

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Введение

ВВЕДЕНИЕ

Молекулярная физика и термодинамика – разделы физики, изучающие макроскопические процессы в телах, связанные с огромным числом содержащихся в них атомов и молекул.

Методы исследования:

- **Термодинамический метод** рассматривает тело (газ, жидкость, твёрдое вещество), как систему в целом с параметрами: m – масса тела, V – объём, P – давление, T – температура.

КАК происходит процесс?

- **Статистический (молекулярно-кинетический) метод** описывает явления, в которых участвует огромное число частиц (атомов, молекул), подчиняющихся законам статистики.

ПОЧЕМУ процесс происходит именно так?

Микроскопические величины – характеристики поведения и свойств каждой молекулы в отдельности

Средние значения микроскопических величин связаны количественно со свойствами коллектива молекул, макропараметрами.

Термодинамический и молекулярно-кинетический методы дополняют друг друга, методы различны, а объект исследования – один.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Законы идеального газа

ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Идеальным газом называется газ, для которого выполнены следующие условия:

- Молекулы газа находятся друг от друга на расстояниях настолько больших, что можно пренебречь линейными размерами молекул, по сравнению с этими расстояниями, т.е. мы пренебрегаем собственным объёмом молекул.
- Между молекулами нет сил взаимодействия. Силы взаимодействия появляются только в момент столкновения, причём столкновение является абсолютно упругим.

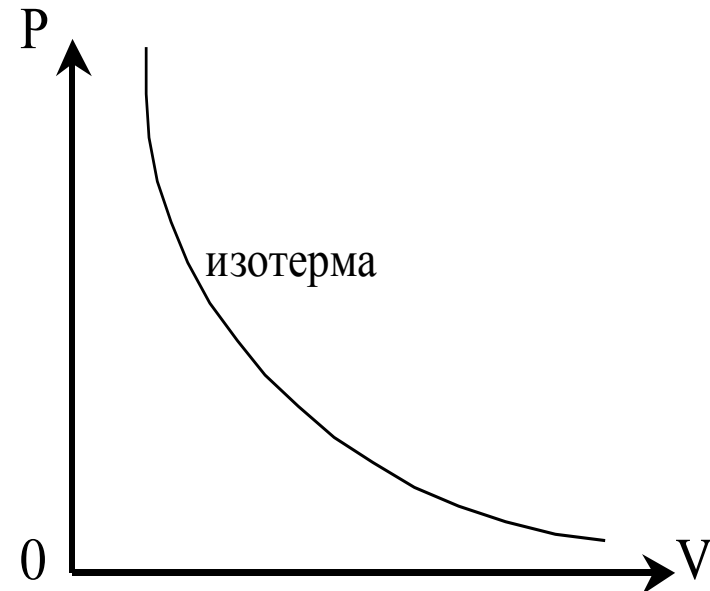
1 Закон Бойля-Мариотта

Изотермический (или изотермный) процесс – это процесс, идущий при постоянной температуре.

$$T = const$$

или

$$PV = const$$



ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

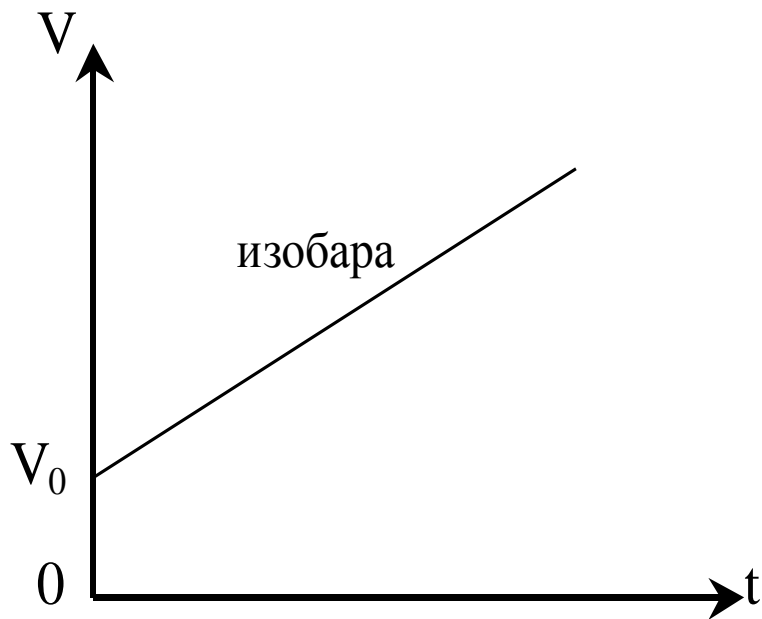
2 Закон Гей-Люсака

Изобарический процесс – это процесс, при котором давление газа остаётся постоянным.

$$V = V_0(1 + \alpha t) \quad \text{при} \quad P = const$$

V – объём газа при температуре t , взятой по шкале Цельсия,

V_0 – объём газа при 0°C , α – коэффициент объёмного расширения газа $\alpha = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$



$$\frac{V}{T} = const \quad \text{при} \quad P = const$$

V – объём газа при температуре T , взятой по шкале Кельвина.

$$T = t + 273.$$

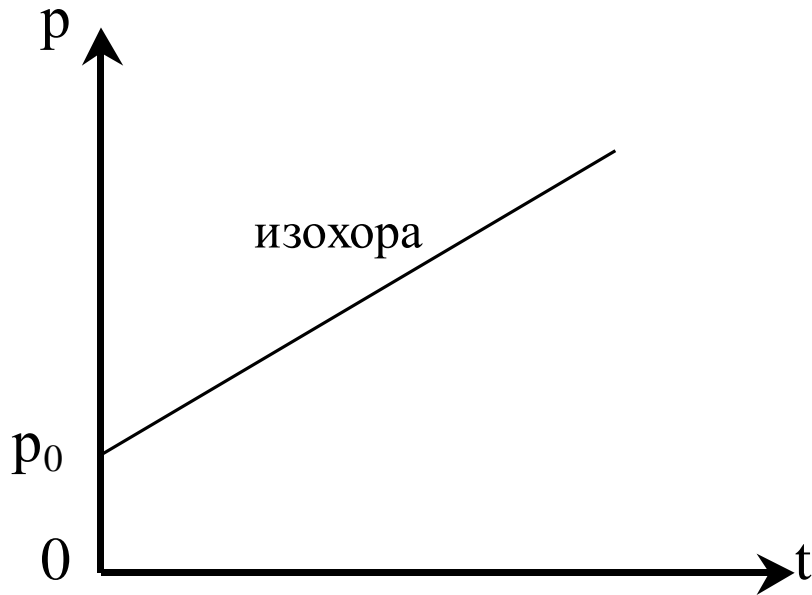
ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

3 Закон Шарля

Изохорический процесс – это процесс, при котором объём газа остаётся постоянным.

$$P = P_0(1 + \beta t) \quad \text{при } V = const$$

P - давление газа при температуре t , взятой по шкале Цельсия,
 P_0 - давление газа при 0°C , β - термический коэффициент $\beta = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$



$$\frac{P}{T} = const \quad \text{при } V = const$$

P – давление газа при температуре T , взятой по шкале Кельвина.

$$\frac{PV}{T} = const$$

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Уравнение состояния идеального газа


УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Параметры состояния: m - масса газа, V - объём газа, P - давление газа, T - температура газа.

Уравнение состояния идеального газа - Уравнение Менделеева–Клапейрона:

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

m – масса газа, μ -масса одного моля газа, m/μ – число молей газа,
 R – универсальная газовая постоянная.

Для одного моля вещества $\left(\frac{m}{\mu} = 1 \right)$  $PV = RT$

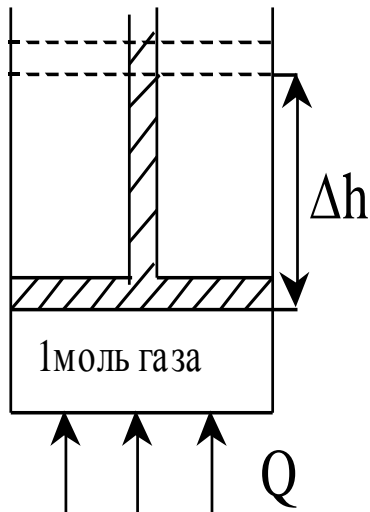
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Физический смысл R .

Начальное состояние (V_1, P_1, T_1) $(P_1 = const)$ Конечное состояние (V_2, P_1, T_2)

Работа газа по поднятию поршня: $A = F\Delta h$

F – сила, действующая на поршень со стороны газа. P_1 – давление газа на поршень.



$$F = P_1 S, \quad S\Delta h = \Delta V \quad \Rightarrow \quad A = P_1 \Delta V, \quad \Delta V = V_2 - V_1$$

$$\left. \begin{array}{l} P_1 V_1 = RT_1 \\ P_2 V_2 = RT_2 \end{array} \right\} \quad P_1 (V_2 - V_1) = R(T_2 - T_1) \quad P_1 \Delta V = R\Delta T$$

$$R = \frac{A}{\Delta T}$$

R равна работе, которую совершает 1 моль идеального газа при изобарическом расширении, если газ нагреть на один градус.

$$R \cong 8.3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \quad R \cong 8.3 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{Кмоль} \cdot \text{К}}$$

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Основное положение молекулярно-кинетической теории

ОСНОВНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

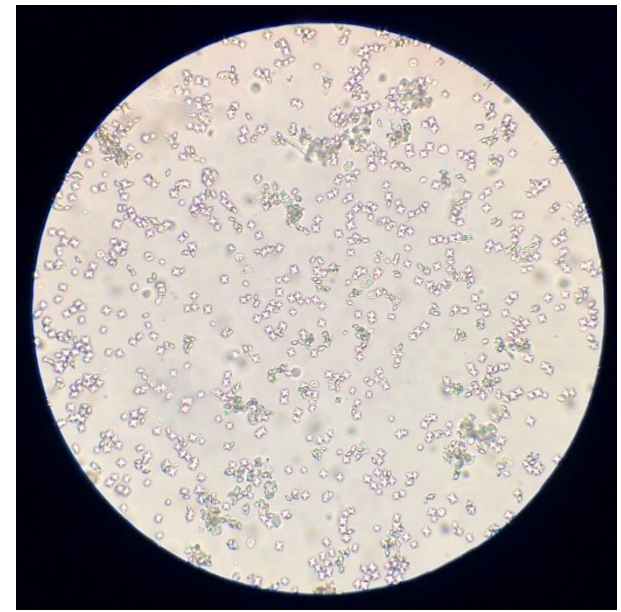
Молекулярно-кинетическая теория объясняет свойства тел взаимодействием и движением атомов и молекул.

Основные положения молекулярно-кинетической теории:

1. Все тела состоят из атомов или молекул.
2. Между атомами и молекулами идеального газа нет сил взаимодействия.
3. Атомы и молекулы находятся в вечном хаотическом (тепловым) движении.

Масса атома водорода равна $1,66 \times 10^{-27}$ кг.

Броуновское движение
(движение частиц эмульсии)



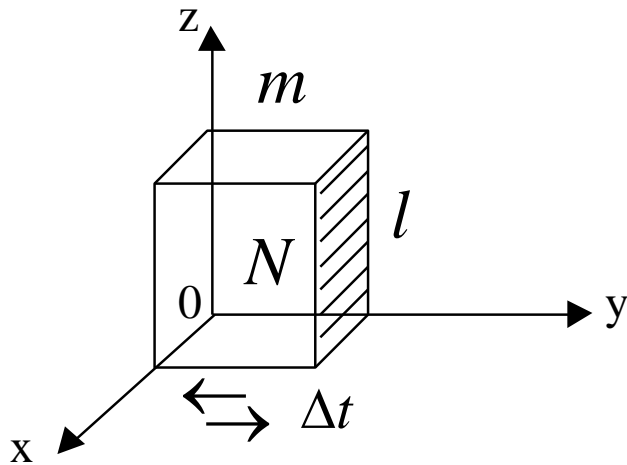
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Уравнение связи давления P газа с микрофизическими характеристиками газа.

Рассмотрим идеальный газ, находящийся в сосуде, имеющем форму куба.



$\mathbf{v} (v_x, v_y, v_z)$ - скорость одной молекулы в сосуде.

Все направления движения эквивалентны



$$N' = \frac{1}{3}N$$

Найдем давление P газа на заштрихованную стенку

v_1 - скорость молекулы до удара о стенку; $-v_1$ - скорость молекулы после удара.

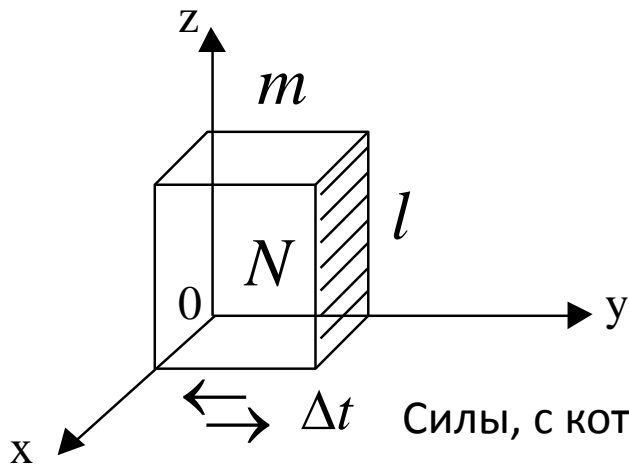
$$\Delta(mv_1) = mv_1 - (-mv_1) = 2mv_1$$

$$f_1 \delta t = \Delta(mv_1)$$

$$\Delta t = \frac{2l}{v_1}$$

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Введем в рассмотрение силу F_1 , постоянно действующую на стенку за время Δt



$$F_1 \Delta t = f_1 \delta t$$

$$F_1 \Delta t = \Delta(mv_1) = 2mv_1$$

$$F_1 \frac{2l}{v_1} = 2mv_1 \quad F_1 = \frac{mv_1^2}{l}$$

Силы, с которыми другие молекулы действуют на стенку сосуда, равны:

$$F_2 = \frac{mv_2^2}{l}, F_3 = \frac{mv_3^2}{l}, \dots, F_{N'} = \frac{mv_{N'}^2}{l}$$

Результирующая сила:

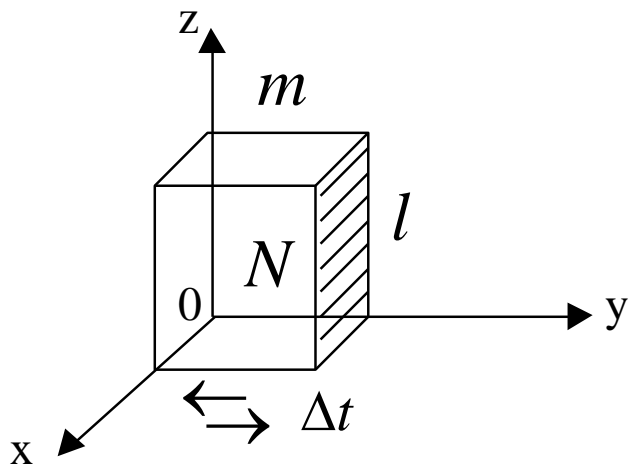
$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_{N'} = \frac{mv_1^2}{l} + \frac{mv_2^2}{l} + \frac{mv_3^2}{l} + \dots + \frac{mv_{N'}^2}{l} = \\ &= \frac{mN'}{l} \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_{N'}^2}{N'} \right). \end{aligned}$$

$$\frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_{N'}^2}{N'} = \langle v_{кв} \rangle^2$$

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_{N'}^2}{N'}}$$

средняя квадратичная скорость молекул газа.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ



$$F = \frac{mN}{l} \langle \mathbf{v}_{кв} \rangle^2 = \frac{1}{3} \frac{mN}{l} \langle \mathbf{v}_{кв} \rangle^2$$

Площадь стенки сосуда: $S = l^2$

Давление – это сила, приходящаяся на единицу площади

$$P = \frac{F}{l^2}, \quad P = \frac{1}{3} m \frac{N}{l^3} \langle \mathbf{v}_{кв} \rangle^2$$

$n_0 = \frac{N}{l^3}$ – концентрация молекул (число молекул в единице объёма газа)

$$P = \frac{1}{3} n_0 m \langle v_{кв} \rangle^2$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

Рассмотрим некоторые следствия из этого уравнения

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Следствие 1.

$$P = \frac{1}{3} n_0 m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 \qquad P = \frac{2}{3} n_0 \frac{m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} = \frac{2}{3} n_0 E_{\text{к}}$$

$E_{\text{к}}$ - средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы газа.

$$PV_0 = \frac{2}{3} n_0 V_0 E_{\text{к}}, \quad PV_0 = RT, \quad n_0 V_0 = N_A$$

V_0 - объём одного моля идеального газа. N_A - число Авогадро.

$$RT = \frac{2}{3} N_A E_{\text{к}} \Rightarrow E_{\text{к}} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T$$

$\frac{R}{N_A} = k$ - постоянная Больцмана.

$$E_{\text{к}} = \frac{3}{2} kT$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа зависит только от температуры.

Температура газа есть количественная мера интенсивности теплового движения молекул газа.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Следствие 2. Нахождение $\langle v_{кв} \rangle$

$$E_k = \frac{3}{2} kT$$

$$\frac{m \langle v_{кв} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

$$m \langle v_{кв} \rangle^2 = 3kT$$

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Так как $k = \frac{R}{N_A}$, то

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{mN_A}}$$

$mN_A = \mu$ - масса моля газа.

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Следствие 3.

$$P = \frac{1}{3} n_0 m \langle v_{кв} \rangle^2$$

$$P = \frac{2}{3} n_0 \frac{m \langle v_{кв} \rangle^2}{2} = \frac{2}{3} n_0 E_{к} \quad E_{к} = \frac{3}{2} kT$$

$$P = \frac{2}{3} n_0 \frac{3}{2} kT = n_0 kT$$

$$P = n_0 kT$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов