

# 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.

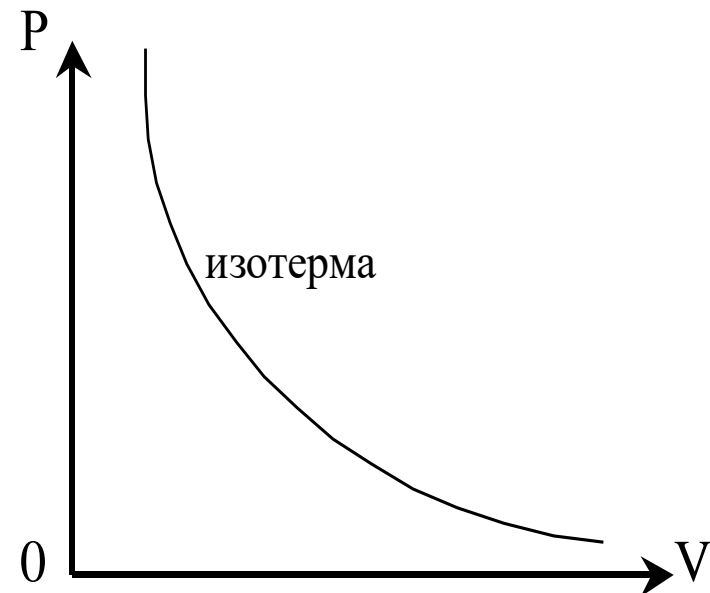
### 1 Закон Бойля-Мариотта

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

$$T = const$$

или

$$PV = const$$



# ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

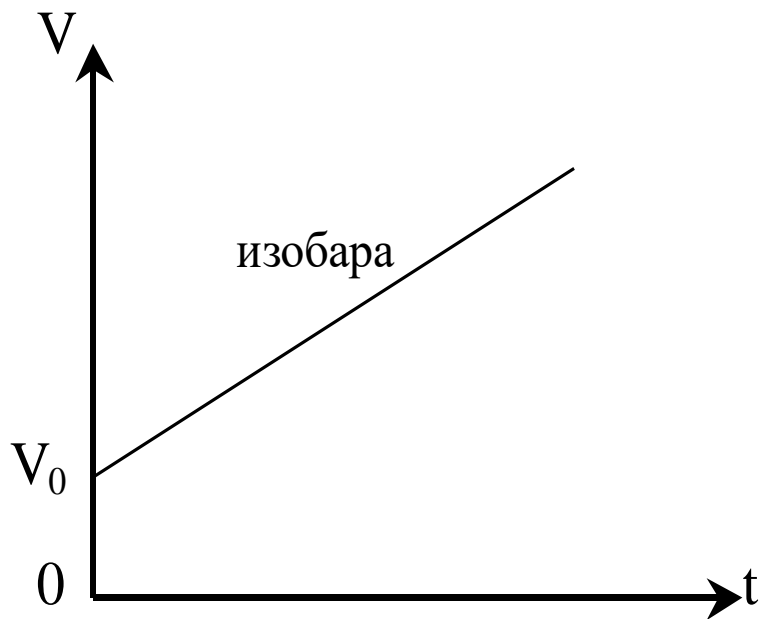
## 2 Закон Гей-Люсака

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  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – 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.

$$T = t + 273.$$

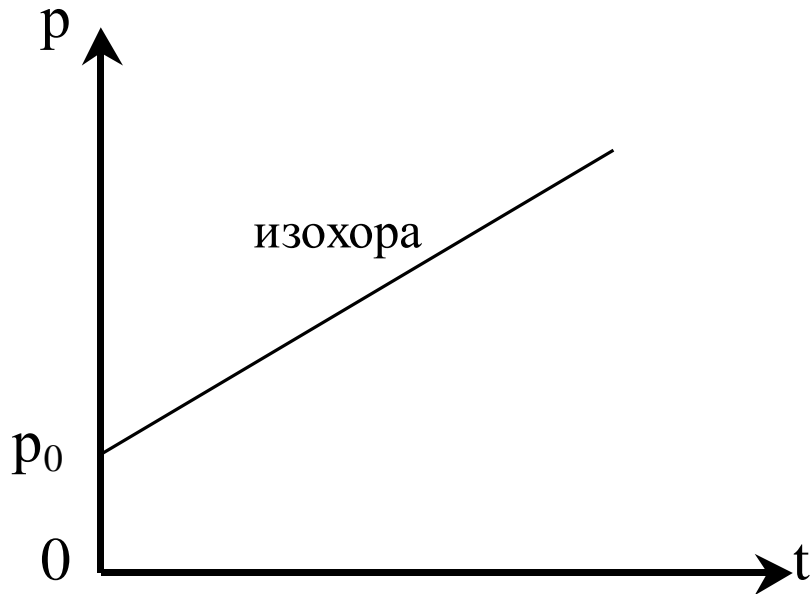
# ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

## 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  $0^\circ\text{C}$ ,  $\beta$  - 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,  $\mu$  -масса одного моля газа,  $m/\mu$  – число молей газа,  
 $R$  – универсальная газовая постоянная.

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



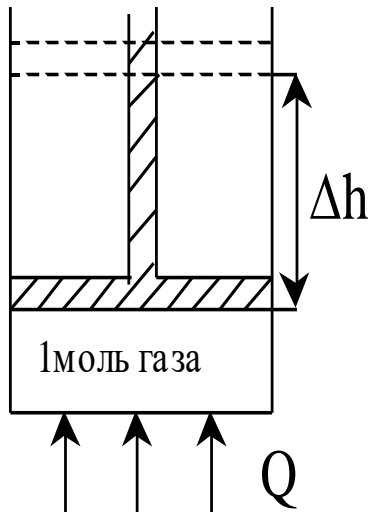
## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

**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

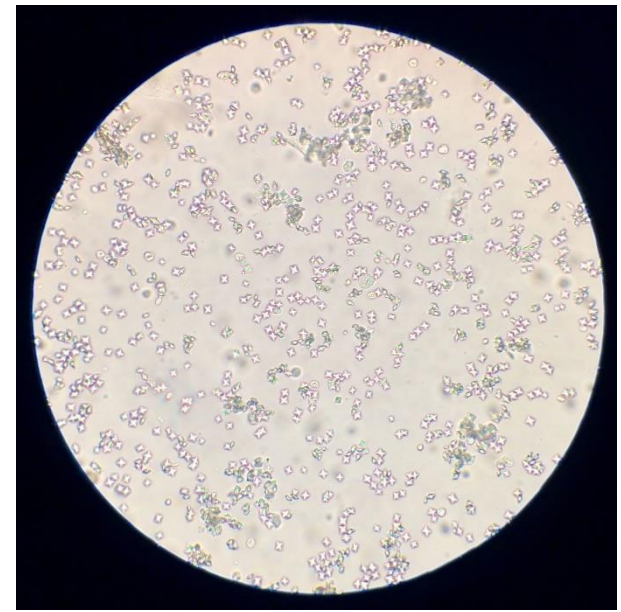
Молекулярно-кинетическая теория объясняет свойства тел взаимодействием и движением атомов и молекул.

### 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)



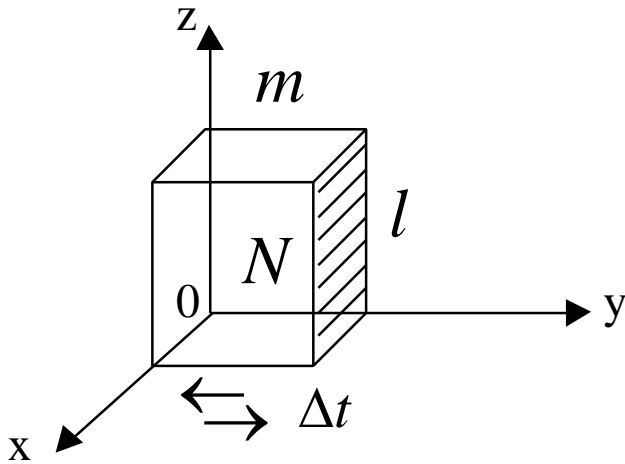
# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории**

## ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Уравнение связи давления  $P$  газа с микрокосмическими характеристиками газа.

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



$v (v_x, v_y, v_z)$  - 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.

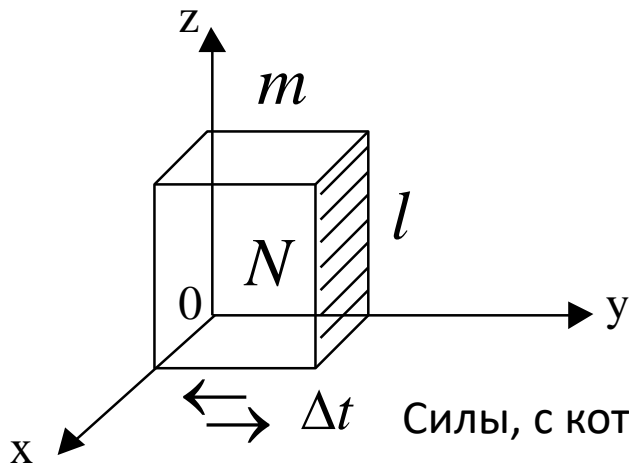
$$\Delta(mv_1) = mv_1 - (-mv_1) = 2mv_1$$

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

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

## ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Введем в рассмотрение силу  $F_1$ , постоянно действующую на стенку за время  $\Delta t$



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

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

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

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:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_{N'} = \frac{mv_1^2}{l} + \frac{mv_2^2}{l} + \frac{mv_3^2}{l} + \dots + \frac{mv_{N'}^2}{l} =$$

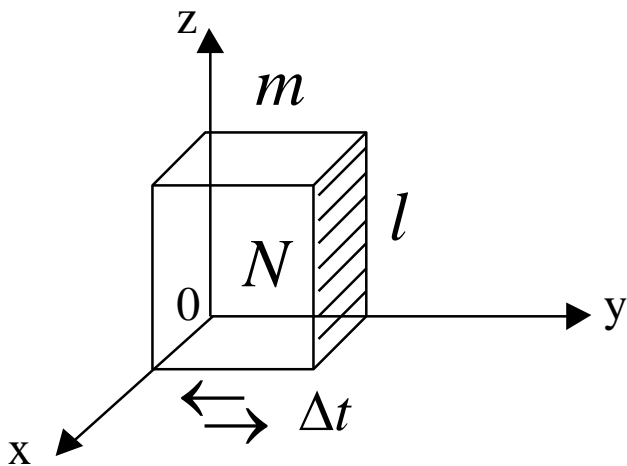
$$= \frac{mN'}{l} \left( \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_{N'}^2}{N'} \right).$$

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

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

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.

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

$E_k$  - средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы газа.

$$PV_0 = \frac{2}{3} n_0 V_0 E_k, \quad PV_0 = RT, \quad n_0 V_0 = N_A$$

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

$$RT = \frac{2}{3} N_A E_k \Rightarrow E_k = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T$$

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

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

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