

Часть 1

Техническая термодинамика

Занятие 3

Энтропия. Второй закон термодинамики. Прямой цикл Карно. Обратный цикл Карно.

Энтропия (S)

- однозначная функция состояния
термодинамической системы

Изменение энтропии – отношение теплоты
сообщенной системе к термодинамической
температуре системы:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Энтропия (S)

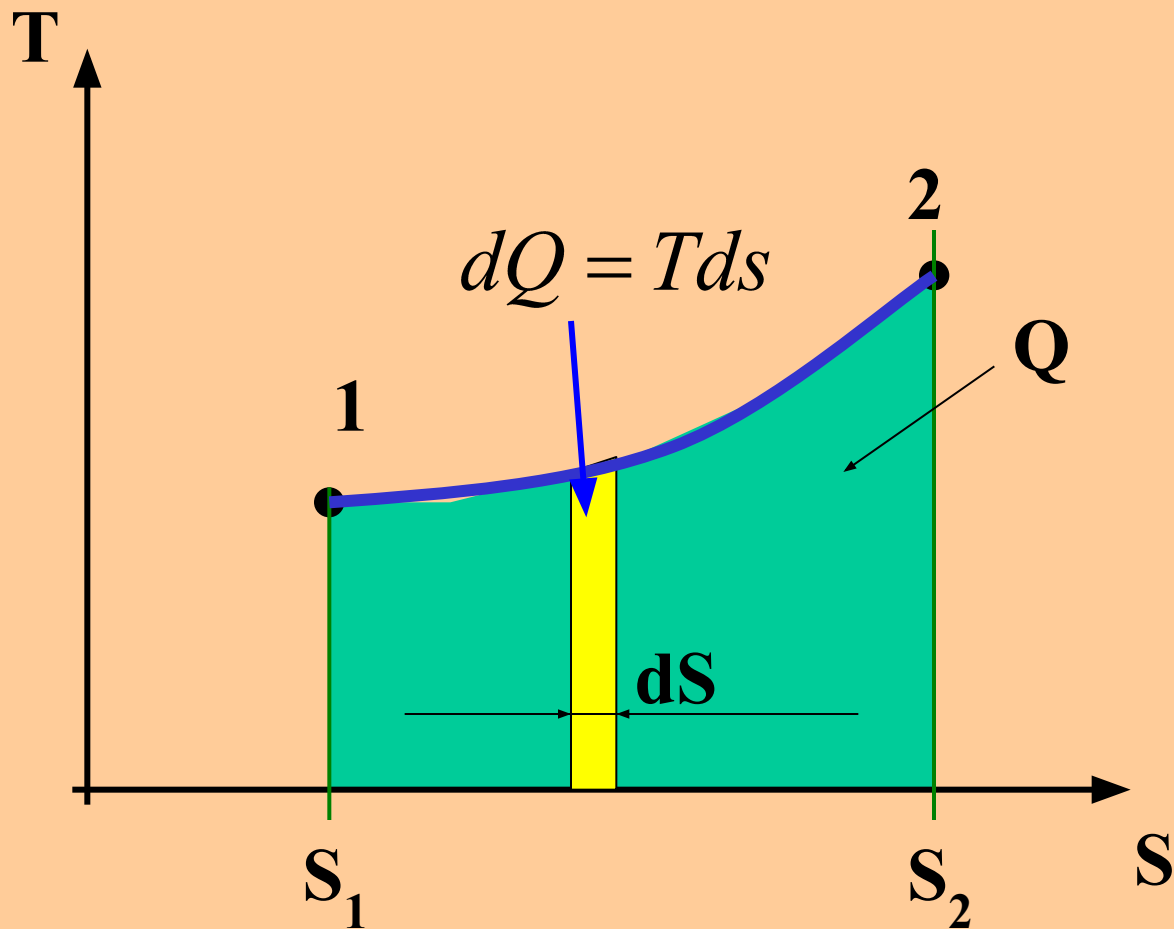
Величина связывает Q и T:

T ??? Q

$$\Delta Q = \Delta S \cdot T$$

Энтропия (S)

Графически Q – площадь диаграммы:



$$Q = \int_{S_1}^{S_2} T ds$$

$$dQ = Tds$$

$$ds = \frac{dQ}{T}$$

$$ds = \frac{cdT}{T}$$

$$\Delta s = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$pv = RT$$

1) $s = f(T, v)$

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{du + pdv}{T} =$$

$$= \frac{c_v dT}{T} + \frac{pdv}{T} = c_v \frac{dT}{T} + \frac{pdv}{pv} R$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

Математическое отображение энтропии

1) $s = f(T, v)$

$$\Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$pv = RT$$

$$2) s = f(T, p)$$

$$v = \frac{RT}{p}$$

$$\Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{RT_2 p_1}{RT_1 p_2} =$$

$$= c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$R = c_p - c_v$$

$$2) s = f(T, p)$$

$$\Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Математическое отображение энтропии

$$pv = RT$$

$$3) s = f(p, v)$$

$$T = \frac{pv}{R}$$

$$R = c_p - c_v$$

$$\Delta S = c_v \ln \frac{p_2 v_2 R}{p_1 v_1 R} + R \ln \frac{v_2}{v_1} =$$

$$= c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_v \ln \frac{v_2}{v_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

3) $s = f(p, v)$

$$\Delta S = c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Энтропия является физической величиной, изменение которой является признаком наличия обмена энергией в форме тепла:

$$dS > 0 \rightarrow dq > 0 \rightarrow \text{ПОДВОД ТЕПЛА}$$

$$dS < 0 \rightarrow dq < 0 \rightarrow \text{ОТВОД ТЕПЛА}$$

$$dS = 0 \rightarrow dq = 0 \rightarrow \text{НЕТ ТЕПЛООБМЕНА}$$

Свойства энтропии

Энтропия имеет два свойства (принципа):

1. Принцип существования энтропии в обратимых ТД процессах:

изменение энтропии существует всегда:

$$dS_{\text{обр}} = \frac{dQ_{\text{обр}}}{T}$$

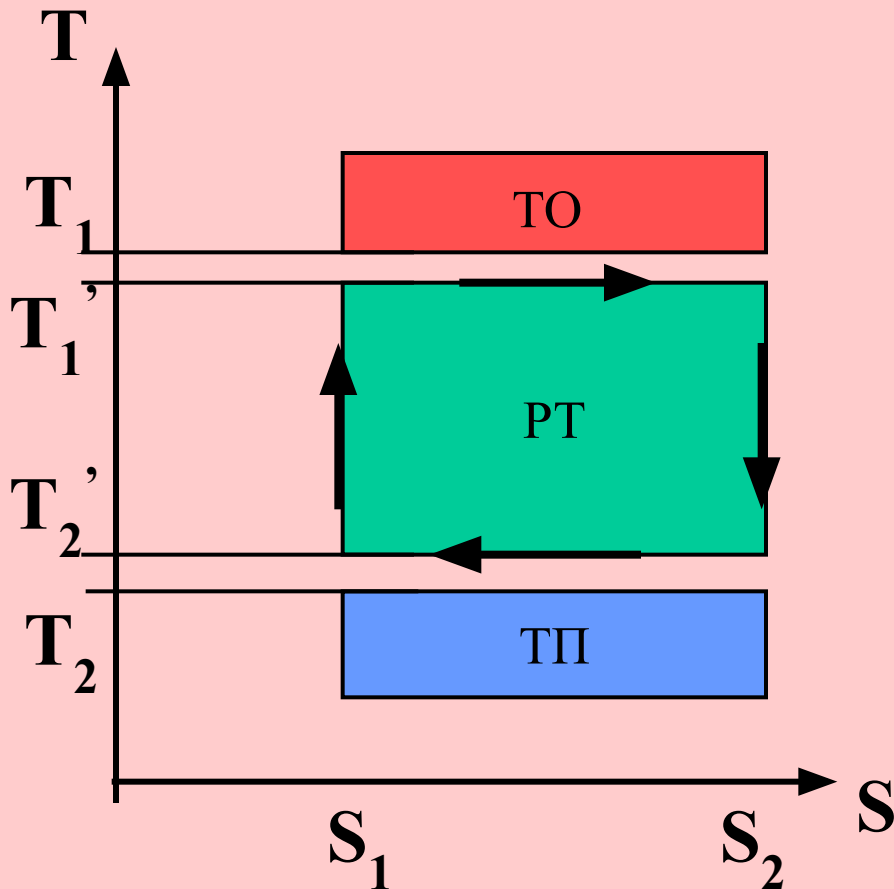
2. Принцип возрастания энтропии:

энтропия изолированной системы неизменно возрастает при всяком изменении их состояния и остается постоянной только при обратимом течении процессов:

$$dS_{\text{изол}} \geq 0$$

Свойства энтропии

доказательство:



Энтропия ТО уменьшается:

$$S_{\text{ТО}} = \frac{|Q_1|}{T_1}$$

Энтропия ТП возрастает:

$$S_{\text{ТП}} = \frac{|Q_2|}{T_2}$$

РТ - передатчик:

для обратимого процесса:

$$\frac{|Q_1|}{T_1} = \frac{|Q_2|}{T_2}$$

для реального процесса:

$$T_1' < T_1 ; T_2' > T_2$$

Свойства энтропии

доказательство:

$$\eta_t > \eta'_t$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} > \eta'_t = 1 - \frac{Q_2'}{Q_1'}$$

$$1 - \frac{T_2}{T_1} > 1 - \frac{Q_2'}{Q_1'}$$

$$\frac{T_2}{T_1} < \frac{Q_2'}{Q_1'}$$

$$\frac{Q_1'}{T_1} < \frac{Q_2'}{T_2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} < \frac{T_2'}{T_1'}$$

$$S_1 < S_2$$

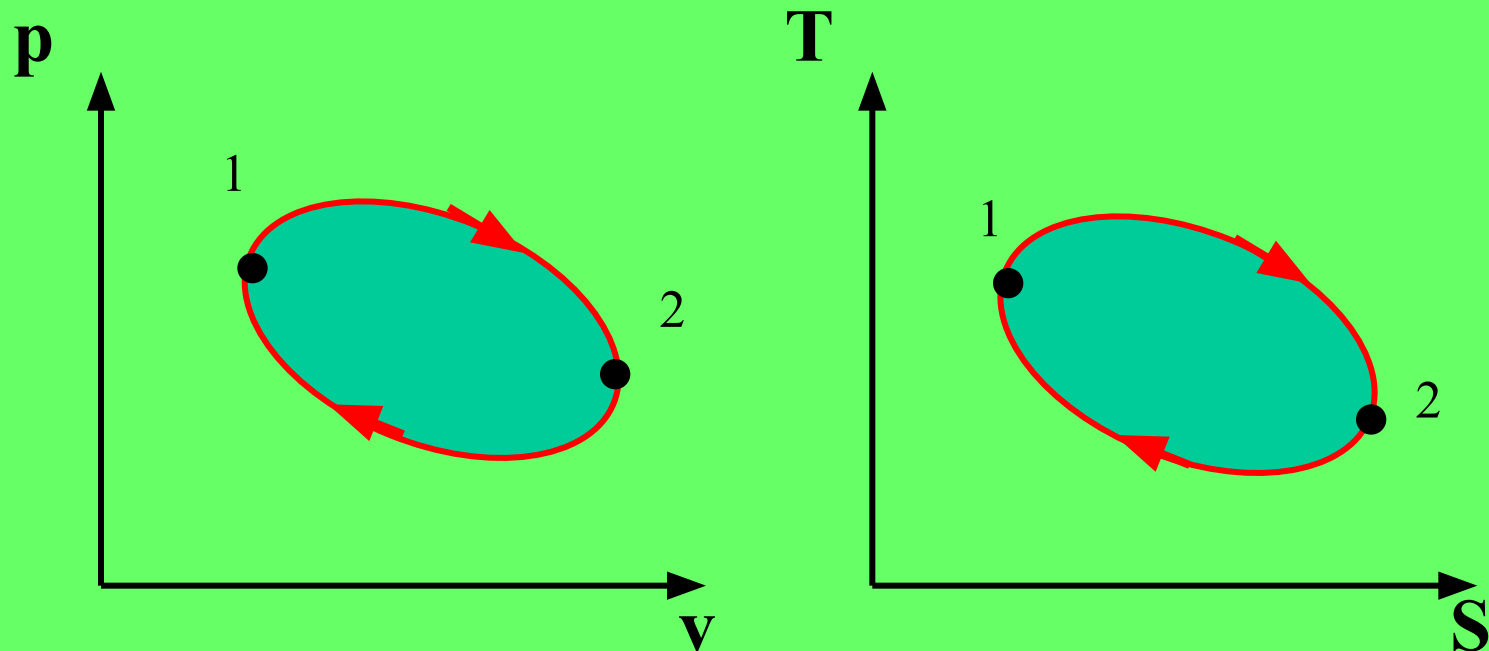
$$S_2 - S_1 > 0$$

$$\Delta S > 0$$

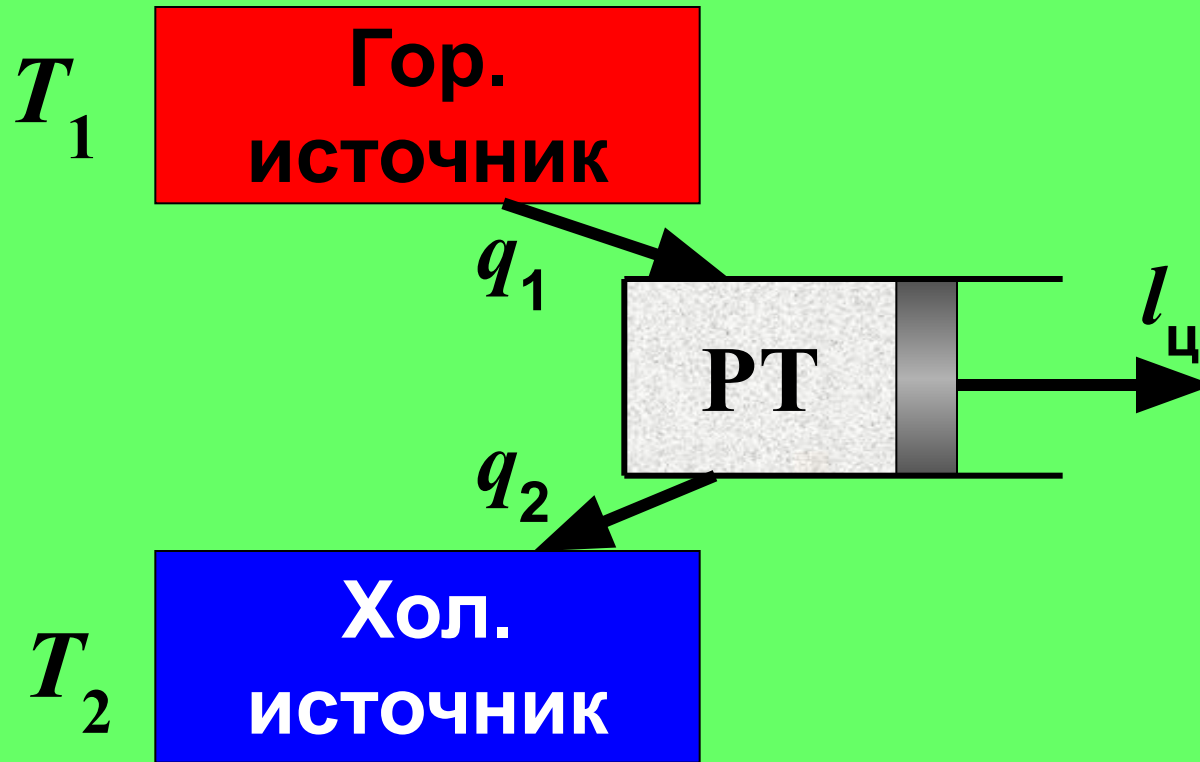
В периодически повторяющемся процессе теплоту полностью превратить в работу невозможно.

Все тепловые двигатели имеют рабочее тело, совершающее замкнутый процесс – ЦИКЛ.

ЦИКЛ – термодинамический процесс, в результате которого РТ, проходя последовательно различные состояния, возвращается снова в исходное состояние.

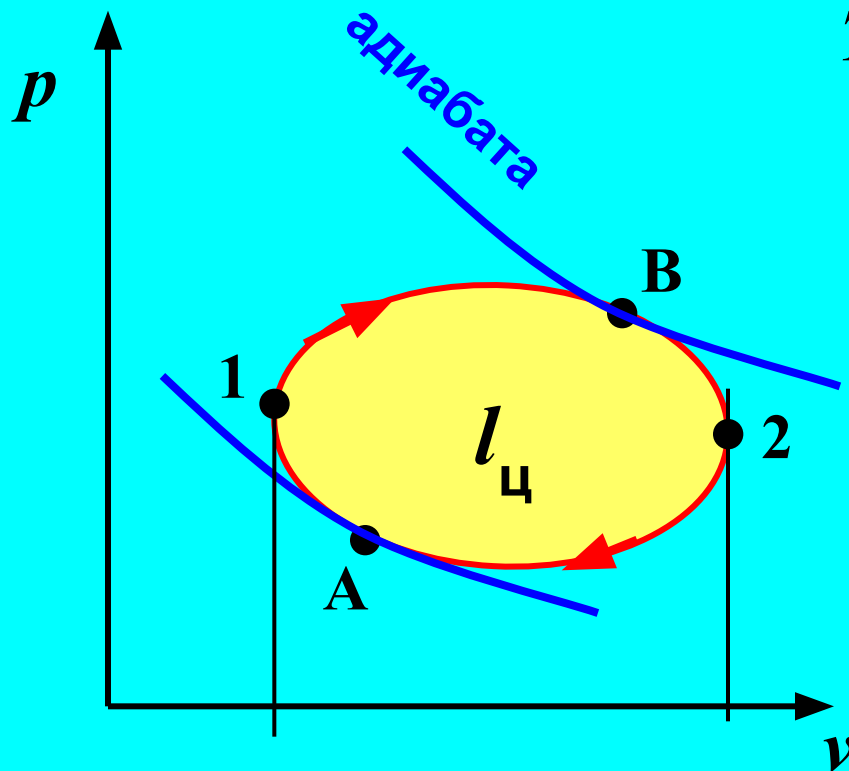


Термодинамическая схема теплового двигателя:

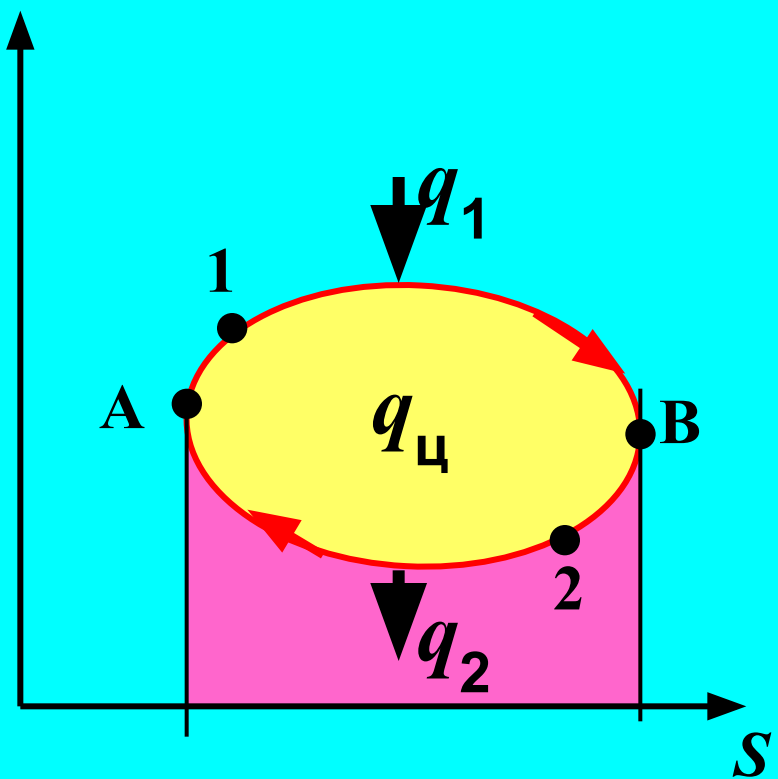


Второй закон термодинамики

Цикл в p - v координатах



Цикл в T - S координатах



A-B – подвод теплоты

B-A – отвод теплоты

1-й закон ТД для цикла:

$$dq = du + dl$$

$$\oint dq = \oint du + \oint dl$$



0

$$\oint dq = \oint dl$$

$$q_{\text{ц}} = l_{\text{ц}}$$

Показатели цикла

Полезно использованная теплота: $q_{\text{ц}} = q_1 - q_2$

Затраченная теплота: q_1

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

Вечный двигатель второго рода



Формулировки второго закона термодинамики

Клаузиус

«Теплота не может переходить от
холодного тела к теплomu даровым
процессом (без затраты работы)»

Формулировки второго закона термодинамики

Планк

«Невозможно построить
периодически действующую
машину, которая не производит
ничего другого, кроме работы и
охлаждения источника теплоты»

Формулировки второго закона термодинамики

Оствальд

«Осуществление

Perpetuum mobile 2-го рода
НЕВОЗМОЖНО»



Формулировки второго закона термодинамики

Томсон

«Энергия изолированной системы
постепенно деградируется»

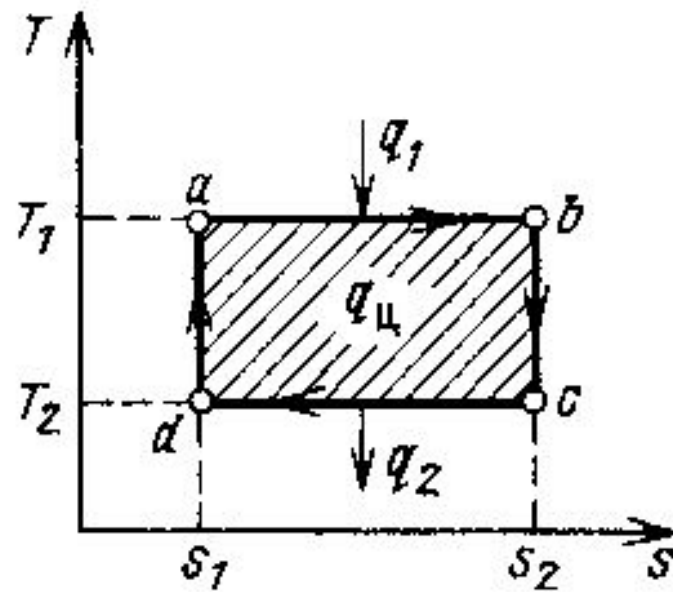
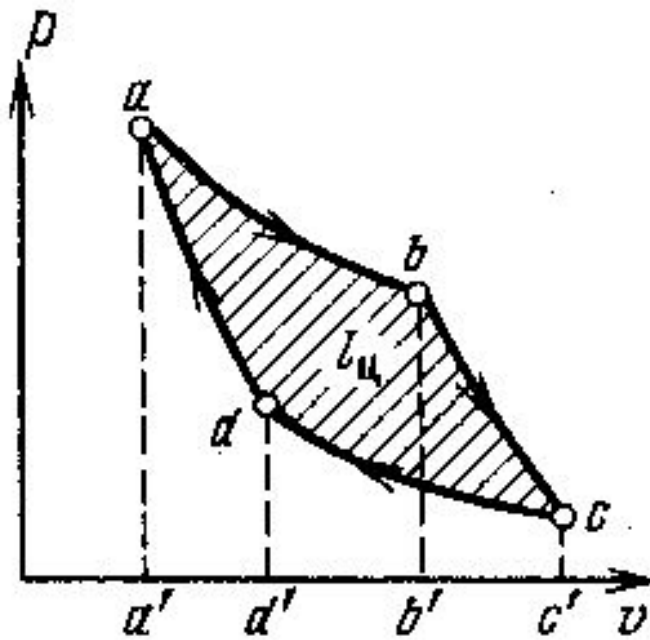
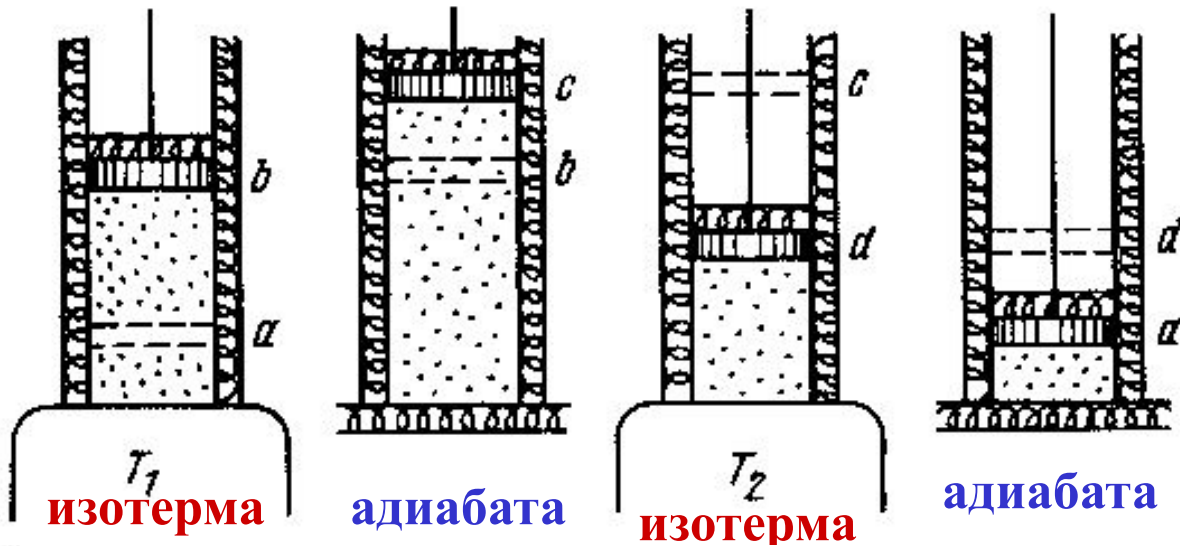
Формулировки второго закона термодинамики

БОЛЬЦМАН

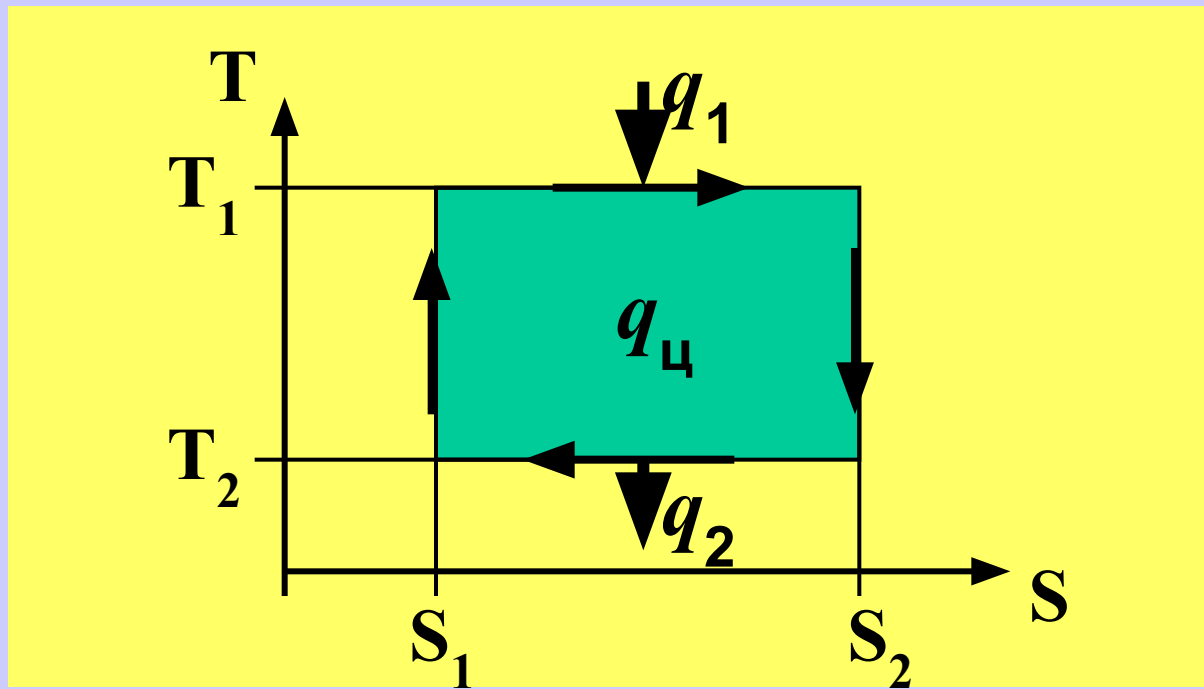
«Природа стремится от состояний
маловероятных к состояниям
более вероятным»

Цикл Карно (1824)

Прямой цикл Карно



Прямой цикл Карно



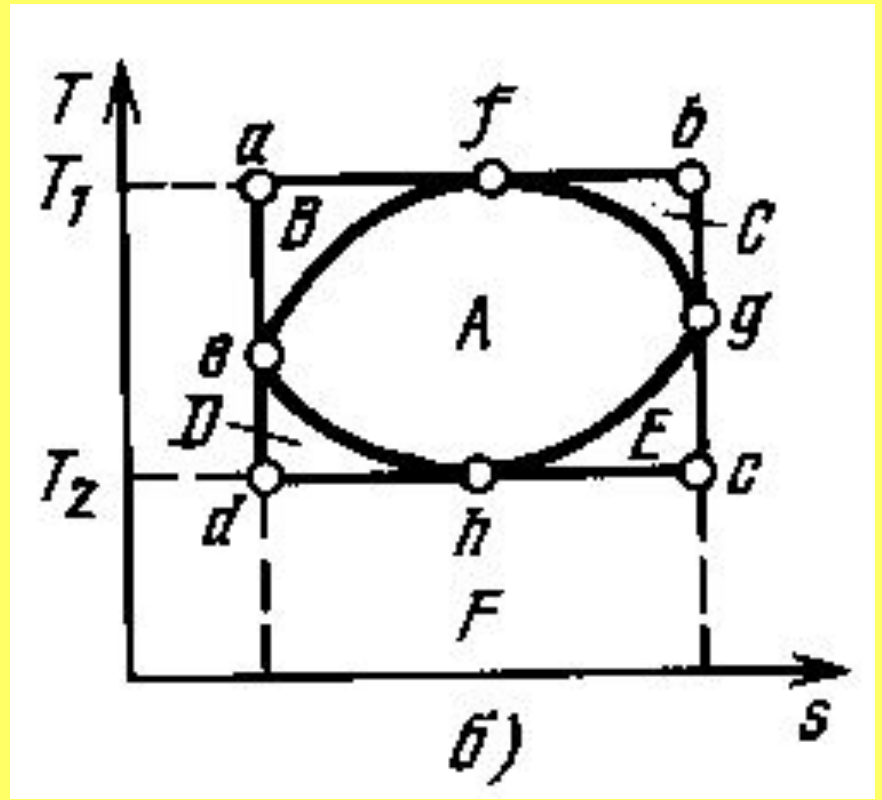
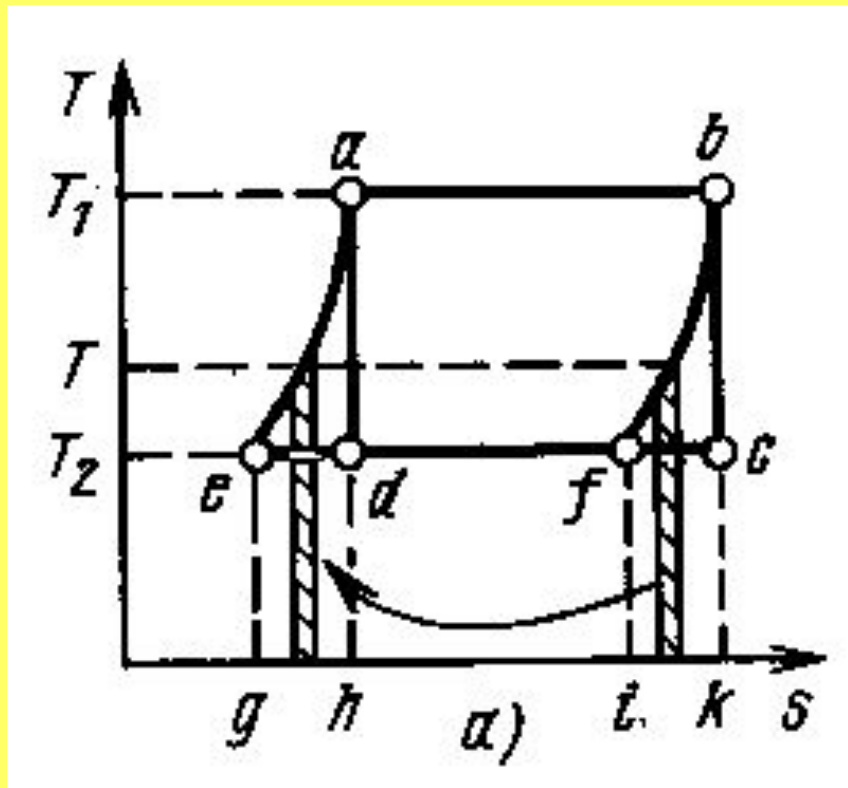
$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_1(S_2 - S_1) - T_2(S_2 - S_1)}{T_1(S_2 - S_1)}$$

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

К.П.Д. цикла Карно

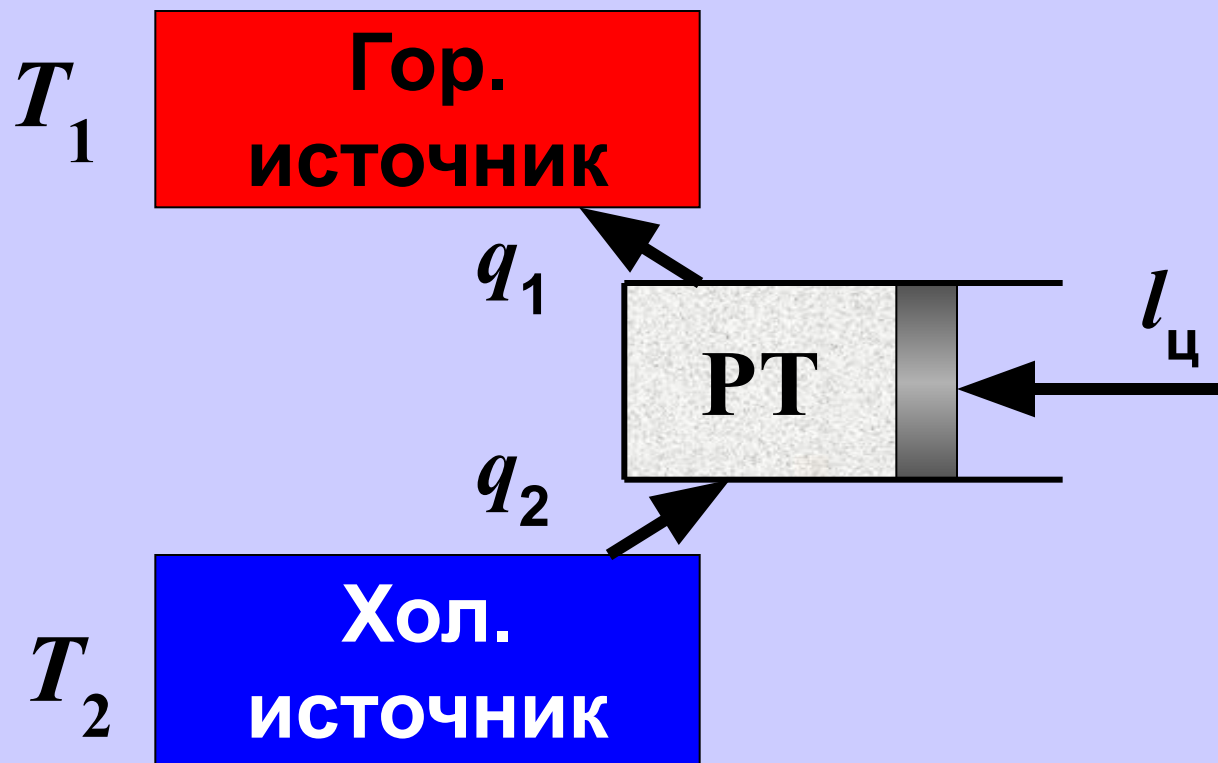
$t_1, ^\circ\text{C}$	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
η_t	0,40	0,58	0,68	0,74	0,78	0,81	0,83	0,85

Регенеративный цикл Карно



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

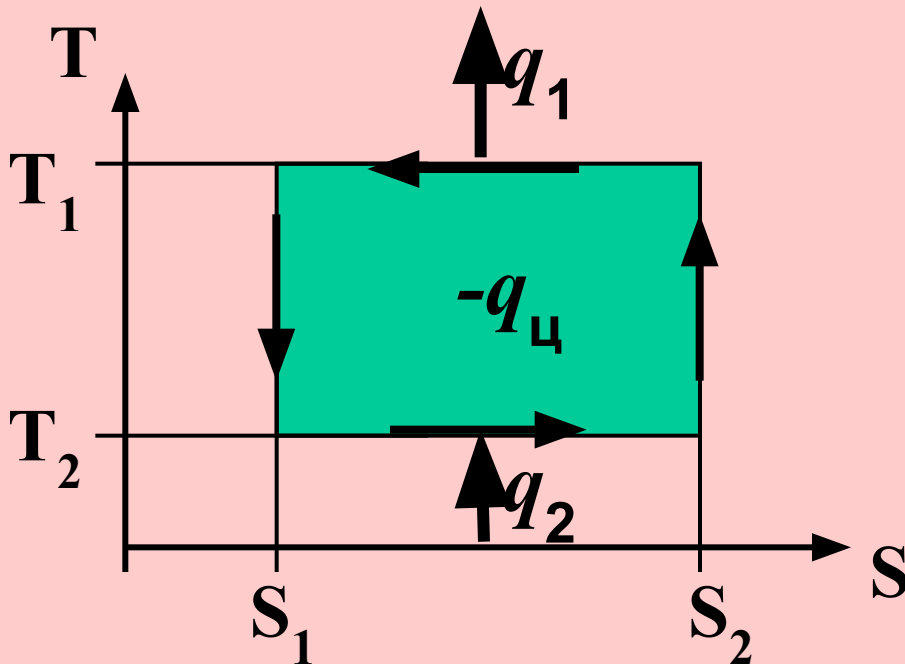
Термодинамическая схема теплового насоса:



Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_{\text{ц}}} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$$

Обратный цикл Карно



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