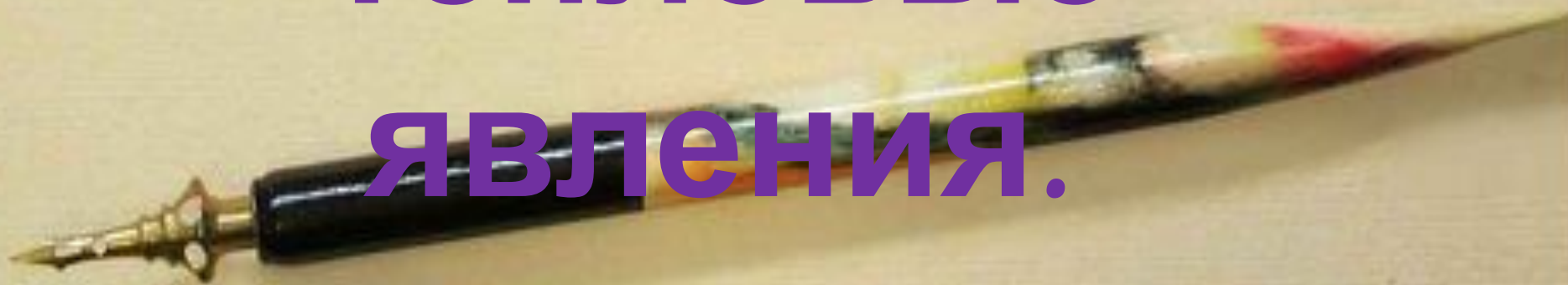


**Молекулярная  
физика.**

**Тепловые  
явления.**



## Рассматриваемые вопросы:

1. Основы молекулярно-кинетической теории.

2. Температура. Энергия теплового движения молекул

2. Температура. Энергия теплового движения молекул.

3. Уравнение состояния идеального газа. Газовые законы.

4. Взаимные превращения жидкостей и газов.

5. Твердые тела

6. Основы термодинамики.

# Основы МКТ

- Основные положения МКТ →
- Молекулярно-кинетическая теория →
- Масса и размеры молекул →
- Количество вещества →
- Строение газов, жидкостей и твердых тел →
- Идеальный газ →
- Среднее значение квадрата скорости молекул →
- Основное уравнение МКТ →



# Температура и энергия теплового движения молекул

- Температура и тепловое равновесие
- Температура – мера средней кинетической энергии молекул
- Скорости молекул





# Уравнение состояния идеального газа

- Уравнение Менделеева-Клапейрона →
- Газовые законы
  - Изотермический процесс →
  - Изобарный процесс →
  - Изохорный процесс →



# Взаимные превращения жидкостей и газов

- **Насыщенный пар** ➡
- **Испарение и кипение** ➡
- **Влажность воздуха** ➡
- **Измерение влажности** ➡



# Твердые тела

- Закон Гука →
- Кристаллические тела →
- Аморфные тела →





# Основы термодинамики

- **Внутренняя энергия** →
- **Работа в термодинамике** →
- **Количество теплоты** →
- **Первый закон термодинамики и его применение к различным процессам** →
- **Тепловые двигатели** →





# Основные положения МКТ

- 1. Все вещества состоят из молекул**
- 2. Молекулы находятся в непрерывном беспорядочном движении**
- 3. Между молекулами действуют силы взаимного притяжения и отталкивания**



# Молекулярно-кинетическая теория

- ✓ МКТ объясняет свойства макроскопических тел и тепловых процессов, на основе представлений о том, что все тела состоят из отдельных, беспорядочно движущихся частиц.
- ✓ Макроскопические тела – тела, состоящие из большого количества частиц.
- ✓ Микроскопические тела – тела, состоящие из малого количества частиц.



# Броуновское движение

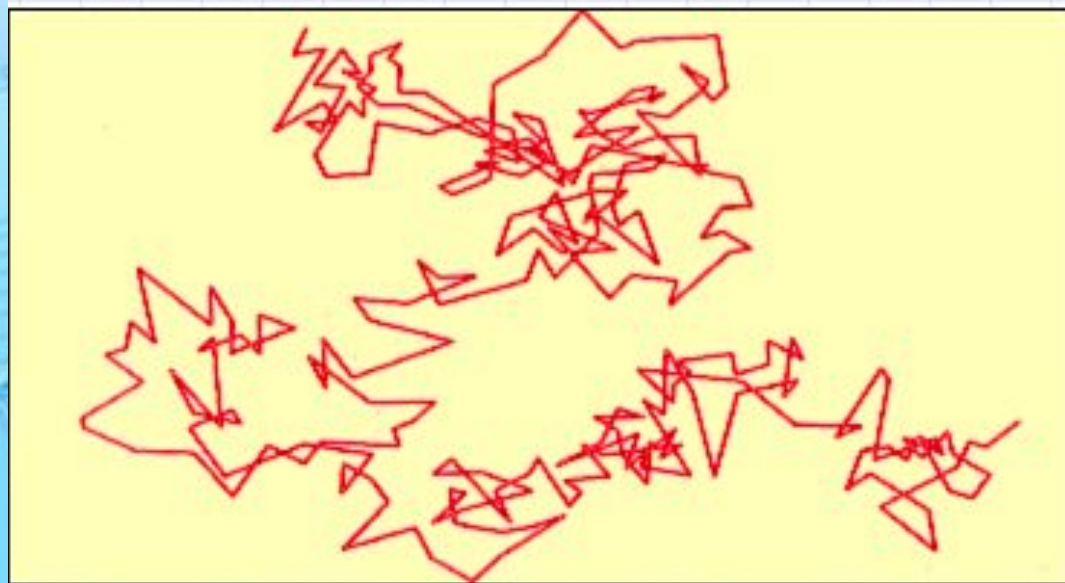
**Броуновское движение - это тепловое движение взвешенных частиц в жидкости (или газе).**

**Броуновское движение стало доказательством непрерывного и хаотичного (теплого) движения молекул вещества.**

**- открыто английским ботаником Р. Броуном в 1827 г.**

**- дано теоретическое объяснение на основе МКТ А. Эйнштейном в 1905 г.**

**- экспериментально подтверждено франц. физиком Ж. Перреном.**



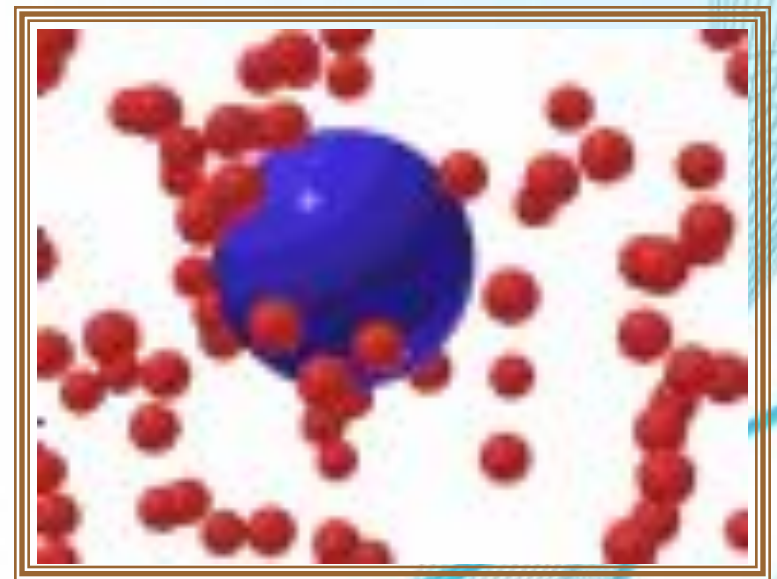
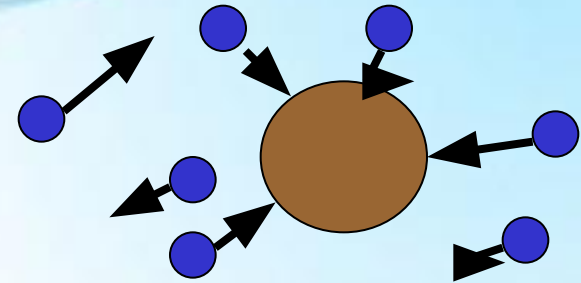
Траектория броуновской частицы





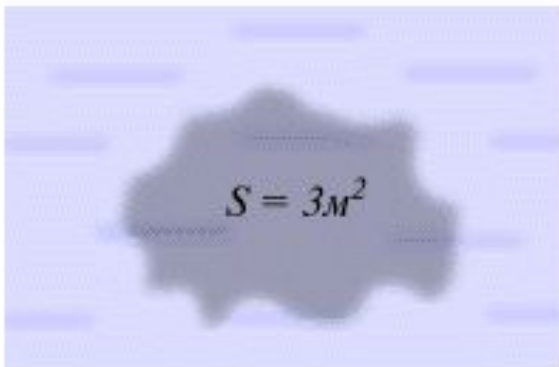
# Броуновское движение

- Причина броуновского движения состоит в том, что удары молекул жидкости о частицу не компенсируют друг друга.

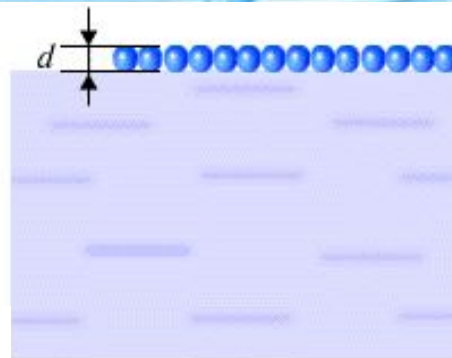


# Масса и размеры молекул

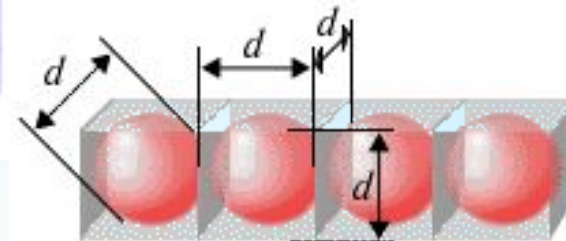
$$\rightarrow V = 1 \text{ мм}^3 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$$



$$d = \frac{V}{S} = \frac{10^{-9} \text{ м}^3}{3 \text{ м}^2} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$



$d$  – диаметр частицы вещества



$V_0$  – объём частицы вещества

$\rho$  – плотность

$m_0$  – масса частицы вещества

$$m_0 = \rho \cdot V_0 = \rho \cdot d^3$$

$$m_0 = 800 \text{ кг/м}^3 \cdot (3 \cdot 10^{-10} \text{ м})^3$$

$$m_0 \approx 2 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$$

Оценка размера  
молекулы

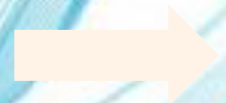
Оценка массы молекулы

# Масса и размеры молекул

В 1 г воды содержится  $3,7 \cdot 10^{22}$  молекул.

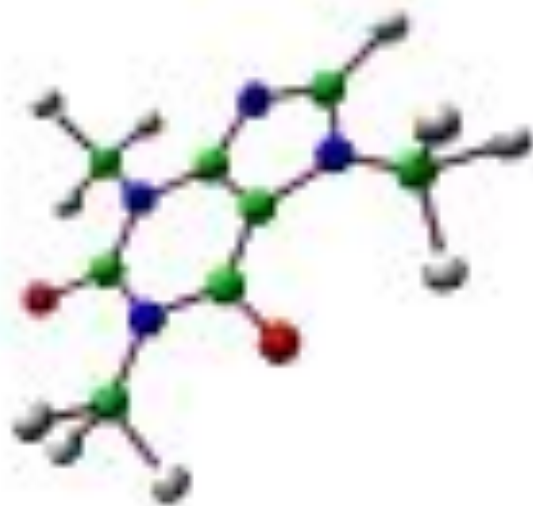
$$m_{0(\text{воды})} = \frac{1 \text{ г}}{3,7 \cdot 10^{22}} = 2,7 \cdot 10^{-23} \text{ г}$$

Массы молекул в макроскопических масштабах  
чрезвычайно малы.

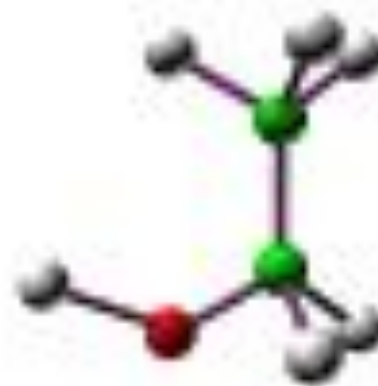




# Масса и размеры молекул



**кофе**



**этанол**



# Масса и размеры молекул

1961 год

**Относительной молекулярной (или атомной) массой вещества ( $M_r$ ) называют отношение массы молекулы (или атома)  $m_0$  данного вещества к  $1/12$  массы атома углерода  $m_{0C}$ .**

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



# Количество вещества

Количество вещества наиболее естественно было бы измерять числом молекул или атомов в теле. Но число частиц в любом макроскопическом теле так велико, что в расчетах используют не абсолютное число частиц, а относительное.

$$[ \nu ] = \text{моль}$$

Один моль – это количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько содержится в углероде массой 12 г.





# Количество вещества

**В 1 моле любого вещества содержится одно и то же число атомов или молекул.**

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \quad \text{- постоянная Авогадро}$$

**Количество вещества равно отношению числа молекул в данном теле к постоянной Авогадро.**

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



# Количество вещества

Молярной массой вещества называют массу вещества, взятого в количестве 1 моль.

$$\mu = m_0 N_A$$

$$[\mu] = \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$m_0$  - масса одной молекулы или атома

$$m_0 = \frac{\mu}{N_A}$$



# Количество вещества

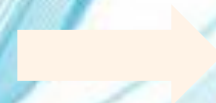
$$m = m_0 N$$

**m** – масса вещества

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

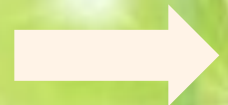
$$N = \nu N_A = N_A \frac{m}{\mu}$$

- формула для расчета  
числа частиц в теле





*Строение газов, жидкостей и  
твердых тел*



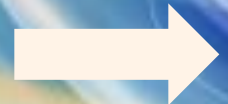
## **Строение твёрдых тел, жидкостей и газов,**

Критерии сравнения	Газ	Жидкость	Твёрдое тело
Расположение молекул	«ХАОС» 	«ХАОС» 	«ПОРЯДОК» 
Характер движения молекул	Двигаются свободно по всему объёму	Колеблются на месте, перескакивают с места на место	Колеблются на месте.
Взаимодействие молекул	Слабое	Сильное	Огромное
Основные свойства	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Не имеет формы.</li> <li>2. Не сохраняет объём.</li> <li>3. Сжимаем.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Не имеет формы.</li> <li>2. Сохраняет объём</li> <li>3. Не сжимаема.</li> <li>4. Текуча.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сохраняет форму.</li> <li>2. Сохраняет объём.</li> <li>3. Не сжимаемо</li> </ol>

# Идеальный газ

Идеальный газ – это газ, в котором

- Частицы – материальные точки
- Частицы взаимодействуют только при соударениях
- Удары абсолютно упругие

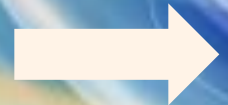




# Среднее значение квадрата скорости молекул

- Скорость – величина векторная, поэтому средняя скорость движения частиц в газе равна нулю.

$$\vec{v}_{cp} = \frac{\vec{v}_1 + \vec{v}_2 + \vec{v}_3 + \dots}{N} = 0$$



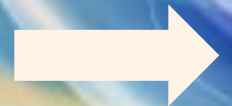
# Среднее значение квадрата скорости молекул

$$\overline{v}^2 = \frac{v^2_1 + v^2_2 + v^2_3 + \dots}{N} \neq 0$$

$$\overline{v}^2 = \overline{v_x}^2 + \overline{v_y}^2 + \overline{v_z}^2$$

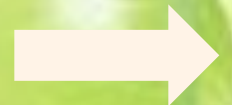
$$\overline{v_x}^2 = \overline{v_y}^2 = \overline{v_z}^2$$

$$\overline{v_x}^2 = \frac{1}{3} \overline{v}^2$$



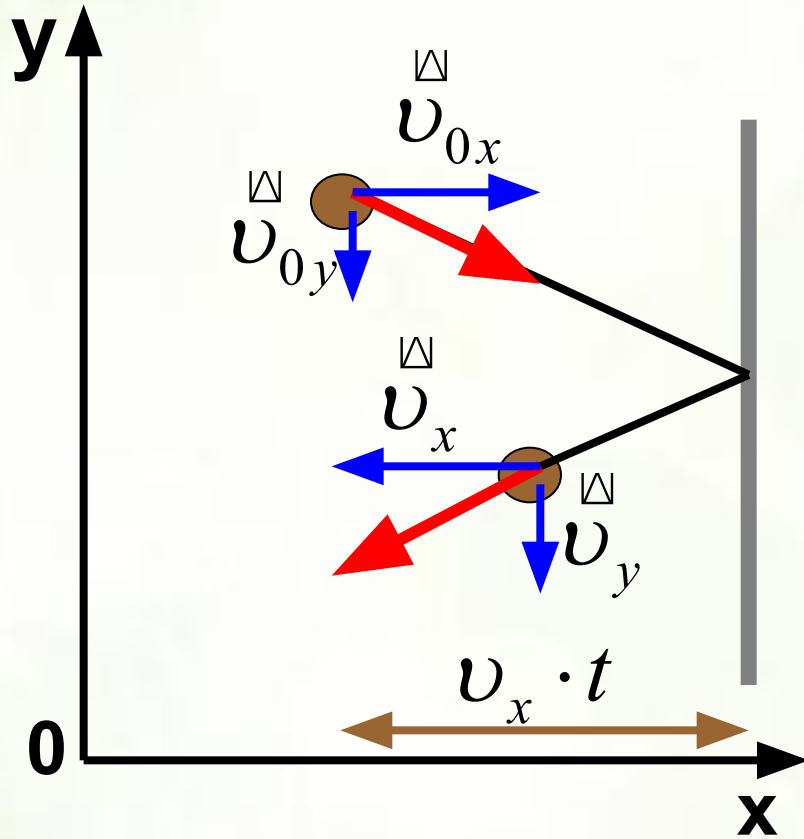
# Основное уравнение мкт

- Основное уравнение мкт устанавливает зависимость давления газа от средней кинетической энергии его молекул.
- Газ оказывает давление на стенки сосуда путем многочисленных ударов молекул (или атомов).





# Основное уравнение мкт



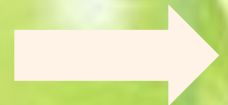
$$\Delta P_{x0} = 2m_0 v_x$$

$$N = \frac{1}{2} n V \quad , \quad V = S v_x t$$

$$F_x = \Delta P_x t = N \cdot \Delta P_{0x} t$$

$$F_x = m_0 n v_x^2 S$$

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$



Основное уравнение МКТ связывает микропараметры частиц ( массу молекулы, среднюю кинетическую энергию молекул, средний квадрат скорости молекул) с макропараметрами газа (р - давление, V - объем, T - температура).

Давление газа на стенки сосуда пропорционально произведению концентрации молекул на среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы.

Ниже приведены различные выражения для основного уравнения МКТ:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \overline{v^2} = \frac{1}{3} \rho \cdot \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \cdot \overline{E_k}$$

где

p - давление газа на стенки сосуда(Па)

n - концентрация молекул, т.е. число молекул в единице объема ( 1/м<sup>3</sup>)

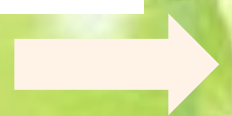
$m_0$  - масса молекулы (кг)

$\overline{v^2}$  - средний квадрат скорости молекул ( м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>)

ρ - плотность газа (кг/м<sup>3</sup>)

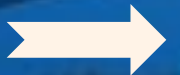
$\overline{E_k}$  - средняя кинетическая энергия молекул (Дж)

Давление идеального газа на стенки сосуда зависит от концентрации молекул и пропорционально средней кинетической энергии молекул.



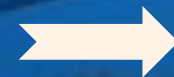
# Температура и тепловое равновесие

- **Макроскопические параметры (макропараметры)** – величины, характеризующие состояние макроскопических тел без учета молекулярного строения. ( $V, p, t$ ).
- **Тепловым равновесием** называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры всех тел системы остаются неизменными сколь угодно долго.

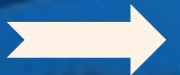




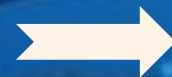
- Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия.
- Все тела системы, находящиеся друг с другом в тепловом равновесии имеют одну и ту же температуру.



- **Термометр** – прибор для измерения температуры тела.
- Термометр входит в состояние теплового равновесия с исследуемым телом и показывает свою температуру.



Основная деталь термометра – **термометрическое тело**, то есть тело, макропараметры которого изменяются при изменении температуры. (Например, в ртутных термометрах термометрическим телом является ртуть – при изменении температуры изменяется ее объем.)





- **Изобретателем термометра является Галилео Галилей (ок. 1600 г.)**
- **Термометрическим телом в его термометре являлся газ – при повышении температуры его объем увеличивался, вытесняя жидкость.**
- **Недостатком термометра Галилея являлось отсутствие температурной шкалы.**



# Температурные шкалы

Шкала  
Цельсия

$$t = T - 273 = \frac{5}{9} (T_F - 32)$$

Термодинами-  
ческая шкала

$$T = t + 273$$

Шкала  
Фаренгейта

$$T_F = 32 + 1,8t$$

кипение воды

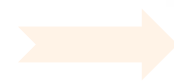
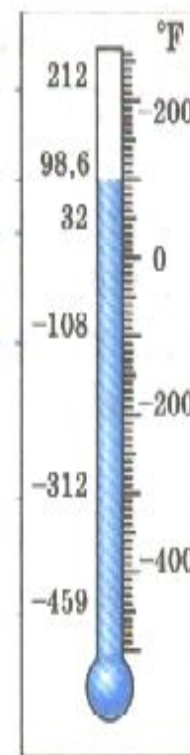
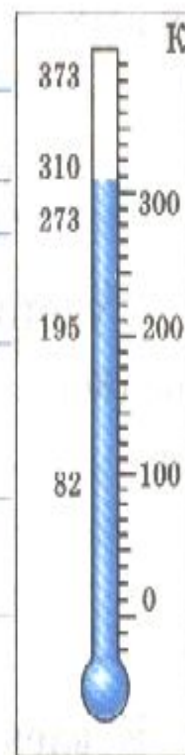
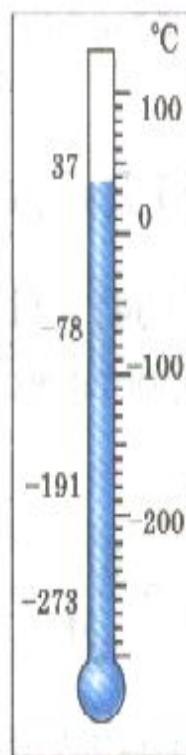
температура  
тела человека

плавление льда

сухой лед ( $\text{CO}_2$ )

жидкий воздух

абсолютный нуль



## Постоянная Больцмана

- Разность полученных в эксперименте значений величины  $pV/N$  равна  $1,38 \cdot 10^{-21}$  Джс.
- Разделим полученную величину на 100, и найдём, что одному градусу по Цельсию соответствует  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  по Кельвину.
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Джс/К – постоянная Больцмана.

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



# Температура тела – мера средней кинетической энергии движения молекул.

- *Какая физическая величина одинакова у любых тел при тепловом равновесии?*
- *Предположим, что при тепловом равновесии средние кинетические энергии молекул одинаковы.*
- *Из основного уравнения МКТ можно получить :*

$$p = \frac{3}{2} n E_k \Rightarrow \frac{3}{2} E_k = \frac{p}{n} \Rightarrow \frac{3}{2} E_k = \frac{pV}{N}$$



# Абсолютная температура и абсолютный нуль

- Из полученного равенства следует, что при  $T = 0$  должны равняться нулю или давление (т.е. движение и соударение молекул со стенками прекращается) или объём газа (т.е. сжатие до нуля).
- Отсюда понятие **абсолютного нуля температуры (0 К) – температуры, при которой должно прекратиться движение молекул.**
- Установим связь между абсолютной температурой и температурой по Цельсию:  
т. к. при  $t = 0$   $kT = 3,76 \cdot 10^{-21}$  Дж,  
где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К,  
то  $T = 3,76 \cdot 10^{-21} / 1,38 \cdot 10^{-23} \approx 273,15$  (К)  
Таким образом  **$T \approx t + 273$**

# Зависимость давления газа от температуры и концентрации молекул газа

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_k &= \frac{3}{2} kT \\ p &= \frac{2}{3} n \bar{E}_k \end{aligned} \right\} p = nkT$$



# Скорости молекул

$$\left. \begin{aligned} \overline{E}_{k0} &= \frac{3}{2} kT \\ \overline{E}_{k0} &= \frac{m_0 \overline{v}^2}{2} \end{aligned} \right\}$$

$$\overline{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

**- средняя  
квадратичная  
скорость**





# Уравнение состояния идеального газа

(ур-е Менделеева – Клапейрона)

$$p = nkT = \frac{N}{V} kT$$

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

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

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

- универсальная  
газовая постоянная






**Если в ходе процесса масса газа  
остается неизменной, то**

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{\mu} R = \text{const}$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} = \dots$$



# Изопроцессы

- Изотермический процесс 
- Изобарный процесс 
- Изохорный процесс 



# Изотермический процесс

- Процесс, происходящий с газом неизменной массы при постоянной температуре называется изотермическим.
- Изотермический процесс описывается **законом Бойля – Мариотта** (конец 17 века):

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

$$p_1V_1 = p_2V_2$$



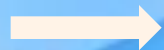


# Изобарный процесс

- Процесс, происходящий с газом неизменной массы при постоянном давлении называется изобарным.
- Изобарный процесс описывается **законом Гей-Люссака** (1802 г.):

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

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

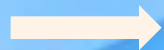


# Изохорный процесс

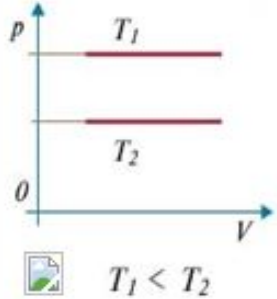
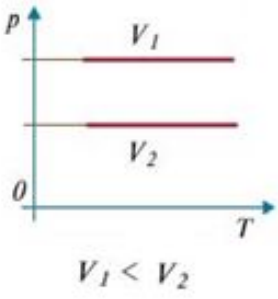
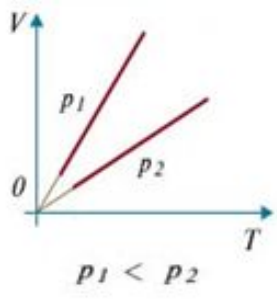
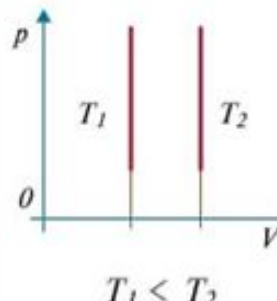
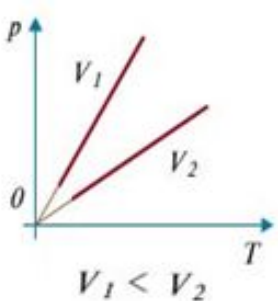
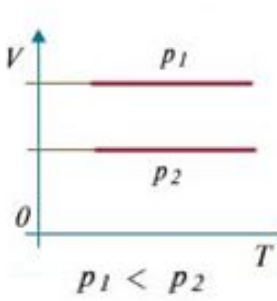
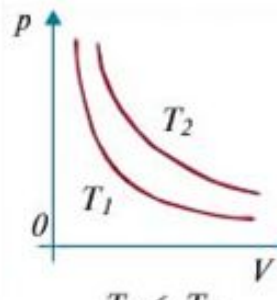
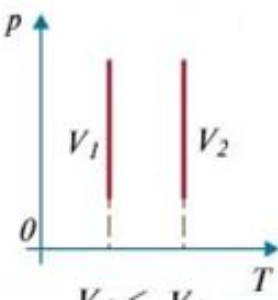
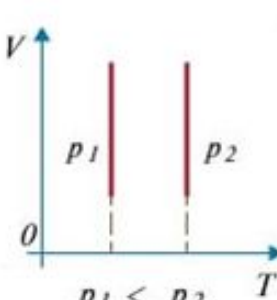
- Процесс, происходящий с газом неизменной массы при постоянном объеме называется **изохорным**.
- Изохорный процесс описывается **законом Шарля** (1787 г.):

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

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

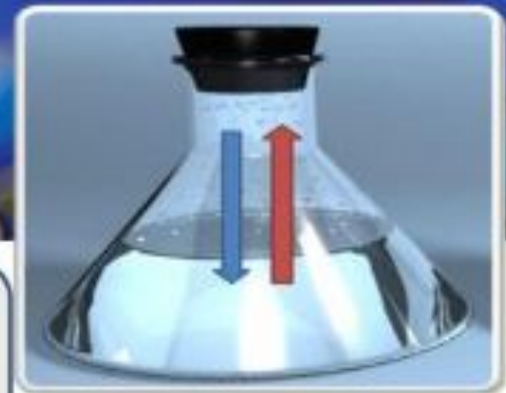


# Графики изопроцессов

	$p(V)$	$p(T)$	$V(T)$
изобарный $p = const,$ $\frac{V}{T} = const$	 <p><math>T_1 &lt; T_2</math></p>	 <p><math>V_1 &lt; V_2</math></p>	 <p><math>p_1 &lt; p_2</math></p>
изохорный $V = const,$ $\frac{p}{T} = const$	 <p><math>T_1 &lt; T_2</math></p>	 <p><math>V_1 &lt; V_2</math></p>	 <p><math>p_1 &lt; p_2</math></p>
изотермический $T = const,$ $pV = const$	 <p><math>T_1 &lt; T_2</math></p>	 <p><math>V_1 &lt; V_2</math></p>	 <p><math>p_1 &lt; p_2</math></p>



# НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР



Процесс испарения, скорость которого постепенно уменьшается

Процесс конденсации, скорость которого постепенно возрастает

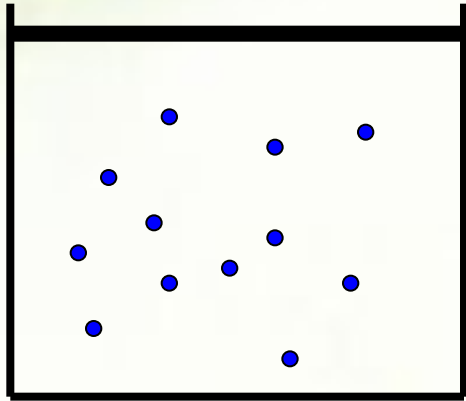
С течением времени в сосуде устанавливается динамическое равновесие

Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называется

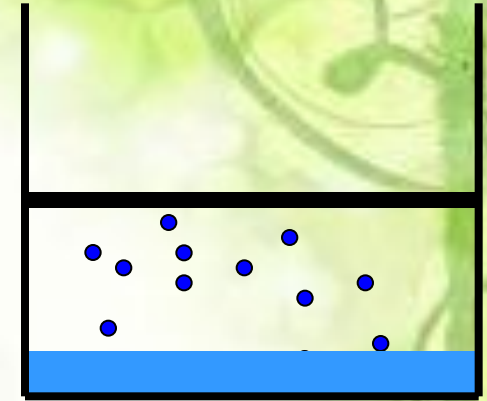
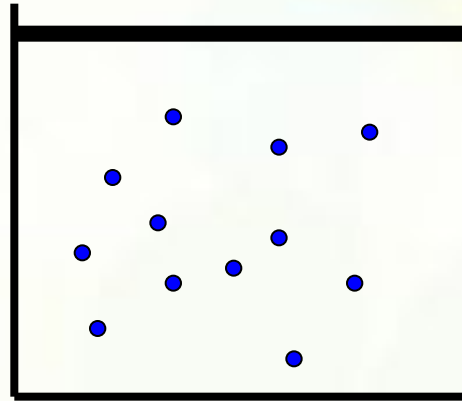
**НАСЫЩЕННЫМ**



# Давление насыщенного пара



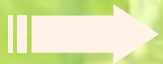
$p_1, V_1$



$p_2, V_2$

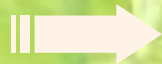
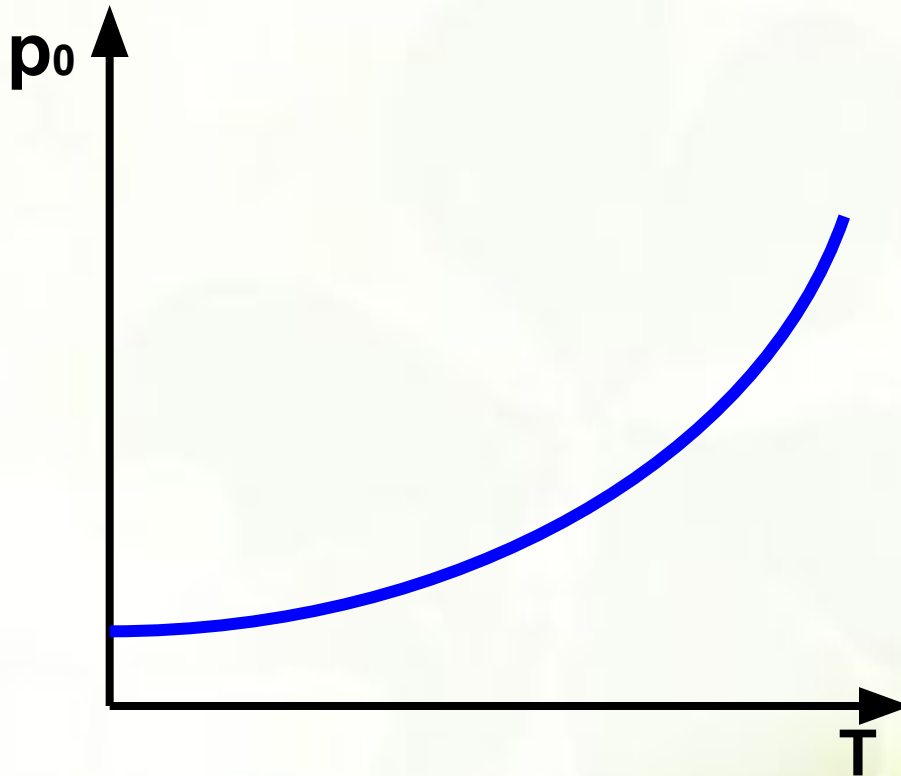
$p_1 = p_2$

Давление насыщенного пара не зависит от занимаемого объема.

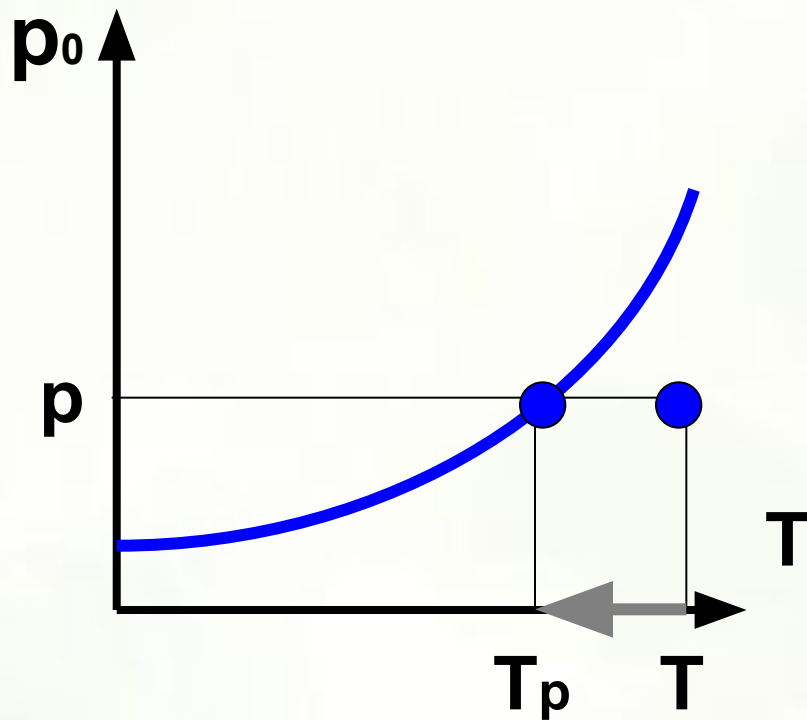


# Давление насыщенного пара

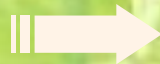
Давление насыщенного пара зависит только от температуры.




# Давление насыщенного пара



**Точка росы** – это температура, при которой ненасыщенный пар становится насыщенным .



# Испарение и кипение




**Процесс  
парообразования с  
поверхности  
жидкости.**

**Происходит при  
любой  
температуре.**

**Скорость испарения зависит от:**

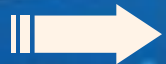
- **Вида жидкости**
- **Температуры**
- **Площади поверхности**
- **Наличие ветра**



**Процесс  
парообразования  
по всему объему  
жидкости.**

**Происходит при  
температуре  
кипения.**

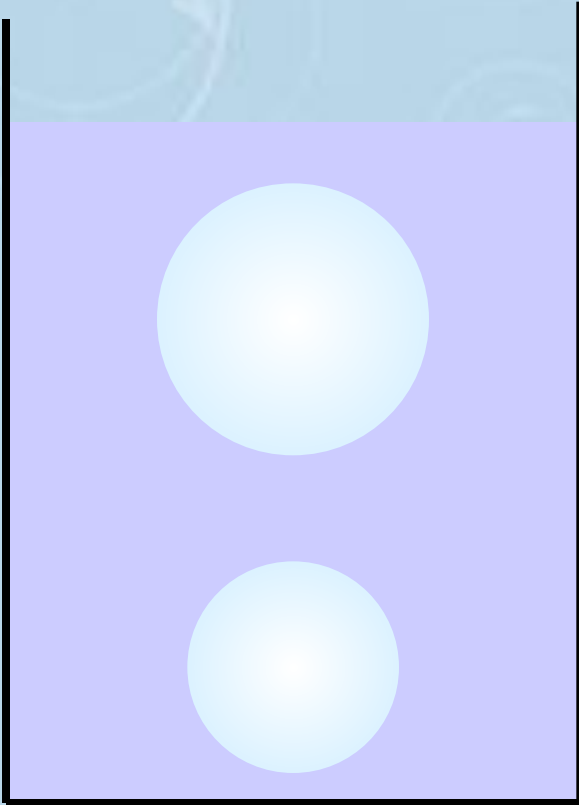
**Чем ниже давление,  
тем ниже температура  
кипения.**





# Кипение

- Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках сравнивается с давлением в жидкости.
- Чем больше внешнее давление, тем выше температура кипения.
- Чем выше давление насыщенного пара, тем ниже температура кипения соответствующей жидкости.



# ВЛАЖНОСТЬ

## АБСОЛЮТНАЯ

$\rho$  - количество водяного пара, содержащегося в 1 м<sup>3</sup> воздуха, т.е. **плотность водяного пара**.

$$\rho = \frac{MP}{RT}$$

Давление, которое производил бы водяной пар, если бы другие газы отсутствовали, называют **парциальным давлением водяного пара**

## ОТНОСИТЕЛЬНАЯ

$\varphi$  - относительная влажность воздуха - показывает, как далек пар от насыщения (%)

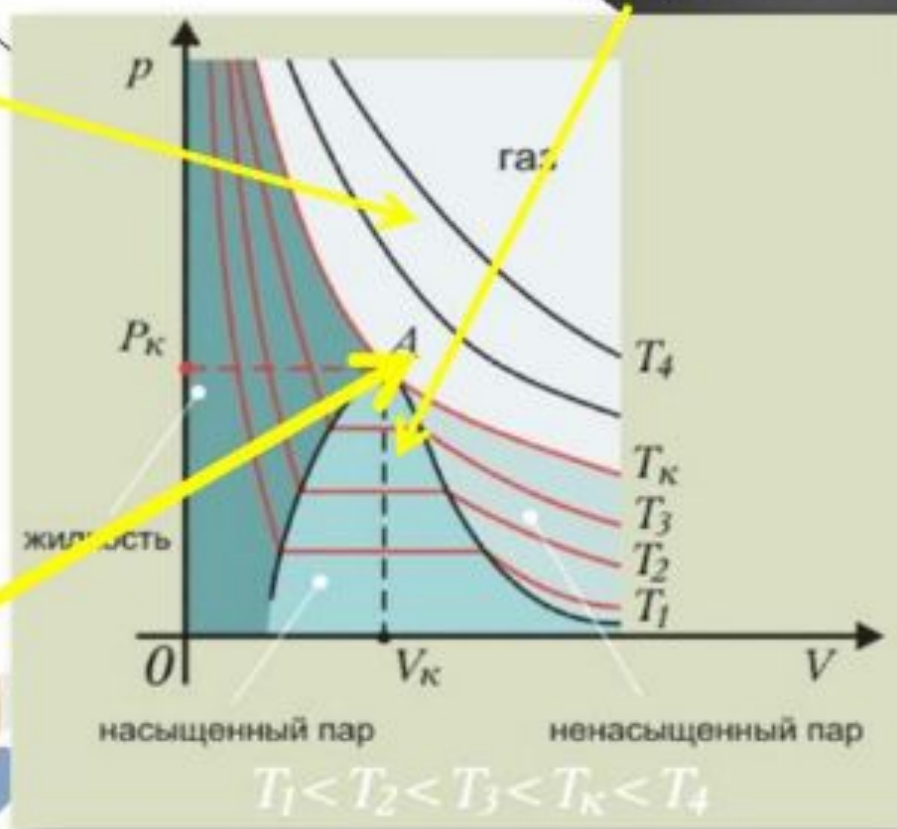
$$\varphi = \frac{P_n}{P_{n.n.}} \cdot 100\%$$

отношение парциального давления  **$P_n$**  водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению  **$P_{n.n.}$**  насыщенного пара при той же температуре, выраженной в процентах.

Если температура газа выше критической, то ни при каком давлении газ не перейдет в жидкое состояние.

Если температура газа равна критической, то газ перейдет в жидкое состояние, минуя состояние насыщенного пара.

Если температура газа ниже критической, то изотермическое сжатие переводит его сначала в состояние насыщенного пара, а затем в жидкость.





# Измерение влажности

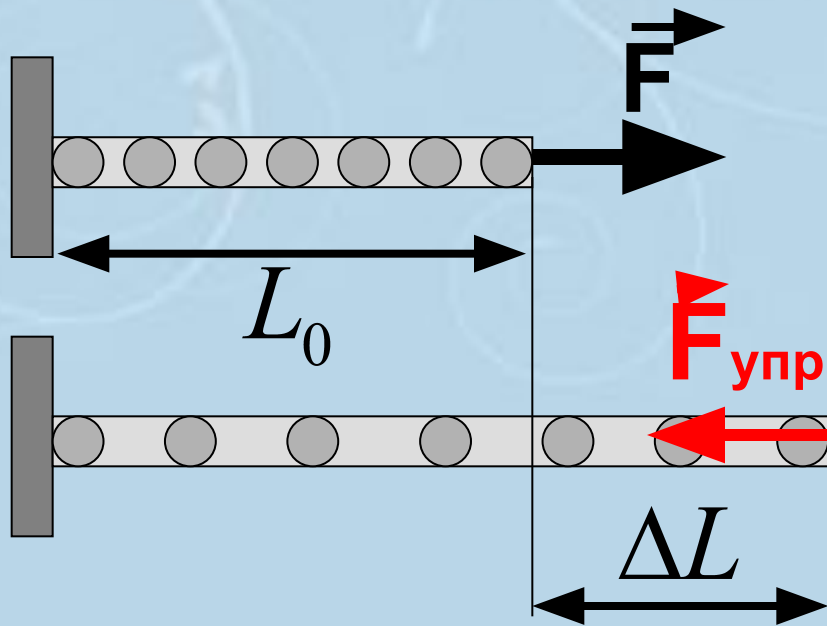
**Приборы для измерения влажности:**

- Психрометр
- Гигрометр





# Закон Гука



$\Delta L$  - абсолютное удлинение.

$$[\Delta L] = \text{м}$$

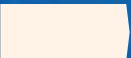
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$F_{\text{упр}} = -k\Delta L$$

$k$  - жесткость

$\varepsilon$  - относительное удлинение

$$[k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$



# Закон Гука

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ - механическое напряжение}$$

$$[\sigma] = \frac{Н}{м^2} = Па$$

$\sigma_{пч}$  - предел прочности – максимальное механическое напряжение, которое выдерживает данное вещество

$$\sigma = \varepsilon E$$

$E$  – модуль Юнга

$$[E] = Па$$

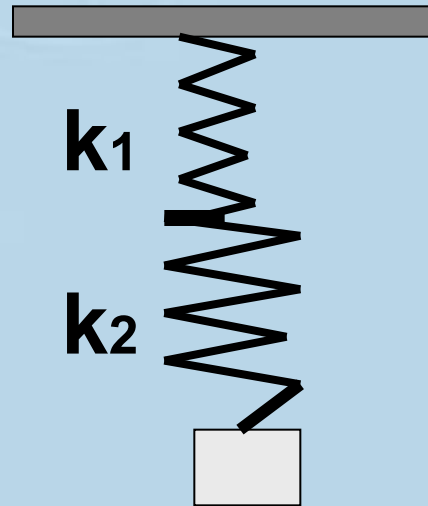
# Закон Гука

$$\Delta L = \frac{FL_0}{ES}$$

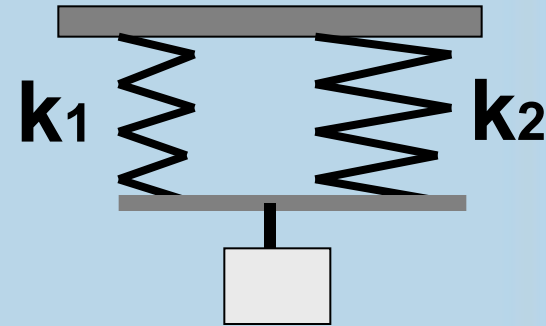
$$F_{\text{упр}} = -kx$$

$$F = -F_{\text{упр}}$$

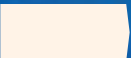
$$k = \frac{ES}{L_0}$$



$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

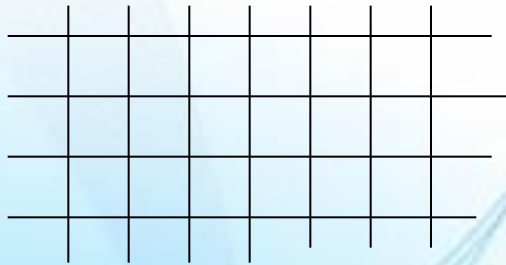


$$k = k_1 + k_2$$

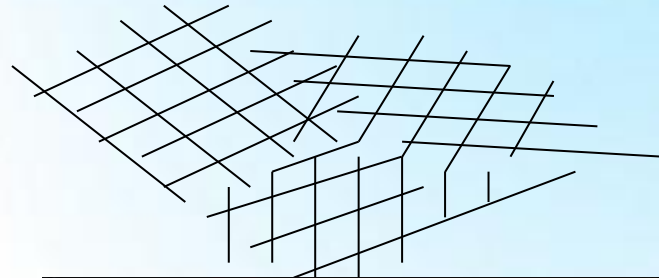


# Кристаллические тела

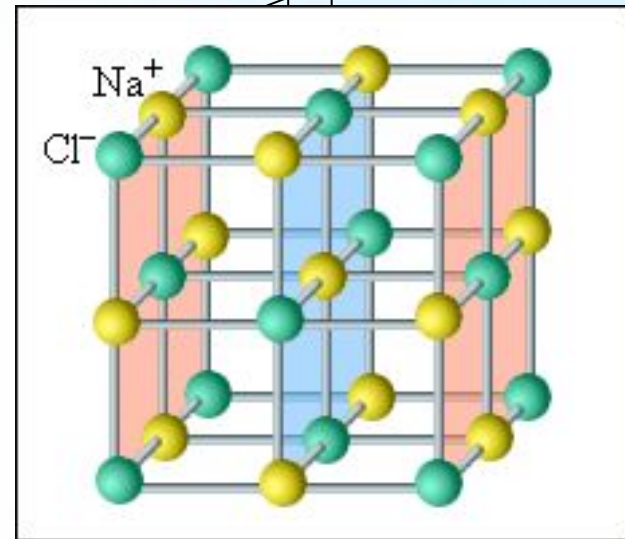
**монокристаллы**



**поликристаллы**



**Анизотропия** –  
зависимость физических  
свойств от направления  
внутри кристалла.



Кристаллическая решетка  
поваренной соли



# Аморфные тела

- Нет строгого порядка в расположении атомов.
- Все аморфные тела **изотропны**, т.е их физические свойства одинаковы по всем направлениям.
- Аморфные тела **не имеют определенной температуры плавления**.
- При внешних воздействиях аморфные тела обнаруживают одновременно **упругие свойства**, подобно твердым телам, и **текучесть**, подобно жидкости.

# Внутренняя энергия

**Внутренняя энергия** макроскопического тела равна сумме **кинетических** энергий беспорядочного движения всех молекул (или атомов) тела и **потенциальных** энергий взаимодействий **всех молекул** друг с другом (но не с молекулами других тел).

$$[U] = \text{Дж}$$

$$U = N \cdot E_k + N \cdot E_n$$

**В идеальном газе** частицы не взаимодействуют между собой, следовательно их потенциальные энергии равны нулю.

$$\left. \begin{aligned} U &= N \cdot E_k \\ N &= N_A \frac{m}{\mu} \\ \bar{E}_k &= \frac{3}{2} kT \\ N_A \cdot k &= R \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U &= \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT \\ U &= \frac{3}{2} \nu RT \\ U &= \frac{3}{2} pV \end{aligned}$$



- Коэффициент  $\frac{3}{2}$  применим только для одноатомного газа.
- В общем случае используется коэффициент  $\frac{i}{2}$  где  $i$  – число степеней свободы движения частицы.

Одноатомный газ (неон, аргон, гелий) –  $i = 3$ .

Двухатомный газ (водород, азот) –  $i = 5$ .

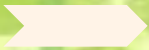
Трехатомный газ (углекислый газ, озон) –  $i = 6$ .

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT$$

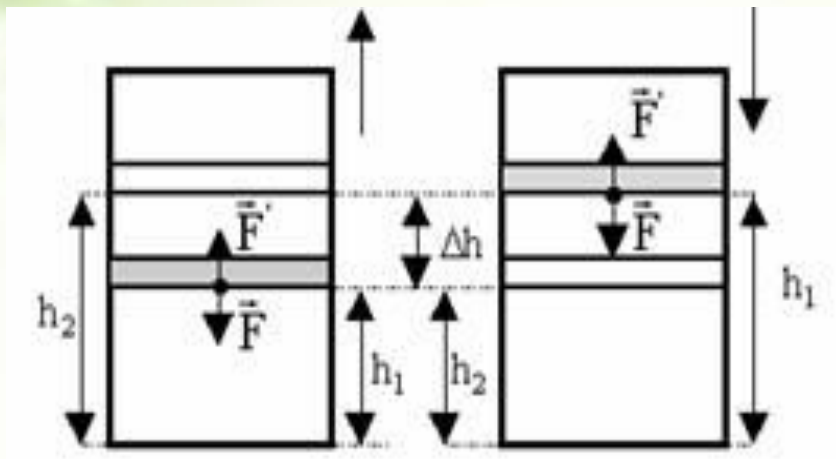


## **Способы изменения внутренней энергии:**

- **Передача теплоты**
- **Совершение работы**



# Работа в термодинамике



Работа газа:

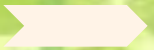
$$\begin{aligned} A' &= F' \cdot s \cdot \cos(\vec{F}', d) = \\ &= p \cdot s \cdot \Delta h = p \cdot \Delta V \end{aligned}$$

По третьему  
закону Ньютона:

$$\vec{F} = -\vec{F}'$$

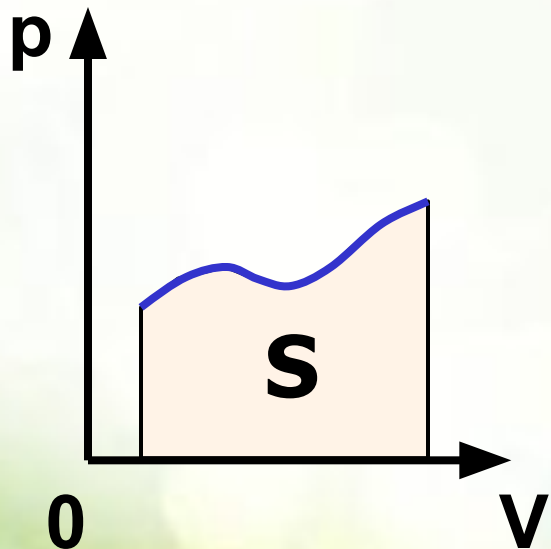
Работа внешних  
сил над газом:

$$A = -A' = -p\Delta V$$

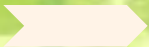


# Работа в термодинамике

- Если процесс не изобарный, используется графический метод: работа равна площади фигуры под графиком процесса в осях  $pV$ .
- Работа газа считается положительной, если объем газа увеличивается и отрицательной, если объем газа уменьшается.



- В случае изохорного процесса работа газа равна нулю.



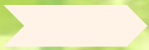
# Количество теплоты

**Количество теплоты – это энергия полученная или отданная телом в процессе теплопередачи.**

**Виды теплопередачи:**

- **Теплопроводность**
- **Конвекция**
- **излучение**

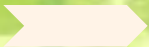
$$[Q] = \text{Дж}$$





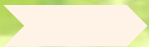
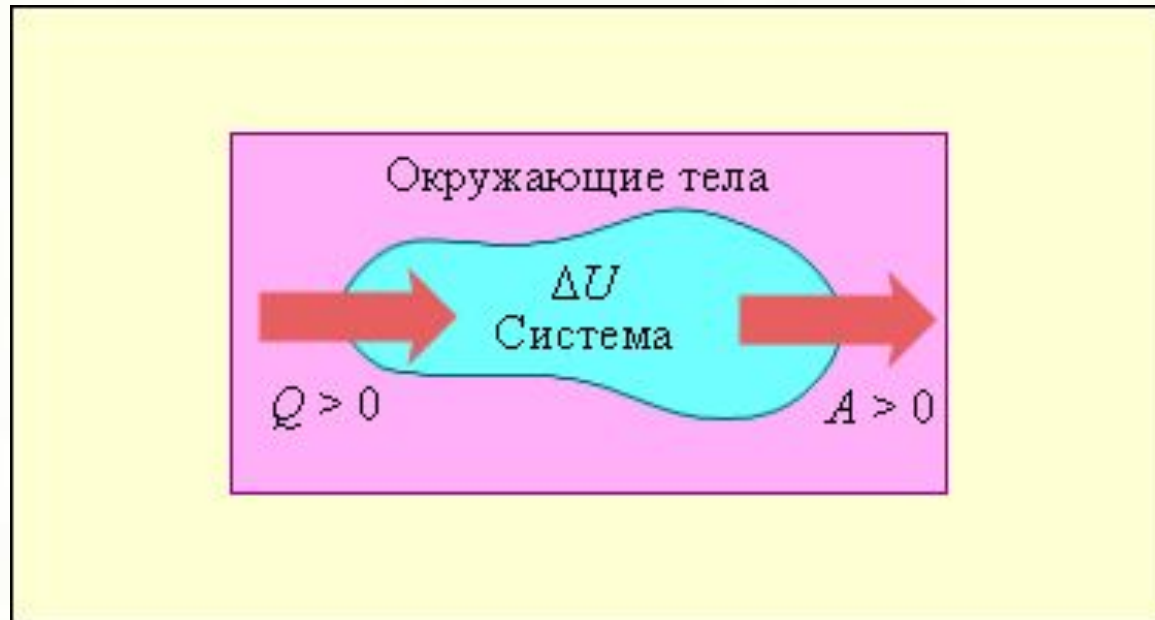
# Количество теплоты

- $Q = cm(t_2^0 - t_1^0)$  – нагревание  
(охлаждение)
- $Q = \pm \lambda m$  - плавление (отвердевание)
- $Q = \pm Lm$  - парообразование  
(конденсация)
- $Q = qm$  – сгорание топлива



# Первый закон термодинамики

Обмен энергией между термодинамической системой и окружающими телами в результате теплообмена и совершаемой работы



**Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:**

$$\Delta U = Q + A$$

**Если  $A$  - работа внешних сил, а  $A'$  - работа газа, то  $A = - A'$  (в соответствии с 3-м законом Ньютона).**

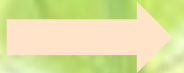
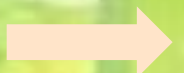
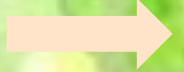
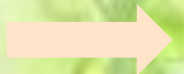
**Тогда:**

$$Q = \Delta U + A'$$

**другая форма записи первого закона термодинамики**

# Применение первого закона термодинамики к различным процессам

- Изотермический процесс
- Изобарный процесс
- Изохорный процесс
- Адиабатный процесс



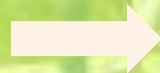


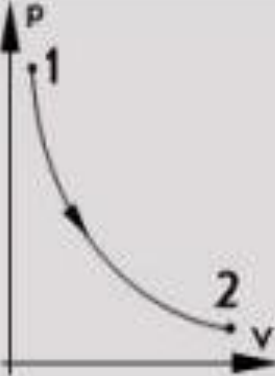
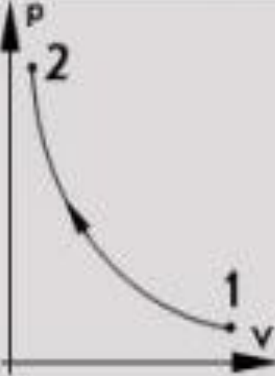
# Изотермический процесс ( $T = \text{const}$ )

✦  $\Delta T = 0$ ,  
следовательно,  
внутренняя  
энергия  
не изменяется:  $\Delta U$   
 $= 0$ .

✦  $Q = A$ .


$$Q = A$$



Процесс	Условие процесса	p, V-диаграмма	Первый закон термодинамики применительно к изопроцессу	Изменение внутренней энергии, $\Delta U$	Работа газа, A
Изотермическое расширение	$T = \text{const}$		$Q = A$ $(Q > 0)$	0	$(A > 0)$
Изотермическое сжатие	$T = \text{const}$		$Q = A$ $(Q < 0)$	0	$(A < 0)$

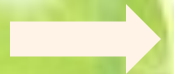


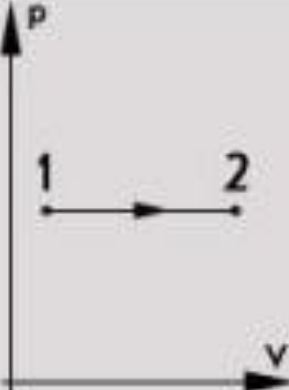
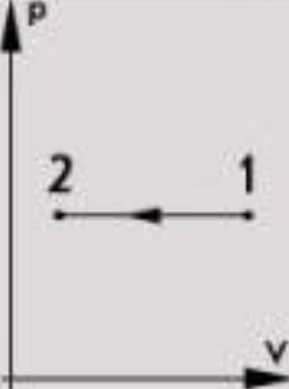
# Изобарный процесс ( $p = \text{const}$ )

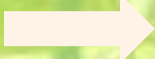
✦ При изобарном расширении газа подведённое к нему количество теплоты расходуется как на увеличение его внутренней энергии, так и на совершение работы газом.

✦ Для изобарного расширения газа, при котором увеличивается его температура, требуется большее количество теплоты, чем при изотермическом процессе, где температура газа не меняется.


$$Q = \Delta U + A$$



Процесс	Условие процесса	p, V-диаграмма	Первый закон термодинамики применительно к изопроцессу	Изменение внутренней энергии, $\Delta U$	Работа газа, $A$
Изобарное расширение	$p = \text{const}$		$Q = \Delta U + A$ ( $Q > 0$ )	$\Delta U = Q - A$ ( $\Delta U > 0$ )	$p(V_2 - V_1) =$ $= \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$ $(A > 0)$
Изобарное сжатие	$p = \text{const}$		$Q = \Delta U + A$ ( $Q < 0$ )	$\Delta U = Q - A$ ( $\Delta U < 0$ )	$p(V_2 - V_1) =$ $= \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$ $(A < 0)$





# Изохорный процесс ( $V = \text{const}$ )

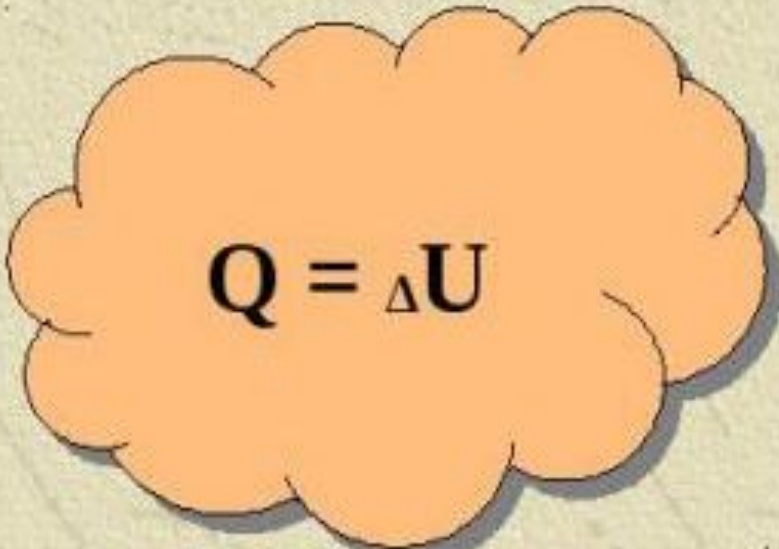
✦  $\Delta V = 0$ , поэтому  
газ работы не  
совершает  
т.е.  $A = 0$ .

✦  $Q = \Delta U$

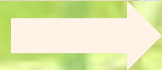
✦  $\Delta U = U_2 - U_1$ ;

$U_2 = \nu m R T_2 / 2M$ ;

$U_1 = \nu m R T_1 / 2M$ ;


$$Q = \Delta U$$


$$\Delta U = \nu m R \Delta T / 2M.$$



Процесс	Условие процесса	$p, V$ -диаграмма	Первый закон термодинамики применительно к изопроцессу	Изменение внутренней энергии, $\Delta U$	Работа газа, $A$
Изохорное нагревание	$V = \text{const}$		$Q = \Delta U$ ( $Q > 0$ )	$\Delta U = Q$ ( $\Delta U > 0$ )	0
Изохорное охлаждение	$V = \text{const}$		$Q = \Delta U$ ( $Q < 0$ )	$\Delta U = Q$ ( $\Delta U < 0$ )	0



# Адиабатный процесс

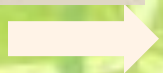
*Теплоизолированная система – это система, не обменивающаяся энергией с окружающими телами.*

*Адиабатный процесс – термодинамический процесс в теплоизолированной системе.*

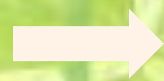
$$Q = 0$$

$$Q = \Delta U + A$$

При закачивании воздуха в колбе увеличивается давление, до тех пор, пока не вылетит пробка. При вылете пробки давление резко становится равным атмосферному. Газ в колбе не успевает обменяться теплом с окружающей средой. Таким образом, мы наблюдаем адиабатный процесс. При резком расширении температура в колбе падает и образуется водяной пар, который мы и наблюдаем.



Процесс	Условие процесса	p, V-диаграмма	Первый закон термодинамики применительно к изопроцессу	Изменение внутренней энергии, $\Delta U$	Работа газа, A
Адиабатное расширение	$\Delta Q=0$		$A=-\Delta U$	$\Delta U < 0$	$A > 0$
Адиабатное сжатие	$\Delta Q=0$		$A=-\Delta U$	$\Delta U > 0$	$A < 0$



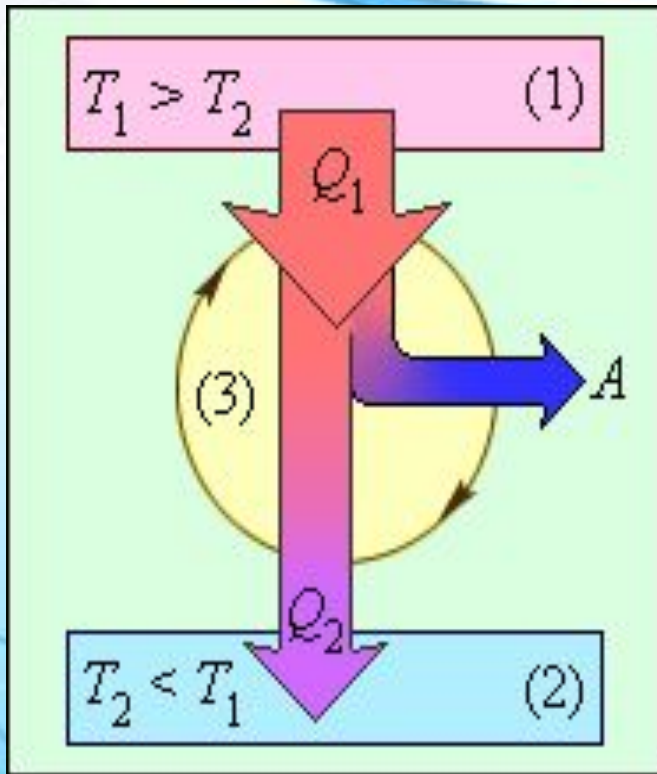


# Тепловые двигатели

*Машины, преобразующие внутреннюю энергию в механическую работу, называют тепловыми двигателями*



# Тепловые двигатели



Энергетическая схема тепловой машины: 1 – нагреватель; 2 – холодильник; 3 – рабочее тело, совершающее круговой процесс.

**КПД теплового двигателя**

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1$$

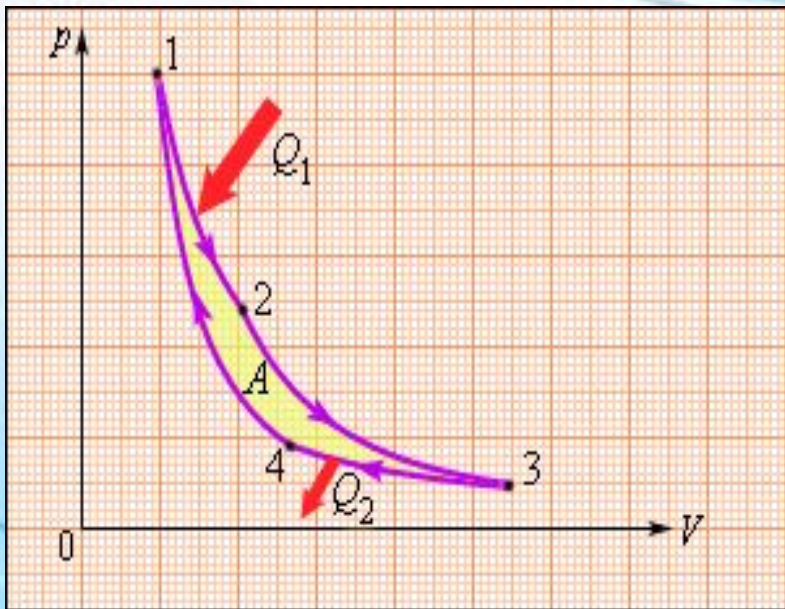
**Кпд реальных двигателей:**

турбореактивный - 20 -30%;

карбюраторный - 25 -30%,

дизельный - 35-45%.

## Идеальная тепловая машина - машина Карно (Сади Карно, Франция, 1815)



**Теорема Карно:** КПД реальной тепловой машины не может быть больше КПД идеальной машины, работающей в том же интервале температур.

Машина работает на идеальном газе.  
1 - 2 - при тепловом контакте с нагревателем газ расширяется изотермически.  
2 - 3 - газ расширяется адиабатно.  
После контакта с холодильником:  
3 - 4 - изотермическое сжатие.  
4 - 1 - адиабатное сжатие.

**КПД идеальной машины:**

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



Спасибо за  
внимание!

