

# Законы идеального газа Молекулярно-кинетическая теория

Статическая физика и термодинамика

# Статическая физика и термодинамика

**Макроскопические тела** - это тела, состоящие из большого количества молекул

Методы исследования:

- статистический (молекулярно-кинетический)
- термодинамический

# Термодинамика

– раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями

**Термодинамическое равновесие** – состояние тела, при котором все точки системы имеют одинаковые и постоянные значения термодинамических макропараметров

# Термодинамика

**Термодинамическая система** – совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой).

**Термодинамические макропараметры**  
(параметры состояния):

Давление, плотность, температура, концентрация, объем, напряженность электрического и магнитного полей

# Температура

– физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы

Шкалы:

- Термодинамическая (в кельвинах)
- Международная практическая (в градусах Цельсия)

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273 \text{ K}$$

# Молекулярная (статистическая) физика

– раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении

**Статистическим методом** основан на том, что **свойства** макроскопической системы в конечном счете **определяются** свойствами частиц системы, и **усредненными значениями характеристик** этих **частиц** (скорости, энергии и т. д.)

# Молекулярно-кинетическая теория

## Основные положения:

1. Все вещества состоят из мельчайших частиц: молекул, атомов или ионов
2. Эти частицы находятся в непрерывном хаотическом движении, скорость которого определяет температуру вещества
3. Между частицами существуют силы притяжения и отталкивания

# Доказательства МКТ

- Расширение газов
- Смачивание жидкостями
- Диффузия
- Броуновское движение



# Идеальный газ

- **Собственный объем молекул газа пренебрежимо мал** по сравнению с объемом сосуда
- Между молекулами газа **отсутствуют силы** взаимодействия
- **Столкновения** молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно **упругие**

Внеся поправки, учитывающие собственный объем молекул газа и действующие молекулярные силы, можно перейти к теории реальных газов

# Законы идеального газа

- Закон Авогадро
- Закон Дальтона
- Закон Бойля-Мариотта
- Закон Гей-Люссака
- Закон Шарля

# Закон Авогадро

Моли любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковые объемы

При нормальных условиях  $V_m = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

**Постоянная (число) Авогадро** – число молекул в одном моле вещества

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$$

**Моль вещества** – количество вещества, содержащее  $N_A$  структурных элементов (атомов, молекул)

# Закон Дальтона

Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

**Парциальное давление** – давление, которое производил бы газ, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре

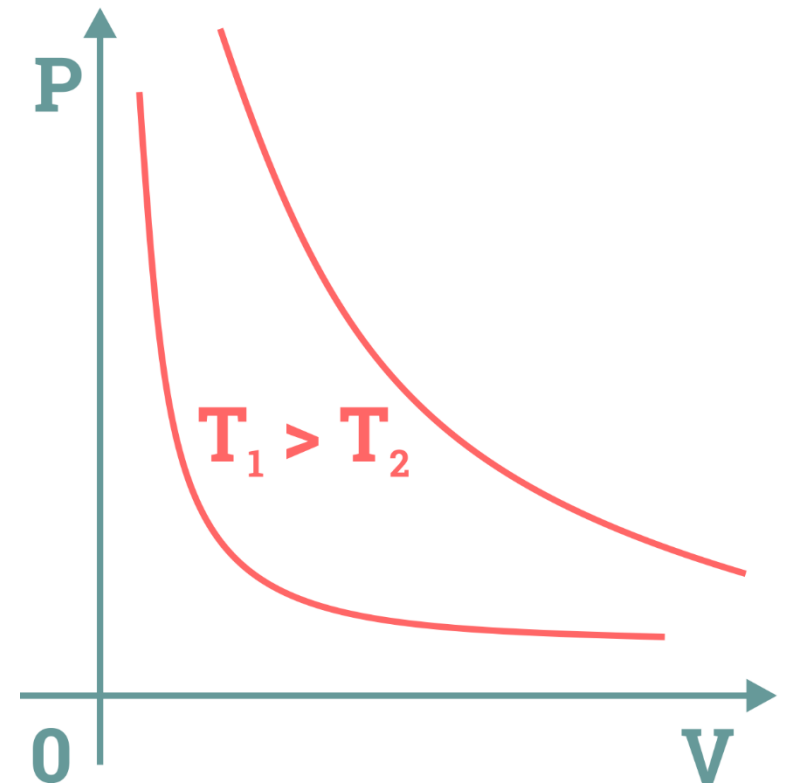
# Закон Бойля–Мариотта

$$PV = \text{const}$$

Для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

Изотермический процесс – процесс, протекающий при постоянной температуре



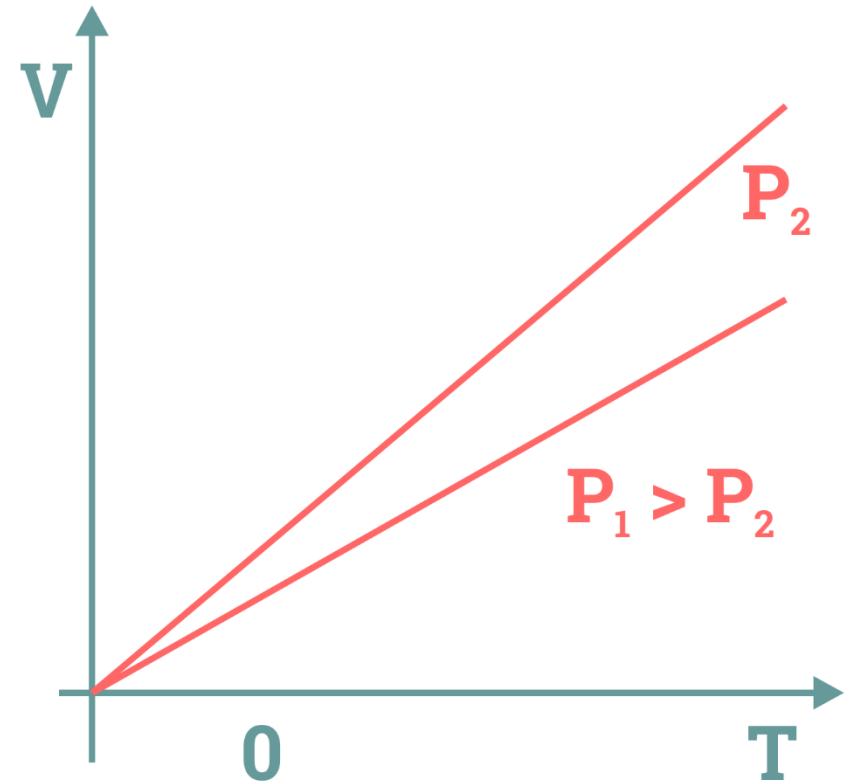
# Закон Гей-Люссака

Объем данной массы газа  
при постоянном давлении  
изменяется линейно  
с температурой

Процесс изобарный –  
процесс, протекающий при  
постоянном давлении

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

$$V = V_0 \alpha T$$



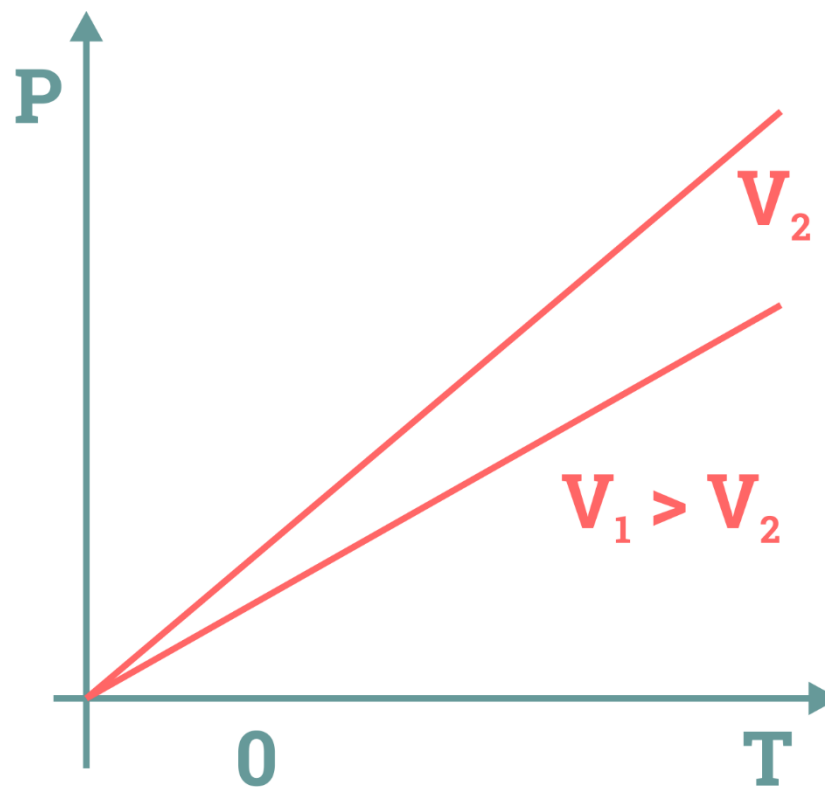
# Закон Шарля

Давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой

Процесс изохорный – процесс, протекающий при постоянном объеме

$$\frac{P}{T} = \text{const}$$

$$P = P_0 \alpha T$$



# Уравнение состояния

– уравнение, связывающее между собой термодинамические (макроскопические) параметры системы

$$f(P, V, T) = 0$$

## Уравнение Клайперона

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \frac{PV}{T} = \text{const}$$



# Уравнение Клайперона-Менделеева

$$\frac{PV_\mu}{T} = R \quad PV_\mu = RT \quad R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

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

$$\mu = \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} \right] - \text{молярная масса}$$

$$\nu = \frac{m}{\mu} = [\text{МОЛЬ}] - \text{количество вещества}$$

$$R = k \cdot N_A$$

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

$$P = \frac{RT}{V_\mu} = \frac{N_A}{V_\mu} kT = nkT$$

**Давление идеального газа при данной температуре  
прямо пропорционально концентрации его молекул**

При одинаковых температуре и давлении все газы  
содержат в единице объема одинаковое число молекул

# Молекулярно-кинетическая теория

## Основные положения:

1. Все вещества состоят из мельчайших частиц: молекул, атомов или ионов
2. Эти частицы находятся в непрерывном хаотическом движении, скорость которого определяет температуру вещества
3. Между частицами существуют силы притяжения и отталкивания

# Основное уравнение МКТ

$$m_0 v - (-m_0 v) = 2m_0 v$$

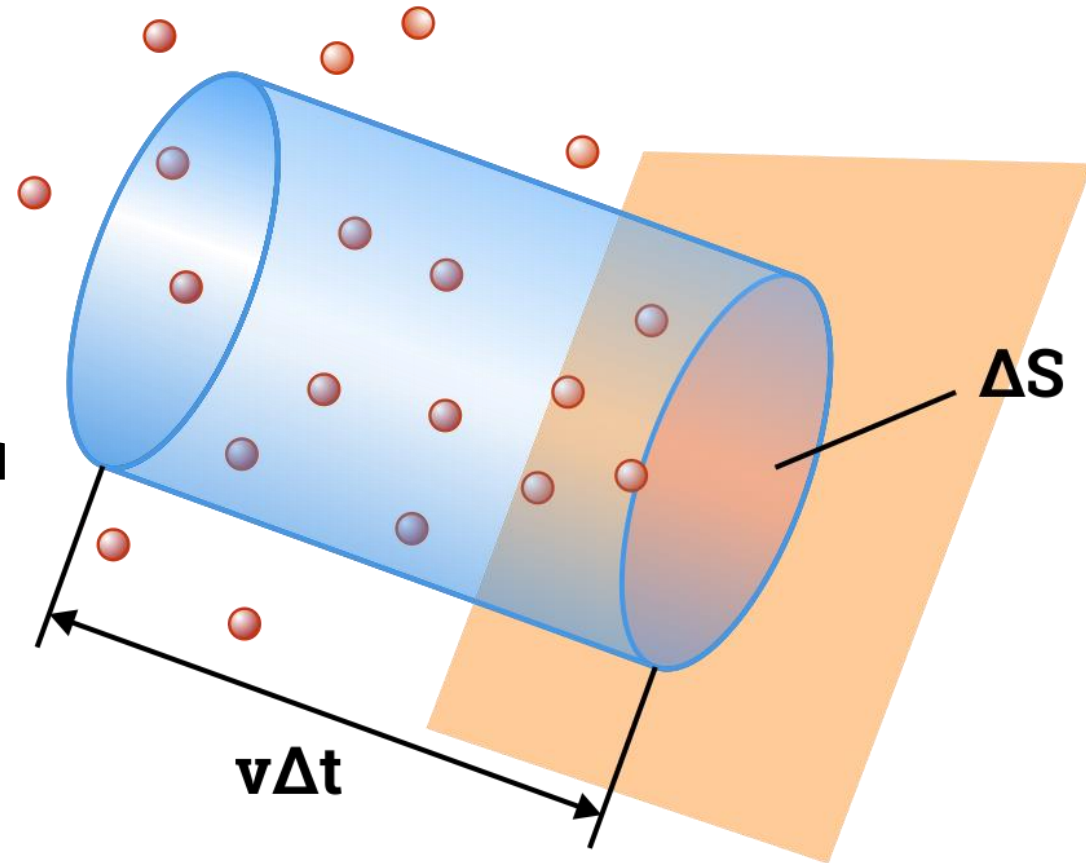
$m_0$  – масса молекулы,  $v_0$  – скорость

Число молекул в цилиндре

$$n \cdot \Delta S \cdot v \cdot \Delta t$$

Число ударов молекул, движущихся  
в заданном направлении

$$\frac{1}{6} n \cdot \Delta S \cdot v \cdot \Delta t$$



# Основное уравнение МКТ

Импульс

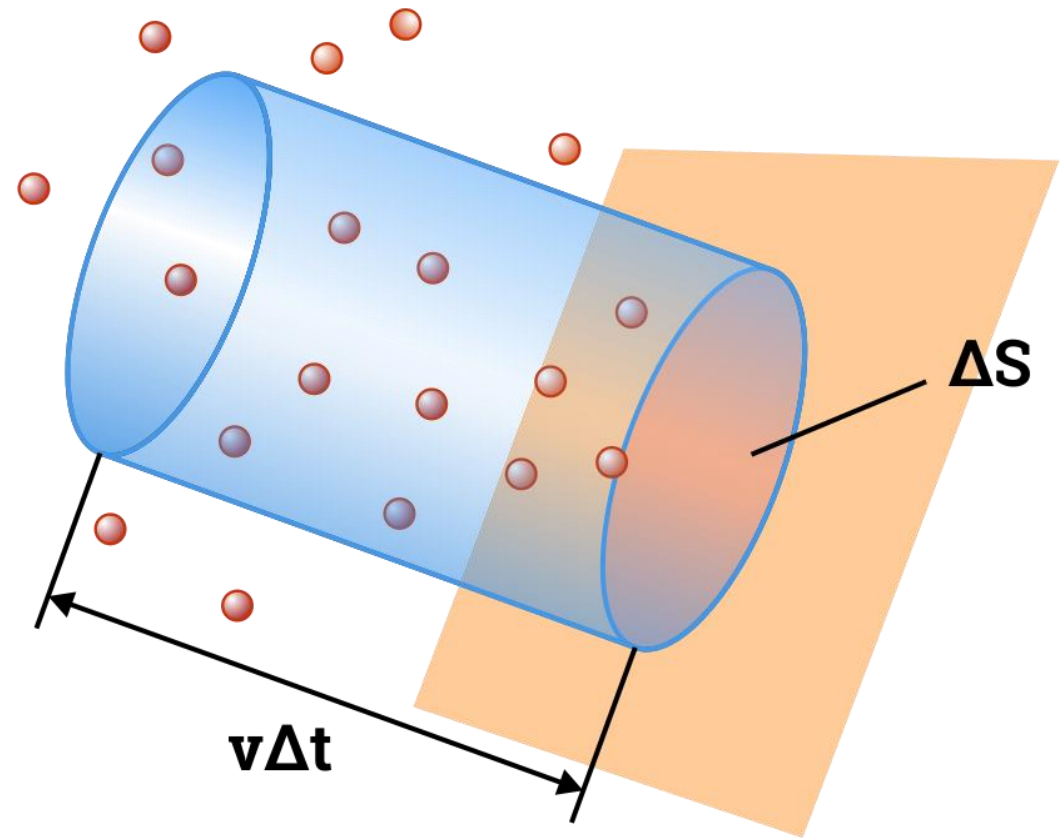
$$\Delta p = 2m_0 v \cdot \frac{1}{6} n \cdot \Delta S \cdot v \cdot \Delta t$$

Давление газа

$$P = \frac{F}{V} = \frac{\Delta p}{\Delta V \cdot \Delta t} = \frac{1}{3} n m_0 v^2$$

Средняя квадратичная скорость

$$\langle v_{\text{КВ}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$$



# Основное уравнение МКТ

Средняя квадратичная  
скорость

$$\langle v_{\text{КВ}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$$

$$\langle v_{\text{КВ}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

$$P = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{КВ}} \rangle^2$$

# Основное уравнение МКТ

Средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{E}{N} = \frac{m_0 \langle v_{\text{KB}} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Термодинамическая температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа

# Распределение Максвелла

В газе, находящемся в состоянии равновесия, устанавливается некоторое стационарное, не меняющееся со временем распределение молекул по скоростям

**Функция распределения молекул по скоростям**

$$f(v)$$

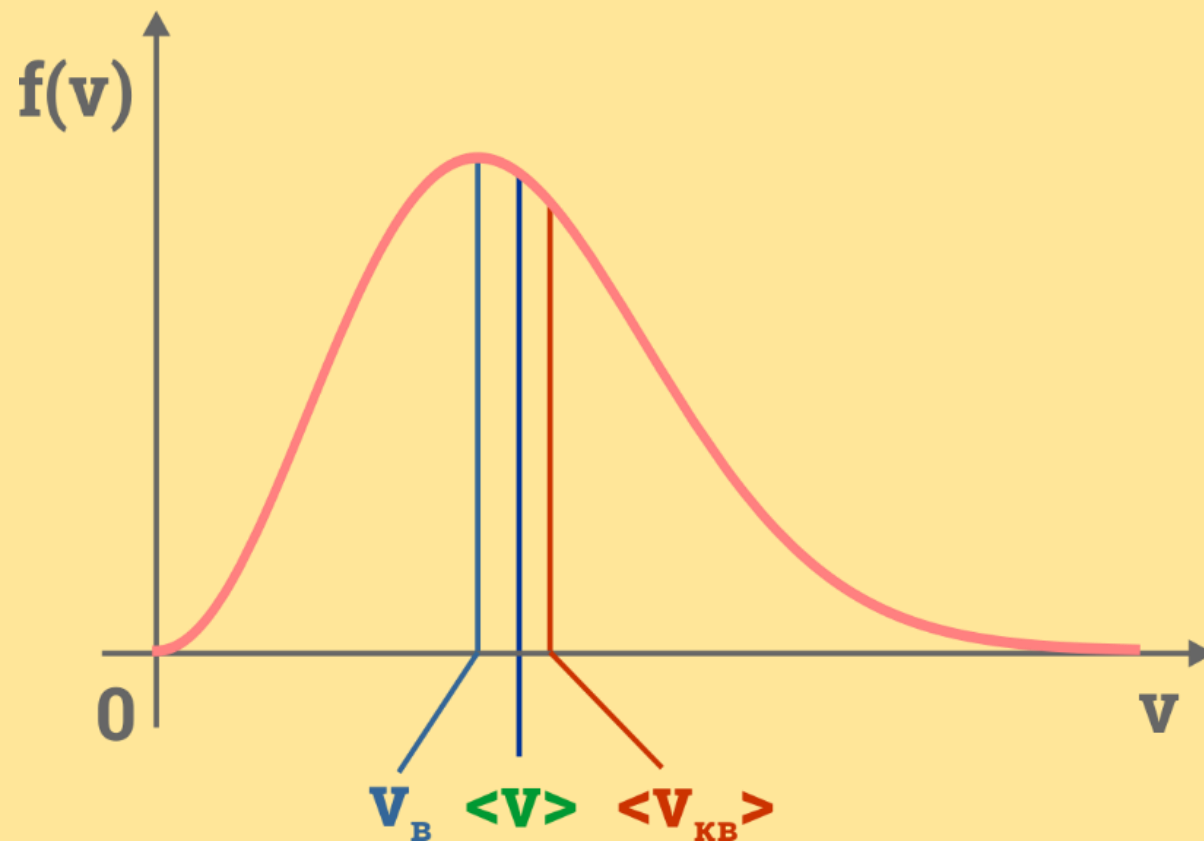


# Распределение Максвелла

Функция  $f(v)$  определяет относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале от  $v$  до  $v + dv$

$$\frac{dN(v)}{N} = f(v)dv$$

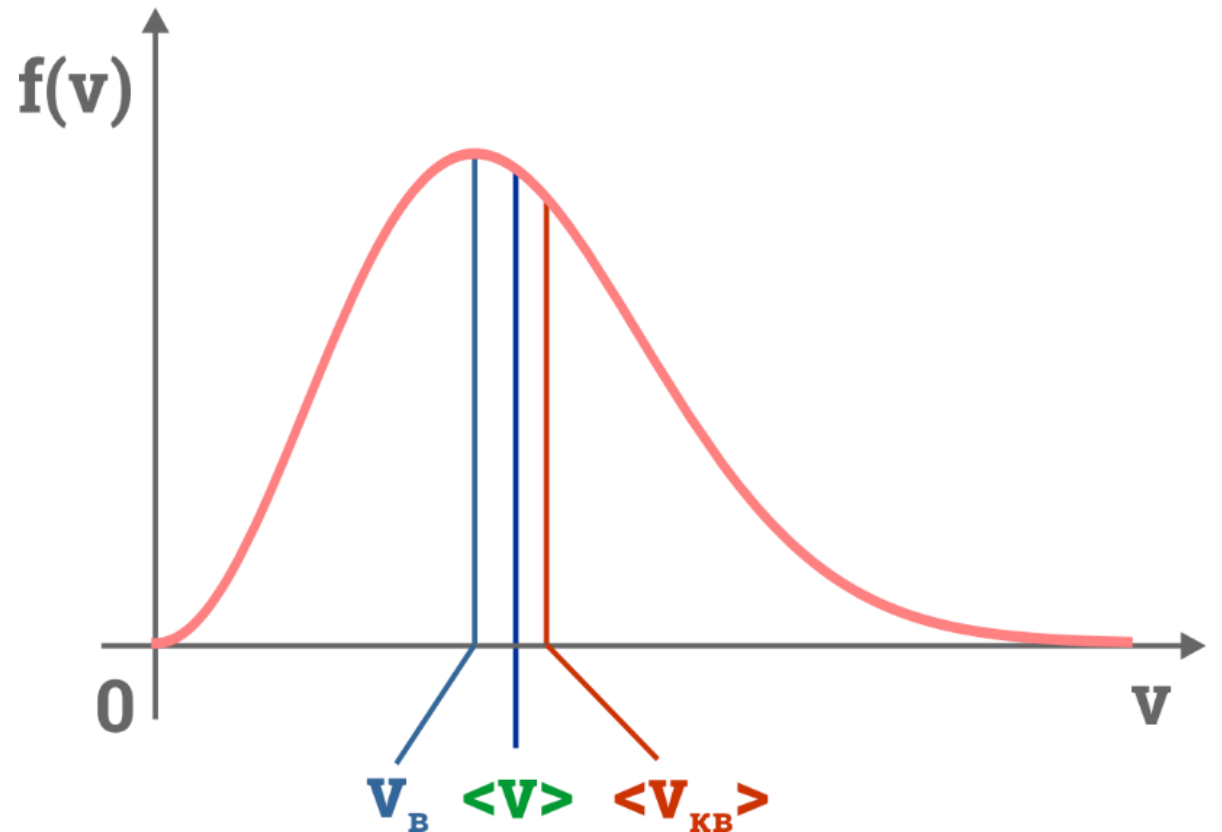
$$f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv}$$



# Закон о распределении молекул идеального газа по скоростям

$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{\left[ -\frac{m_0 v^2}{2kT} \right]}$$

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1$$



# Закон о распределении молекул идеального газа по скоростям

Наиболее вероятная скорость

$$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

Средняя арифметическая скорость

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$$

# Распределение Максвелла

Распределение молекул по скоростям

$$dN(v) = N \cdot 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{\left[ -\frac{m_0 v^2}{2kT} \right]} \cdot dv$$

# Распределение Максвелла

$$v = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m_0}}$$

Распределение молекул по **энергиям** теплового движения

$$dN(v) = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-\frac{3}{2}} \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} d\varepsilon$$

# Распределение Больцмана

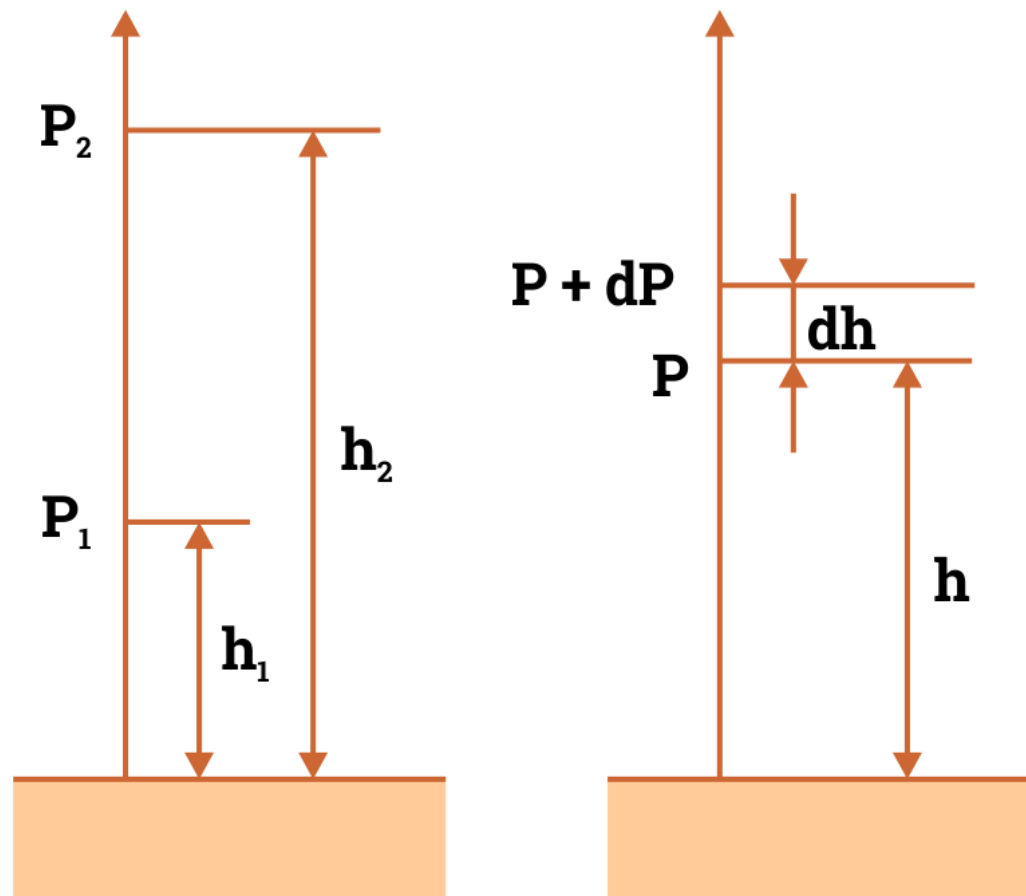
Распределение молекул в силовом поле

Разность давлений

$$P - (P + dP) = \rho g dh$$

$$dP = -\rho g dh$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT}$$



# Распределение Больцмана

Распределение молекул в силовом поле

Разность давлений

$$P - (P + dP) = \rho g dh \qquad dP = -\frac{\mu g}{RT} P dh$$

$$dP = -\rho g dh$$

$$P_2 = P_1 e^{-\frac{\mu g}{RT}(h_2 - h_1)}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT}$$

# Распределение Больцмана

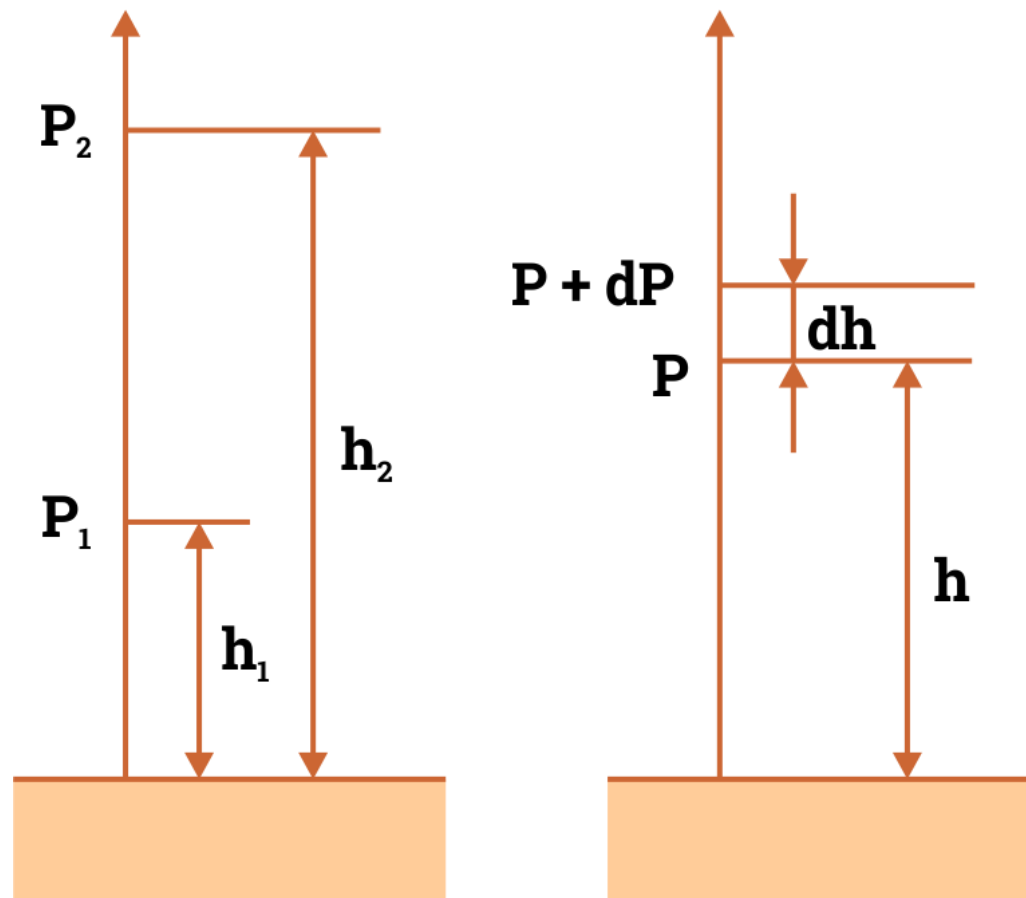
## Барометрическая формула

$$P = P_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}}$$

$$P = nkT$$

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0 gh}{kT}} = n_0 e^{-\frac{W_{\text{ПОТ}}}{kT}}$$

$$W_{\text{ПОТ}} = m_0 gh$$

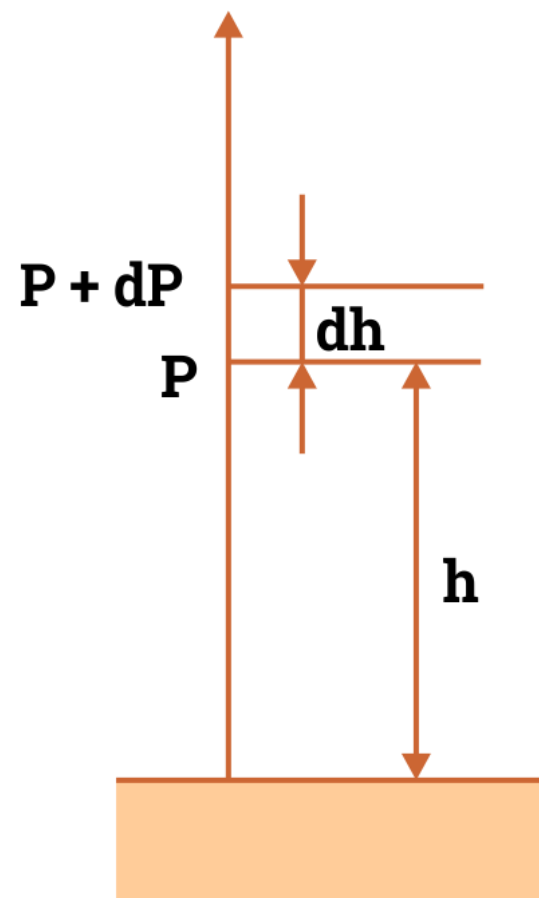
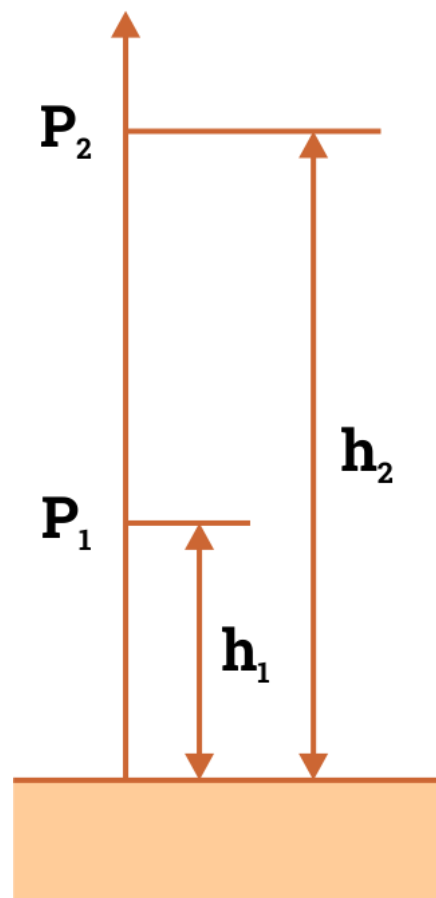




# Распределение Больцмана

$$n = n_0 e^{-\frac{W_{\text{ПОТ}}}{kT}}$$

При постоянной температуре плотность газа больше там, где меньше потенциальная энергия его молекул

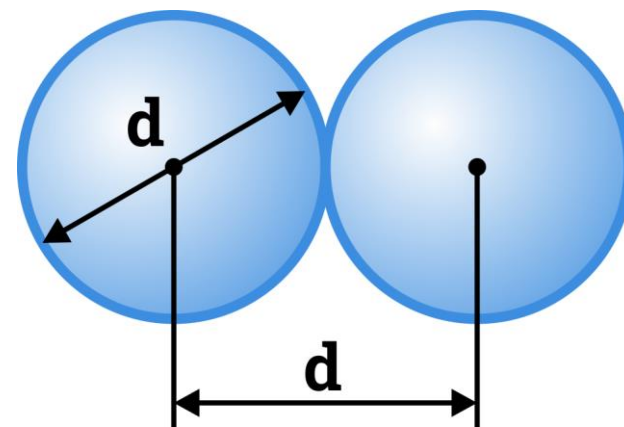


# Длина свободного пробега

– расстояние между двумя  
последовательными  
столкновениями молекулы

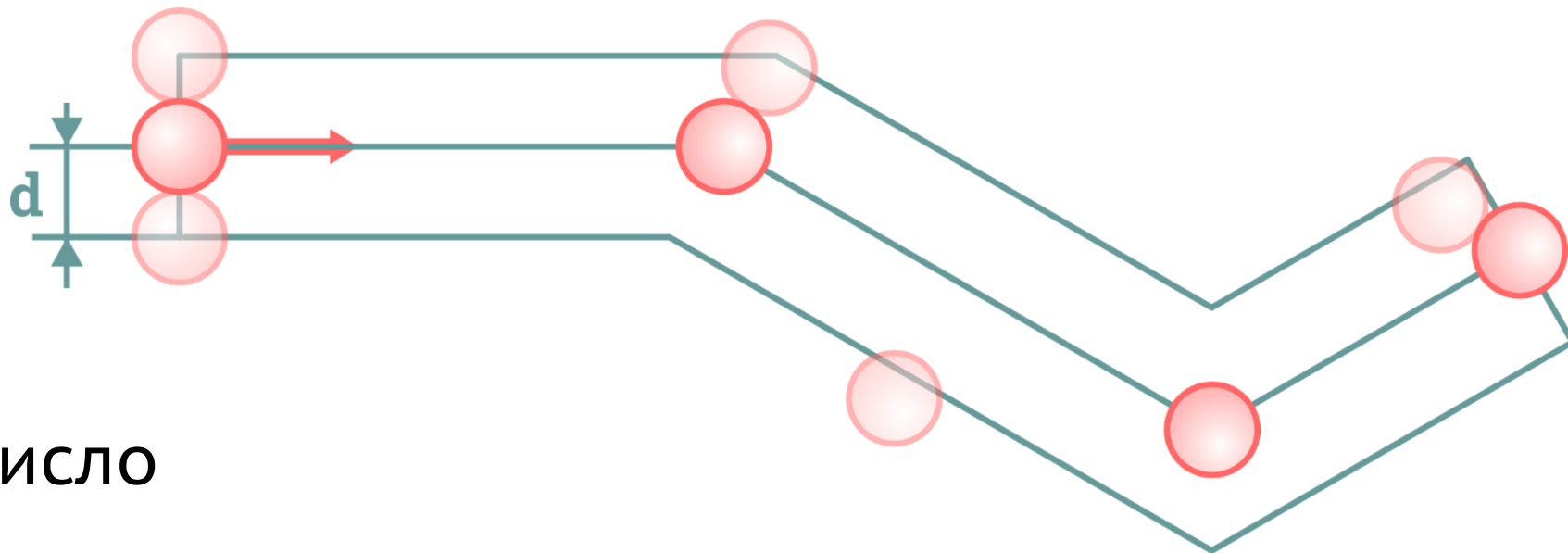
**Эффективный диаметр молекулы  $d$**

– минимальное расстояние, на  
которое сближаются при  
столкновении центры двух молекул



# Длина свободного пробега

$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle}$$



$\langle z \rangle$  – среднее число  
столкновений, испытываемых  
одной молекулой газа за 1 с

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle$$