



18 ноября 2011 года

ЛЕКЦИЯ 2.2 (10)

Идеальный газ

Содержание Лекции 2 (10):

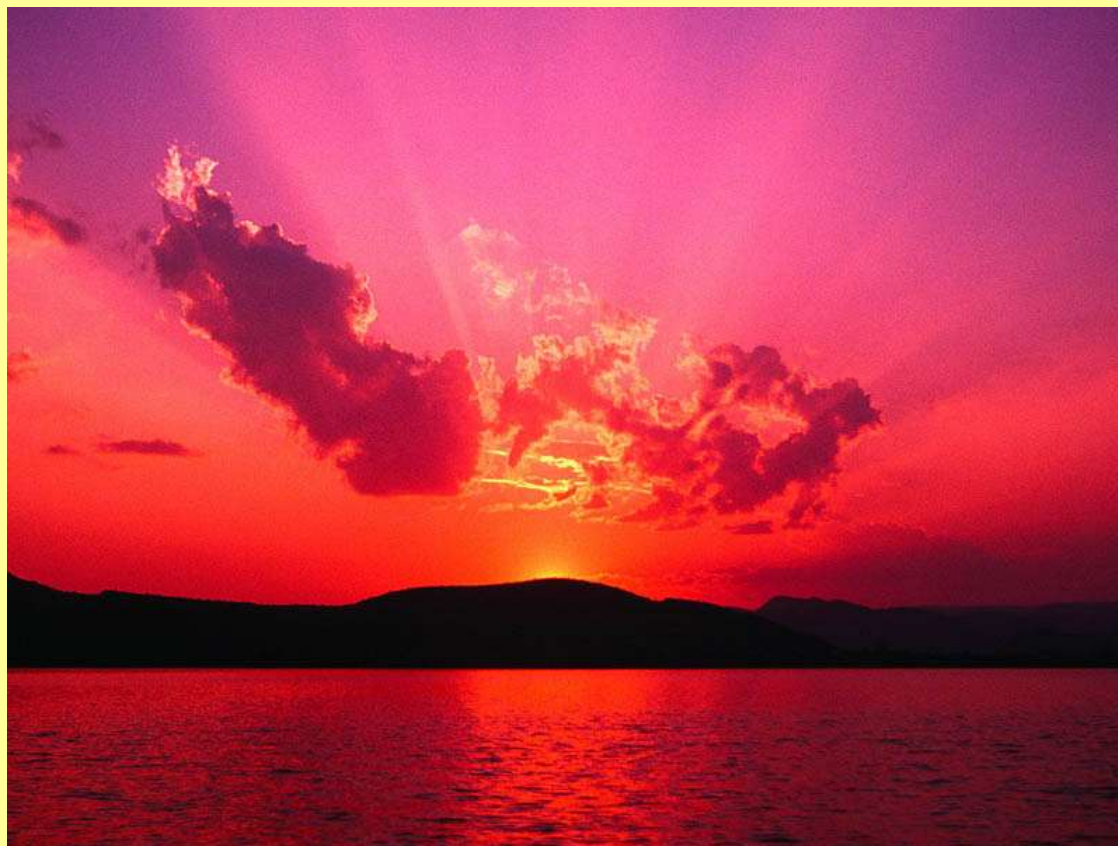
Идеальный газ, его определение с точки зрения молекулярной физики и термодинамики.

Эмпирические газовые законы: Бойля-Мариотта, Шарля и Гей-Люссака для соответствующих изопроцессов.

Уравнение состояния идеального газа. Закон Авогадро. Уравнение Клапейрона-Менделеева. Уравнение кинетической теории для давления (основное уравнение молекулярно-кинетической теории). Постоянная Больцмана.

Закон Дальтона.

10.1. Модель идеального газа



Идеальный газ (ИГ)

Теоретическая **МОДЕЛЬ** газа, в которой не учитывается:

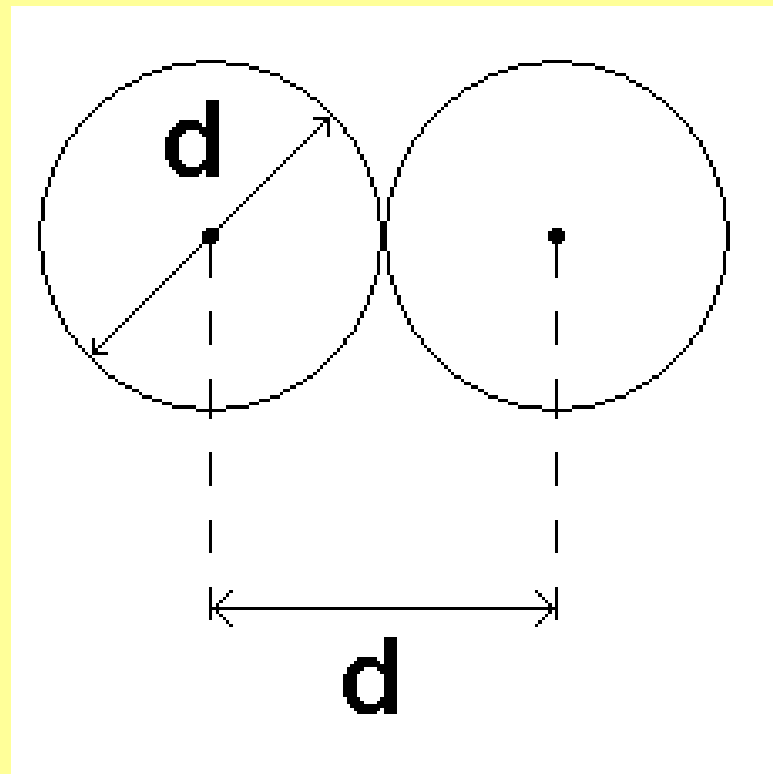
взаимодействие частиц газа (средняя кинетическая энергия частиц много больше энергии их взаимодействия) и **собственный объем** молекул.

Реальные газы хорошо описываются моделью классического ИГ, если они достаточно разрежены.

Некоторые количественные параметры

1) Эффективный диаметр

2) Эффективное сечение
молекулы



Значения d для молекул некоторых газов при нормальных условиях

Газ	Азот	Водород	Воздух	Кислород
d , нм	0,38	0,28	0,27	0,36

Величина d зависит от скорости сталкивающихся молекул (от температуры газа).

Нормальные условия (н.у.): $p_0=10^5$ Па, $T_0=273$ К

3) Число Лошмидта

ЛОШМИДТ (Loschmidt), Йозеф (1821-1895)

Австрийский физик. Профессор Венского университета (с 1868 года). Впервые определил число молекул в единице объёма газа (число Лошмидта), исходя из кинетической теории газов (1865).

Экспериментально изучал диффузию в газах.

4) Среднее расстояние между ближайшими частицами

5) Соотношение собственного объема молекул с занимаемым ими объемом

Кинетическая теория газов (молекулярно-кинетическая теория)

Это учение о строении и физических свойствах газов, основанное на статистическом методе исследования → статистическая теория ИГ.

При этом в системе частиц выполняются законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.

10.2. Понятие о хаотичности движения



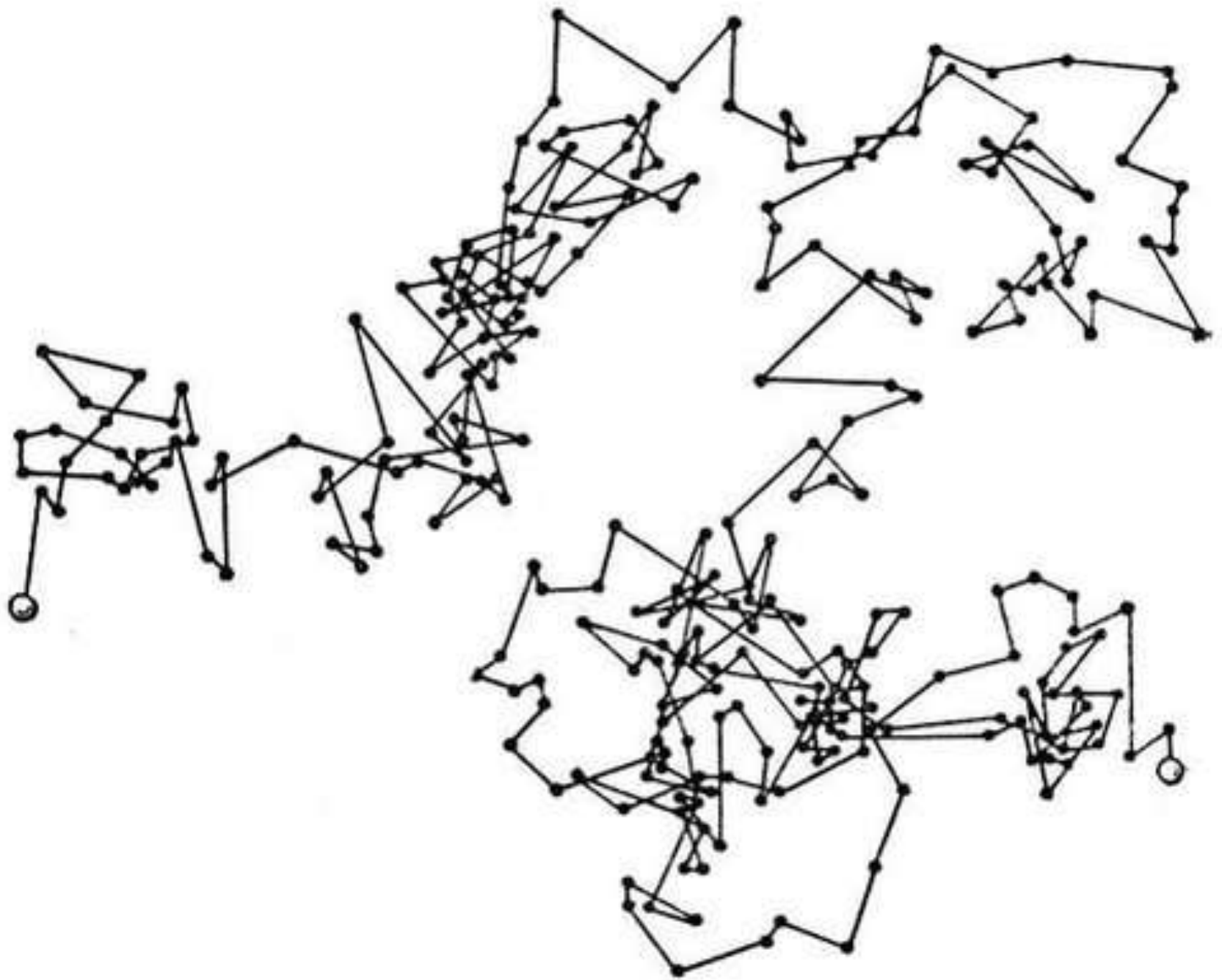
Хаотичность движения

Если газ находится в равновесии, молекулы движутся совершенно беспорядочно, хаотически.

Все направления движения равновероятны, ни одному из них не может быть отдано предпочтение перед другими.

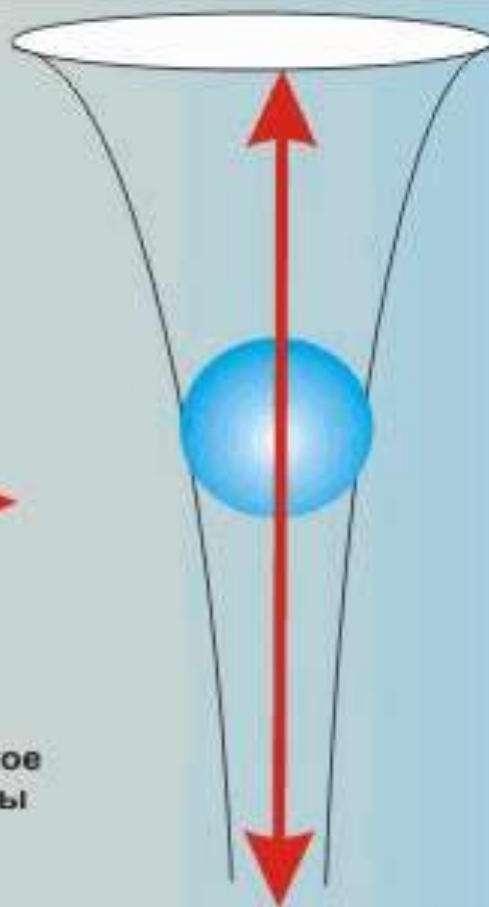
Скорости молекул могут быть самыми различными по величине.

При каждом соударении с другими молекулами величина скорости должна изменяться (с равной вероятностью она может уменьшится или возрасти).





Обычное броуновское
движение молекулы
воздуха



Броуновское движение
молекулы воздуха в
жгуге вихря

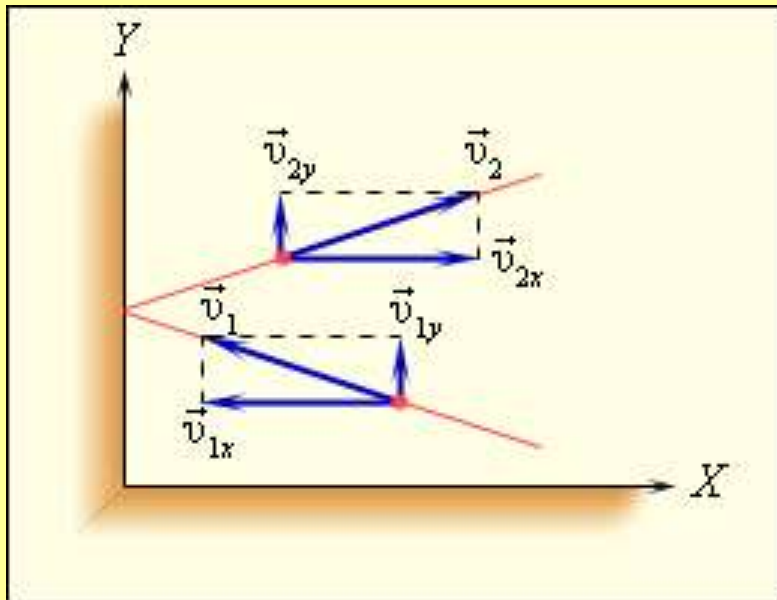
10.3. Основное уравнение МКТ



Давление газа на стенку

Найдем силу взаимодействия одной движущейся молекулы газа и стенки сосуда:

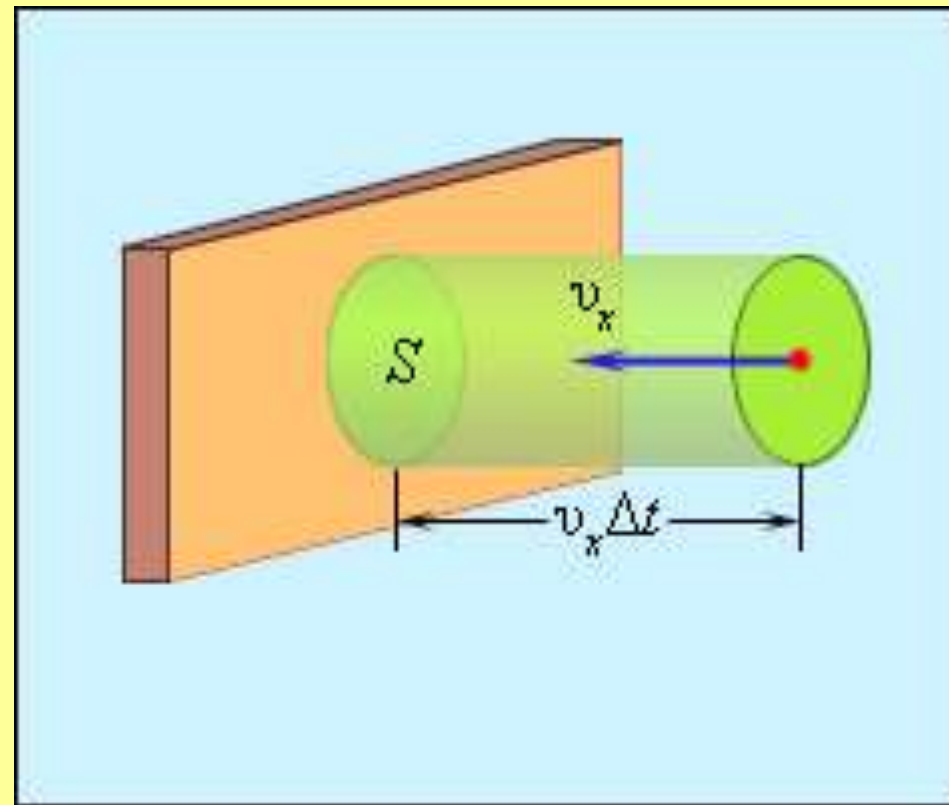
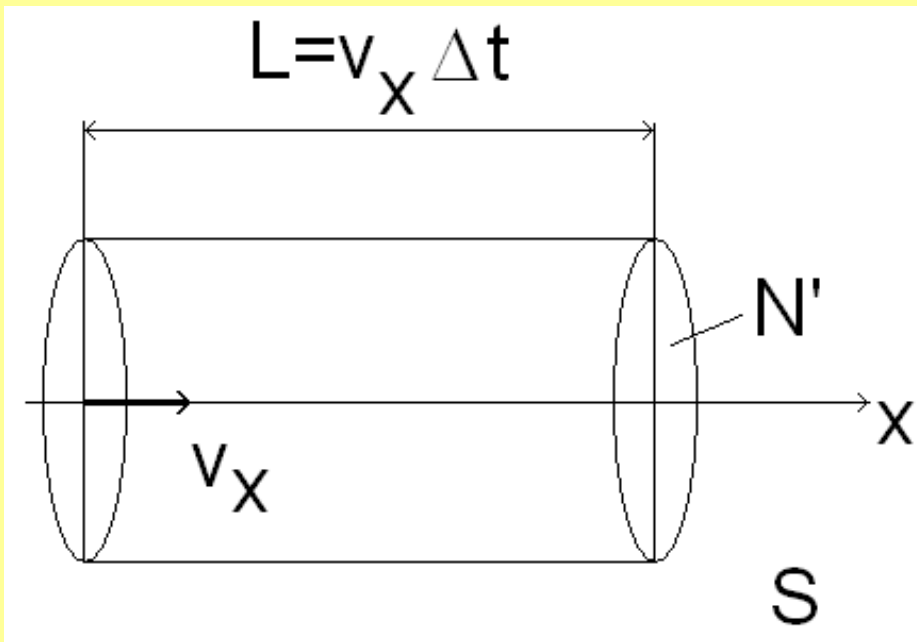
$$p = f_n/S \rightarrow \vec{F} \cdot \Delta t = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$$



$$\rightarrow f = 2m_0v/\Delta t$$

$$(10.3)$$

Молекулы, заключенные в рассматриваемом объеме, могут испытывать соударения со одной стенкой за время Δt :



Концентрация молекул в рассматриваемом объеме:

$$n = N/V,$$

где $[n] = \text{м}^{-3}$. Далее,

$$N = \dots$$

Тогда,

$$N' = \frac{1}{2} N = \dots$$

Итак,

$$F = \dots$$

где $f = 2m_0v_x/\Delta t$.

Тогда окончательно получаем:

$$\langle F \rangle = \frac{1}{2} n \cdot v_x \Delta t S \cdot 2m_0 v_x / \Delta t = n \cdot S \cdot m_0 v_x^2.$$

Далее,

$$p = \dots$$

С учетом, что $v_x^2 = v_y^2 = v_z^2 = \frac{1}{3}v^2 \rightarrow$

$$\rightarrow p = \dots \quad (10.4)$$

Т.к. газ в объеме V содержит N молекул, движущихся со разными скоростями v_1, v_2, \dots, v_n , то целесообразно рассматривать среднюю квадратичную скорость:

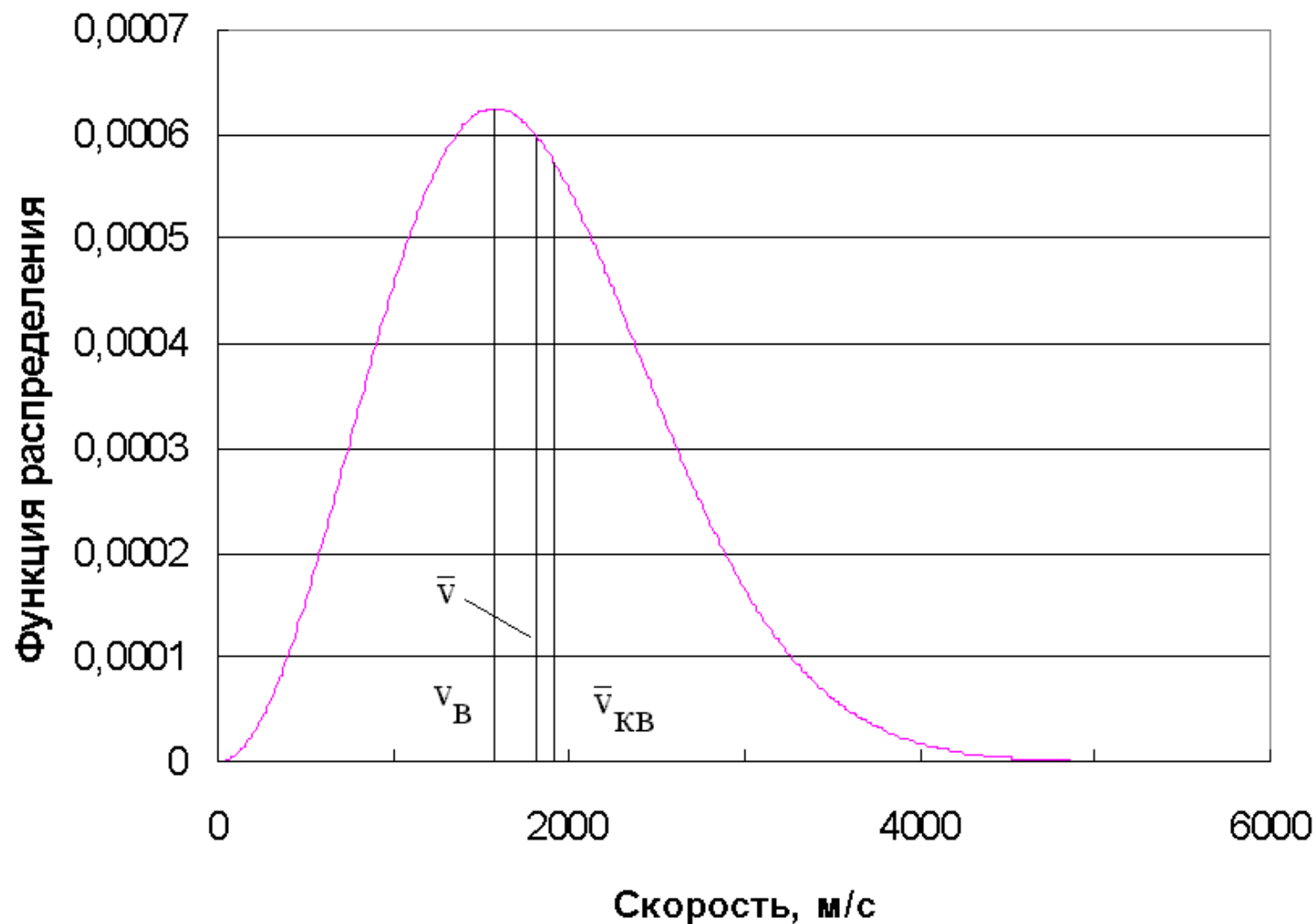
$$\langle v_{\text{КВ}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} . \quad (10.5)$$

Тогда

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{КВ}} \rangle^2 . \quad (10.6)$$

Это основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ).

Введем понятие характерных скоростей (специально обсудим в лекции 13):



Средняя квадратичная скорость $\langle v_{\text{KB}} \rangle$

В случае водорода ($\mu = 0.002$ кг/моль; $T = 300$ К):

$$\langle v_{\text{KB}} \rangle = 1930 \text{ м/с} .$$

Основное уравнение МКТ

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

Статистическая трактовка температуры

$$\frac{2}{3}\langle \mathcal{E}_{\text{пост}} \rangle = kT \rightarrow \langle \mathcal{E}_{\text{пост}} \rangle = \frac{1}{2}m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{3}{2}kT .$$

- Т.о. температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул.
- Температура определяет не скорость, а всю энергию.

$$p = \frac{2}{3} n \langle \mathcal{E}_{\text{пост}} \rangle = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT = nkT. \quad (10.10)$$

10.4. Уравнение Клапейрона-Менделеева

$$p = nkT \rightarrow pV = NkT$$

1 моль ИГ: $N = N_A \rightarrow pV = (N_A k)T = RT$

$$pV_\mu = RT \quad [V_\mu] = \text{м}^3/\text{моль};$$

ν молей ИГ ($\nu = m/\mu$):

$$pV = (m/\mu) RT \quad [V] = \text{м}^3.$$

**УРАВНЕНИЕ
КЛАПЕЙРОНА-МЕНДЕЛЕЕВА**

**ЗАКОН
ГЕЙ-ЛЮССАКА**

процесс-
изобарический

$$P = \text{const}$$
$$m = \text{const}$$

**ЗАКОН
БОЙЛЯ-МАРИОТТА**

процесс-
изотермический

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

**ЗАКОН
ШАРЛЯ**

процесс-
изохорический

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

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА

Законы идеального газа

Изобарический процесс

$$P = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

Изохорический процесс

$$V = \text{const}$$

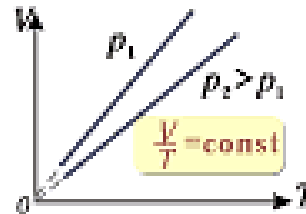
$$m = \text{const}$$

Изотермический процесс

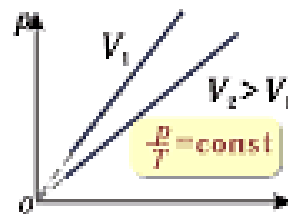
$$T = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

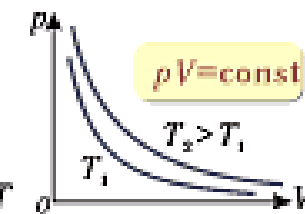
ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА



ЗАКОН ШАРЛЯ



ЗАКОН БОЙЛЯ-МАРИОТТА



Уравнение состояния идеального газа

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

УРАВНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВА-КЛАПЕЙРОНА

Закон Дальтона

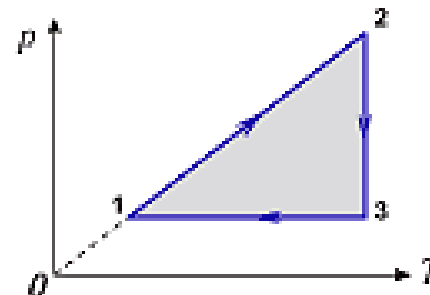
Давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений

$$p = \sum_{i=1}^N p_i$$

p_i - парциальное давление i -го компонента смеси

Задание

Изобразите процесс 1-2-3 в координатах $V - T$ и $P - V$

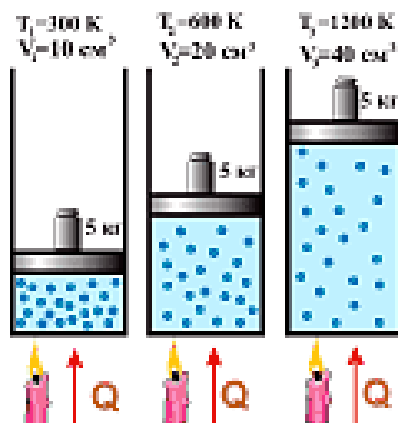


Закон Гей-Люссака (изобарический процесс)

Для газа данной массы при постоянном давлении отношение объема газа к абсолютной температуре есть величина постоянная

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

Процесс, происходящий при постоянном давлении называется **изобарическим**

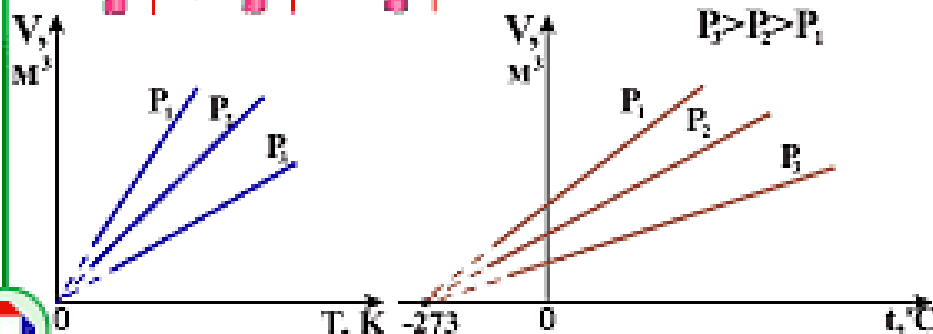


$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$$

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

где $\alpha = \frac{1}{273 \text{ K}}$,

V_0 - объем газа при 0°C



МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА

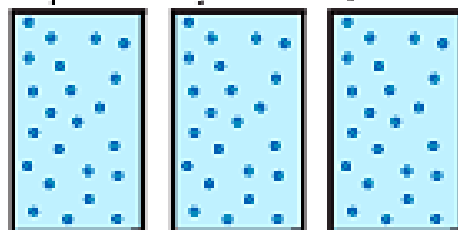
Закон Шарля
(изохорический процесс)

Для газа данной массы при постоянном объеме отношение давления газа к абсолютной температуре есть величина постоянная

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

Процесс, происходящий при постоянном объеме называется **изохорическим**

$P_1 = 1 \text{ атм}$ $P_2 = 2 \text{ атм}$ $P_3 = 4 \text{ атм}$
 $T_1 = 300 \text{ К}$ $T_2 = 600 \text{ К}$ $T_3 = 1200 \text{ К}$

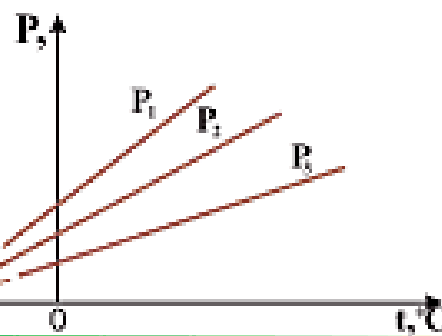
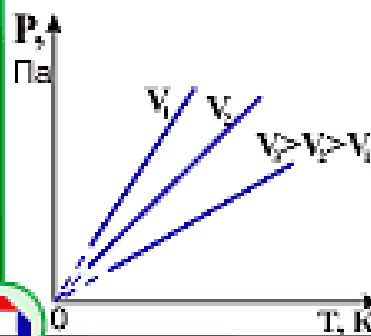


$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$$

$$P = P_0 (1 + \alpha t),$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1}{273} \frac{1}{\text{К}},$$

P_0 - давление газа при 0°C



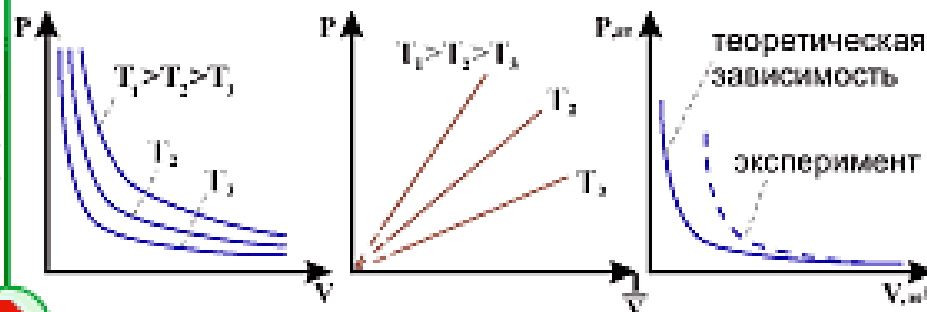
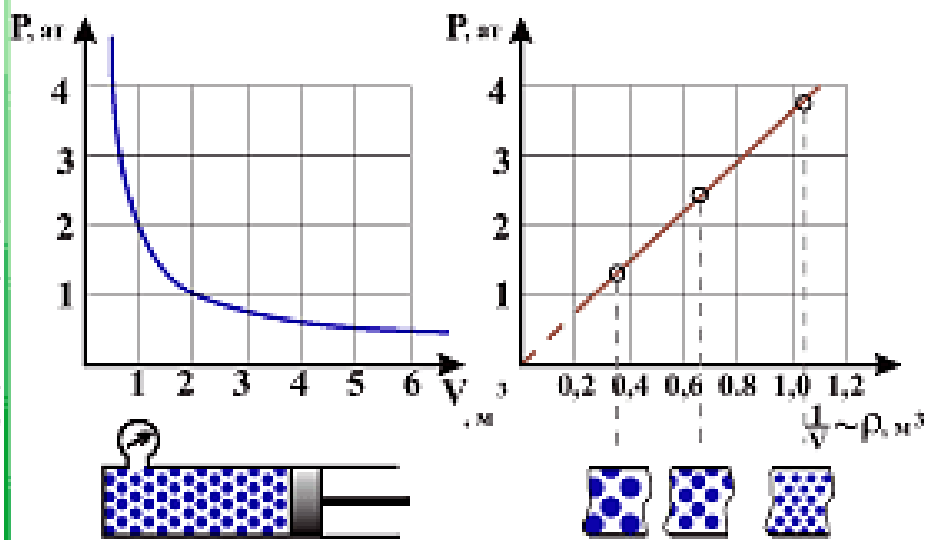
МОЛЕКУЛЯРНАЯ
ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА

Закон Бойля-Марриотта

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

$$PV = \text{const}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$



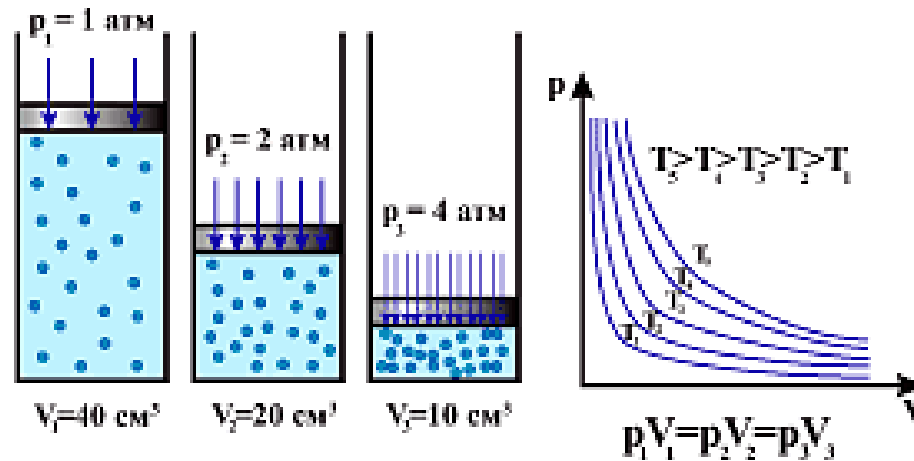
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА

**Закон Бойля-Мариотта
(изотермический процесс)**

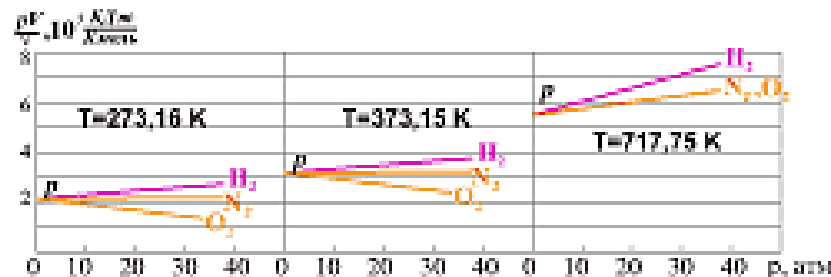
Для газа данной массы при неизменной температуре произведение давления на объем есть величина постоянная

$$pV = \text{const, при } T = \text{const, } m = \text{const}$$

Процесс, происходящий при постоянной температуре называется **изотермическим**



Отклонение от закона Бойля-Мариотта для реальных газов



Физико-Уральский государственный университет

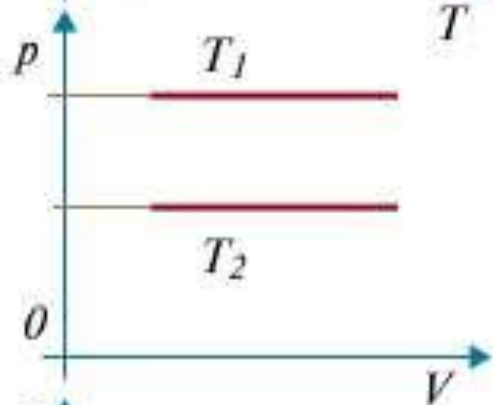
РНИО Росуринформ



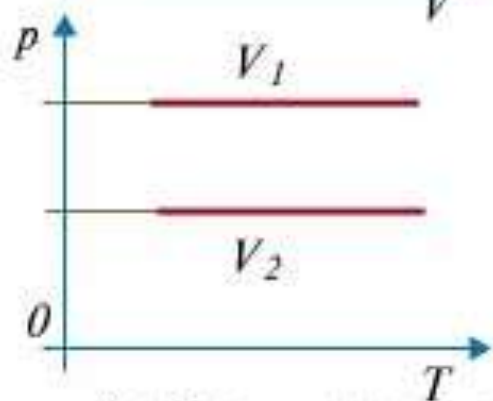
График изобарного процесса.



$$p_1 < p_2$$



$$T_1 < T_2$$



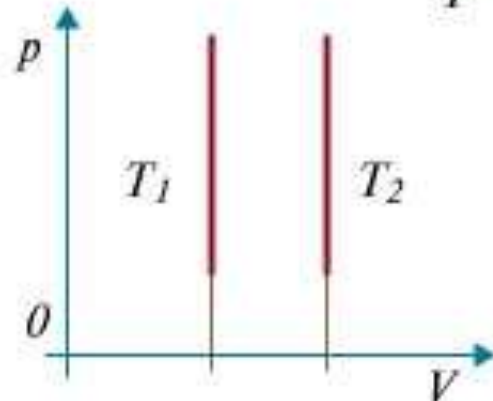
$$V_1 < V_2$$

Изобары в координатах pV , VT и pT .

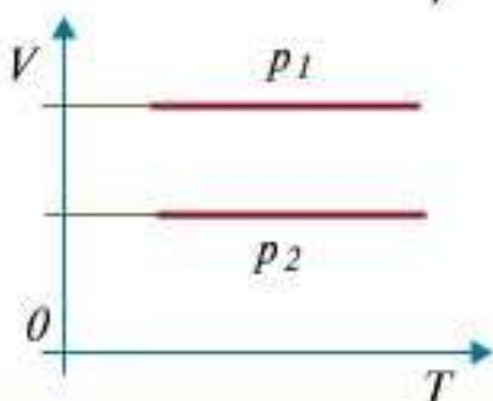
График изохорного процесса.



$$V_1 < V_2$$



$$T_1 < T_2$$



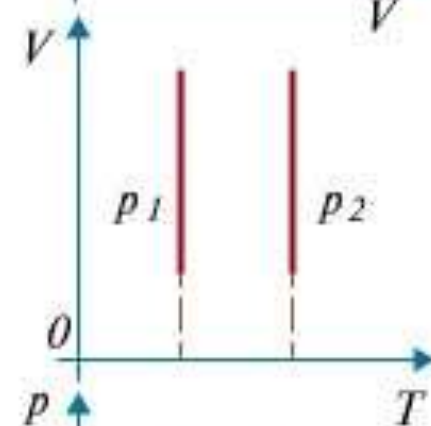
$$p_1 < p_2$$

Изохоры
в координатах
 pV , VT и pT .

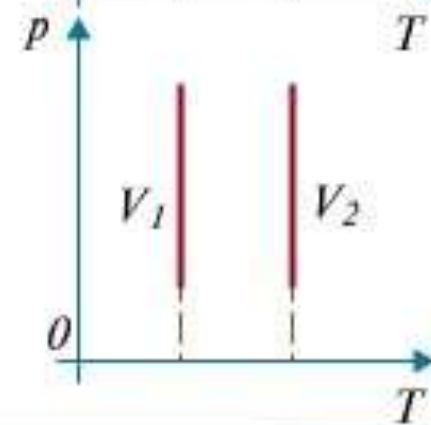
График изотермического процесса



$$T_1 < T_2$$



$$p_1 < p_2$$



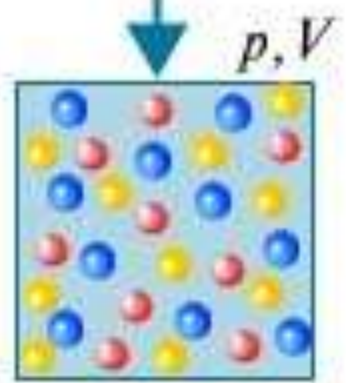
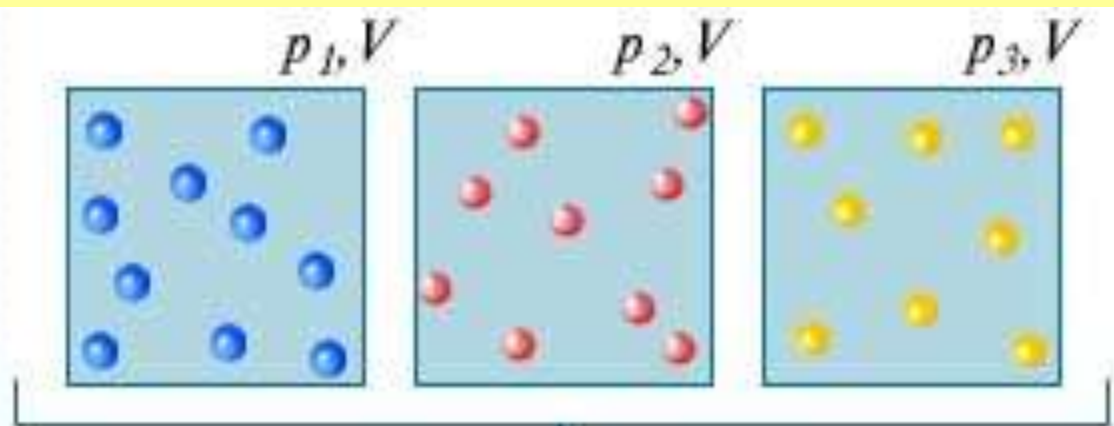
$$V_1 < V_2$$

Изотермы
в координатах
 pV , VT и pT .

10.5. Смесь газов, формула Дальтона

(самостоятельно)





$$p = p_1 + p_2 + p_3$$



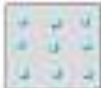



$$p = \sum_i p_i$$

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА

Смесь газов

Давление идеального газа при $T = \text{const}$ зависит от концентрации молекул и не зависит от их строения

$$P = \frac{m}{M} \frac{RT}{V} = \frac{Nm_r RT}{N_r m_r V}$$

M_1		V, T, N_1, m_1	$P_1 = \frac{m_1}{M_1} \frac{RT}{V} = \frac{N_1}{V} kT$
M_2		V, T, N_2, m_2	$P_2 = \frac{m_2}{M_2} \frac{RT}{V} = \frac{N_2}{V} kT$
M_3		V, T, N_3, m_3	$P_3 = \frac{m_3}{M_3} \frac{RT}{V} = \frac{N_3}{V} kT$
M		$V, T, (N_1+N_2+N_3)$ $(m_1+m_2+m_3)$	$P = \frac{N_1+N_2+N_3}{V} kT$

Закон Дальтона

Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений компонент смеси

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

$$\frac{m_1+m_2+m_3}{MV} RT = \frac{m_1}{M_1} RT + \frac{m_2}{M_2} RT + \frac{m_3}{M_3} RT$$

Молярная масса смеси газов

$$M = \frac{m_1+m_2+m_3}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \frac{m_3}{M_3}}$$

Уравнение Менделеева-Клапейрона для смеси газов

$$PV = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \frac{m_3}{M_3} \right) RT$$



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

