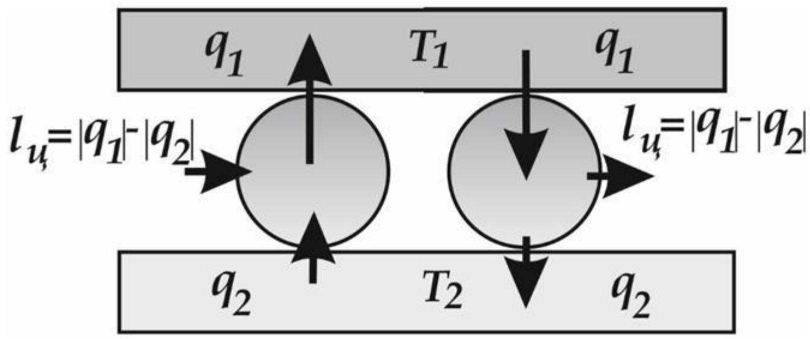
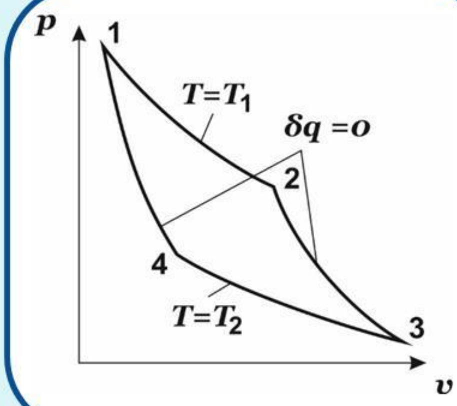
Темы 5 - 6

Тепловая машина

Теплота полностью возвращается в **обратимом регенеративном цикле !!!!!.**





«Цикл Карно»: **равновесные обратимые** процессы:

два изотермических при T_1 и T_2 - два адиабатных

«теорема Карно»:

термический КПД **обратимого цикла Карно** не зависит от рабочего тела.

$$\eta_t^{\text{оцк}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

ОПЫТ СВИДЕТЕЛЬСТВУЕТ

- **Всякая система стремится к состоянию равновесия, независимо от того быстро или медленно протекают в ней процессы.**

- **Невозможно всю теплоту превратить в полную работу, часть ее непременно теряется.**

- **«Естественные процессы развиваются необратимо в направлении увеличения беспорядка»** (Больцман).

Работа

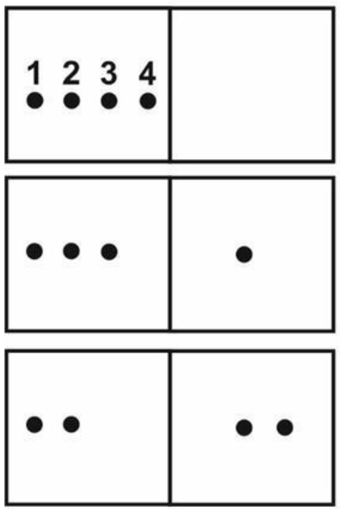
- **производится только при неравновесном состоянии,**
- **заканчивается в равновесном состоянии,**
- **а теорема Карно об обратимом (равновесном) цикле.**

Например, два тела с разной температурой касаются друг друга, и теплота может переходить от одного тела к другому, причем согласно первому закону термодинамики, нет никаких препятствий, чтобы горячее тело еще более нагрелось от холодного. Цикл Карно только при $\delta T \rightarrow 0$

Энтропия и вероятность

Вероятность состояния = (Число макросостояний, которое описывает это состояние системы) / (Общее число макросостояний системы)

W - число вариантов



$W = 1$

$W = 4$

$W = 6$

$$p_{4,0}^{4} = \frac{W_{4,0}^{4}}{W_{4,0}^{4} + W_{4}^{3} + W_{2,2}^{4}} = \frac{1}{1+4+6} = \frac{1}{11}$$

$$p_{3,1}^{4} = \frac{W_{3,1}^{4}}{W_{4,0}^{4} + W_{3,1}^{4} + W_{2,2}^{4}} = \frac{4}{1+4+6} = \frac{4}{11}$$

$$p_{2,2}^{4} = \frac{W_{2,2}^{4}}{W_{4,0}^{4} + W_{3,1}^{4} + W_{2,2}^{4}} = \frac{6}{1+4+6} = \frac{6}{11}$$

$$W_{N_1,N_2,N_3,\dots,N_n}^{N} = \frac{N!}{N_1!N_2!N_3!,\dots,N_n!}$$

$$N = \sum_{i=1}^{n} N_i$$

$$W_{25,25,25,25}^{100} = 1,61 \cdot 10^{57}$$

$$\boxed{s = k\ln(p)}$$

k - постоянная Больцмана;
p – вероятность состояния

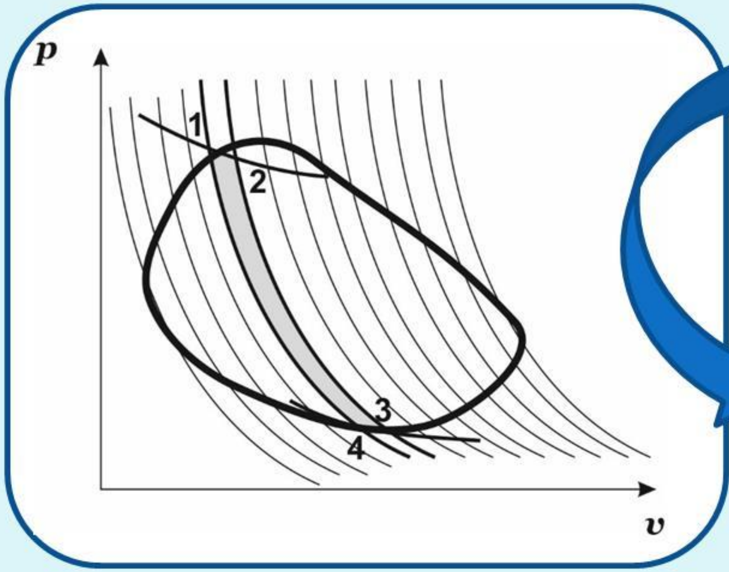
И из теплоты и из вероятности – энтропия экстенсивна

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \eta_t^{\text{оцк}} > \eta_t^{\text{нцк}}$$

$$\eta_t^{\text{оцк}} = \frac{\delta q_1 - |\delta q_2|}{\delta q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{\delta q_1}{T_1} = \frac{|\delta q_2|}{T_2} \Rightarrow \frac{\delta q_1}{T_1} + \frac{\delta q_2}{T_2} = 0$$

для произвольного цикла (i- подводится), (j- отводится):

$$\sum_i \left(\frac{\delta q_i}{T_i}\right) + \sum_j \left(\frac{\delta q_j}{T_j}\right) = 0$$



$$\boxed{\oint \frac{\delta q}{T} = 0}$$

Интеграл Клаузевица для **любого обратимого цикла**

Как следствие из «Интеграла Клаузевица»

- **Энтропи́я** (от др.-греч. ἐντροπία — поворот, превращение) — в естественных науках мера беспорядка системы, состоящей из многих элементов.

$$\frac{\delta q}{T} = ds$$

$$\delta q = Tds = du + pdv = dh - vdp$$

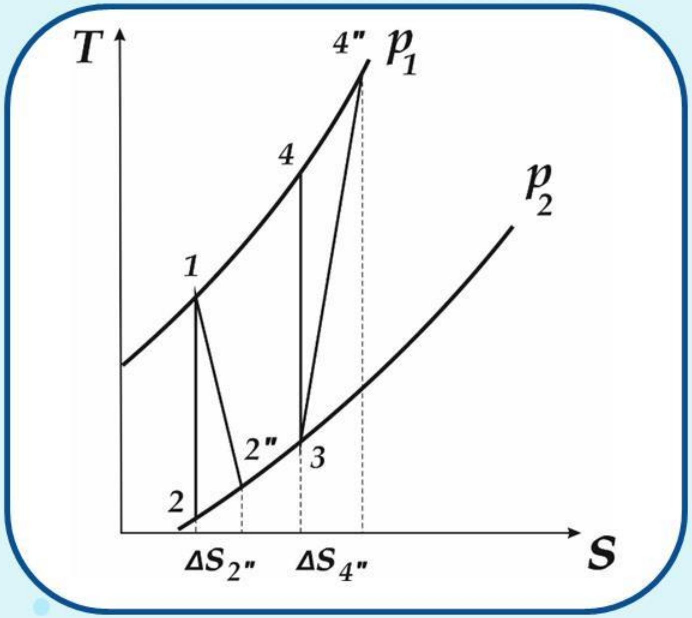
Необратимая адиабата

Неравновесные: $dS > \frac{\delta Q}{T}$ **Равновесные:** $dS = \frac{\delta Q}{T}$

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

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

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta Q'}{T} = dS_{\text{обратимый}} + dS'_{\text{необратимый}}$$



Для необратимых процессов

$$\oint ds > 0$$

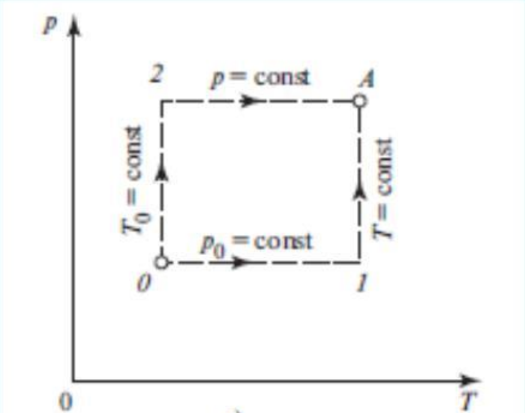
$$\oint \frac{\delta q}{T} \leq 0$$

При необратимом процессе необходимо отводить и теплоту, которая подводится из-за внутренней диссипации

$$s(p,T)=s_0(p_0,T_0)+\int_{p_0}^{p}\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T dp+\int_{T_0}^{T}\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p dT$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T=-\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$$

$$s-s_0=\int_{p_0}^{p}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp+\int_{T_0}^{T}\frac{c_p}{T}dT$$

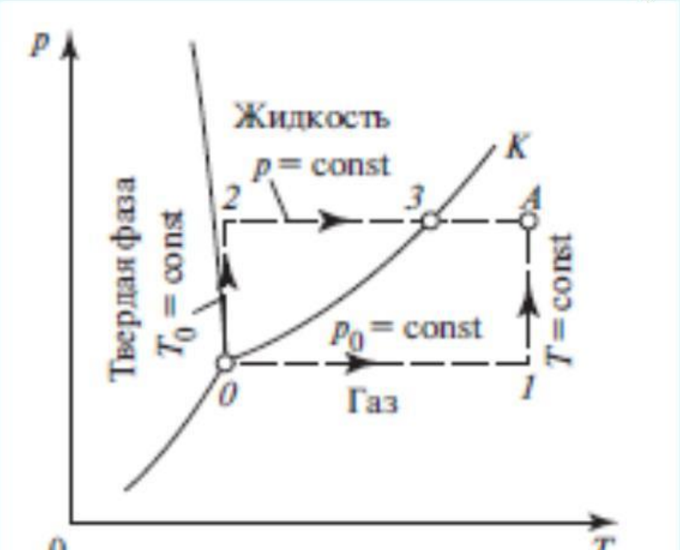


а)

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p=\frac{c_p}{T}$$

«0» - тройная точка

$$s''-s'=\frac{r}{T}$$



б)

O-1-A

$$s-s_0=\frac{r_0}{T_0}+\int_{T_0}^{T}\frac{c_p^{\text{газ}}}{T}dT-\int_{p_0}^{p}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p^{\text{газ}}dp$$

O-2-3-A

$$s-s_0=-\int_{p_0}^{p}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p^{\text{жид.}}dp+\int_{T_0}^{T_s}\frac{c_p^{\text{жид.}}}{T}dT+\frac{r_s}{T_s}+\int_{T_s}^{T}\frac{c_p^{\text{газ}}}{T}dT$$

$$s(v,T)-s_0(v_0,T_0)=\int_{v_0}^{v}\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv+\int_{T_0}^{T}\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T=\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$$

$$s-s_0=\int_{v_0}^{v}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv+\int_{T_0}^{T}\frac{c_v}{T}dT$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v=\frac{c_v}{T}$$

$$s(h,p)-s_0(h_0,p_0)=\int_{h_0}^{h}\left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)_T dh+\int_{p_0}^{p}\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_h dp$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)_p=\frac{1}{T}$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_h=-\frac{v}{T}$$

$$s-s_0=\int_{h_0}^{h}\frac{dh}{h}+\int_{p_0}^{p}\frac{v}{T}dp$$

Энтропия идеального газа

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dv = \left| p = \frac{RT}{v} \right| = c_v \frac{dT}{T} + \frac{RT}{T} \frac{dv}{v} = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \frac{v}{T} dp = \left| v = \frac{RT}{p} \right| = c_p \frac{dT}{T} - \frac{RT}{T} p = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

$$\Delta s_{12} = c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$\boxed{\Delta s_{12} = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}$$

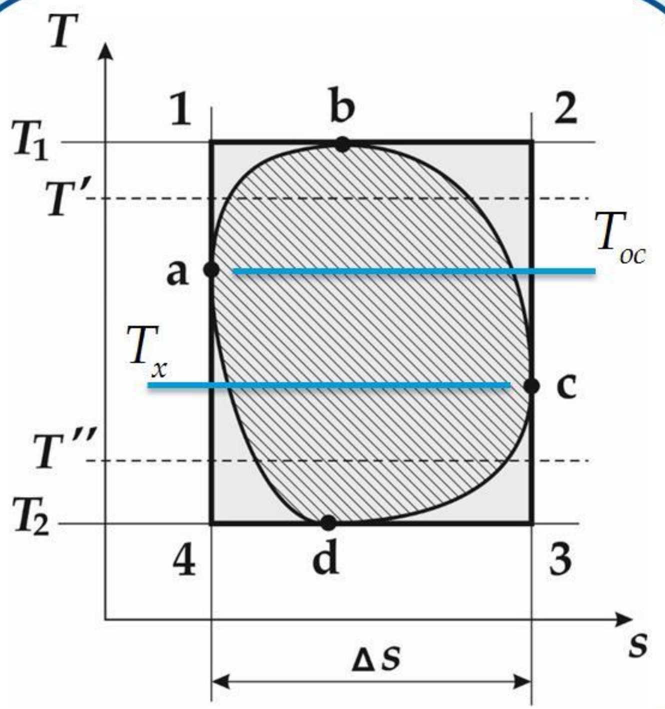
$$\Delta s_{12} = c_p \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) + c_v \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$s_i = s_i^0\left(T, p_0\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_0}\right)$$

$$s_i^0\left(T, p_0\right) = \int_o^T c_p \frac{dT}{T}, \quad p_0 = 1 бар$$

$$s_i = s_i^0\left(T, p_0\right) - R \ln\left(p\right)$$

Удобно циклы тепловых машин - в *Ts* - диаграммах



$$q_1 = q_{1\to 2} = T_1 \Delta s \qquad |q_2| = |q_{3\to 4}| = T_2 |\Delta s|$$

$$\eta_t^k = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} - \text{теорема Карно}$$

$$l_ц = |q_1| - |q_2|$$

Прямой (по часовой):

$$l_ц > 0, \quad q_1 > |q_2|, \quad q_1 > 0, q_2 < 0$$

$$q_1 = q_{abc} = T' \Delta s \qquad |q_2| = |q_{cda}| = T'' |\Delta s|$$

$$\eta_t^{abcd} = \frac{q_{abc} - |q_{cda}|}{q_{abc}} = \frac{T' - T''}{T'} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Обратный (против часовой):

$$l_ц < 0, \quad |q_1| > |q_2|, \quad q_1 < 0, q_2 > 0$$

$$\varepsilon_х = \frac{q_2}{|l_ц|}$$

$$\frac{T''}{T' - T''} < \frac{T_x}{T_{oc} - T_x}$$

Абсолютная шкала температур

С помощью идеального обратимого цикла Карно, КПД которого не зависит от рабочего тела поставим в соответствие теплоты подвода отвода и соответствующие температуры нагревателя и охладителя:

$$dq = Tds, \quad pv = \frac{R_\mu}{\mu} T_г$$

$$\eta_t^k = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \qquad \Rightarrow T_1 = T_2 \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$t_2 = 0{,}01^\circ C, \quad p = 611 \text{ Па}$$

$$T_2 = 273{,}15 + 0{,}01 = 273{,}16 \text{ К}$$

Максимальная работа. Эксергия

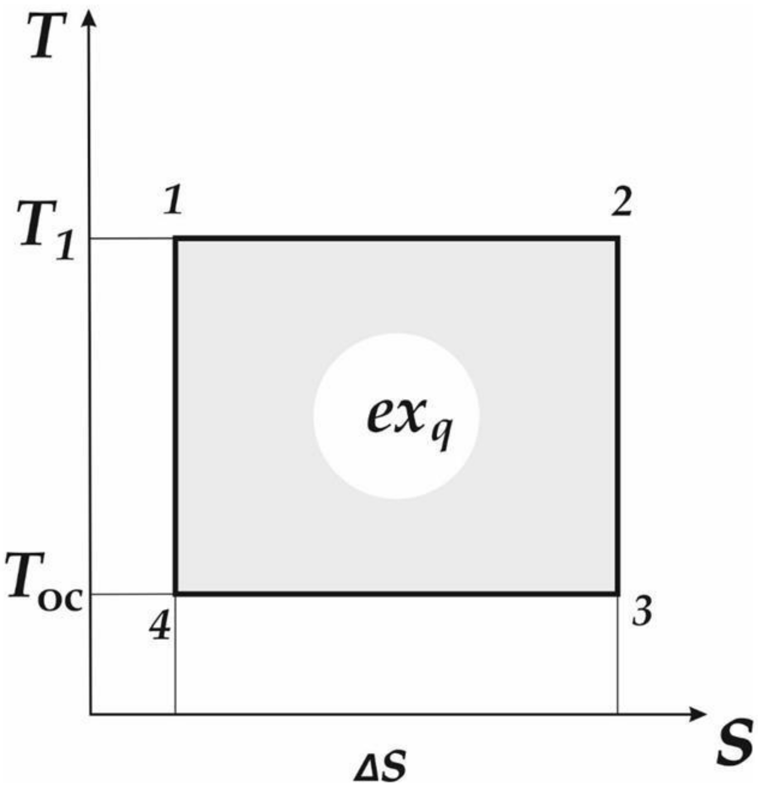
1. В изолированной системе возможно получить работу только в том случае, если она не находится в состоянии термодинамического равновесия. Работоспособность системы **исчерпывается** при достижении в ней **равновесного состояния**.

2. **Наибольшая возможная работа** может быть получена при переходе системы из неравновесного состояния в равновесное, при протекании в ней **только обратимых процессов**.

Эксергия
(от греч. **ex** — приставка, обозначающая здесь высокую степень,
и **érgon** — работа),
работоспособность, термин, применяемый в термодинамике для обозначения **максимальной работы**, которую может совершить система при переходе из данного состояния в равновесие с окружающей средой.

Согласно этому энергию разделяют на Эксергию (ex –что в принципе можно в работу) и Анергию (an – что никак нельзя преобразовать в работу)

Эксергия теплоты

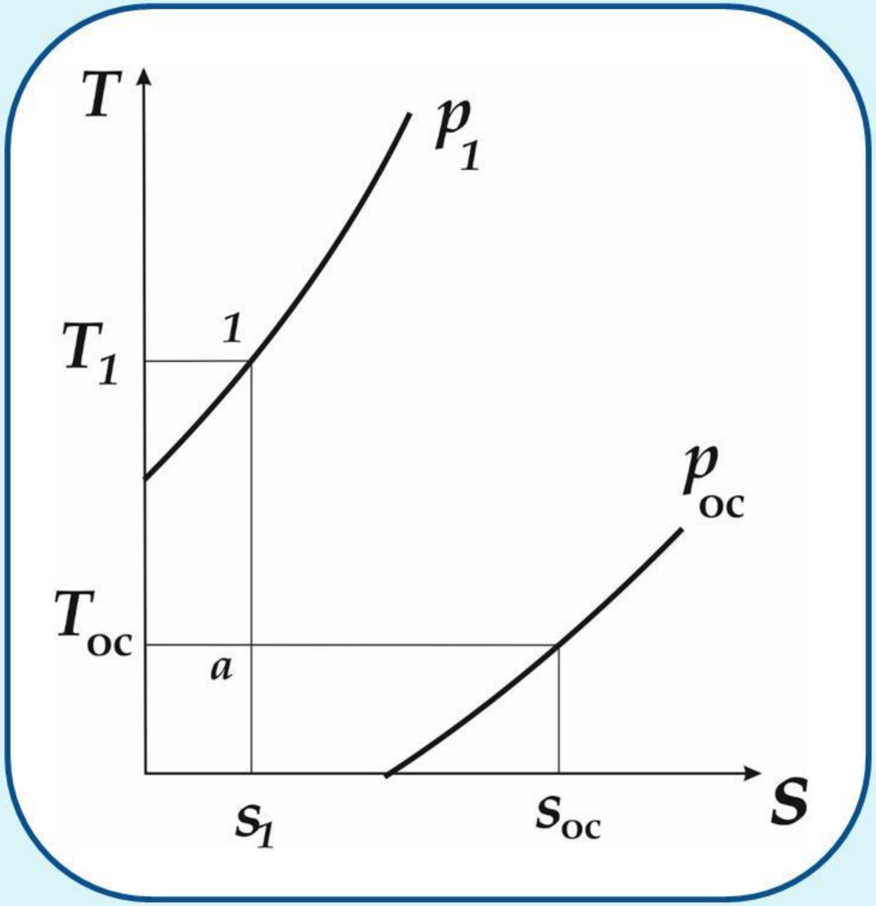


$$q = T\Delta s$$

$$\eta_t^{\text{оцк}} = \frac{l_{\max}}{q_1} = 1 - \frac{T_{\text{ос}}}{T_1}$$

$$ex_q = q_1\eta_t^{\text{оцк}} = q_1\left(1 - \frac{T_{\text{ос}}}{T_1}\right) = q_1 - T_{\text{ос}}\Delta s$$

Эксергия потока рабочего тела



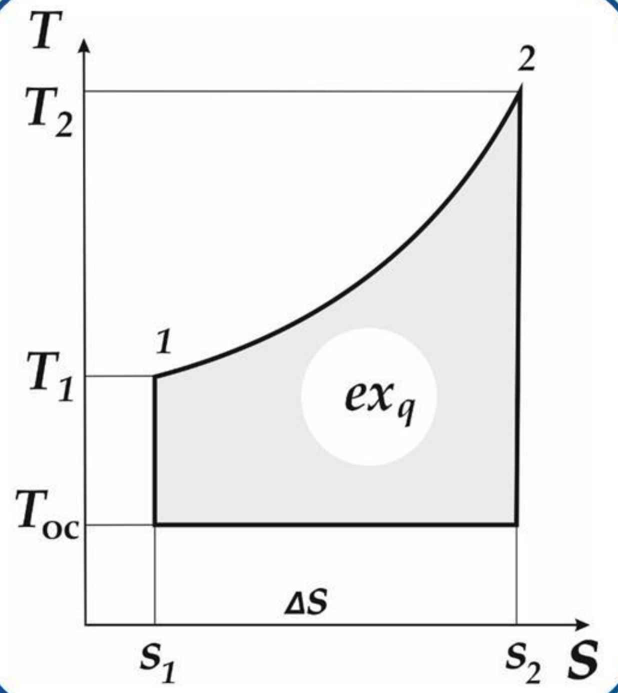
$$ex = l_a + l_{T_{\text{ос}}}$$

$$0 = h_{\text{ос}} - h_1 + l_a \Rightarrow l_a = h_1 - h_{\text{ос}}$$

$$T_{\text{ос}}(s_{\text{ос}} - s_1) = 0 + l_{T_{\text{ос}}}$$

$$ex_1 = h_1 - h_{\text{ос}} - T_{\text{ос}}(s_1 - s_{\text{ос}})$$

Что касается работы любого процесса



$$l = h_1 - h_2 + q_{1\to 2}$$

$$q_{1\to 2} = \overline{T}_{12}(s_2 - s_1)$$

$$h_1 = ex_1 + h_{\text{ос}} + T_{\text{ос}}(s_1 - s_{\text{ос}})$$

$$h_2 = ex_2 + h_{\text{ос}} + T_{\text{ос}}(s_2 - s_{\text{ос}})$$

$$l = ex_1 - ex_2 + \left(\overline{T}_{12} - T_{\text{ос}}\right)(s_2 - s_1)$$

$$\boxed{l = ex_1 - ex_2 + ex_q}$$

$$\boxed{l = ex_1 - ex_2 + ex_q \equiv l_{\max}}$$

$$\eta_{ex} = \frac{l_{\text{полезная реальная}}}{\sum ex_1 - \sum ex_2}$$ - процесс с выполнением полезной работы

$$\eta_{ex} = \frac{\sum ex_2}{\sum ex_1}$$ - процесс с без выполнения полезной работы

Суммарные эксергетические потоки системы на входе $\sum ex_1$ и выходе $\sum ex_2$

$\Delta ex = \sum ex_1 - \sum ex_2$ - либо это использовано полностью, либо с потерями

Потеря возможной работы системы (эксергии) представляет собой произведение абсолютной температуры окружающей среды на увеличение энтропии системы, вызванное необратимостями происходящих в ней процессов, - **теорема Гюи – Стодолы** в честь ученых, установивших эту закономерность.

$$\Delta ex = T_{\text{ос}} \Delta S_{\text{системы}}$$

$\Delta S_{\text{системы}}$ – возрастание энтропии системы за счет необратимости процессов.

Эксергия тепловых машин. Общий подход.

$$\eta_{ex} = \frac{ex_{\text{отведенная}}}{ex_{\text{подведенная}}}$$

Химическая удельная эксергия незначительно отличается от $ex_{\text{топлива}} = Q_{\text{н}}^{p}$

$$ex_{\text{подведенная}} = ex_{\text{топлива}} = Q_{\text{н}}^{p}$$

В «простых» ДВС, ГТУ и ПСУ $ex_{\text{отведенная}} = l_{\partial}$ или l_e

В ПСУ для ТЭЦ $ex_{\text{отведенная}} = l_e + ex_q$ полезная отопления для потребителей

Эксергетический анализ парового котла

$$\eta_{ex}=\frac{ex_{\text{подведенная}}-ex_{\text{отведенная}}}{ex_{\text{подведенная}}}=\frac{ex_{\text{топлива}}-\left(ex_{\mathrm{H_2O}\text{ на входе}}-ex_{\mathrm{H_2O}\text{ на выходе}}\right)}{ex_{\text{топлива}}}$$

Эксергетический анализ компрессоров и насосов

неохлаждаемый

$$\eta_{ex}=\frac{ex_{\text{рабочее тело на выходе}}-ex_{\text{рабочее тело на входе}}}{l_{\text{к}}}$$

охлаждаемый

$$\eta_{ex}=\frac{\left(ex_{\text{рабочее тело на выходе}}-ex_{\text{рабочее тело на входе}}\right)+ex_{q\text{ полезная для потребителей}}}{l_{\text{к}}}$$

Эксергетический анализ трубопроводов и дроссельных устройств

$$\eta_{ex} = \frac{ex_{\text{на выходе}}}{ex_{\text{на входе}}}$$

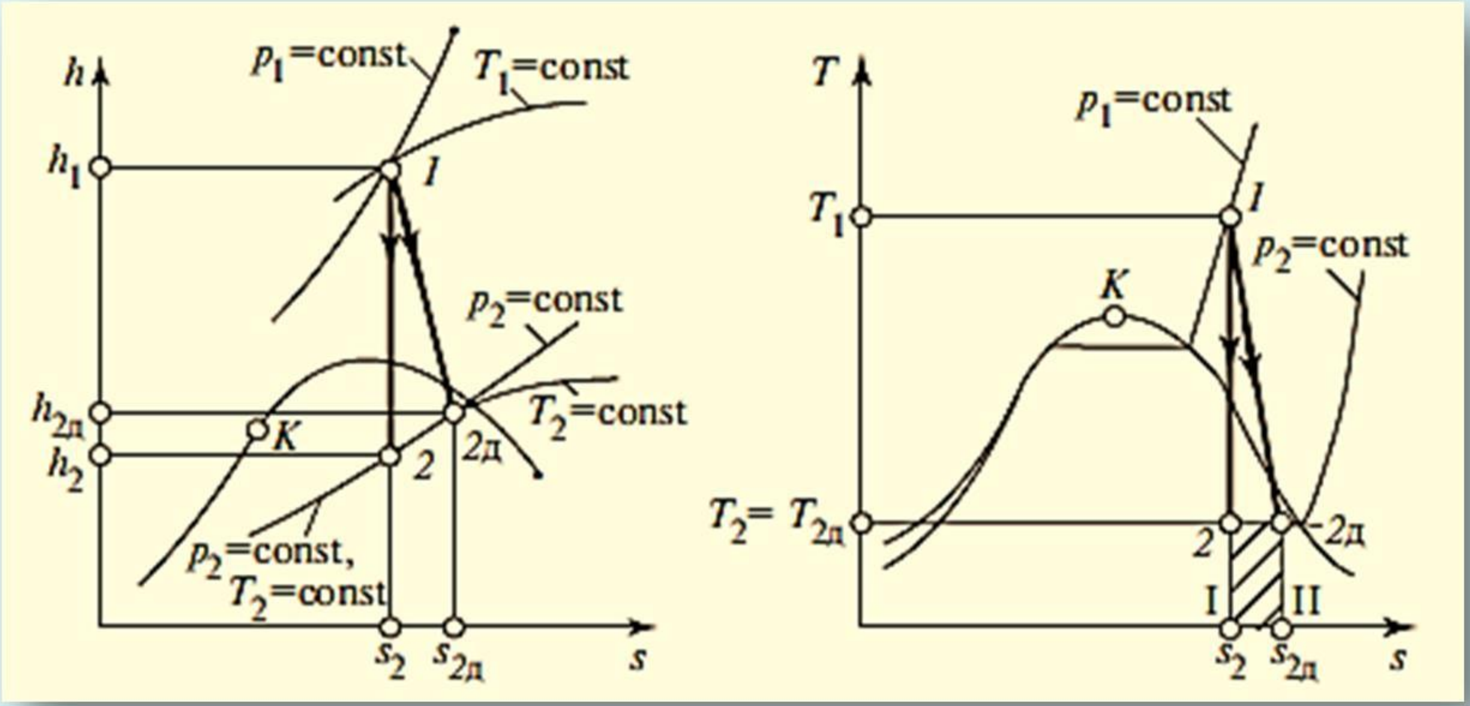
Эксергетический анализ теплообменников

$$\eta_{ex} = \frac{ex_{\text{отвода в теплообменнике}}}{ex_{\text{подвода в теплообменнике}}} = \frac{\Delta ex_{\text{нагреваемого}}}{\Delta ex_{\text{охлаждаемого}}}$$

$$\Delta ex_{\text{нагреваемого}} = h_2'' - h_2' - T_0\left(s_2'' - s_2'\right)$$

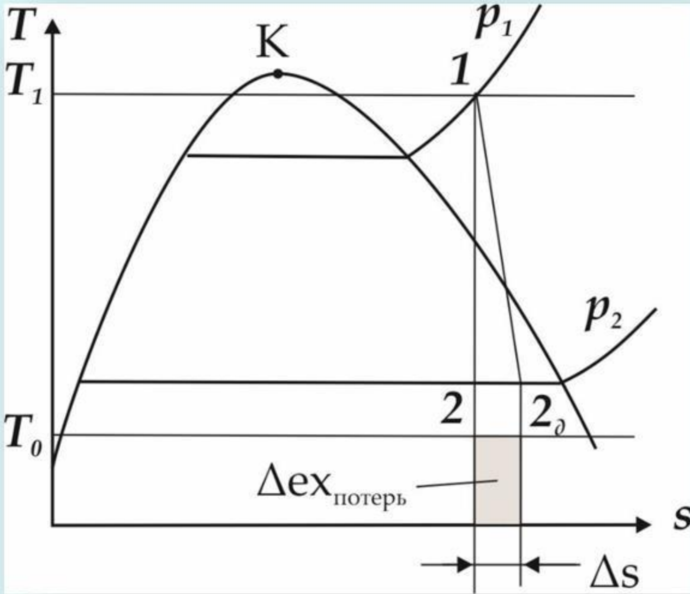
$$\Delta ex_{\text{охлаждаемого}} = h_1' - h_1'' - T_0\left(s_1' - s_1''\right)$$

Эксергетический анализ турбин



Внутренний относительный КПД турбины – $\eta_{0i}^{T} = \dfrac{l_\partial}{h_1 - h_2} = \dfrac{h_1 - h_{2\partial}}{h_1 - h_2}$

сравнение идеального и реального процессов



$$\Delta ex_{потерь} = ex_1 - ex_{2д} - l_д$$
$$ex_1 = h_1 - h_0 - T_0\left(s_1 - s_0\right)$$
$$ex_{2д} = h_{2д} - h_0 - T_0\left(s_{2д} - s_0\right)$$
$$l_д = h_1 - h_{2д}$$

$$\eta_{ex} = \frac{l_д}{ex_1 - ex_{2д}} = \frac{h_1 - h_{2д}}{\left(h_1 - h_{2д}\right) - T_0\left(s_1 - s_{2д}\right)}$$

Эксергетический анализ –

сравнение двух эффектов одного реального процесса .

При этом η_{ex} **уменьшается при неизменном** η_{0i}^{T}

$$\left(h_1 - h_2\right) - \left(h_1 - h_{2д}\right) = q_{1-2д} = \overline{T}_{1-2д}\left(s_1 - s_{2д}\right)$$

$$\eta_{0i}^{T} = \frac{l_д}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_{2д}}{\left(h_1 - h_{2д}\right) - \overline{T}_{1-2д}\left(s_1 - s_{2д}\right)}$$