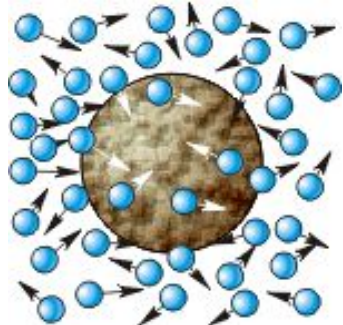


# Лекция 2

---

***Кинетическая теория  
равновесного идеального газа.***

***Термодинамика  
идеального газа***



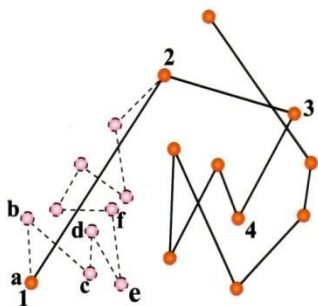
# §1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ молекулярно-кинетической теории вещества (МКТВ)

Атомы и молекулы находятся в состоянии непрерывного хаотического ТЕПЛОВОГО движения

Доказательством этого являются:

## БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

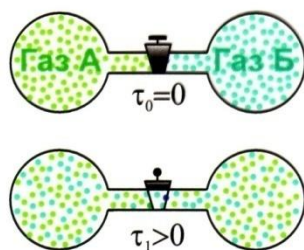
- движение взвешенных в жидкости или газе макроскопических частиц



## ДИФфуЗИЯ

- проникновение различных веществ друг в друга, вследствие теплового движения молекул

### Диффузия в газах



**Молекулярно-кинетический) метод исследования систем из большого числа частиц, оперирует статистическими закономерностями и средними (усредненными) значениями физических величин, характеризует всю систему, исходя из того что все тела состоят из большого числа атомов, молекул или ионов находящихся в непрерывном хаотическом движении.**

**Молекула** является мельчайшей частицей вещества (диаметр  $\sim 3 \cdot 10^{-11}$  м), сохраняющей все его химические свойства. Простейшие молекулы (содержащие только одно ядро), называются **атомами**.

# Длина свободного пробега

---

**Средней длиной свободного пробега** называется среднее расстояние, которое молекула проходит без столкновения

$$\langle \lambda \rangle = \bar{\lambda} = \lambda_{\text{ср}}$$

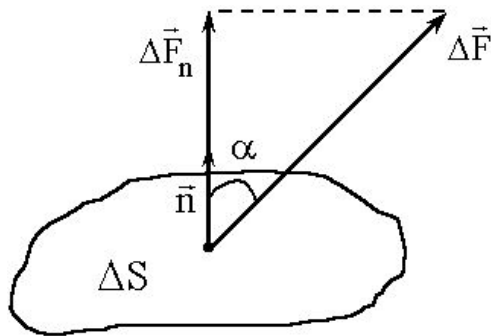
$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle u \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$$

$\langle u \rangle$  – средняя арифметическая скорость молекулы,  $\langle z \rangle$  – среднее число соударений,  $d$  – эффективный диаметр молекулы (расстояние  $d$  определяет размеры области, в которую не может проникнуть другая молекула,  $d \sim 10^{-10}\text{м} = 1 \text{ \AA}$ ),  $n$  – число молекул в единице объема газа (концентрация)

**Для большинства газов при нормальных условиях:**  $\lambda \approx 10^{-7}\text{м}$

# Параметры состояния

**Термодинамические параметры (параметры состояния) – совокупностью физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы: давление ( $p$ ), объем ( $V$ ) температура ( $T$ )**



**ДАВЛЕНИЕМ ( $p$ )** называют нормальную составляющую силы, приходящейся на единицу площади поверхности, на которую эта сила действует

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta S} = \frac{dF_n}{dS} \quad \left[ \text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right]$$

**ОБЪЕМ ( $V$ )** определяется геометрическими размерами пространства, которое занимает рассматриваемое вещество (система)

**ТЕМПЕРАТУРА** системы (вещества), находящейся в равновесном состоянии, служит мерой интенсивности теплового движения атомов, молекул и других частиц, образующих систему (мера нагретости тела)

$$T = t \text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15 \text{ K}$$

# ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

---

**ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ** можно рассматривать как совокупность беспорядочно движущихся молекул-шариков, имеющих пренебрежимо малый собственный объем и не взаимодействующих друг с другом на расстоянии.

**Давление** является макроскопическим проявлением **теплового движения молекул**.

**ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ** газов связывает давление и объем газов с энергией движения частиц (молекул)

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

где  $p$  – давление газа,  
 $V$  – его объем

$$W_k = \sum_{i=1}^N \frac{m_i u_i^2}{2} = \sum_{i=1}^N w_{ki}$$

суммарная кинетическая энергия поступательного движения  $N$  молекул газа

# Уравнение Клаузиуса

**СРЕДНЯЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ** поступательного движения одной молекулы идеального газа равна

$$\langle w_k \rangle = \bar{w}_k = \frac{W_k}{N} = \frac{m_0 \bar{v}_{KB}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad \begin{array}{l} k \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} - \\ \text{Постоянная Больцмана} \end{array}$$

**Термодинамическая температура** является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа

$$pV = \frac{2}{3} W_k \quad \text{Подставляем} \quad W_k = \langle w_k \rangle N \quad \longrightarrow \quad pV = \frac{2}{3} \langle w_k \rangle N$$

$$\text{Делим почленно на } V, \text{ и учитывая, что: } n = \frac{N}{V} \quad \langle w_k \rangle = \frac{3}{2} kT \quad \longrightarrow \quad p = nkT$$

При одинаковых условиях (при одинаковых давлениях и температуре) различные идеальные газы содержат в равных объемах одно и то же количество молекул

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

**закон Авогадро**

# УРАВНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВА – КЛАПЕЙРОНА

## уравнение состояния идеального газа

---

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \text{ или } pV = \nu RT$$

$m$  – масса газа,  $\mu$  – молярная масса газа (масса одного моля),

$m/\mu = \nu$  – количество вещества (молей)

Согласно **закону Авогадро**: 1 моль любого вещества содержит одно и то же число молекул (число Авогадро)  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  и 1 моль идеального газа занимает при нормальных условиях объем  $V = 22,4 \text{ дм}^3 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

$R$  – универсальная газовая постоянная **8.31 Дж/моль К**

$$R = kN_A$$

$$N = \nu N_A$$



Роберт Бойль  
1627-1691  
английский  
химик,  
физик и теолог

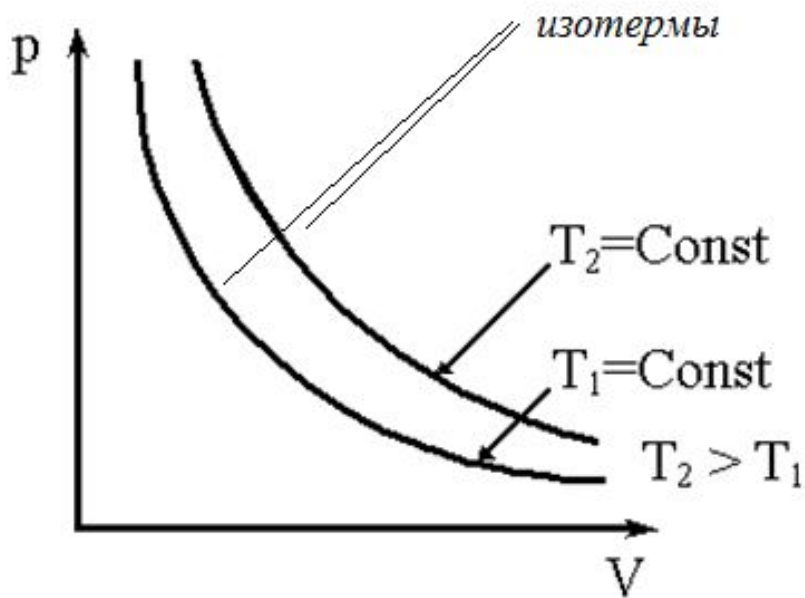
Эдм Мариотт  
1620-1684  
французский  
физик



## Закон Бойля-Мариотта

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

**При постоянной массе газа и неизменной температуре произведение давления  $p$  на объем  $V$  газа постоянно**



**при  $T = \text{Const}$ ,  $m = \text{Const}$**   
 **$pV = \text{Const}$**  - уравнение изотерм

**Термодинамический процесс, протекающий при постоянной температуре, называется**  
**изотермическим процессом**

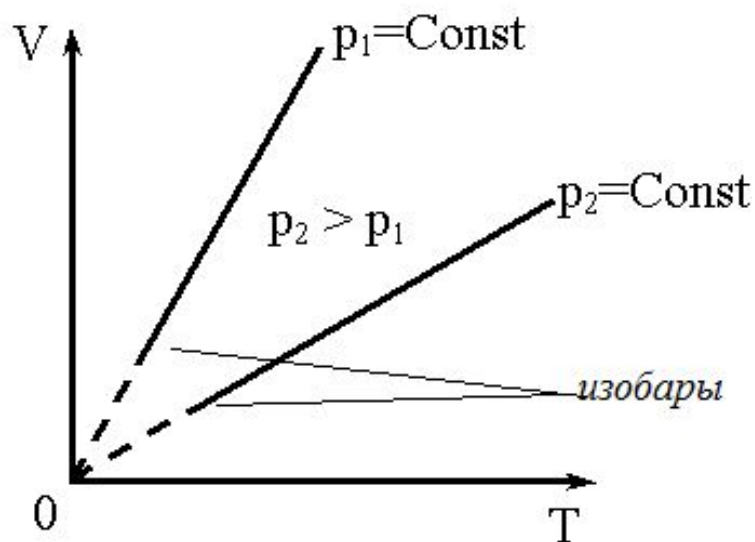




Жозеф Луи Гей-Люссак  
1778-1850  
французский химик и  
физик

## Закон Гей-Люссака

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



**При постоянном давлении газа и неизменной массе отношение объема газа  $V$  к его температуре  $T$  остается величиной постоянной**

**при  $P=Const$ ,  $m=Const$**

$$\frac{V}{T} = Const \text{ уравнение изобар}$$

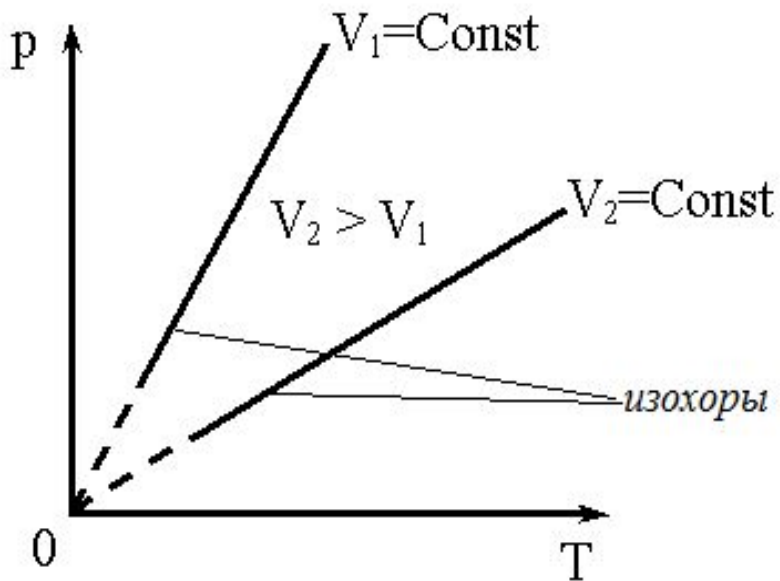
**Процесс, протекающий при постоянном давлении ( $p=Const$ ), называется **изобарным****



Жан Александр Шарль  
1746-1823  
французский физик и  
изобретатель

## Закон Шарля

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

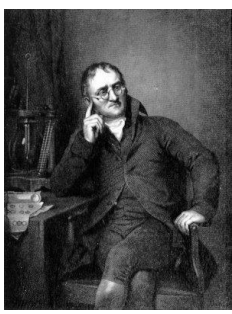


**При постоянных объемах и  
массе газа отношение давления  
газа к его температуре  
постоянно**

$$V = \text{Const}, m = \text{Const}$$

$$\frac{p}{T} = \text{Const} \text{ уравнение изохор}$$

**Процесс, протекающий при  
 $V = \text{Const}$ , называется  
**ИЗОХОРНЫМ****



Джон Дальтон  
1766-1844  
английский физик

**Закон Дальтона:** давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений  $p_1, p_2, \dots, p_n$  входящих в нее газов

**Парциальное давление** — давление, которое производил бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре

**Уравнение Менделеева-Клапейрона**  
для смеси газов

$$pV = \left( \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n} \right) RT$$

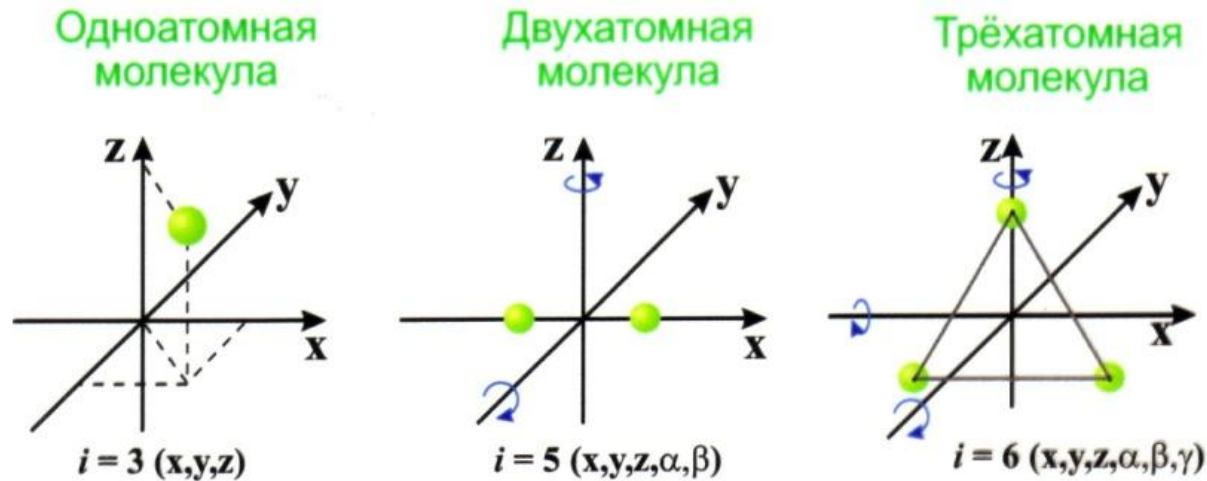
**Барометрическая формула** дает закон убывания давления с высотой  $h$  в поле силы тяжести Земли

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}}$$

**Распределение Больцмана** во внешнем потенциальной поле дает значение концентрации молекул на высоте

$$n = n_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}}$$

**Число степеней свободы** тела (в том числе и молекулы) называется наименьшее число координат (число независимых координат), которые нужно задать для того, чтобы полностью определить положение тела в пространстве.



**Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы:** энергия молекулы равномерно распределяется между всеми степенями свободы, на каждую степень свободы молекулы в среднем приходится одинаковая кинетическая энергия, равная

$$\langle w_{k0} \rangle = \frac{kT}{2}$$

Средняя энергия молекулы равна, где  $i$  – число степеней свободы

$$\langle w_k \rangle = i \frac{kT}{2} = i \langle w_{k0} \rangle$$

# Термодинамика

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

---

**Термодинамика** – раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями

**Термодинамической системой** называется совокупность макроскопических тел, которые могут обмениваться энергией между собой и окружающей средой.

Термодинамические системы, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом называются **замкнутыми (изолированными)**.

Параметры состояния не всегда имеют определенные значения (одинаковые во всех точках системы). Состояние, в котором хотя бы один из параметров не имеет определенного значения, называется **неравновесным**.

Состояние термодинамической системы будет **равновесным**, если все параметры состояния имеют определенные значения, не изменяющиеся с течением времени.

Любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее термодинамических параметров, называется **термодинамическим процессом**

**Основа термодинамического метода – определение состояния термодинамической системы – совокупности макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой).**

# Внутренняя энергия

**ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИЕЙ** вещества называется энергия  $U$ , зависящая от термодинамического состояния системы (вещества) (т.е. является функцией состояния термодинамической системы) и включает в себя энергию всех видов внутренних движений в теле (системе).

Для идеального газа учитывается только **кинетическая энергия теплового поступательного и вращательного движения**

$$U = N \langle w_k \rangle = \nu N_A \langle w_k \rangle = \frac{i}{2} k T \nu N_A = i \frac{\nu RT}{2}$$

$$U = i \frac{\nu RT}{2}$$

# Работа в термодинамике.

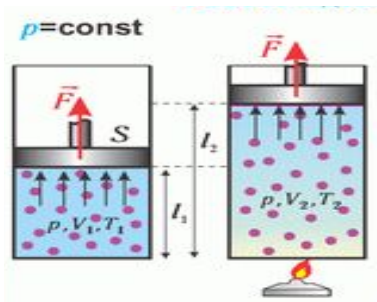
Обмен энергией осуществляется двумя способами:  
путем совершения **РАБОТЫ** и путем **ТЕПЛООБМЕНА**

Энергия, передаваемая при этом термодинамической системе внешними телами, называется **работой**, совершаемой над системой.

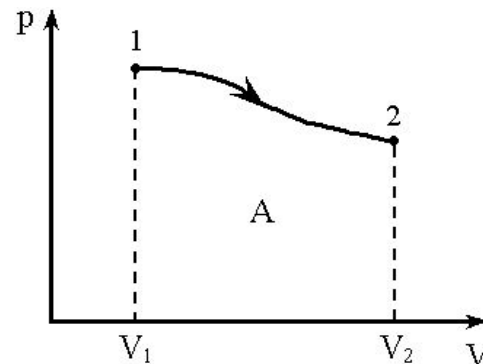
**Работу** над системой производят внешние силы по изменению **объема**

**Если  $p = \text{const}$**

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1)$$



**Если в процессе изменения объема происходит изменение давления**



$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

# Количество теплоты

**Теплообмен** происходит между телами или частями одного и того же тела, нагретыми до различной температуры

Энергия ( $Q$  или  $\Delta Q$ ), передаваемая системе внешними телами путем теплообмена (без совершения работы), называется **ТЕПЛОТОЙ** (**КОЛИЧЕСТВОМ ТЕПЛОТЫ (Дж)**), получаемой системой от внешней среды

**ТЕПЛОЕМКОСТЬЮ** тела (вещества) называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо подвести к телу, чтобы увеличить его температуру на один градус

$$C^* = \frac{\delta Q}{dT} \text{ Дж/К}$$

**УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ** вещества – теплоемкость единицы массы вещества

$$c = \frac{C^*}{m} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT} \text{ Дж/кг[К]}$$

В зависимости от вида процесса изменения состояния вещества различают теплоемкость при **постоянном давлении**  $C_v$  и при **постоянном объеме**  $C_p$



# Первое начало термодинамики

$$Q = \Delta U + A$$

**количество теплоты, сообщенное системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы против внешних сил**

**ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ – это закон сохранения и превращения энергии в термодинамических процессах**

**Для изменения состояния системы, вызванного сообщением ей бесконечно малого количества теплоты  $\delta Q$**

$$\delta Q = dU + \delta A$$

Если к системе **подводится** теплота, то  **$\delta Q > 0$**

Если от системы **отводится** теплота, то  **$\delta Q < 0$**

Если **система совершает работу** над внешними телами, то  **$\delta A > 0$**

Если же **над системой** внешние силы совершают работу, то  **$\delta A < 0$**

# ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

$$\delta Q = dU + \delta A$$

ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИЗОПРОЦЕССАМ В ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗАХ

---

**Для изохорного процесса ( $V = \text{Const}$ )** работа равна нулю, поскольку  $dV=0 \Rightarrow \delta A = pdV=0$

$$\delta Q = dU$$

В изохорном процессе количество теплоты, переданное системе, идет на увеличение ее внутренней энергии, т.е. на **увеличение температуры**

$$dU_{\mu} = \frac{i}{2} R dT \quad \longrightarrow \quad C_V = \frac{i}{2} R$$

**Для изотермического процесса ( $T = \text{Const}$ )**  $dU=0$

$$\delta Q = \delta A = pdV$$

В изотермическом процессе все тепло, получаемое системой, расходуется на **совершение системой работы**.

# ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

$$\delta Q = dU + \delta A$$

ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИЗОПРОЦЕССАМ В ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗАХ

---

*Для изобарного процесса ( $p = \text{const}$ )*

$$\delta Q = dU + p dV$$

$$\delta Q = \frac{m}{\mu} c_{\mu p} dT, \quad \delta A = p dV = \frac{m}{\mu} R dT \quad \longrightarrow \quad R = \frac{\delta A}{\frac{m}{\mu} dT}$$

**Физический смысл  $R$ :** численно равна работе, совершаемой одним молем идеального газа при его изобарном нагревании на один градус

*Уравнение Майера:*  $c_{\mu p} - c_{\mu v} = R$

$$C_p = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R.$$

# ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

$$\delta Q = dU + \delta A$$

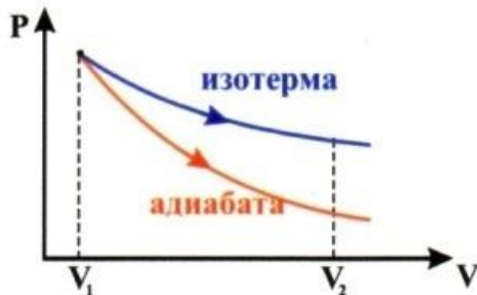
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИЗОПРОЦЕССАМ В ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗАХ

$$\delta Q = \delta A = 0 - dU$$

**АДИАБАТНЫМ** называется, термодинамический процесс, при котором система не обменивается теплом с окружающей средой, т.е.  $\delta Q = 0$ .

Такая система называется теплоизолированной

Работа в адиабатном процессе совершается за счет убыли внутренней энергии системы



$$pV^\gamma = \text{Const}$$

Уравнение адиабаты  
Уравнение Пуассона

$$\gamma = \frac{C_p^*}{C_v^*} = \frac{c_{\mu p}}{c_{\mu v}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i}$$

# II Начало термодинамики.

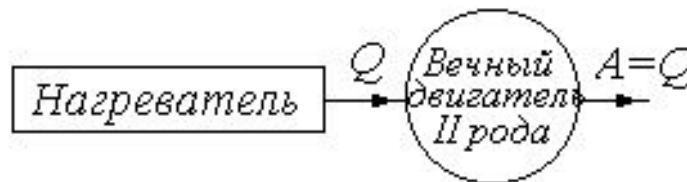
## Цикл Карно

---

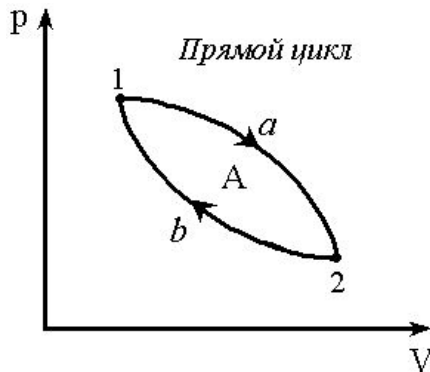
### определения II закона термодинамики

**1. Формулировка Клаузиуса:** теплота самопроизвольно не может переходить от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой

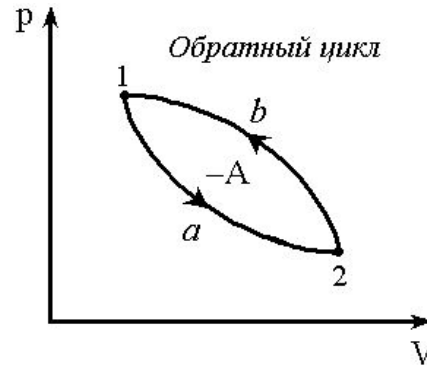
**2. Формулировка Томсона (Кельвина):** невозможен такой периодический процесс единственным результатом которого было бы превращение теплоты в работу вследствие охлаждения тела



# Круговые процессы



$A > 0$ , то цикл называется прямым



$A < 0$ , то цикл называется обратным

**Круговым процессом** (или циклом) называется процесс, при котором система, пройдя через ряд промежуточных состояний, возвращается в исходное

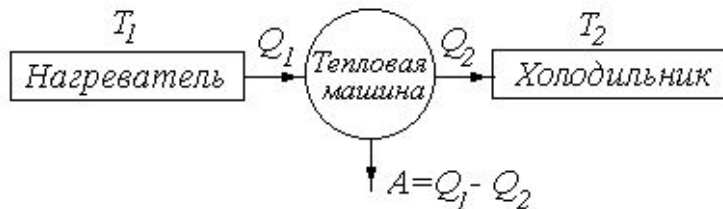
**РАБОТА**, равно как и **ТЕПЛОТА** — является функцией **процесса**, который происходит с системой

Термодинамический процесс называется **ОБРАТИМЫМ**, если после его завершения в окружающей среде не произошло никаких изменений — физическая абстракция!

**Все реальные процессы являются необратимыми!**

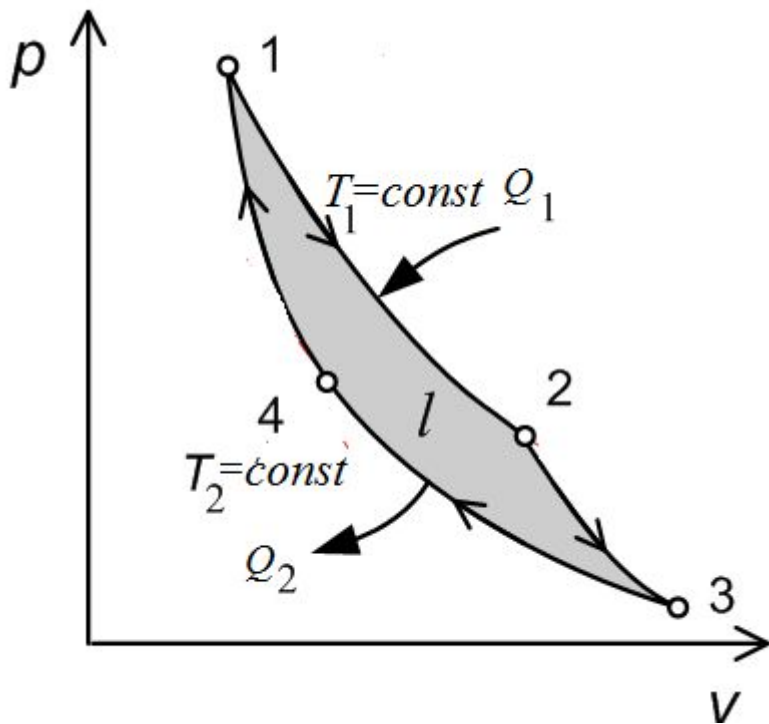
# Цикл Карно -

пример обратимого кругового процесса, описывающий работу идеального теплового двигателя



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

Цикл Сади Карно состоит из двух обратимых **изотермических** и двух обратимых **адиабатных** процессов



**На участке 1-2** идеальный газ совершает работу по **изотермическому расширению** за счет теплоты  $Q_1$ , полученной от нагревателя. Внутренняя энергия газа не изменяется, так как  $T_1 = \text{const}$

**На участке 2-3** - **адиабатически расширяется**: газ совершает работу за счет изменения внутренней энергии ( $T_2 < T_1$ )

**На участке 3-4** **изотермически сжимается** при температуре  $T_2$  ( $T_2 = \text{const}$ ) выделяющаяся теплота  $Q_2$  полностью передается холодильнику, внутренняя энергия не меняется.

**На участке 4-1** при **адиабатном сжатии** работа идет на повышение внутренней энергии газа, теплоты идеальный газ не получает

# Теорема Карно

---

## **3. Формулировка Карно (II закона термодинамики):**

**Теорема Карно: КПД обратимых машин, работающих при одинаковых температурах нагревателей и холодильников, равны друг другу и не зависят от природы рабочего тела, а определяются только температурами нагревателя и холодильника**

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

**к.п.д. тепловой машины всегда меньше 1!**

для повышения к.п.д. тепловой машины нужно **увеличивать** температуру нагревателя и **уменьшать** температуру холодильника



**4. Формулировка ВТОРОГО НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ на основе понятия энтропии: ЭНТРОПИЯ замкнутой (теплоизолированной) системы не может убывать при любых происходящих в ней процессах**

---

$$\Delta S \geq 0$$

**ЗАКОН ВОЗРАСТАНИЯ  
ЭНТРОПИИ**

**неравенство Клаузиуса**

$$\frac{\delta Q}{T} = dS$$

**Энтропией  $S$  называется функция состояния системы и характеризует направление протекания процессов в термодинамической системе**

*Если система замкнутая (теплоизолированная), то изменение энтропии для*

- *обратимого кругового процесса равно нулю  $\Delta S=0$* 
  - *необратимого -  $\Delta S>0$*