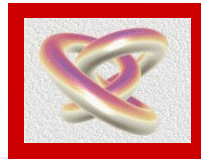


The background of the slide is white, scattered with numerous spheres of varying sizes. Some spheres are a deep purple color, while others are white with a textured, crater-like surface, resembling small planets or moons. The spheres are distributed across the entire page, creating a dynamic and scientific atmosphere.

# Лекция

# ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Составители: д.т.н., профессор Симдянкин А.А., к.п.н., доцент Симдянкина Е.Е.



## Основы МКТ

---

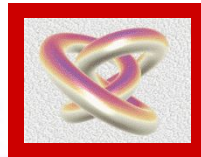
*Левкип* и *Демокрит* – 400 лет до н.э.

*М.В. Ломоносов* – XVIII век.

«О причине теплоты и холода» и

«О коловратном движении корпускул»

---



## ОСНОВЫ МКТ

---

### ● Молекулярно-кинетической теорией

называют учение о строении и

свойствах вещества на основе

представления о существовании

атомов и молекул как наименьших

частиц химического вещества.

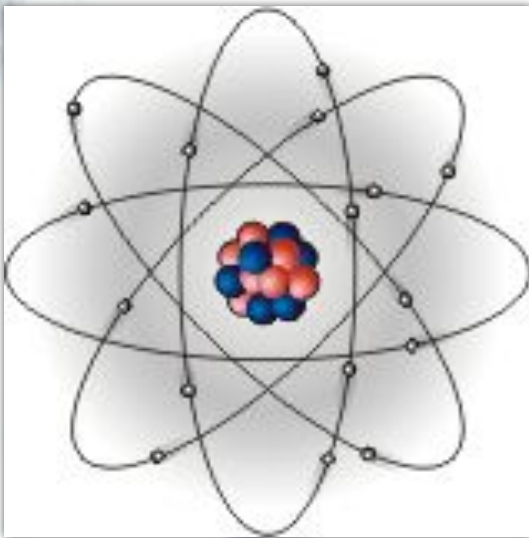
---

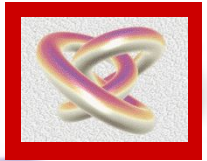


## Основные положения МКТ

---

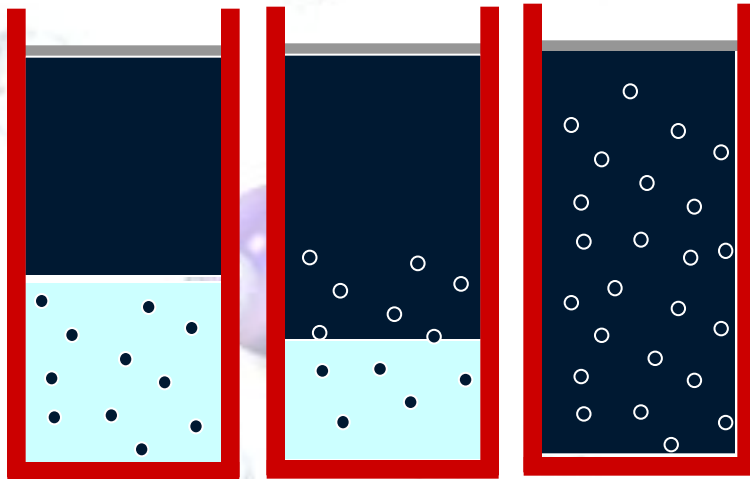
- 1. Все вещества – жидкие, твердые и газообразные – образованы из мельчайших частиц – молекул (атомов), которые сами состоят из более мелких элементарных частиц (электронов, протонов, нейтронов).**





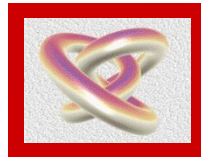
## Основные положения МКТ

---



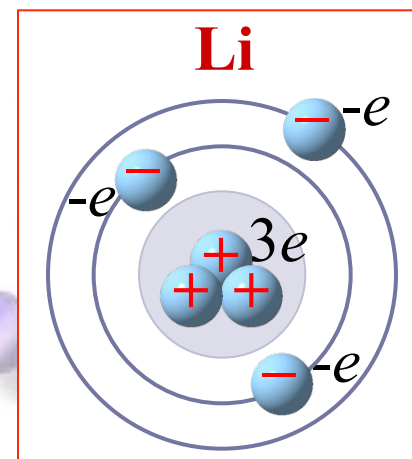
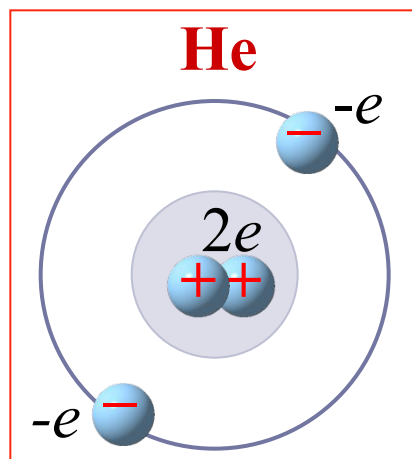
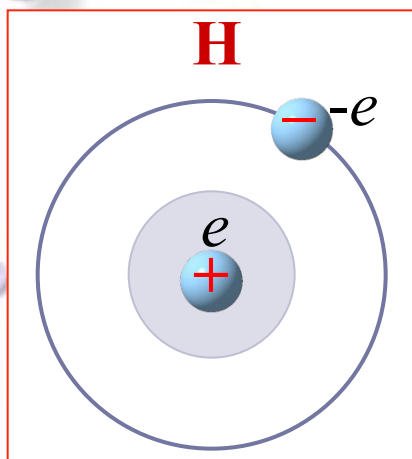
**2. Атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.**

---

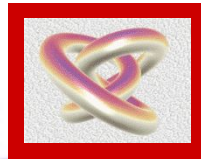


## Основные положения МКТ

### 3. Частицы взаимодействуют друг с другом силами, имеющими электрическую природу.



Гравитационное взаимодействие между частицами пренебрежимо мало.



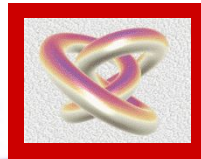
Опытные обоснования МКТ

## Существование молекул

### 1. Закон кратных отношений:

*при образовании из двух элементов различных веществ массы одного из элементов в разных соединениях находятся в кратных отношениях*





## Опытные обоснования МКТ

### Существование молекул

**7 г** азота, соединяясь с **4 г** кислорода, образуют  
11 г закиси азота  $N_2O$ ,

**8 г** » » » 15 г окиси азота  $NO$ ,

**12 г** » » » 19 г азотистого ангидрида  $N_2O_3$ ,

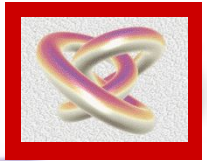
**16 г** » » » 23 г двуокиси азота  $NO_2$ ,

**20 г** » » » 27 г азотного ангидрида  $N_2O_5$ .

Массы кислорода, приходящиеся на одну и ту же массу азота (7 г), в этих соединениях относятся как

$$4 : 8 : 12 : 16 : 20 = 1 : 2 : 3 : 4 : 5.$$





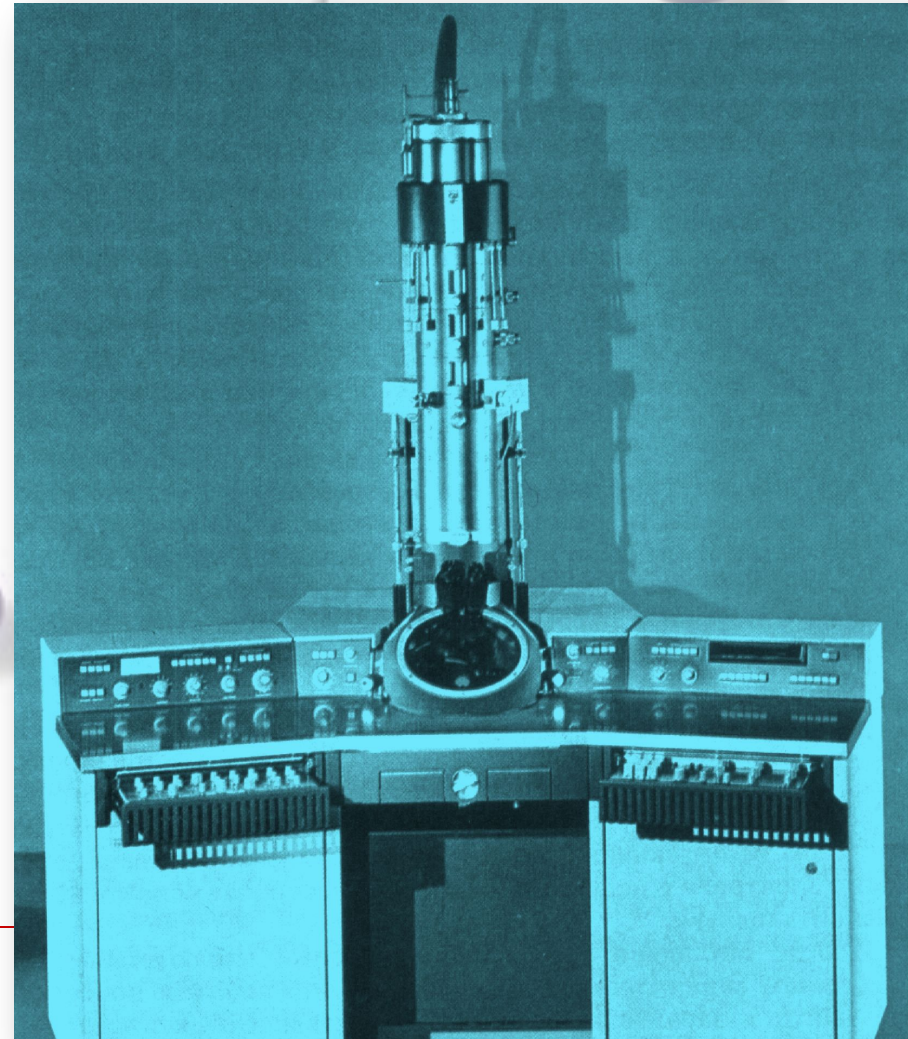
Опытные обоснования МКТ  
**Существование молекул**

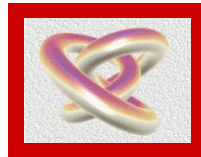
---

**2. Молекулы  
наблюдаются с  
помощью ионного  
проектора,  
электронного  
микроскопа**

---

Современный электронный  
микроскоп



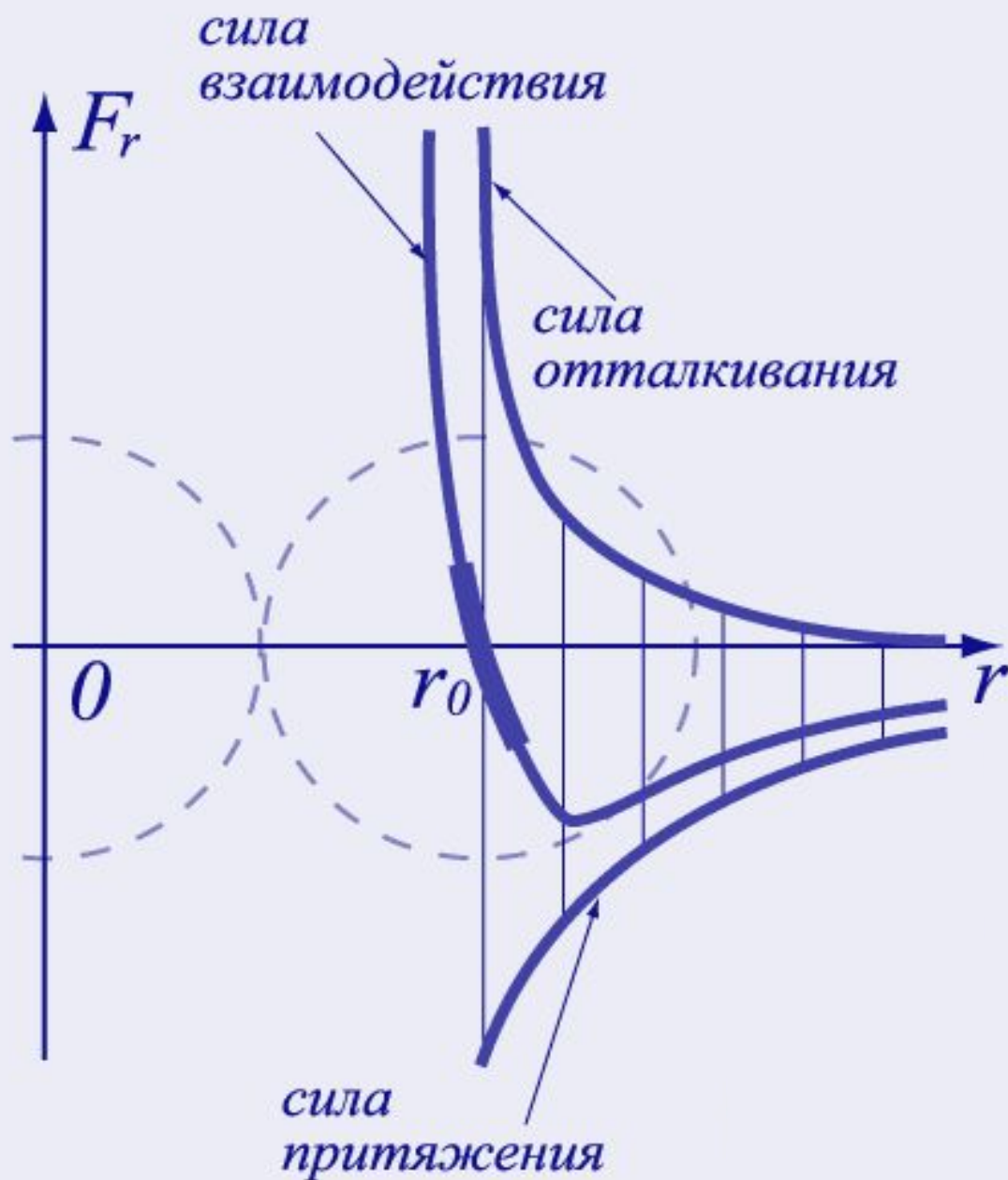
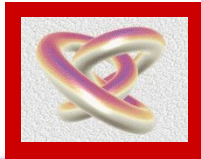


Опытные обоснования МКТ

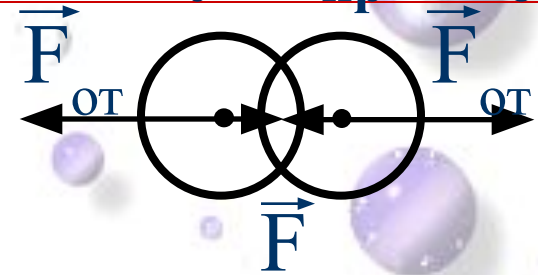
## **Взаимодействие молекул**

---

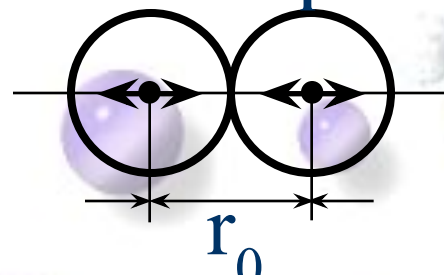
- Силы притяжения и отталкивания действуют одновременно.
  - Силы электромагнитной природы.
-



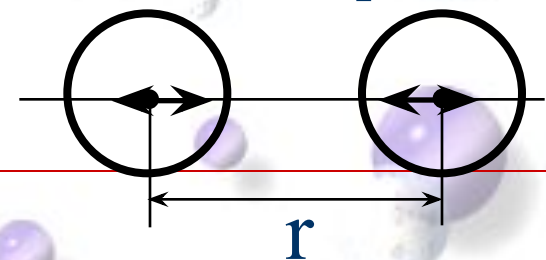
$r < r_0 \quad F_{\text{пр}} < F_{\text{от}}$

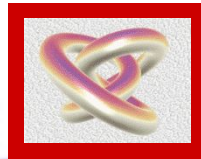


$r = r_0 \quad F_{\text{пр}} = F_{\text{от}}$



$r > r_0 \quad F_{\text{пр}} > F_{\text{от}}$





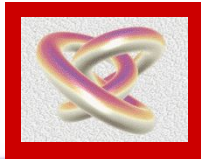
Опытные обоснования МКТ

## **Хаотическое движение молекул**

---

Наиболее ярким экспериментальным подтверждением представлений молекулярно-кинетической теории о беспорядочном движении атомов и молекул является *броуновское движение*.

---

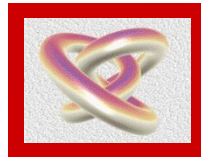


Опытные обоснования МКТ

## Хаотическое движение молекул



Фотография броуновского движения



Опытные обоснования МКТ

## **Хаотическое движение молекул**

---

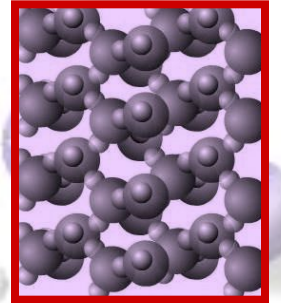
- 1. Броуновское движение.**
  - 2. Диффузия.**
  - 3. Давление газа на стенки сосуда.**
  - 4. Стремление газа занять любой объем.**
-



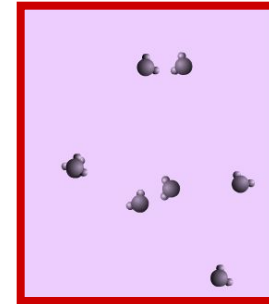
## ОСНОВЫ МКТ

---

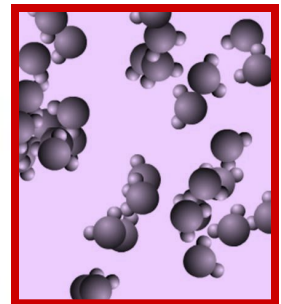
Беспорядочное хаотическое движение молекул называется *тепловым движением*.



Кинетическая энергия теплового движения растет с возрастанием *температуры*.

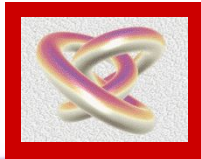


*Внутренняя энергия* — это сумма энергий молекулярных взаимодействий и энергии теплового движения молекул.



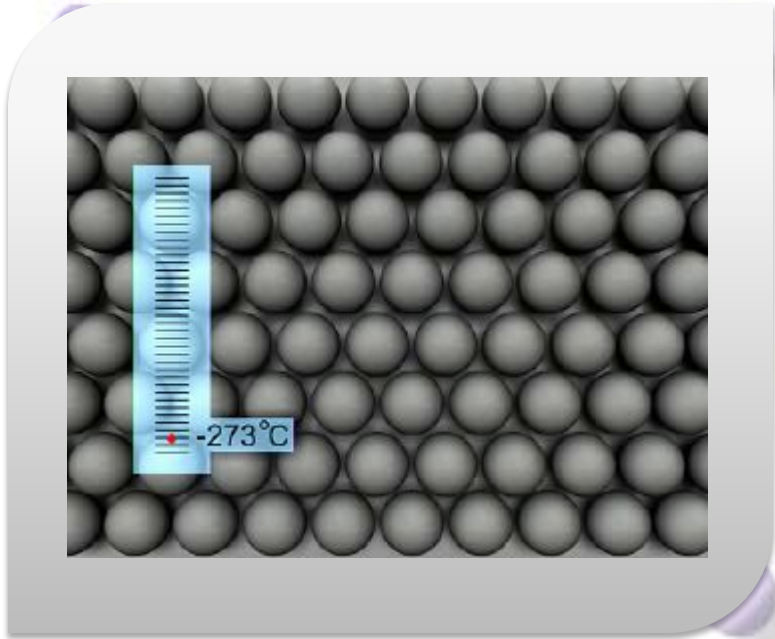
---

**Понятие энергии относится всегда к системе тел.**

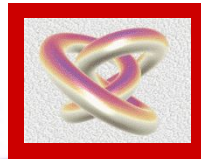


# ОСНОВЫ МКТ

---

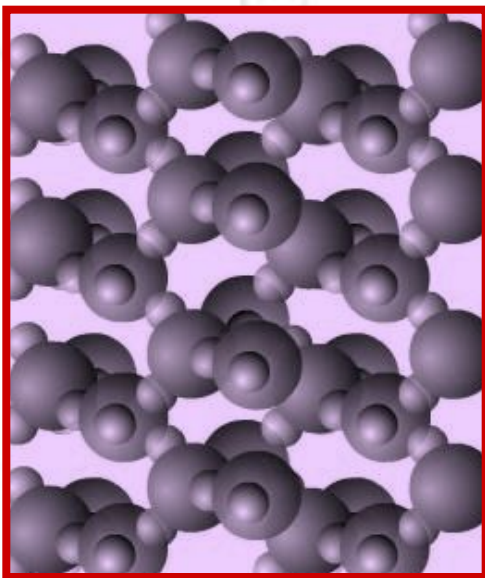






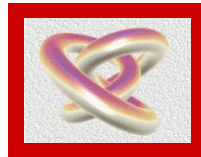
## ОСНОВЫ МКТ

---



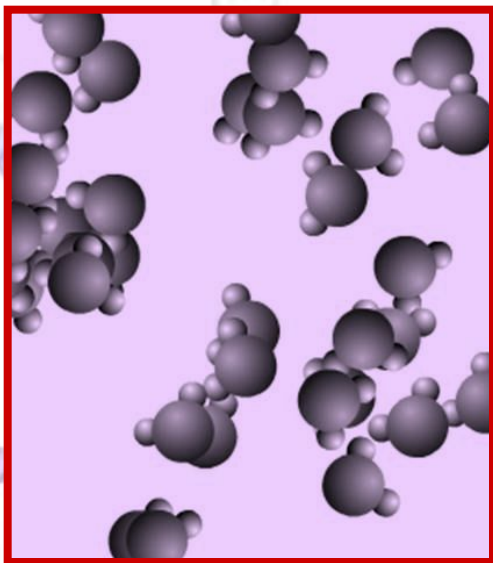
В *твердых телах* молекулы совершают беспорядочные колебания около фиксированных центров (положений равновесия). Эти центры могут быть расположены в пространстве нерегулярным образом (**аморфные тела**) или образовывать упорядоченные объемные структуры (**кристаллические тела**).

---



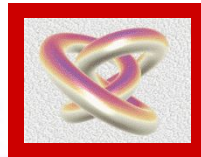
## ОСНОВЫ МКТ

---



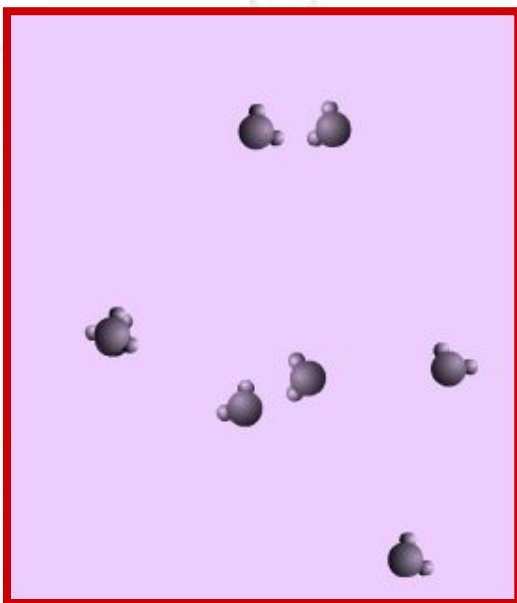
В *жидкостях* молекулы имеют значительно большую свободу для теплового движения. Они не привязаны к определенным центрам и могут перемещаться по всему объему жидкости. Этим объясняется текучесть жидкостей.

---



## Основы МКТ

---



В *газах* расстояния между молекулами обычно значительно больше их размеров. Силы взаимодействия между молекулами на таких больших расстояниях малы, и каждая молекула движется вдоль прямой линии до очередного столкновения с другой молекулой или со стенкой сосуда.

---



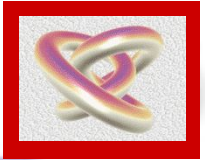
## Идеальный газ

---

Простейшей моделью молекулярно-кинетической теории является модель *идеального газа*.

*В кинетической модели идеального газа молекулы рассматриваются как идеально упругие шарики, взаимодействующие между собой и со стенками только во время упругих столкновений.*

---



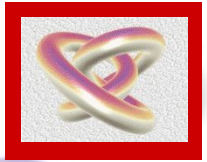
## Идеальный газ

---

**Суммарный объем всех молекул предполагается малым по сравнению с объемом сосуда, в котором находится газ.**

**Модель *идеального газа* достаточно хорошо описывает поведение реальных газов в широком диапазоне давлений и температур.**

---



## Температура

---

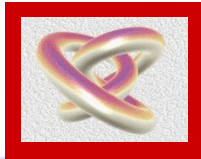
Температурная шкала Кельвина называется *абсолютной (термодинамической) шкалой температур*.

$$T = t + 273,15$$

В СИ единицей измерения температуры является **кельвин - К**.

Комнатная температура  $T_C = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  по шкале Кельвина равна  $T_K = 293,15 \text{ К}$ .

---



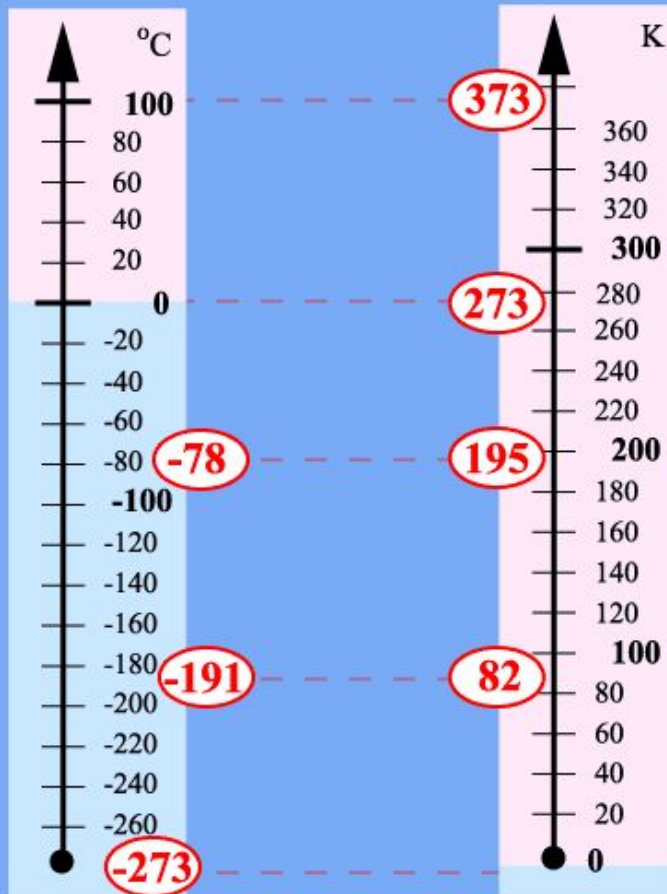
# Температура

Шкала Цельсия

Термодинамическая  
шкала

$$t = T - 273$$

$$T = t + 273$$



кипение воды



плавление льда



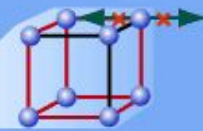
сухой лед ( $CO_2$ )

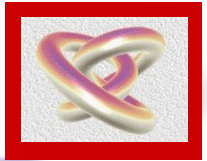


жидкий воздух



абсолютный ноль





## Температура

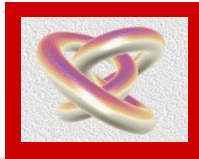
---

Понятие ***температуры*** тесно связано с понятием теплового равновесия.

***Тепловое равновесие*** – это такое состояние системы тел, находящихся в тепловом контакте, при котором не происходит теплопередачи от одного тела к другому, и все макроскопические параметры тел остаются неизменными. Температура – это физический параметр, одинаковый для всех тел, находящихся в тепловом равновесии.

---





## ОСНОВЫ МКТ

---

### *Макроскопические параметры:*

- ◆ **давление,**
- ◆ **объем,**
- ◆ **температура.**

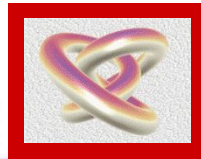
*$p$     $V$     $T$*

?

---

The background of the slide is filled with numerous 3D-rendered spheres of varying sizes. The spheres are primarily purple and blue, with some appearing to have a textured or speckled surface. They are scattered across the white background, creating a sense of depth and movement. The lighting on the spheres gives them a realistic, three-dimensional appearance.

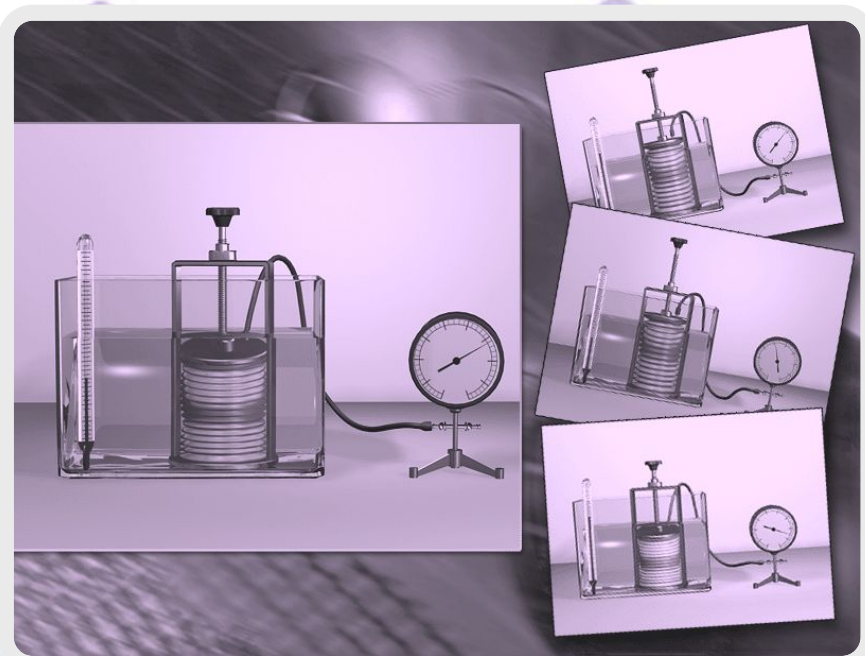
# ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ



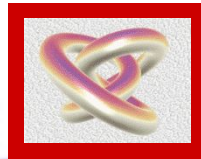
# ИЗОПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ

(газовые законы)

---



Процессы,  
протекающие при  
неизменном значении  
одного из параметров  
( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ) для данной  
массы газа, называют  
*изопроцессами.*



## Изотермический процесс (закон Бойля-Мариотта)

---

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

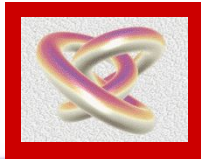
1662 г.

Бойль (англ.)

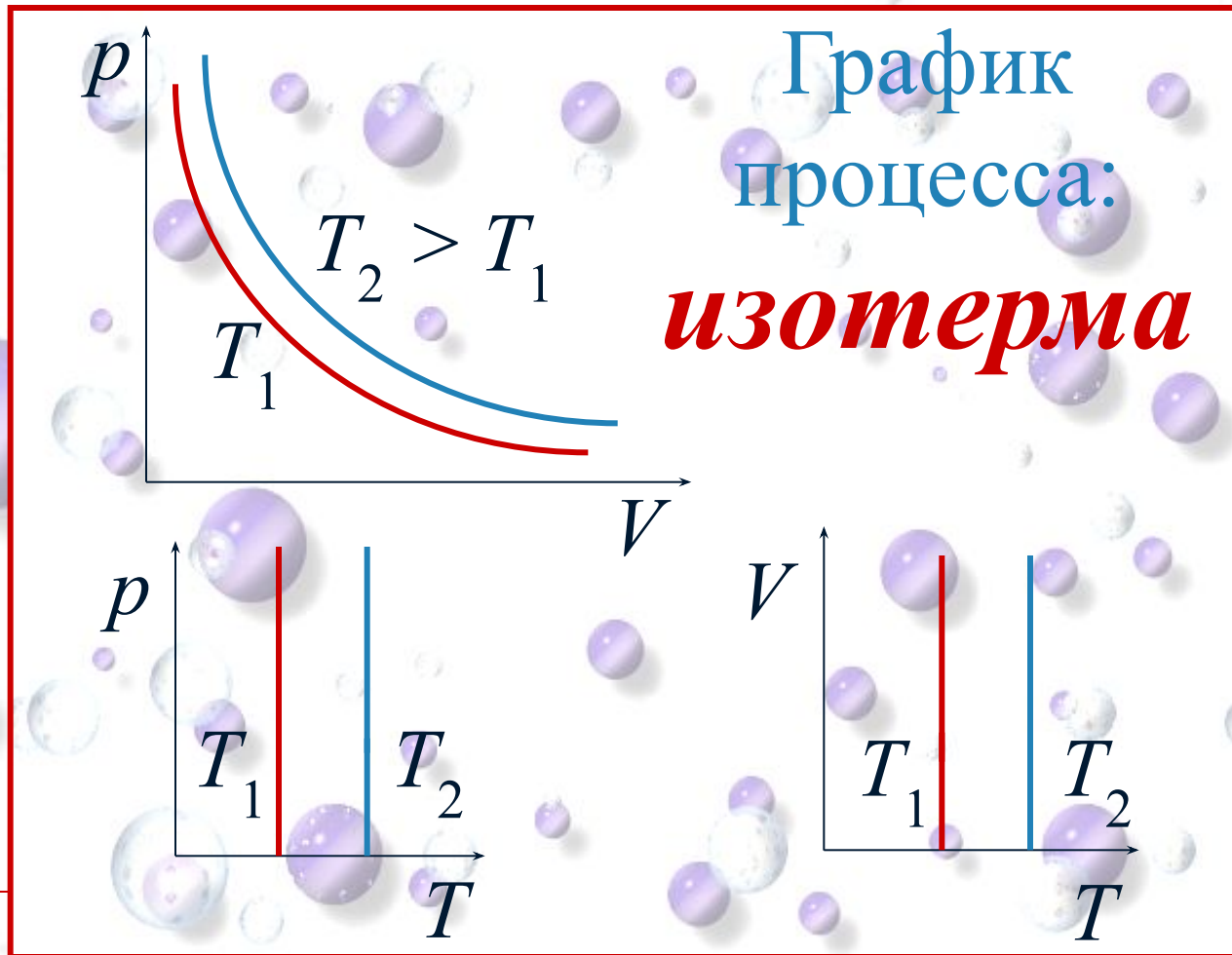
1676 г. Мариотт(фр.)

*При*  $T = \text{const}; m = \text{const}$

$$pV = \text{const} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$



# Изотермический процесс (закон Бойля-Мариотта)



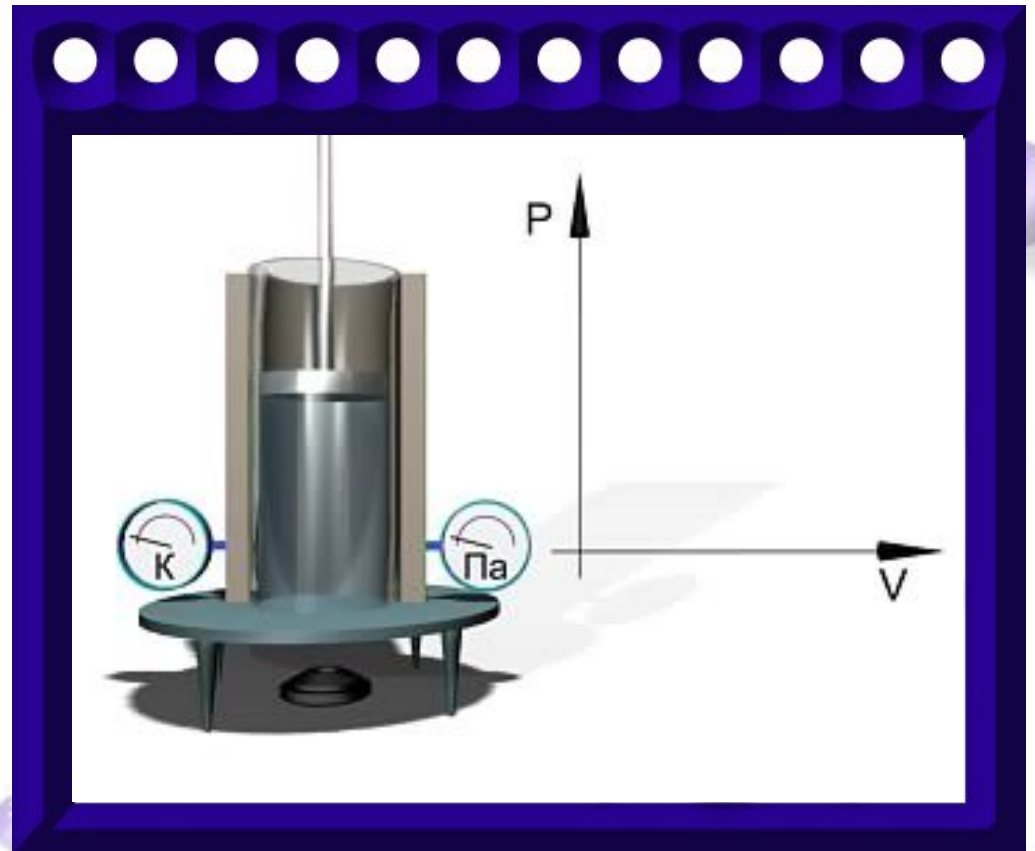


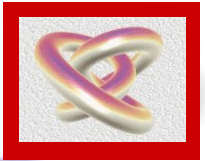
# Прикольный процесс (закон Бойля-Мариотта)

При  $T = \text{const}$ ;  
 $m = \text{const}$

$$pV = \text{const}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$





## Изобарный процесс (закон Гей-Люссака)

---

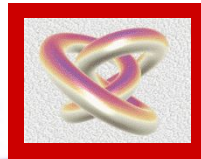
*Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:*

При  $p = \text{const}; m = \text{const}$

$$V = V_0 (1 + \alpha t)$$

---

***Изобарным* процессом называют процесс, протекающий при неизменном давлении  $p$ .**



## Изобарный процесс (закон Гей-Люссака)

---

$$V = V_0 (1 + \alpha t)$$

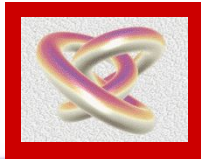
где  $V_0$  – объем газа при температуре  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .  
Коэффициент  $\alpha$  равен  $(1/273,15)\text{ K}^{-1}$ .

Его называют *температурным коэффициентом объемного расширения газов*.

В термодинамической  
форме:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$





# Изобарный процесс (закон Гей-Люссака)

**Условие  
процесса**

$$p = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

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

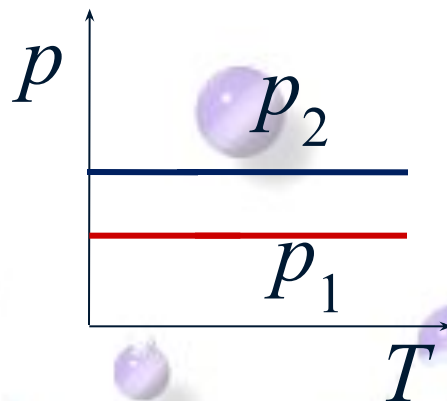
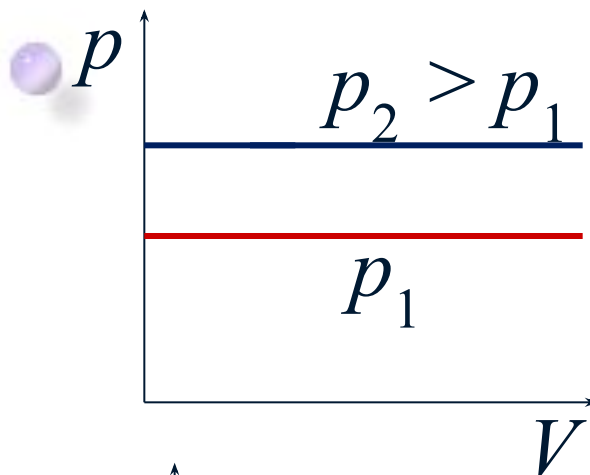
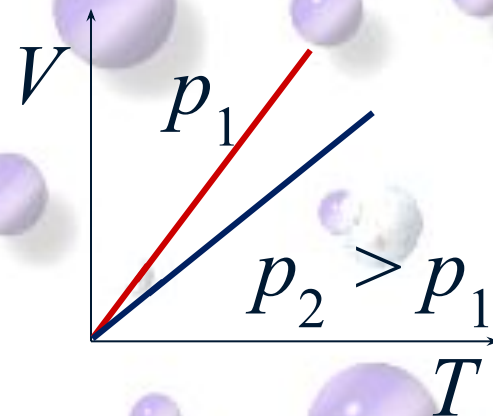
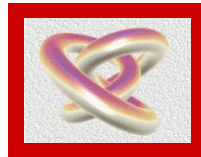


График  
процесса:  
***изобара***





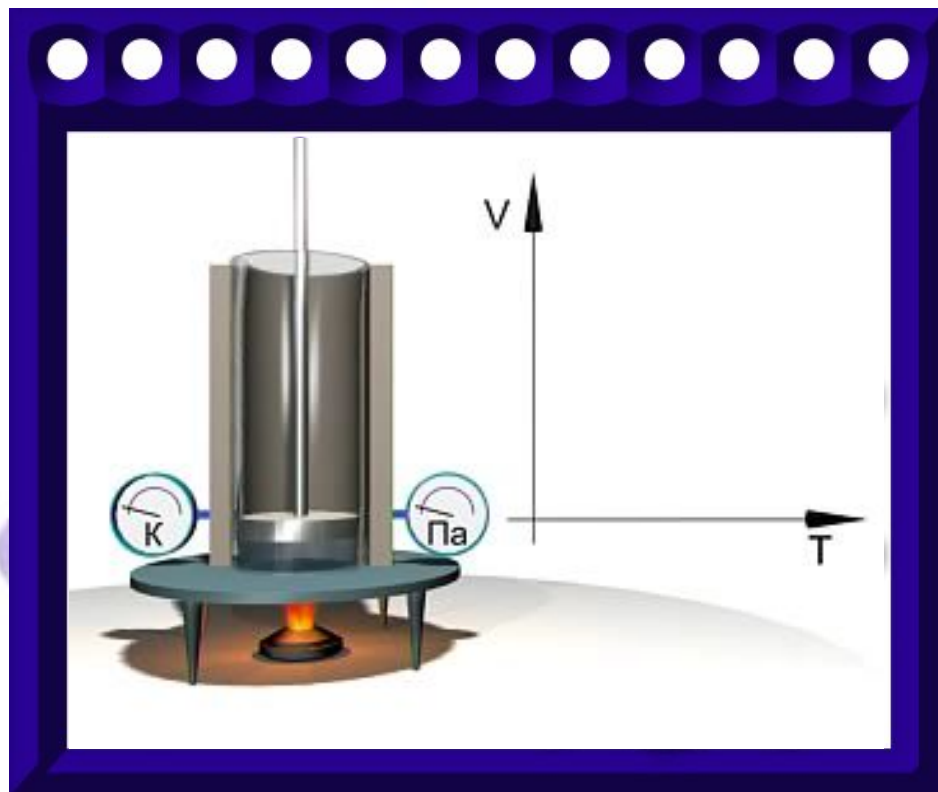
# Изобарный процесс (закон Гей-Люссака)

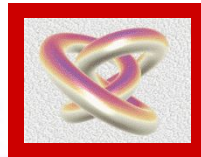
Условие  
процесса

$$p = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

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





## Изохорный процесс (закон Гей-Люссака – Шарля)

---

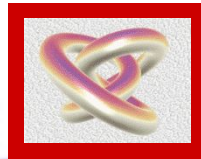
*Давление газа  $p$  изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре:*

При  $V = \text{const}; m = \text{const}$

$$p = p_0 (1 + \alpha t)$$

---

*Изохорный процесс* – это процесс протекающий при постоянном объеме  $V$ .



Изохорный процесс  
(закон Гей-Люссака – Шарля)

---

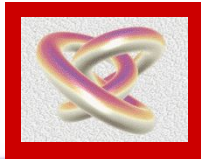
$$p = p_0 (1 + \alpha t)$$

где  $p_0$  – давление газа при температуре  $0^\circ\text{C}$ .  
Коэффициент  $\alpha$  равен  $(1/273,15) \text{ K}^{-1}$ .

Его называют *температурным коэффициентом давления*.

В термодинамической  
форме:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



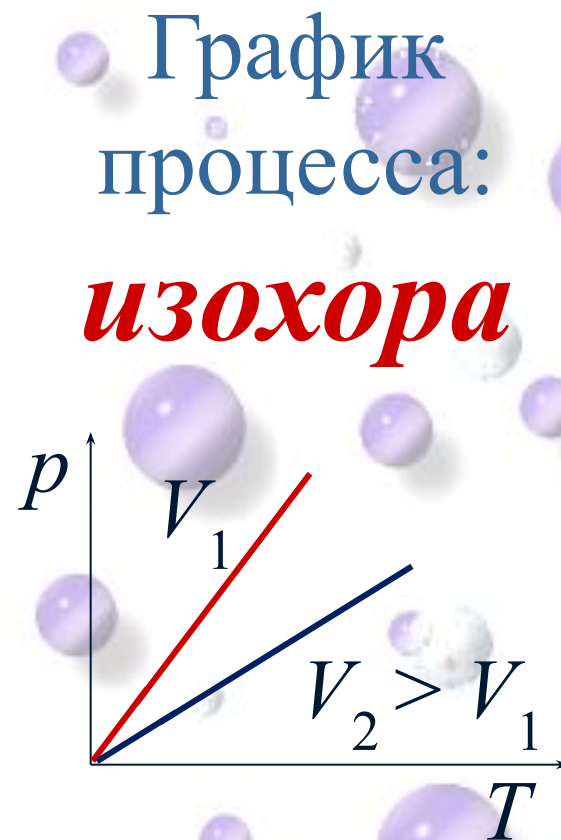
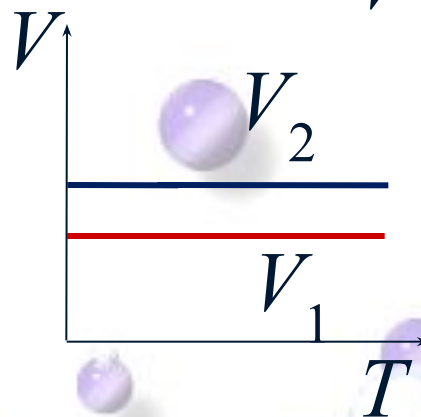
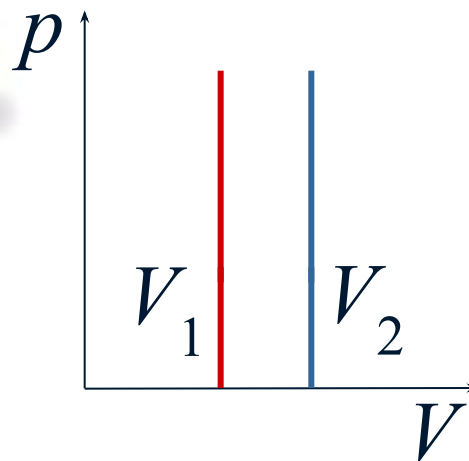
# Изохорный процесс (закон Гей-Люссака – Шарля)

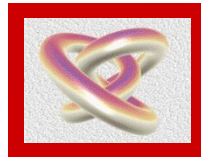
Условие  
процесса

$$V = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

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





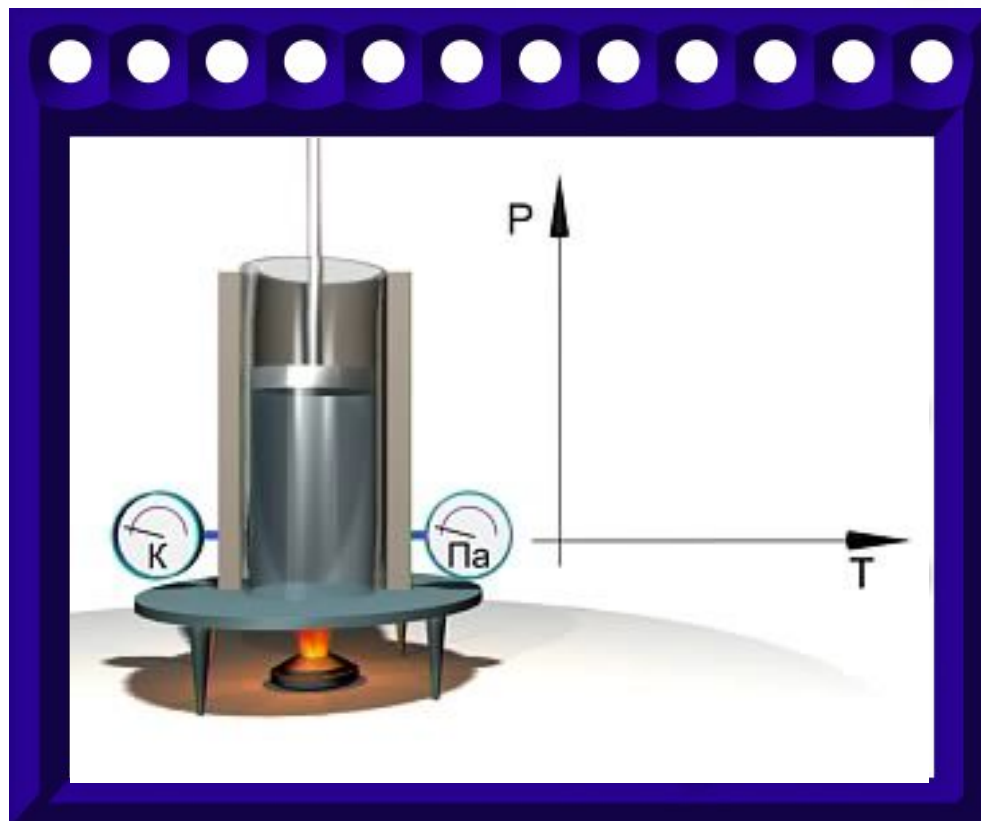
# Изохорный процесс (закон Гей-Люссака – Шарля)

Условие  
процесса

$$V = \text{const}$$

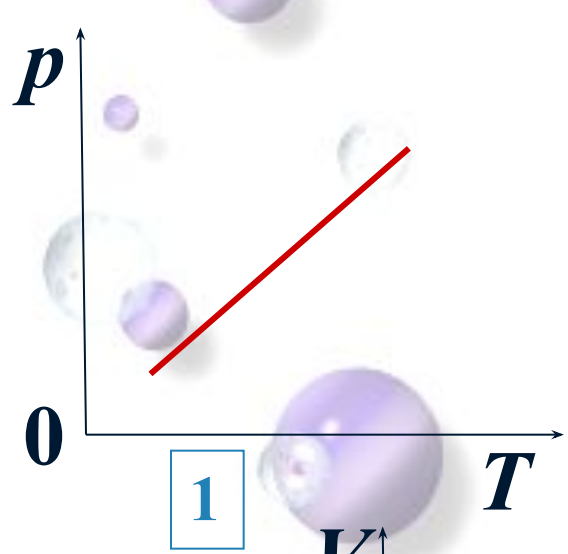
$$m = \text{const}$$

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

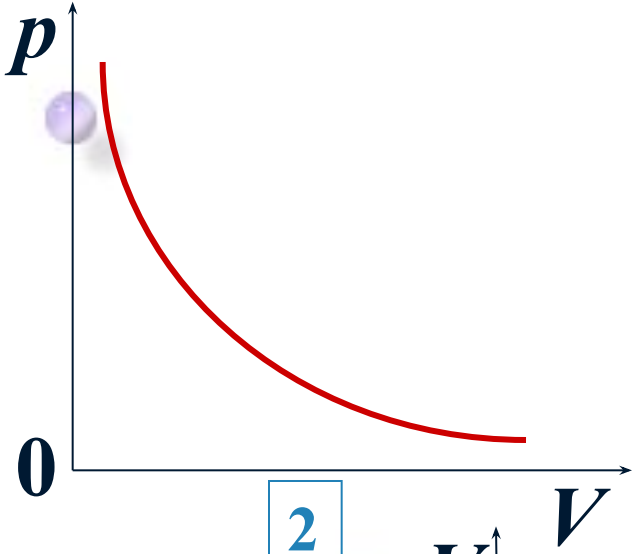


# Задание

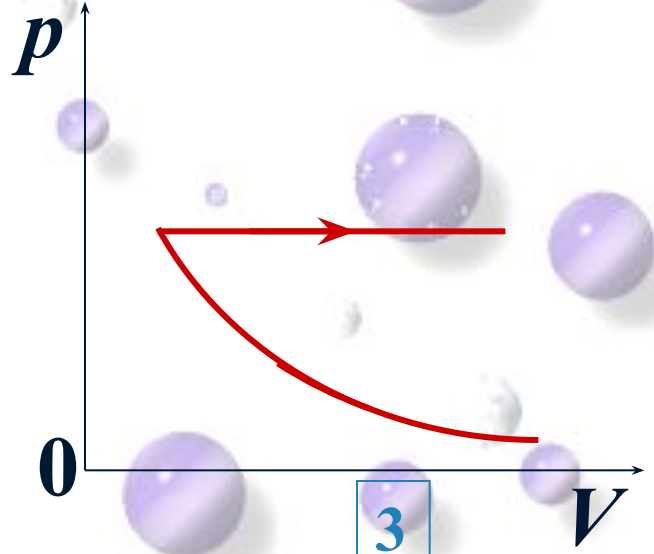
Назовите процессы, изображенные на рисунках 1 – 5.



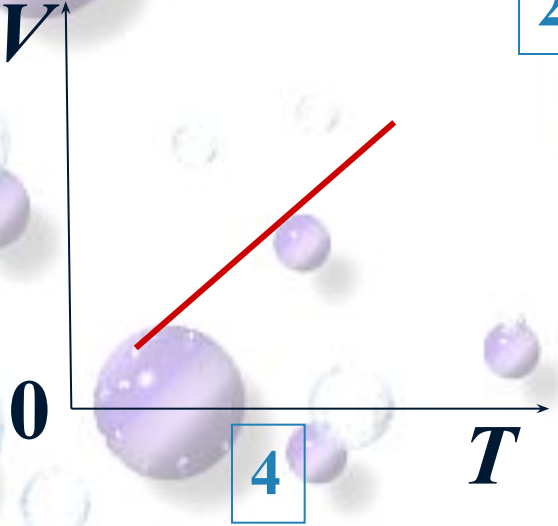
1



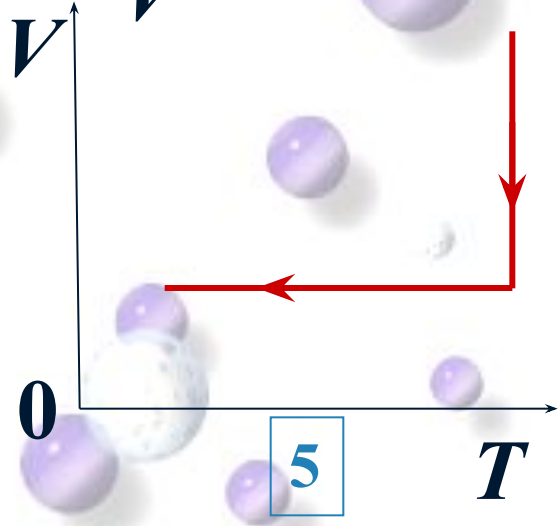
2



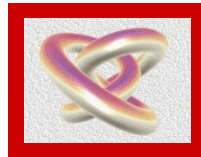
3



4

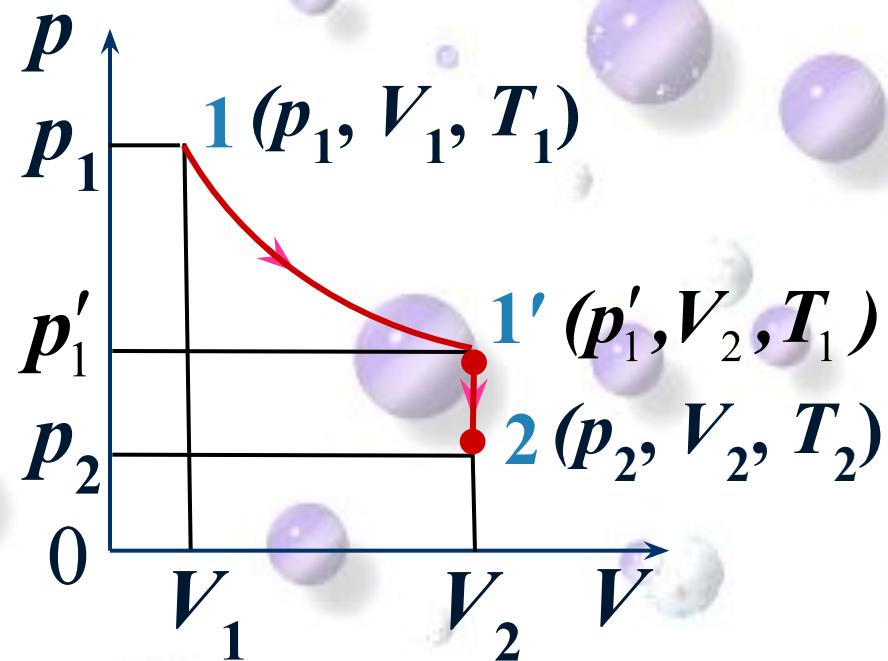


5

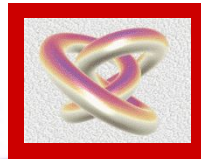


## Уравнение Клапейрона

*Клапейрон (фр.)  
вывел уравнение  
состояния  
идеального газа,  
объединив законы  
Бойля-Мариотта и  
закон Гей-Люссака –  
Шарля.*





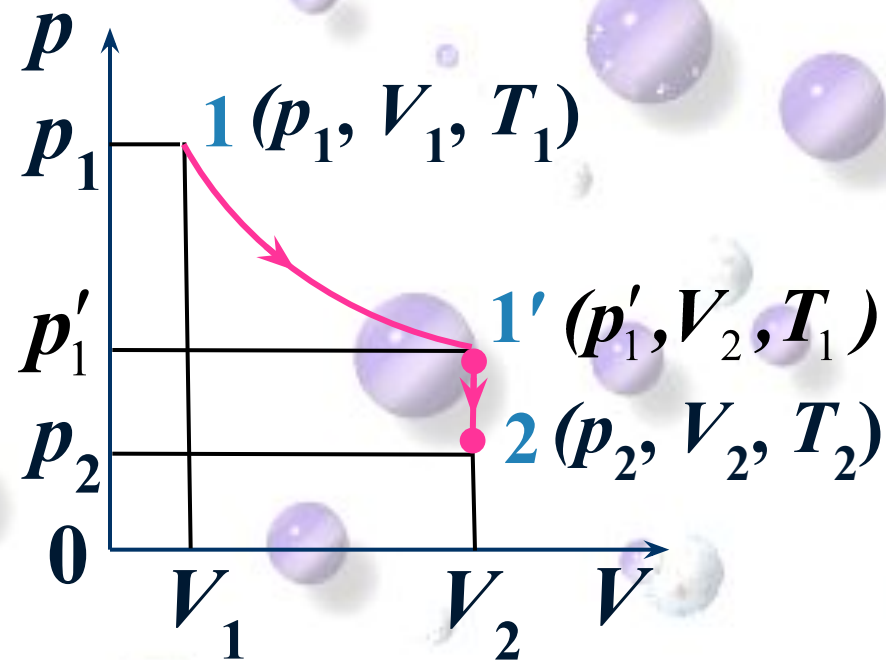


## Уравнение Клапейрона

*Из рис. видим:*

$$p_1 V_1 = p'_1 V_2$$

$$\frac{p'_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



*Исключим  $p'_1$ .*



## Уравнение Клапейрона

---

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

---

*уравнение Клапейрона*

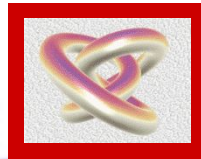
---



## Уравнение Клапейрона

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad (1)$$

$p$  – давление идеального газа  
 $V$  – объем идеального газа  
 $T$  – абсолютная температура  
идеального газа



## Уравнение Менделеева-Клапейрона

*Менделеев объединил уравнение Клапейрона с законом Авогадро.*

*Согласно закону Авогадро:*

*Один моль любого газа при нормальных условиях ( $T = 273 \text{ К}$  и  $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ) занимает один и тот же объем (молярный)*

*$V_m$ , равный:*

$$V_m = 0,0224 \text{ м}^3/\text{моль} = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}.$$

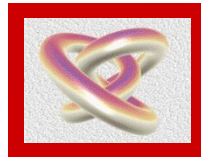
*Подставим эти данные в (1):*



## Уравнение Менделеева-Клапейрона

---

$$const = R = \frac{pV_m}{T} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$



## Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$R$  – универсальная газовая постоянная  
(молярная газовая постоянная)



## Уравнение Менделеева-Клапейрона

*Тогда для 1 моль газа уравнение (1)  
можно записать в виде:*

$$pV_m = RT \quad (2)$$

**$m$**

Уравнение Менделеева-  
Клапейрона для 1 моль газа



## Уравнение Менделеева-Клапейрона

---

*Тогда для любой массы газа  $m$ :*

$$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT$$

*Учтено, что:*

$$V = \frac{m}{M} V_m$$

---

$\nu$  – (количество вещества) число молей газа.





## Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

$p$  – давление идеального газа

$V$  – объем идеального газа

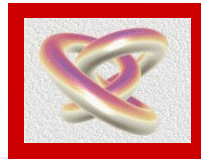
$m$  – масса газа

$M$  – молярная масса газа

$R$  – универсальная газовая постоянная

$T$  – абсолютная температура

идеального газа



## Основы МКТ

---

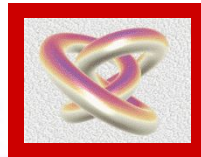
Задача молекулярно-кинетической теории состоит в том, чтобы установить связь между **микроскопическими** (масса, скорость, кинетическая энергия молекул) и **макроскопическими параметрами** (давление, объем, температура).

$m$     $v$     $E_k$

?

$p$     $V$     $T$

---

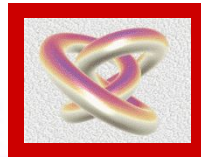


---

*Газ, состоящий из отдельных атомов, а не молекул, называют одноатомным.*

К одноатомным газам относят инертные газы — гелий, неон, аргон. В случае идеальных газов пренебрегают силами взаимодействия молекул, т. е. их потенциальная энергия полагается равной нулю, поэтому **внутренняя энергия идеального газа представляет собой кинетическую энергию теплового движения молекул.**

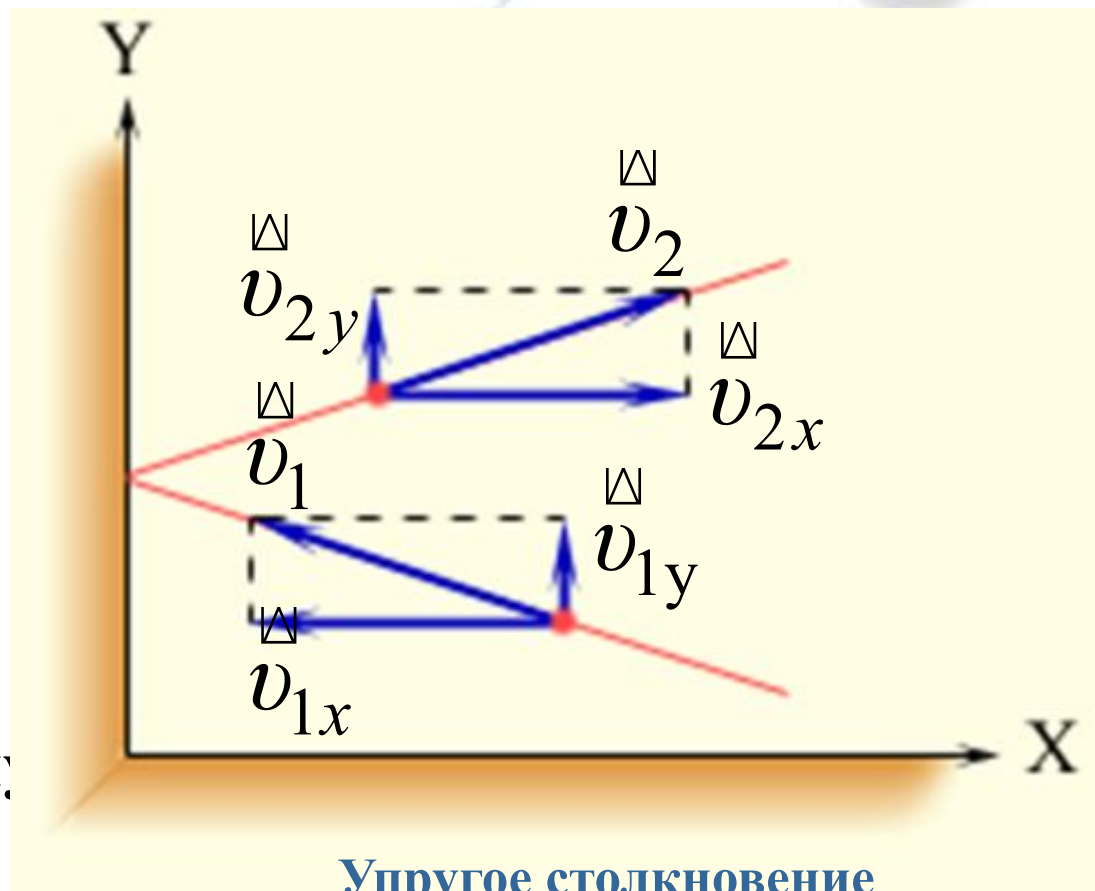
---



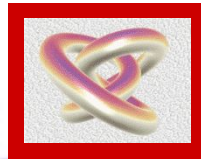
## Основное уравнение МКТ газов

Используя модель идеального газа, вычислим *давление газа на стенку сосуда*.

В процессе взаимодействия молекулы со стенкой сосуда между ними возникают силы, подчиняющиеся третьему закону Ньютона.

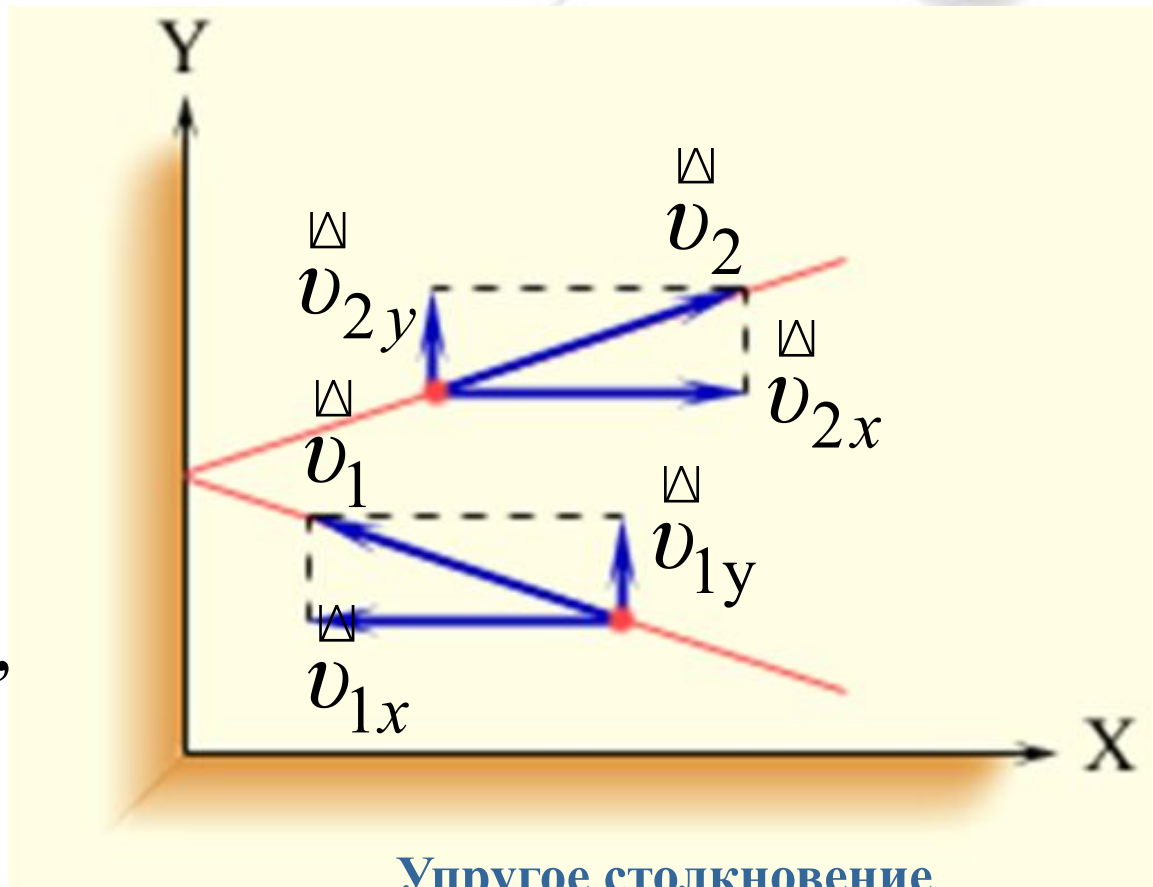


Упругое столкновение молекулы со стенкой

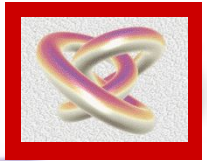


## Основное уравнение МКТ газов

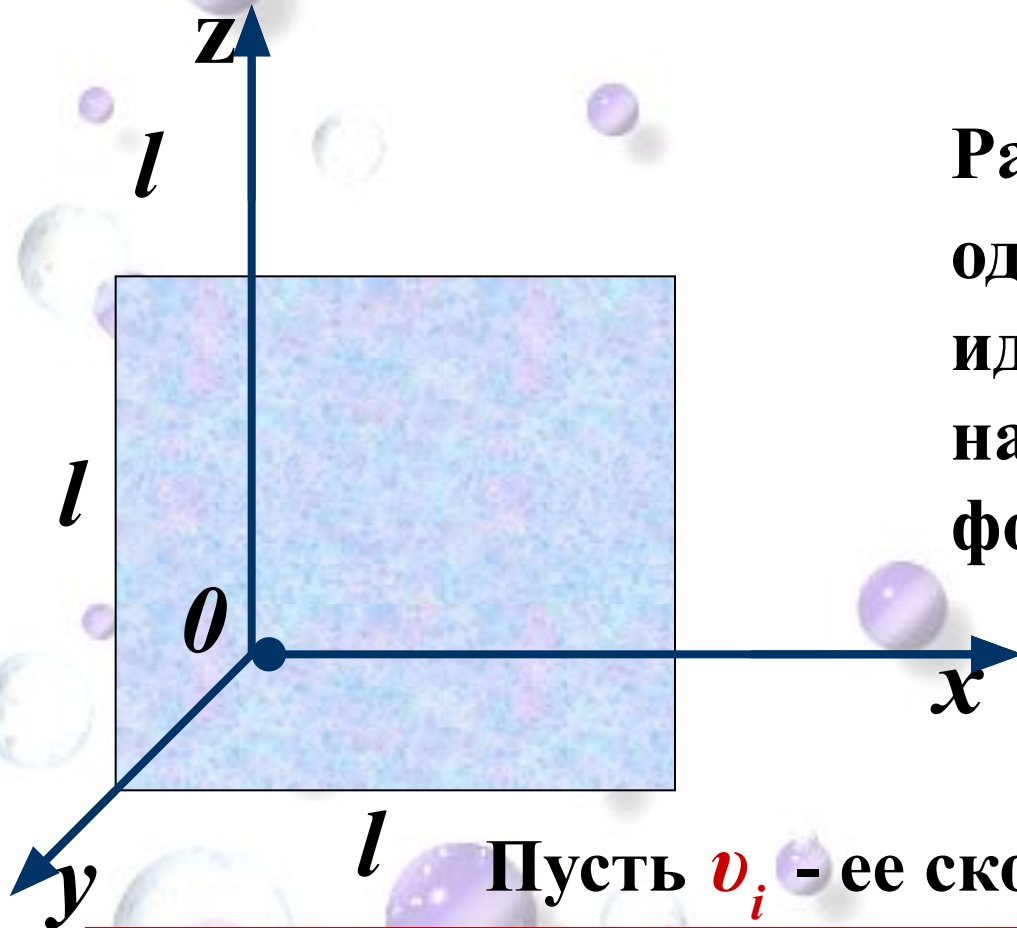
В результате проекция  $v_x$  скорости молекулы, перпендикулярная стенке, изменяет свой знак на противоположный, а проекция  $v_y$  скорости, параллельная стенке, остается неизменной.



Упругое столкновение молекулы со стенкой

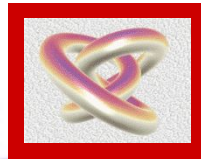


## Основное уравнение МКТ газов

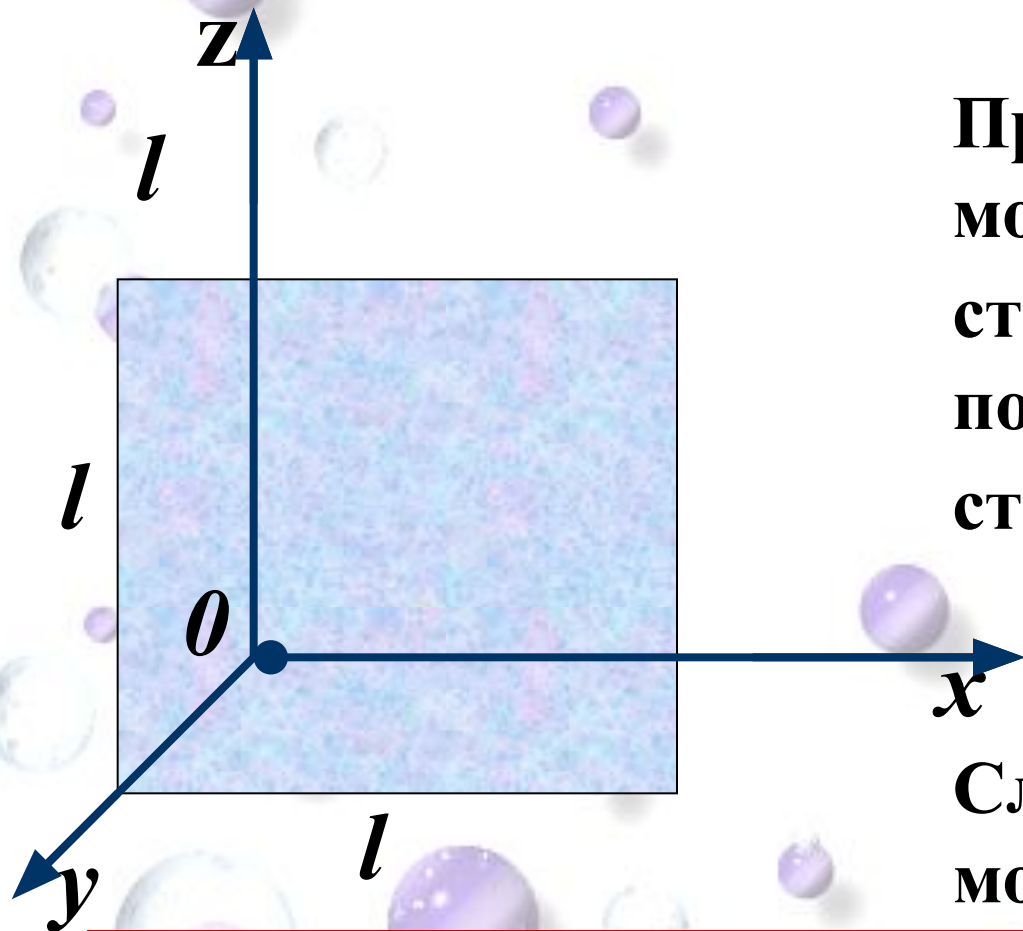


Рассмотрим поведение одной молекулы  $i$  идеального газа, находящегося в сосуде в форме куба.

Пусть  $v_i$  - ее скорость, направленная  $\perp$  стенке сосуда, а  $m_i$  - ее масса.



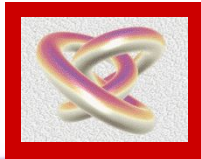
## Основное уравнение МКТ газов



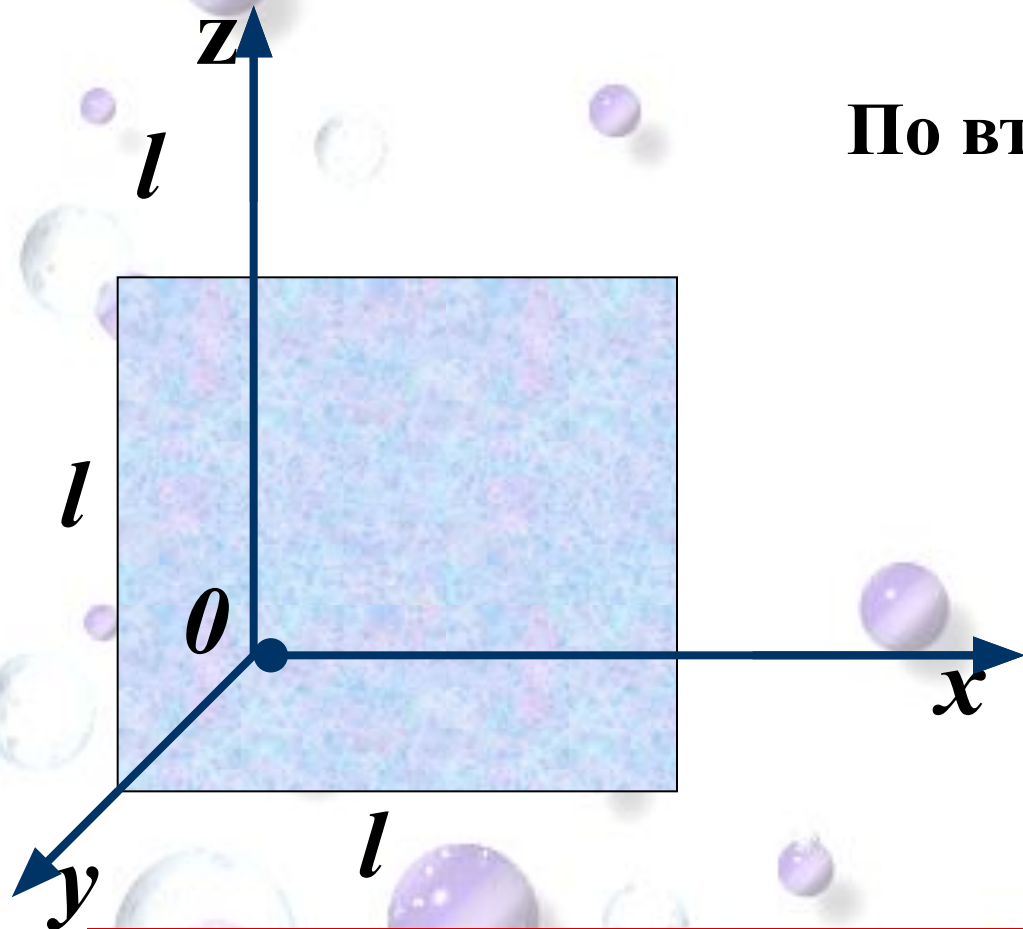
При упругом ударе молекула сообщает стенке импульс  $m_i v_i$ , после удара ее импульс станет равным  $(-m_i v_i)$ .

Следовательно, импульс молекулы изменится на

$$m_i v_i - (-m_i v_i) = 2m_i v_i$$




## Основное уравнение МКТ газов



По второму закону Ньютона:

$$F_i t_i = 2m_i v_i \quad (3)$$

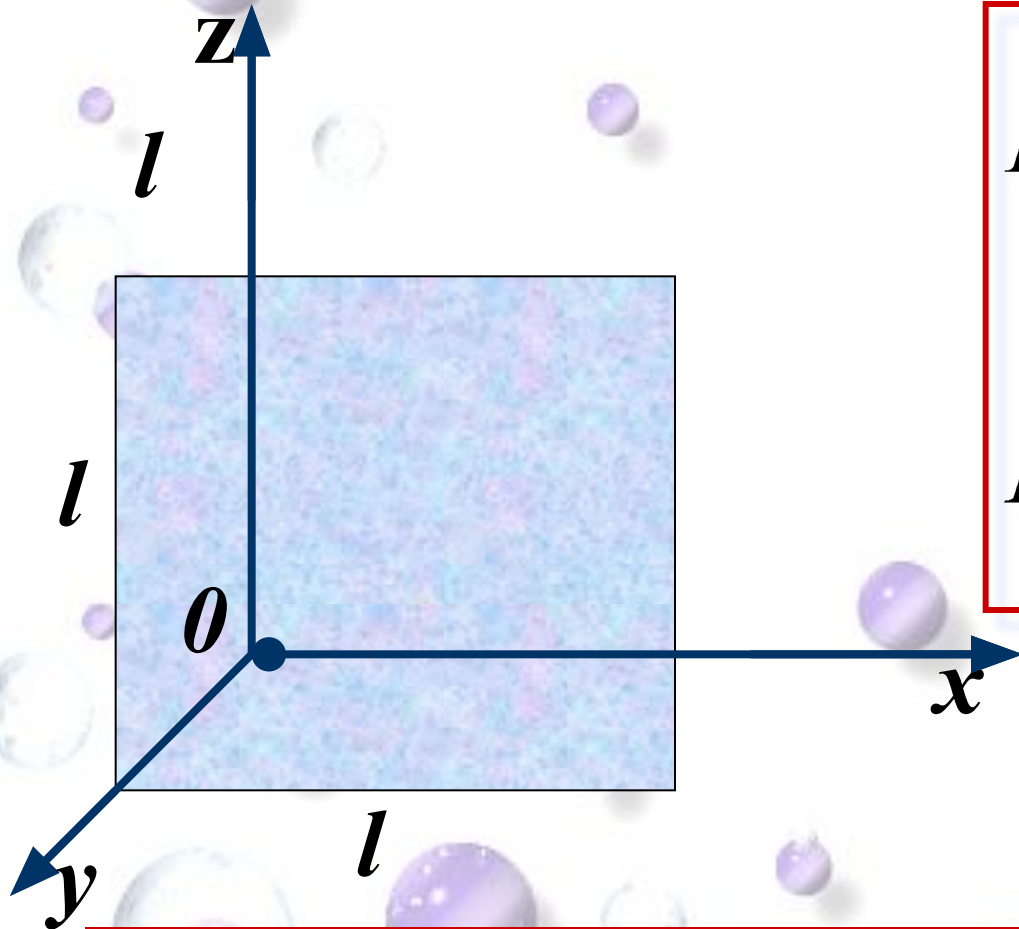
$$t_i = \frac{2l}{v_i} \quad (4)$$

(4)  (3)

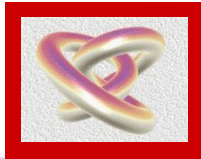




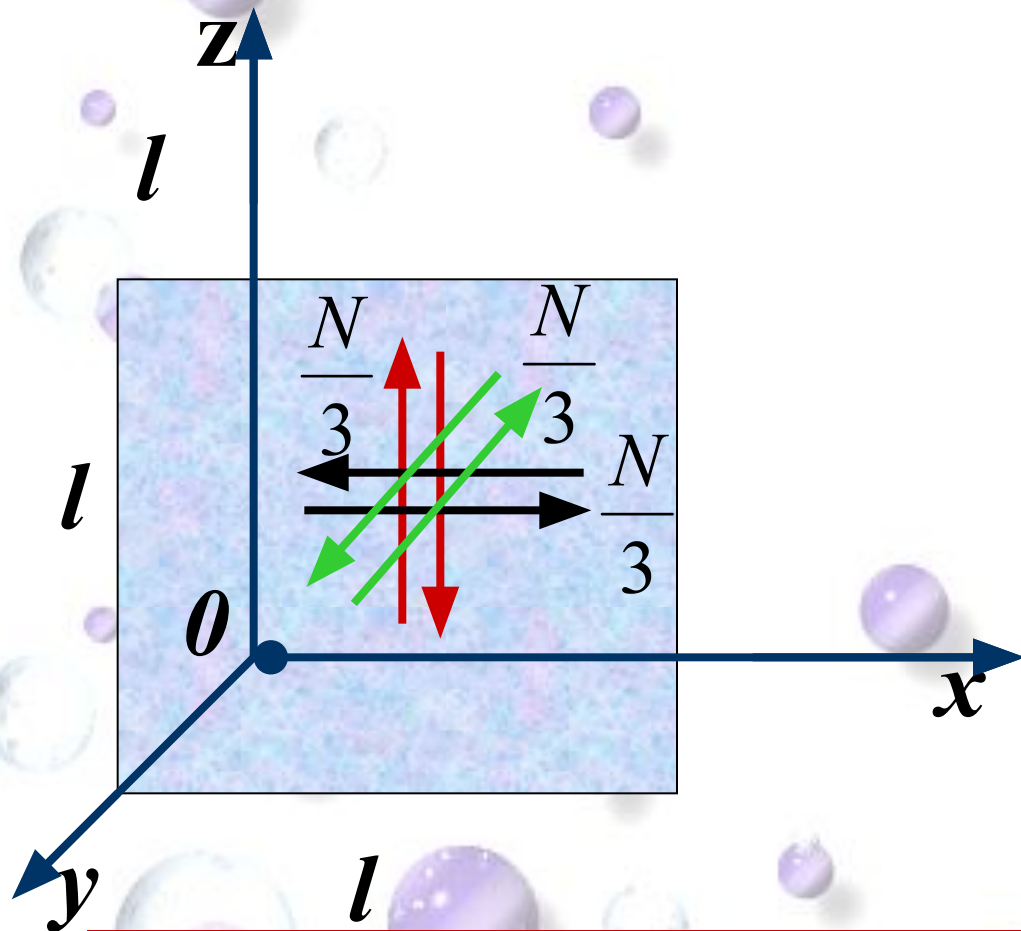
## Основное уравнение МКТ газов



$$F_i \frac{2l}{v_i} = 2m_i v_i \Rightarrow$$
$$F_i = \frac{2m_i v_i^2}{2l} = \frac{m_i v_i^2}{l}$$



## Основное уравнение МКТ газов



Между двумя противоположными гранями куба в направлении оси  $x$  движется  **$1/3$**  всех молекул.



## Основное уравнение МКТ газов

---

**Суммарная сила ударов об одну грань:**

$$F = \frac{1}{3} \left( \frac{m_1 v_1^2}{l} + \frac{m_2 v_2^2}{l} + \dots + \frac{m_n v_n^2}{l} \right)$$



## Основное уравнение МКТ газов

Для идеального газа ( $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m_0$ ):

$$F = \frac{1}{3} \frac{m_0}{l} (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2)$$

или  $F = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{l} \left( \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{N} \right)$

$$\langle v_{кв} \rangle^2$$



## Основное уравнение МКТ газов

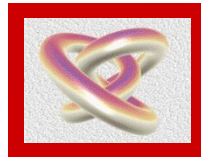
$$F = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{l} \langle v_{кв} \rangle^2$$

С другой стороны, сила  $F$ , действующая со стороны газа в направлении, перпендикулярном к поверхности  $S$  стенки сосуда:

$$F = pS$$

$$[p] = 1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

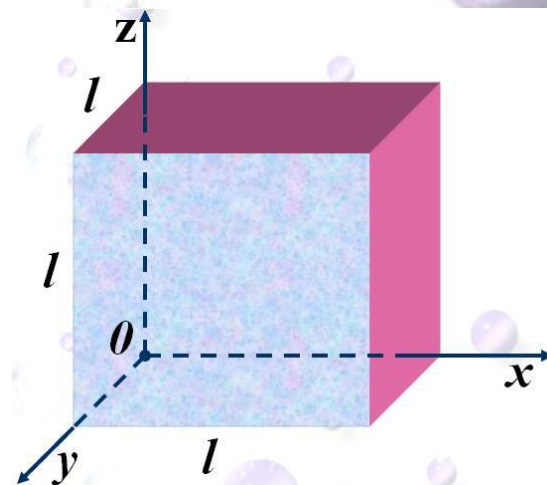
$p$  – **давление** газа на стенку сосуда.



## Основное уравнение МКТ газов

В нашем случае  $S = l^2$

Следовательно,



$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{l^2} = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{l^3} \langle v_{кв} \rangle^2$$



## Основное уравнение МКТ газов

Или

$$p = \frac{1}{3} \frac{m_0 N}{V} \langle v_{кв} \rangle^2 = \frac{1}{3} m_0 n \langle v_{кв} \rangle^2 \quad (5)$$

Основное уравнение МКТ

$n = \frac{N}{V}$  — концентрация молекул



## Основное уравнение МКТ газов

---

***Средняя кинетическая энергия*** хаотического движения молекул газа

$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} m_0 \langle v_{кв} \rangle^2$$

Откуда

$$\langle v_{кв} \rangle^2 = \frac{2 \langle E \rangle}{m_0}$$



(5)





## Основное уравнение МКТ газов

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \langle v_{кв} \rangle^2 = \frac{1}{3} m_0 n \frac{2 \langle E \rangle}{m_0} = \frac{2}{3} n \langle E \rangle$$

(6)

Основное уравнение МКТ



## Основное уравнение МКТ газов

Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \nu RT$$



$$p = \frac{\nu RT}{V}$$

Или

$$p = \frac{\nu RT}{V} = \frac{NRT}{N_A V} = \frac{nRT}{N_A}$$



## Основное уравнение МКТ газов

С другой стороны:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle$$

Тогда:

$$\frac{2}{3} n \langle E \rangle = \frac{nRT}{N_A}$$

Откуда:

$$\langle E \rangle = \frac{nRT}{N_A} \frac{3}{2n} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T$$

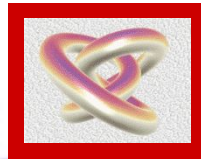


## Основное уравнение МКТ газов

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

$$k = \frac{R}{N_A}$$

$k$  – постоянная Больцмана



## Основное уравнение МКТ газов

---

Тогда:

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT \quad (7)$$

**Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа прямо пропорциональна абсолютной температуре.**

**Температура есть мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул.**



## Основное уравнение МКТ газов

---

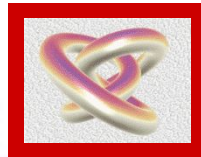
(7)  (6)

$$p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT$$

Или

$$p = nkT$$

---



---

Лекцию подготовили д.т.н.,  
профессор Симдянкин А.А., к.п.н.,  
доцент Симдянкина Е.Е.

---