

Задание:

- Изучить теорию;
- Написать краткий конспект;
- Ответить устно на вопросы.
- По вопросам обращаться 072-1098278 или hvastov@rambler.ru
- Фотоотчёт конспекта прислать в течении 3 дней со дня получения задания на hvastov@rambler.ru

История атомистических учений. Наблюдения и опыты, подтверждающие атомно-молекулярное строение вещества. Масса и размеры молекул. Тепловое движение. Абсолютная температура как мера средней кинетической энергии частиц.

Цель: показать историю развития атомистических учений. На опытах подтвердить основные положения МКТ, а также малость размеров молекул. Показать разновидность масс молекул.

План

1. Основные положения молекулярно-кинетической теории.
2. Размеры и масса молекул.
3. Опыт Штерна.
4. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
5. Зависимость давления от температуры.
6. Термодинамическая шкала температур.

1. Основные положения молекулярно-кинетической теории. Идеи о строении материи из мельчайших частиц, сохраняющих ее свойства, имеют древнегреческое происхождение. Живший в V в. до н.э. мыслитель Демокрит утверждал: «Ничего не существует, кроме атомов и пустого пространства; все прочее - мнение» и «различие всех предметов состоит в различии их атомов в числе, величине, форме и порядке...». Слово “атом” в переводе означает “неделимый”.

В основе молекулярно-кинетической теории лежат три постулата (положения), принимаемые как результат наблюдений и опытов:

1. *Все виды вещества состоят из молекул, между которыми имеются промежутки;*
2. *Молекулы в любом веществе непрерывно и хаотически движутся;*
3. *На небольших расстояниях между молекулами действуют как силы притяжения, так и силы отталкивания, имеющие электромагнитную природу.*

Эти утверждения подтверждаются такими явлениями как, например:

- сжимаемость тел;
- диффузия;
- Броуновское движение;
- теплопроводность;
- сопротивление сжатию и растяжению.

2. Размеры и масса молекул. Если на спокойную поверхность воды поместить каплю нерастворимой в воде жидкости, то образуется пленка, толщина которой равна диаметру одной молекулы. Размеры молекул удобно выражать в ангстремах:

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м.}$$

Например, молекула кислорода O_2 имеет диаметр $1,2 \text{ \AA}$, а молекула воды H_2O - $2,6 \text{ \AA}$.

Поскольку масса молекул тоже мала (например, у кислорода O_2 она равна $5,35 \cdot 10^{-26}$ кг, а у водорода H_2 - $3,34 \cdot 10^{-27}$ кг), то ее удобно выражать в относительных единицах.

Атомной единицей массы называется 1/12 массы изотопа углерода C^{12} .

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Относительные массы атомов указаны в таблице Менделеева. Полезно запомнить округленные относительные массы некоторых элементов:

<i>Наименование</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Относительная масса, а.е.м.</i>
<i>Водород</i>	<i>H</i>	<i>1</i>
<i>Гелий</i>	<i>He</i>	<i>4</i>
<i>Углерод</i>	<i>C</i>	<i>12</i>
<i>Азот</i>	<i>N</i>	<i>14</i>
<i>Кислород</i>	<i>O</i>	<i>16</i>
<i>Алюминий</i>	<i>Al</i>	<i>27</i>

Относительную молекулярную массу вещества принято обозначать M_r . Для ее вычисления требуется установить, сколько атомов тех или иных элементов содержит молекула.

Пример 1. Молекула серной кислоты H_2SO_4 содержит два атома водорода, один атом серы (32 а.е.м.) и четыре атома кислорода, поэтому:

$$M_r = (1 \cdot 2 + 32 + 16 \cdot 4) \text{ а.е.м.} = 98 \text{ а.е.м.}$$

Иногда бывает важно учитывать число молекул, содержащихся в данном теле, т.е. количество вещества:

$$[v] = \text{моль.}$$

Модем называется количество вещества, масса которого в граммах равна его относительной молекулярной массе.

Масса одного моля данного вещества называется молярной:

$$[\mu] = \text{г/моль.}$$

Молярная масса вычисляется аналогично относительной молекулярной массе, но имеет другую размерность.

Пример 2. Молекула углекислого газа CO_2 содержит один атом углерода и два атома кислорода, поэтому:

$$\mu = (12 + 16 \cdot 2) \text{ г/моль} = 44 \text{ г/моль.}$$

Пример 3. Воздух является смесью газов, процентное содержание которых необходимо учитывать при вычислении его молярной массы:

Наименование	Обозначение	Процентное содержание	Молярная масса, г/моль
Азот	N_2	78 %	28
Кислород	O_2	21 %	32

Поскольку другие компоненты (аргон, углекислый газ, гелий, водород, водяной пар и др.) составляют всего 1%, то их содержанием можно пренебречь. Тогда получаем:

$$\mu_{\text{возд}} = (28 \cdot 0,78 + 32 \cdot 0,21) \text{ г/моль} \approx 29 \text{ г/моль}.$$

Полученное значение следует запомнить и использовать при решении задач.

Если известна масса вещества, то количество вещества может быть найдено по формуле:

$$\nu = \frac{m}{\mu}$$

Число молекул, содержащихся в одном моле любого вещества, есть величина постоянная и равно числу Авогадро:

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Количество молекул, содержащихся в веществе, может быть найдено по формуле:

$$N = \nu N_A$$

При нормальных условиях один моль любого газа занимает объем:

$$V_\mu = 22,4 \text{ л/моль}.$$

В дальнейшем под нормальными условиями будем понимать такое состояние газа, при котором:

$$p = 1 \text{ атм},$$

$$t = 0^\circ\text{C}.$$

3. Опыт Штерна. В 1920 г. немецким физиком О. Штерном была проведена экспериментальная проверка закона распределения молекул по скоростям. Созданная им установка (рис. 1.1) состояла из двух полых цилиндров *A* и *B*, расположенных соосно. По оси *O* цилиндров располагалась посеребренная платиновая проволока. При пропускании электрического тока проволока нагревалась, и атомы серебра отрывались от ее поверхности. Большинство из них оседали на внутренней стенке цилиндра *A*, а часть атомов, пролетев через узкую щель, образовала на внутренней стенке цилиндра *B* узкую полоску серебра.

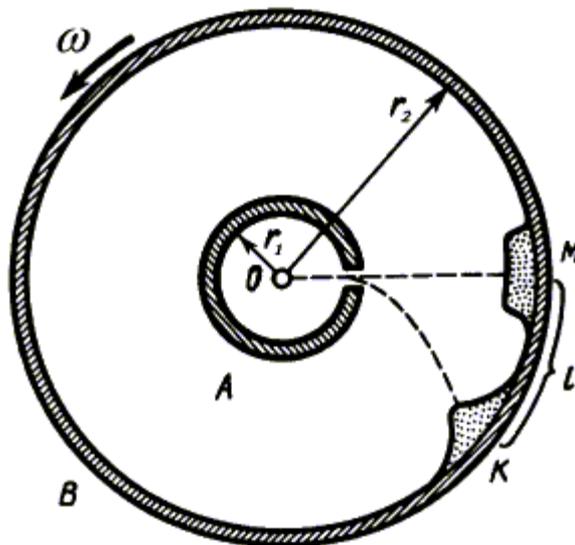


Рис. 1.1.

При неподвижных цилиндрах атомы серебра откладывались напротив щели в точке M , а толщина слоя полоски была равномерной. При вращении цилиндров с угловой скоростью ω место отложения атомов серебра смещалось в точку K . Объясняется это тем, что пока атом серебра пролетает расстояние между цилиндрами, цилиндр B успевает повернуться на некоторый угол.

Пусть v - скорость атомов серебра, тогда время их движения между цилиндрами:

$$t = \frac{r_2 - r_1}{v}.$$

С другой стороны, за это же самое время происходит поворот цилиндра B на дугу l , и это время равно:

$$t = \frac{l}{\omega r_2}.$$

Приравниваем правые части этих выражений и из полученного уравнения находим формулу для вычисления скорости атомов серебра:

$$v = \frac{\omega r_2 (r_2 - r_1)}{l}.$$

Опыт Штерна показал, что атомы серебра движутся с разными скоростями. Об этом свидетельствует неравномерная толщина слоя серебра в точке K . Быстрые молекулы откладывались ближе к точке M , медленные - дальше. Наибольшую толщину слоя образовали атомы, движущиеся с наивероятнейшей скоростью v_n , которая составила около 500 м/с. Форма слоя в разрезе соответствует закону распределения молекул по скоростям, найденному Дж. Максвеллом. Вид этого распределения изображен на рис. 1.2.

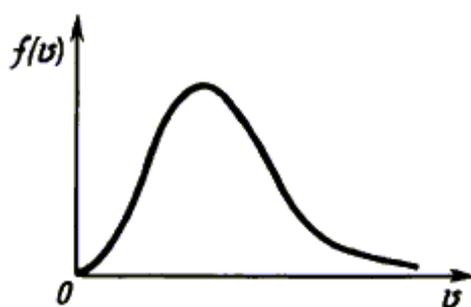


Рис. 1.2.

4. Силы и энергия межмолекулярного взаимодействия. Между молекулами на малых расстояниях одновременно действуют как силы притяжения, так и отталкивания. При приближении двух молекул начинают преобладать силы отталкивания, при удалении - силы притяжения.

На рис. 1.3 изображен график зависимости равнодействующей F сил взаимодействия двух молекул от расстояния между ними. Для сил отталкивания выбрано положительное направление, для сил притяжения - отрицательное.

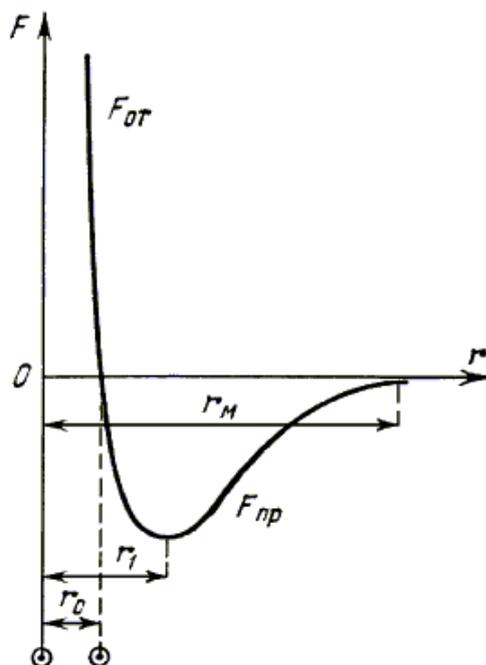


Рис. 1.3.

Расстояние r_0 на графике соответствует положению устойчивого равновесия молекул, т.к. равнодействующая сил в этом случае равна нулю. На расстоянии r_1 силы притяжения принимают максимальное по абсолютной величине значение. Если удалось удалить молекулы на такое расстояние, то при дальнейшем увеличении расстояния силы притяжения начинают убывать. Следовательно, расстояние r_1 можно считать точкой разрыва.

Расстояние, на котором силы взаимодействия молекул так малы, что ими можно пренебречь, называется радиусом молекулярного действия r_M .

Силы взаимодействия имеют электромагнитную природу и характеризуются потенциальной энергией. График ее зависимости от расстояния между молекулами изображен на рис. 1.4. Заметим, что положению устойчивого равновесия r_0 молекул соответствует минимум потенциальной энергии.

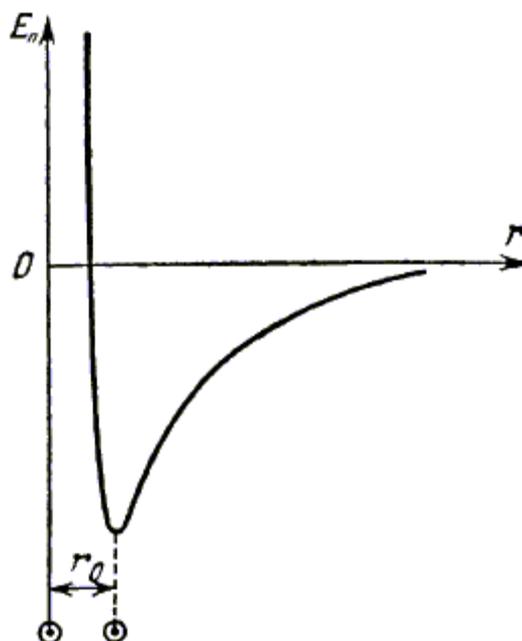


Рис. 1.4.

Под идеальным понимается такой газ, силами притяжения между молекулами которого можно пренебречь, а объем, занимаемый молекулой, равен нулю.

Одним из параметров, определяющих состояние газа, является давление:

$$[p] = \text{Па.}$$

Давление газа обусловлено ударами молекул о стенки сосуда.

Прибор для измерения давления называется манометром. Большие давления измеряются металлическим манометром, а маленькие - закрытым жидкостным. Для измерения атмосферного давления служит барометр.

Внесистемные единицы давления.

Наименование	Обозначение	Значение, Па
Миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133,3
Атмосфера физическая	атм	$1,013 \cdot 10^5$
Атмосфера техническая	ат	$9,81 \cdot 10^4$
Бар	бар	10^5

Миллиметр ртутного столба - давление, производимое столбом ртути высотой 1 мм на горизонтальную поверхность.

Давление столба жидкости вычисляется по формуле:

$$p = \rho g h.$$

Подставляя в нее плотность ртути 13600 кг/м^3 и высоту столба $0,001 \text{ м}$, получаем:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па.}$$

Атмосфера физическая введена по среднегодовому атмосферному давлению на уровне моря, которое составляет 760 мм рт. ст.

Поскольку давление равно отношению силы к площади поверхности, на которую она действует, атмосфера техническая была введена следующим способом:

$$atm = \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2},$$

где кгс (килограмм-сила) - сила равная весу тела массой один килограмм.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Давление газа может быть выражено через величины, характеризующие молекулы.

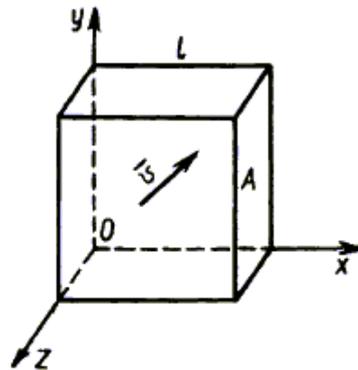


Рис. 2.1.

Пусть в сосуде, имеющем форму куба с ребром l (рис. 2.1), находится газ. В силу закона сохранения импульса при абсолютно упругом ударе молекулы стенки A сосуда

	получает	импульс:
Δp	=	$2m v_x.$
Средняя сила	воздействия молекулы	на стенку
равна:		$F_1 = \frac{\Delta p}{\Delta t},$

где Δt - время, приходящееся на один удар.

Предположим, что в сосуде находится всего одна молекула. Отразившись от стенки A , она ударится о противоположную стенку и вернется обратно. Тогда Δt будет равно времени между двумя последовательными ударами:

$$\Delta t = \frac{2l}{v_x}.$$

Следовательно:

$$F_1 = \frac{m v_x^2}{l}.$$

На самом деле в сосуде находится огромное число молекул, но они, сталкиваясь, обмениваются импульсами. Поскольку массы молекул одинаковы, получается такой же результат, как если бы они прошли сквозь друг друга без столкновения, поэтому приведенные выше рассуждения правомочны.

Если в сосуде находится N молекул, имеющих одинаковые массы, но различные скорости, то сила, с которой они все вместе воздействуют на стенку A сосуда, будет равна:

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_N.$$

Подставляем вместо сил, действующих на стенку со стороны отдельных молекул, выражение, полученное выше:

$$F = \frac{m v_{x1}^2}{l} + \frac{m v_{x2}^2}{l} + \dots + \frac{m v_{xN}^2}{l}$$

и выносим одинаковые множители за скобки:

$$F = \frac{m}{l} (v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xN}^2).$$

Величину

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}},$$

называют среднеквадратической скоростью молекул. По аналогии можно записать:

$$\bar{v}_x^2 = \frac{v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xN}^2}{N}.$$

Отсюда

получим:

$$v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xN}^2 = N \bar{v}_x^2.$$

Таким образом, со стороны всех молекул газа на стенку действует сила:

$$F = \frac{N}{l} m \bar{v}_x^2.$$

Если разложить среднеквадратическую скорость молекул по осям координат на составляющие, то по обобщенной теореме Пифагора получим:

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2.$$

Поскольку все направления движения молекул равновероятны, имеем:

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2,$$

следовательно:

$$\bar{v}_x^2 = \frac{\bar{v}^2}{3}.$$

Учитывая

это

соотношение,

получим:

$$F = \frac{1}{3} \frac{N}{l} m \bar{v}^2.$$

Разделив силу на площадь l^2 стенки А, находим давление на нее:

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{l^3} m \bar{v}^2,$$

а учитывая, что l^3 - объем сосуда, имеем:

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m \bar{v}^2.$$

Концентрацией называется количество молекул в единице объема.
 $[n] = \text{м}^{-3}$

В соответствии с определением концентрация может быть вычислена по формуле:

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

тогда

получаем:

$$p = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2.$$

Полученное соотношение называется *основным уравнением молекулярно-кинетической теории газа*. Обычно его записывают иначе. Если учесть, что средняя кинетическая энергия молекул равна:

$$\bar{E} = \frac{m \bar{v}^2}{2},$$

то:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}$$

Значение данного уравнения состоит в том, что в нем давление - макроскопический параметр, характеризующий состояние газа как совокупности огромного числа молекул, выражается через микроскопический параметр (относящийся к отдельным молекулам) - среднюю кинетическую энергию.

Зависимость давления от температуры. С ростом температуры увеличивается скорость движения молекул, они с большей силой ударяются о стенки сосуда, и, следовательно, газ должен оказывать большее давление.

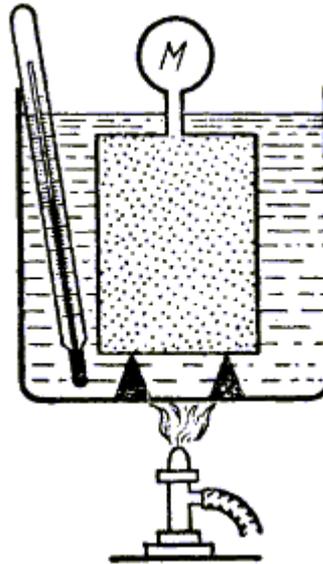


Рис. 2.2.

В 1787 году французский физик Ж. Шарль установил характер зависимости давления от температуры. Схема опыта Шарля приведена на рис. 2.2, а график зависимости на рис. 2.3.

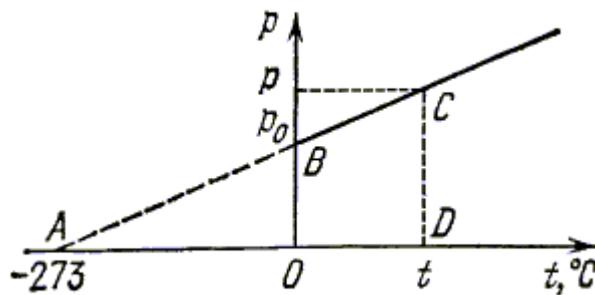


Рис. 2.3.

Поскольку зависимость линейная, можно выразить ее в виде формулы. Для этого продолжим график влево до пересечения с осью температур. Опыт, проведенный для различных газов и при различных массах газа, показывает, что в пределах ошибок измерений точка A получается в одном и том же месте.

Стороны подобных по двум углам треугольников ABO и ACD пропорциональны, поэтому:

$$\frac{CD}{BO} = \frac{AD}{AO}.$$

Устанавливая по оси давлений и температур длины данных отрезков, получаем:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{273^\circ \text{C} + t}{273^\circ \text{C}}.$$

Выполним в правой части почленное деление и перенесем p_0 из левой части в правую:

$$p = p_0 \left(1 + \frac{t}{273^\circ \text{C}} \right).$$

Величину

$$\gamma = \frac{l}{273^\circ \text{C}}$$

называют температурным коэффициентом давления. С учетом этого обозначения окончательно получаем:

$$p = p_0(1 + \gamma t)$$

Термодинамическая шкала температур. В точке А на графике (рис. 2.3) давление равно нулю. Это означает, что молекулы не ударяются о стенки сосуда и, следовательно, не движутся. Поскольку температура является мерой движения молекул (их средней кинетической энергии), то значение -273°C является минимально возможным для температуры.

Температура, при которой должно прекратиться поступательное движение молекул, называется абсолютным нулем.

Точное значение абсолютного нуля составляет $-273,15^\circ \text{C}$, но для упрощения можно пользоваться приближенным значением -273°C .

Целесообразный выбор шкалы температур позволяет упростить формулы и глубже понять физический смысл наблюдаемых закономерностей. В 1848 г. английский физик У. Кельвин предложил *термодинамическую шкалу (шкалу Кельвина)*, по которой температура откладывается от абсолютного нуля и называется *абсолютной температурой*, а размер единицы температуры совпадает по величине с градусом Цельсия и называется *Кельвином*:

$$[T] = K.$$

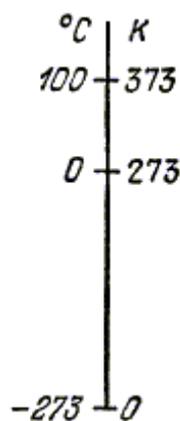


Рис. 2.4.

Соотношение между температурой по шкале Цельсия и шкале Кельвина приведено на рис. 2.4, а переход от одной шкалы к другой осуществляется по формулам:

$$T = 273 + t,$$

$$t = T - 273.$$

Средняя кинетическая энергия молекул прямо пропорциональна термодинамической температуре. По предложению немецкого физика Л. Больцмана соотношение между этими величинами для идеального газа записывают в виде:

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

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, смысл которой будет выяснен ниже.

В общем случае приведенную выше формулу следует записывать иначе.

Минимальное количество координат, с помощью которых можно задать положение тела в пространстве, называется числом степеней свободы.

Вращательное движение у молекулы идеального газа, состоящей из одного атома, в силу бесконечной малости ее диаметра отсутствует, поэтому она может совершать только поступательное движение и, следовательно, имеет три степени свободы (координаты x , y и z).

Молекула, состоящая из двух атомов, кроме поступательного движения совершает и вращательное относительно двух взаимно перпендикулярных осей (рис. 2.5), поэтому имеет пять степеней свободы.



Рис. 2.5.

Наконец, молекула, состоящая из трех и более атомов, может вращаться вокруг трех пространственных осей (рис. 2.6) и поэтому имеет шесть степеней свободы.

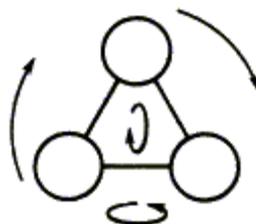


Рис. 2.6.

Таким образом, имеем формулу Больцмана:

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

где i – число степеней свободы, принимающее значения:

$i = 3$ для одноатомного газа,

$i = 5$ для двухатомного газа,
 $i = 6$ для многоатомного газа.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества.
2. Опишите явление диффузии.
3. Дайте определение количества вещества в СИ.
4. Чем обусловлено давление газа?
5. Какой газ называется идеальным?