



# План лекции

---

	Наименование раздела	Количество слайдов
	Введение	1
1	Основные положения молекулярной физики	3
2	Эмпирические законы молекулярной физики	4
3	Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа	4
4	Идеальный газ в поле тяготения Земли	3
	Вопросы в экзаменационных билетах	1

# Введение

---

## Методы исследований макроскопических процессов

**Макроскопические процессы** – это процессы, происходящие с веществом (жидким, газообразным), в котором содержится огромное число молекул, атомов. Например, нагрев, изменение давления и др.

**Методы исследований макропроцессов:**

- *молекулярно-кинетический*; соответствующий раздел физики: молекулярная физика (тема этой и следующей лекций);
- *термодинамический*; соответствующий раздел физики: термодинамика (тема последующих лекций).

**Оба метода взаимосвязаны и дополняют друг друга.**

---

# Раздел 1.

## Основные положения молекулярной физики

# 1. Основные положения молекулярной физики

---

## 1.1 Статистичность (законы больших чисел)

1. Все вещества состоят из отдельных частиц: молекул, атомов, - которые находятся в непрерывном хаотическом движении, независимо друг от друга.
2. Количество частиц – огромно, сопоставимо с числом Авогадро ( $\sim 6 \times 10^{23}$  частиц в моле), невозможно учесть каждую частицу в отдельности.
3. Законы поведения огромного числа частиц являются *статистическими* законами, позволяющими рассчитывать *средние* значения параметров этих частиц.

Главное: все *макроскопические процессы*, протекающие в веществе, обусловлены *совокупным действием огромного числа частиц* этого вещества.

Свойства, параметры вещества (температура, давление и др.) определяются *усреднёнными* значениями характеристик частиц (скорость, энергия и т.д.), а не характеристиками отдельных молекул, атомов.

# 1. Основные положения молекулярной физики

---

## 1.2 Модель идеального газа

**Гипотеза:** поведение частиц (молекул, атомов) в веществе – аналогично поведению молекул в разреженном газе (отдельные движущиеся твёрдые «шарики»):

1. Частицы (молекулы) *упруго сталкиваются* друг с другом и со стенками сосуда.
2. Между частицами (молекулами) *отсутствуют силы взаимодействия*: притяжения или отталкивания.
3. Собственный *объём частиц* (молекул) *пренебрежимо мал* по сравнению с объёмом сосуда.

**Основная модель молекулярной физики**, основанная на этой гипотезе – это *модель идеального газа*.

# 1. Основные положения молекулярной физики

---

## 1.3 Размеры частиц (молекул, атомов)

Следует различать:

- реальный размер частицы ( $d$ ) и
- эффективный размер ( $d_{\text{эфф}}$ ) и эффективное сечение частицы ( $\sigma$ )

$$\sigma = \pi d^2$$

$$d_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \sigma} = 2 d$$

Примеры реальных размеров молекул:

Водород  $d = 2,8 \times 10^{-10}$  м

Азот  $d = 3,8 \times 10^{-10}$  м

Кислород  $d = 3,6 \times 10^{-10}$  м

---

## **Раздел 2.**

# **Эмпирические законы молекулярной физики**

## 2. Эмпирические законы молекулярной физики

---

### 2.1 Законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака для идеального газа

Экспериментально было установлено, что идеальный газ может быть описан всего *тремя* параметрами: температура ( $T$ ), давление ( $p$ ), объём ( $V$ ).

Определены частные законы, связывающие эти три параметра попарно (при постоянном третьем параметре и постоянной массе газа).

Закон Шарля часто называют также законом Гей-Люссака, но для изохорного процесса,  $V = \text{Const}$

## 2. Эмпирические законы молекулярной физики

---

### 2.2 Уравнение Клапейрона

В результате обобщения частных эмпирических законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака была установлена связь всех трёх параметров идеального газа ( $T$ ,  $p$ ,  $V$ ). Это – уравнение Клапейрона.

## 2. Эмпирические законы молекулярной физики

---

### 2.2 Уравнение Клапейрона-Менделеева

Окончательная форма *уравнения состояния идеального газа* была установлена Д.И. Менделеевым. Уравнение Клапейрона-Менделеева связывает все три параметра ( $T$ ,  $p$ ,  $V$ ) и массу газа ( $m$ ) через универсальную газовую постоянную  $R$ .

Универсальная газовая постоянная ( $R$ ) связана с постоянной Больцмана ( $k$ ) и числом Авогадро ( $N_A$ ):

$$R = k \times N_A$$

$M$  – молярная масса

$\nu$  – количество вещества

## 2. Эмпирические законы молекулярной физики

---

### 2.2 Расчёт количества вещества

Определение:

Полезные расчётные формулы:

$$V_m = 22,4 \text{ л/моль} - \text{молярный объём}$$

Остальные величины определены  
ранее

---

## **Раздел 3.**

# **Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа**

# 3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) идеального газа

---

## 3.1 Собственно основное уравнение

Другие формы записи основного уравнения МКТ:

$p$  – давление газа

$m_0$  – масса молекулы газа

$v$  – скорость движения молекул

$n$  – концентрация молекул,  $n = N/V$

$N$  – число молекул

$V$  – объём

$E_{k0}$  - кинетическая энергия движения молекулы,  $E_{k0} = (1/2) \times m_0 v^2$

$\rho$  – плотность газа,  $\rho = m/V$

$m$  – масса газа,  $m = N \times m_0$

*Замечание: знак «черта сверху» означает среднее значение*

# 3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) идеального газа

---

## 3.2 Связь основного уравнения МКТ с уравнением Клапейрона-Менделеева

*Учтём, что:*

$$n = N/V,$$

$$m = N \times m_0,$$

$E$  – суммарная  
кинетическая  
энергия всех  
молекул газа:



или

или



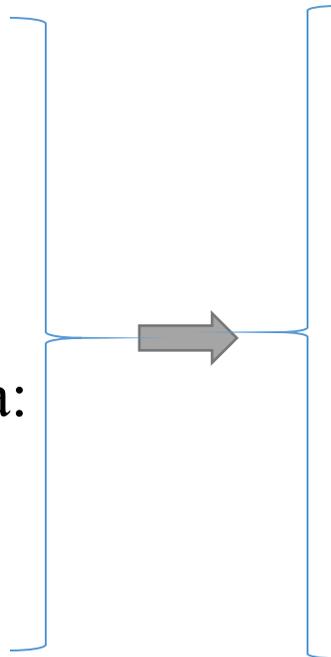
# 3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) идеального газа

## 3.2 Связь основного уравнения МКТ с уравнением Клапейрона-Менделеева (окончание)

Основное уравнение МКТ:



Уравнение Клапейрона-Менделеева:



или

=

т.к.  $R = k \times N_A$   
 $M = m_0 \times N_A$

**В итоге:** установлена связь между микропараметрами (скорость, кинетическая энергия молекул) и макропараметрами (температура, давление, объём)

# 3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) идеального газа

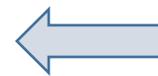
---

## 3.3 Вывод основного уравнения МКТ (факультативно)

Необходимо рассчитать давление молекул газа стенку на стенку

**F1** – сила, с которой одна частица со скоростью  $v$  «давит» на стенку за счёт передачи ей импульса  $\Delta p$  за время  $\Delta t$

**Z** – количество частиц, способных достичь стенки за время  $\Delta t$  и оказать на неё давление



Это – основное уравнение МКТ

---

## Раздел 4. Идеальный газ в поле тяготения Земли

# 4. Идеальный газ в поле тяготения Земли

---

## 4.1 Физическая модель

Молекулы газа:

- совершают хаотическое тепловое движение
- и испытывают притяжение к Земле



Разность давлений газа на высоте  $h$  и на высоте  $h + \Delta h$  равна весу газа, заключённому между этими высотами, и составляет (для единичной площади  $S$ ):

## 4. Идеальный газ в поле тяготения Земли

---

### 4.2 Барометрическая формула

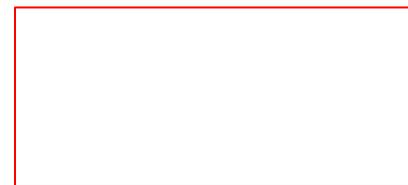
Исходное уравнение (*предыд.слайд*)  $p - (p + dp) = \rho \times g \times dh$  (1)

Из уравнения Клапейрона-Менделеева: (2)

Подставим уравнение (2) в (1): (3)

Проинтегрируем уравнение (3): (4)

Получим:



 **Барометрическая формула**

## 4. Идеальный газ в поле тяготения Земли

---

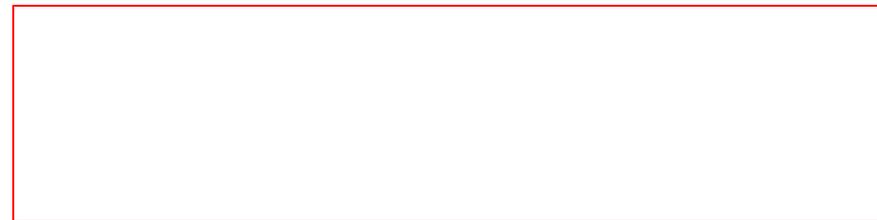
### 4.3 Распределение Больцмана

Исходное уравнение (распределение Больцмана): (1)

Из основного уравнения МКТ

(связь давления и концентрации молекул):  $p \sim n$  (2)

Из уравнения (1) с учётом (2) получим:



*Распределение Больцмана*

# Вопросы в экзаменационных билетах

---

1. Основные положения молекулярной физики
2. Эмпирические законы молекулярной физики
3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа
4. Идеальный газ в поле тяготения Земли

***Важно:***

*Вопросы совпадают с названиями разделов лекции*

