

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 ➔



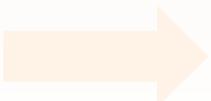
Основы термодинамики

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



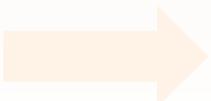
Молекулярно-кинетическая теория

- 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

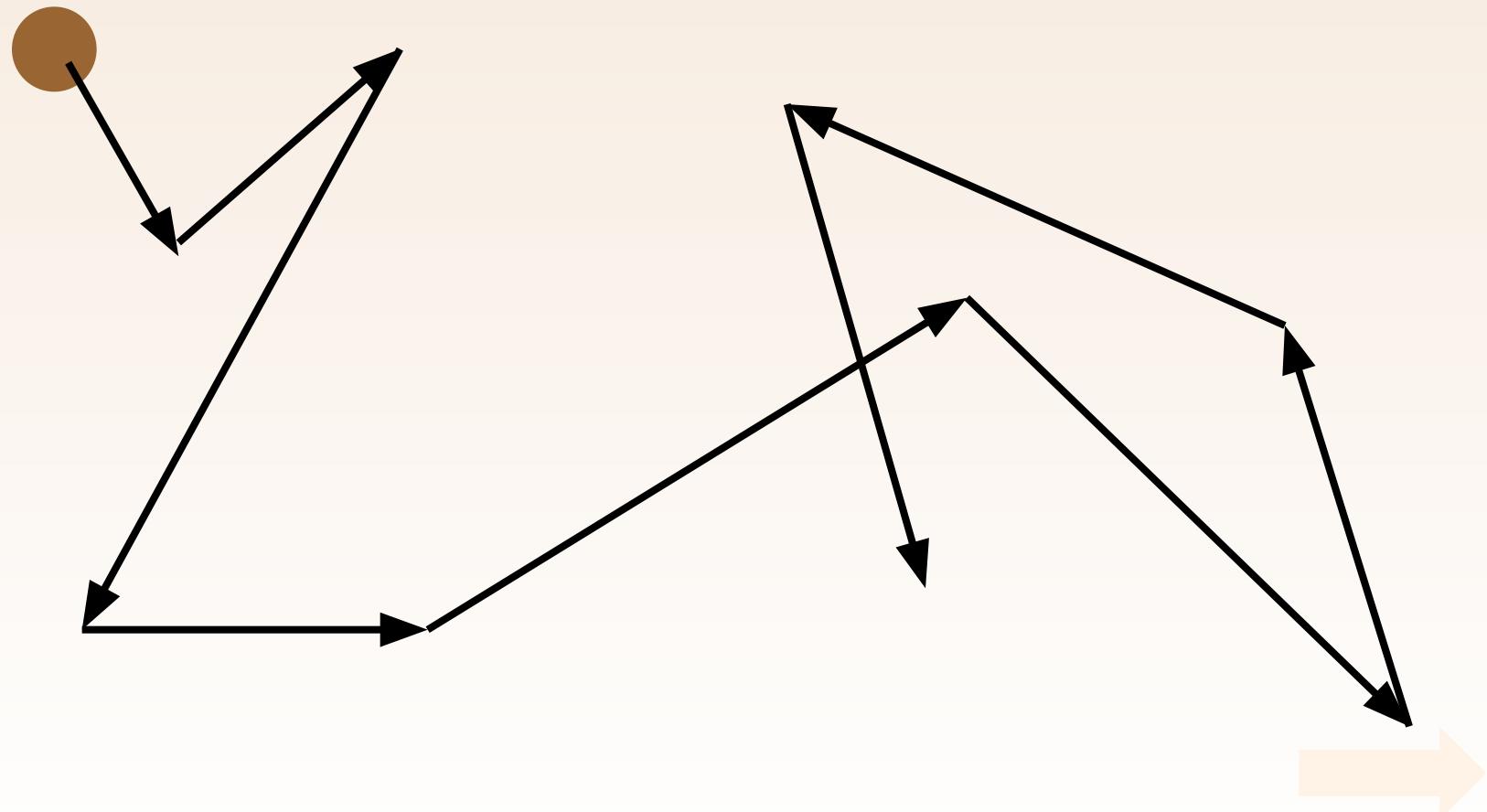
- Вещество состоит из частиц
- Частицы непрерывно и хаотически движутся
- Частицы взаимодействуют друг с другом



Броуновское движение

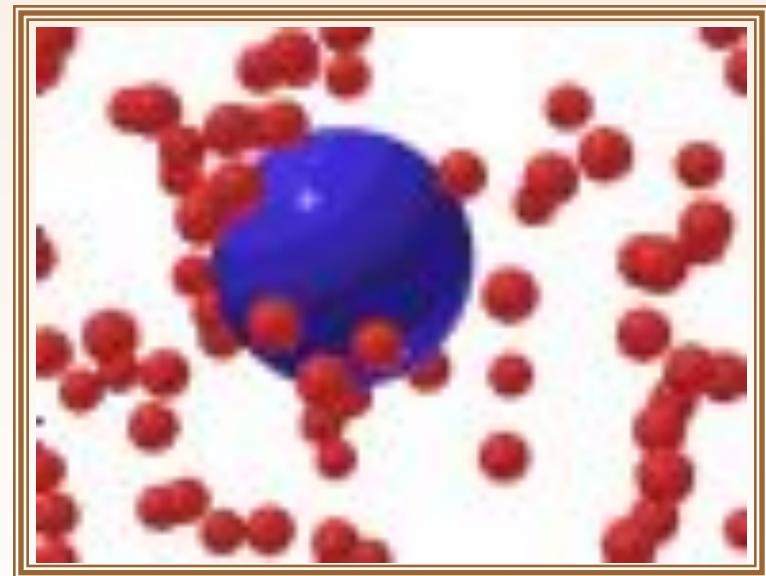
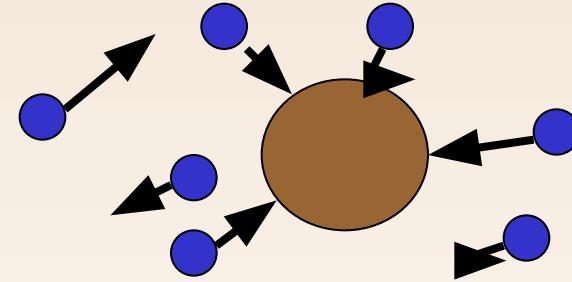
1827 г.

Роберт Броун



Броуновское движение

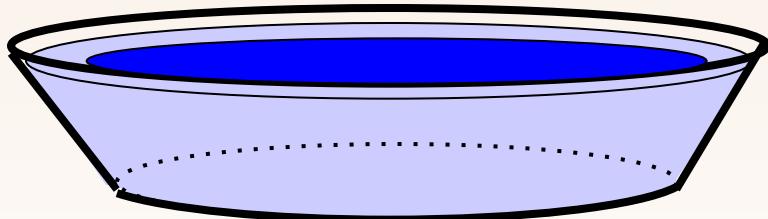
- Причина броуновского движения состоит в том, что удары молекул жидкости о частицу не компенсируют друг друга.
- 1905 г. Альберт Эйнштейн.



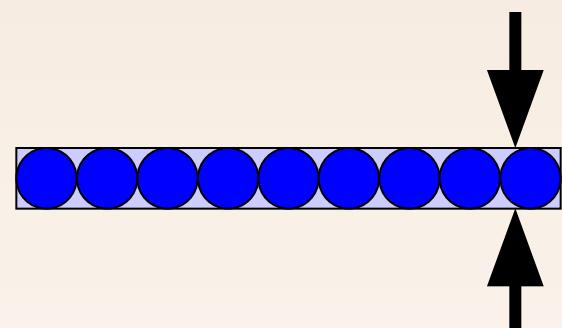
Масса и размеры молекул



$$V = 1 \text{ } \mu\text{m}^3$$

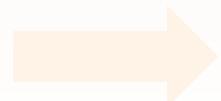


$$S = 0,6 \text{ } \mu\text{m}^2$$



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

$$d = 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

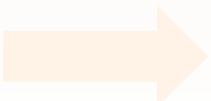


Масса и размеры молекул

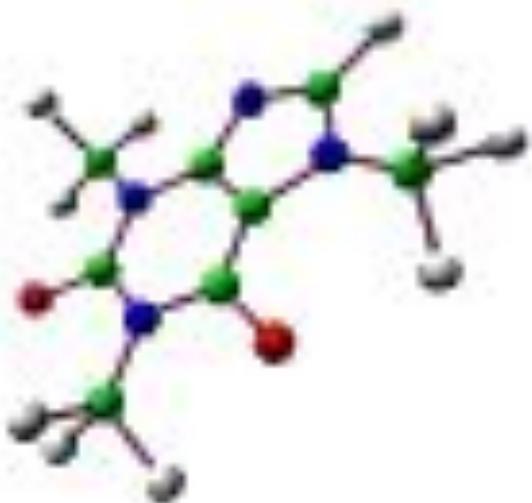
В 1 г воды содержится $3,7 \cdot 10^{22}$ молекул.

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

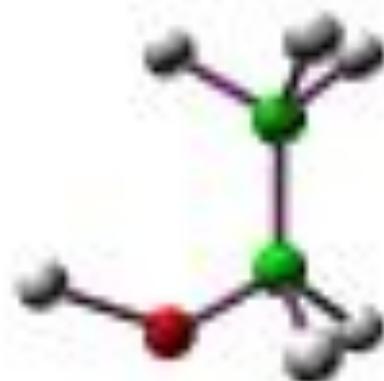
Массы молекул в макроскопических масштабах
чрезвычайно малы.



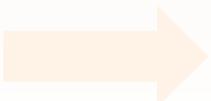
Масса и размеры молекул



кофе



этанол



Масса и размеры молекул

1961 год

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

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

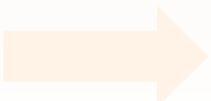


Количество вещества

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.

$$[v] = \text{моль}$$

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

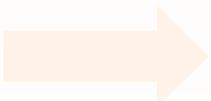
Молярной массой вещества называют массу вещества, взятого в количестве 1 моль.

$$\mu = m_0 N_A$$

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

m_0 – масса одной молекулы или атома

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



Количество вещества

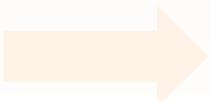
$$m = m_0 N$$

m – масса вещества

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

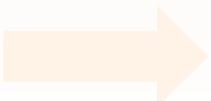
$$N = \nu N_A = N_A \frac{m}{\mu}$$

**- формула для расчета
числа частиц в теле**



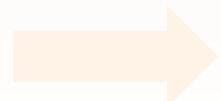
Таблица

**Свойства газов, жидкостей и
твердых тел**



Строение газов, жидкостей и твердых тел

	<i>свойства</i>	<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.



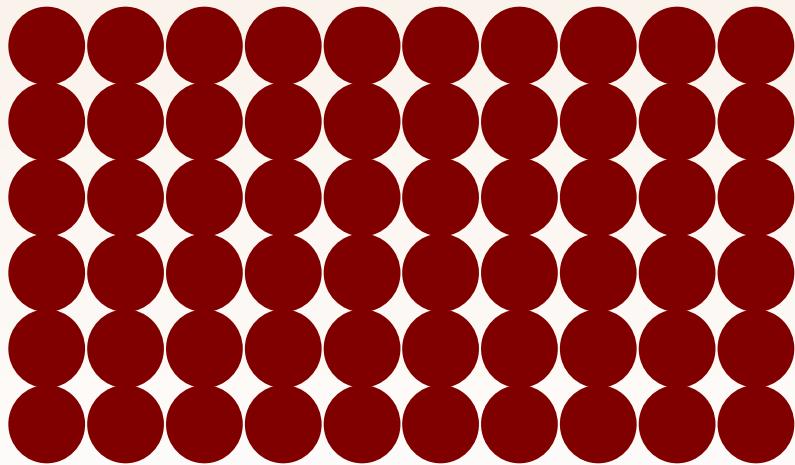
Свойства

- Газы не имеют формы, занимают весь предоставленный объем.



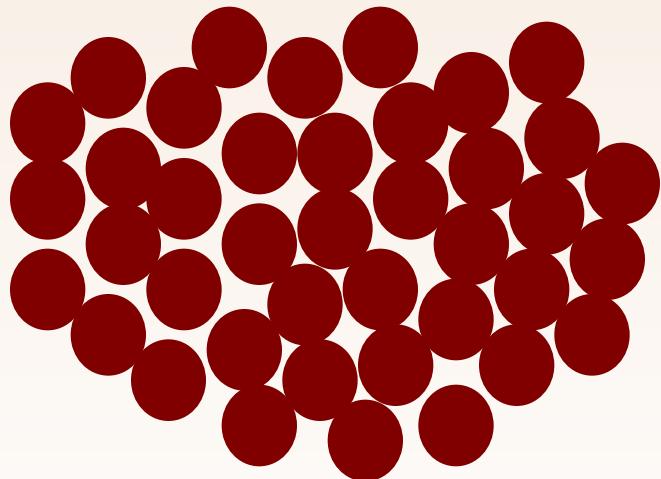
Расположение частиц

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



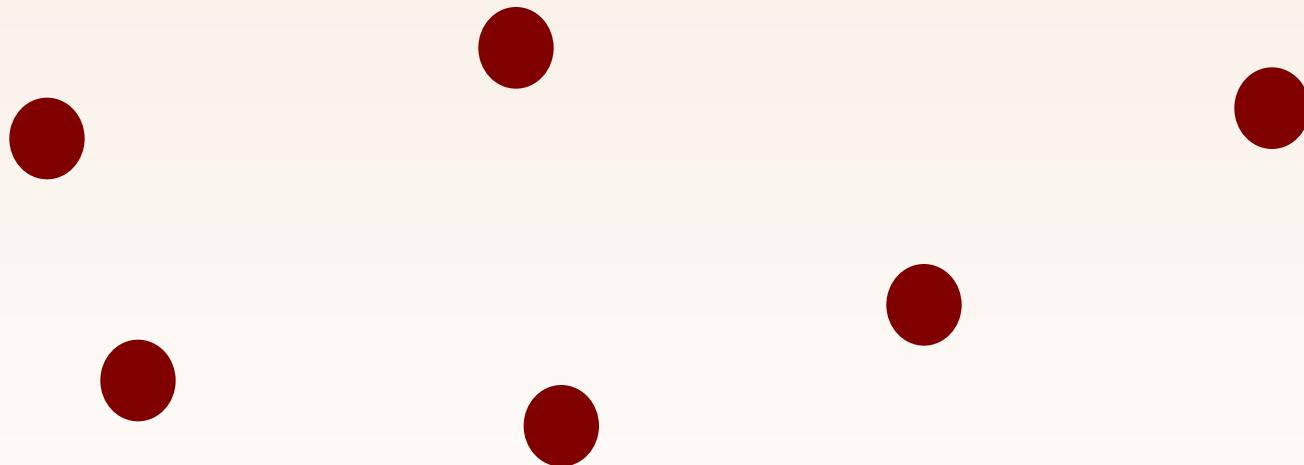
Расположение частиц

- 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

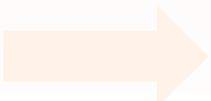
- Частицы свободно перемещаются по всему объему, двигаясь поступательно
- Силы притяжения почти отсутствуют, силы отталкивания проявляются при соударениях



Идеальный газ

Идеальный газ – это газ, в котором

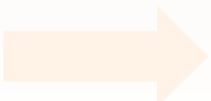
- **Частицы – материальные точки**
- **Частицы взаимодействуют только при соударениях**
- **Удары абсолютно упругие**



Среднее значение квадрата скорости молекул

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

$$\overline{v_{cp}} = \frac{\overline{v_1^2} + \overline{v_2^2} + \overline{v_3^2} + \dots}{N} = 0$$



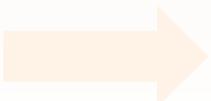
Среднее значение квадрата скорости молекул

$$\bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots}{N} \neq 0$$

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$$

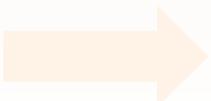
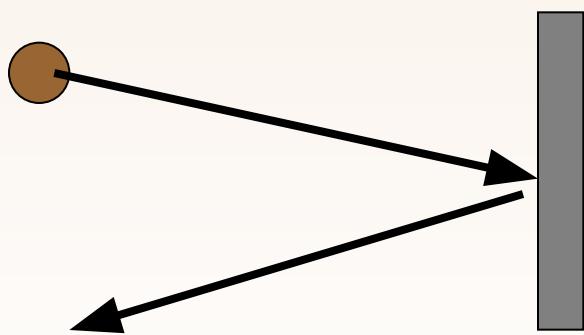
$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$$

$$\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3} \bar{v}^2$$

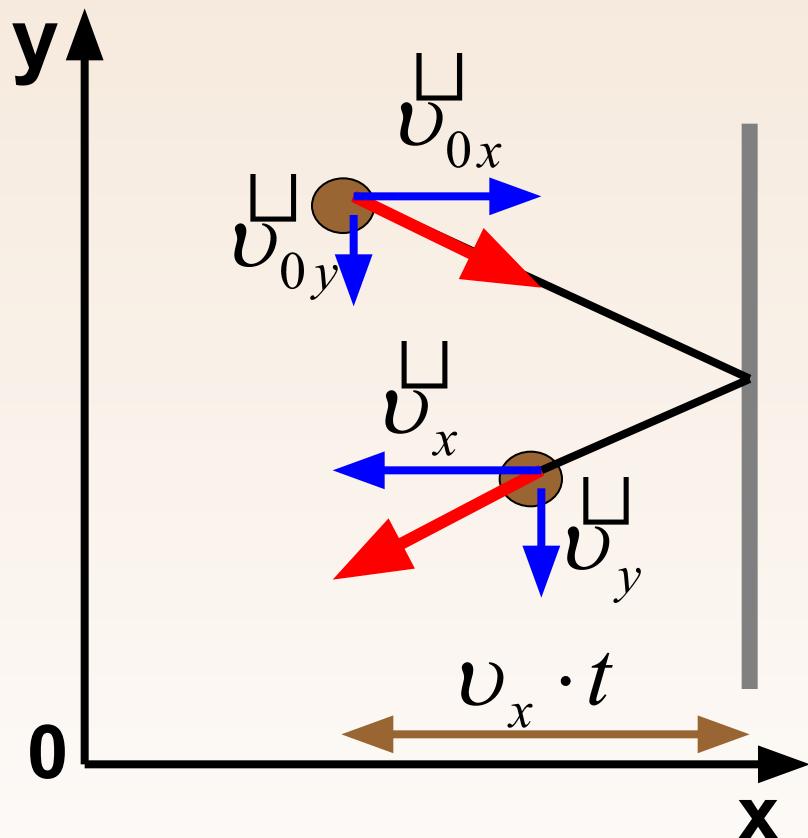


Основное уравнение МКТ

- 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



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

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

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

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

$$\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3} \bar{v}^2$$

Основное уравнение МКТ

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

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.



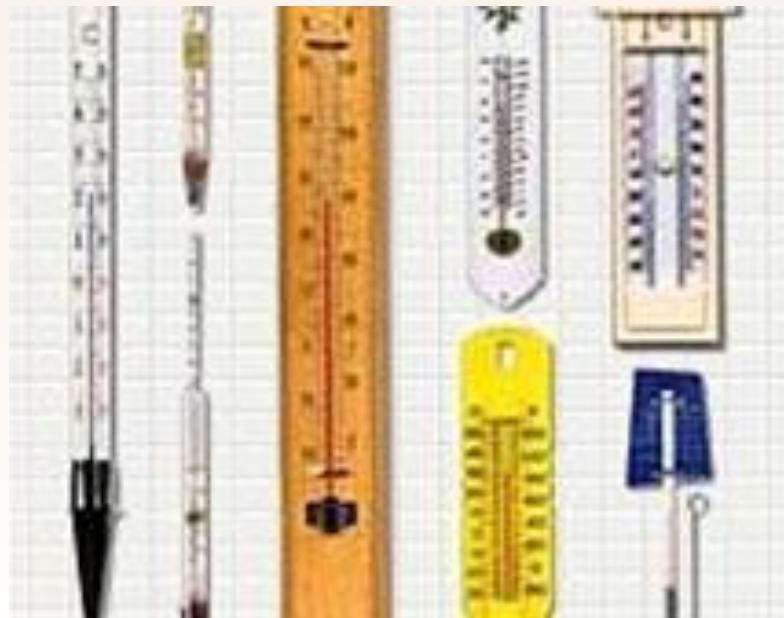
Температура и тепловое равновесие

- 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.)

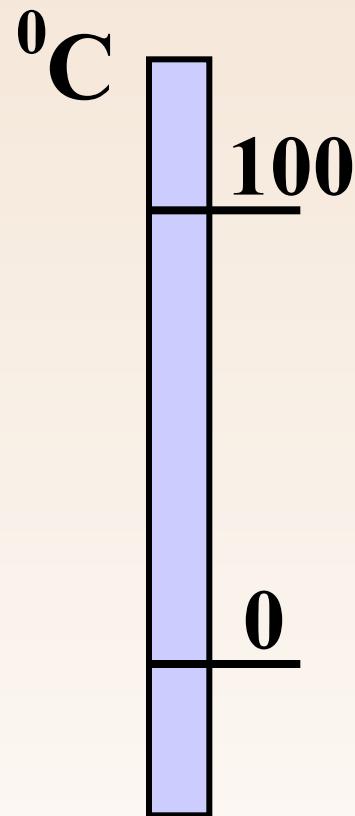


Температура и тепловое равновесие

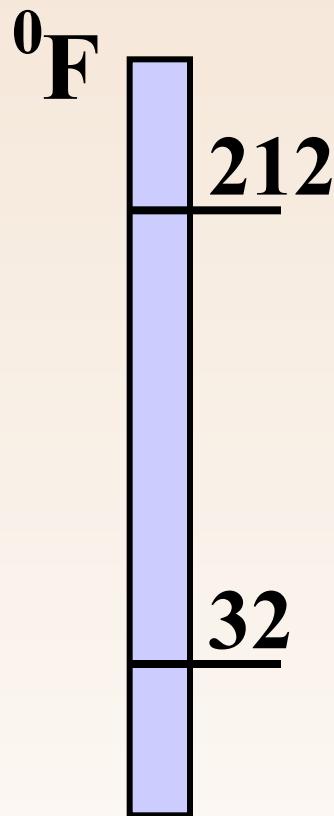
- Изобретателем термометра является Галилео Галилей (ок. 1600 г.)
- Термометрическим телом в его термометре являлся газ – при повышении температуры его объем увеличивался, вытесняя жидкость.
- Недостатком термометра Галилея являлось отсутствие температурной шкалы.



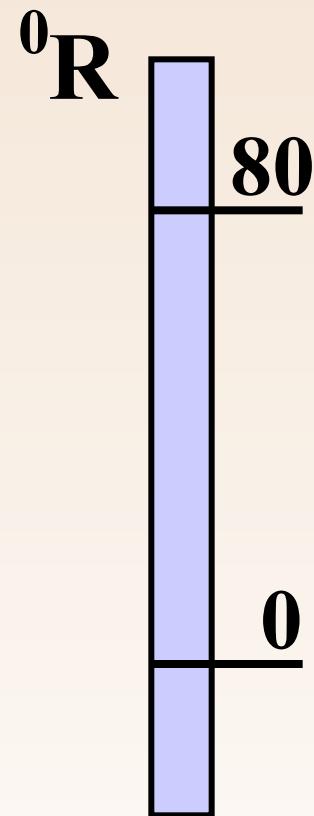
Температурные шкалы



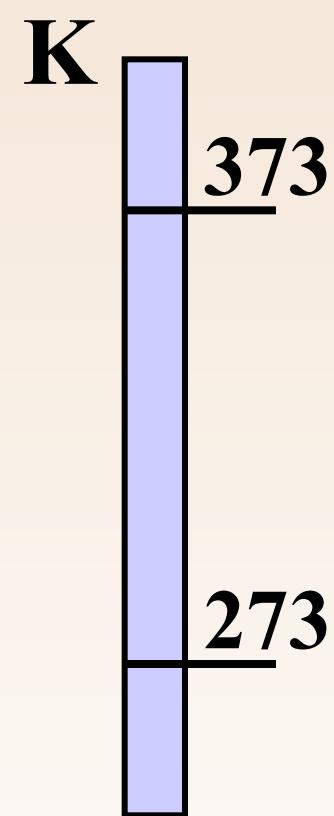
шкала
Цельсия



шкала
Фаренгейта

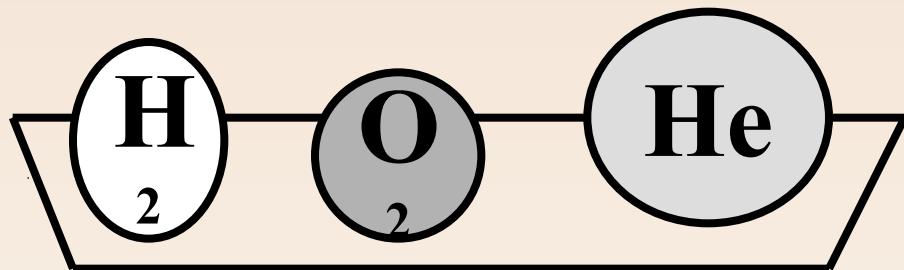


шкала
Реомюра



шкала
Кельвина

Определение температуры



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

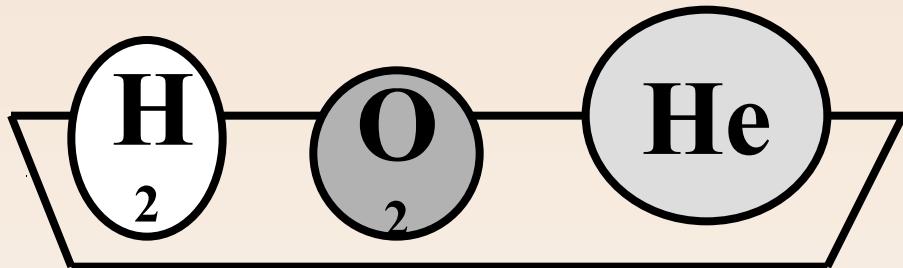
$$\frac{2}{3} E_k = \frac{pV}{N} = const$$

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

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



Определение температуры



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

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

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

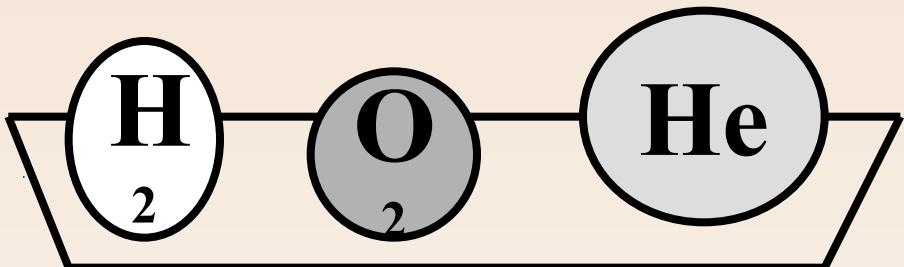
$$[\Theta] = \text{Дж}$$

Θ - Энергетический
эквивалент
температуры.

$$\Theta \sim T$$



Определение температуры



$$\Theta = kT$$

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

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

– постоянная
Больцмана



Температура – мера средней кинетической энергии молекул

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

$[T] = K$ (кельвин)

$$T = t + 273$$

$$t = T - 273$$

$$\Delta t = \Delta T$$



Зависимость давления газа от температуры и концентрации молекул газа

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



Скорости молекул

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

$$\left. \begin{array}{l} v_{азота} = 500 \frac{\mathcal{M}}{c} \\ v_{водорода} = 1800 \frac{\mathcal{M}}{c} \end{array} \right\} \text{при } 0^\circ C$$



Уравнение состояния идеального газа

(ур-е Менделеева – Клапейрона)

$$\left. \begin{array}{l} p = nkT = \frac{N}{V} kT \\ N = vN_A = N_A \frac{m}{\mu} \end{array} \right\}$$

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

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

– универсальная
газовая постоянная

Уравнение состояния идеального газа (ур-е Менделеева – Клапейрона)

Если в ходе процесса масса газа остается неизменной, то

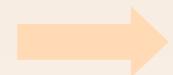
$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{\mu} R = const$$

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

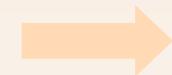


Изопроцессы

-Изотермический процесс



-Изобарный процесс



-Изохорный процесс

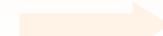


Изотермический процесс

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

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

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$



Изобарный процесс

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

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

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



Изохорный процесс

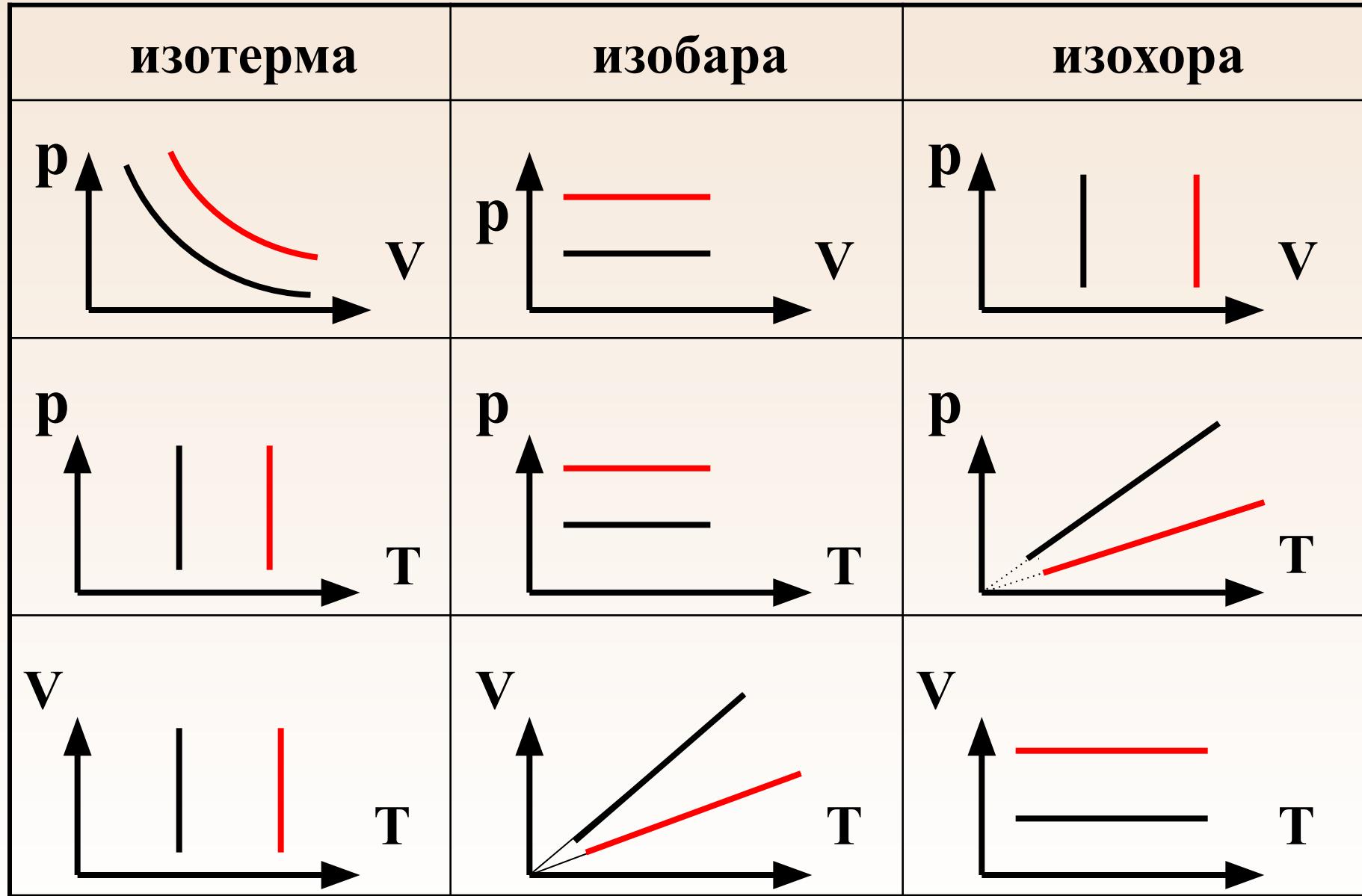
- Процесс, происходящий с газом неизменной массы при **постоянном объеме называется изохорным.**
- Изохорный процесс описывается **законом Шарля (1787 г.):**

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

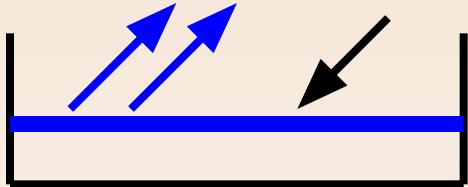
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$



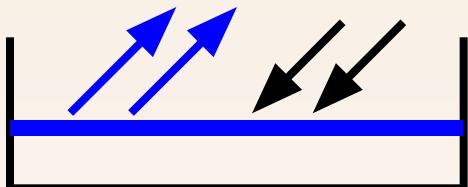
Графики изопроцессов



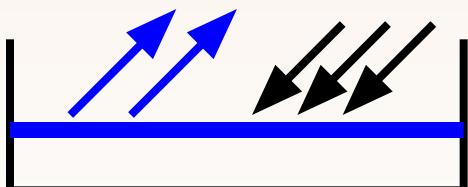
Насыщенный пар



Ненасыщенный пар



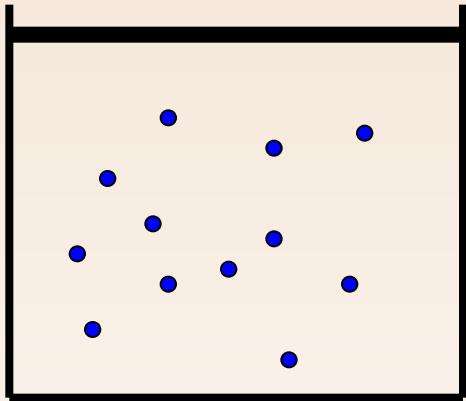
Насыщенный пар – это пар, который находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.



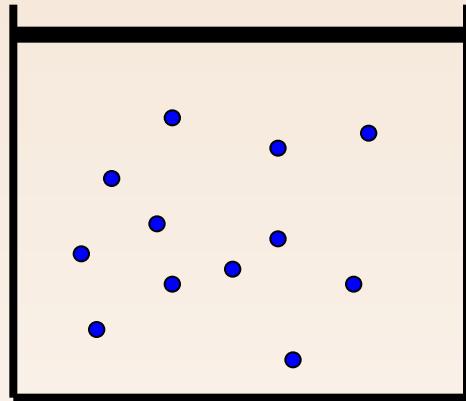
Перенасыщенный пар



Давление насыщенного пара



p_1, V_1



p_2, V_2

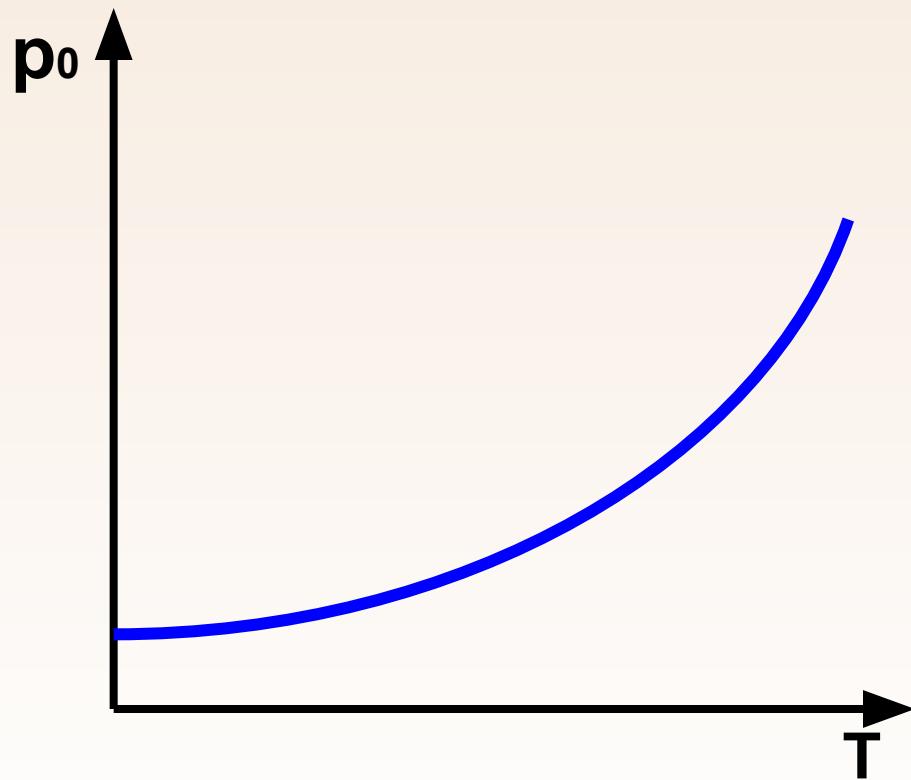
$p_1 = p_2$

Давление насыщенного пара не зависит от занимаемого объема.

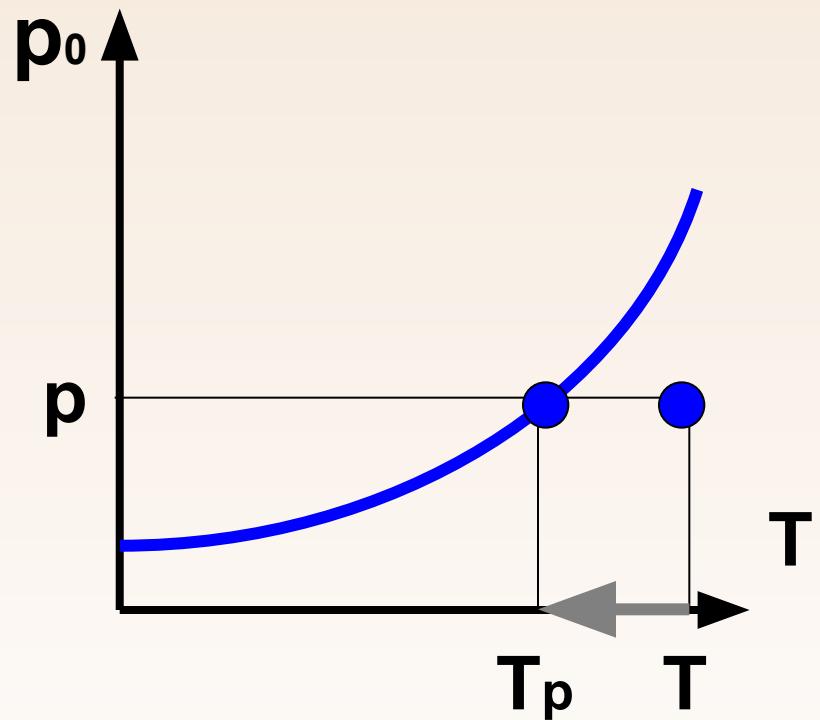


Давление насыщенного пара

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.

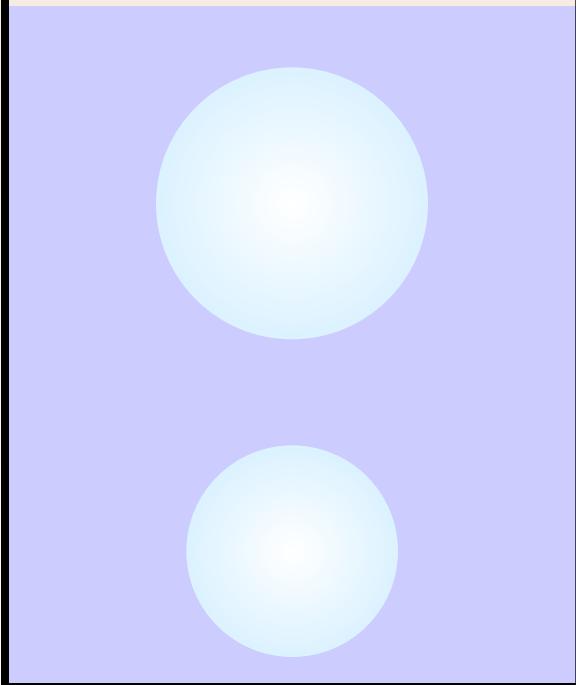
Происходит при температуре кипения.

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.

относительная

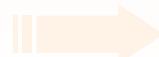
Отношение парциального давления
водяного пара, содержащегося в
воздухе, к давлению насыщенного
пара при данной температуре.

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

$$[\rho] = \frac{\kappa g}{M^3}$$

$$\varphi = \frac{P}{P_0} \cdot 100\%$$

$$[\varphi] = \%$$



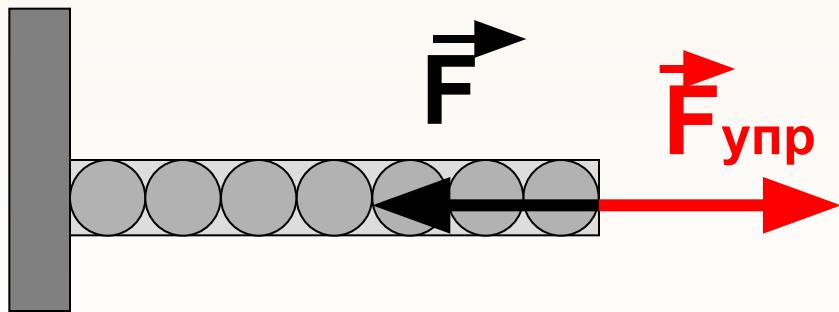
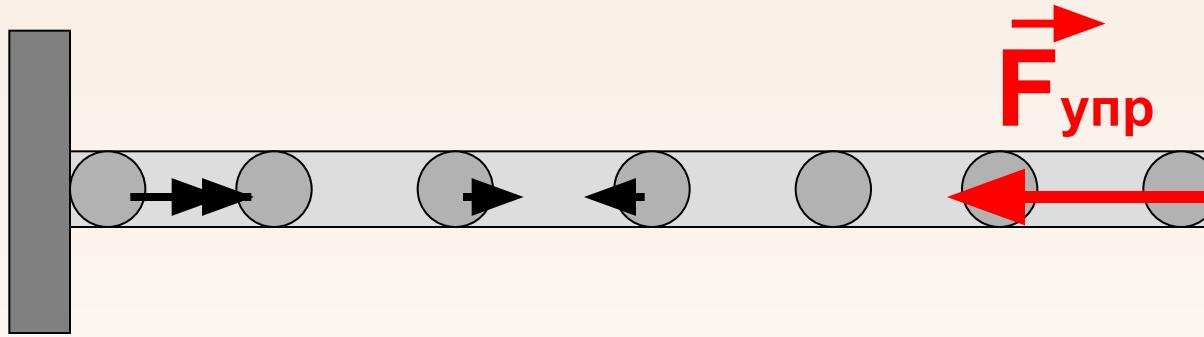
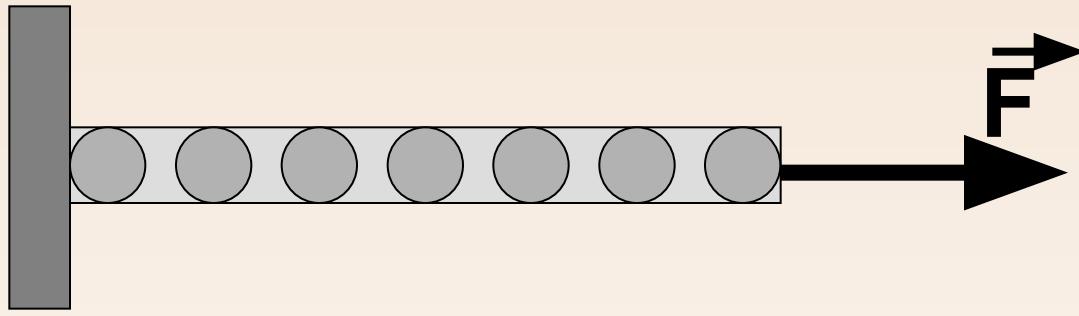
Измерение влажности

Приборы для измерения влажности:

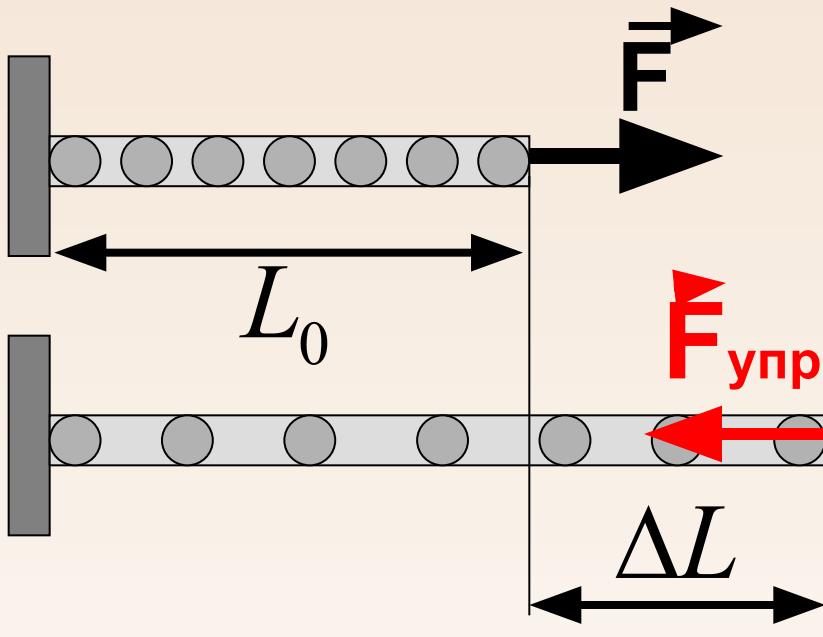
- Психрометр
- Гигрометр



Закон Гука



Закон Гука



ΔL - абсолютное удлинение.

$$[\Delta L] = \text{м}$$

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

ε - относительное удлинение

k – жесткость

$$[k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Закон Гука

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

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

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

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

E – модуль Юнга

$$[E] = Pa$$

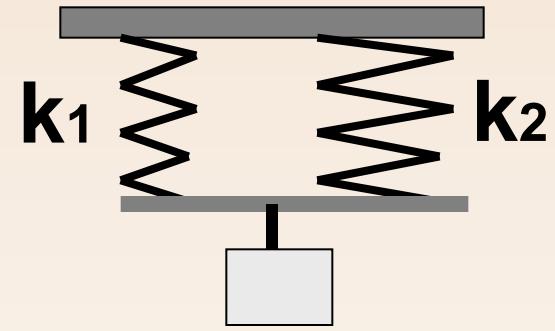
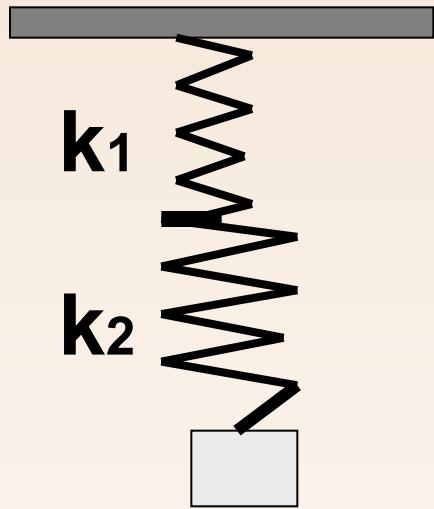
Закон Гука

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

$$F_{\text{ymp}} = -kx$$

$$F = -F_{\text{ymp}}$$

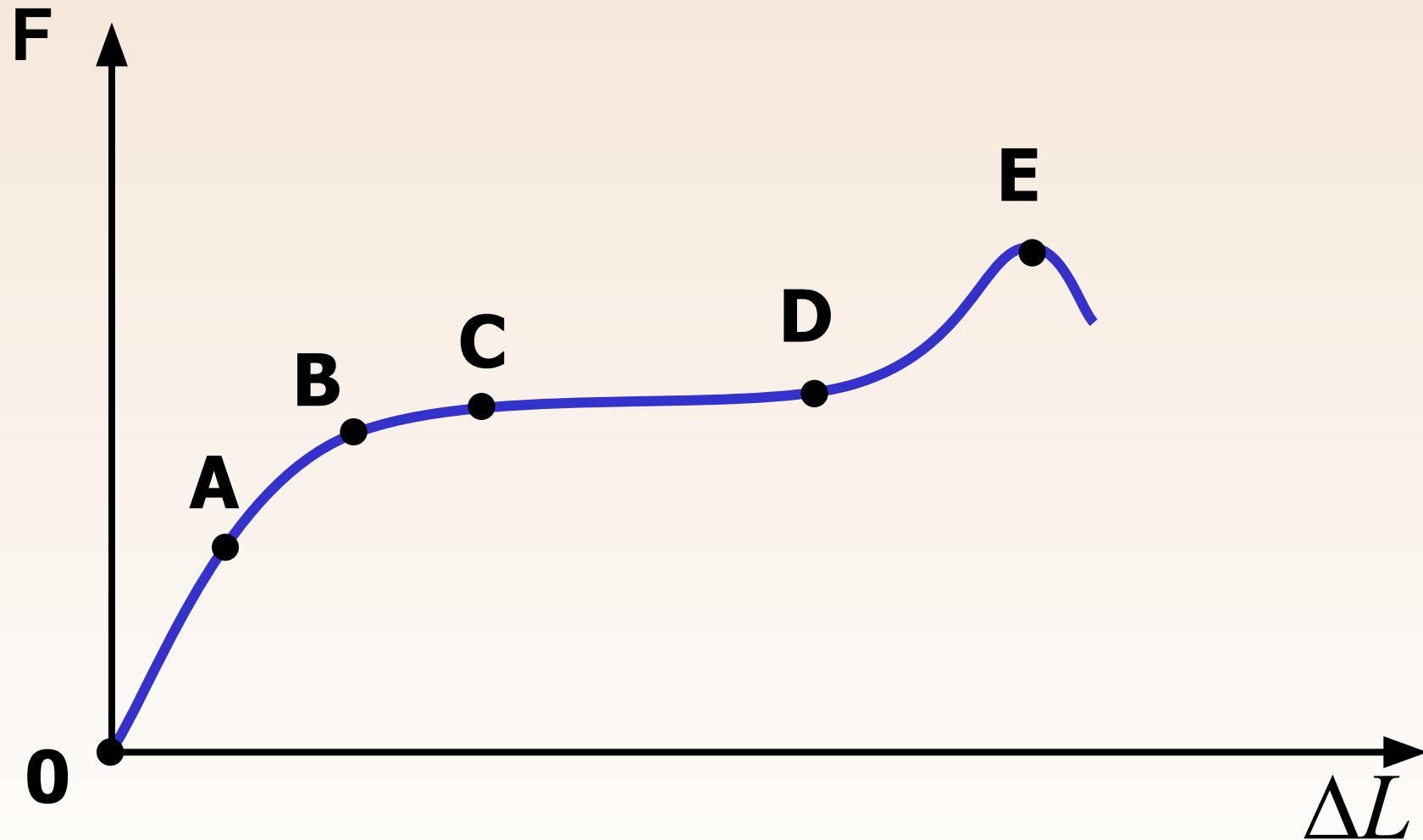
$$k = \frac{ES}{L_0}$$



$$k = k_1 + k_2$$

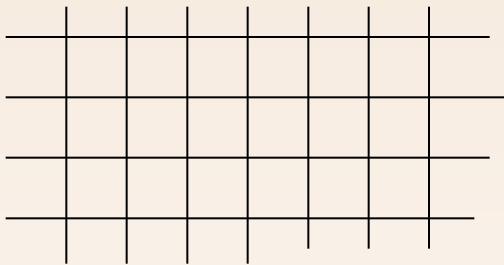
$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

Диаграмма растяжений

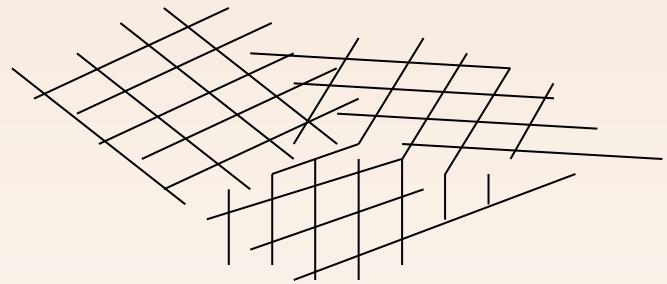


Кристаллические тела

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.

$$U = N \cdot E_k$$

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

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$$

$$N_A \cdot k = R$$

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

$$U = \frac{3}{2} vRT$$

$$U = \frac{3}{2} pV$$

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) – $i = 5$.

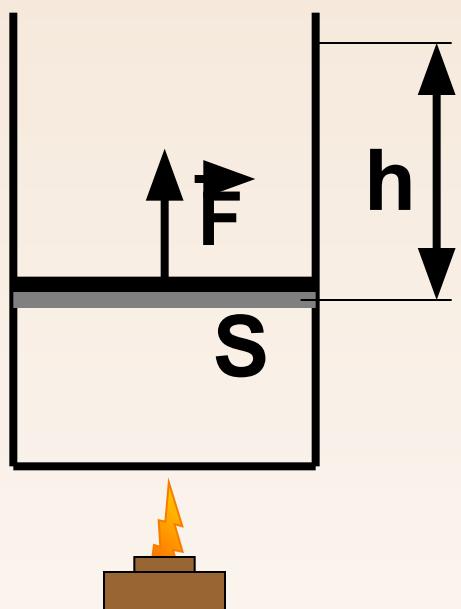
Трехатомный газ (углекислый газ, озон) – $i = 6$.

Внутренняя энергия

**Способы изменения внутренней
энергии:**

- Передача теплоты
- Совершение работы

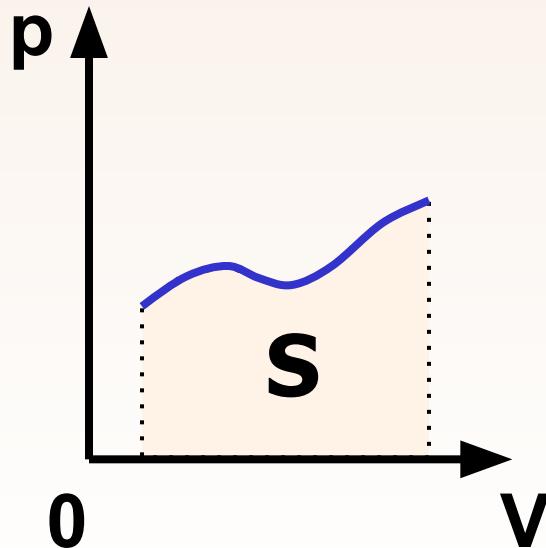
Работа в термодинамике


$$\left. \begin{array}{l} A_g = F \cdot h \\ F = p \cdot S \\ S \cdot h = \Delta V \end{array} \right\} A_g = p \cdot \Delta V$$
$$A_g = \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

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

$$[Q] = Дж$$

Количество теплоты

потребляется

нагревание

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

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

выделяется

охлаждение

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

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

с – 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

$$Q = \lambda m$$

$$Q = -\lambda m$$

λ - 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

выделяется

конденсация

$$Q = Lm$$

$$Q = -Lm$$

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.

$$A = -A_{\text{г}} \quad Q = \Delta U + A_{\text{г}}$$

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

$$Q = \Delta U + A_{\varphi}$$

$$\Delta U = 0 \quad , \text{ m.k. } \Delta T = 0$$

$$Q = A_{\varphi}$$

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



Изобарный процесс

$$Q = \Delta U + A_e$$

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

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

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

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

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

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



Изобарный процесс

Если газ не одноатомный, то

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

$$\Delta U = Q - A_g$$

Можно воспользоваться следующими выражениями:

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

i – число степеней свободы движения частиц.



Изохорный процесс

$$Q = \Delta U + A_v$$

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

$$Q = \Delta U$$

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.

$$Q = 0$$

$$0 = \Delta U + A_{\text{г}}$$

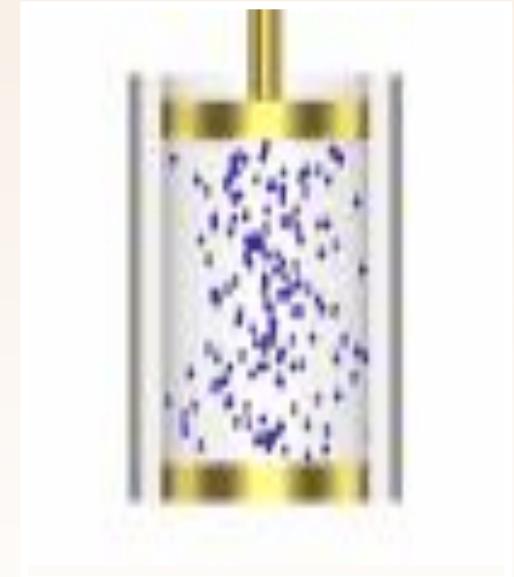
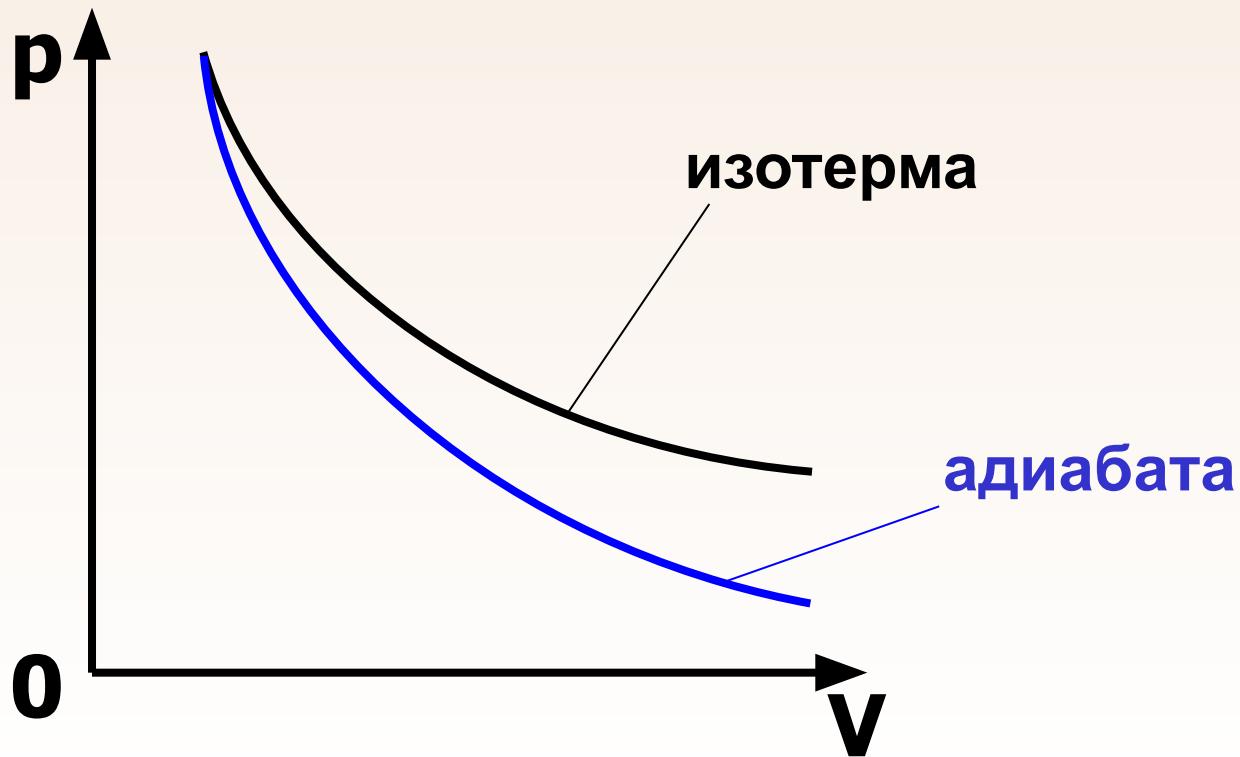
$$\Delta U = -A_{\text{г}}$$

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



Адиабатный процесс

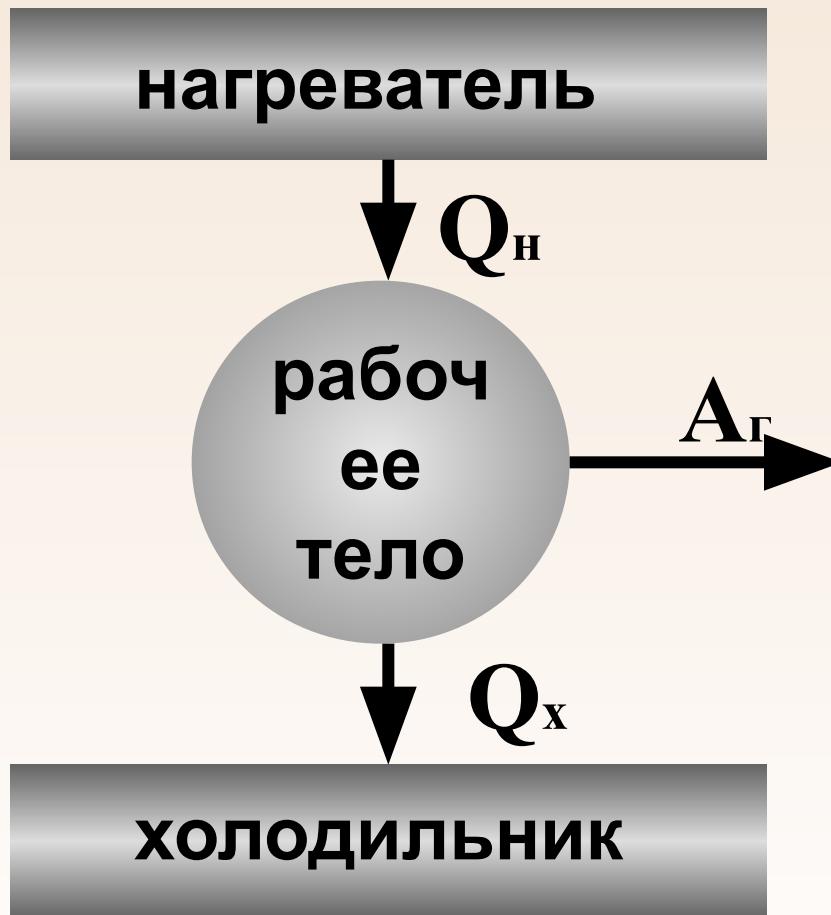
$$\Delta U = -A_g \begin{cases} \text{если } \Delta V > 0, \text{ то } \Delta T < 0 \\ \text{если } \Delta V < 0, \text{ то } \Delta T > 0 \end{cases}$$



Тепловые двигатели

- Термодинамические процессы в тепловом двигателе:
 - Термодинамические процессы в тепловом двигателе:
 - Термодинамические процессы в тепловом двигателе:

Тепловые двигатели



КПД : $[\eta] = \%$

$$A_\varphi = Q_h - Q_x$$

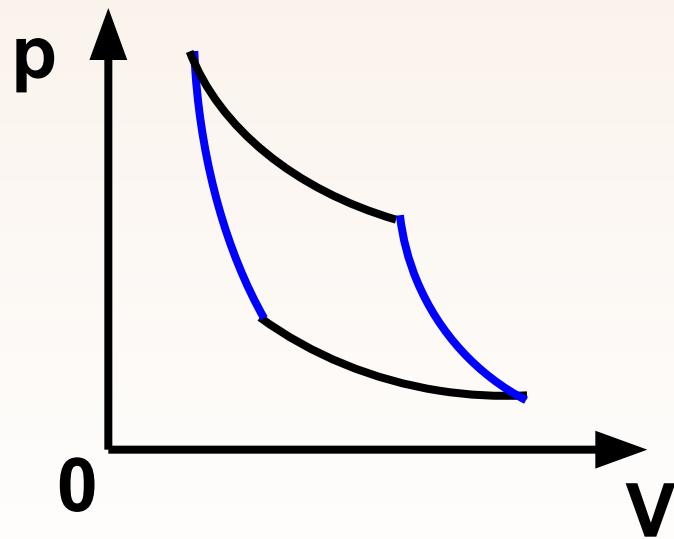
$$\eta = \frac{A_\varphi}{Q} \cdot 100\%$$

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

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».



$$КПД : [\eta] = \%$$

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