

## Раздел VI. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.

### Глава 1. Кинетическая теория

#### идеального классического газа.

##### 1. Определение идеального классического газа.

а) Газ считается идеальным, если средняя энергия взаимодействия между частицами  $\langle U_{вз} \rangle$  много меньше средней кинетической энергии частицы  $\langle E_{кин} \rangle$ :

$$\langle U_{вз} \rangle \ll \langle E_{кин} \rangle$$

Пример: воздух  $\frac{1}{5} \text{O}_2$ ,  $\frac{4}{5} \text{N}_2$ , ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O} \dots \sim 1\%$ ),

концентрация молекул в воздухе  $n = 2,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

$$\langle r \rangle = \frac{1}{n^{\frac{1}{3}}} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ см}$$

$$r_B = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ см} \Rightarrow$$

$$\langle r \rangle \gg \langle r_B \rangle$$

Так как среднее расстояние между молекулами  $\langle r \rangle$  много

больше размера молекул ( $r_B$  - радиус Бора), то большую часть времени молекулы двигаются свободно  $\Rightarrow$  воздух с хорошей точностью может считаться идеальным газом.

Примером сильно неидеального газа можно считать жидкости.

б) Газ считается классическим, если

$$\langle r \rangle \gg \lambda$$

Где  $\lambda = \frac{h}{mv}$  - длина волны де Бройля. В противном случае

газ называют квантовым.

Так для молекул  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$  в воздухе при нормальных

$$\text{условиях } v \approx 500 \frac{\text{м}}{\text{с}} \Rightarrow \lambda \approx 10^{-8} \text{ см}$$

Воздух – классический газ.

##### 2. Состояние системы. Процесс.

Газ – система, состоящая из огромного числа частиц.

Каждая частица характеризуется радиус-вектором  $\vec{r}$ , скоростью  $\vec{V}$ , энергией поступательного движения  $E_{пост}$ , вращательного  $E_{вращ}$ , колебательного  $E_{колеб}$  и рядом других величин. Это - микроскопические параметры системы.

С другой стороны, такие параметры, как температура  $T$ , давление  $P$ , объем  $V$  характеризуют систему в целом. Такие параметры называются макроскопическими.

Система находится в равновесном состоянии, если все макроскопические параметры постоянны по всему объему и не меняются во времени.

Процесс, состоящий из непрерывной последовательности равновесных состояний, называется равновесным.

Равновесным может быть только очень медленный процесс.

Равновесный процесс может быть проведен в обратном направлении, поэтому равновесные процессы являются обратимыми.

### **3. Основы молекулярно – кинетической теории.**

Газ предполагается идеальным, классическим, равновесным.

а) Число ударов молекул о стенку единичной площади за единицу времени:

$$j = \frac{1}{4} n \langle V \rangle \quad n - \text{концентрация молекул}$$

$\langle V \rangle$  - средняя скорость

б) Основное уравнение молекулярно – кинетической теории газов.

$$p = \frac{1}{3} n m \langle V^2 \rangle \quad p - \text{давление}$$

$m$  – масса молекулы.  
 $\langle V^2 \rangle$  - среднее значение квадрата скорости молекулы.

### **4. Температура.**

Температура идеального газа – мера средней кинетической энергии поступательного движения молекулы

$$\langle E_{\text{пост}} \rangle = \frac{m \langle V^2 \rangle}{2} :$$

$$\frac{3}{2} kT = \langle E_{\text{пост}} \rangle$$

$$k = 1,4 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}^\circ} = 1,4 \cdot 10^{-16} \frac{\text{эрг}}{\text{К}^\circ} - \text{постоянная Больцмана.}$$

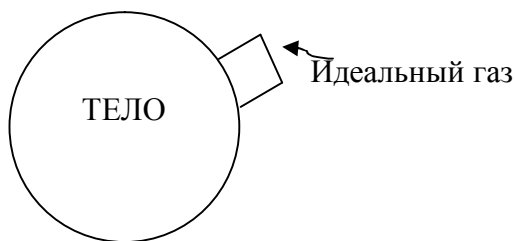
Такой коэффициент пропорциональности соответствует шкале Кельвина.

$T = 0^\circ \text{К}$  - абсолютный нуль.

$T = 273^\circ \text{К}$  - температура таяния льда.

$T = 373^\circ \text{К}$  - температура кипения воды.

Температура любого тела (не идеального газа) можно определить посредством гипотетического газового термометра.



## 5. Уравнение состояния идеального газа.

Основное уравнение молекулярно – кинетической теории с использованием понятия температуры можно переписать в виде:

$$P = nkT$$

$$\leq \frac{3}{2} kT = \frac{m \langle V^2 \rangle}{2}$$

Это уравнение называют уравнением состояния идеального газа. Уравнение состояния связывает макроскопические характеристики идеального газа, находящегося в равновесном состоянии, при этом не важно каким образом газ попал в это состояние.

Другая форма уравнения состояния получается, если использовать газовую постоянную R:

$$R = N_A \cdot k = 8,3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}},$$

где  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$  - число Авогадро

Это форма Клапейрона – Менделеева:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT$$

M – масса газа

$\mu$  - масса моля

Моль – количество вещества, в котором содержится число Авогадро  $N_A$  молекул.

## 6. Закон равномерного распределения энергии молекулы по степеням свободы. Внутренняя энергия идеального газа.

$$\langle E_{\text{пост}} \rangle = \frac{m \langle V^2 \rangle}{2} = \frac{m \langle V_x^2 \rangle + m \langle V_y^2 \rangle + m \langle V_z^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Вследствие: равноправия всех направлений движениям

$\langle V_x^2 \rangle = \langle V_y^2 \rangle = \langle V_z^2 \rangle$ , тогда :

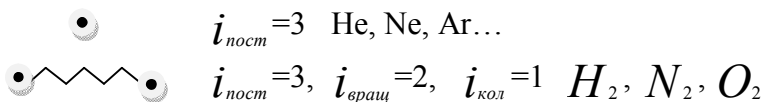
$$\frac{m \langle V_x^2 \rangle}{2} = \frac{kT}{2}$$

В общем случае выполняется следующий закон: на каждую степень свободы поступательного и

вращательного движения приходится средняя энергия  $\frac{kT}{2}$ ,

на каждую степень свободы колебательного движения – kT

$$\langle E \rangle = (i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{кол}}) \frac{kT}{2}$$

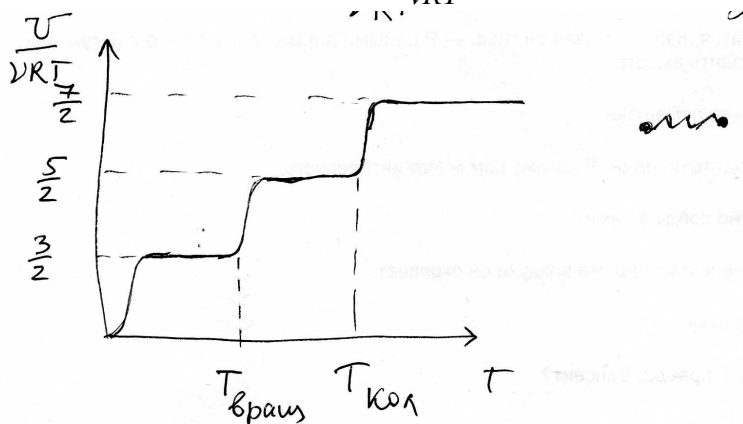


Внутренняя энергия идеального газа:

$$U = N \langle E \rangle = N i \frac{kT}{2} = \frac{i}{2} \frac{NR}{N_A} T = \frac{i}{2} \nu RT = \frac{i}{2} pV$$

Где  $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{кол}}$ ,  $\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{M}{\mu}$  - число молей.

В действительности ситуация более сложная. При низких температурах вращательные и колебательные степени свободы не возбуждены (эффект квантовый). С ростом температуры сначала возбуждаются вращательные степени свободы, потом колебательные. Для 2-х атомной молекулы типичная зависимость  $\frac{U}{\nu RT}$  от  $T$  имеет вид:



В воздухе при нормальных условиях колебательные степени свободы не возбуждены  $\rightarrow i = 5$

Вопросы:

1. Критерий идеальности газа.
2. Критерий классичности газа.
3. Что такое состояние равновесия?
4. Что такое равновесный процесс?
5. Основное уравнение МКТ.
6. Что такое температура?
7. Уравнение состояния идеального газа.
8. Закон распределения энергии молекулы по степеням свободы.
9. Что такое внутренняя энергия идеального газа?