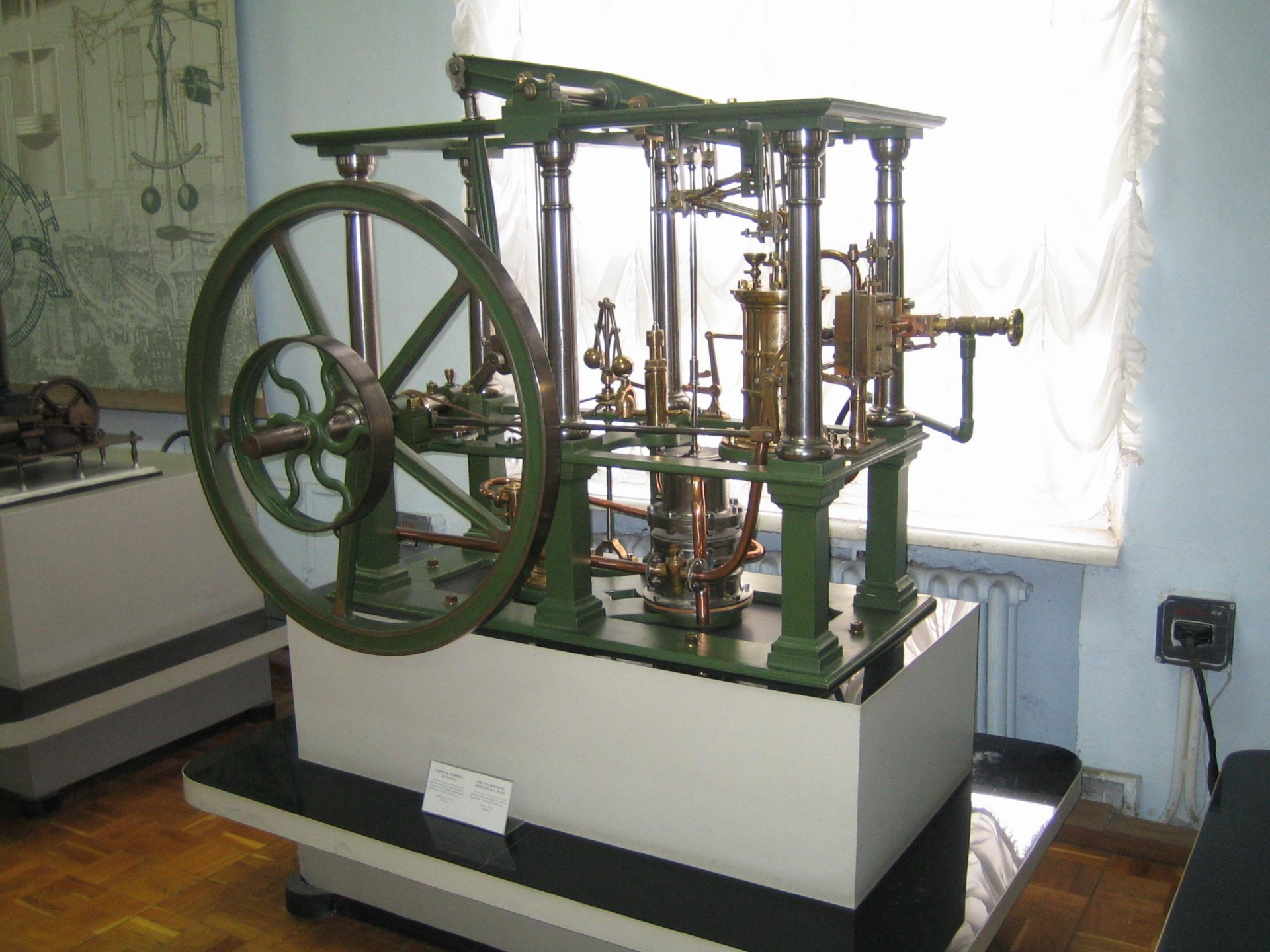


# Тема 5. Второе начало термодинамики

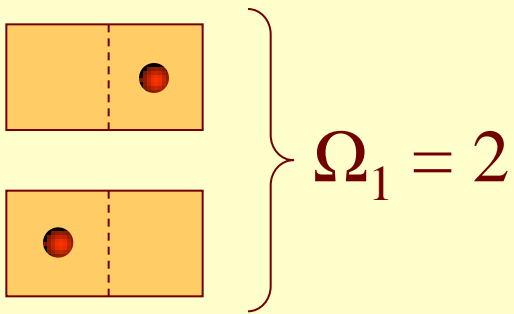
## 5.1. Микроканоническое распределение Гиббса (1905 г.)



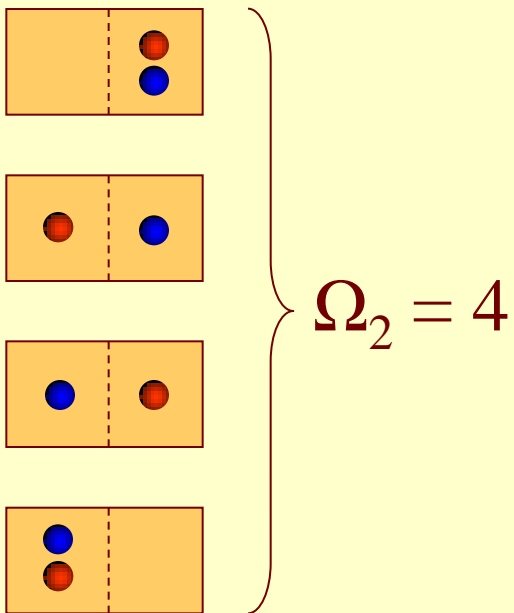




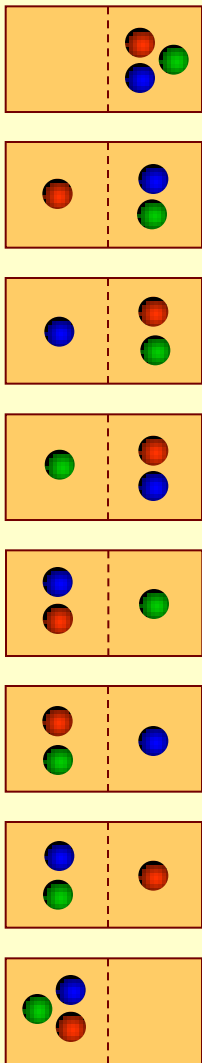
James Watt's Parallel Motion Linkage  
The Parallel Motion Linkage  
Invented by James Watt  
1769



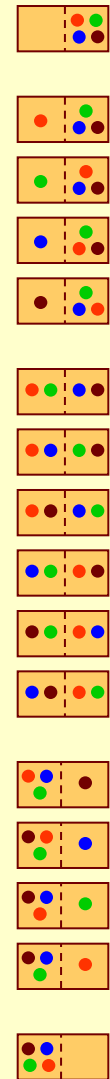
$$\Omega_1 = 2$$



$$\Omega_2 = 4$$



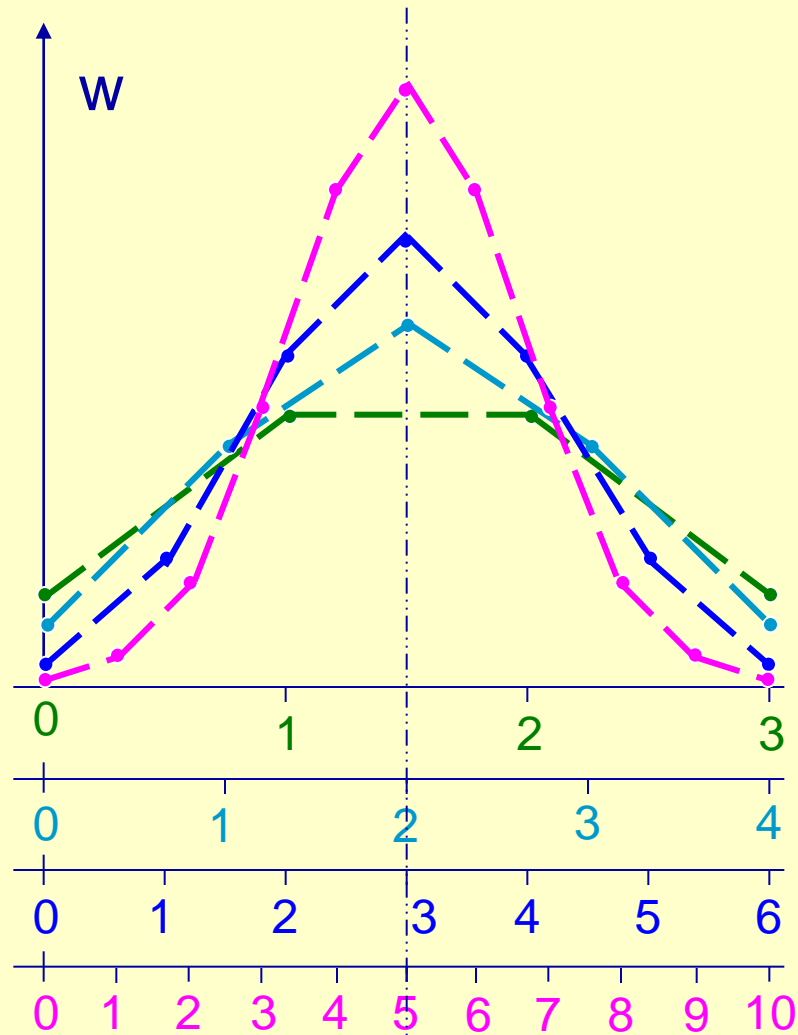
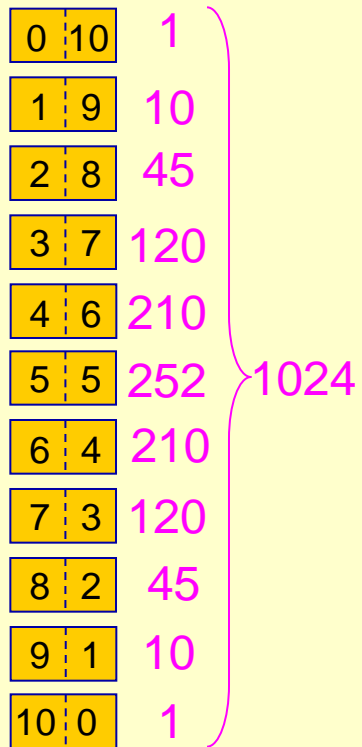
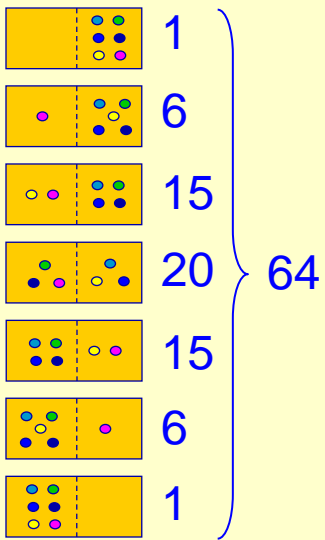
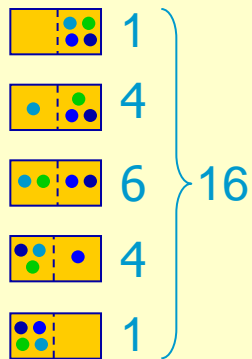
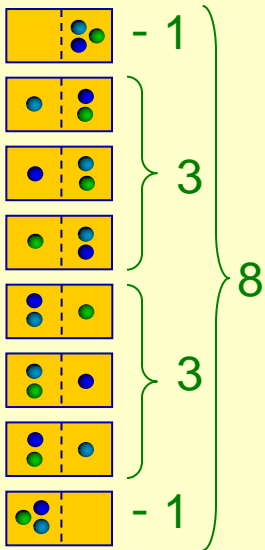
$$\Omega_3 = 8$$



$$\Omega_4 = 16$$

$$\underline{\Omega_N = 2^N}$$

$$\boxed{\Omega \sim a^{N_A} (!)}$$

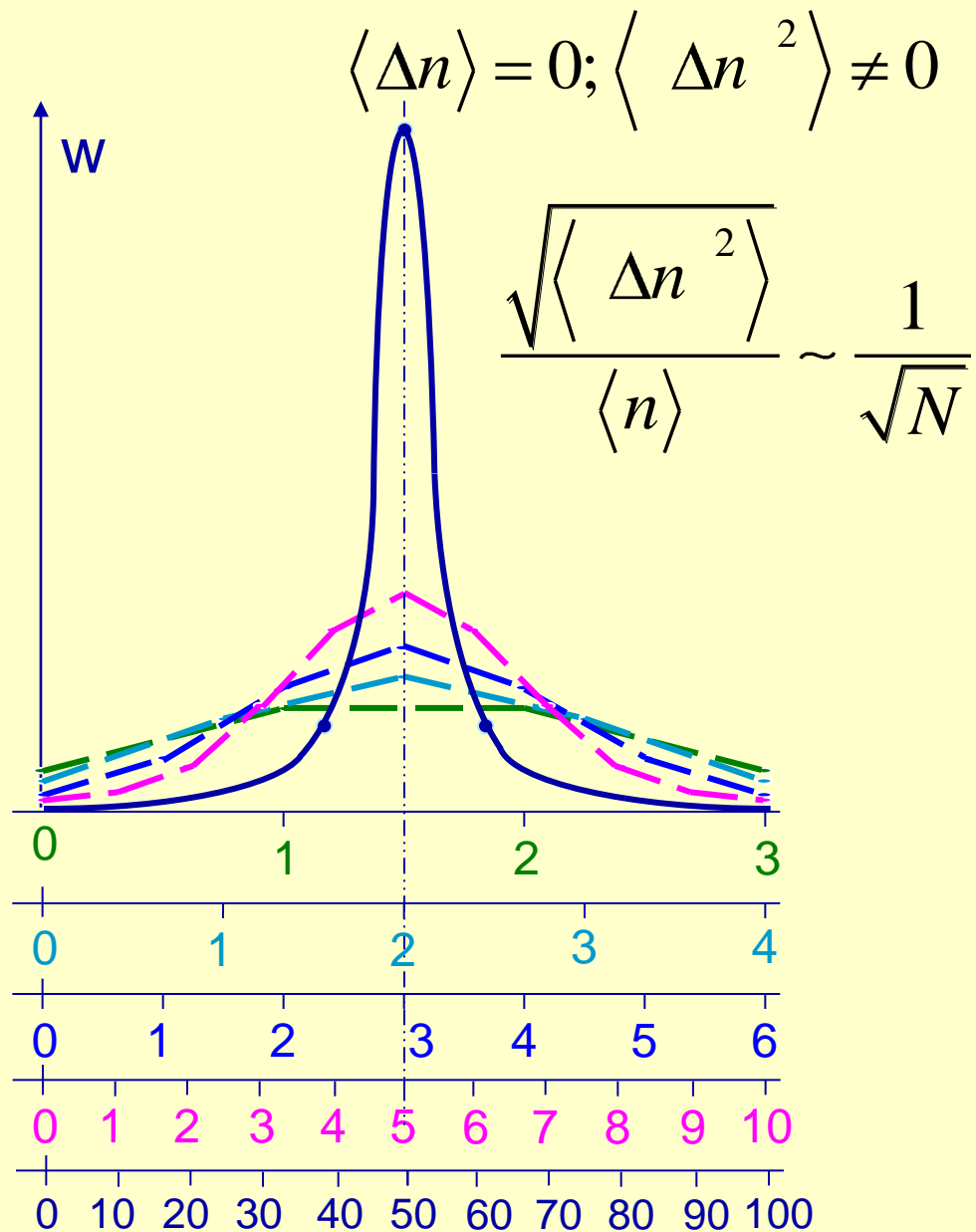


$$N = 4 \Rightarrow \frac{\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle}}{\langle n \rangle} = \frac{1}{2}$$

$$N = 24 \Rightarrow \frac{\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle}}{\langle n \rangle} \approx \frac{1}{5}$$

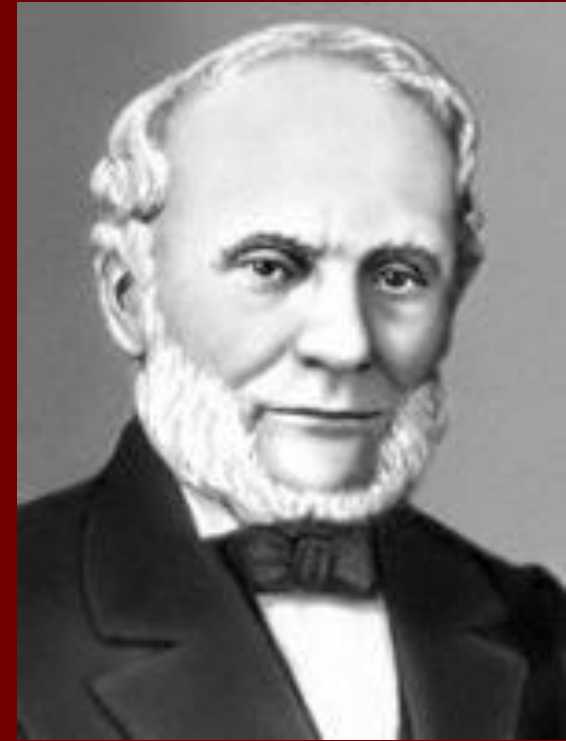
.....

$$N = 10^{24} \Rightarrow \frac{\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle}}{\langle n \rangle} = \frac{1}{10^{12}}$$



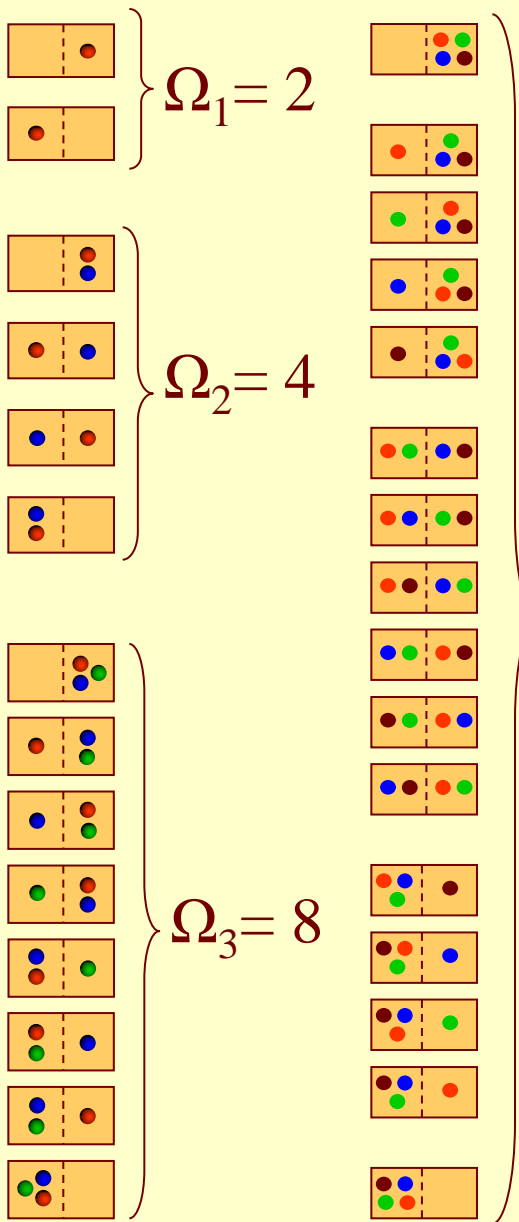
# Тема 5. Второе начало термодинамики

- 5.2. Статистический вес и энтропия. Закон возрастания энтропии



Клаузиус Рудольф  
(2.I.1822–24.VIII.1888)





*Статистический вес –  
мультипликативная величина:*

$$\Omega_{1+2} = \Omega_1 \cdot \Omega_2; \quad \Omega_{1+3} = \Omega_1 \cdot \Omega_3$$

Энтропия:  $S = k \ln \Omega$  – формула  
Больцмана

*k – постоянная Больцмана*

*Свойства энтропии:*

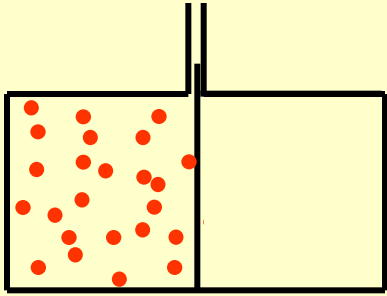
*1. Аддитивность*

$$S_{1+2} = S_1 + S_2$$

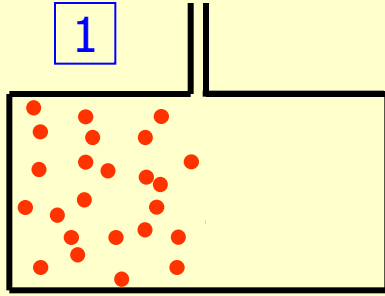
2.  $S > 0 \quad \ln \Omega > 0$

3.  $S \sim N \quad \Omega \sim a^N$

4.  $S = S(V, N, U)$

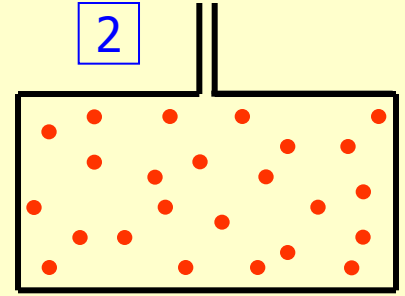


1



$$S = S_1$$

2



$$S = S_2$$



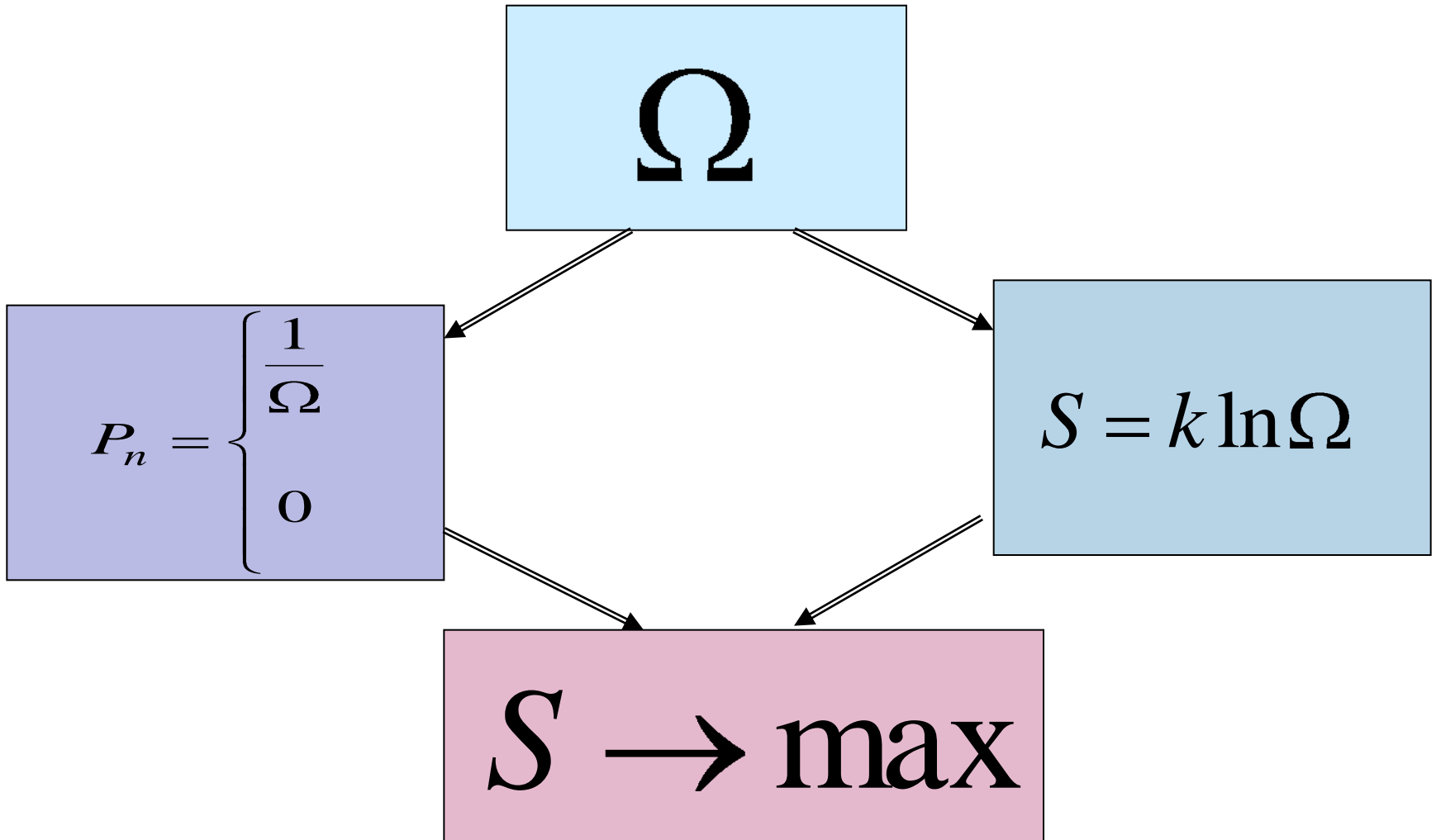
Выводы:

$$\Omega$$

$$P_n = \begin{cases} \frac{1}{\Omega} \\ 0 \end{cases}$$

$$S = k \ln \Omega$$

$$S \rightarrow \max$$



# Пример расчета энтропии:

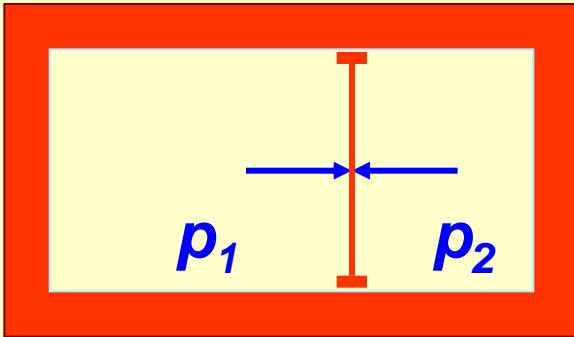
Энтропия 1 моля одноатомного идеального газа

$$\mu C \equiv \vec{r}_i, \vec{v}_i$$

$$\Omega = \Omega_{np} \cdot \Omega_{ck} \Rightarrow S = k \ln \Omega_{np} + k \ln \Omega_{ck}$$

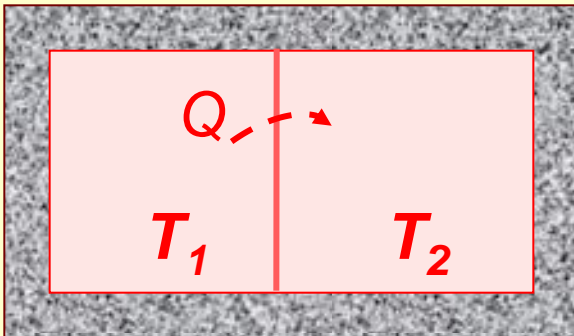
# Тема 5. Второе начало термодинамики

- 5.3. Статистическая температура и химический потенциал



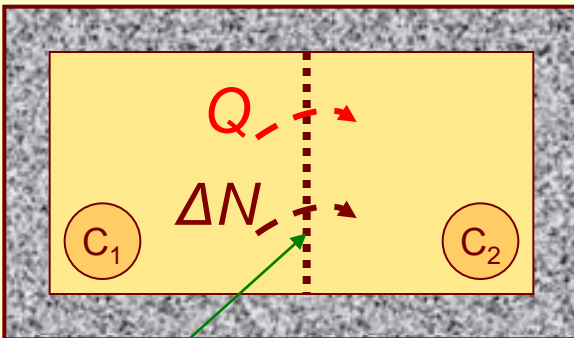
## 1. Механический контакт систем

Условие равновесия:  $p_1 = p_2$



## 2. Тепловой контакт систем

Условие равновесия:  $T_1 = T_2$



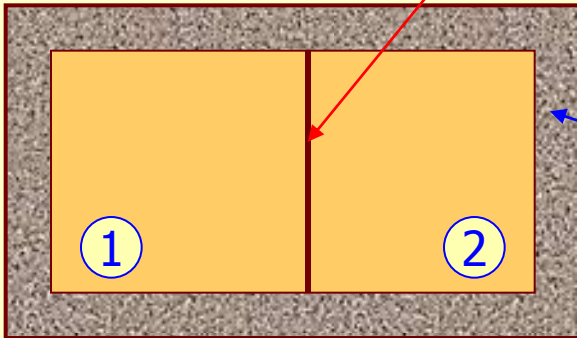
## 3. Диффузионный контакт систем

Условие равновесия:  $\mu_1 = \mu_2$

проницаемая стенка



1. Теплопроводящая стенка (*тепловой контакт систем*):



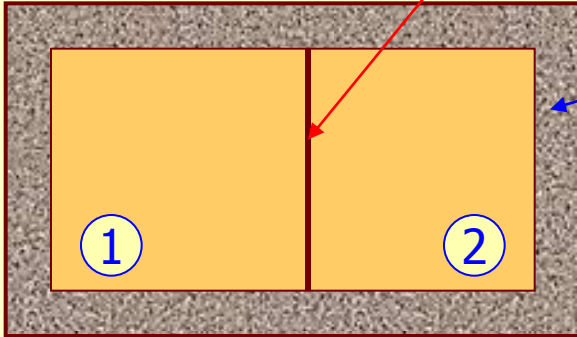
$$U_1 = U_1(t); \quad U_2 = U_2(t)$$

теплоизоляция (*отсутствует теплообмен с окружающей средой*):

$$U_1 + U_2 = U = \text{const} \Rightarrow dU_2 = -dU_1$$

$$S = S_1(U_1) + S_2(U_2).$$

1. Теплопроводящая стенка (*тепловой контакт систем*):



теплоизоляция (*отсутствует теплообмен с окружающей средой*):

$$U_1 + U_2 = U = const \Rightarrow dU_2 = -dU_1$$

$$S = S_1(U_1) + S_2(U_2).$$

$$\frac{\partial S}{\partial U} \equiv \frac{1}{T_{cm}}$$

$$\frac{1}{T_{1cm}} = \frac{1}{T_{2cm}}$$

# Условия равновесия:

- **Тепловой контакт:**  $\left(\frac{\partial S_1}{\partial U_1}\right)_{N_1} = \left(\frac{\partial S_2}{\partial U_2}\right)_{N_2}$ ;  $\left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_N \equiv \frac{1}{T}$ ;  $T_1 = T_2$
- **Механический контакт:**  $\left(\frac{\partial S_1}{\partial V_1}\right)_{U_1, N_1} = \left(\frac{\partial S_2}{\partial V_2}\right)_{U_2, N_2}$ ;  $\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_{U, N} \equiv \frac{P}{T}$ ;  $\frac{P_1}{T} = \frac{P_2}{T}$
- **Материальный контакт:**  $\left(\frac{\partial S_1}{\partial N_1}\right)_{U_1} = \left(\frac{\partial S_2}{\partial N_2}\right)_{U_2}$ ;  $\left(\frac{\partial S}{\partial N}\right)_U \equiv -\frac{\mu}{T}$ ;  $\frac{\mu_1}{T} = \frac{\mu_2}{T}$

# Тема 5. Второе начало термодинамики

- 5.4. Квантовое распределение Больцмана



# Тема 5. Второе начало термодинамики

- 5.5. Статистическая и термодинамическая температуры

# Тема 5. Второе начало термодинамики

## ■ 5.6. Энтропия и теплота

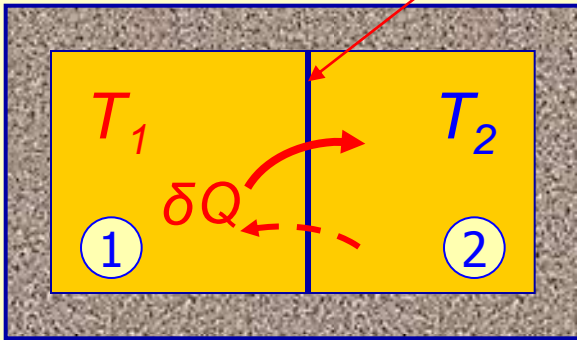
# Тема 5. Второе начало термодинамики

- 5.7. КПД цикла. Неравенство Клаузиуса



**Клаузиус Рудольф**  
(2.I.1822–24.VIII.1888)

теплопроводящая стенка (*тепловой контакт систем*):  $\delta Q = CdT$



Пусть  $T_1 > T_2$

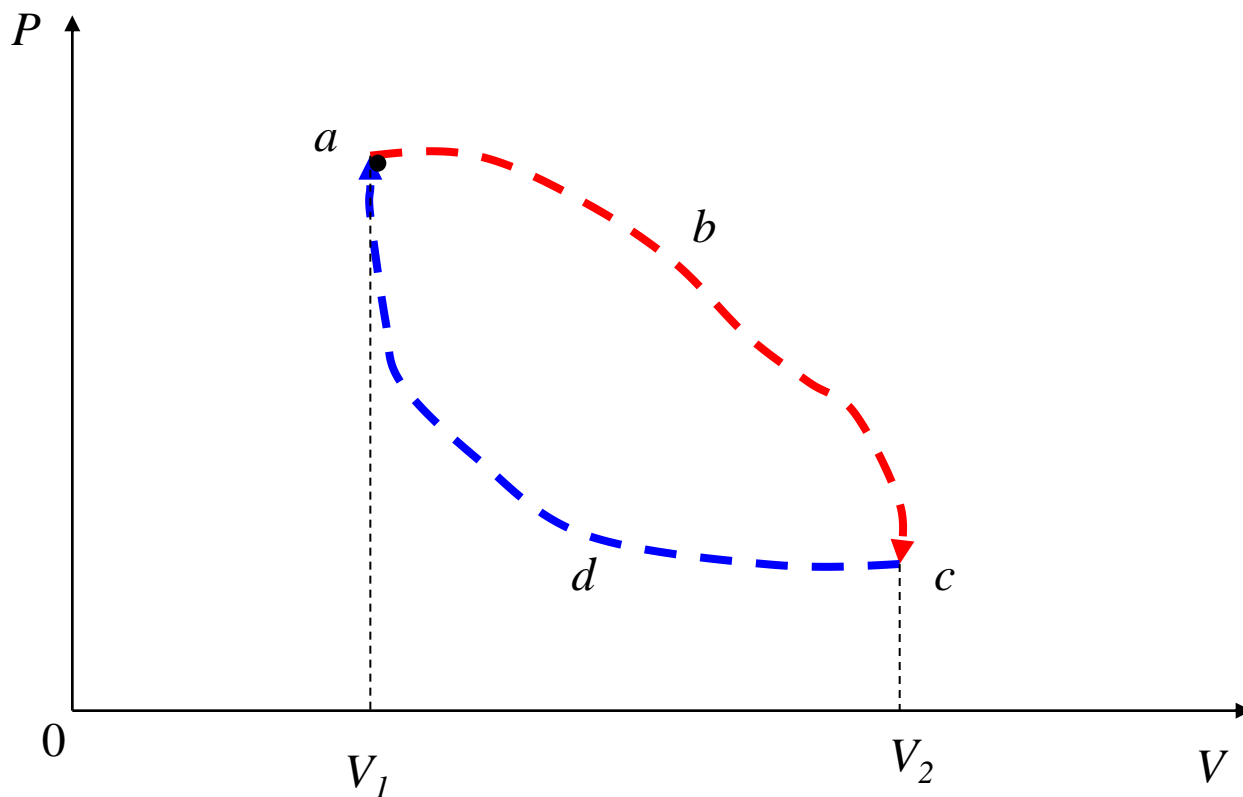
допустим, что  $T_1 \rightarrow T_1 + \Delta T$ ;

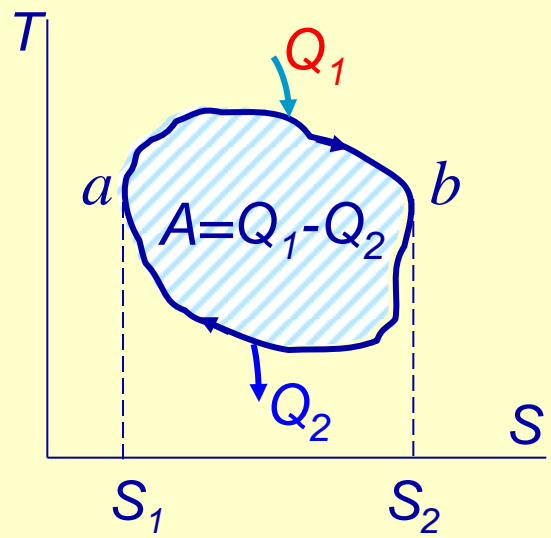
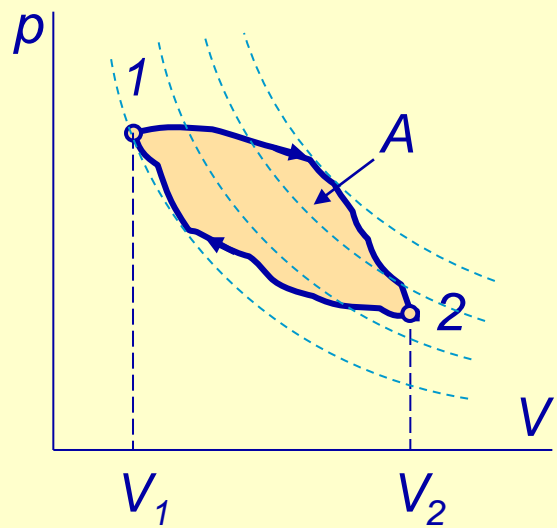
$$\Delta S < 0 \text{ (?!)}$$

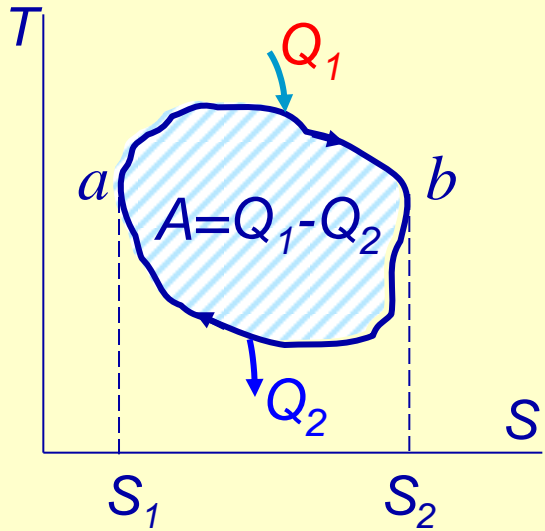
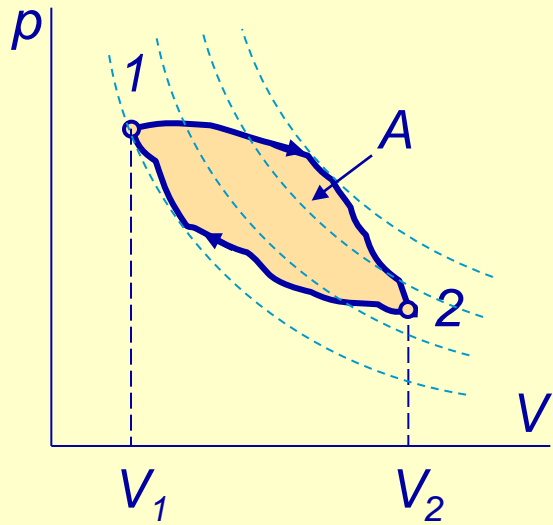
*противоречит закону  
возрастания энтропии!*



*Цикл (или круговой процесс)- процесс в котором система периодически возвращается в исходное состояние.*







$$0 \geq \oint \frac{\delta Q}{T}$$

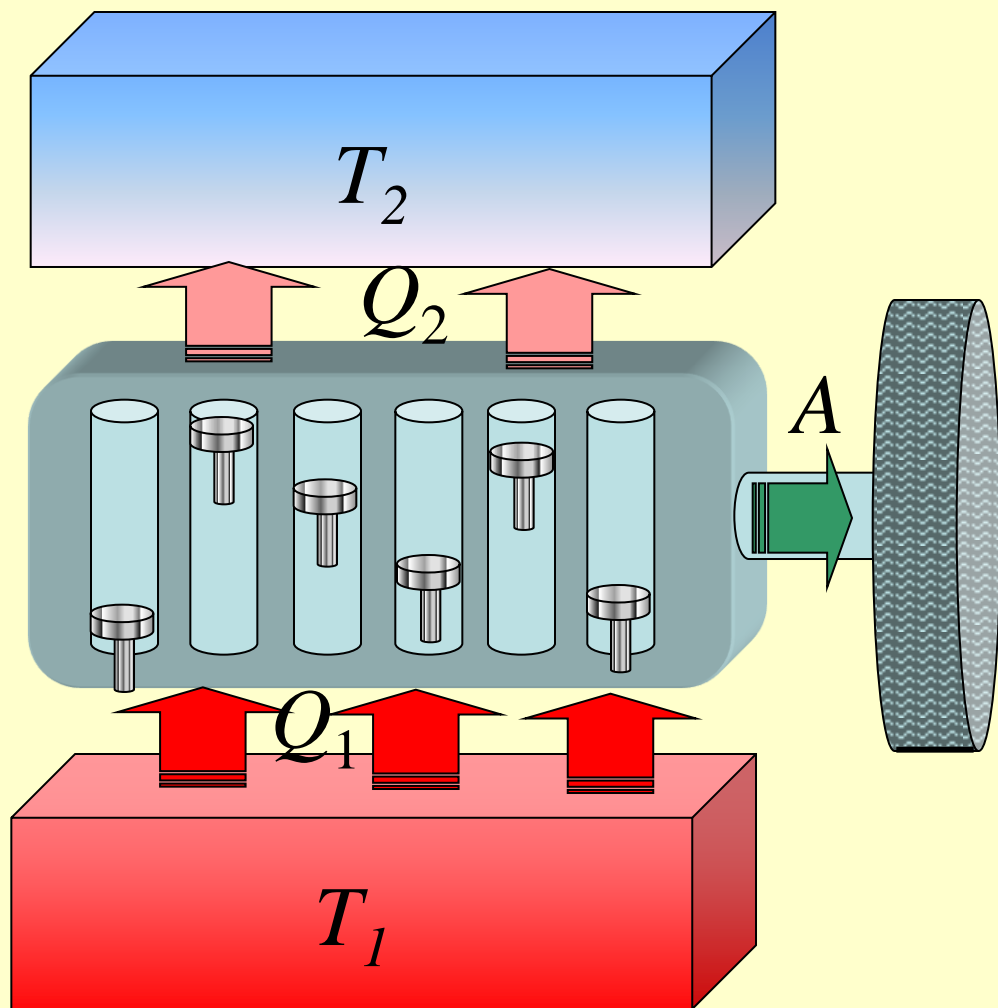
Неравенство Клаузиуса

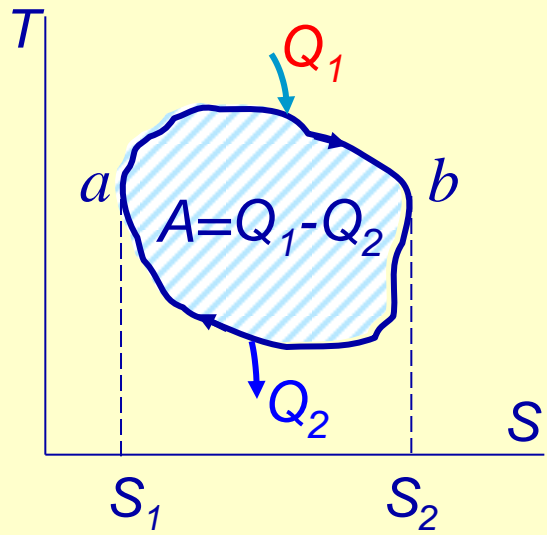
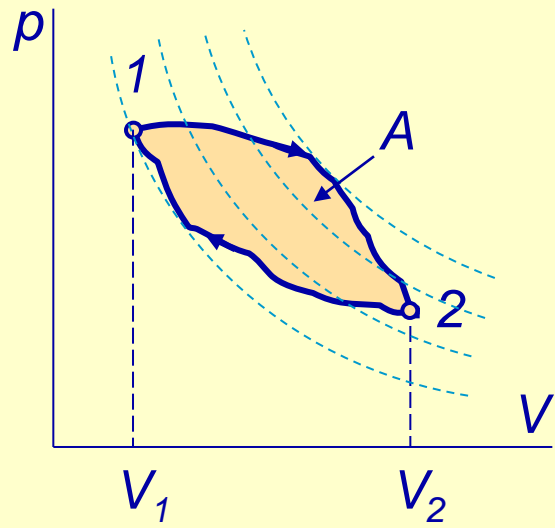


791 824002  
H. H. HUBNER  
GREEN ISLAND

1870-1880  
The first steam traction engine was built in 1804 by Richard Trevithick. It was a portable engine that could be used for a variety of tasks, including mining, agriculture, and transport. The first steam traction engine was built in 1825 by James Watt and James Pickard. It was a portable engine that could be used for a variety of tasks, including mining, agriculture, and transport. The first steam traction engine was built in 1825 by James Watt and James Pickard. It was a portable engine that could be used for a variety of tasks, including mining, agriculture, and transport.

# Энергетическая схема тепловой машины





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

$$\eta \leq 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

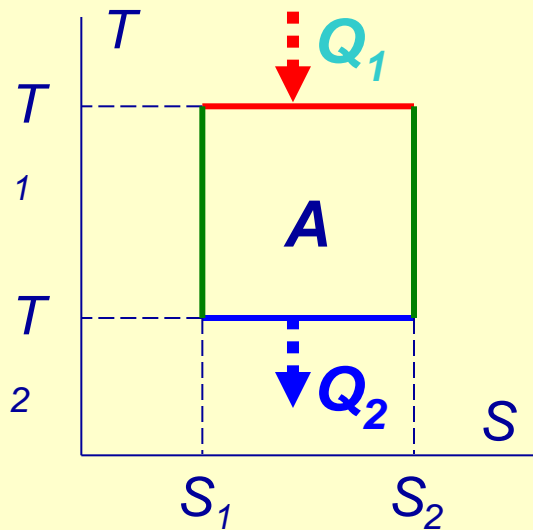
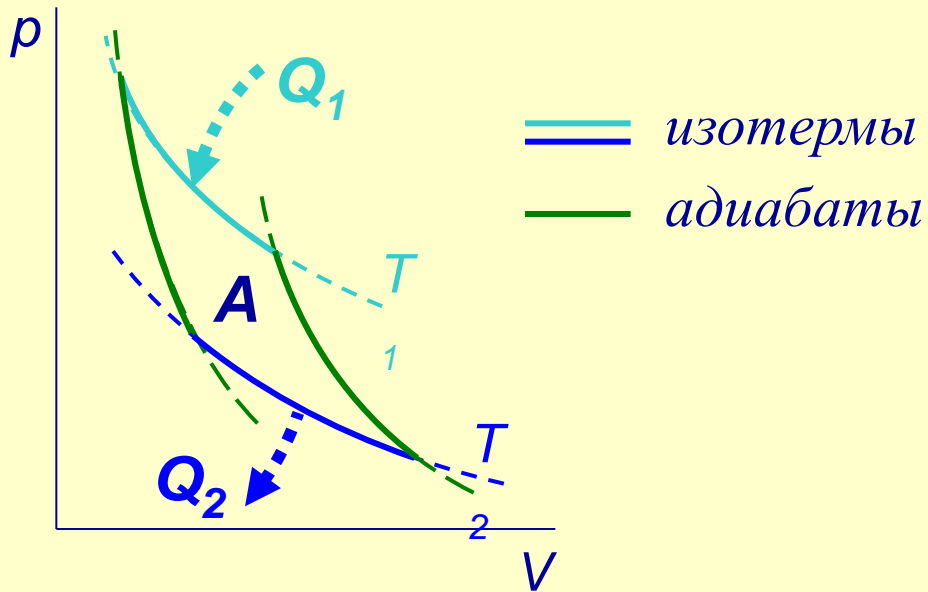


# Тема 5. Второе начало термодинамики

## ■ 5.8. Цикл Карно

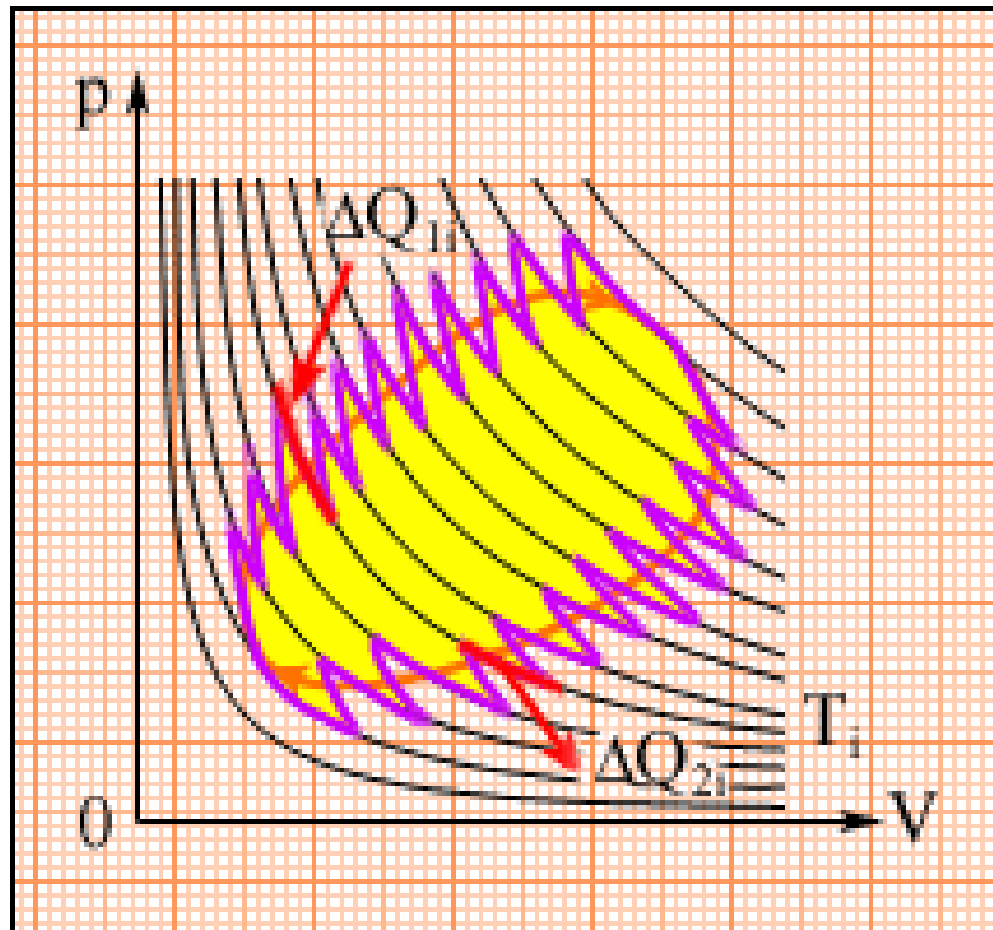


# Цикл Карно



$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{— к.п.д. цикла Карно}$$

Произвольный обратимый цикл как последовательность малых изотермических и адиабатических участков



# Теоремы Карно:

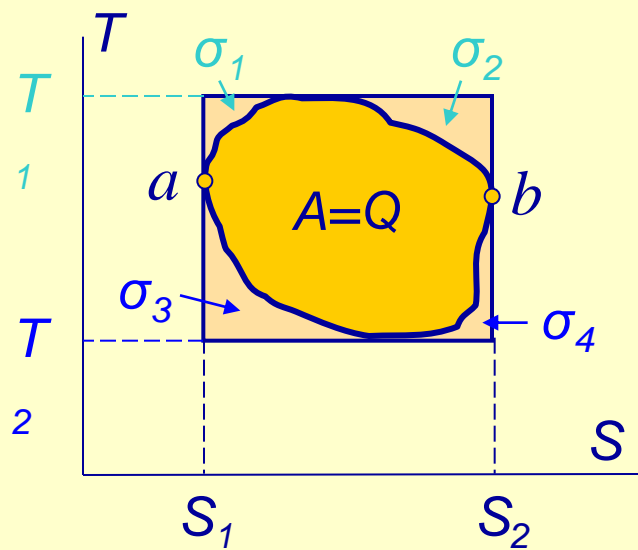
- Первая:

К.П.Д. всех тепловых машин, работающих по циклу Карно, определяется только температурами нагревателя и холодильника

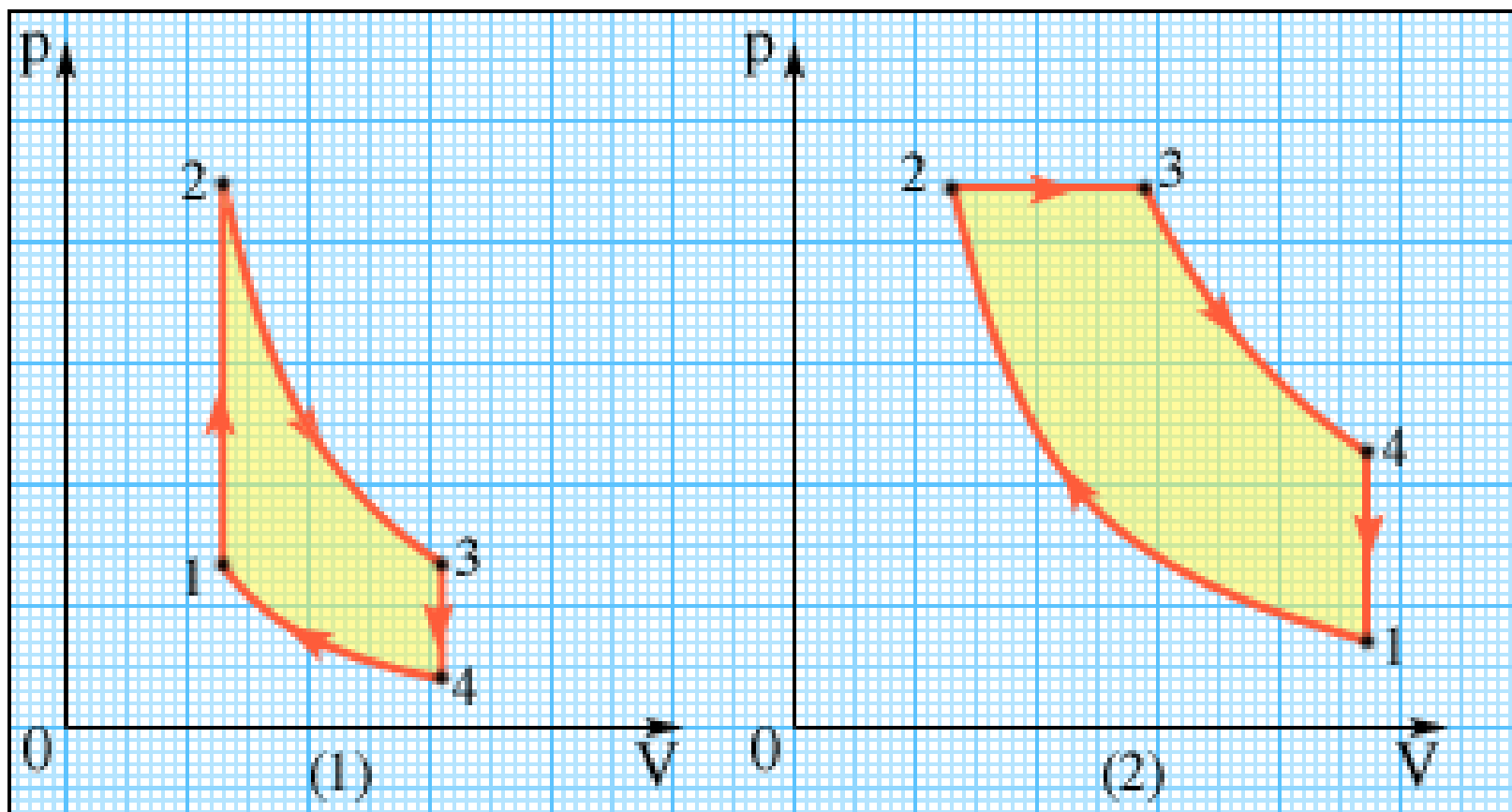
- Вторая:

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 2-й теоремы Карно

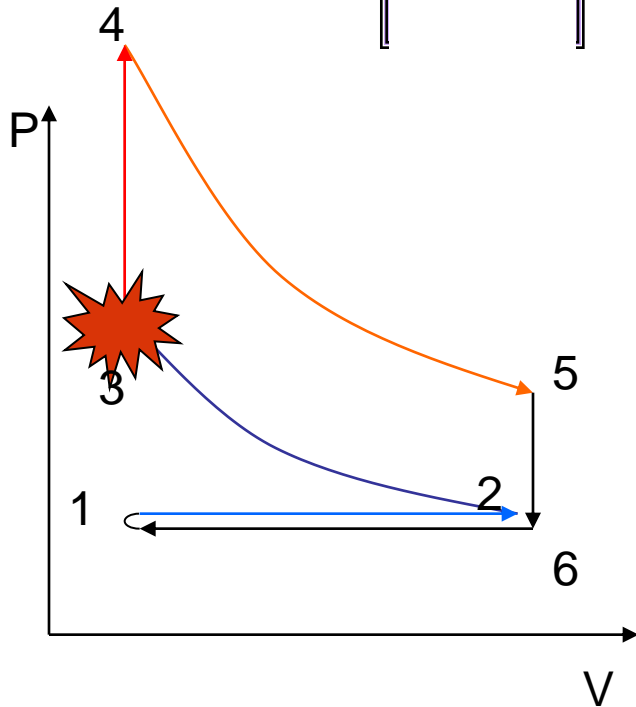
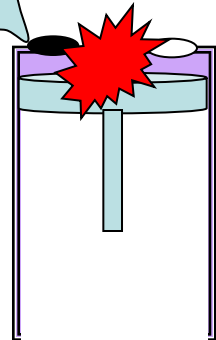


Циклы карбюраторного двигателя внутреннего сгорания (1)  $\eta < 30\%$  и дизельного двигателя (2)  $\eta < 40\%$ .



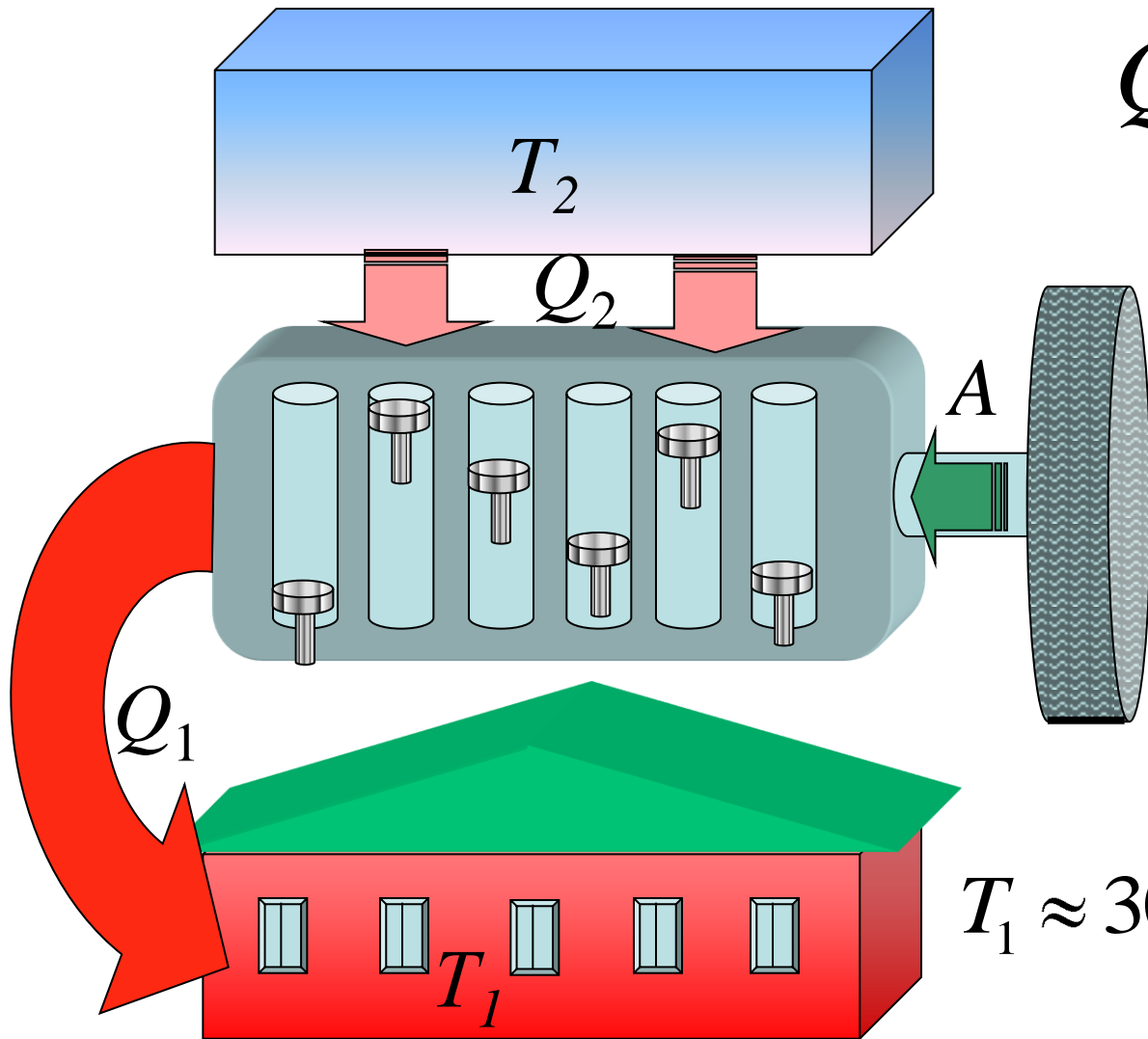
# Двигатель Отто

$$\eta = \frac{A_{4-5} - A_{3-2}}{Q_{3-4}}$$



- 1-2 Впуск горючей смеси
- 2-3 Сжатие горючей смеси
- 3-4 Воспламенение горючей смеси
- 4-5 Рабочий ход
- 5-6 Выхлоп
- 6-1 Продувка

# Принцип динамического отопления (Томсон)



$$Q_1 = Q_2 + A$$

Эффективность

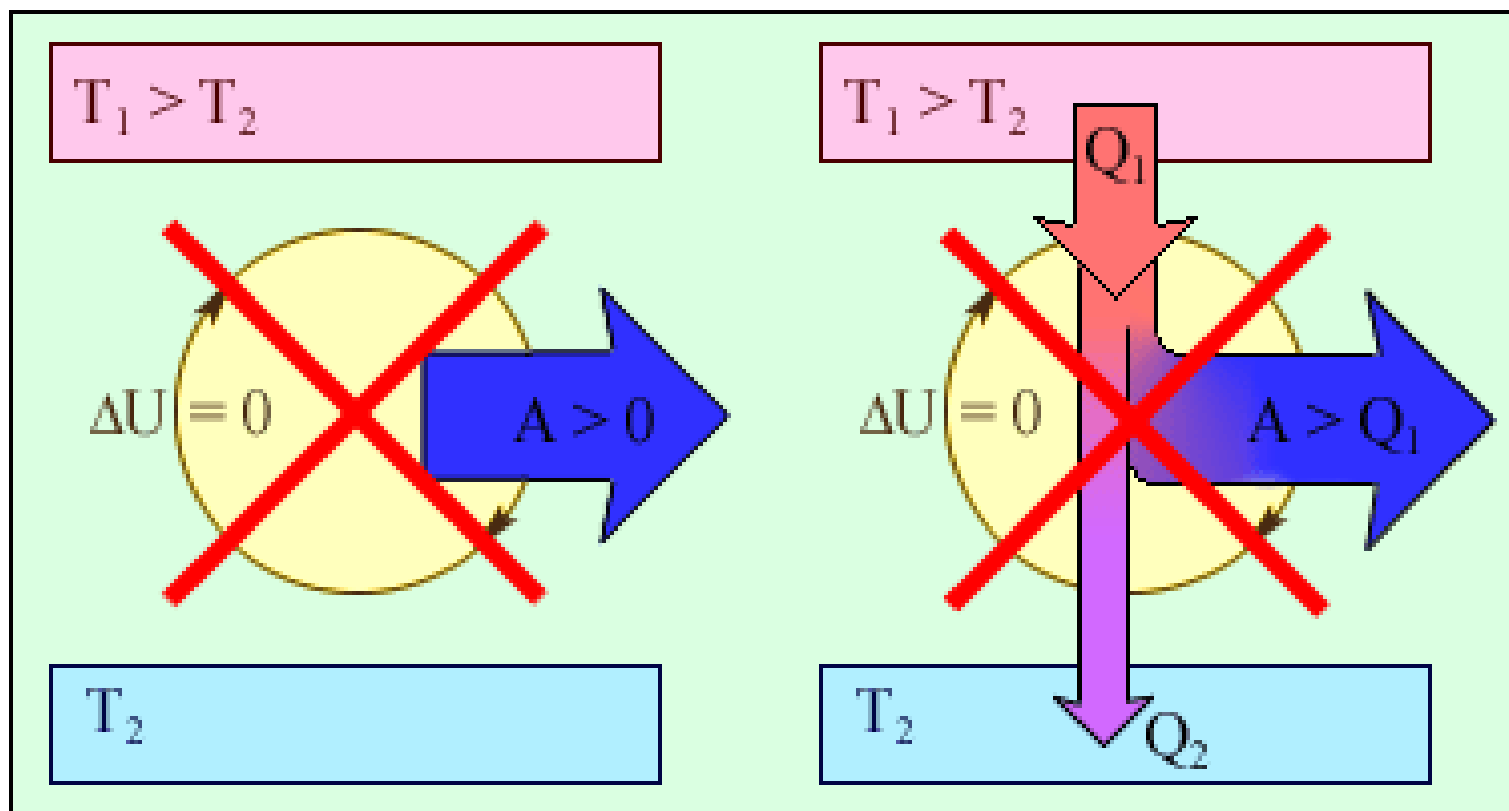
$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

Пример:

$$T_1 \approx 300 \text{ K}, \quad \Delta T \approx 50 \text{ K}$$

$$\varepsilon \approx 6$$

- Циклически работающие тепловые машины, запрещаемые первым законом термодинамики:
- 1 – вечный двигатель 1 рода, совершающий работу без потребления энергии извне;
  - 2 – тепловая машина с коэффициентом полезного действия  $\eta > 1$





Процессы, не противоречащие первому закону термодинамики, но запрещаемые вторым законом:

1 – «вечный двигатель второго рода»;

2 – самопроизвольный переход тепла от холодного тела к более теплomu («идеальная холодильная машина»).

