

Тема 8. Основы МКТ строения вещества

1. Основные положения МКТ

МКТ - это теория, которая объясняет тепловые явления в макроскопических телах на основе представлений о том, что все тела состоят из непрерывно движущихся и взаимодействующих между собой микроскопических частиц.

Макроскопические тела - это тела обычных размеров (мы их видим без увеличительных приборов), состоящие из громадного количества микроскопических частиц.

Микроскопические частицы - это те мельчайшие "кирпичики" вещества, которые сохраняют его химические свойства и способны существовать самостоятельно (молекулы или атомы - в зависимости от строения вещества).

Тепловые явления - это любые явления, связанные с изменением температуры физических тел.

Хаотическое движение - это беспорядочное тепловое (поскольку его интенсивность зависит от температуры) движение микроскопических частиц вещества (атомов или молекул - в зависимости от строения вещества).

К началу XX века была полностью создана, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена **молекулярно-кинетическая теория (МКТ)** строения вещества, в основе которой лежат *три* положения:

I-ое - все тела состоят из мельчайших частиц (атомов или молекул - в зависимости от строения вещества), разделенных промежутками;

II-ое - эти частицы находятся в непрерывном хаотическом движении, которое иначе называют тепловым, поскольку интенсивность этого движения зависит от температуры вещества;

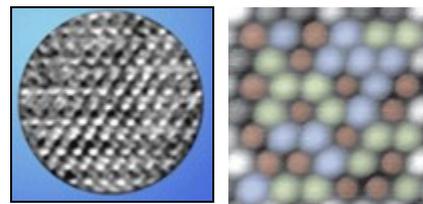
III-е - частицы вещества взаимодействуют между собой посредством сил притяжения и отталкивания; природа этих сил - электромагнитная.

В настоящее время существует достаточно много доказательств положений МКТ, основанных как на простых наблюдениях, так и на достаточно сложных опытах и экспериментах. Приведем некоторые из них.

Существование атомов и молекул доказано с помощью электронных микроскопов, которые увеличивают изображения объектов в миллионы раз.



Существует громадное количество реальных фотографий атомов и молекул.



Хаотическое движение и зависимость его интенсивности от температуры доказаны давно также непосредственными наблюдениями. Два физических явления - броуновское движение и диффузия являются прямыми доказательствами этого движения. Эти явления также доказывают существование

промежутков между частицами.

Взаимодействие молекул и атомов можно доказать простым опытом - "прилипание" двух свинцовых цилиндров, а также технологией "холодной" сварки, применяемой в вакууме.

2. Взаимодействие частиц вещества

Молекулы состоят из атомов, а атомы - из ядер ($+^1$ электрический заряд) и электронов (движутся вокруг ядра $-^2$ электрический заряд). Атомы в целом могут быть электрически нейтральными, а могут иметь электрический заряд. Следовательно, в основе взаимодействия между частицами вещества лежат силы электромагнитной природы.

Рассмотрим график зависимости $F(r)$ - силы взаимодействия F от расстояния r для двух микрочастиц твердого тела.

Положение (1): на тело не действуют внешние силы \rightarrow^3 частицы находятся в состоянии равновесия и E_p - расстояние равновесия \rightarrow их E_p^4 - минимальна.

Положение (2): на тело действует внешняя сила, которая сжимает его \rightarrow происходит микроскопическое уменьшение расстояния между частицами \rightarrow начинают действовать силы отталкивания $\rightarrow E_p$ возрастает - чем меньше расстояние между частицами, тем больше силы отталкивания и тем больше E_p . Однако, частицы нельзя (таким простым способом) сблизить на нулевое расстояние.

Положение (3): на тело действует внешняя сила, которая растягивает его \rightarrow происходит микроскопическое увеличение расстояния между частицами \rightarrow начинают действовать силы притяжения $\rightarrow E_p$ возрастает - чем больше расстояние между частицами, тем больше силы притяжения и тем больше E_p ,

¹Здесь и далее знак «+» обозначает «положительный»

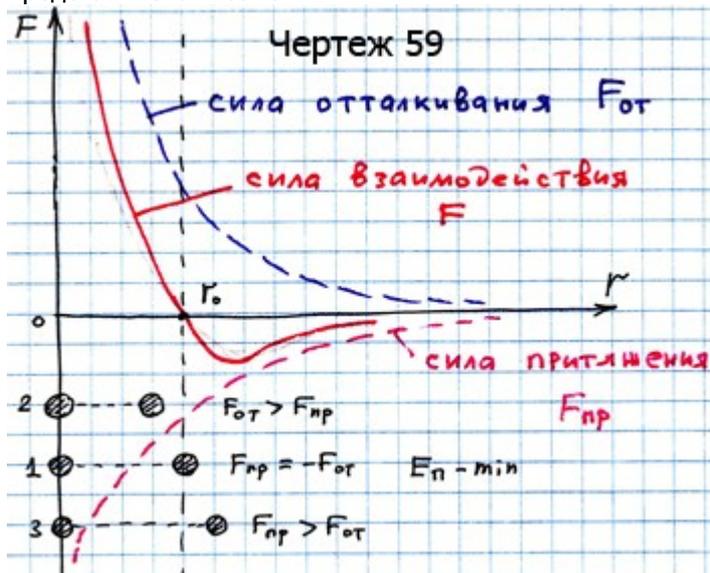
²Здесь и далее знак «-» обозначает «отрицательный»

³ Знак \rightarrow обозначает «следовательно»

⁴ E_p - потенциальная энергия зависит от сил взаимодействия частиц вещества

но если растянуть тело на $r \gg r_0$ (точка **A**), то никакая сила уже не вернет частицы в положение равновесия - тело деформируется так, что не сможет самопроизвольно принять прежнюю форму. Это легко проверить на небольшой пружинке: после небольшого растяжения она восстанавливает форму, но если ее растянуть сильно - она так и останется растянутой.

Как видно, график результирующей⁶ силы **F** имеет сложную форму и описать его математически не представляется возможным.



Каждая микрочастица, как и любое физическое тело, подчиняется закону инерции. Поэтому, пройдя положение равновесия, она тормозится, затем ускоряется в обратном направлении, снова проходит положение равновесия, тормозится, ускоряется в обратном направлении и т.д. - совершает колебательное движение около положения равновесия. Направление колебаний меняется хаотически → частицы твердого тела участвуют в хаотическом колебательном движении.

3. Энергия частиц и энергия макроскопического тела

Частицы вещества движутся → они обладают E_k ⁷, и взаимодействуют → они обладают E_p . Однако, частиц в макроскопическом теле громадное количество, а их движение и взаимодействие хаотично → каждая частица имеет (в данный момент времени!) свою E_k и E_p . Как быть с энергией отдельной частицы, если все они разные и постоянно непредсказуемо меняются?

Ответ прост: надо говорить о **средней E_k** и **средней E_p** для каждой частицы.

Каков смысл средней величины вообще? Допустим, вы измерили рост каждого студента вашей группы. Для нахождения среднего роста нужно все роста сложить и поделить на количество студентов в группе. Каков смысл найденной величины? Ведь может оказаться так, что никто из студентов не имеет роста, равного среднему! Средний рост означает, что *большинство* имеет рост, *близкий* к среднему, т.е. к найденной величине. Наверняка окажется, что есть студенты (таких немного), у которых рост значительно отличается от среднего.

Таким образом, средняя величина характеризует большинство. И чем для большего количества чего-либо просчитана средняя величина, тем точнее характеристика или числовое значение данного параметра для большинства из этого количества!

Если подсчитать **среднюю v^2** , **среднюю E_p** и **E_k** , то они и будут характеризовать громадное количество микрочастиц данного тела. Но среди этих частиц всегда найдутся такие, у которых скорости и энергии значительно отличаются от средних в одну и в другую сторону. Обратите внимание на обозначения средних величин.

$\overline{E_k}$ и $\overline{E_p}$ - средние энергии

\overline{v} - средняя скорость

⁵ Знак \gg обозначает «во много раз больше»

⁶ Под «**результующей**» силой понимают равнодействующую (сумму) всех сил

⁷ E_k – кинетическая энергия зависит от скорости движения частиц вещества

⁸ v – средняя скорость движения частиц вещества

Посмотрим, как можно подсчитать среднюю E_k :

E_{ki} - кин. энергия i -ой частицы

v_i - скор i -ой частицы

$$E_{ki} = \frac{m_0 v_i^2}{2} \quad \text{кин. энерг. частицы}$$

$$\bar{E}_k = \frac{E_{k1} + E_{k2} + \dots + E_{kN}}{N}, \quad \text{где } N - \text{к-во частиц}$$

$$\bar{E}_k = \frac{\frac{m_0 v_1^2}{2} + \frac{m_0 v_2^2}{2} + \dots + \frac{m_0 v_N^2}{2}}{N} =$$

$$= \frac{m_0}{2} \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\bar{E}_k = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}} \quad \text{ср. кин. энергия микрочастицы}$$

m_0 - масса одной частицы

\bar{v}^2 - квадрат ср. скорости

Частицы также взаимодействуют (расстояния и силы взаимодействия меняются хаотически), то можно получить формулу и для средней E_p , но не методами элементарной математики.

Итак, каждая микрочастица вещества обладает полной энергией, среднее значение которой равно

$$\bar{E} = \bar{E}_k + \bar{E}_p$$

Если же средние энергии всех частиц сложить, то получится ЭНЕРГИЯ, КОТОРОЙ ОБЛАДАЕТ ФИЗИЧЕСКОЕ ТЕЛО:

U - внутр. энергия физич. тела

$$U = \underbrace{\bar{E}_k + \bar{E}_p}_{\text{всех частиц}}$$

Эта энергия U заключена в любом физическом теле и называется **ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИЕЙ**, поскольку связана с внутренним строением вещества. Ее величина колоссальна! Ядерная энергия, которая выделяется при радиоактивном распаде, например, ядер урана - это лишь малая часть внутренней энергии урана.

4. Особенности агрегатных состояний вещества

Еще древние греки в VI в. до нашей эры считали, что весь окружающий нас мир есть проявление **ЧЕТЫРЕХ** стихий: земли, воды, воздуха и огня (вспомните фильм "5-ый элемент"). По современным представлениям вещество, которое нас окружает, может находиться в одном из **четырёх агрегатных состояний**:

газообразном, жидком, твердом или **плазменном**. Ученые полагают, что некоторые звезды - их называют нейтронными - состоят из вещества, находящегося в 5-ом агрегатном состоянии - нейтронном. Также, некоторые ученые полагают, что водород, охлажденный до очень низкой температуры и сжатый под громадным давлением, находится также в особом агрегатном состоянии (уже в 6-ом!), которое получило название "металлический водород". Но не все в этих вопросах в настоящее время достаточно понятно и легко объяснимо.

О плазме речь пойдет в Теме 13, п. 5. Сейчас мы рассмотрим особенности строения, движения и взаимодействия молекул в газах, жидкостях и твердых телах.

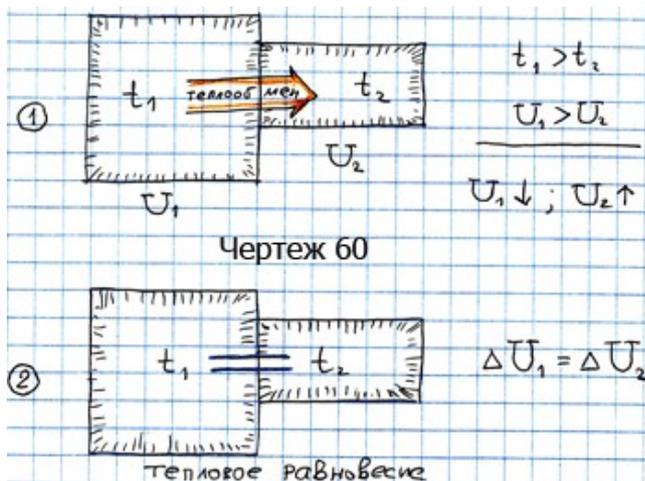
Таблица 1. Свойства, характеристики и параметры агрегатных состояний.

Свойства, параметры, характеристики	Твердое тело	Жидкость	Газ
физические свойства	сохраняет объем и форму, несжимаемо	сохраняет объем, принимает форму сосуда, практически несжимаема	не имеет формы, не сохраняет объем, легко сжимаем
характер движения частиц	хаотическое колебательное вблизи положения равновесия	хаотическое скачкообразное	свободное хаотичное
соотношение размеров частиц d и расстояний между частицами r	$r = d$	$r > d$	$r \gg d$
соотношение сил F_{np} и $F_{от}$ между частицами	$F_{np} = F_{от}$	$F_{np} < F_{от}$	$F_{np} = 0$
соотношение средних E_k и E_n	$E_n \gg E_k$	$E_n = E_k$	$E_k \gg E_n$
зависимость интенсивности хаотического движения от t (температуры)	возрастает с ростом t и наоборот	возрастает с ростом t и наоборот	возрастает с ростом t и наоборот

Если физическое тело нагреть или охладить изменится его температура \rightarrow изменится его $U \rightarrow$ изменятся все свойства, параметры и характеристики \rightarrow изменится его **агрегатное состояние**.

5. Понятие о температуре

Температура - одно из основных понятий не только в молекулярной, но и в физике вообще. Можно сказать, что *температура характеризует степень нагретости тел*: чем тело теплее, тем выше его температура и наоборот. Температура также определяет направление **теплообмена**. Например, если привести в соприкосновение два тела разной температуры, причем $t_1 > t_2$ (1), то тепло будет переходить от тела с более высокой температурой, к телу с более низкой температурой. При этом U_1 будет уменьшаться, а U_2 - увеличиваться. Когда одно тело отдает тепло другому, говорят, что между ними происходит **теплообмен**. Он длится до тех пор, пока не выровняются температуры $t_1 = t_2$ (2). Такое состояние называют **тепловым равновесием**.



Если система (например, два физических тела) находится в состоянии теплового равновесия, то не только

ее t остается постоянной, но и V - объем, и p - давление.

p, V, t - три параметра, которые полностью характеризуют **физическое состояние тела** или **системы тел**. Поэтому их называют **макропараметрами** или **параметрами состояния**.

p, V, t - макропараметры

$$[p] - 1 \text{ Па}$$

$$[V] - 1 \text{ м}^3$$

$$[t] - 1^\circ\text{C}$$

Для измерения температуры используют термометры. Самые распространенные - жидкостные. Их принцип действия основан на том, что жидкость при нагревании расширяется, а при охлаждении - сжимается. Однако, в настоящее время все чаще применяют электронные термометры, принцип действия которых довольно сложен.

6. Идеальный газ и основное уравнение МКТ

В природе существует много разных газов, которые отличаются по строению, химическим и физическим свойствам.

В физике для упрощения математического описания поведения газов в разных состояниях вводится понятие **идеального газа**.

Идеальный газ - это такой газ, молекулами которого являются материальные точки, а взаимодействие между ними отсутствует полностью. Поскольку молекулы газа не взаимодействуют, то он остается газом при любых условиях (температурах и давлениях). Молекулы идеального газа при столкновениях испытывают абсолютно упругие соударения.

Казалось бы, какой смысл в такой примитивной физической модели? Оказывается, большинство реальных газов довольно точно описывается с помощью законов идеального газа, если условия, в которых они находятся, не слишком сильно отличаются от нормальных.

$t_0 = 0^\circ\text{C}$	НОРМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ
$p_0 = 101\,325 \text{ Па} \approx 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (760 мм.рт.ст.)	

Еще один параметр нормальных условий - **относительная влажность** (см. Тема 10, п. 2), которая должна составлять 80%.

Попробуем выяснить, чем определяется **давление газа** на дно и стенки сосуда.

Во-первых, оно зависит от силы ударов молекул о дно и стенки сосуда; во-вторых - от частоты этих ударов. С ростом температуры возрастает интенсивность хаотического движения \rightarrow возрастает и давление. Удар молекулы о стенку определяется ее импульсом \rightarrow средней скоростью \rightarrow **средней E_k** . Количество ударов в единицу времени пропорционально n - концентрации частиц.

Концентрация - это количество частиц в единице объема.

$p \sim \bar{E}_k$	} $\Rightarrow p \sim n \bar{E}_k$	
$p \sim n$		
Точно установлено \rightarrow	$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$	ОСНОВНОЕ УР-ИЕ МКТ
n - концентрация частиц		
$[n] - 1 \text{ м}^{-3}$		

Путем простых преобразований можно получить несколько «разновидностей» основного уравнения МКТ:

$$1) \left. \begin{aligned} p &= \frac{2}{3} n \bar{E}_k \\ \bar{E}_k &= \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2}$$

$$2) \left. \begin{aligned} p &= \frac{2}{3} n \bar{E}_k \\ n &= \frac{N}{V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k}$$

$$3) p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{1}{3} \frac{m}{V} \bar{v}^2 = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$$

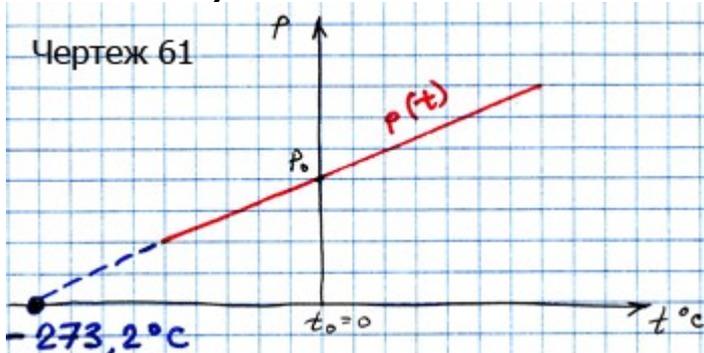
$N m_0 = m$ - масса газа $\frac{m}{V} = \rho$ - плотность газа

Итак: $\underline{p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2}$

$[\rho] = 1 \frac{кг}{м^3}$

7. Абсолютный нуль температуры

Опытным путем установлено, что если нагревать или охлаждать газ в герметичном сосуде, то его давление будет меняться прямо пропорционально температуре. Графиком зависимости $p(t)$ будет прямая, пересекающая ось Op в точке p_0 , т.к. при температуре $t=0$ газ имеет давление. Если продолжить данный график влево, то он пересечет в некоторой точке ось Ot , при этом его давление станет $p=0$. Что это значит? Давление определяется **средней E_k** , а она - средней скоростью движения молекул \rightarrow давление стало равным нулю потому, что средняя скорость стала равной нулю \rightarrow молекулы прекратили свое хаотичное тепловое движение! Эту температуру рассчитал английский физик Кельвин и назвал ее **абсолютным нулем**.

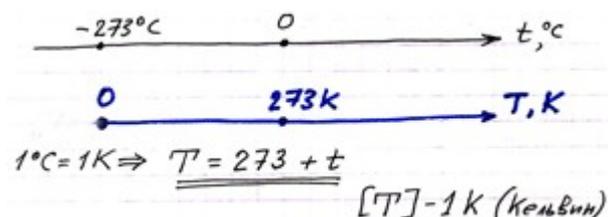


Особенности абсолютного нуля:

- прекращается хаотичное тепловое движение молекул вещества;
- это самая низкая температура в природе;
- достичь такой температуры нельзя ни в какой холодильной установке.

Температура межзвездной среды в глубоком космосе близка к абсолютному нулю. В некоторых научных приборах и устройствах также поддерживается температура, близкая к абсолютному нулю.

Кельвин предложил использовать в физике новую температурную шкалу - шкалу абсолютных температур. Она начинается с нуля и продолжается вправо - в сторону $+$ температур до бесконечности и обозначается большой буквой T :



T - **абсолютная температура**, а приведенная шкала называется также **шкалой абсолютных температур** или **шкалой Кельвина**.

Зависимость $p(T)$ – давления от температуры – выглядит следующим образом:



Можно показать, что **средняя Ек** пропорциональна абсолютной температуре:

$$\left. \begin{array}{l} p \sim \bar{E}_k \\ p \sim T \end{array} \right\} \Rightarrow \bar{E}_k \sim T$$

Немецкий физик Больцман установил точную зависимость **средней Ек(T)**:

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

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} - \text{пост. Больцмана}$$

Подставив формулу Больцмана в основное уравнение МКТ, получим **новый вид** этого уравнения:

$$\left. \begin{array}{l} p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k \\ \bar{E}_k = \frac{3}{2} k T \end{array} \right\} \Rightarrow p = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} k T \Rightarrow \boxed{p = nkT}$$

NEW!
ОСН. УР-НЕ
МКТ

Контрольные вопросы:

1. Дайте определения МКТ, макроскопического тела, тепловых явлений, хаотического движения.
2. Назовите основные положения МКТ.
3. Как доказано существование молекул и атомов?
4. Как доказано наличие хаотического движения микрочастиц и его зависимость от температуры?
5. Опишите график зависимости сил взаимодействия от расстояния между микрочастицами (на примере твердого тела).
6. Каков физический смысл средних величин: v , E_n и E_k ?
7. Как можно рассчитать среднюю E_k одной микрочастицы? Формула?
7. Почему сложно рассчитать среднюю E_n микрочастицы?
8. Что называют внутренней энергией?
9. В чем принципиальная разница между внутренней энергией и средними E_n и E_k ?
10. Какие агрегатные состояния вы знаете?
11. Охарактеризуйте твердое, жидкое и газообразное состояния вещества.
12. Почему происходит изменение агрегатного состояния при изменении температуры?
13. Раскройте понятия температуры, теплообмена, теплового равновесия.
14. Какие физические величины и почему называют макропараметрами или параметрами состояния?
15. Что такое "идеальный газ"? Каковы его особенности?
14. Чем определяется давление газа на дно и стенки сосуда?
15. Как записывается основное уравнение МКТ? Какие величины входят в него?
16. Какую температуру и почему называют абсолютным нулем?
17. Чем шкала Кельвина отличается от шкалы Цельсия?
18. Как перевести температуру из градусов Цельсия в Кельвины и наоборот?
19. Взаимосвязь каких величин установил Больцман?
20. Как записывается основное уравнение МКТ с использованием формулы Больцмана? Какие величины входят в него?