

## Лекция 2.2 МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Е.В. Феськова,  
канд. пед. наук, доцент кафедры «Инженерный бакалавриат CDIO»

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

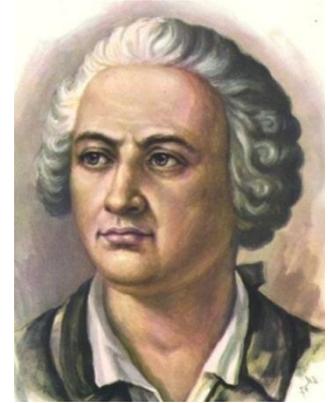


**Демокрит Абдерский**  
древнегреческий философ  
(460 – 370 до н.э.)



## атомное строение вещества

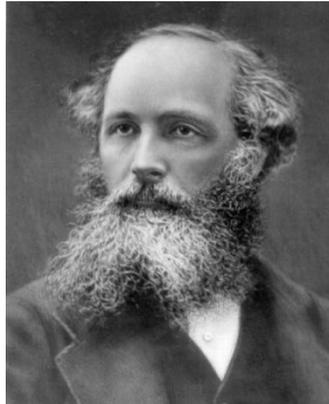
**Молекулярная физика** — раздел физики, в котором изучаются строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении



**М.В. Ломоносов**  
первый русский учёный-  
естествоиспытатель  
(1711 – 1765)



**Рудольф Клаузиус**  
немецкий физик  
(1822 – 1888)



**Джеймс Максвелл**  
британский физик  
(1831 – 1879)



**Людвиг Больцман**  
австрийский физик  
(1844 – 1906)

# СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ (МОЛЕКУЛЯРНО – КИНЕТИЧЕСКИЙ)

основан на квантовой теории строения вещества и использует статистические закономерности

оперирует величинами, усредненными для многих частиц: средней скоростью, средней энергией

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ

основан на опыте

изучает общие свойства макросистем (не вдаваясь в строение, происходящее внутри), находящихся в состоянии термодинамического равновесия

$p, V, T$  –  
термодинамические  
параметры

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ  
ТЕОРИЯ

ТЕРМОДИНАМИКА

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

**Система** – конечная область пространства с находящимися в ней физическими объектами исследования. Система может находиться в различных состояниях.

**Параметры состояния** - величины, характеризующие состояние системы: давление  $P$ , температура  $T$ , объём  $V$ .

**Уравнения состояния системы** – специфическая связь для каждого тела между параметрами системы  $P$ ,  $T$ ,  $V$ .

**Макроскопическая система** - система, содержащая большое количество физических объектов.

**Равновесная система** - система, параметры состояния которой одинаковы во всех точках этой системы и не изменяются со временем (при неизменных внешних условиях).

**Неравновесная система** - система, параметры состояния которой изменяются в пространстве и во времени, при этом в системе возникают потоки вещества и энергии (явления переноса).

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Классические представления в молекулярно-кинетической теории и термодинамике применимы для систем, состоящих из большого числа частиц ( $N > 10^{20}$ ) и при температуре от 1000 К до 10000 К (когда атомы и молекулы бесструктурные неделимые частицы)

---

**Условие применимости классических законов – выполнение неравенства**

$$mvR \ll \hbar$$

где  $m$  – масса

$v$  – скорость

$R$  – размер пространства движения частицы

$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  кг·м<sup>2</sup>/с – постоянная Планка

Если условие не выполняется, применяют **квантово-механические** представления

# МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

**Молекулярно-кинетическая теория** – учение о строении и свойствах вещества, которое основано на представлении о его молекулярном строении

---

## **Основные положения МКТ:**

1. Все вещества состоят из частиц (атомов, молекул или ионов)
2. Частицы находятся в непрерывном хаотическом тепловом движении
3. Между частицами вещества одновременно действуют силы притяжения и силы отталкивания, величина которых зависит от их относительных расстояний

# ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ПОЛОЖЕНИЙ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

## 1. Все вещества состоят из частиц (атомов, молекул или ионов)

### Существование молекул

Делимость вещества. **Закон кратных отношений:** при образовании из двух элементов различных веществ массы одного из элементов в разных соединениях находятся в кратных отношениях  
–  $N_2O : N_2O_2 : N_2O_3$  - 1:2:3. (1803, Дж. Дальтон; 1808, Ж.Л. Гей-Люссак).

Наблюдение молекул с помощью ионного проектора, электронного микроскопа, туннельного микроскопа.

Явление диффузии.

### Наличие промежутков между молекулами

При смешивании различных жидкостей объем смеси меньше суммы объемов отдельных жидкостей.

Явление диффузии.

Деформация.

# ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ПОЛОЖЕНИЙ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

## 2. Частицы находятся в непрерывном хаотическом тепловом движении

Броуновское движение.

Явление диффузии.

Давление газа на стенки сосуда.

Стремление газа занять любой объем.

Опыты по измерению скоростей атомов и молекул методом молекулярных пучков: И. Штерн, 1920.

# ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ПОЛОЖЕНИЙ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

**3. Между частицами вещества одновременно действуют силы притяжения и силы отталкивания, величина которых зависит от их относительных расстояний**

Деформация тела.

Сохранение формы твердого тела.

Поверхностное натяжение жидкости.

Свойства прочности, упругости, твердости и т.п.

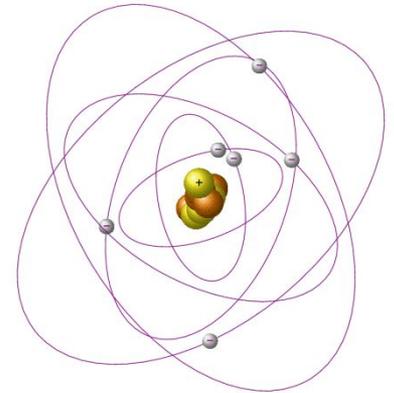
# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

**Вещество** – вид материи, состоящей из фундаментальных элементарных частиц электронов, протонов, нейтронов, масса которых не равна нулю

**Атом** – наименьшая часть химического элемента (микрочастица)

Атомы в свободном состоянии — газ.

Атомы в связанном состоянии — жидкие и твердые тела.

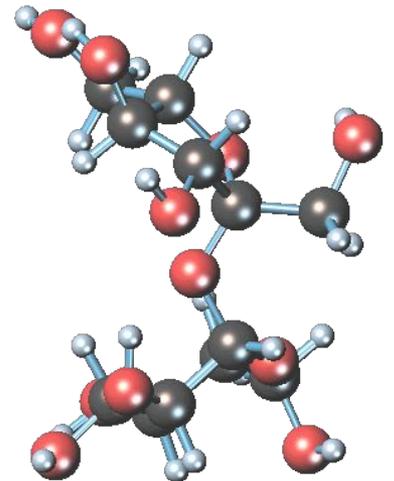


---

**Молекула** – наименьшая частица вещества, обладающая его основными химическими свойствами и состоящая из атомов, которые соединены между собой химическими связями

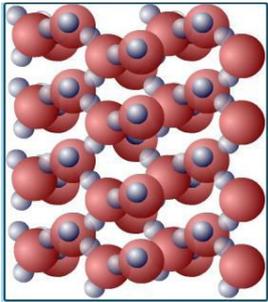
Атом или молекулу, потерявшие один или несколько электронов, называют **положительным ионом**.

Атом или молекулу, присоединивший один или несколько электронов, называют **отрицательным ионом**.



# МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

В зависимости от соотношения между средней кинетической энергией теплового движения частиц и средней потенциальной энергией их взаимодействия вещество может находиться в **газообразном, жидком или твердом состояниях**

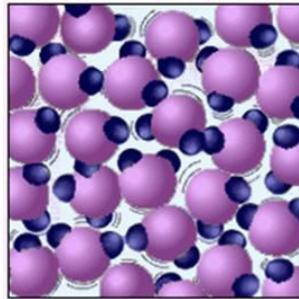


**Твердое тело**

$$E_{\text{пот}} \gg E_{\text{кин}}$$

Молекулы располагаются упорядочено и плотно.

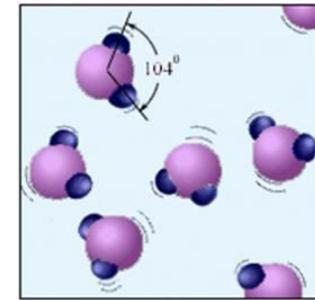
При деформации в твердом теле возникают силы, стремящиеся восстановить его форму.



**Жидкость**

$$E_{\text{пот}} \approx E_{\text{кин}}$$

Молекулы в жидкости расположены почти вплотную друг к другу жидкости имеют границу раздела с другой средой и обладают поверхностным натяжением.



**Газ**

$$E_{\text{пот}} \ll E_{\text{кин}}$$

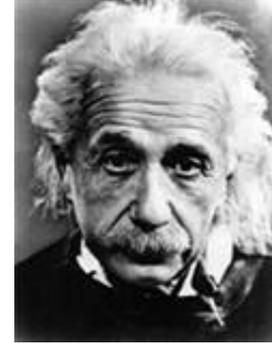
Газ может неограниченно расширяться в пространстве, не сохраняя ни формы, ни объема.

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА



**Роберт Броун**  
шотландский ботаник  
(1773 – 1857)

В 1827 наблюдал поведение частиц пыльцы, взвешенных в воде, обнаружил, что они совершают хаотические зигзагообразные движения



**Альберт Эйнштейн**  
немецкий физик  
(1879 – 1955)

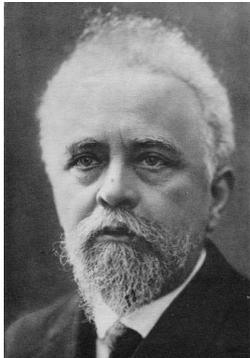


**Марианн фон Смолуховский**  
польский физик  
(1872 – 1917)

---

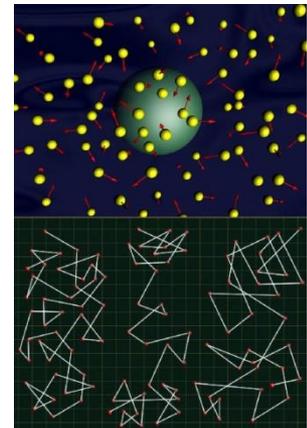
Развили в 1905 молекулярно-статистическую теорию броуновского движения

---



**Жан Батист ПЕРРЕН**  
французский физик  
(1870 – 1942)

В 1908 - 1913 осуществил цикл исследований броуновского движения. ИТОГ: броуновское движение является следствием теплового движения молекул среды, убедили в реальности самих молекул. Исходя из своих опытов, вычислил (1909) **число Авогадро** —  $6,8 \cdot 10^{23}$ .



# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

**Броуновское движение** — беспорядочное движение микроскопических видимых взвешенных в жидкости или газе частиц твёрдого вещества, вызываемое тепловым движением частиц жидкости или газа.

Броуновское движение является следствием и свидетельством существования теплового движения.

Броуновское движение происходит тем интенсивнее, чем меньше размеры частиц, чем выше температура и меньше вязкость жидкости

**!** В тепловом движении молекул и атомов участвуют абсолютно все молекулы тела, именно поэтому с изменением теплового движения меняется и состояние самого тела, и его свойства.

---

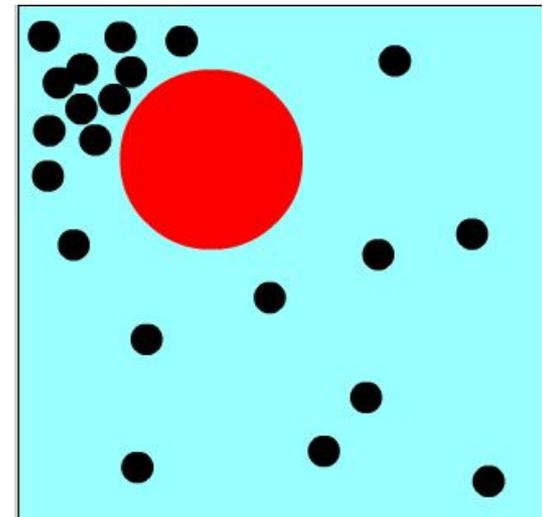
## Роль в природе, технике

Питание растений из почвы.

В организмах человека и животных всасывание питательных веществ происходит через стенки органов пищеварения.

Работа органов обоняния.

Цементация.



# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Чем больше атомов и молекул содержится в макроскопическом теле, тем больше вещества содержится в нем. Число молекул в макроскопических телах огромно, поэтому удобно указывать не абсолютное число атомов или молекул, а относительное.

**Относительной молекулярной (или атомной) массой** вещества  $M_r$  называют отношение массы молекулы (или атома)  $m_0$  данного вещества к  $1/12$  массы атома углерода  $m_0^{12}\text{C}$ :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0\text{C}}}$$

---

**Количество вещества** характеризуется относительным числом атомов и молекул

**Моль** – количество вещества, в котором содержится число частиц, равное числу атомов в 0,012 кг изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$$

$\nu$  - число молей вещества

$m$  – масса вещества

$M$  – молярная масса вещества,  
взятого в количестве 1 моля

$N$  – число частиц вещества

$N_A$  – число Авогадро

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

В 1811 г. А. Авогадро выдвинул гипотезу: один моль любого газа при одинаковых температуре и давлении занимает один и тот же объём (молярный объём), при нормальных условиях равный 22,4 л.

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{МОЛЬ}}$$

**Число Авогадро** – число частиц, которое содержится в одном моле вещества

в январе 2011 года были опубликованы результаты новых измерений, считающиеся более точными:  $N_A = 6,02214078(18) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

---

$$N_L = \frac{P_0}{k_0} = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

**Число Лошмидта** – число молекул идеального газа, содержащихся в 1 м<sup>3</sup> при нормальных условиях ( $P_0 = 10^5 \text{ Па}$ ;  $T_0 = 273 \text{ К}$ ;  $V = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ )

---

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{M}{N_A} = \frac{\rho}{n}$$

$\rho$  – плотность вещества  
 $n$  – концентрация вещества

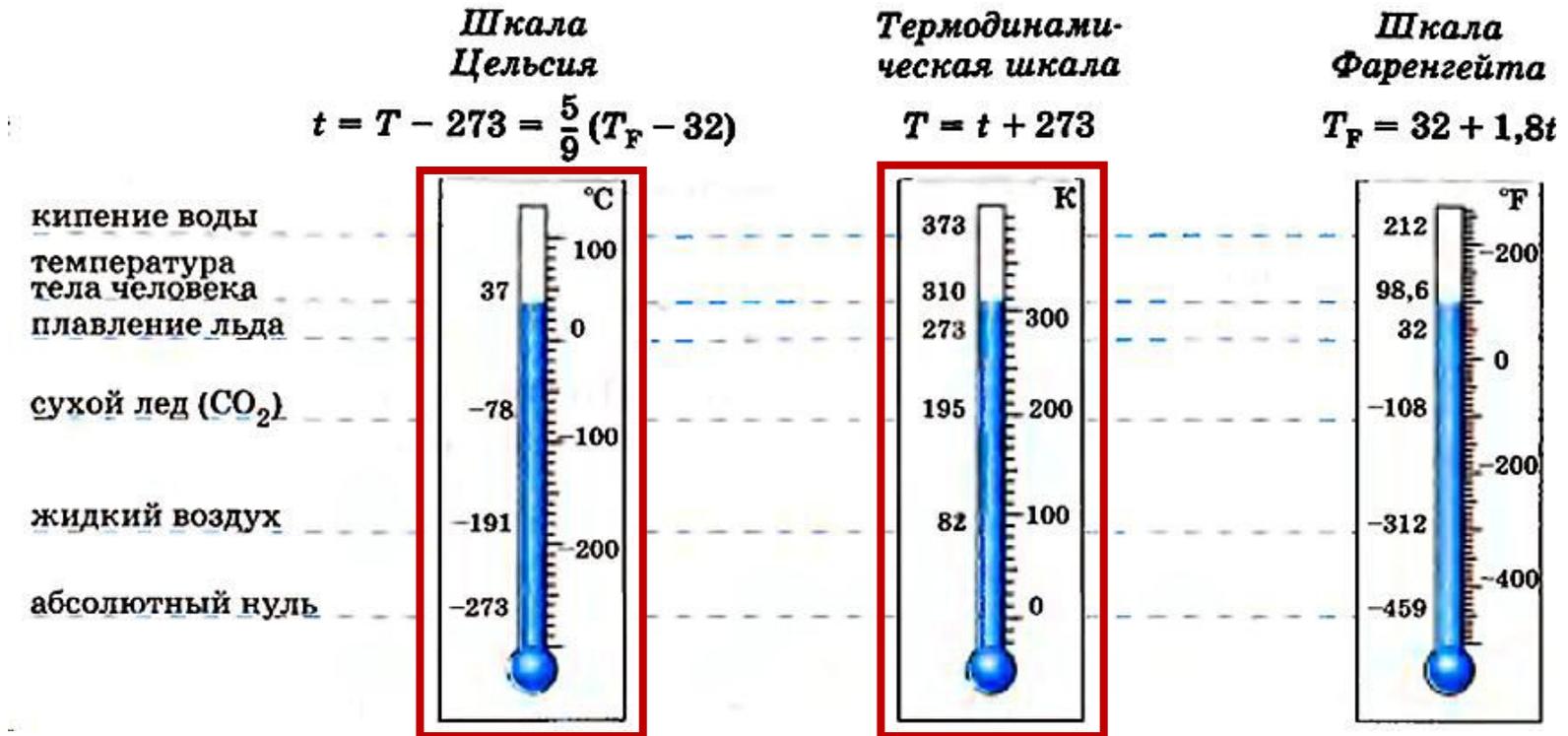
---

$$d = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}}$$

диаметр одной молекулы  $\approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

# ТЕМПЕРАТУРА

**Температура** — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы

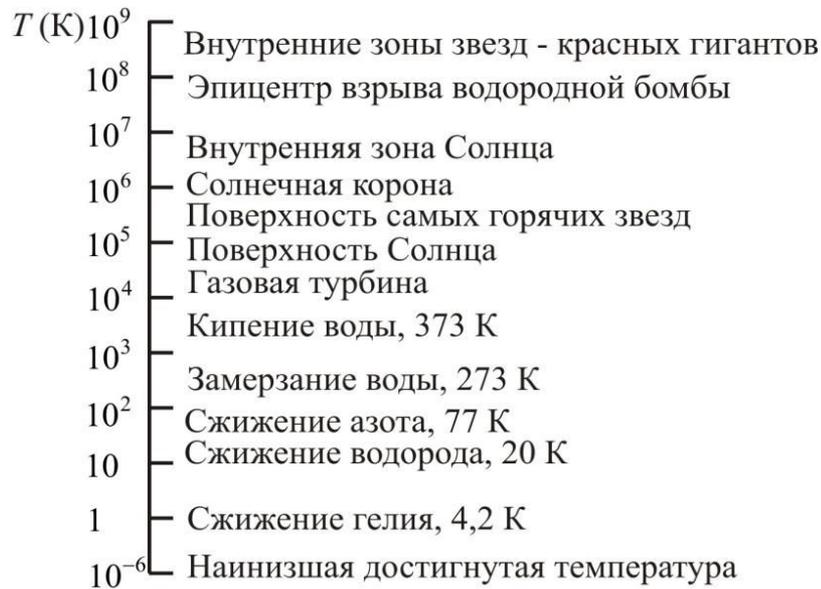


$$T = 273K + t$$

**Свойства температуры:**

- абсолютная температура всегда **положительна**
- не обладает свойством **аддитивности**
- невозможно достичь **абсолютного нуля**

# ТЕМПЕРАТУРА



Рекордная **низкая** температура на поверхности земли – **89.2° С** была зарегистрирована на советской научной станции Восток, Антарктида (высота 3488 м над уровнем моря) 21 июля 1983г

Когда материя охлаждается, тепловая энергия уменьшается. Вещество переходит от менее упорядоченного состояния к более упорядоченному.

Газ превращается в жидкость и затем кристаллизуется в твёрдое тело.

При абсолютном нуле электроны движутся между атомами со скоростью Ферми ( $10^6$  м/с).

Температуры абсолютного нуля достичь невозможно. Наиболее низкая температура ( $450 \pm 80$ ) ·  $10^{-12}$  К была получена в 2003 г. в США.

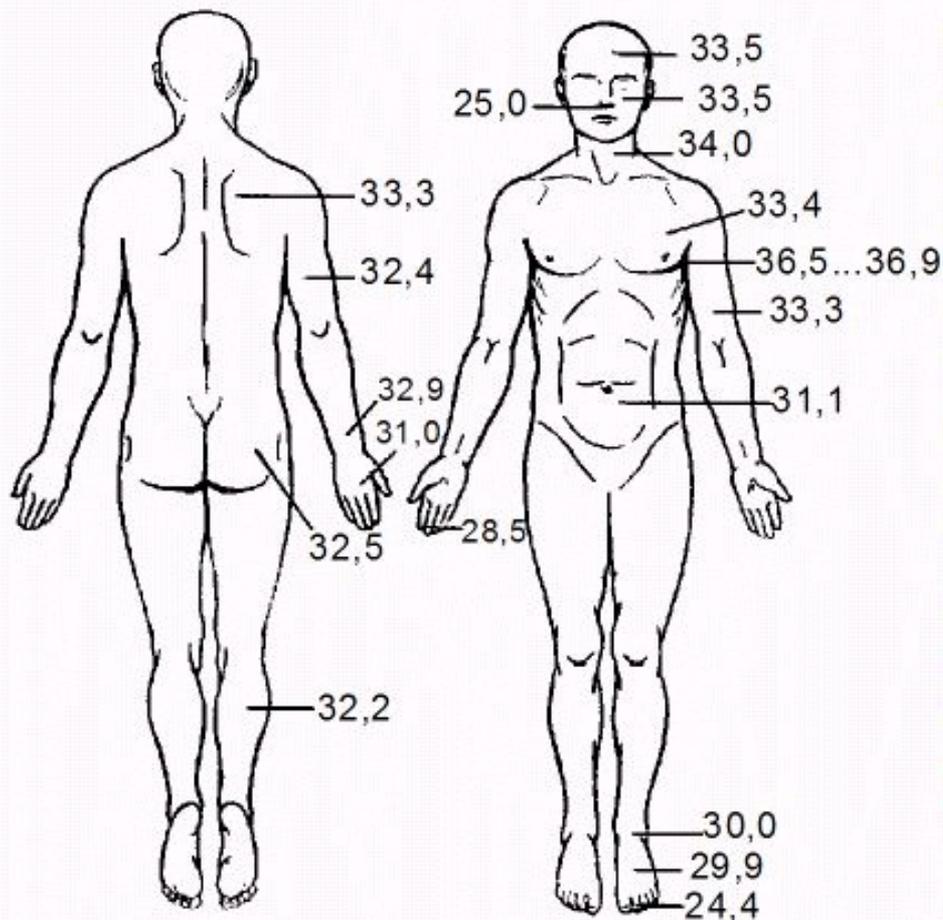
**ВЕРХОЯНСК - ПОЛЮС ХОЛОДА  
СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ЗЕМЛИ**

**57,8°**

В ДЕКАБРЕ 1869 ГОДА ПОЛИТССЫЛЬНЫЙ И.А. ХУДЯКОВ  
ОТКРЫЛ « ПОЛЮС ХОЛОДА » ЗАРЕГИСТРИРОВАВ ТЕМПЕРАТУРУ  
-53,2°

15 ЯНВАРЯ 1885 ГОДА ПОЛИТССЫЛЬНЫЙ С.Ф. КОВАЛИК  
ЗАФИКСИРОВАЛ - 57,8. ЭТО ТЕМПЕРАТУРА ДЛЯ СЕВЕРНОГО ПОЛУ-  
ШАРИЯ ОСТАЕТСЯ РЕКОРДНОЙ И ПОНЫНЕ. ЭТИ ДАННЫЕ  
ВКЛЮЧЕНЫ В « ЛЕТОПИСЬ ГЛАВНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ »  
МИФ ЯКУТОВ: ЗЛОЕ СУЩЕСТВО БЕЛЫЙ БЫК ЗИМЫ С ГОЛУ-  
ВЫМИ ПЯТНАМИ ИМЕЕТ ГРОМДНЫЕ РОГА, МОРОЗНОЕ  
ДЫХАНИЕ. С ПОТЕПЛЕНИЕМ В СЕРЕДИНЕ ФЕВРАЛЯ, ОТПАДАЕТ  
ОДИН РОГ, В МАРТЕ ОТЛАМЫВАЕТСЯ И ВТОРОЙ РОГ. ЗАТЕМ И  
ГОЛОВА СЛЕТАЕТ ПРОЧЬ И ТОГДА С ГРОХОТОМ РАВВАЛЫВАЕТСЯ  
ВСЯ ЕГО ТУША. ПОСЛЕ ЭТОГО НАСТУПАЕТ ВЕСНА.

# ТЕМПЕРАТУРА КОЖНЫХ ПОКРОВОВ



Температура печени +38 ... +38,5 град.С

Температура в прямой кишке,  
ректальная +37 ... +37,5 град. С

Температура в подмышечной впадине  
у здорового человека +36 ... +37 град.С

Понижение температуры тела,  
при которой возникает озноб,  
не представляет опасности, до + 32 град.С

Понижение температуры тела,  
при которой наступает кома,  
нарушение сердечной деятельности  
и дыхания, до + 27 град. С

Критическая температура тела  
ниже + 25 град.С

# ТЕМПЕРАТУРА



**Людвиг Больцман**  
австрийский физик  
(1844 – 1906)

Температура – термодинамический параметр, одинаковый во всех частях термодинамической системы, находящейся в тепловом равновесии. **Температура – мера кинетической энергии теплового движения частиц идеального газа**

Температуры тел, находящихся в тепловом контакте, выравниваются.

Опытным путем установлено, что при тепловом равновесии для всех газов одинаково отношение:

$$\frac{p}{n} = \frac{pV}{N} = kT$$

Чтобы связать энергию с температурой, Больцман ввел коэффициент пропорциональности  $k$ , который впоследствии был назван его именем:

$k$  – постоянная  
**Больцмана**

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

$$\frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT$$

$$m_0 \langle v^2 \rangle = 3kT$$

$$T = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{3k} \quad k = \frac{R}{N_A}$$

$$\langle v^2 \rangle = \frac{3kT}{m_0} = \frac{3RT}{m_0 N_A} = \frac{2RT}{M}$$

# ДАВЛЕНИЕ ГАЗА



**Даниил Бернулли**  
швейцарский физик  
(1700 - 1782)

**Давление газа – есть следствие столкновения газовых молекул со стенками сосуда. Давление является единственным сигналом присутствия газа**

**Давление - равно отношению силы, действующей за единицу времени на единицу площади**

**В свою очередь газ или жидкость оказывают давление на стенки сосуда (внутреннее давление) – одинаковое во всех направлениях и во всем объеме, независимо от формы сосуда (закон Паскаля).**

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} n \cdot m \cdot v_x^2$$

**Молекулы имеют разные скорости, направленные в разные стороны, то есть скорости газовых молекул – случайная величина**

Случайную величину характеризует **среднеквадратичная величина**

Под скоростью  $v_x^2$  необходимо понимать  $\langle v_x^2 \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$  **среднеквадратичную**

**скорость, характеризующую всю совокупность молекул газа**

# ДАВЛЕНИЕ ГАЗА

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$$

ни одной из этих проекций нельзя отдать предпочтение из-за хаотичного теплового движения молекул, то есть в среднем  $v_x^2 = v_y^2 = v_z^2$

$$P = \frac{1}{3} m_0 n \langle v^2 \rangle = \frac{1}{3} \rho \langle v^2 \rangle$$

**основное уравнение  
молекулярно-  
кинетической теории**

Учитывая, что

$$P = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$$

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



$$P = nkT$$

**основное уравнение  
молекулярно-  
кинетической теории**

где  $\langle E_k \rangle$  – средняя энергия одной молекулы.

**Давление газов определяется средней кинетической энергией поступательного движения молекул**

# ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Примером термодинамической системы является идеальный газ.

**Идеальный газ** это совокупность огромного числа одинаковых молекул размеры, которых пренебрежимо малы. Молекулы движутся по законам классической механики и взаимодействуют между собой только во время столкновений, которые носят характер упругого удара.

Реальный газ приближается к идеальному газу при средних температурах и низких давлениях.

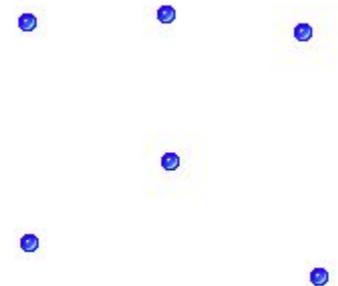
---

## Модель идеального газа:

радиус взаимодействия молекул много меньше среднего расстояния между ними (молекулы взаимодействуют только при столкновении);

столкновения молекул между собой и со стенками сосуда – абсолютно упругие (выполняются законы сохранения энергии и импульса);

объем всех молекул газа много меньше объема, занятого газом



# ЗАКОН БОЙЛЯ-МАРИОТТА



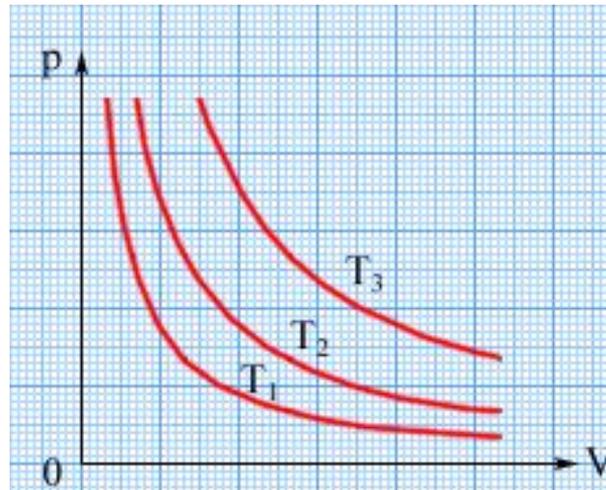
**Роберт Бойль**  
англо-ирландский  
физик  
(1627 - 1691)

**Закон Бойля — Мариотта (изотермический процесс):** при постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы произведение объёма газа на его давление остаётся постоянным:

$$PV = const$$



**Эдем Мариотт**  
французский физик  
(1620 - 1684)



$$T_3 > T_2 > T_1$$

# ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА



**Жозеф Гей-Люссак**  
французский физик  
(1778 - 1850)

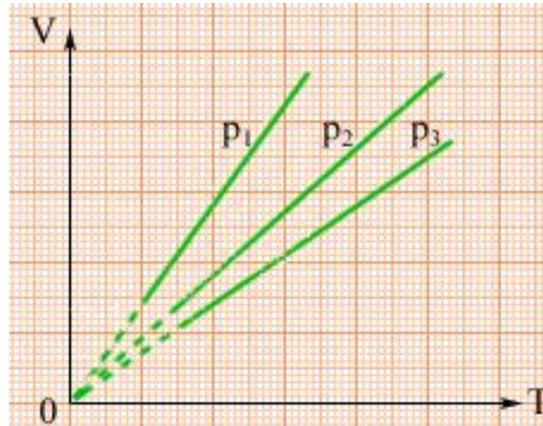
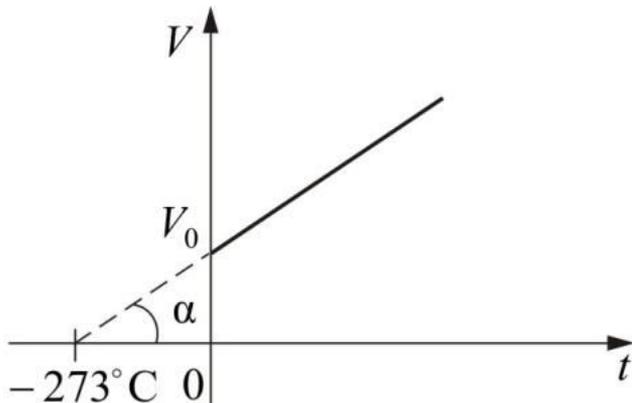
**Закон Гей-Люссака (изобарический процесс):** объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой

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

где  $V_0$  – объем при  $0^\circ\text{C}$  по Цельсию;  $\alpha$  – температурный коэффициент расширения газа равен  $1/273 \text{ град}^{-1}$

**Закон Гей-Люссака:** при постоянном давлении и неизменных значениях массы и газа, и его молярной массы отношение объёма газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным:

**Процесс можно считать изобарным, если не меняется внешнее давление**



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

$$P_3 > P_2 > P_1$$

# ЗАКОН ШАРЛЯ



**Жак Александр  
Сезар Шарль**  
французский физик  
(1746 - 1823)

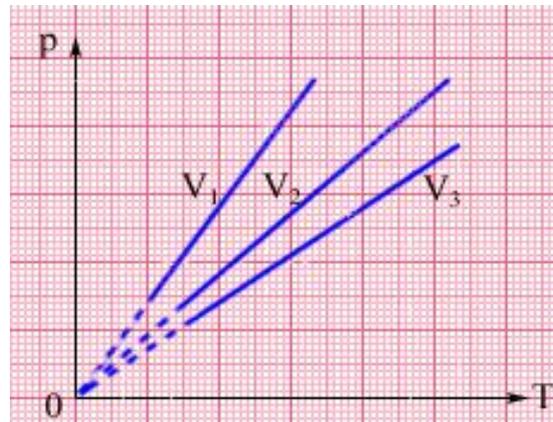
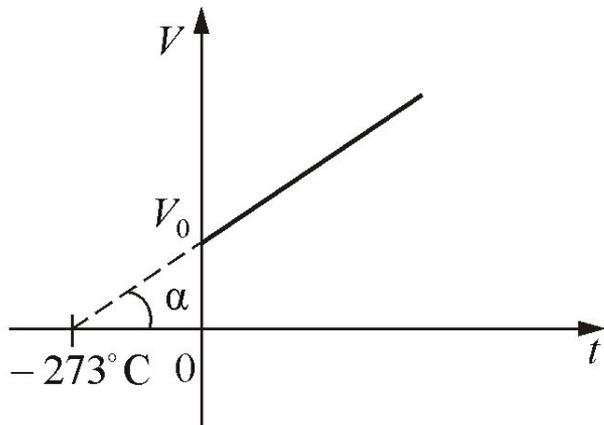
**Закон Шарля (изохорный процесс)** для случая когда температура выражена в Цельсиях: давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой

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

где  $P_0$  – давление при  $0^\circ\text{C}$  по Цельсию;  $\alpha$  – температурный коэффициент давления газа равен  $1/273 \text{ град}^{-1}$

**Закон Шарля:** при постоянном объёме и неизменных значениях массы газа и его молярной массы отношение давления газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным:

**Процесс можно считать изохорным, если он происходит в закрытом сосуде**



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

$$V_3 > V_2 > V_1$$

# УРАВНЕНИЕ КЛАПЕЙРОНА



Бенуа Клапейрон  
французский физик  
(1799 - 1864)

**Объединённый газовый закон** (Закон Клапейрона).  
В соответствии с законами Бойля - Мариотта и Гей-Люссака можно сделать заключение, что для данной массы газа

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

---

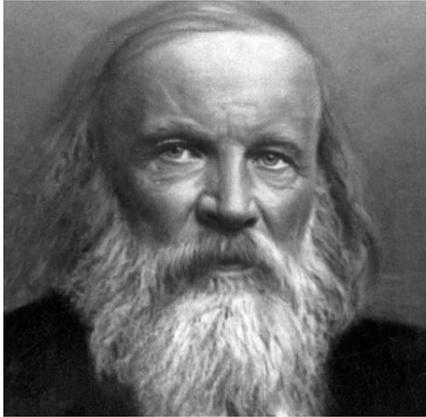
Для одного моля газа

$$\frac{PV}{T} = R$$

Для  $\nu$  моля газа

$$\frac{PV}{T} = \nu \cdot R$$

# УРАВНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВА—КЛАПЕЙРОНА



Д.И. Менделеев  
русский ученый  
(1834 - 1907)

Менделеев объединил законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля с законом Авогадро. Уравнение, связывающее все эти законы, называется **уравнением Менделеева-Клапейрона**

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

$$R = N_A k = 8,31 \text{ Дж/моль К}$$

$$PV = \nu RT$$

$$M = \rho RT$$

# ЗАКОН ДАЛЬТОНА



**Джон Дальтон**  
английский ученый  
(1766 - 1844)

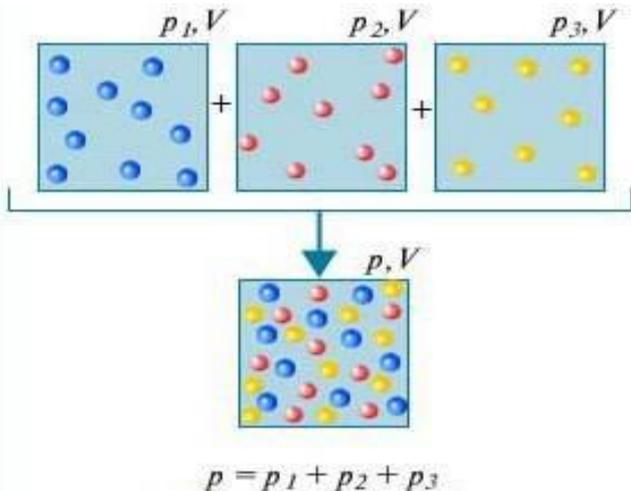
**Закон Дальтона:** полное давление смеси газа равно сумме парциальных давлений всех газов, входящих в смесь

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

**парциальные давления** — давления, которые оказывали бы газы смеси, если бы они одни занимали объем, равный объему смеси при той же температуре

$$PV = \left( \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n} \right) RT$$

**уравнение Менделеева-Клапейрона для смеси газов**



# ОПЫТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МКТ

- ! Доказать существования молекул и измерить скорость их движения

$$\frac{m\langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2}kT \quad \rightarrow \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad \rightarrow \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad \rightarrow \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$
$$P = nkT$$
$$N = 1$$
$$PV = \frac{m}{M}RT$$

# ОПЫТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МКТ

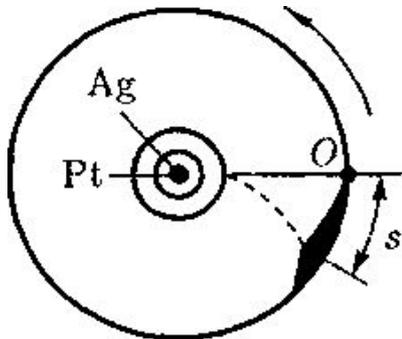


Отто Штерн  
немецкий физик  
(1888 – 1969)

**Опыт Штерна:** опытным путем были измерены скорости газовых молекул и показано, что они имеют большой разброс по скоростям.

Причина – в хаотичности теплового движения молекул.

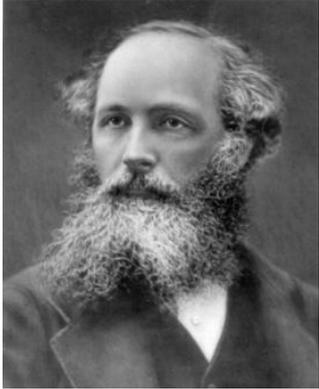
В XIX веке **Дж. Максвелл** утверждал, что молекулы, беспорядочно сталкиваясь друг с другом, как-то «распределяются» по скоростям, причём вполне определённым образом



Температура нити в опытах Штерна равнялась  $1200^{\circ}\text{C}$ , что соответствует **среднеквадратичной скорости молекул серебра**  $v_{\text{КВ}} = 584 \text{ м/с}$

В эксперименте получился **разброс значений скорости от 560 до 640 м/с**, что указывает на движение атомов Ag с различными скоростями

# ЗАКОН МАКСВЕЛЛА



**Джеймс Максвелл**  
британский физик  
(1831 – 1879)

Распределение молекул идеального газа по скоростям впервые было получено английским ученым Дж. Максвеллом в 1860 году с помощью методов теории вероятностей

**Максвелл использовал предположения:**

- а) все направления в пространстве равноправны, т.е. любое направление скорости одинаково вероятно. Движение по трем взаимно перпендикулярным осям независимы.
- б) газ состоит из очень большого числа  $N$  тождественных молекул находящихся в состоянии беспорядочного теплового движения при одинаковой температуре.
- в) силовые поля на газ не действуют.

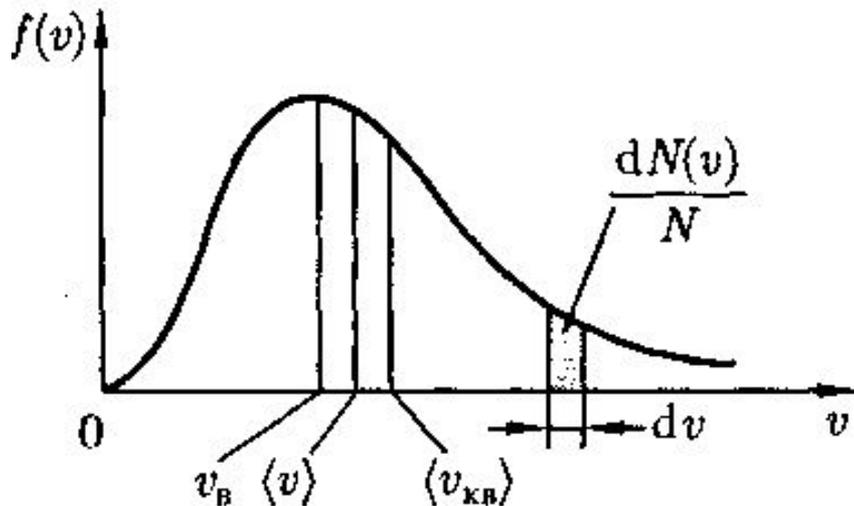
# ЗАКОН МАКСВЕЛЛА

**Закон Дж. Максвелла:** распределение молекул по скоростям стационарное, не меняющееся со временем

$$f(v) = A e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

где  $A = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}}$

**Закон определяет,** какое число  $dN$  молекул ( $p = \text{const}$ ) одноатомного идеального газа из общего числа  $N$  его молекул в единице объёма имеет при данной температуре  $T$  скорости, заключенные в интервале от  $v$  до  $v + dv$



Закон распределения по скоростям справедлив только для газа в равновесной системе.

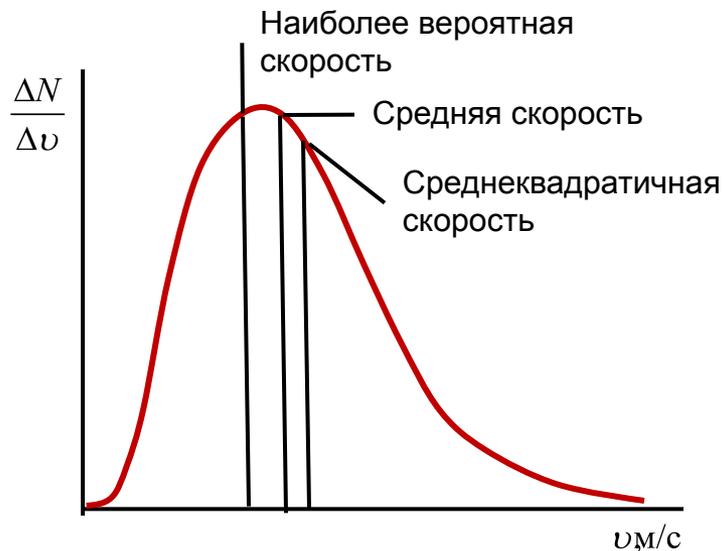
Закон статистический и выполняется тем лучше, чем больше число молекул

# ЗАКОН МАКСВЕЛЛА

$$f(v) = A e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

$f(u)$  – имеет смысл вероятности, то есть показывает, какова вероятность любой молекулы газа в единице объёма иметь скорость, заключённую в единичном интервале, включающем заданную скорость  $u$ .

$f(u)$  называют плотностью вероятности



Выводы:

вид распределения молекул газа по скоростям, для каждого газа **зависит** от массы  $m$  и температуры  $T$  газа **и не зависит** от давления  $P$  и объёма  $V$  газа.

распределение Максвелла характеризует **распределение молекул по значениям кинетической энергии** (показывает, какова вероятность при данной температуре иметь такое значение кинетической энергии)

# ЗАКОН МАКСВЕЛЛА

Скорость, при которой функция распределения молекул идеального газа по скоростям максимальна, называется **наиболее вероятной скоростью**

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

**Средняя арифметическая скорость молекулы**

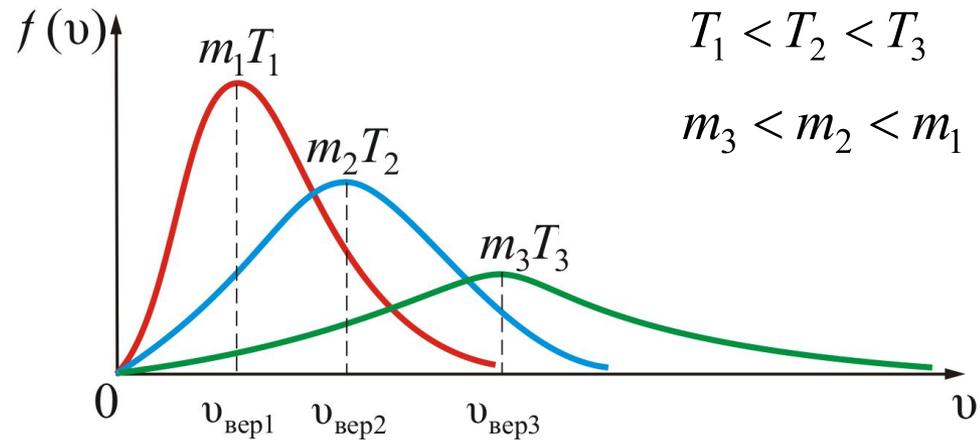
$$\langle v_a \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

**Среднеквадратичная скорость молекулы**

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

При повышении температуры значение наиболее вероятной скорости становится больше.

Площадь, ограниченная графиком, остается неизменной, при повышении температуры график будет растягиваться и понижаться



$$\frac{\langle v \rangle}{v_B} = 1,22$$

$$\frac{v_a}{v_B} = 1,13$$

# ЗАДАЧА

Найти среднюю арифметическую, среднюю квадратичную и наиболее вероятную скорости молекул газа, который при давлении 40 кПа имеет плотность 0,3 кг/м<sup>3</sup>

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

$$\langle v_a \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

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

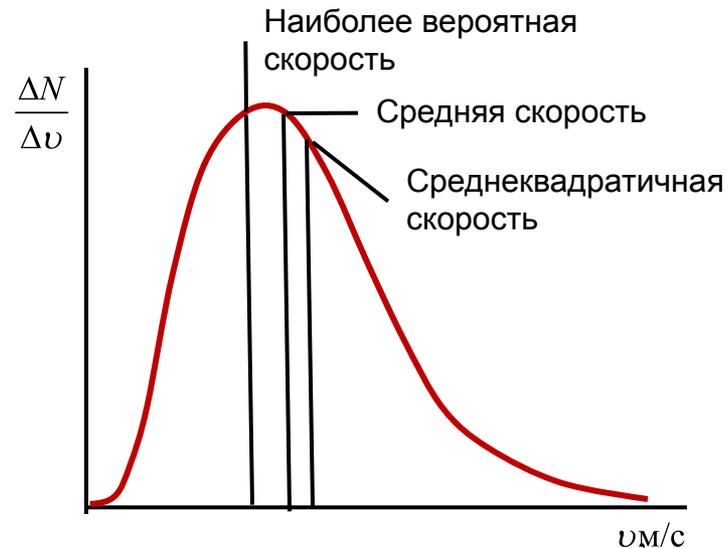
$$M = \frac{\rho RT}{P}$$

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M}$$

$$v_B = 513 \text{ м / с}$$

$$\langle v_a \rangle = 579 \text{ м / с}$$

$$\langle v \rangle = 628 \text{ м / с}$$



# ЗАДАЧА

При какой температуре  $T$  средняя квадратичная скорость молекул азота больше их наиболее вероятной скорости на  $\Delta v = 50$  м/с?

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

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

$$\langle v \rangle = v_B + \Delta v$$

$$\Delta v = \langle v \rangle - v_B$$

$$T = \frac{M(\Delta v)^2}{R(\sqrt{3} - \sqrt{2})^2} = 83,37 K$$

# ЗАКОН МАКСВЕЛЛА

Для решения многих задач удобно использовать формулу Максвелла, где скорость выражена в относительных единицах.

Относительную скорость обозначим через  $u$ :  $u = \frac{v}{v_{\text{вер}}}$  где  $v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$



$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2 \Delta u$$

**Закон распределения Дж. Максвелла по скоростям**

# ЗАДАЧА

Какая часть молекул кислорода при  $t=0^\circ \text{C}$  обладает скоростями  $v$  от 100 до 110 м/с?

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2 \Delta u$$

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

$$u = \frac{v}{v_{\text{вер}}}$$

$$u^2 = 0,071$$

$$e^{-u^2} = 0,93$$

$$\Delta u = \frac{10}{376}$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2 \Delta u = 0,004 = 0,4\%$$

# БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА

на молекулы любого газа находящиеся в потенциальном поле тяготения Земли, действует **сила тяготения**

молекулы любого газа находятся в тепловом движении

стационарное состояние газа, при котором давление газа с высотой убывает



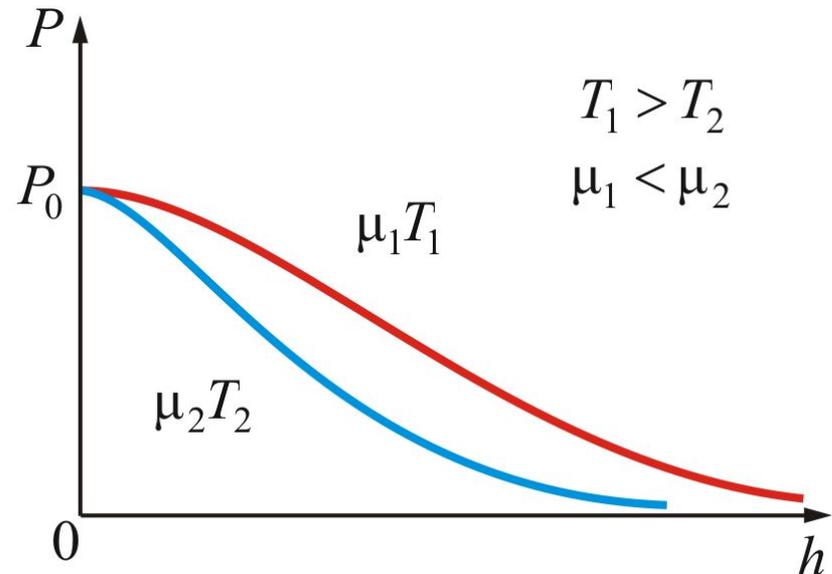
Зависимость давления или плотности газа от высоты в поле силы тяжести в стационарных условиях

**Барометрическая формула** позволяет найти атмосферное давление в зависимости от высоты или, измерив давление, найти высоту

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

$p$  – давление на высоте  $h$   
 $p_0$  – давление при  $h=0$

чем тяжелее газ ( $> M$ ) и чем ниже температура, тем быстрее убывает давление



# ЗАДАЧА

На какой высоте  $h$  давление воздуха составляет 75% от давления на уровне моря?  
Температуру воздуха считать постоянной и равной  $t=0^\circ \text{C}$ .

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

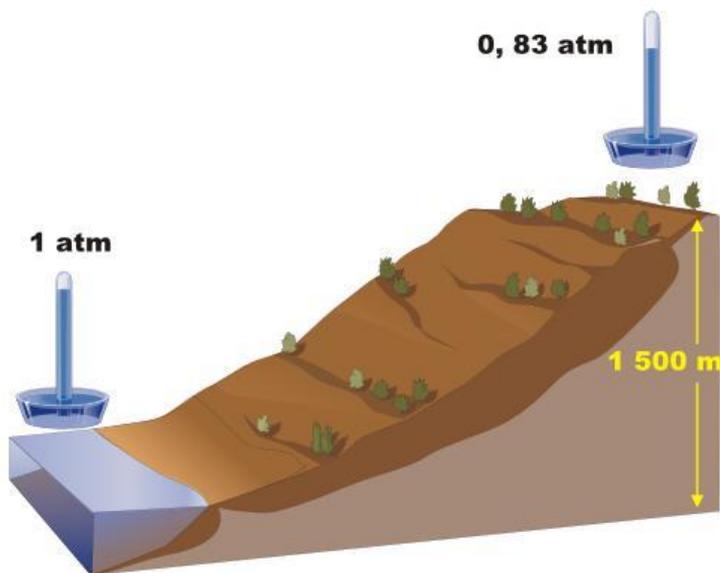
$$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{Mgh}{RT}$$

$$h = -\frac{RT \ln \frac{P}{P_0}}{Mg} = 2296$$

# БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА

Для практических целей необходимо найти высоту, зная давление. Из барометрической формулы можно получить зависимость высоты от уровня давления:

$$h = kT \cdot \ln \left( \frac{P_0}{P_h} \cdot \frac{1}{mg} \right)$$



высотомер



# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БОЛЬЦМАНА

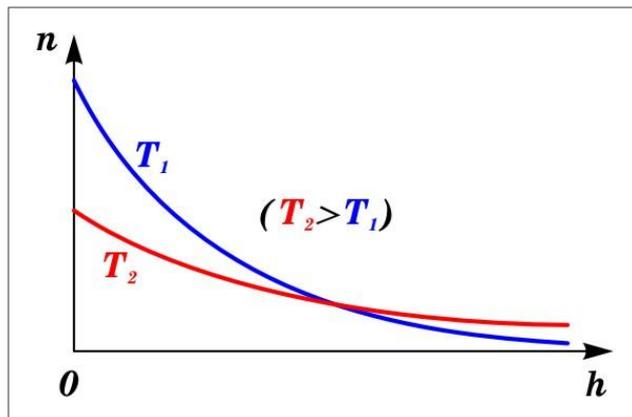
$$P = P_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}$$
$$P = nkT$$

$$n = n_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}} \quad \text{или} \quad n = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}$$

$n_0$  и  $n$  – число молекул в единичном объёме на высоте  $h = 0$  и  $h$ , соответственно

**Распределение Больцмана** определяет распределение частиц в силовом поле в условиях теплового равновесия

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



При уменьшении температуры число молекул на высотах **убывает**.

При  $T=0$  тепловое движение прекращается, все молекулы расположились бы на земной поверхности.

При увеличении температуры молекулы распределены по высоте равномерно, а **плотность молекул убывает с высотой**

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА - БОЛЬЦМАНА

закон Максвелла → распределение частиц по значениям кинетической энергии

закон Больцмана → распределение частиц по значениям потенциальной энергии



**Единый закон Максвелла-Больцмана:**  
число молекул в единице объёма, скорости которых лежат в пределах от  $u$  до  $u+du$  равно

$$dn_{U,K} = n_0 \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{U+K}{kT}} v^2 dv$$

**Статистика Максвелла — Больцмана** — статистический метод описания физических систем, содержащих большое число невзаимодействующих частиц, движущихся по законам классической механики

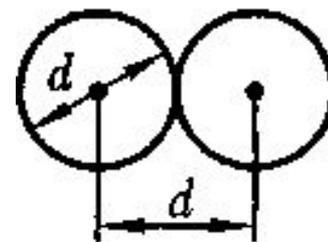
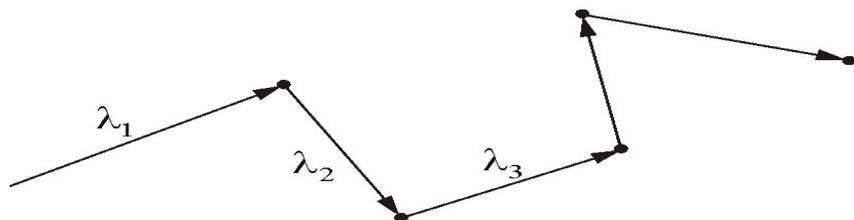
# СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ

Средняя длина свободного пробега - расстояние, проходимое молекулой в среднем без столкновений

$$\langle \lambda \rangle = v_{\text{ср}} \tau$$

$v_{\text{ср}}$  – средняя скорость теплового движения

$\tau$  – среднее время между двумя столкновениями



---

**Эффективный диаметр молекулы  $d$**  - минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул



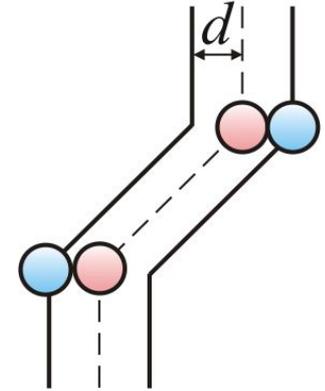
зависит от скорости сталкивающихся молекул, т.е. от температуры газа  
(уменьшается с ростом температуры)

# СРЕДНЕЕ ЧИСЛО СТОЛКНОВЕНИЙ МОЛЕКУЛ

Все молекулы движутся



число соударений определяется средней скоростью движения молекул относительно друг друга



По закону сложения случайных величин

$$\begin{aligned} \langle v \rangle &= \sqrt{\langle v^2 \rangle + \langle v^2 \rangle} \\ &= \sqrt{2 \langle v^2 \rangle} = \sqrt{2} \langle v \rangle \end{aligned}$$

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

Средняя длина свободного пробега молекул

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d^2}$$

С учетом основного уравнения МКТ

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P}$$

$$\frac{\langle \lambda_1 \rangle}{\langle \lambda_1 \rangle} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{p_2}{p_1}$$

# ЗАДАЧА

Найти среднюю длину свободного пробега  $\lambda$  молекул воздуха и число столкновений молекул при нормальных условиях. Диаметр молекул воздуха  $d=0,3$  нм.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P}$$

$$z = \frac{\langle v_a \rangle}{\lambda}$$

$$\langle v_a \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi}}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P} = 94,2 \text{ нм}$$

# ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ

Необратимые процессы, называемые **явлениями переноса**, в результате которых происходит пространственный перенос энергии, массы, импульса

**диффузия**  
(обусловлена  
переносом массы)

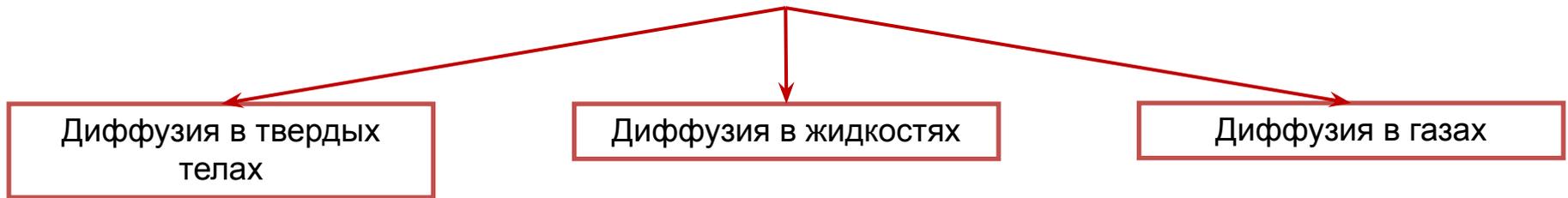
**теплопроводность**  
(обусловлена  
переносом энергии)

**внутреннее трение**  
(обусловлено  
переносом  
импульса)

# ДИФФУЗИЯ

**Диффузия** (распространение, растекание) – взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга, вследствие теплового движения частиц вещества

Диффузия происходит в направлении уменьшения концентрации вещества и ведет к его равномерному распределению по занимаемому объему



молекулы движутся с огромными скоростями



диффузия **должна** происходить очень быстро, но процесс **происходит медленно**

Молекулы при атмосферном давлении обладают малой длиной свободного пробега и, сталкиваясь с другими молекулами, в основном «стоят» на месте

диффузия сводится к обмену масс частиц соприкасающихся тел, возникает и продолжается, пока существует градиент плотности

$$\text{grad } n = \frac{dn}{dx}$$

**Градиент** — вектор, своим направлением указывающий направление наибольшего возрастания некоторой величины. значение которой меняется от одной точки пространства к другой

# ДИФФУЗИЯ



**Адольф Ойген Фик**  
немецкий физик  
(1829 - 1901)

Результирующий диффузионный поток пропорционален градиенту концентрации и подчиняется **закону Фика**

$$J = -D \frac{dn}{dx}$$

$$J = -D \operatorname{grad} n$$

$$[D] = \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$$

Знак минус в уравнении Фика показывает, что диффузионный поток направлен в сторону уменьшения концентрации. При этом **коэффициент диффузии D** численно равен диффузионному потоку через единицу площади в единицу времени при  $\operatorname{grad} n=1$

коэффициент диффузии

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v_a \rangle$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \sigma P}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P}$$

$$\langle v_a \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$$p = nkT$$

диффузионный поток,  
направлен в сторону  
уменьшения концентрации  
вещества, массы и  
плотности

с увеличением  
температуры диффузия в  
газах ускоряется, с ростом  
давления – замедляется

# ЗАДАЧА

Найти коэффициент диффузии  $D$  водорода при нормальных условиях, если средняя длина свободного пробега  $\lambda=0,16$  мкм.

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle$$

$$\langle v_a \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi}}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P}$$

$$D = 0,06 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$$

# ДИФФУЗИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

**Диффузионная металлизация** – процесс диффузионного насыщения поверхности изделий металлами или металлоидами.

---

**Борирование** – диффузионное насыщение поверхности металлов и сплавов бором для повышения твердости, коррозионной стойкости, износостойкости проводят путем электролиза в расплавленной соли бора.

---

**Алитирование** – это процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя алюминием, проводят в порошкообразных смесях алюминия или в расплавленном алюминии. Цель – получение высокой жаростойкости поверхности стальных деталей.

---

**Силицирование** – диффузионное насыщение кремнием проводят в газовой атмосфере. Насыщенный кремнием слой стальной детали имеет не очень высокую твердость, но высокую коррозионную стойкость и повышенную износостойкость в морской воде, азотной, соляной в серной кислотах.

# ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФУЗИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

**Диффузионная сварка металлов.** Методом диффузионной сварки соединяют между собой металлы, неметаллы, металлы и неметаллы, пластмассы. Детали помещают в закрытую сварочную камеру с сильным разряжением, сдавливают и нагревают до 800 градусов. При этом происходит интенсивная взаимная диффузия атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов. Диффузионная сварка применяется в основном в электронной и полупроводниковой промышленности, точном машиностроении.

---

**Для извлечения растворимых веществ** из твердого измельченного материала применяют диффузионный аппарат. Такие аппараты распространены главным образом в свеклосахарном производстве, где их используют для получения сахарного сока из свекловичной стружки, нагреваемой вместе с водой.

# ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ (ВЯЗКОСТЬ)

**Механизм возникновения внутреннего трения между параллельными слоями газа (жидкости)**

хаотическое  
тепловое  
движение молекул  
газа (жидкости)



происходит обмен  
молекулами между  
слоями, в результате чего  
импульс «быстрого» слоя  
—уменьшается, импульс  
«медленного» слоя —  
увеличивается



торможение  
«быстрого» слоя и  
ускорение  
«медленного» слоя

---

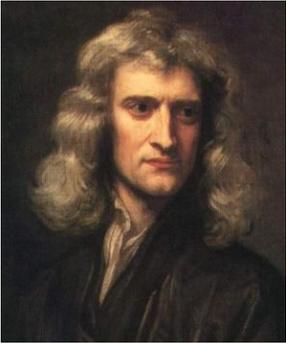
Каждая молекула газа в слое участвует в двух движениях: **тепловом и направленном**.

Если **направление теплового движения** хаотически меняется, то вектор тепловой скорости равен нулю.

**Направленное движение** определяется постоянной скоростью с которой дрейфуют молекулы.

Перемешивание молекул разных слоёв приводит к выравниванию дрейфовых скоростей разных слоёв, это проявляется как **действие сил трения между слоями – внутреннее трение**

# ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ (ВЯЗКОСТЬ)



Исаак Ньютон  
английский физик  
(1642 – 1726)

причиной внутреннего трения в газах является перенос импульса из одного слоя в другой. Сила трения пропорциональна градиенту скорости и подчиняется **закону Ньютона для вязкого трения**:

$$f = -\eta \frac{dv}{dx} \qquad f = -\eta \operatorname{grad} v$$

$\eta$  – коэффициент вязкости  
 $\rho$  – плотность газа

---

$$\eta = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle n m_0 = D \rho$$

Коэффициент вязкости  $\eta$  численно равен импульсу, переносимому в единицу времени через единицу площади при градиенте скорости равном единице

Коэффициент вязкости газов растет с повышением температуры пропорционально  $\sqrt{T}$ .  
Измеряется коэффициент вязкости в Па·с.

# ЗАДАЧА

Найти среднюю длину свободного пробега  $\lambda$  молекул гелия при давлении  $p=101,3$  кПа и температуре  $t=0^\circ\text{C}$ , если вязкость гелия  $\eta=13$  мкПа·с.

$$\eta = \frac{1}{3} \lambda \langle v_a \rangle n m_0 = D \rho$$

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v_a \rangle$$

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

$$\langle v_a \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi}}$$

$$\lambda = 182 \text{ нм}$$

# ПРИМЕНЕНИЕ ВЯЗКОСТИ

## **Применение в косметологии**

Косметические компании зарабатывают огромную прибыль на том, что смогли найти идеальный баланс вязкости, который нравится покупателям.

---

## **Применение в медицине**

Определение и контроль вязкости крови. Густая и вязкая кровь плохо движется по кровеносным сосудам, что ограничивает поступление питательных веществ и кислорода в органы и ткани. При низких температурах кровь становится более вязкой.

---

## **Применение в технике**

Неньютоновские жидкости используются в автопроме, моторные масла синтетического производства на основе неньютоновских жидкостей уменьшают свою вязкость в несколько десятков раз, при повышении оборотов двигателя, позволяя при этом уменьшить трение в двигателе.

# ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ



**Жан Батист Жозеф  
Фурье**  
французский физик  
(1768 - 1830)

**Теплопроводность** – явление переноса внутренней энергии из одного слоя газа в другой. Если в соседних слоях газа создана и поддерживается разность температур, то между ними будет происходить обмен тепла

Хаотичное  
движение  
молекул



перемешивание молекул  
с разной кинетической  
энергией

**Тепловой поток  $q$**  пропорционален градиенту температуры и подчиняется закону Фурье

$$q = -\chi \frac{dT}{dx}$$

$q$  – тепловой поток  
 $\chi$  – коэффициент теплопроводности

$$q = -\chi \text{ grad } T$$

**результатирующий тепловой поток** через единичную площадку в единицу времени равен  $q$  и **направлен в сторону противоположную направлению градиента**

**Энергия переносится в сторону убывания температуры (к холодному телу)**

# ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

$$\chi = \frac{1}{3} \lambda \langle v_a \rangle n \frac{i}{2} k$$

$$[\chi] = \frac{q \text{ Дж}}{\text{м}^2 \text{ К}} = \frac{\text{М} \cdot \text{Вт}}{\text{К}^2 \text{ с} \cdot \text{М} \cdot \text{К}}$$

$$\chi = \frac{1}{3} \lambda \langle v_a \rangle \rho C_V$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2n\pi d^2}}$$

Средняя длина свободного пробега молекул

## **χ** - коэффициента теплопроводности

---

с увеличением температуры теплопроводность газа возрастает и не зависит от давления

**Газы** - плохие проводники тепла. **χ** - прогрессирует с возрастанием температуры (0,006 до 0,6 Вт/(м·К)).

**Жидкости** **χ** колеблется (0,07 до 0,7 Вт/(м·К)).

**Металлы** – лучшие проводники тепла, **χ** (20÷418 Вт/(м·К)). Материалы с **χ** < 0,25 Вт/(м·К), принято обозначать как теплоизоляционные

# ЗАДАЧА

В сосуде объемом  $V=2$  л находится  $N=4 \cdot 10^{22}$  молекул двухатомного газа. Теплопроводность газа  $K=14$  мВт/(м·К). Найти коэффициент диффузии  $D$  газа.

$$\chi = \frac{1}{3} \lambda \langle v_a \rangle \rho C_V$$

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v_a \rangle$$

$$\langle v_a \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi}}$$

$$n = \frac{\rho N_a}{M}$$

$$D = 2,02 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$$

# УРАВНЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕНОСА

Закон Фурье для теплопроводности  $q = -\chi \text{grad} T$   
 $\chi = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle \rho C_V$

---

Закон Фика для диффузии  $J = -D \text{grad} n$   
 $D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle$

---

Закон Ньютона для внутреннего трения (вязкости)  $f = -\eta \text{grad} v$   
 $\eta = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle n m_0$

---

Связь коэффициентов переноса и характеристики теплового движения молекул

$$\chi = D \rho C_V \quad \frac{\lambda}{\eta C_V} = 1$$
$$\eta = D \rho$$
$$\chi = \eta C_V$$

# ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА ОТ ДАВЛЕНИЯ P

Скорость теплового движения молекул  $\langle v \rangle \sim \sqrt{T}$  и не зависит от давления  $P$ , а коэффициент диффузии  $D \sim \lambda$ .

При обычных давлениях и в разряженных газах  $D \sim \frac{1}{P}$

в высоком вакууме  $D = \text{const}$

При нормальном давлении

$$\rho \sim P$$

$$\eta \sim P$$

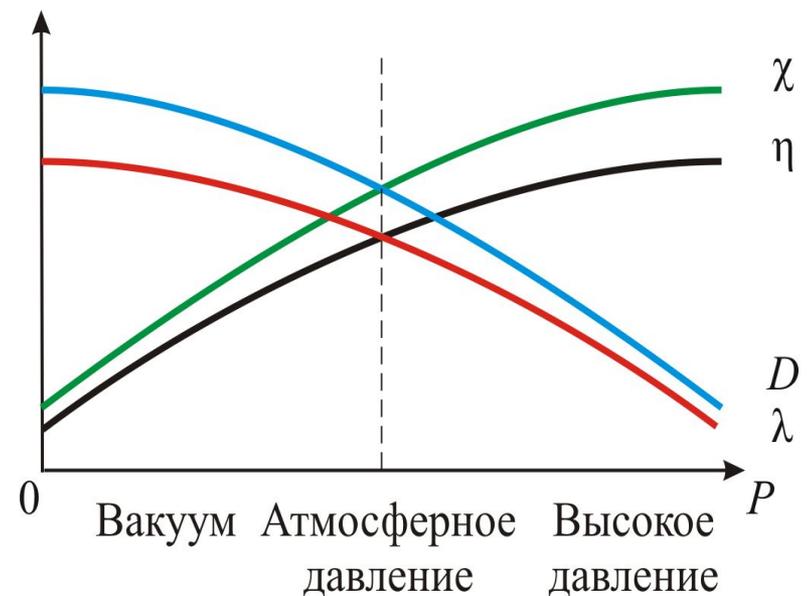
$$\chi \sim P$$

При увеличении давления и плотности

$$\lambda \downarrow \text{ и } D \rightarrow 0$$

$$\eta = \text{const}$$

$$\chi = \text{const}$$



# СВОЙСТВА УЛЬТРАРАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

Явления диффузии, теплопроводности, вязкого трения обусловлены взаимодействием молекул в газе и проявляются в случае,  $\lambda \ll d$

Характеристика	Вакуум			
	низкий	средний	высокий	сверхвысокий
	$\lambda \ll d$	$\lambda \leq d$	$\lambda > d$	$\lambda \gg d$
<b>Давление P (мм рт.ст)</b>	760 – 1	$1 - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{-8}$ и менее
<b>Концентрация (в м<sup>-3</sup>)</b>	$10^{25} - 10^{22}$	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{19} - 10^{13}$	$10^{13}$ и менее
<b>Зависимость коэффициентов <math>\chi</math>, <math>\eta</math> от давления</b>	Не зависят от давления	Определяется параметром $\frac{\langle \lambda \rangle}{l}$	$\eta \sim P$ $\chi \sim P$	$\eta \rightarrow 0$ $\chi \rightarrow 0$

# МОЛЕКУЛЯРНОЕ ТЕЧЕНИЕ. ЭФФУЗИЯ ГАЗОВ

**Молекулярное течение** газов в условиях вакуума – течение при котором молекулы не сталкиваются друг с другом.

**Эффузия газа** - течение газа в условиях вакуума через отверстие (под действием разности давлений)

**При эффузии**, количество протекающего в единицу времени газа обратно пропорционально корню квадратному из молярной массы

$$n \sim \frac{1}{\sqrt{\mu}}$$

# СВОЙСТВА УЛЬТРАРАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

Стационарное состояние ультраразреженного газа ( $\lambda \gg d$ ), находящегося в двух сосудах, соединенных трубкой, возможно если встречные потоки частиц, перемещающихся из одного сосуда в другой, одинаковы, т. е.

$$\frac{P_1}{P_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

$T_1$  и  $T_2$  – температуры газа в сосудах

$P_1$  и  $P_2$  – давления разреженного газа в обоих сосудах

в условиях высокого вакуума выравнивания давлений не происходит

**Эффект Кнудсена** – явление перетекания при одинаковых давлениях разреженного газа через поры (малые отверстия) от более низкой к более высокой температуре

---

**Тепловая эффузия природе.** Днем поверхность земли нагревается солнечными лучами. Из более глубоких слоёв почвы воздух выходит по капиллярам на поверхность и рассеивается ветром, и ночью наружный слой почвы охлаждается — возникает обратный поток воздуха в более глубокие слои почвы.