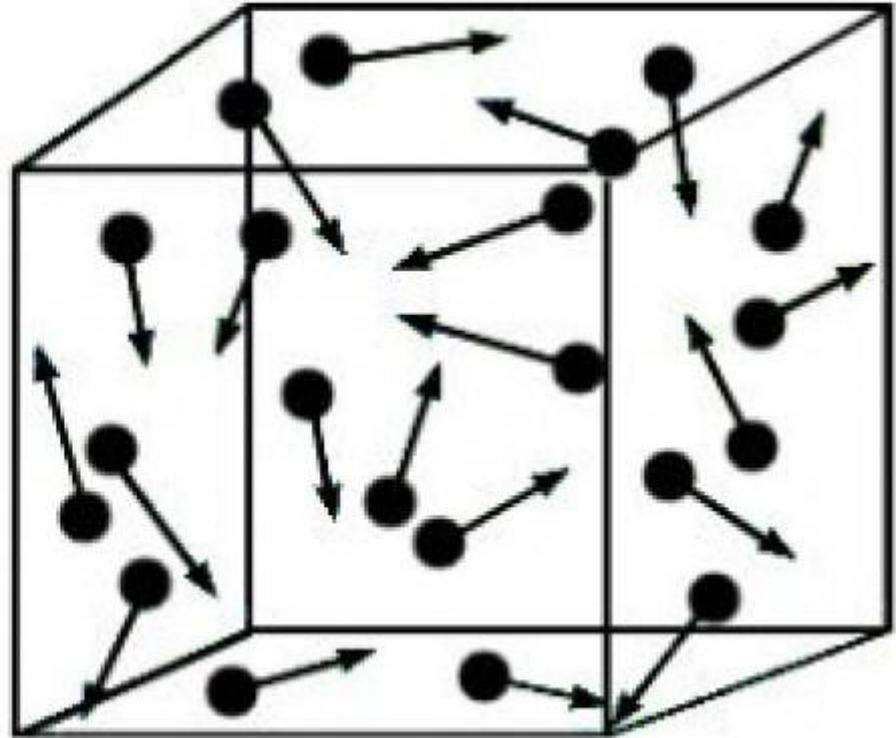
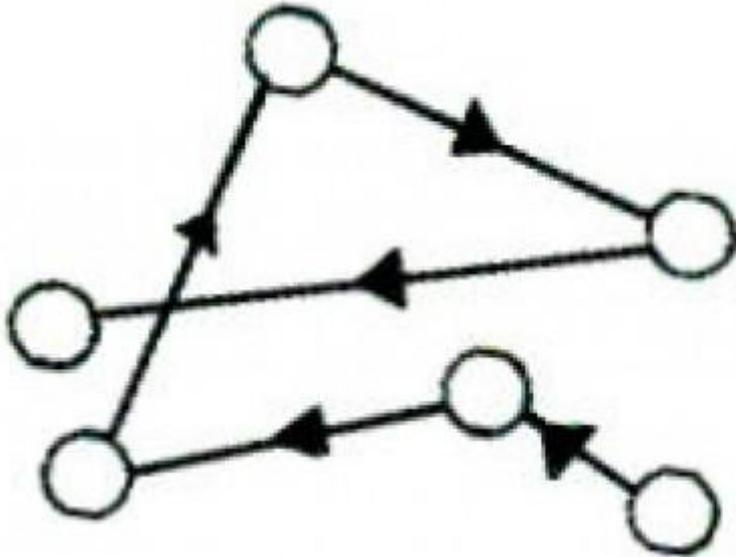


# Обратимые процессы. Энтропия. Цикл Карно.

Лекция-презентация разработана  
Мамаевой Ириной Алексеевной,  
Кострома.

## Термодинамическая система (ТС)



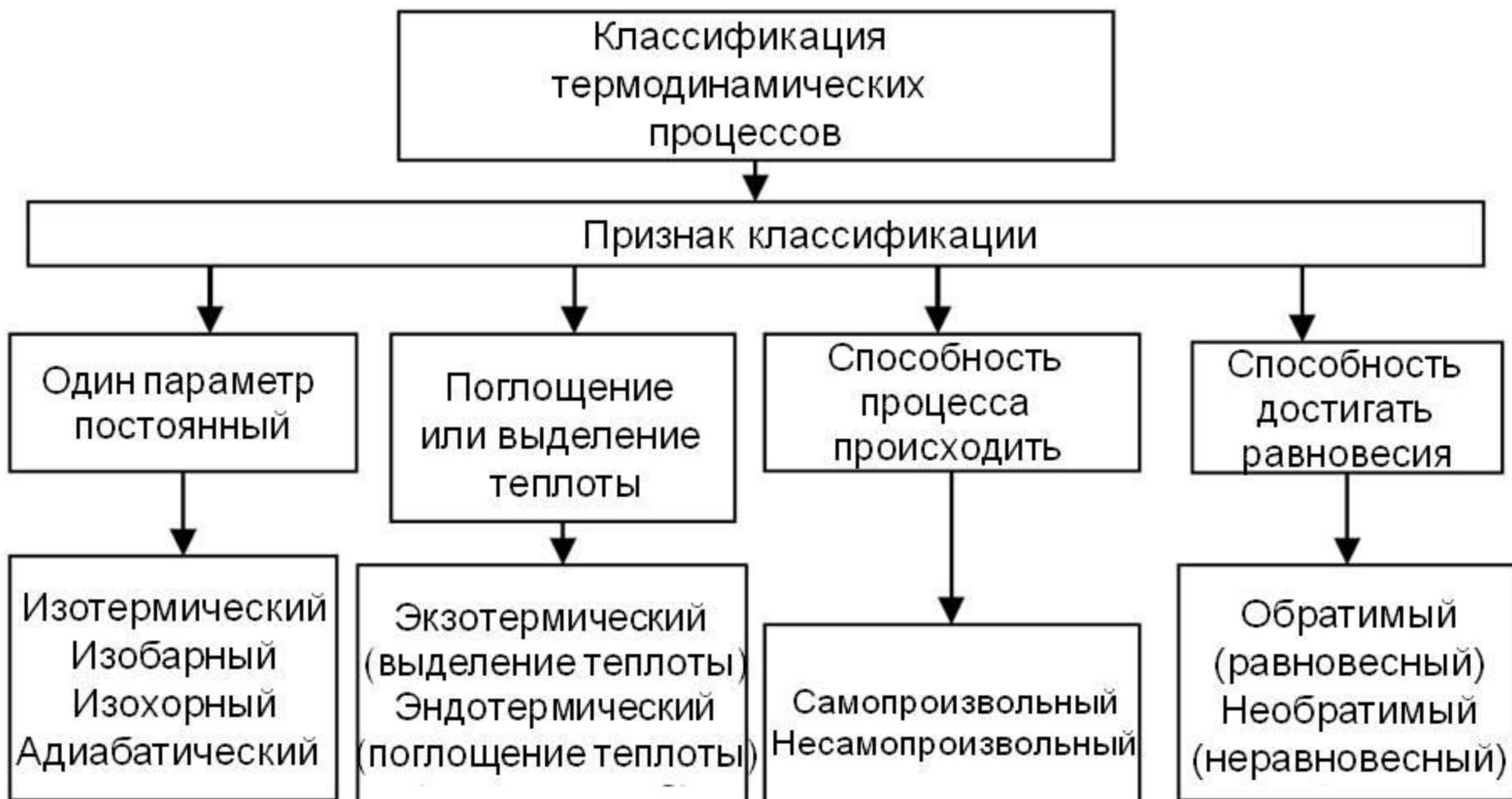
- объект, который состоит из большого числа частиц, находящихся в постоянном хаотичном движении, изменяющие свое состояние случайным образом.

**Цель лекции - познакомиться с обратимыми термодинамическими процессами, энтропией, вторым законом термодинамики, Циклом Карно**

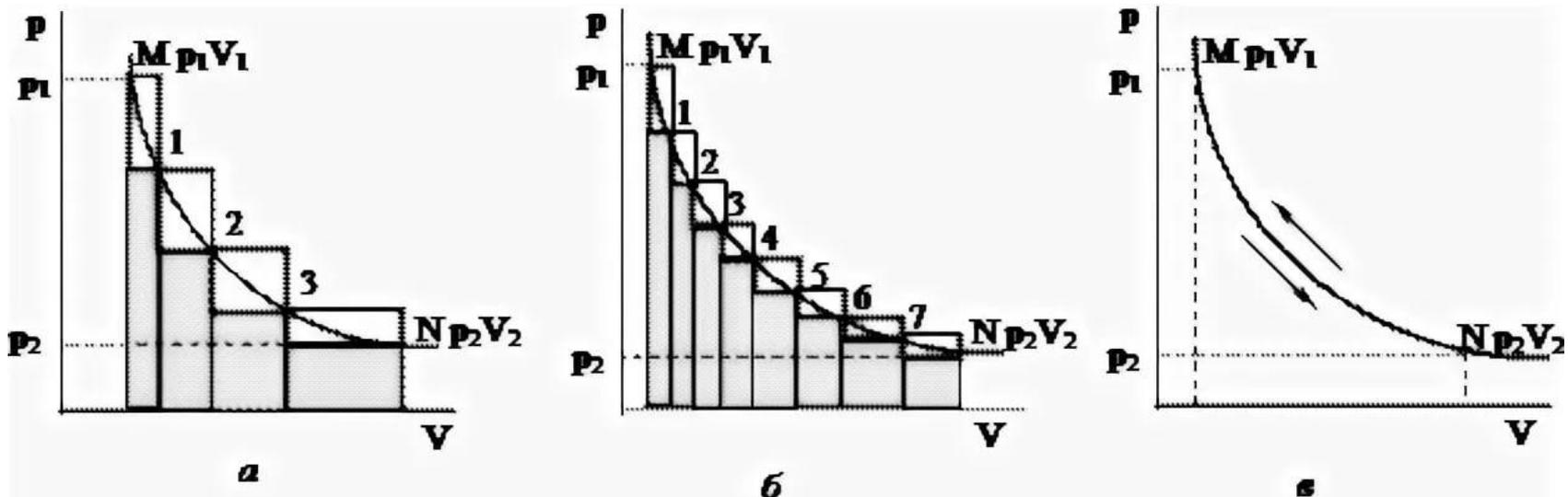
# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

- Всякое изменение термодинамического состояния системы, происходящее вследствие внешних воздействий или внутренних самопроизвольных процессов.
- Совокупность состояний термодинамической системы, через которые она проходит под действием внешних воздействий или в следствие внутренних самопроизвольных процессов.

# Термодинамические процессы



# РАВНОВЕСНЫЙ ПРОЦЕСС



- термодинамический процесс, в котором система проходит непрерывный ряд близких равновесных термодинамических состояний.

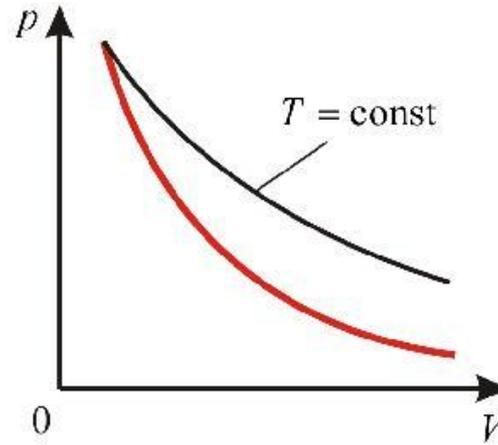
# ИЗОПРОЦЕССЫ

- это термодинамический равновесный процесс, который происходит при постоянстве одного параметра.

| Название процесса | Постоянный параметр | Формула газового закона                                                      | Название газового закона | Графическое представление газового закона |
|-------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| Изотермический    | Т<br>температура    | $p \cdot V = \text{const}$<br>$p_1 \cdot V_1 =$<br>$= p_2 \cdot V_2 = \dots$ | Бойля –<br>Мариотта      |                                           |
| Изобарный         | p<br>давление       | $\frac{V}{T} = \text{const}$<br>$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots$  | Гей-<br>Люссака          |                                           |
| Изохорный         | V<br>объём          | $\frac{p}{T} = \text{const}$<br>$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \dots$  | Шарля                    |                                           |

# ИЗОПРОЦЕССЫ

- График адиабатического процесса ( $p \sim V^\gamma$ ) подобен графику изотермического процесса ( $p \sim V$ ), однако адиабата идет несколько круче, так как показатель адиабаты  $\gamma > 1$ .
- Уравнение адиабаты используется для процессов, протекающих очень быстро. Например, быстроходные двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели.



► **Адиабатный процесс** – процесс, происходящий в физической системе без теплообмена с окружающей средой ( $Q = 0$ ).

$PV^\gamma = \text{const}$  уравнение Пуассона.

$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}$   $\gamma$  – показатель адиабаты.

$$A = -\Delta U$$

# ОБРАТИМЫЙ ПРОЦЕСС

- процесс, который может быть осуществлен в обратном направлении через те последовательные промежуточные состояния, которые были пройдены в прямом процессе, при осуществлении прямого и обратного процесса термодинамическая система возвращается в исходное состояние, не вызывая изменений в окружающей среде.

- равновесный термодинамический процесс, который может проходить как в прямом, так и в обратном направлении.

*Обратимым процессом может быть только равновесный процесс.*

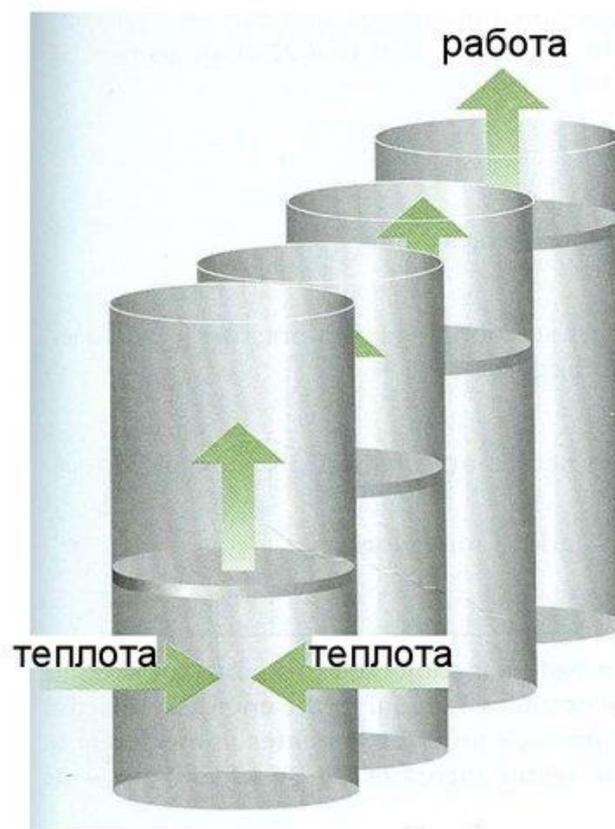
# Обратимые процессы

Если после протекания процесса систему и окружающую среду можно вернуть в прежнее состояние то процессы называются **обратимыми**.

**Пример:** расширение газа в сосуде *без трения*.

В условиях трения для перехода в прежнее состояние необходимо затратить работу, которая приведет к изменению энергии окружающей среду и процесс будет **необратимым**.

Работа, совершаемая при обратимом процессе – **максимальная**.

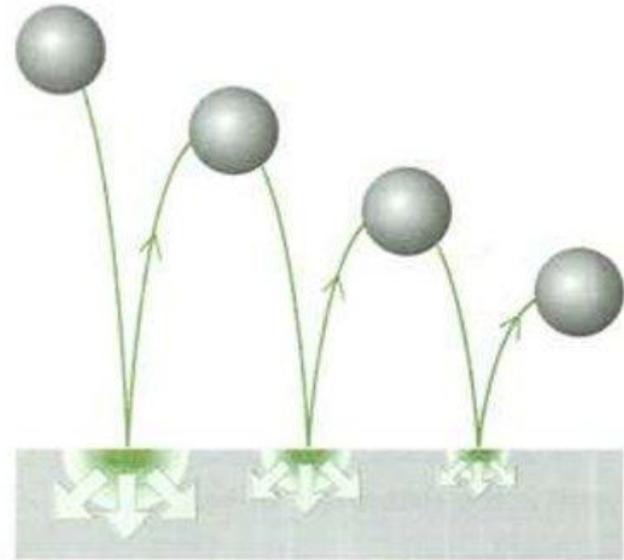


# Необратимые процессы

Если после протекания процесса системы и окружающей среды нельзя вернуть в прежнее состояние без изменений, то такие процессы называются **необратимыми**.

Во всех необратимых процессах происходит превращение работы в теплоту.

Во всех необратимых процессах происходит выравнивание термодинамических параметров ( $T$ ,  $P$ ). Система переходит в состояние **равновесия**.

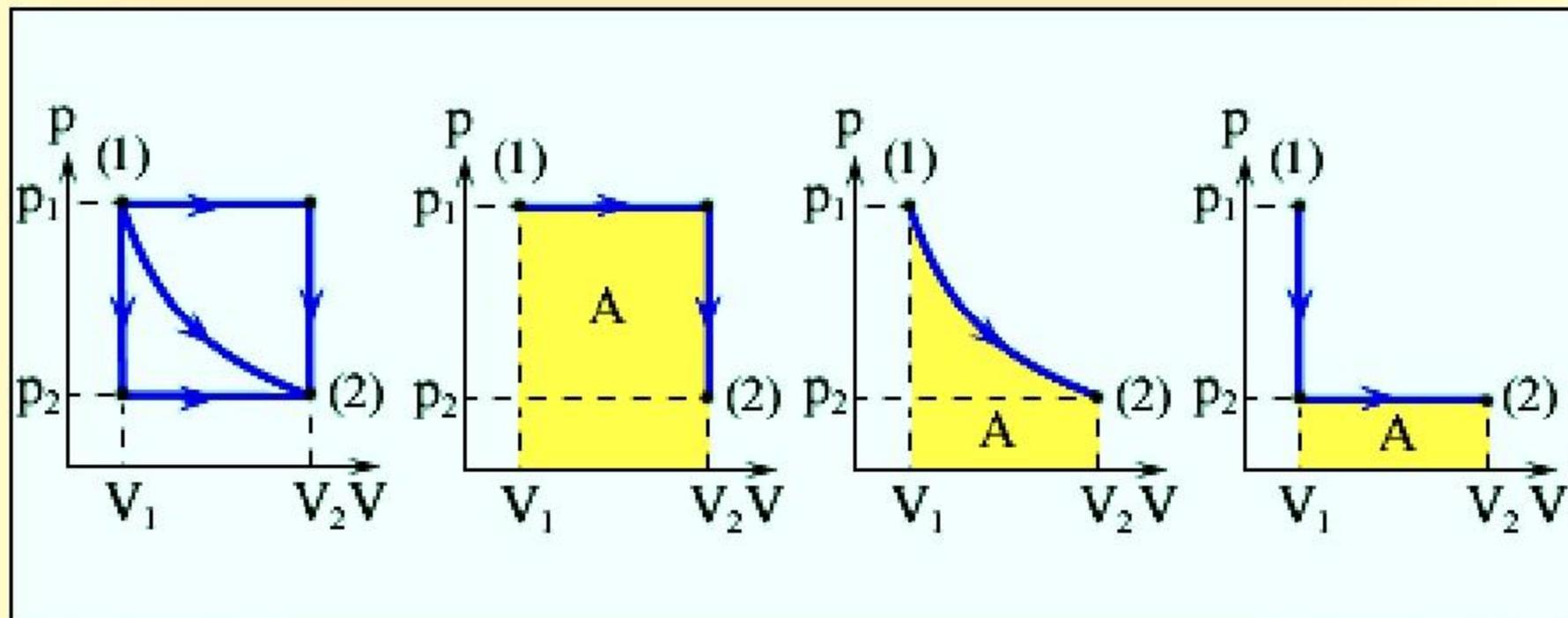


**Пример:** рассеяние энергии в окружающую среду в виде теплового движения (хаотичное рассеяние энергии)

**Еще примеры?**

# Работа газа

Три различных пути перехода из состояния (1) в состояние (2). Во всех трех случаях газ совершает разную работу, равную площади под графиком процесса.



Процессы, изображенные на рисунке, можно провести и в обратном направлении; тогда работа  $A$  просто изменит знак на противоположный. Процессы такого рода, которые можно проводить в обоих направлениях, называются **обратимыми**

# Первое начало термодинамики

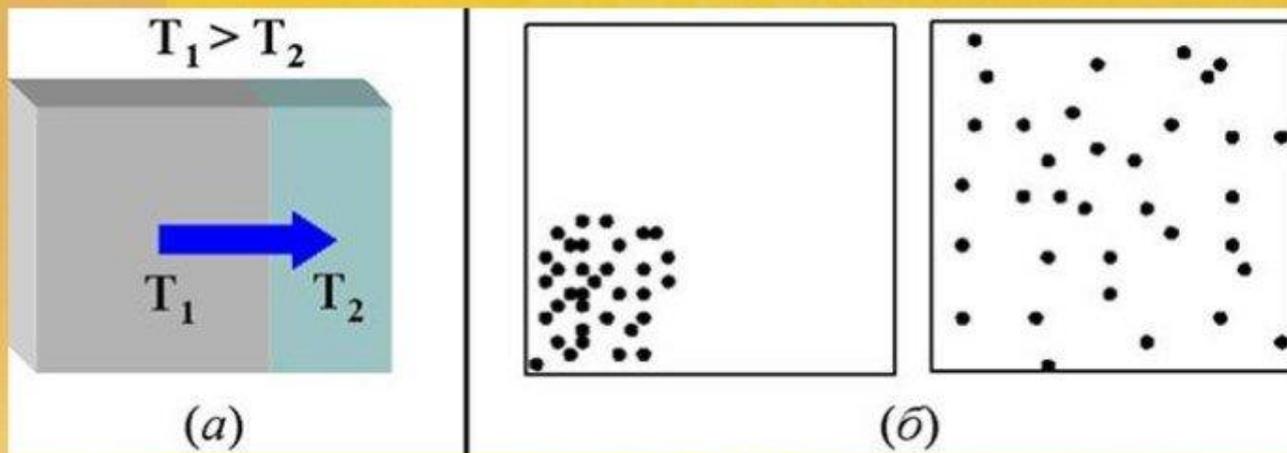
—это закон сохранения энергии, учитывающий обмен энергией между системой и окружающей средой по разным каналам:

**Количество теплоты, сообщенное системе, идет на приращение внутренней энергии и совершение системой работы над внешними телами.**

$$Q = \Delta U + A$$

*Первое начало термодинамики не может отразить изменения внутри ТС, если в ней происходит переход от неравновесного состояния к равновесному, полная энергия сохраняется при этих процессах.*

# Реальные тепловые процессы необратимы.



*Первое начало термодинамики не может отразить изменения внутри ТС, если в ней происходит переход от неравновесного состояния к равновесному - процессы идут, а полная энергия сохраняется (не видно изменений).*

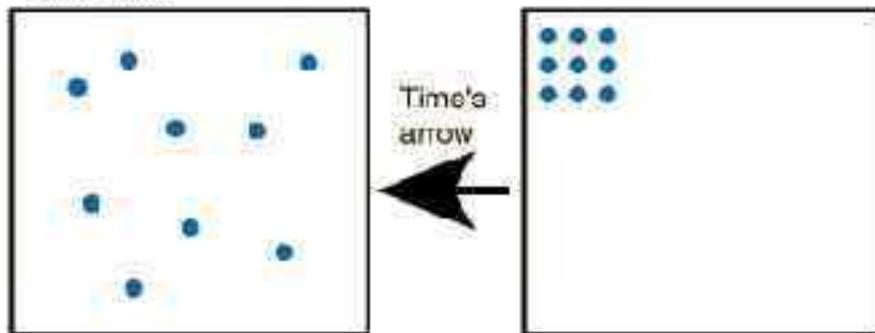
*Объяснить, исследовать переход от неравновесного состояния к равновесному в термодинамической систем можно, если использовать понятие энтропии и второе начало термодинамики.*

*С этого момента понятие энтропии будет основным наряду с понятиями температуры, давления, объема, внутренней энергии.*

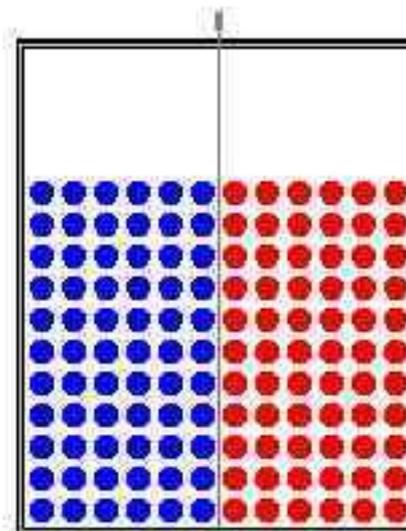
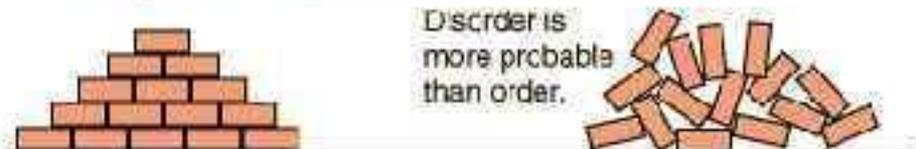
# Статистический смысл энтропии (Людвиг Больцман, 1872 г.)

**Энтропия** – это такая функция состояния термодинамической системы, которая определяет степень ее неупорядоченности.

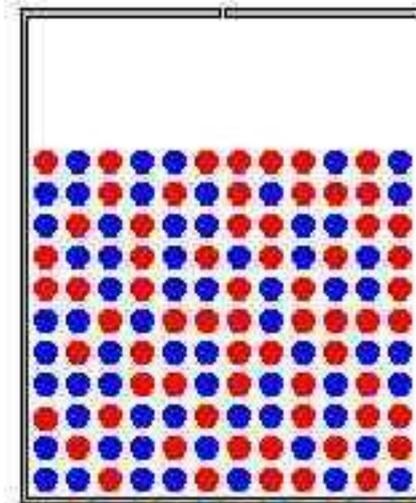
If the particles represent gas molecules at normal temperatures inside a closed container, which of the illustrated configurations came first?



If you tossed bricks off a truck, which kind of pile of bricks would you more likely produce?



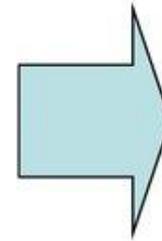
box with colored balls & removable partition



partition is removed & box shaken

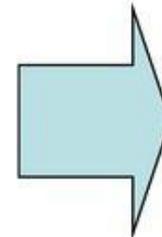
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ В ТЕРМОДИНАМИКЕ

Термодинамическое определение энтропии:



$$dS = \frac{\delta Q_{\text{обр}}}{T}$$

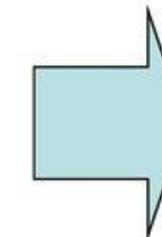
Энтропия каждого состояния системы относительно какого-либо выбранного состояния определяется:



$$\Delta S = \frac{Q_{\text{обр}}}{T}$$

**Энтропия – функция состояния.**

Поэтому можно рассчитать изменение энтропии между начальным и конечным состоянием системы.



$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q_{\text{обр}}}{T}$$

# §§ Энтропия идеального газа

I-е начало в дифференциальной форме

$$\delta Q = dU + pdV = \nu C_V dT + pdV$$

↑ функция состояния  
↑ полный дифференциал  
↑ бесконечно малое приращение  
( $Q$  – не функция состояния, как и  $A$ )

Разделим на  $T$  левую и правую части:

$$\frac{\delta Q}{T} = \nu C_V \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dV$$

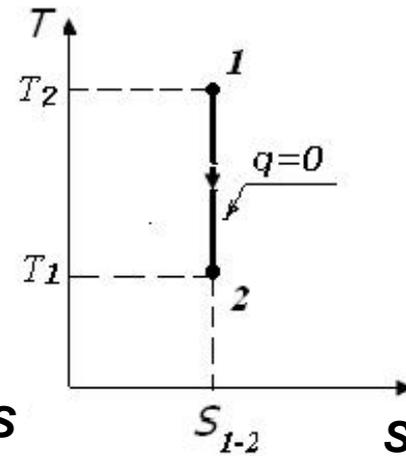
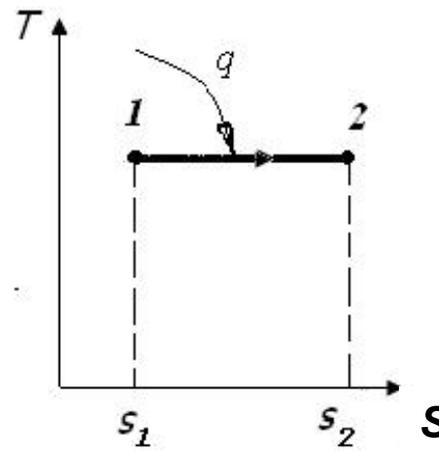
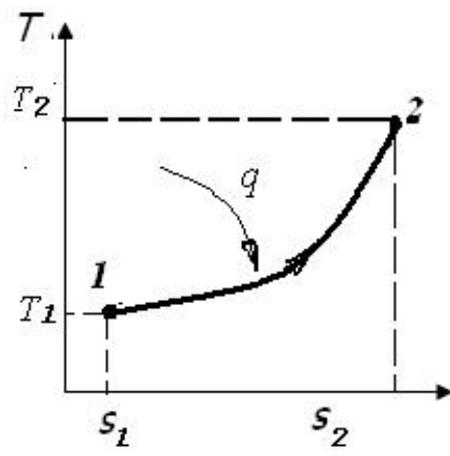
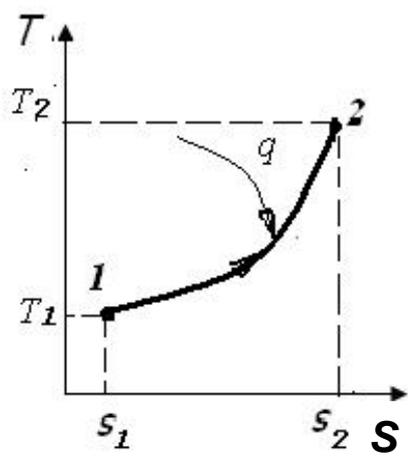
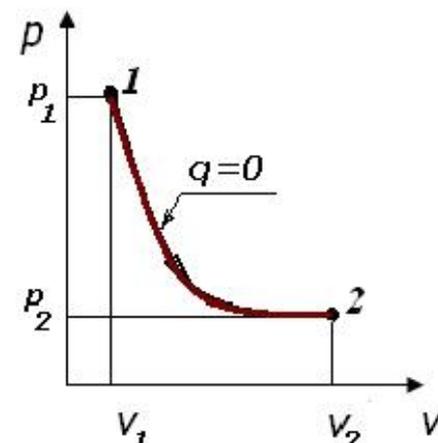
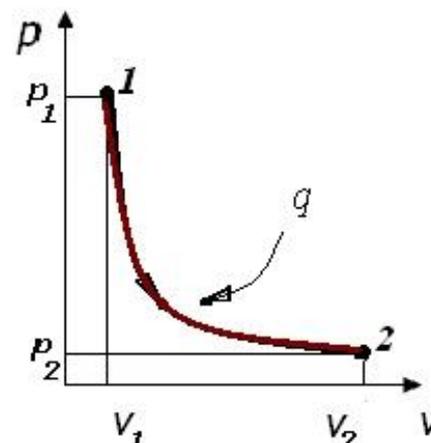
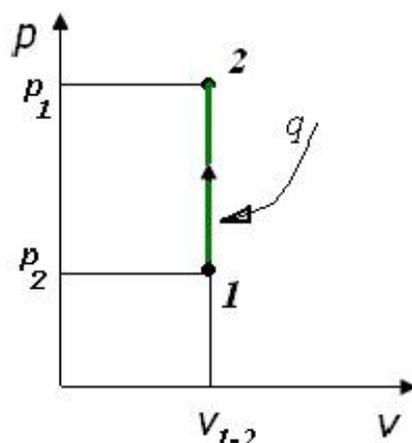
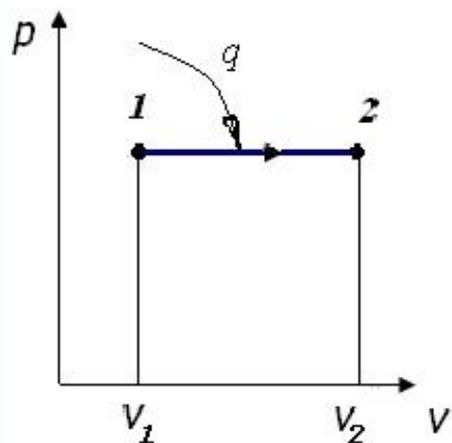
# РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ИЗОПРОЦЕССОВ

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Изменение энтропии  $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$  идеального газа при переходе его из состояния 1 в состояние 2 не зависит от пути перехода  $1 \rightarrow 2$ .

|                                  |                                                                                                                           |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>изохорического процесса:</i>  | $\Delta S = \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad V_1 = V_2$                                                       |
| <i>изобарического процесса:</i>  | $\Delta S = \frac{m}{\mu} \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT_2}{T_1} = \frac{m}{\mu} C_p \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad p_1 = p_2$ |
| <i>изотермического процесса:</i> | $\Delta S = mR \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad T_1 = T_2$                                                                      |
| <i>адиабатного процесса:</i>     | $dQ = 0, \quad \Delta S = 0,$                                                                                             |

# PV-ДИАГРАММЫ И TS-ДИАГРАММЫ ИЗОПРОЦЕССОВ



# Термодинамические процессы

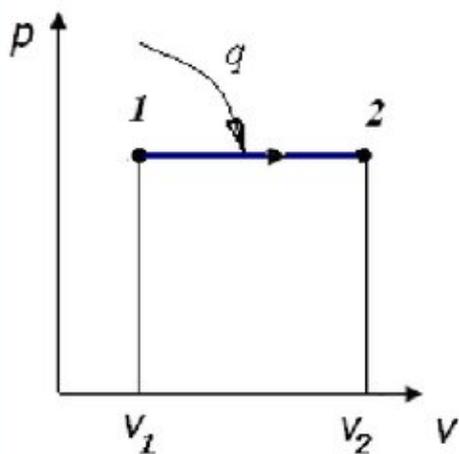
| Процесс        | PV-ДИАГРАММА                                                                                                                            | ГАЗОВЫЙ ЗАКОН                                               | I закон термодинамики                                                                                                                                           | Энтропия                                                            |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Изохорный      |                                                                                                                                         | $P_2/P_1 = T_2/T_1$                                         | $A = 0;$<br>$q = \Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1)$                                                                                                              | $\Delta s = c_v \cdot \ln(T_2/T_1)$                                 |
| Изобарный      |                                                                                                                                         | $v_2/v_1 = T_2/T_1$                                         | $A = P \cdot (v_2 - v_1);$<br>$q = \Delta u + l = c_p \cdot (t_2 - t_1)$                                                                                        | $\Delta s = c_p \cdot \ln(T_2/T_1)$                                 |
| Изотермический |                                                                                                                                         | $P_1 / P_2 = v_2 / v_1$                                     | $\Delta u = 0;$<br>$q = A = R \cdot T \cdot \ln(v_2/v_1)$                                                                                                       |                                                                     |
| Адиабатный     |                                                                                                                                         | $P \cdot v^k = \text{const};$<br>$k = c_p/c_v$              | $A = -\Delta u = -c_v \cdot (t_2 - t_1) =$<br>$= R \cdot (T_1 - T_2)/(k - 1) =$<br>$= R \cdot T_1 \cdot [1 - (v_1/v_2)^{k-1}]/(k - 1)$                          | $\Delta s = 0$                                                      |
| Политропный    | $n = \pm \infty, v = \text{const},$<br>$n = 0, P = \text{const},$<br>$n = 1, T = \text{const},$<br>$n = k, P \cdot v^k = \text{const}.$ | $P \cdot v^n = \text{const},$<br>$n$ – показатель политропы | $A = R \cdot (T_1 - T_2)/(n - 1) =$<br>$= R \cdot T_1 \cdot [1 - (v_1/v_2)^{n-1}]/(n - 1)$<br>$q = c_n \cdot (T_2 - T_1),$<br>$c_n = c_v \cdot (n - k)/(n - 1)$ | $\Delta s = c_v \cdot \ln(T_2/T_1) +$<br>$+ c_p \cdot \ln(v_2/v_1)$ |

# ПОЛИТРОПНЫЕ ПРОЦЕССЫ

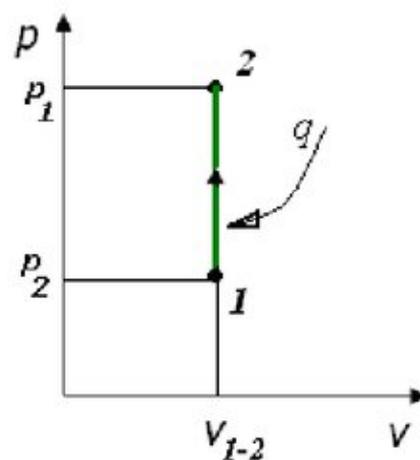
- Политропными называют термодинамические процессы, удовлетворяющие уравнению
- $$pv^n = \text{const}$$
- при произвольном, постоянном для данного политропного процесса значении  $n$ .
- **Величину  $n$  называют показателем политропы.**  
Показатель политропы  $n$  для различных политропных процессов может принимать любые значения от  $+\infty$  до  $-\infty$ .
- Кривую политропного процесса в диаграмме состояния называют **политропой.**

# ИЗОПРОЦЕССЫ – ПОЛИТРОПНЫЕ ПРОЦЕССЫ

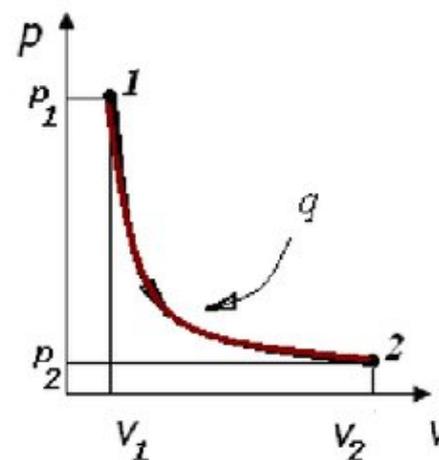
изобарный



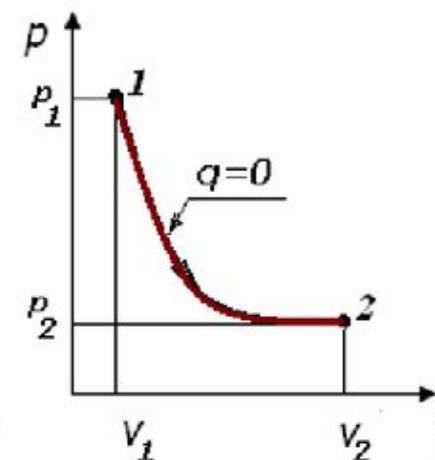
изохорный



изотермический



адиабатический



Политропный процесс

$$pV^n = const$$

$n=0$

$n=\pm\infty$

$n=1$

$n=k$   
 $1 < k < 2$

## Изменение энтропии в необратимых и обратимых процессах

Энтропия является критерием **возможности и направленности** протекания процессов.

Энтропия является критерием состояния термодинамического **равновесия**.

В **обратимом** (равновесном) процессе:

$$\Delta S = 0$$

Энтропия в **изолированной** системе, при протекании **самопроизвольного** процесса всегда возрастает.

**Необратимый** процесс является самопроизвольным и поэтому приводит к **увеличению энтропии**.

$$\Delta S > 0$$

## Второе начало термодинамики

**Формулировка II-го начала  
(принцип возрастания энтропии):**

Энтропия закрытой системы не может убывать (запрет на убывание энтропии в закрытой системе).

В обратимых процессах она (энтропия) остается постоянной, в необратимых – растет.

$S_1$  – начальное значение энтропии при протекании какого-либо процесса в системе;

$S_2$  – конечное.

$$\Delta S = S_2 - S_1 - \text{изменение энтропии}$$

$\Delta S \geq 0$  (в закрытой системе изменение энтропии не может быть меньше 0).

## Второе начало термодинамики

Из II-го начала термодинамики следует принцип возрастания энтропии, который заключается в следующем:

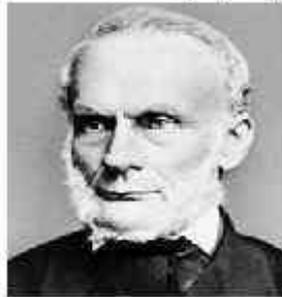
*В природе практически нет строго обратимых процессов, только с некоторым приближением отдельные из них можно отнести к обратимым.*

*Поэтому в закрытой системе энтропия может только возрастать.*

!! Во втором начале термодинамики отражено существование одного направления передачи энергии в природе (от горячего тела к холодному, например)

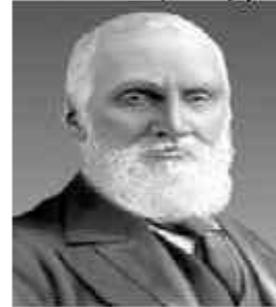
## Второе начало термодинамики

Р. Клаузиус и У. Томсон предложили различные по виду, но эквивалентные формулировки второго закона термодинамики



(1822 – 1888)

$$\Delta S \geq 0$$



(1824 – 1907)

- Клаузиус: невозможен процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от холодного тела к нагретому.
- Томсон: невозможен процесс, единственным результатом которого является совершение работы за счет охлаждения одного тела.

*Рассмотрим о чем говорит второе начало термодинамики, используя энтропию, и вернемся к формулировке Томсона*

**Энтропия – мера вероятности.**

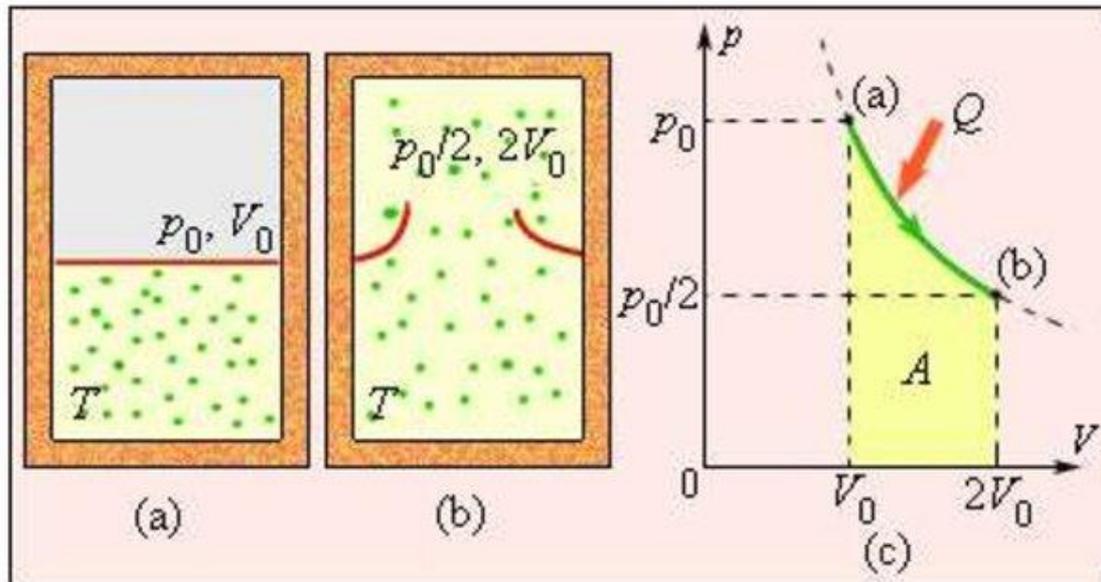
**Статистическое определение энтропии.**

- Статистическое определение энтропии:  
 $S = k \ln w$ , где  $w$  - вероятность данного состояния
- $w \sim G$  – статистический вес (или термодинамическая вероятность) = число способов, реализующих данное макросостояние.
- **Закон возрастания энтропии – соответствует переходу системы в более вероятное состояние. Максимально вероятным является состояние равновесия.**
- Переход в равновесное состояние – это переход в состояние с наибольшим статистическим весом.

# Второй закон термодинамики

Л. Больцман 1844 - 1906

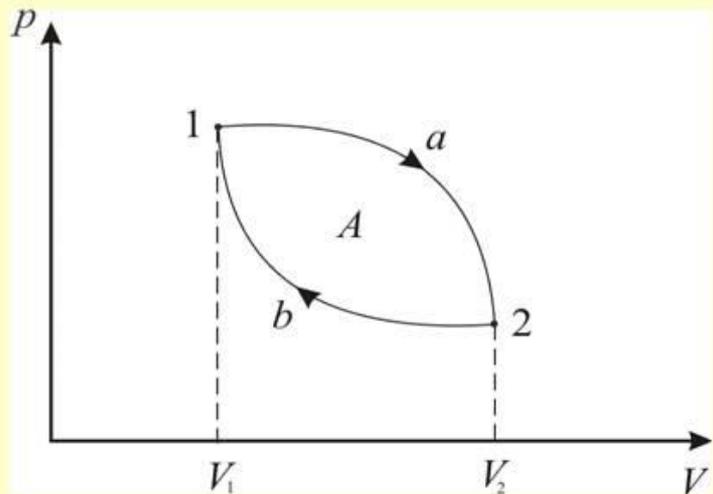
Самопроизвольно изолированная система может переходить только из менее вероятного состояния в более вероятное.



Вернемся к формулировке Томсона – рассмотрим круговой процесс и пример кругового процесса (цикл Карно)

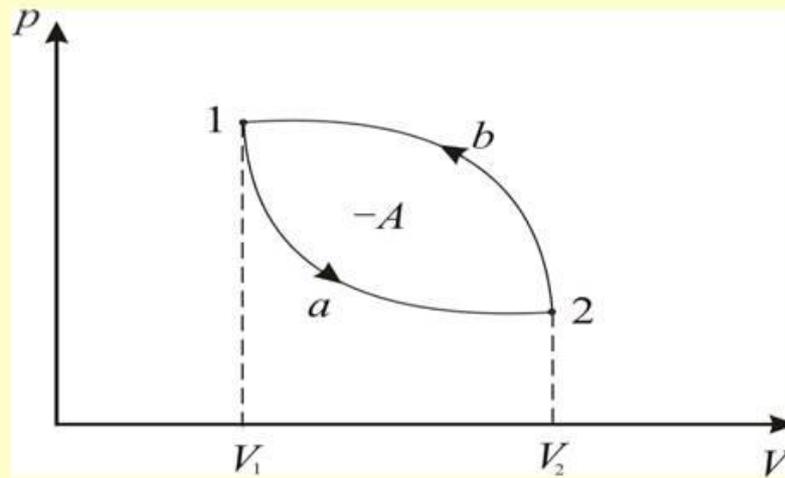
## Круговые (замкнутые) процессы

Совокупность термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние, называется круговым процессом (циклом).



Прямой цикл – работа за цикл

$$A = \oint p dV > 0$$



Обратный цикл – работа за цикл

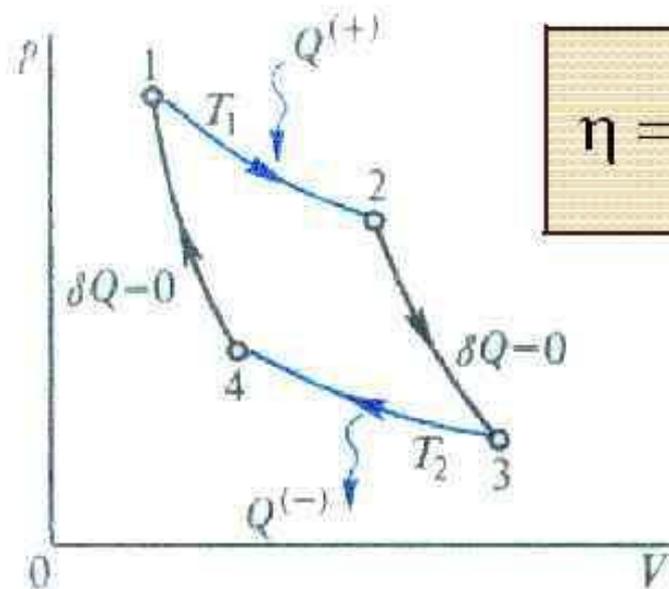
$$A = \oint p dV < 0$$

Вернемся к формулировке Томсона – рассмотрим цикл Карно (пример кругового процесса)

## Цикл Карно

1824 г. – цикл Карно – наиболее эффективный круговой процесс из всех возможных при заданных температурах нагревателя и холодильника.

*Состоит из двух изотерм и двух адиабат.*



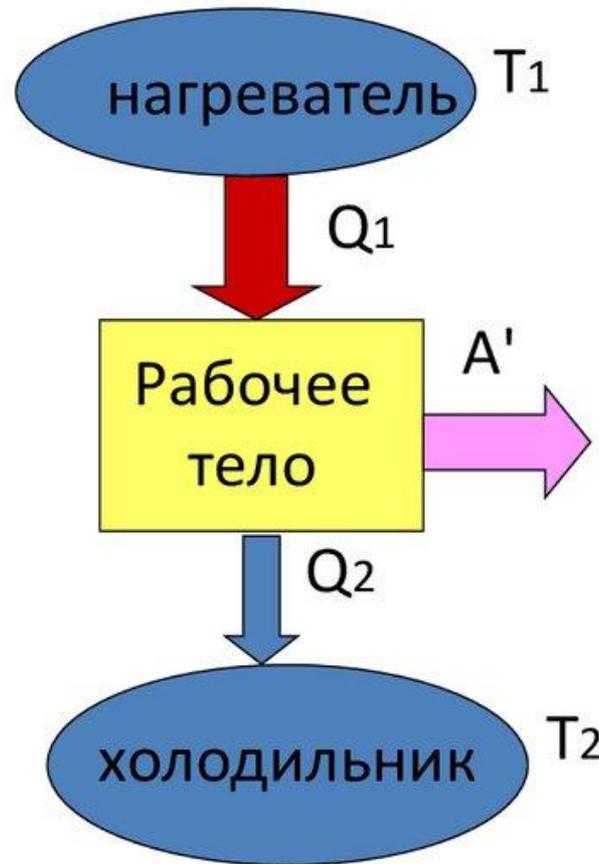
$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

# Принцип действия теплового двигателя

Рабочее тело от нагревателя получает количество теплоты  $Q_1$ .

Часть этой энергии расходуется на совершение работы  $A'$ .

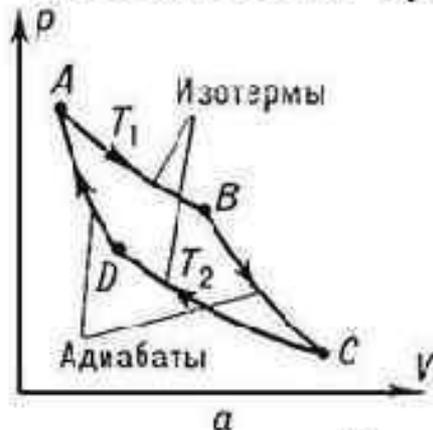
Часть тепла ( $Q_2$ ) передаётся холодильнику.



*!! Работа равна разности двух количеств теплоты  $A=Q_1-Q_2$  (всегда надо часть энергии отдать, чтобы получить полезную работу)*

# Цикл Карно.

Единственным обратимым циклом для машины, состоящей только из рабочего тела, нагревателя и холодильника, является цикл Карно.

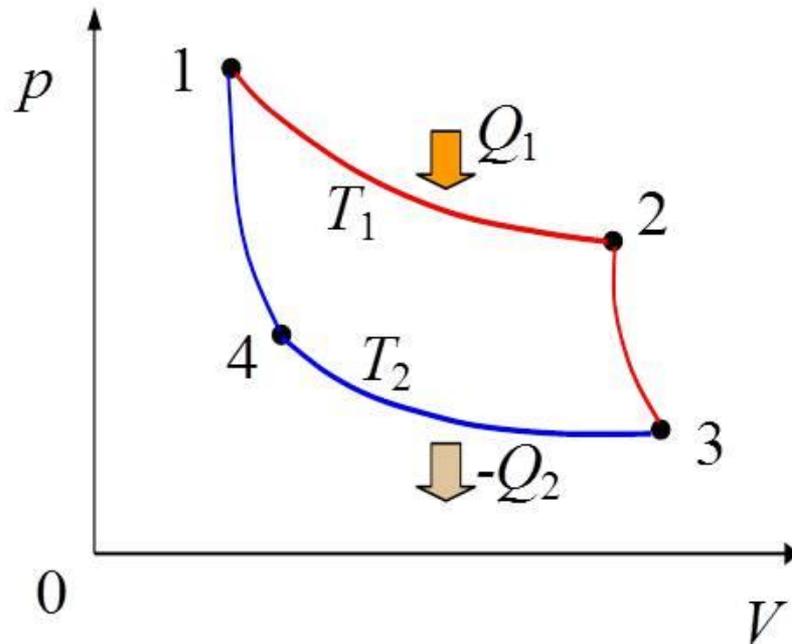


Тепловая машина работающая по циклу Карно (прямому или обратному) называется идеальной тепловой машиной.

$$\text{КПД} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

# PV-ДИАГРАММА ЦИКЛА КАРНО (ПРЯМОЙ ЦИКЛ)

Цикл Карно замкнутый.



Прямой цикл Карно.

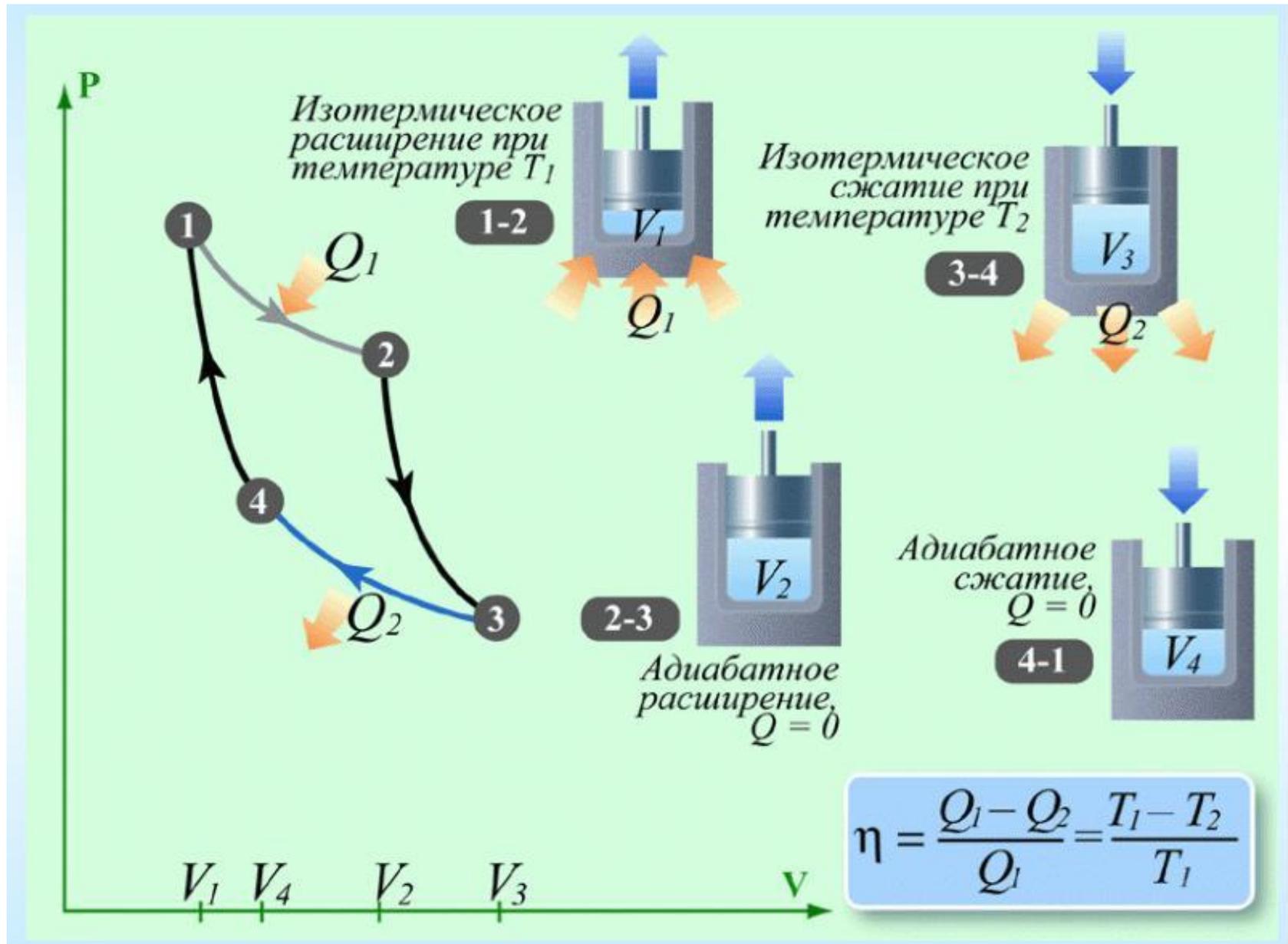
1–2: изотерма – от нагревателя получено тепло  $Q_1$ .

2–3: адиабата – расширение, тепло не подводится.

3–4: изотерма – тепло  $Q_2$  передаётся холодильнику.

4–1: адиабата – сжатие, тепло не подводится.

# PV-ДИАГРАММА ЦИКЛА КАРНО (ПРЯМОЙ ЦИКЛ)

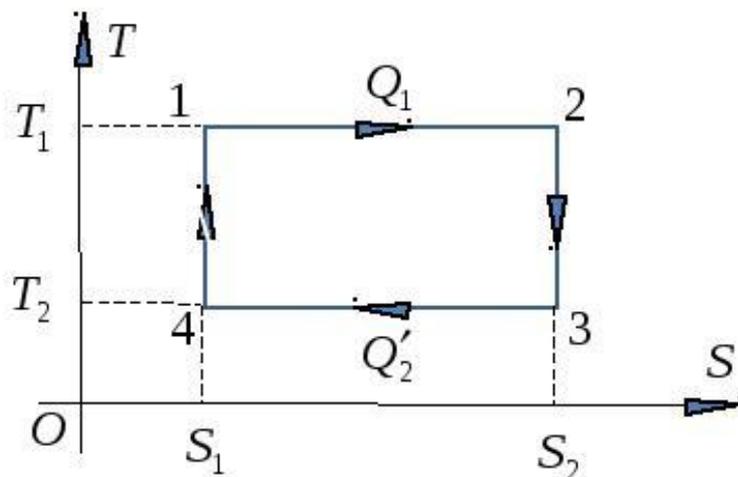


# TS-ДИАГРАММА ЦИКЛА КАРНО

Тепловые двигатели. Цикл Карно. Теорема Карно. КПД необратимых тепловых двигателей.

Единственный обратимый процесс передачи тепла – изотермический при температуре термостата (теплового резервуара).

Обратимый цикл – цикл Карно: две изотермы ( $T = const$ ) и две адиабаты ( $S = const$ ).



$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q'_2}{T_2} \quad \longrightarrow \quad \frac{Q'_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\delta Q = TdS,$$

$$Q_1 = \int_1^2 TdS = T_1(S_2 - S_1)$$

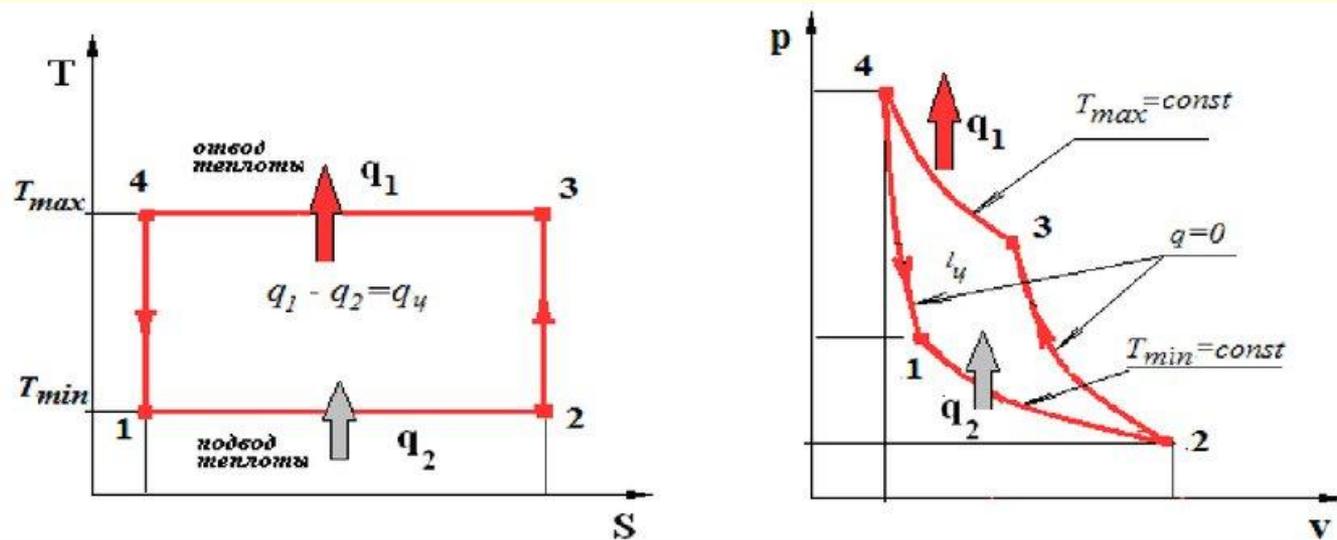
$$Q_2 = \int_3^4 TdS = T_2(S_1 - S_2),$$

$$Q'_2 = -Q_2 = T_2(S_2 - S_1)$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q'_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q'_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

# ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА – ОБРАТНЫЙ ЦИКЛ КАРНО

## Обратный обратимый цикл Карно



- 1-2 – расширение, подвод теплоты от холодного источника
- 2-3 – адиабатическое сжатие
- 3-4 – изотермическое сжатие с отводом теплоты горячему источнику;
- 4-1 – адиабатическое расширение, снижение температуры

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД (НАПОМИНАНИЕ)

$$\eta = \frac{A_n}{A_з} \cdot 100\%$$

коэффициент полезного  
действия механизма

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия,  $A_n$  – полезная работа,  
 $A_з$  – полная (затраченная) работа

# КПД замкнутого цикла

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} \qquad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

$Q_1$  – количество теплоты полученное от нагревания

$$Q_1 > Q_2$$

$Q_2$  - количество теплоты отданное холодильнику

$$Q_2 < Q_1$$

$A' = Q_1 - |Q_2|$  - работа совершаемая двигателем за цикл  $\eta < 1$

# Цикл Карно

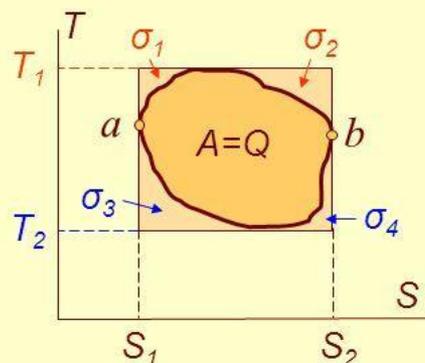
- **Первая теорема Карно**: Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно, зависит только от температур нагревателя и холодильника и не зависит от устройства машины и типа рабочего тела

$$\eta_{\text{Карно}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

**Вторая теорема Карно:** КПД любого цикла не может быть больше, чем КПД цикла Карно -  $\eta = 1 - T_2/T_1$ , где под  $T_1$  понимается максимальная, а под  $T_2$  минимальная температура

2-я теорема Карно: к.п.д. цикла Карно больше к.п.д. любого другого цикла, в котором максимальная и минимальная температуры равны, соответственно, температурам нагревателя и холодильника в цикле Карно.

Доказательство:



$$\eta_K - \eta \quad - ?$$

$$\eta_K - \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} - \left( 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) = \frac{Q_2}{Q_1} - \frac{T_2}{T_1}$$

$$Q_1 = \int_a^b T dS; \quad Q_1 = T_1 \Delta S - (\sigma_1 + \sigma_2)$$

$$Q_2 = T_2 \Delta S + (\sigma_3 + \sigma_4)$$

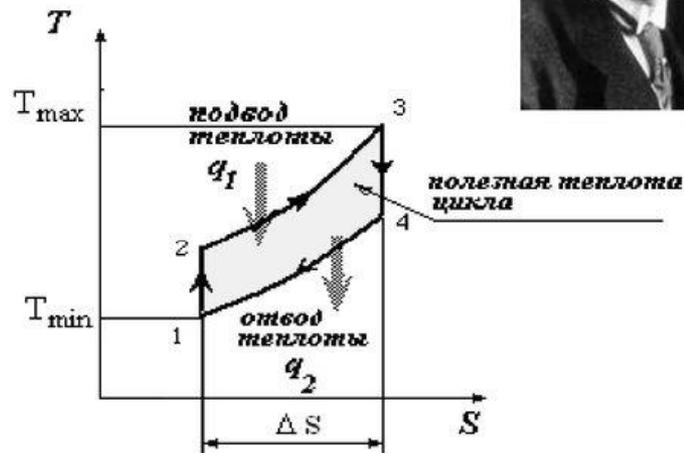
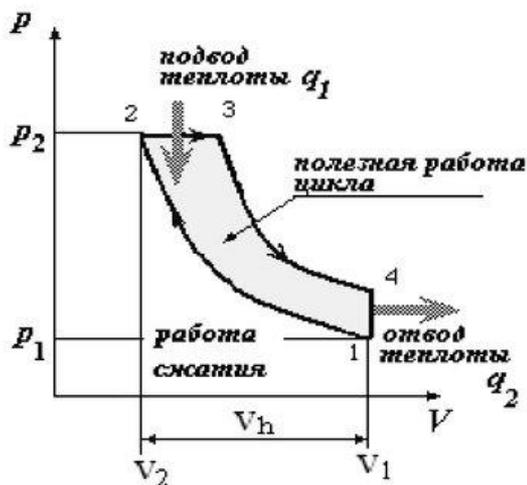
$$\eta_K - \eta = \frac{\cancel{T_1 T_2} \Delta S + T_1 (\sigma_3 + \sigma_4) - \cancel{T_1 T_2} \Delta S + T_2 (\sigma_1 + \sigma_2)}{T_1 Q_1} > 0$$

$$\eta_K > \eta$$

# Для самостоятельного анализа – опишите, из каких изопроцессов состоит круговой процесс

Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей

**Идеальный цикл поршневого ДВС с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля)**



$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

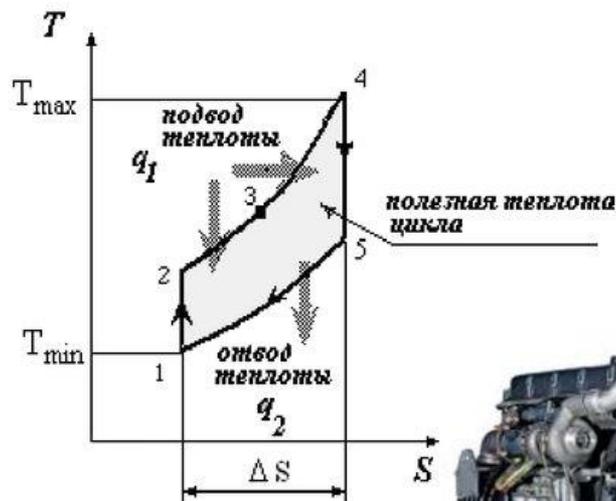
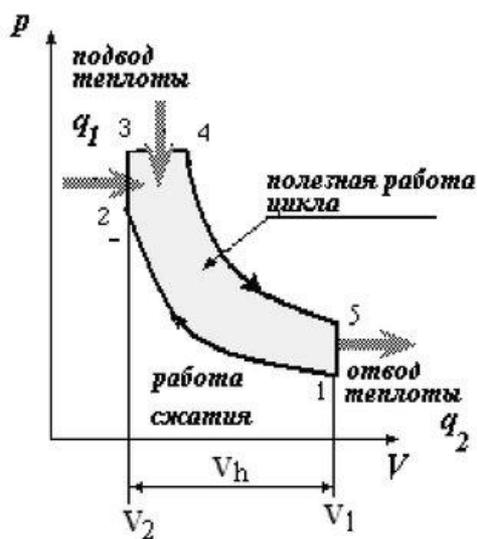
$$\rho = \frac{v_3}{v_2}$$

$$\rho = 1 + \frac{q_1}{c_p \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)}$$

# Для самостоятельного анализа – опишите, из каких изопроцессов состоит круговой процесс

## Идеальные термодинамические циклы поршневых двигателей Идеальный цикл поршневого ДВС - цикл Г.В.Тринклера



$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} = f(q_1')$$

$$\rho = \frac{v_4}{v_3} = f(q_1'')$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}$$

# Выводы:

«Обратимый процесс - это...»

«Энтропия - это...»

«Термодинамическая вероятность - это...»

«Адиабатный процесс = изоэнтропийный,  
потому что ....»

«Второе начало термодинамики: ...»

«Цикл Карно - это..., он состоит из ...»

«Первая теорема Карно: ...»

«Вторая теорема Карно: ...»