

# ***Молекулярная физика***

# Молекулярная физика

- Основы мкт 
- Температура и энергия теплового движения молекул 
- Уравнение состояния идеального газа 
- Взаимные превращения жидкостей и газов
- Твердые тела 
- Основы термодинамики 



# ОСНОВЫ 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 
- Определение температуры 
- 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** 



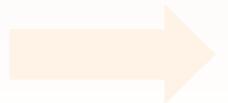
# Молекулярно-кинетическая теория

- **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.**



# Основные положения МКТ

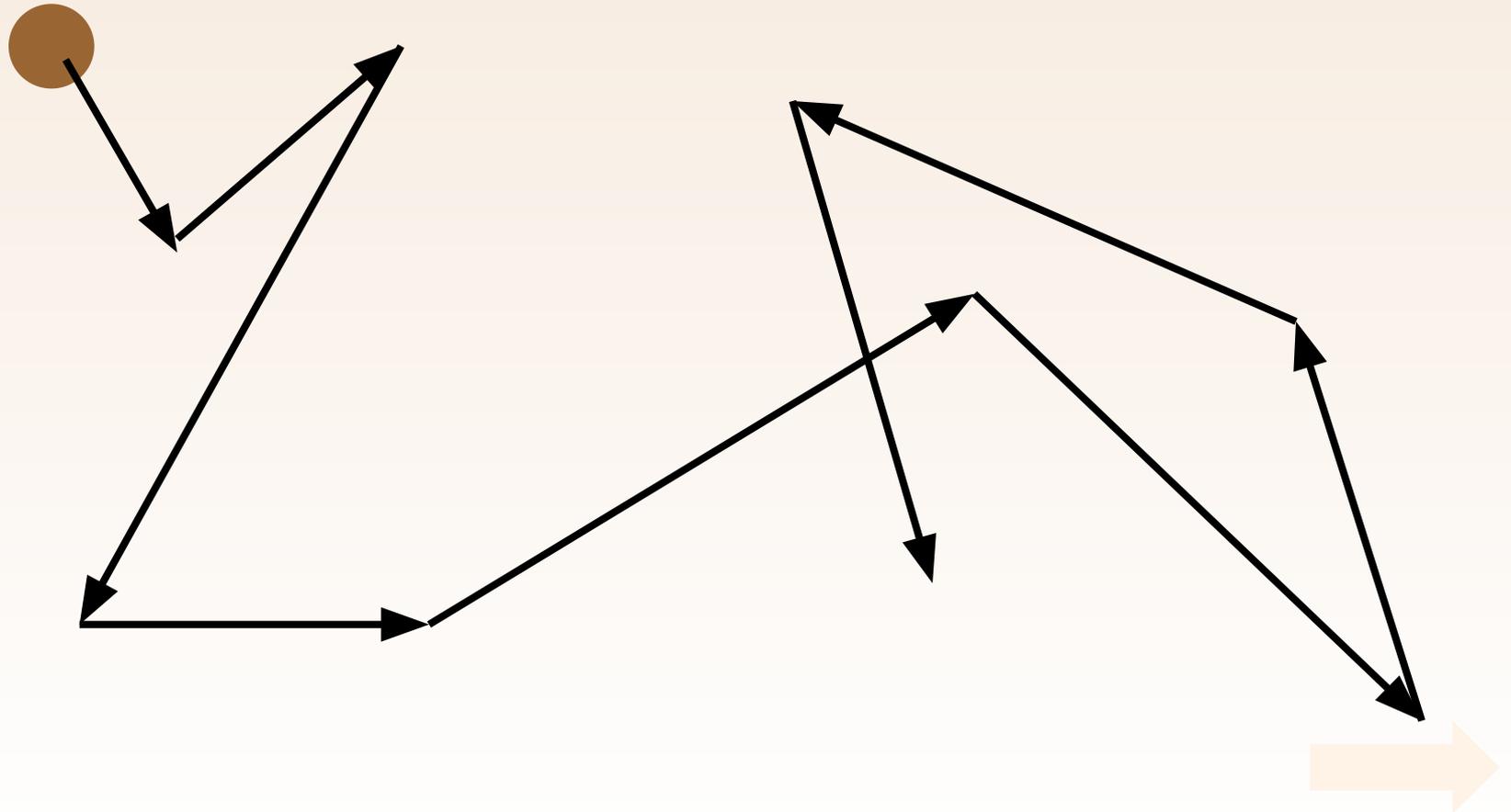
- **Вещество состоит из частиц**
- **Частицы непрерывно и хаотически движутся**
- **Частицы взаимодействуют друг с другом**



# Броуновское движение

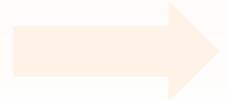
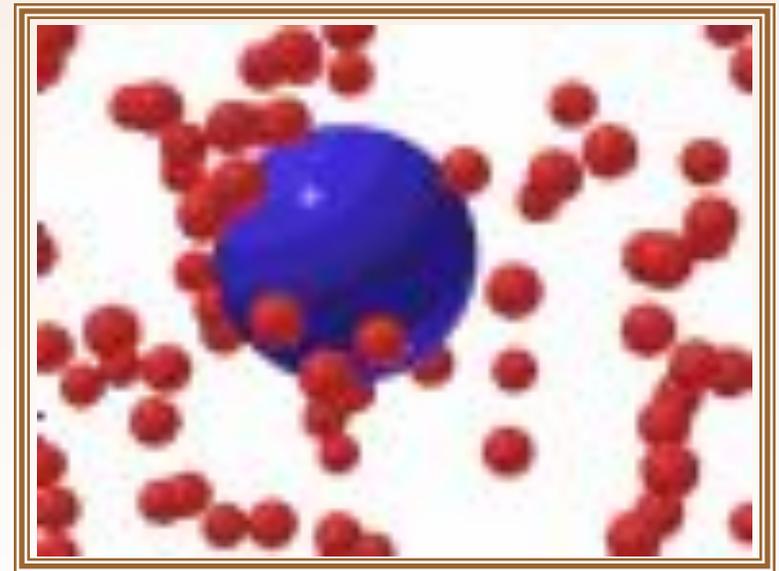
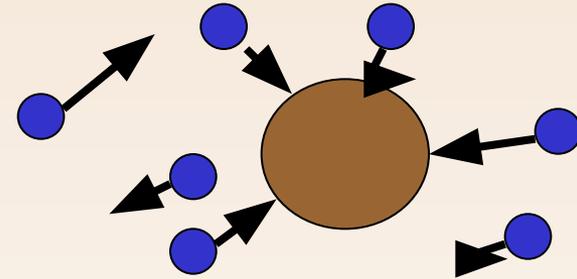
1827 г.

Роберт Броун



# Броуновское движение

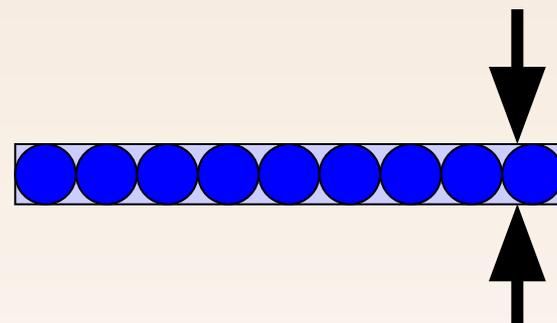
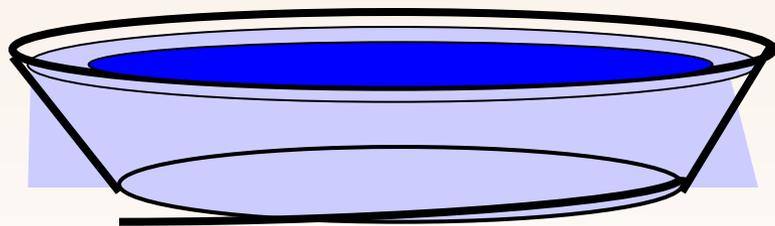
- Причина броуновского движения состоит в том, что удары молекул жидкости о частицу не компенсируют друг друга.
- 1905 г. Альберт Эйнштейн.



# Масса и размеры молекул

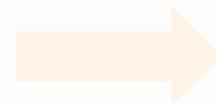

$$V = 1 \text{ мм}^3$$

$$S = 0,6 \text{ м}^2$$



$$d = \frac{V}{S}$$

$$d = 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$



# Масса и размеры молекул

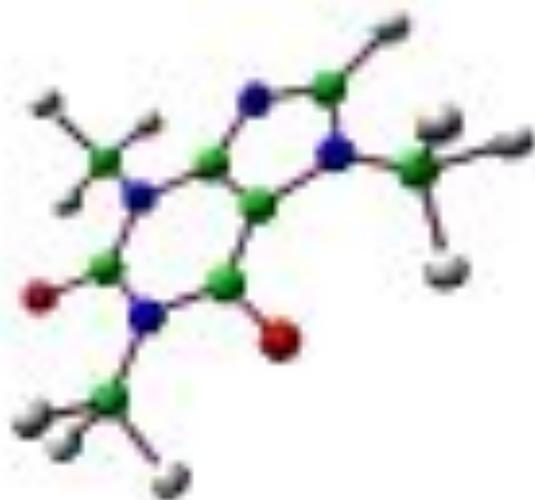
В 1 г воды содержится  $3,7 \cdot 10^{22}$  молекул.

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

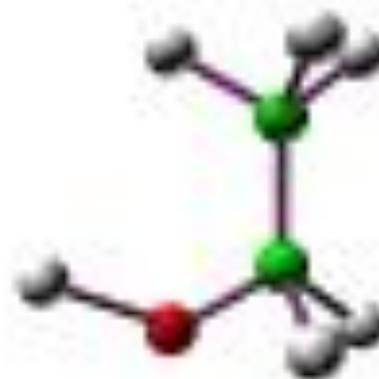
Массы молекул в макроскопических масштабах  
чрезвычайно малы.



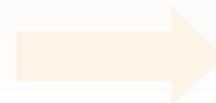
# Масса и размеры молекул



**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.**

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

**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



# Таблица

**Свойства газов, жидкостей и  
твёрдых тел**



# Строение газов, жидкостей и ТВЕРДЫХ ТЕЛ

	<b>свойства</b>	<i>расположение частиц</i>	<i>движение и взаимод. частиц</i>
<i>твердые тела</i>	★	★	★
<i>жидкости</i>	★	★	★
<i>газы</i>	★	★	★



# Свойства

- **Твердые тела сохраняют объем и форму.**



# Свойства

- **Жидкости сохраняют объем и принимают форму сосуда.**
- **Обладают текучестью.**



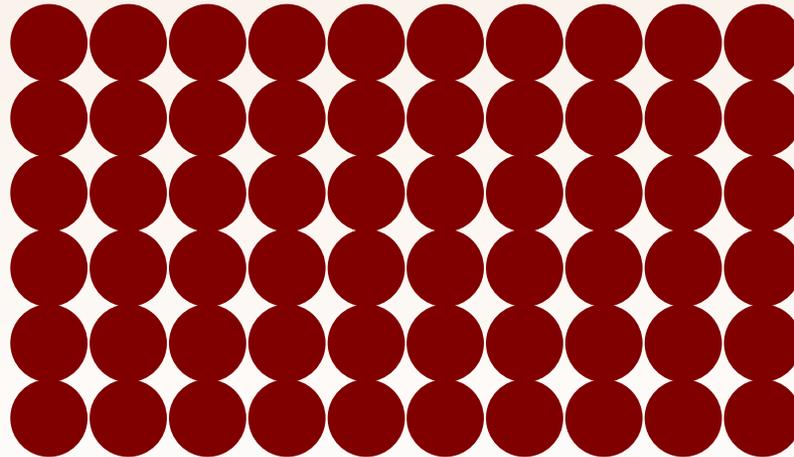
# Свойства

- Газы не имеют формы, занимают весь предоставленный объем.



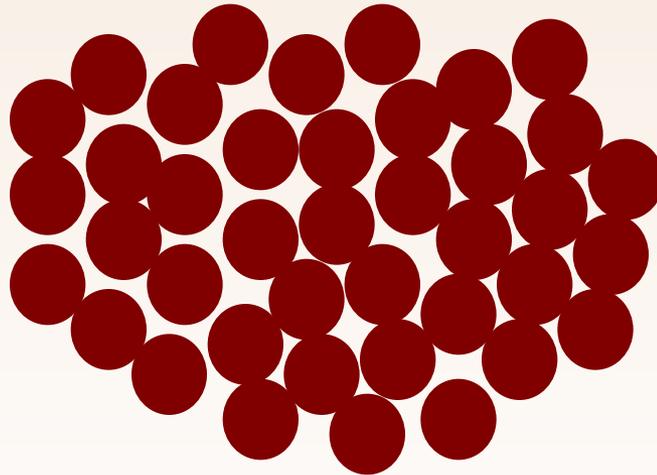
# Расположение частиц

- **Частицы расположены в строгом порядке вплотную друг к другу.**
- **Кристаллическая решетка.**



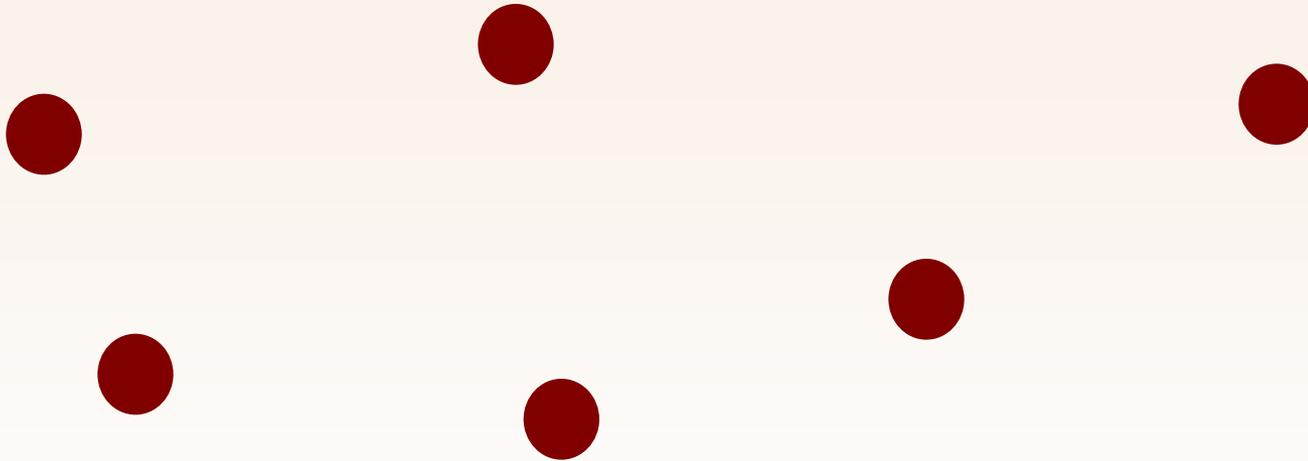
# Расположение частиц

- **Частицы расположены вплотную друг к другу, образуют только ближний порядок.**



# Расположение частиц

- **Частицы расположены на значительных расстояниях (расстояния между частицами во много раз больше размеров самих частиц).**



# Движение и взаимодействие частиц

- **Частицы совершают колебательные движения около положения равновесия**
- **Силы притяжения и отталкивания значительны**



# **Движение и взаимодействие частиц**

- **Частицы совершают колебательные движения около положения равновесия, изредка совершая скачки на новое место**
- **Силы притяжения и отталкивания значительны**



# **Движение и взаимодействие частиц**

- **Частицы свободно перемещаются по всему объему, двигаясь поступательно**
- **Силы притяжения почти отсутствуют, силы отталкивания проявляются при соударениях**



# 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.**

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



# Среднее значение квадрата скорости молекул

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

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

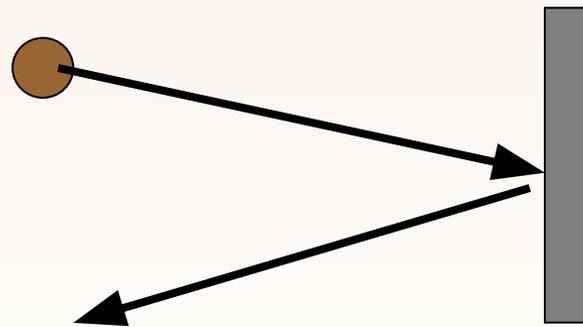
$$\overline{v_x}^2 = \overline{v_y}^2 = \overline{v_z}^2$$

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

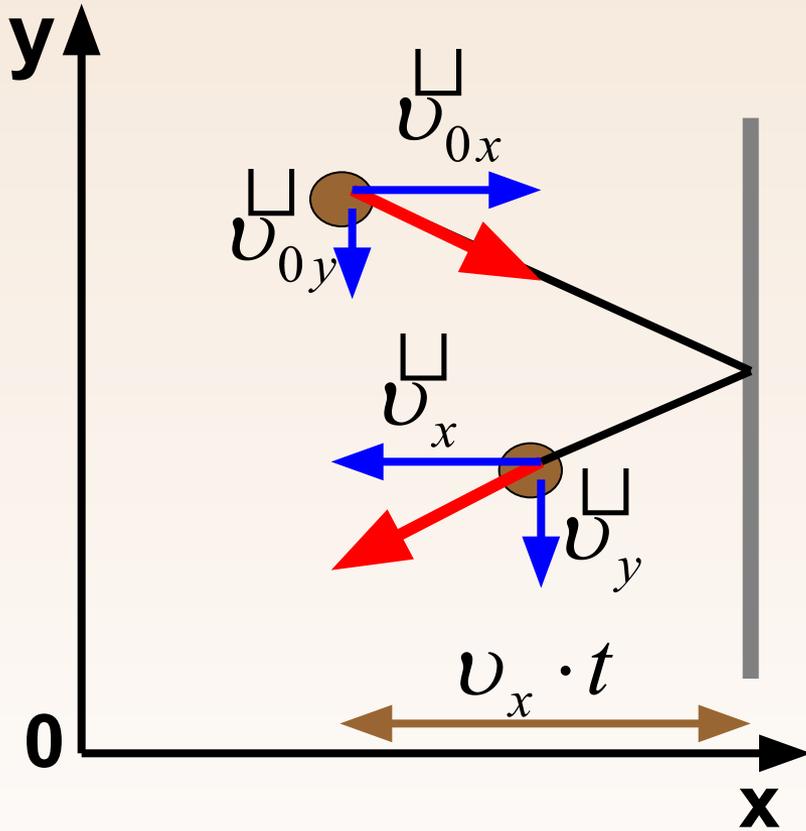


# Основное уравнение МКТ

- 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



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

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

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

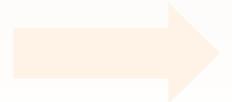
$$F_x = m_0 n v_x^2 S$$

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



# Основное уравнение МКТ

$$\left. \begin{aligned} \bar{F} &= \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 S \\ p &= \frac{\bar{F}}{S} \\ \bar{E}_{k0} &= \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} p &= \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2 \\ p &= \frac{2}{3} n \bar{E}_{k0} \\ m_0 n &= m_0 \frac{N}{V} = \frac{m}{V} = \rho \\ p &= \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2 \end{aligned}$$



# 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.



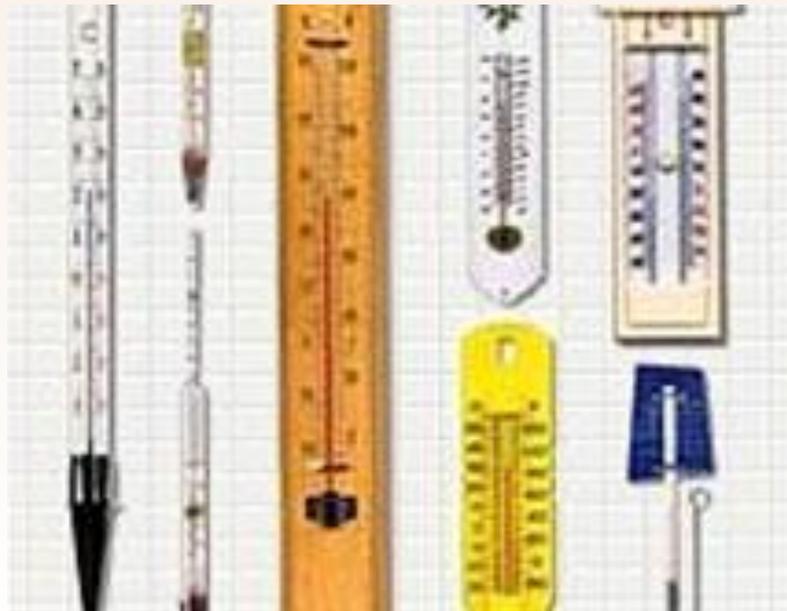
# Температура и тепловое равновесие

- 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.



# Температура и тепловое равновесие

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



# Температура и тепловое равновесие

- 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.)

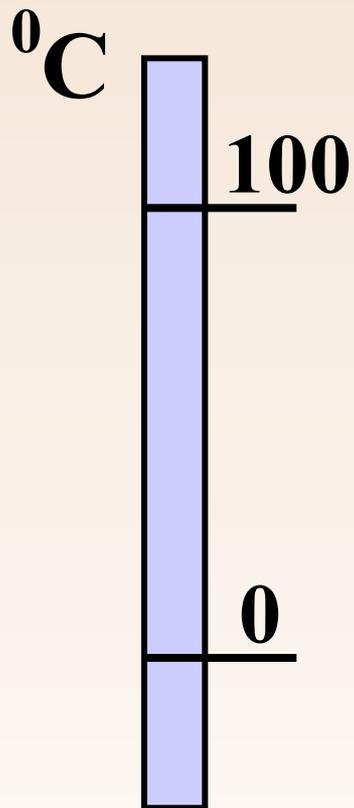


# Температура и тепловое равновесие

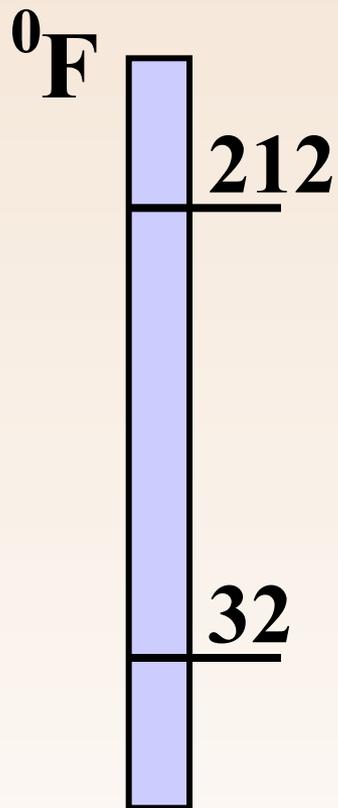
- Изобретателем термометра является Галилео Галилей (ок. 1600 г.)
- Термометрическим телом в его термометре являлся газ – при повышении температуры его объем увеличивался, вытесняя жидкость.
- Недостатком термометра Галилея являлось отсутствие температурной шкалы.



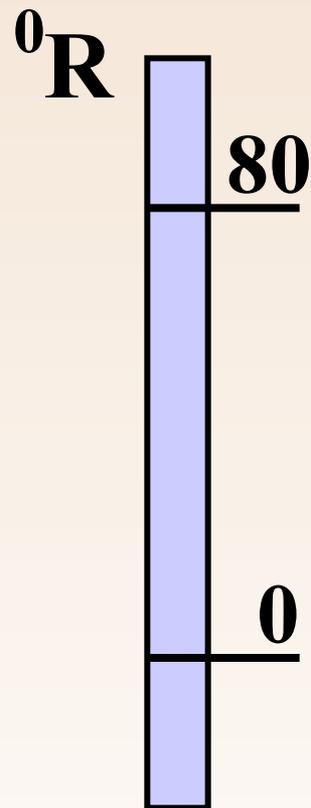
# Температурные шкалы



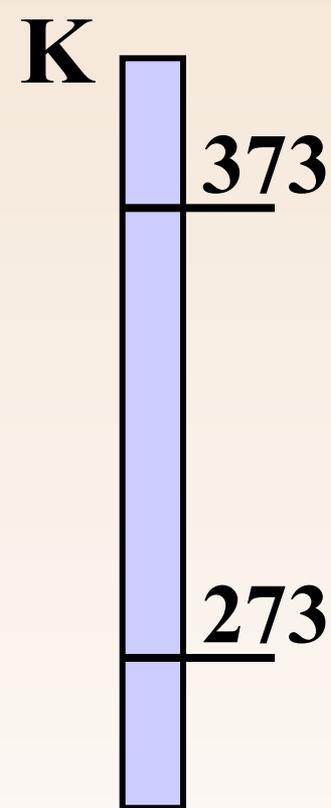
шкала  
Цельсия



шкала  
Фаренгейта



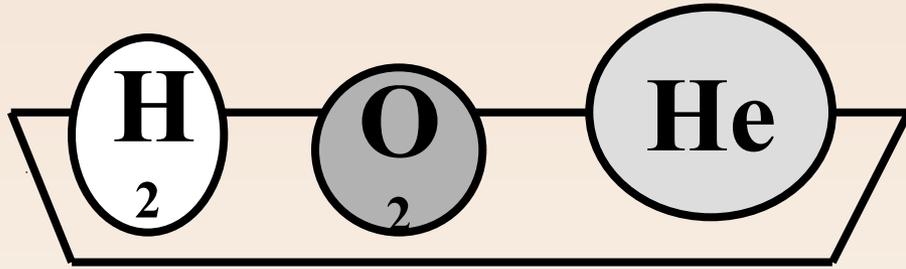
шкала  
Реомюра



шкала  
Кельвина



# Определение температуры



При тепловом равновесии средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул всех газов одинакова.

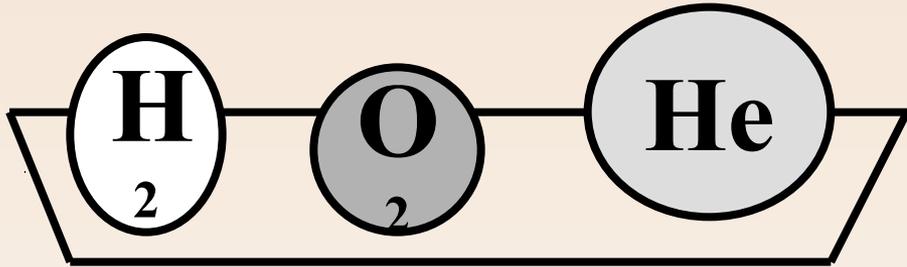
$$p = \frac{2}{3} n E_k = \frac{2}{3} \frac{N}{V} E_k$$

$$\frac{2}{3} E_k = \frac{pV}{N} = \text{const}$$

$$\frac{2}{3} E_k = \Theta$$



# Определение температуры



$$[\Theta] = \text{Дж}$$

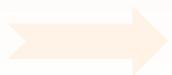
$\Theta$  - Энергетический эквивалент температуры.

$$\left( \frac{pV}{N} \right)_t = \Theta_t = \text{const}$$

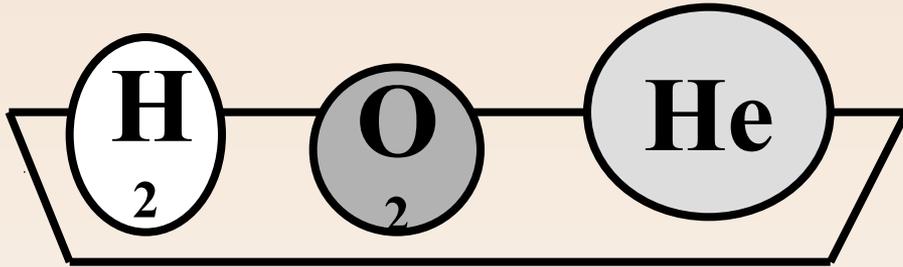
$$\Theta_0 = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$$

$$\Theta_{100} = 5,10 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$$

$$\Theta \sim T$$



# Определение температуры



$$\Theta = kT$$

$$k = \frac{\Theta_{100} - \Theta_0}{100 - 0}$$

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

- постоянная  
Больцмана



# Температура – мера средней кинетической энергии молекул

$$\left. \begin{array}{l} \Theta = kT \\ \frac{2}{3} \bar{E}_k = \Theta \end{array} \right\} E_k = \frac{3}{2} kT$$

$$[T] = K \text{ (кельвин)}$$

$$T = t + 273$$

$$t = T - 273$$

$$\Delta t = \Delta T$$



# 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

$$\left. \begin{aligned} \overline{E}_{k0} &= \frac{3}{2} kT \\ \overline{E}_{k0} &= \frac{m_0 \overline{v}^2}{2} \end{aligned} \right\} \overline{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \quad \text{- средняя квадратичная скорость}$$

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{азота}} &= 500 \frac{\text{м}}{\text{с}} \\ v_{\text{водорода}} &= 1800 \frac{\text{м}}{\text{с}} \end{aligned} \right\} \text{при } 0^\circ \text{C}$$



# 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



# Уравнение состояния идеального газа

(ур-е Менделеева – Клапейрона)

Если в ходе процесса масса газа  
остается неизменной, то

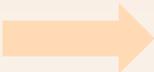
$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{\mu} R = \text{const}$$

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



# 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

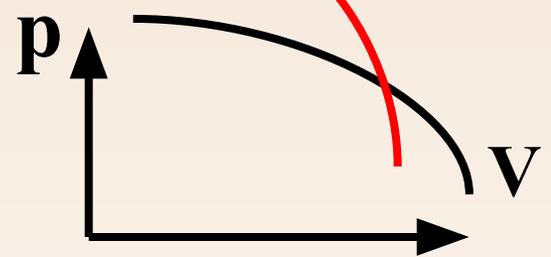
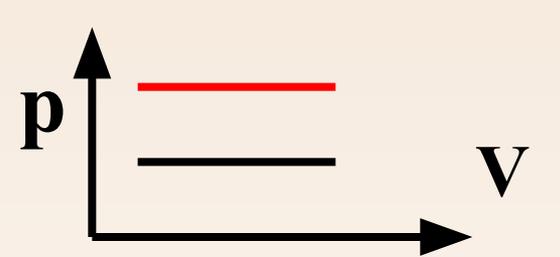
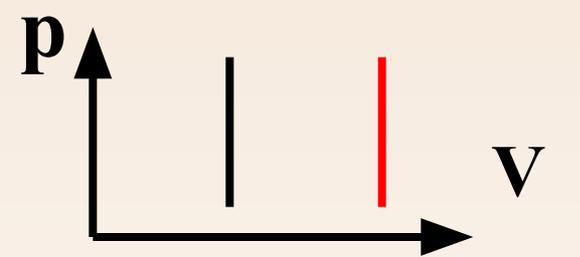
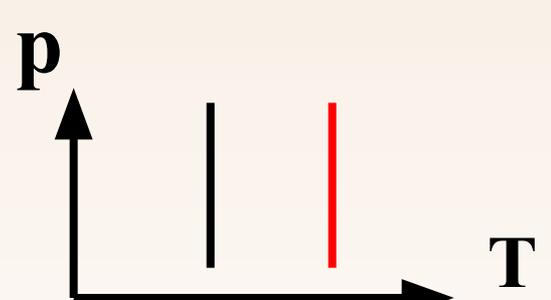
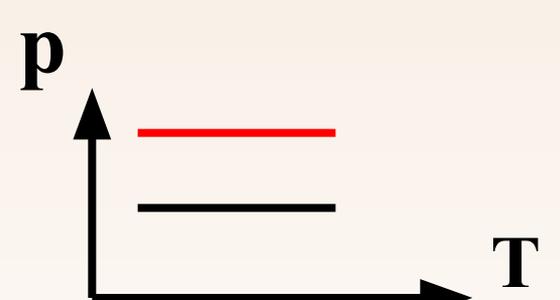
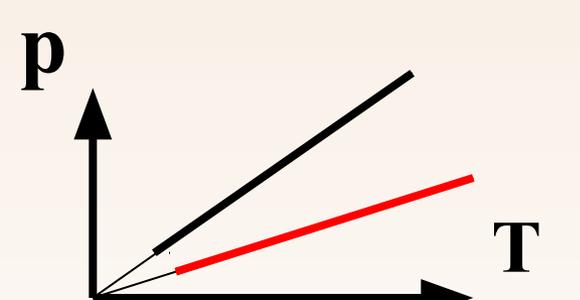
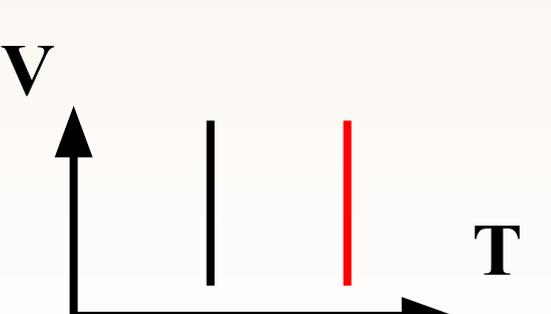
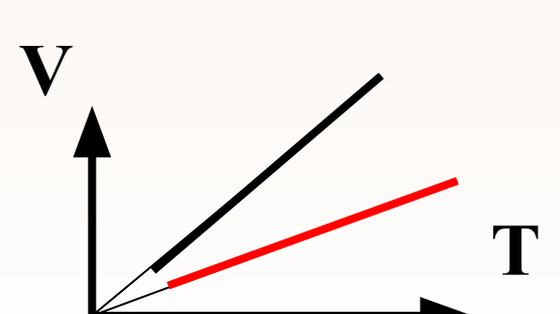
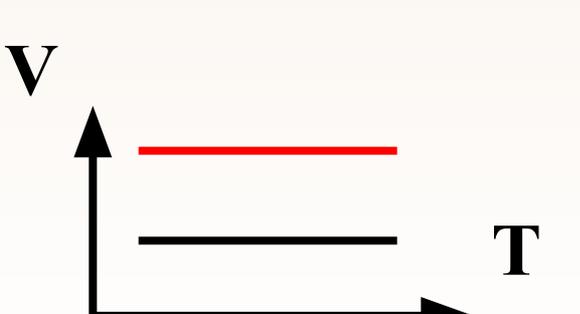
- Процесс, происходящий с газом неизменной массы при постоянном объеме называется **изохорным**.
- Изохорный процесс описывается **законом Шарля** (1787 г.):

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

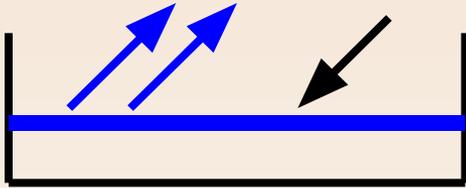
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$



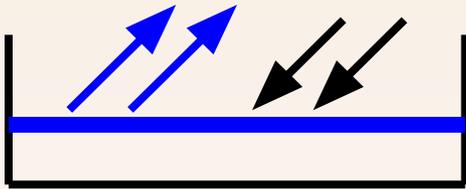
# Графики изопроцессов

изотерма	изобара	изохора
		
		
		

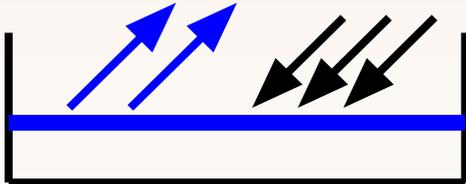
# Насыщенный пар



**Ненасыщенный пар**

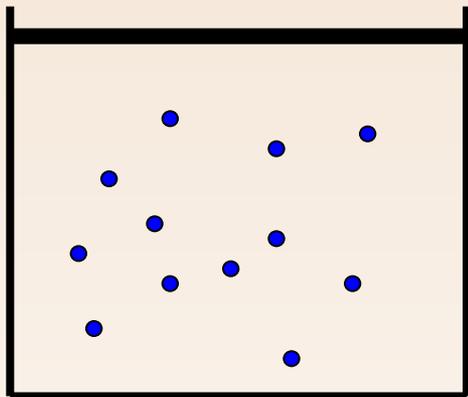


**Насыщенный пар** - это пар, который находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

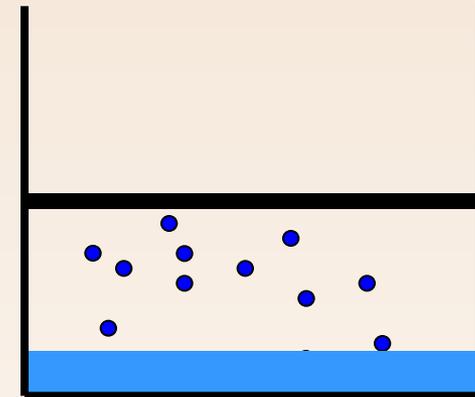
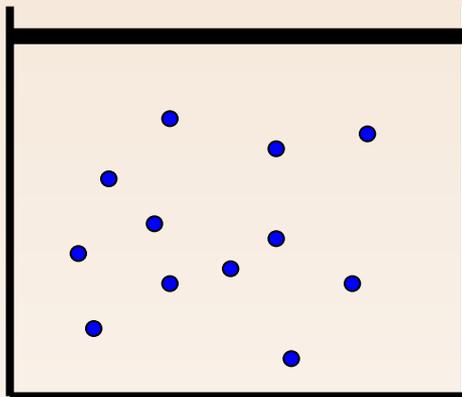


**Перенасыщенный пар**

# Давление насыщенного пара



$p_1, V_1$



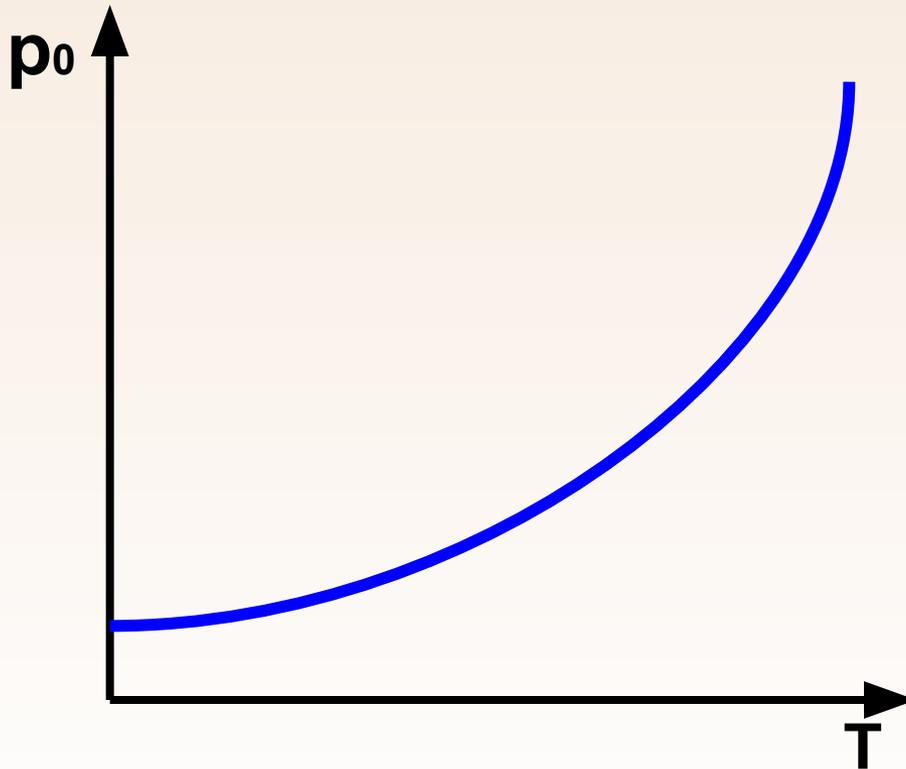
$p_2, V_2$

$p_1 = p_2$

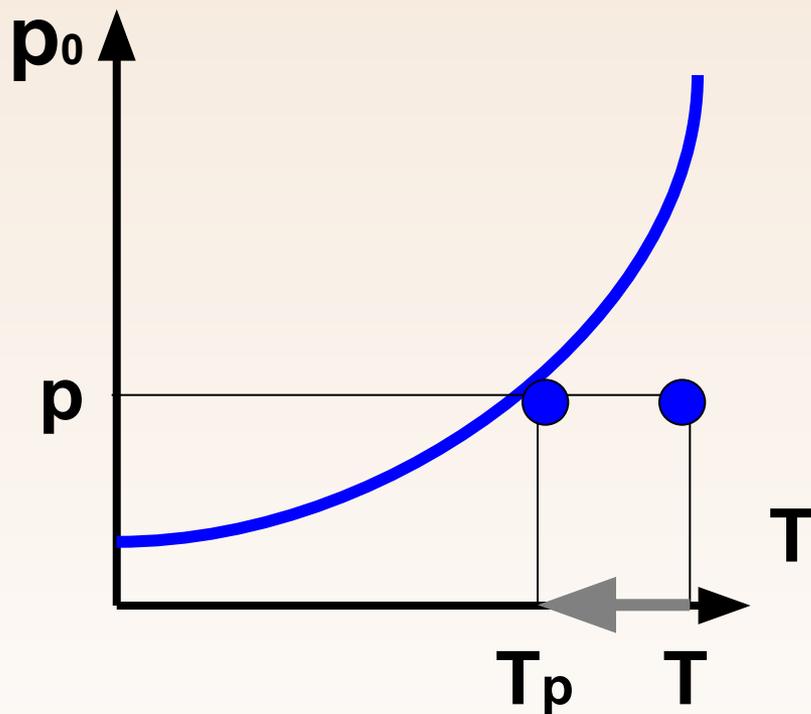
**Давление насыщенного пара не зависит от занимаемого объема.**

# Давление насыщенного пара

Давление насыщенного пара зависит только от температуры.



# Давление насыщенного пара



**Точка росы** – это температура при, 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**



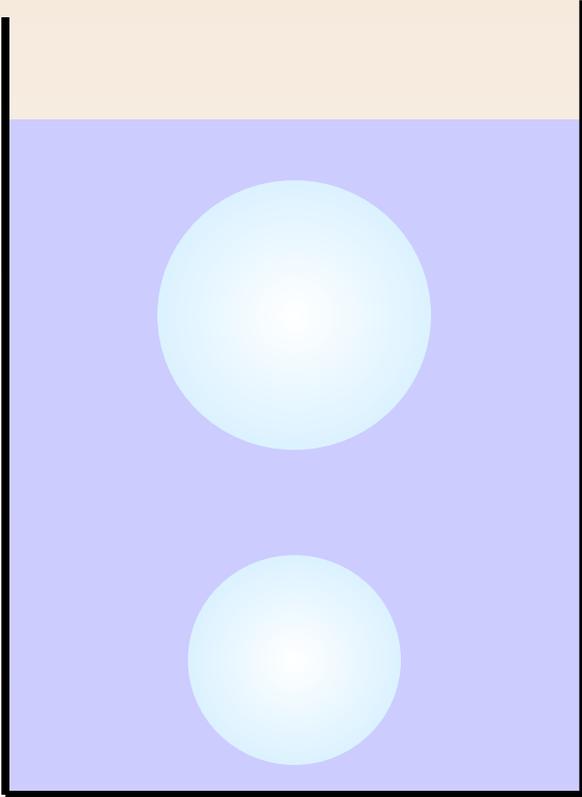
**Процесс  
парообразования  
по всему объему  
жидкости.**

**Происходит при  
температуре  
кипения.**

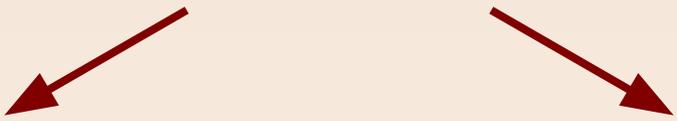
**Чем ниже давление,  
тем ниже температура  
кипения.**

# 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

**Плотность  
водяных паров в  
воздухе.**

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$[\rho] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

## относительная

**Отношение парциального давления  
водяного пара, содержащегося в  
воздухе, к давлению насыщенного  
пара при данной температуре.**

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%$$

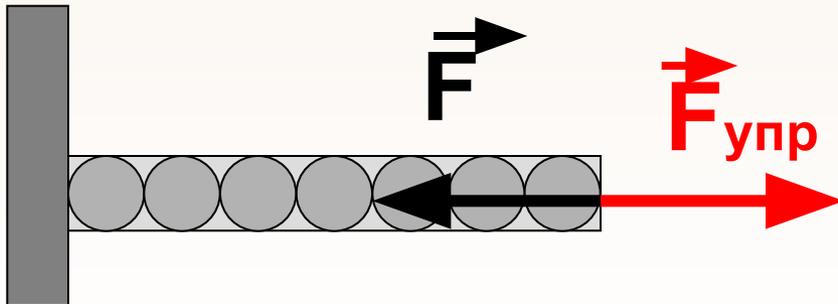
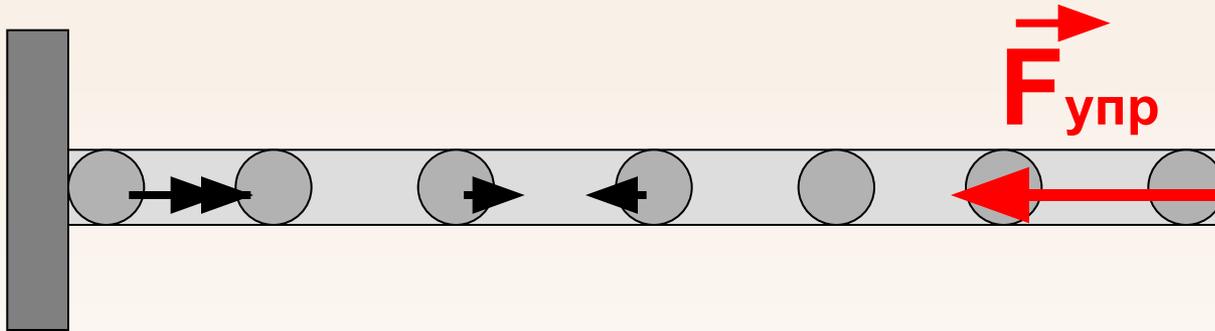
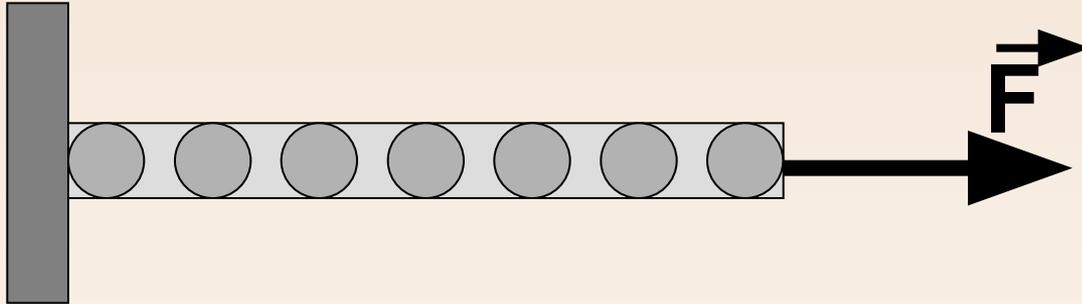
$$[\varphi] = \%$$

# Измерение влажности

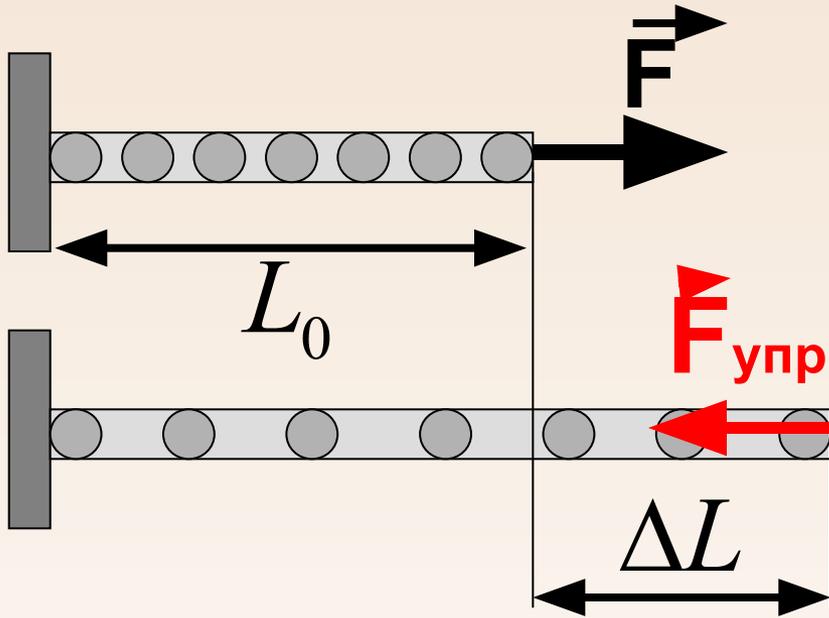
**Приборы для измерения влажности:**

- Психрометр
- Гигрометр

# Закон Гука



# Закон Гука



$\Delta L$  - абсолютное удлинение.

$$[\Delta L] = м$$

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

$$F_{упр} = -k\Delta L$$

$k$  - жесткость

$$[k] = \frac{H}{м}$$

$\varepsilon$  - относительное удлинение

# Закон Гука

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

$$[\sigma] = \frac{H}{m^2} = Pa$$

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

$$\sigma = \varepsilon E \quad 1660 \text{ г.}$$

$E$  – модуль Юнга

$$[E] = Pa$$

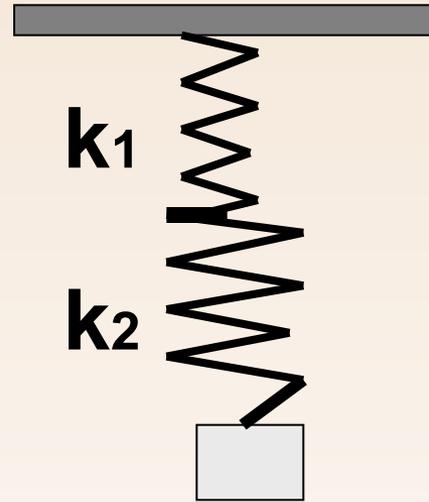
# Закон Гука

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

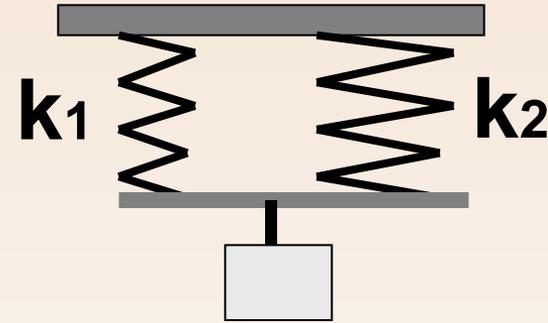
$$F_{\text{упр}} = -kx$$

$$F = -F_{\text{упр}}$$

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



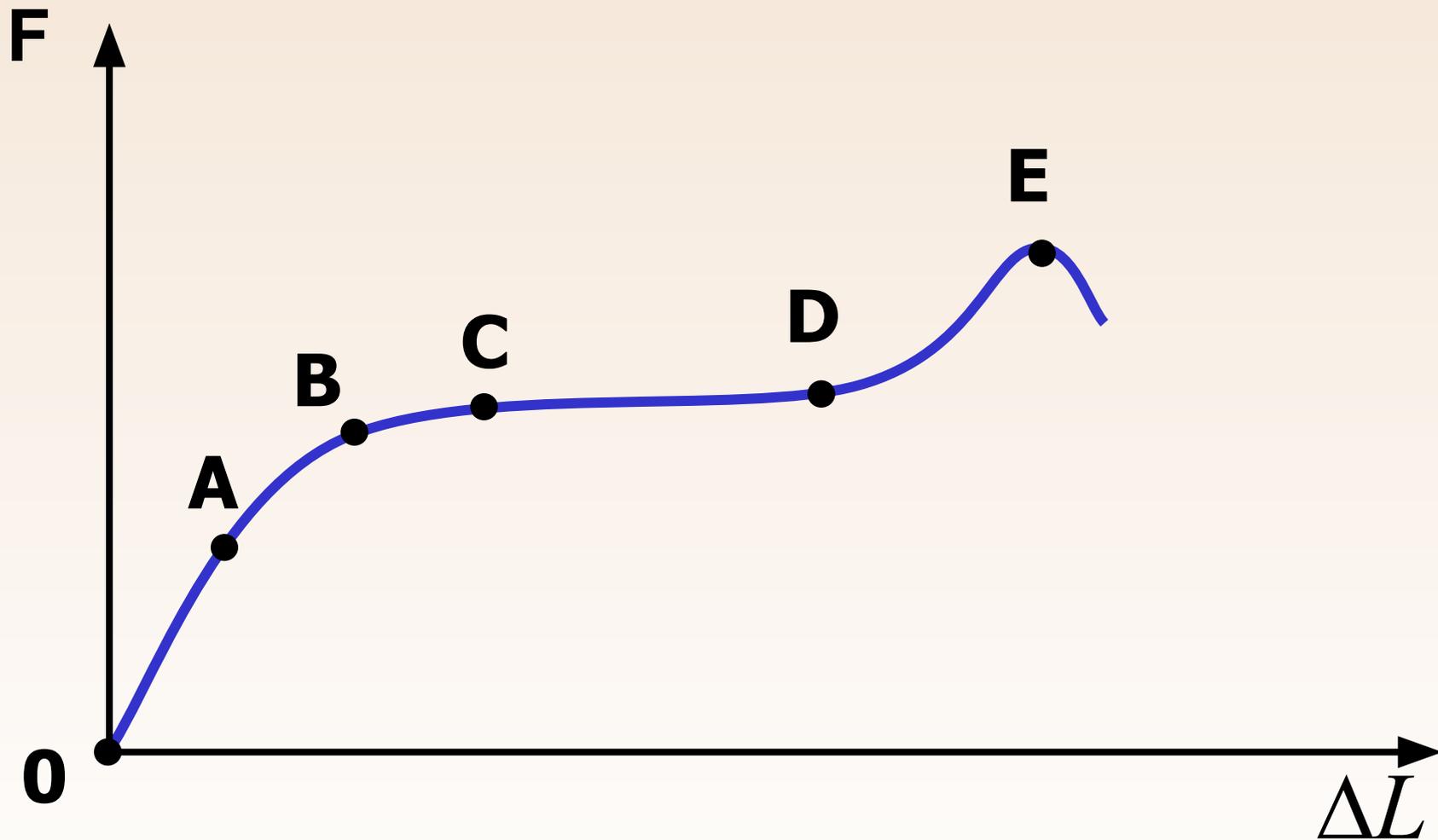
$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$



$$k = k_1 + k_2$$

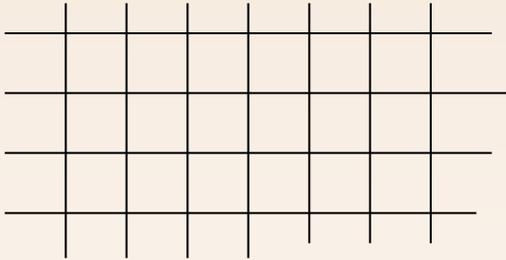


# Диаграмма растяжений

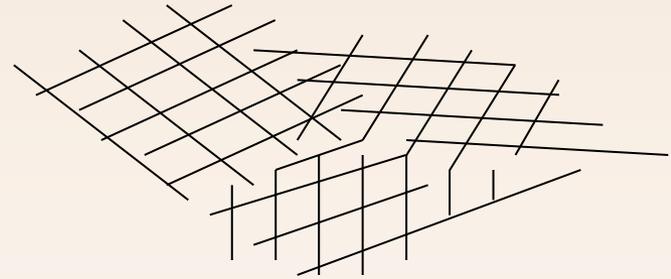


# Кристаллические тела

## монокристаллы



## поликристаллы



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



# 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).

$$[U] = \text{Дж}$$

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



# Внутренняя энергия

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

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



# Внутренняя энергия

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

- 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) –  $i = 6$ .



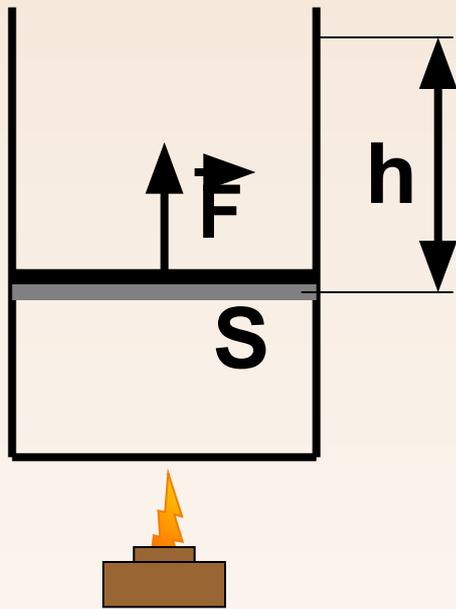
# Внутренняя энергия

**Способы изменения внутренней энергии:**

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



# Работа в термодинамике



$$A_2 = F \cdot h$$

$$F = p \cdot S$$

$$S \cdot h = \Delta V$$

$$\left. \begin{array}{l} A_2 = F \cdot h \\ F = p \cdot S \\ S \cdot h = \Delta V \end{array} \right\} A_2 = p \cdot \Delta V$$

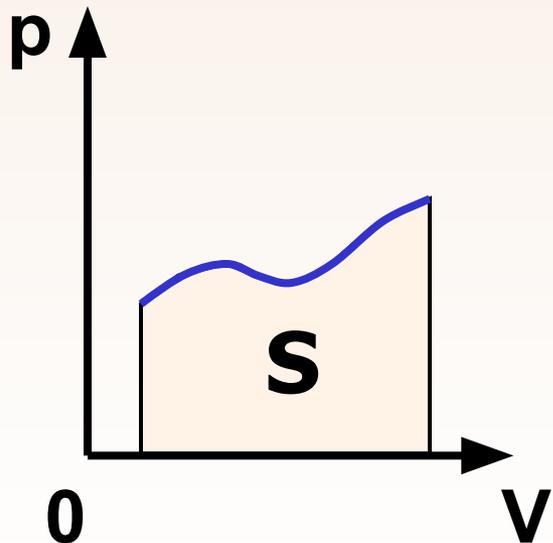
$$A_2 = \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

Данные выражения подходят только для расчета работы газа в ходе изобарного процесса.



# 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

**потребляется**

**нагревание**

$$Q = cm(t_2 - t_1)$$

$$t_2 > t_1 \Rightarrow \Delta t > 0$$

**выделяется**

**охлаждение**

$$Q = cm(t_2 - t_1)$$

$$t_2 < t_1 \Rightarrow \Delta t < 0$$

**$c$  – удельная теплоемкость вещества – величина равная энергии, необходимой для нагревания тела массой 1 кг на 1 К.**

$$[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$



# Количество теплоты

**потребляется**

**выделяется**

**плавление**

**кристаллизация**

$$Q = \lambda m$$

$$Q = -\lambda m$$

$\lambda$ - удельная теплота плавления вещества – величина равная энергии, необходимой для того, чтобы тело массой 1 кг, взятое при температуре плавления полностью расплавилось.

$$[\lambda] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$



# Количество теплоты

**потребляется**

**парообразование**

$$Q = Lm$$

**выделяется**

**конденсация**

$$Q = -Lm$$

**L - удельная теплота парообразования вещества – величина равная энергии, необходимой для того, чтобы жидкость массой 1 кг, взятая при температуре кипения полностью перешла в газообразное состояние.**

$$[L] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$



# Количество теплоты

**потребляется**

**выделяется**

**Сгорание топлива**

$$Q = -qm$$

**$q$  – удельная теплота сгорания топлива – величина равная энергии, которая выделяется при сгорании данного вида топлива массой 1 кг.**

$$[q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$



# Первый закон термодинамики

$$\Delta U = Q + A$$

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

$$A = -A_2 \quad Q = \Delta U + A_2$$

**Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.**



# Применение первого закона термодинамики к различным процессам

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



# Изотермический процесс

$$Q = \Delta U + A_2$$

$$\Delta U = 0, \text{ т.к. } \Delta T = 0$$

$$Q = A_2$$

**В ходе изотермического процесса все полученное системой количество теплоты идет на совершение работы.**



# Изобарный процесс

$$Q = \Delta U + A_2$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} A_2$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

$$Q = \frac{5}{2} A_2$$

$$A_2 = \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

$$Q = \frac{5}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

**Данный способ расчета внутренней энергии и количества теплоты подходит только для одноатомного газа.**



# Изобарный процесс

Если газ не одноатомный, то

$$Q = cm(t_2 - t_1) \quad , \quad A_2 = \frac{m}{\mu} R\Delta T$$

$$\Delta U = Q - A_2$$

Можно воспользоваться следующими выражениями:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R\Delta T \quad \quad Q = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R\Delta T$$

$i$  - число степеней свободы движения частиц.



# Изохорный процесс

$$Q = \Delta U + A_2$$

$$A_2 = 0, \text{ т.к. } \Delta V = 0$$

$$Q = \Delta U$$

**В ходе изохорного процесса все полученное системой количество теплоты идет на изменение внутренней энергии системы.**



# Адиабатный процесс

Процесс, который происходит без теплообмена с внешней средой называется адиабатным.

$$Q = 0$$

$$0 = \Delta U + A_2$$

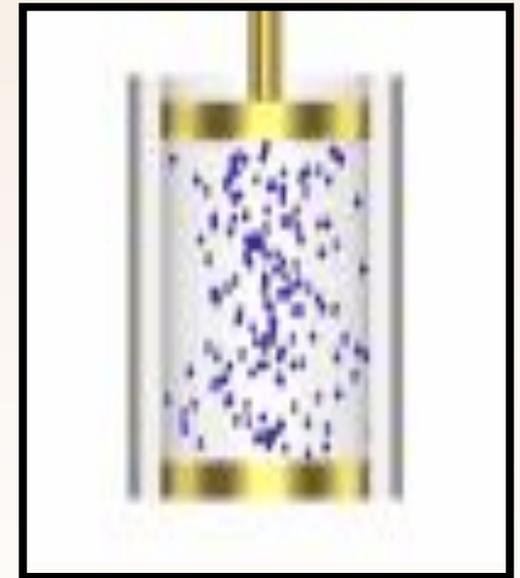
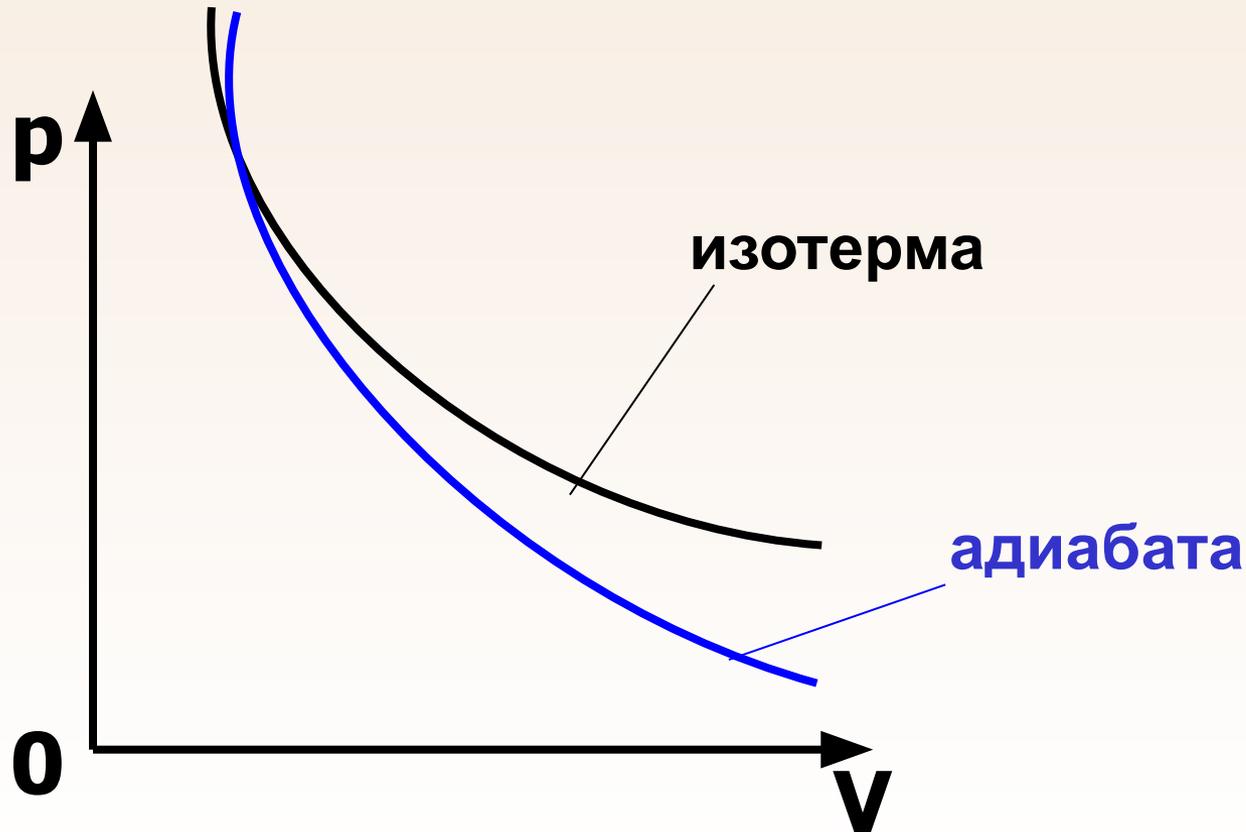
$$\Delta U = -A_2$$

В ходе адиабатного процесса газ совершает работу за счет изменения внутренней энергии.



# Адиабатный процесс

$$\Delta U = -A_2 \begin{cases} \text{если } \Delta V > 0, \text{ то } \Delta T < 0 \\ \text{если } \Delta V < 0, \text{ то } \Delta T > 0 \end{cases}$$

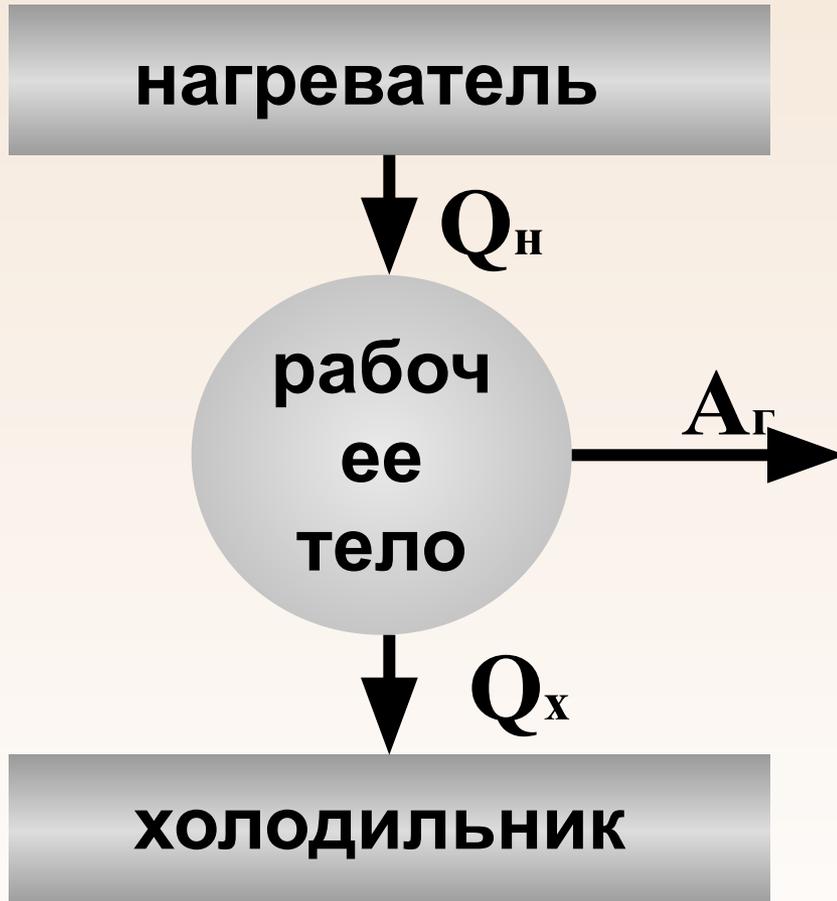


# Тепловые двигатели

- **Тепловые двигатели – механизмы, преобразующие внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.**
- **Основные детали: нагреватель, холодильник и рабочее тело.**
- **В качестве рабочего тела в т.д. выступает газ.**



# Тепловые двигатели



$$КПД : [\eta] = \%$$

$$A_г = Q_n - Q_x$$

$$\eta = \frac{A_г}{Q} \cdot 100\%$$

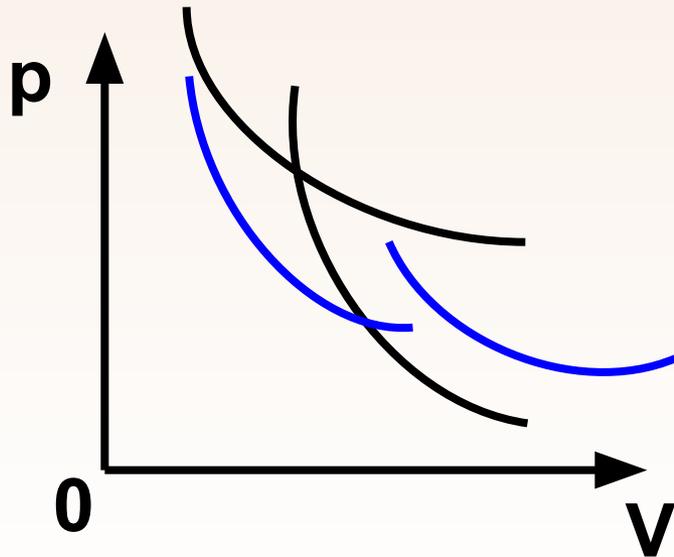
$$\eta = \frac{Q_n - Q_x}{Q_n} \cdot 100\%$$



# Тепловые двигатели

**Идеальный тепловой двигатель** – двигатель, работающий по **циклу Карно**. (Цикл Карно состоит из **двух изотерм и двух адиабат**).

1824 г. французский инженер Сади Карно опубликовал работу под названием «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».



$$\text{КПД} : [\eta] = \%$$

$$\eta = \frac{T_H - T_x}{T_H} \cdot 100\%$$

