газа из отверстия в сосуде, в котором имеется давление P_1 , в окружающую среду с давлением P_2 , будет равна

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

(Эта формула служит для вычисления струи газа, выходящего из сосуда с высоким давлением P_1 в сосуд с низким давлением P_2)

В цилиндре I пары серебра можно считать идеальным газом и поэтому

$$P_1 = nkT$$

в цилиндре II поддерживается вакуум и можно полагать $P_2=0$, тогда ($\rho=nm_0$)

$$V = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

т.е. средняя скорость молекул в потоке газа, выходящего из сосуда в вакуум, в точности равна средней наивероятной скорости молекул.

Средняя скорость броуновской частицы.

Броуновская частица массой m участвует в тепловом движении молекул, поэтому её средняя скорость приближенно может быть определена так:

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Средняя скорость броуновской частицы зависит от T и m :

-чем больше T , тем больше скорость броуновской частицы;

-с увеличением m скорость убывает.