

# Молекулярная физика

## Молекулярная физика и термодинамика

В изучении свойств вещества существует два подхода.

**Молекулярная физика** использует **статистический подход**, основывающийся на **молекулярно-кинетической теории**, в соответствии с которой все тела состоят из огромного числа атомов и молекул, находящихся в непрерывном хаотическом (тепловом) движении. Атомы и молекулы взаимодействуют между собой, притягиваясь на больших расстояниях и отталкиваясь на маленьких расстояниях.

**Термодинамический подход** изучает свойства веществ в целом, не привлекая сведений об их строении. Он устанавливает связи между макроскопическими экспериментально определяемыми параметрами состояния (температура, давление, внутренняя энергия и т. д.), базируясь на нескольких фундаментальных законах, называемых началами термодинамики. Обе теории взаимно дополняют друг друга.

# Молекулярная физика

## • Молекулярно-кинетическая теория.

• Масса атомов и молекул определяется в атомных единицах массы (а. е. м.) ( $1/12$  массы изотопа углерода  $C_{12}$ ). Макроскопическая масса различных веществ измеряется в молях и киломолях. **1 моль (1 киломоль)** – количество вещества, масса которого численно равна массе его атома или молекулы, выраженной в граммах (килограммах). Для кислорода, масса молекулы которого равна 32 а. е. м., 1 моль равен 32 г, а – 1 киломоль – 32 кг. В одном моле вещества содержится количество атомов или молекул, равное числу Авогадро.

## • Температура

• При соприкосновении двух нагретых тел в результате теплового движения атомов и молекул происходит передача энергии от более нагретого к менее нагретому телу до тех пор, пока не наступает тепловое равновесие. Характеристикой степени нагретости тел служит температура  $T$ , которая определяется следующим соотношением

# Молекулярная физика

$$\varepsilon_{\text{кин}} = \frac{m_{\text{мб}} \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Где  $\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle$  - кинетическая энергия поступательного движения молекулы массой  $m_0$ , Дж/К - постоянная Больцмана,  $v_{\text{кв}}$  - средняя квадратичная скорость молекулы.

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N}}, \langle v_{\text{кв}} \rangle \quad \text{- среднее значение квадрата скорости}$$

движения молекулы. Измерять температуру в джоулях неудобно, в связи с малой величиной кинетической энергии молекулы и сложностью ее определения. Поэтому принято измерять температуру в градусах абсолютной шкалы температуры – кельвинах, ноль которой соответствует прекращению теплового движения. Наряду со шкалой Кельвина используется шкала Цельсия, где за  $0^\circ$  принимается точка замерзания воды, а за  $100^\circ$  – точка ее кипения. Абсолютная температура замерзания воды  $273,15^\circ \text{K}$ , поэтому для перевода градусов Цельсия в градусы Кельвина пользуются соотношением  $T = 273,15 + t_c$

# Молекулярная физика

## • Давление.

• При столкновении со стенками сосуда молекулы газа оказывают на них давление, передавая им определенный импульс. Изменение импульса определяет величину действующей на стенку силы.

Давлением  $p$  называется сила  $F$  действующая на единицу площади поверхности сосуда

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

• В системе СИ давление измеряется в паскалях:  $\text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ .

Наряду с этим используется внесистемная единица давления - атмосфера, определяемая как сила в 1 кГ, действующая на площади в  $1 \text{ см}^2$  и миллиметры ртутного столба

$$1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт.ст.}$$

## Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

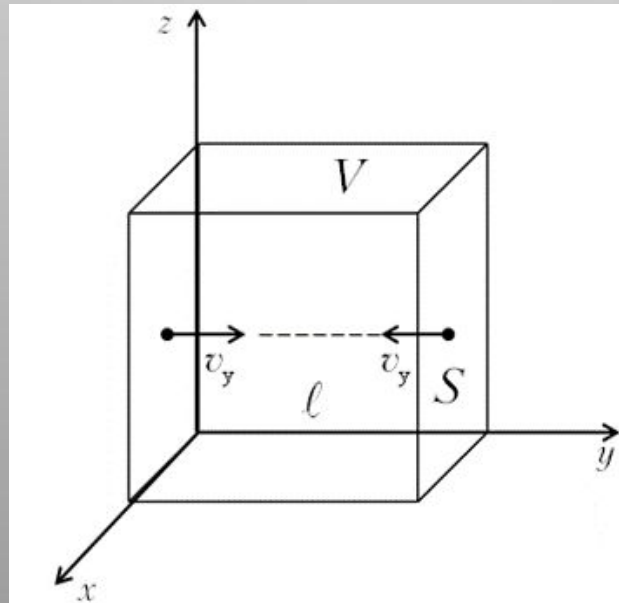
**Идеальный** – газ, взаимодействием между молекулами которого можно пренебречь (за исключением момента их соударения).

Молекулы идеального газа рассматриваются как материальные точки, не имеющими объема.

# Молекулярная физика

Рассмотрим движение молекулы идеального газа вдоль оси  $y$  в объеме  $V$  (Рис) При каждом ударе о стенку сосуда  $S$  она передает ему импульс, равный  $m_0 v_y - (-m_0 v_y) = 2m_0 v_y$ . После удара молекула долетит до противоположной стенки сосуда на расстоянии  $\ell$ , отразится и вновь ударит о стенку через время  $\Delta t = 2\ell/v_y$ . Она подействует на стенку с силой  $f$ , равной

$$f = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2m_0 v_y v_y}{2\ell} = \frac{m_0 v_y^2}{\ell}.$$



Тепловое движение молекул

# Молекулярная физика

Полная сила, действующая на стенку со стороны всех  $N$  молекул, находящихся в сосуде, равна

$$F = \sum_{i=1}^N \frac{m_0 v_{iy}^2}{\ell} = \frac{m_0}{\ell} \sum_{i=1}^N v_{iy}^2 = \frac{m_0}{\ell} N \frac{\sum_{i=1}^N v_{iy}^2}{N} = \frac{m_0}{\ell} N \langle v_y^2 \rangle$$

Т.к. движение молекул хаотично, то все направления равноценны и

$$m_0 v_x^2 = m_0 v_y^2 = m_0 v_z^2 = 1/3 m_0 v^2$$

Тогда на дно и любую стенку сосуда со стороны  $N$  молекул действует сила

$$F = \frac{m_0}{3\ell} N \langle v^2 \rangle = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{V} S \langle v^2 \rangle = \frac{1}{3} m_0 n S \langle v^2 \rangle,$$

где  $n = \frac{N}{V}$  - число молекул в единице объема. Отсюда

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle$$

• Полученное соотношение называется основным уравнением молекулярно-кинетической теории. Используя определение

# Молекулярная физика

температуры, получим основное уравнение МКТ в форме Больцмана  $p = nkT$ . Если преобразовать уравнение

$$pV = NkT = \frac{N}{N_A} N_A kT = \nu RT,$$

то получим уравнение Клапейрона-Менделеева  $pV = \nu RT$ ,

где  $\nu$  - число молей.  $R = kN_A$  - универсальная газовая постоянная.

• **Закон Дальтона:** давление  $p$  смеси газов равно сумме давлений каждого из газов, которое он производил бы, занимая весь объем

$$p = p_1 + p_2 + \dots$$

## Примеры решения задач

**Задача 54.** В сосуде объемом  $V = 400 \text{ см}^3$  содержится некоторый газ при температуре  $10^\circ\text{C}$ . Найдите насколько повысится давление  $\Delta p$ , если в сосуд добавить  $N_0 = 10^{19}$  молекул.

**Решение.** Запишем основное уравнение молекулярно-кинетической теории для конечного  $p_2 = \frac{N + N_0}{V} kT$  и начального

# Молекулярная физика

состояний  $p_1 = \frac{N}{V} kT$ . Вычитая из первого выражения второе,

получим: 
$$\Delta p = \frac{N_0}{V} kT = \frac{10^{19}}{400 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 283 = 97,6$$

**Задача 55.** Баллон, вместимостью 20 л, содержит смесь водорода и азота при температуре 290 К и давлении 1 Мпа. Найдите массу водорода, если масса смеси равна 200 г, молярная масса водорода 2 г/моль, молярная масса азота 28 г/моль.

**Решение.** По закону Дальтона давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = p_{\text{в}} + p_{\text{а}} = \left( \frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{а}}}{M_{\text{а}}} \right) \frac{RT}{V},$$

Откуда  $\frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} + \frac{m - m_{\text{в}}}{M_{\text{а}}} = \frac{pV}{RT}$  и масса водорода равна 2,51 г.

**Задача 56.** Найдите давление газа в сосуде, если его плотность равна 0,1 кг/м<sup>3</sup>, а средняя квадратичная скорость  $v_{\text{кв}} = 500$  м/с.



# Молекулярная физика

**Решение.** Из уравнения Клапейрона – Менделеева давление

равно

$$p = \frac{mRT}{VM} = \frac{\rho RT}{M}$$

Средняя квадратичная скорость определяется выражением

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

и

$$p = \frac{\rho RT}{M} = \frac{\rho v_{\text{кв}}^2}{3} = 8333,3 \text{ Па.}$$

**Задача 57.** Как и во сколько раз изменится средняя кинетическая энергия молекул идеального газа при уменьшении его объема в 3 раза и увеличении давления в 6 раз.

**Решение.** Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории в форме Больцмана имеем  $p = \frac{N}{V} \frac{2}{3} \langle \varepsilon_{\text{кин}} \rangle$ , где  $N$  – число

молекул газа,  $\langle \varepsilon_{\text{кин}} \rangle$  – средняя кинетическая энергия одной

# Молекулярная физика

откуда 
$$\frac{\langle \varepsilon_{\text{кин2}} \rangle}{\langle \varepsilon_{\text{кин1}} \rangle} = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = 2.$$

**Задача 58.** Баллон, вместимостью 20 л содержит смесь водорода и азота при температуре 290К и давлении 1Мпа. Найти массу водорода, если масса смеси равна 200 г, молярная масса водорода 2г/см<sup>3</sup>, молярная масса азота 28 г/см<sup>3</sup>.

**Решение.** По закону Дальтона давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = p_{\text{в}} + p_{\text{а}} = \left( \frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{а}}}{M_{\text{а}}} \right) \frac{RT}{V},$$

откуда 
$$\frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} + \frac{m - m_{\text{а}}}{M_{\text{а}}} = \frac{pV}{RT}$$
 и масса водорода равна 2,51г.

**Задача 59.** В сосуде объемом 5 л находится кислород, концентрация молекул которого равна  $9,41 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Найдите массу газа.

**Решение.** Из уравнения Клапейрона-Менделеева 
$$pV = \frac{m}{M} RT$$

# Молекулярная физика

находим  $m = \frac{pVM}{RT} = \frac{nkTVM}{RT} = \frac{nVM}{N_A} = 0,25$ .

**Задача 60.** Найдите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы идеального газа, если при давлении 200 кПа концентрация молекул этого газа равна  $5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$

**Решение.** Запишем основное уравнение молекулярно-

кинетической теории  $p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle$ , откуда

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = \frac{3p}{2n} = 4,1 \cdot 10^{-21}$$

**Задача 61.** В сосуде при 400 К содержится смесь 16 г кислорода и 42 г азота, которые создают давление 166 кПа. Найдите плотность этой газовой смеси.

**Решение.** Из уравнения Клапейрона-Менделеева и закона Дальтона получим  $p = p_a + p_k = (v_a + v_k) \frac{RT}{V}$ , где  $p_a, p_k, v_a, v_k$  - давление

# Молекулярная физика

и число молей азота и кислорода соответственно. Тогда плотность смеси равна:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{(m_a + m_k)p}{(\nu_a + \nu_k)RT} = 1,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$