

Тема 2.

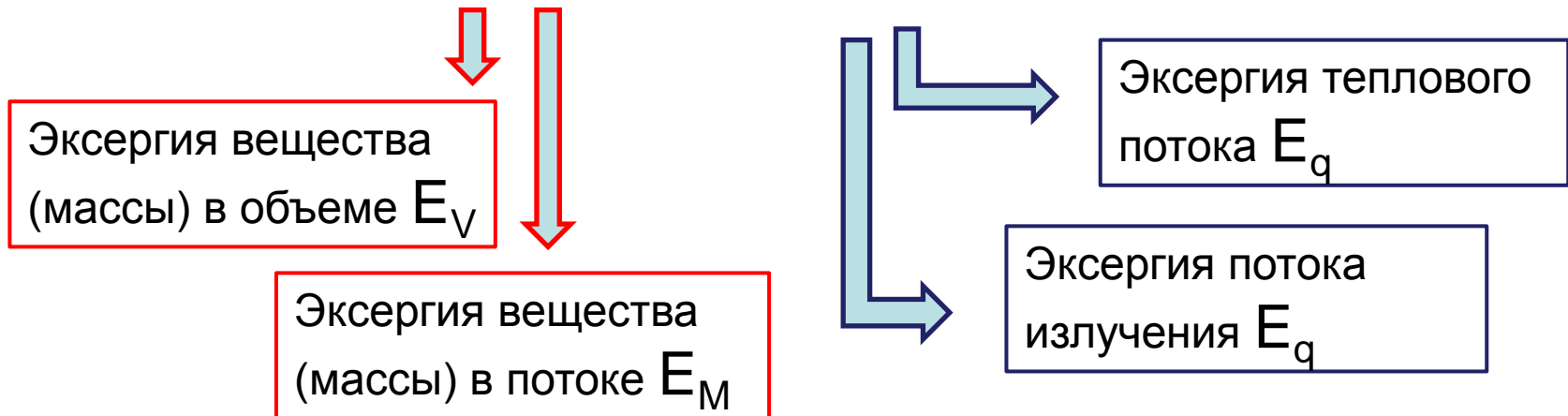
Теоретические основы ЭА

Эксергетические функции и параметры

Виды и составляющие эксергии

$$E < W$$

E делится по признаку **наличия** или **отсутствия** тела - носителя эксергии

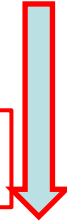


Составляющие эксергии вещества в потоке

E_M делится на виды в зависимости от формы энергетического взаимодействия с окр средой через контрольную поверхность системы



Термическое взаимодействие - T

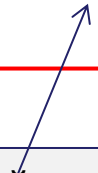


Деформационное взаимодействие - P



Реакционное (концентрационное) взаимодействие – химический потенциал μ

Необходим обмен массой с окр ср



2.1. Эксергия теплоты ex_q

Эксергией ex_q потока теплоты q , полученной от горячего источника с температурой T , является *максимальная работа цикла* L_{\max} , которая может быть получена за счёт этой теплоты при условии, что холодным источником является окружающая среда с температурой T_0 , давление P_0

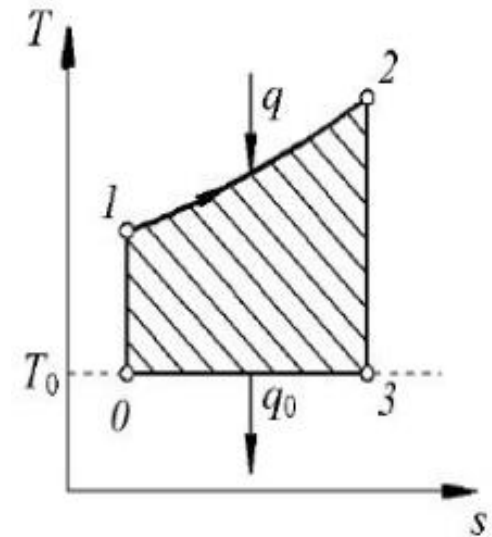
$$L_{\max} = ex_q$$

Максимальная работа за счёт потока q для данного интервала температур горячего и холодного источников ($T \div T_0$) может быть получена только в цикле Карно (рисунок 1).

Эксергия теплоты при переменной температуре источника

$$l_{\max} = q - |q_0| = \int_{s_1}^{s_2} T ds - \int_{s_0}^{s_3} |T_0 ds.$$

интегрирование проводим в одинаковых пределах изменения энтропии



$$l_{\max} = \int (T - T_0) ds = \int (T - T_0) dq / T = \int (1 - T_0 / T) dq = q - T_0 \int dq / T.$$

При условии, что за теплоприемник принята естественная окружающая среда, величину

$$ex_q = q - T_0 \int dq / T$$

называют *эксергией теплоты*

$$ex_q = q - T_0 \int dq / T$$



1. Эксергия теплоты не является функцией состояния

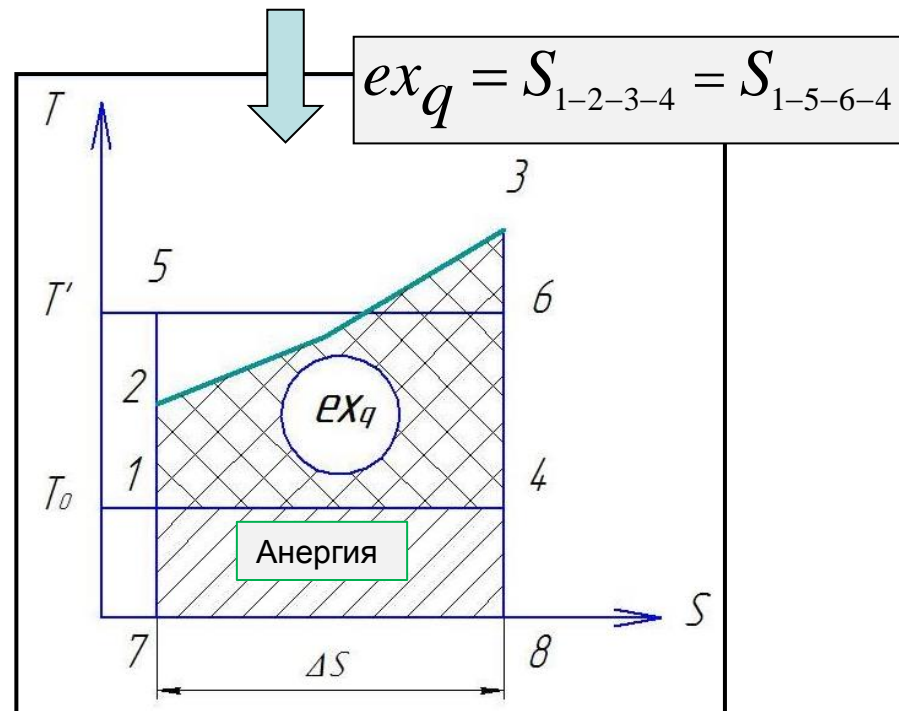
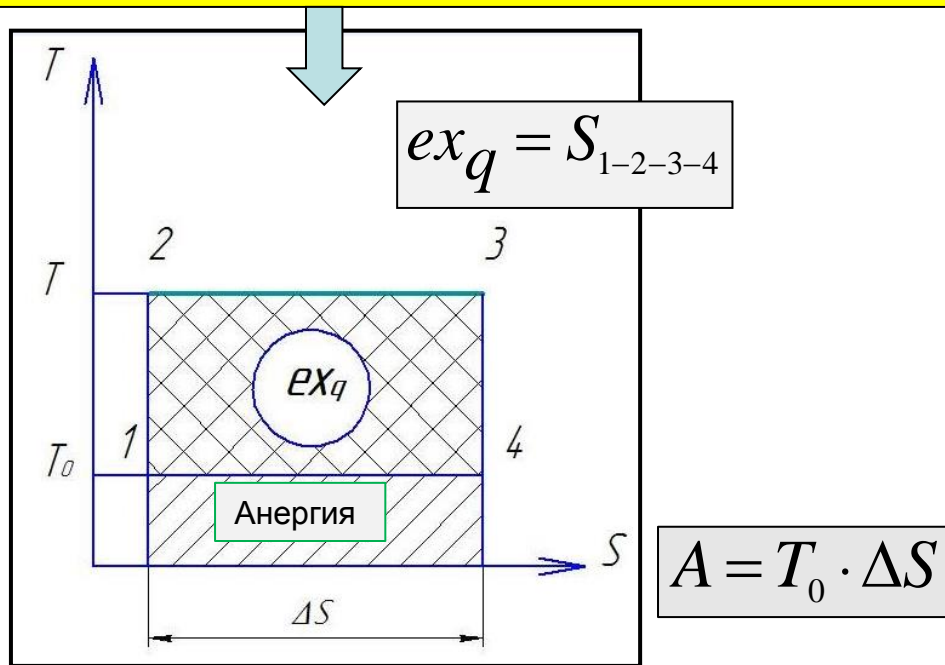
2. Эксергия определенного количества теплоты тем больше, чем выше температура теплоотдатчика T .

Графическая иллюстрация ex_q

$$ex_q = q - T_0 \int dq / T$$

Максимальная работа за счёт потока q для данного интервала температур горячего и холодного источников ($T \neq T_0$) может быть получена только в цикле Карно

Изобарный процесс подвода теплоты $P = \text{const}$, переменная температура ($T \uparrow$),



$$l_{max} = q \times \eta_t^K = q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

-непревратимая часть теплоты в работу

$$ex_q = q - T' \cdot \Delta S,$$

$$ex_q = q \left(1 - \frac{T_0}{T'} \right)$$

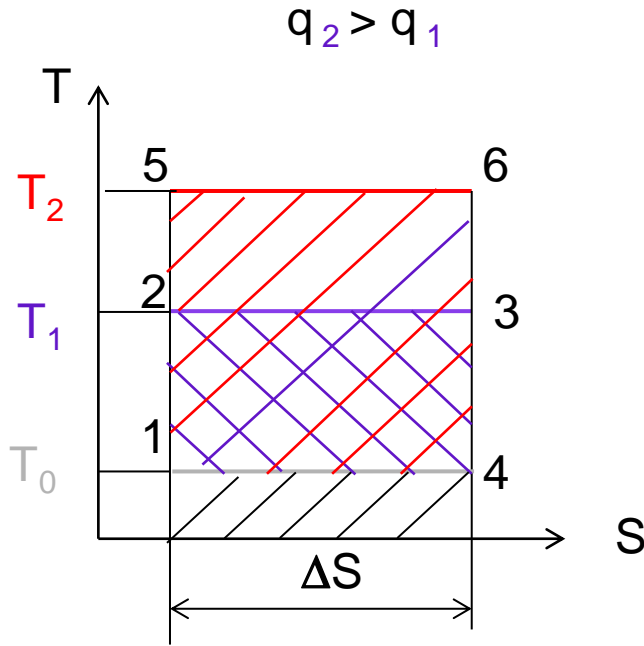
$$ex_q = q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

$$ex_q = q - T_0 \cdot \Delta S$$

7

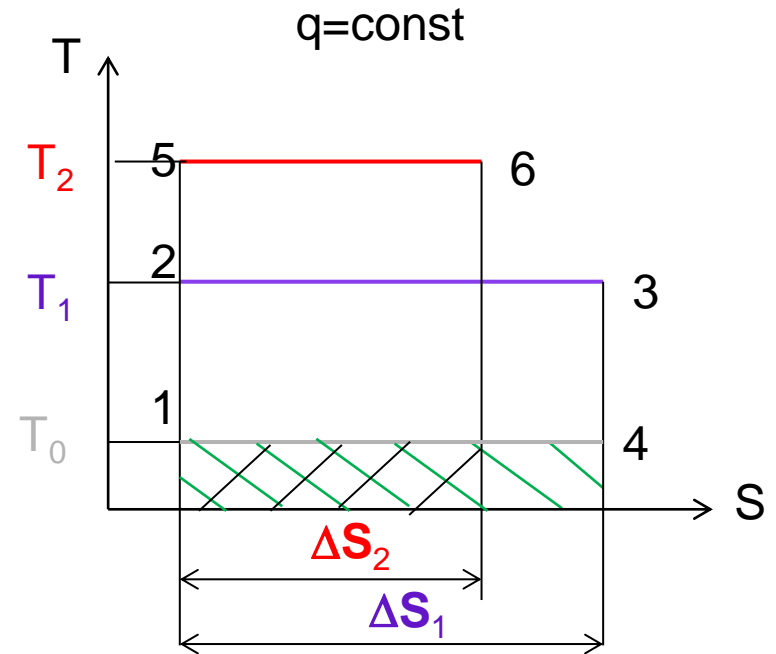
$T' = \frac{q}{\Delta S}$ средняя термодинамическая температура подвода теплоты

Эксергия потока теплоты зависит от температуры источника теплоты. Чем выше температура источника теплоты, тем больше эксергия.



$$Ex_2 = q_2 - T_0 \cdot \Delta S = S_{1564}$$

$$Ex_1 = q_1 - T_0 \cdot \Delta S = S_{1234}$$

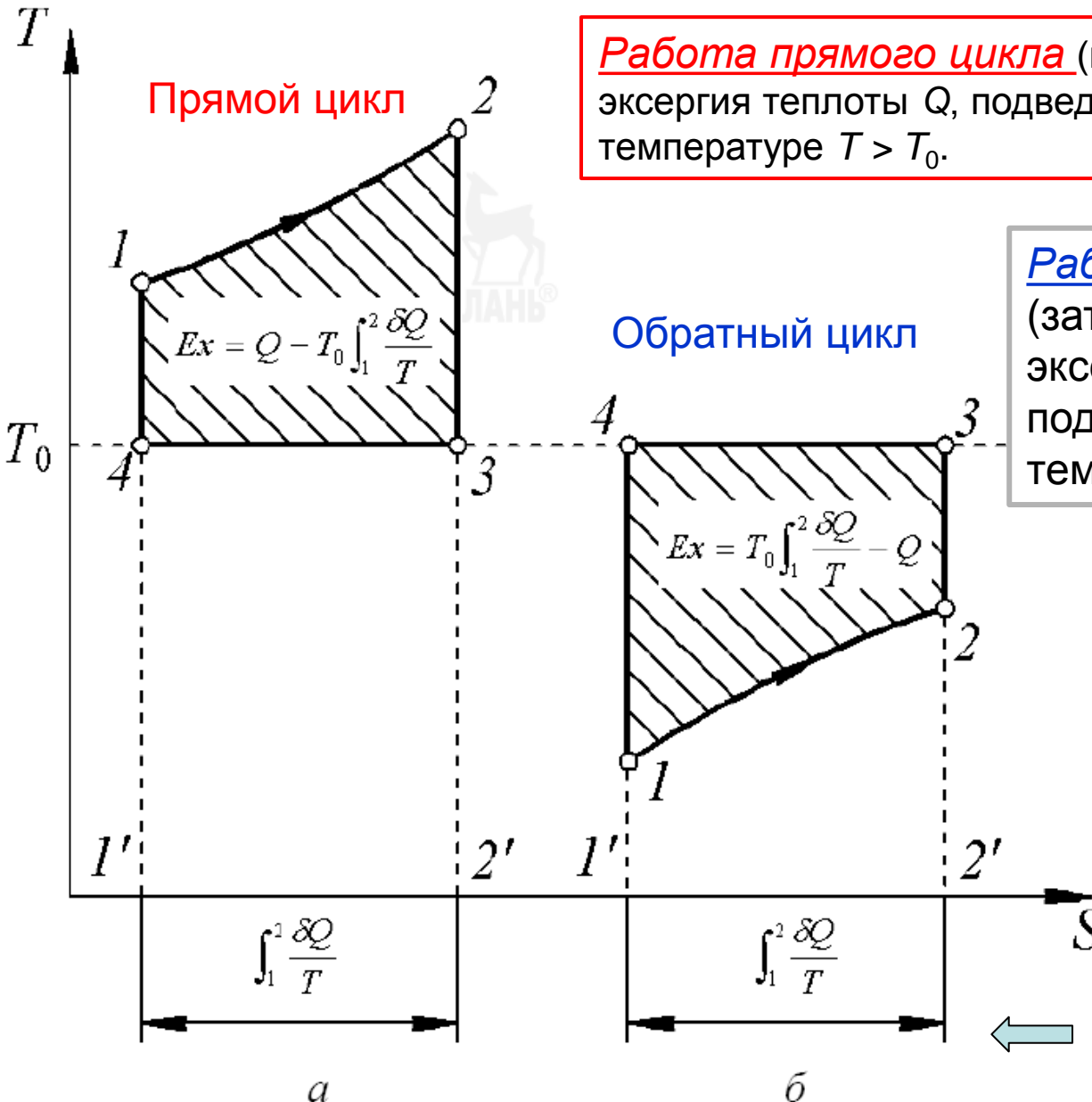


$$q = \text{const} = S_{1234} = S_{1564}$$

$$Ex_2 = q - T_0 \cdot \Delta S_2 = S_{1564}$$

$$Ex_1 = q - T_0 \cdot \Delta S_1 = S_{1234}$$

Подвод теплоты от источника с переменной T



Работа прямого цикла (получаемая работа) есть эксергия теплоты Q , подведенной к рабочему телу при температуре $T > T_0$.

Работа обратного цикла (затрачиваемая работа) есть эксергия теплоты Q , подведенной к хладагенту при температуре $T < T_0$.

Подведенная теплота
(для обоих случаев)

$$Q = F_{1'122'1'}$$

Эксергия теплоты

$$ex_q = F_{12341}$$

Потери эксергии теплоты при теплообмене

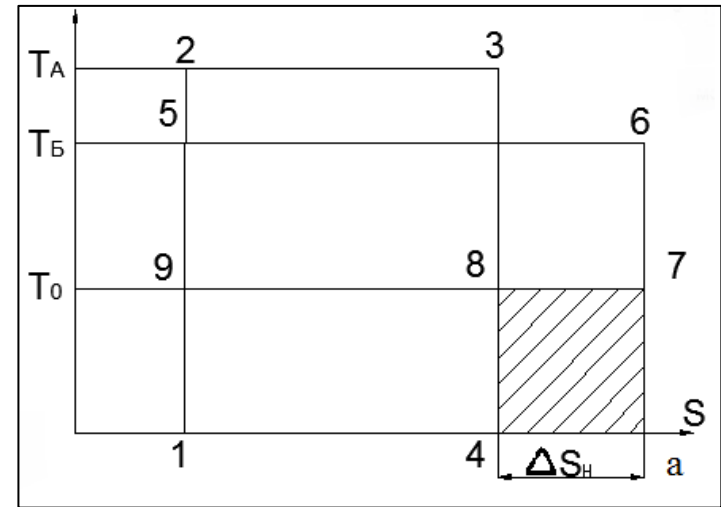
Пример. Теплота в количестве $q=1000$ кДж/кг передаётся от тела А с постоянной температурой $T_A=2000$ К к телу Б с постоянной температурой $T_B=500$ К. Температура окружающей среды $T_0=290$ К. Определить потери эксергии теплоты.

До теплообмена эксергия теплоты при $T_A=2000$ К

$$(ex_q)_{T_A} = q \left(1 - \frac{T_0}{T_A} \right) = 855 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергия той же теплоты, но при более низкой температуре $T_B=500$ К

$$(ex_q)_{T_B} = q \left(1 - \frac{T_0}{T_B} \right) = 420 \text{ кДж/кг.}$$

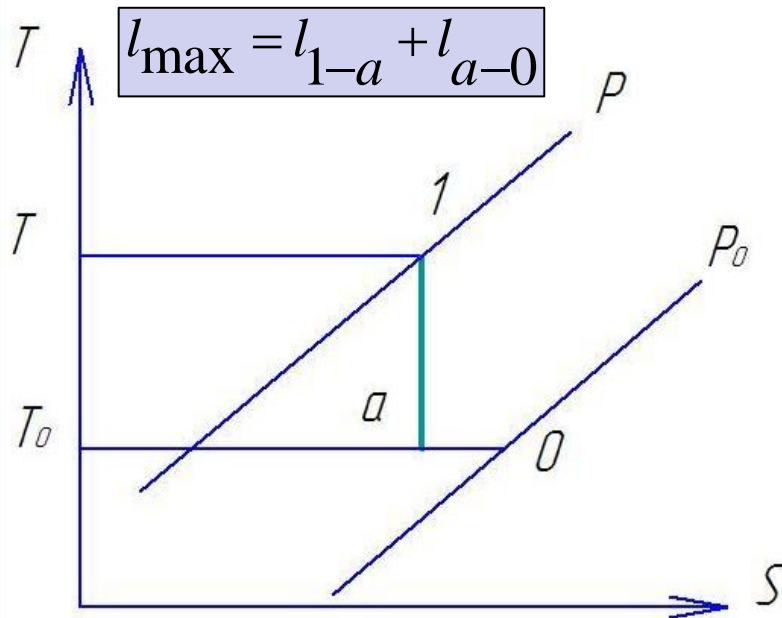


В процессах теплообмена между телами при конечной разности температур (внешне необратимый процесс) происходит потеря эксергии тепла.

$$\Delta ex_{пот} = (ex_q)_{T_A} - (ex_q)_{T_B} = 435 \text{ кДж/кг.}$$

2.2. Эксергия потока рабочего тела ex

Эксергией потока рабочего тела ex с параметрами P и T называют максимальную работу, которую можно получить от потока в процессе его обратимого перехода в состояние равновесия с окружающей средой (P_0 и T_0)



(1-a) – адиабатический процесс

$$l_{1-a} = h - h_a$$

(a-0) – изотермический процесс

$$l_{a-0} = q_{a-0} - \Delta h_{a-0} = T_0 \cdot (S_0 - S) - (h_0 - h_a)$$

$$l_{\max} = h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0)$$

$$ex = h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0)$$

h, S - энтальпия и энтропия рабочего тела при параметрах P, T ;

h_0, S_0, T_0 энтальпия и энтропия рабочего тела при параметрах окружающей среды P_0, T_0 .

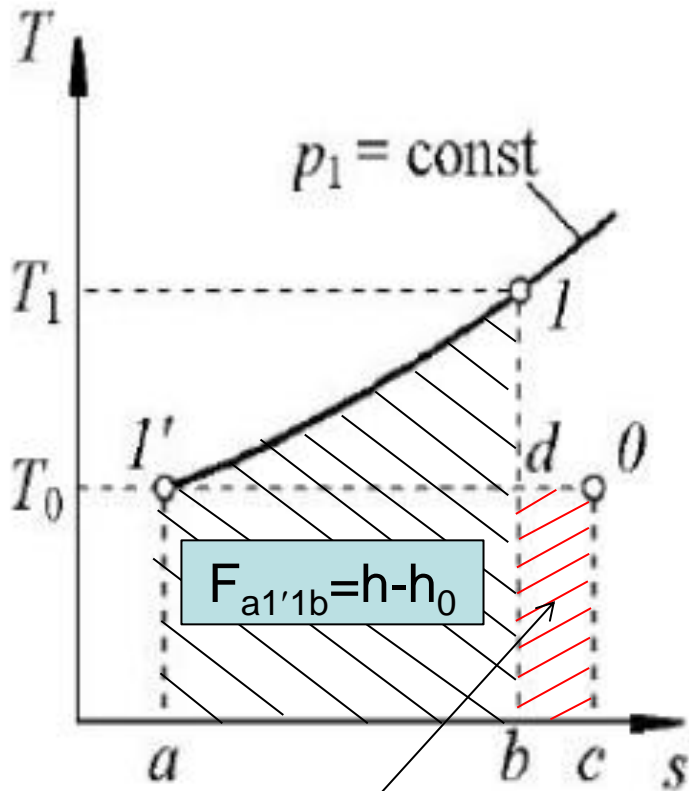
$$ex = h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0)$$



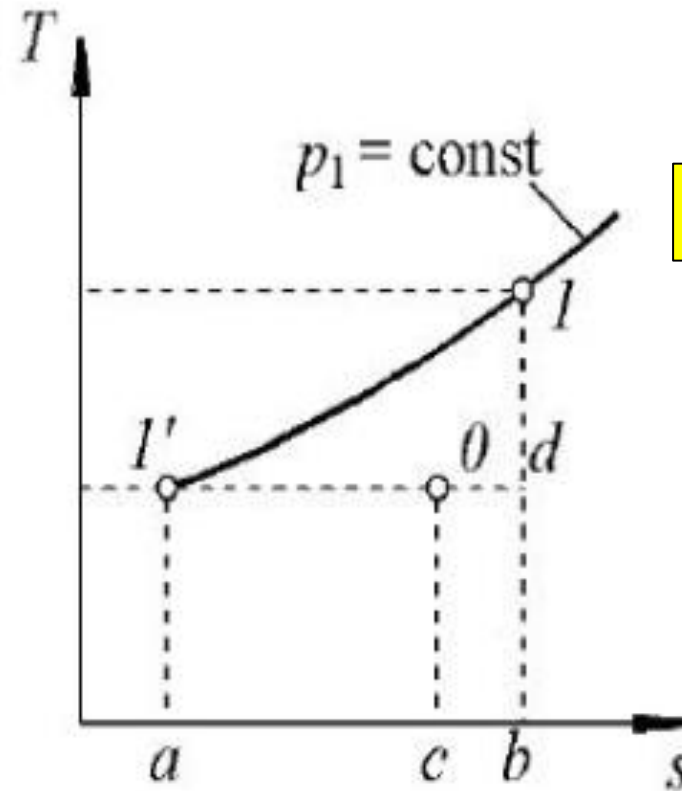
1. При фиксированных параметрах окр. ср. эксергия является функцией состояния рабочего тела.

2. Для эксергии существует начало отсчета - ее нулевое значение, определяемое параметрами окружающей среды.

Графическое представление эксергии потока в T, s -диаграмме



$$F_{bd0c} = T_0(S_0 - S_1)$$



$S_0 < S_1$

$$e = F_{a1'1b} - F_{bd0c}$$

$S_0 > S_1$

$$e = F_{a1'1b} + F_{bd0c}$$

$$e = \boxed{h - h_0} - \boxed{T_0 \cdot (S - S_0)}$$

$S_{a1'1b}$
 S_{bd0c}

2.3. Необратимость и потеря эксергии

$$\Delta ex_{\text{пот}}$$

Потери эксергии в технических системах условно делятся на 2 группы

1) Внутренние потери (связаны с необратимостью процессов, протекающих внутри системы):

- дросселирование,
- гидравлические сопротивления,
- неравновесность,
- трение в процессах сжатия и расширения р.т.,

...

2) Внешние потери :

- теплообмен при конечной разности температур между телами,
- потери на трение в подшипниках,
- потери с уходящими газами,
- с охлаждающей водой,

...

Эксергетический баланс системы

$$\sum E_{BX} = \sum E_{ВЫХ} + \sum D$$

эксергия, вводимая в техническую систему (установку)

$$\sum E_{BX}$$



$$\sum E_{ВЫХ}$$

эксергия, выводимая из установки

$$\sum D$$

Суммарные потери от необратимости (**ДИССИПАЦИЯ** энергии)

Обратимые процессы

$$\sum D = 0$$

$$\sum E_{BX} = \sum E_{ВЫХ}$$

Эксергетический КПД

Обозначения потерь

$$\eta_{ex} = \frac{\sum E_{ВЫХ}}{\sum E_{BX}} = \frac{\sum E_{BX} - \sum D}{\sum E_{BX}} = 1 - \frac{\sum D}{\sum E_{BX}}$$

$$D \equiv \Pi \equiv \Delta ex_{nom}$$

Располагаемая эксергия = полезный эффект + потери эксергии

Эксергетический анализ позволяет определить местные потери эксергии и установить для каждой из них свою причину.

Это дает возможность оценить влияние местных потерь на эффективность установки в целом.

Однако связь между снижением эксергетических потерь и повышением эффективности установки не так однозначна.

В некоторых случаях стремление устранить местную необратимость для повышения эффективности установки может привести к прямо противоположному результату.

$$\Delta ex_{ПОТ} = l_{ОБР} - l_{Д}$$

$L_{ОБР}$ – работоспособность тепла (эксергия тепла) или работа обратимого процесса ;

$L_{Д}$ – то же для необратимого процесса.

1. Энтропийный метод

$$\Delta ex_{ПОТ} = T_0 \cdot \Delta S_H$$

Увеличение энтропии от необратимости

В энтропийном методе каждый элемент рассматривают отдельно от других

2. Эксергетический метод

$$\Delta ex_{ПОТ} = (ex_{ВХ} - ex_{ВЫХ} + ex_q) - l_{Д}$$

Эксергия потока на входе и выходе

17

Эксергетическим методом оценивают потери в элементах установки, связанных между собой потоками эксергии.

2.4. Закон Гюи – Стодолы (энтропийный метод расчета потерь эксергии)

$$\Pi = T_0 \sum \Delta S.$$

Эксергетические потери в изолированной системе равны произведению наиминимей термодинамической температуры в системе и суммы изменений энтропии всех участвующих в процессе тел.

Поставим задачу установить связь между эксергетическими потерями и увеличением энтропии изолированной системы.

Сделаем это применительно к теплосиловой установке.

A – теплоотдатчик с темп-рой T_A

Теплоприемник (окр ср) с темп-рой $T_0 < T_A$

Рабочее тело совершает **прямой** цикл.

Q_A , Дж - количество теплоты, подводимое к р.т. от теплоотдатчика;

Q_0 , Дж - количество теплоты, отводимое от р.т. к теплоприемнику;

$L_{\text{ц}}^{\text{обр}}$, Дж – работа, получаемая в обратимом цикле;

$L_{\text{ц}}^{\text{необр}}$, Дж – работа необратимого цикла.

Потери эксергии

$$P = L_{\text{ц}}^{\text{обр}} - L_{\text{ц}}^{\text{необр}}$$

Будем считать, что в обоих случаях к рабочему телу подводится одинаковое количество теплоты

$$Q_A^{\text{обр}} = Q_A^{\text{необр}} = Q_A$$

Баланс энергии в обратимом процессе

$$L_{\text{ц}}^{\text{обр}} = Q_A^{\text{обр}} - |Q_0^{\text{обр}}|$$

Баланс энергии в необратимом процессе

$$L_{\text{ц}}^{\text{необр}} = Q_A^{\text{необр}} - |Q_0^{\text{необр}}|$$

$$L_{\text{ц}}^{\text{обр}} > L_{\text{ц}}^{\text{необр}}$$



$$|Q_0^{\text{необр}}| > |Q_0^{\text{обр}}|$$



Потери эксергии Π

$$|Q_0^{\text{необр}}| - |Q_0^{\text{обр}}| = L_{\text{ц}}^{\text{обр}} - L_{\text{ц}}^{\text{необр}}$$

$$L_{\text{ц}}^{\text{обр}} = Q_A^{\text{обр}} - |Q_0^{\text{обр}}|$$

$$L_{\text{ц}}^{\text{необр}} = Q_A^{\text{необр}} - |Q_0^{\text{необр}}|$$

$$\Pi = L_{\text{ц}}^{\text{обр}} - L_{\text{ц}}^{\text{необр}}$$

Потери работы Π вследствие необратимости цикла переходят в эквивалентное количество теплоты Q , оказывающееся на низшем температурном уровне.

$$Q_0^{\text{необр}} = Q_0^{\text{обр}} + \Pi$$



Количество теплоты отдаваемое теплоприемнику в действ. прямом цикле, состоит из двух частей:
1) принципиально непреобразуемого в работу количества теплоты Q_0 ;
2) потерь Π , вызванных необратимостью процессов

Изменение S изолированной системы равно сумме изменений энтропии тела A , теплоприемника и рабочего тела:

$$\Sigma \Delta S = \Delta S_A + \Delta S_0 + \Delta S_{\text{р.т.}}$$

Считая, что теплообмен между телом A и рабочим телом, а также между рабочим телом и теплоприемником происходит при постоянных температурах T_A и T_0 соответственно, получим

$$\Delta S_A = -Q_A/T_A$$

$$\Delta S_0 = Q_0/T_0$$

$$\Delta S_{\text{р.т.}} = 0$$

Поскольку рабочее тело возвращается в конце цикла в исходное состояние, изменение энтропии рабочего тела в цикле равно нулю.

Изменение энтропии термически изолированной системы при протекании в ней обратимых процессов равно нулю

Для необратимых

$$|Q_0^{\text{необр}}| > |Q_0^{\text{обр}}|$$

$$-\frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_0^{\text{необр}}}{T_0} = \Sigma \Delta S > 0$$

Тогда

$$-\frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_0^{\text{обр}}}{T_0} = 0$$

$$\Sigma \Delta S = \frac{Q_0^{\text{необр}} - Q_0^{\text{обр}}}{T_0}$$

$$\Pi = T_0 \Sigma \Delta S$$

2.5. Потери эксергии при теплообмене

Рассмотрим передачу теплоты Q от тела A с постоянной температурой T_A к телу B с постоянной температурой T_B , причем $T_B < T_A$.

Изменения энтропии тел A и B

$$\Delta S_A = -Q/T_A$$

$$\Delta S_B = Q/T_B$$

$$\Pi = T_0 \sum \Delta S$$



$$\Pi = T_0 \cdot (\Delta S_A + \Delta S_B) = T_0 \cdot Q \cdot (1/T_B - 1/T_A)$$

Потери эксергии при теплообмене тем больше, чем больше разность температур и чем меньше их произведение.



$$\Pi = T_0 \cdot Q \cdot \frac{T_A - T_B}{T_A \cdot T_B}$$



В условиях низких температур следует стремиться к меньшим разностям температур (уменьшается знаменатель, след-но надо уменьшить числитель)

$$Q = k(t_1 - t_2)F$$

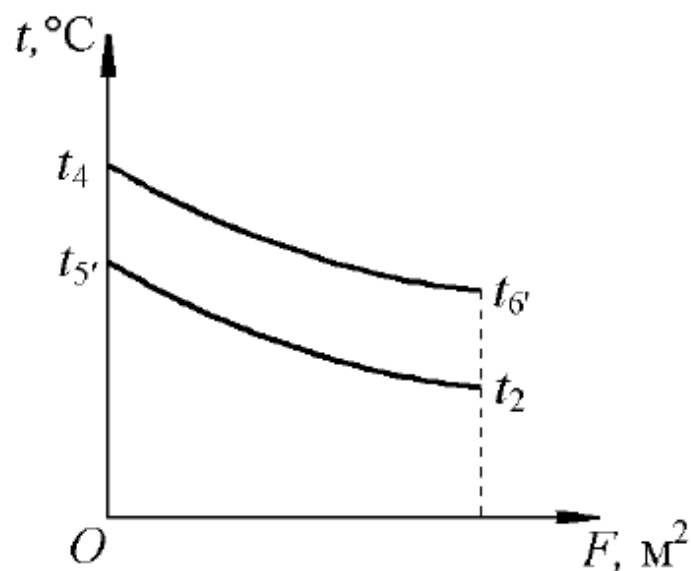


Теплообменники, работающие в области низких температур, изготавливаются крупногабаритными при том же количестве передаваемой теплоты

Пример 1. Теплообменник

В теплообменнике-регенераторе ГТУ с подводом теплоты при $p = \text{const}$ (см. рис. 3.2, а) воздух, выходящий из компрессора, нагревается газами, выпускаемыми из турбины. Требуется определить удельные потери эксергии в процессе теплообмена между газами и воздухом и эксергетический КПД теплообменника при следующих условиях.

В процессах при $p = \text{const}$ воздух нагревается от $t_2 = 140$ °С до некоторой температуры $t_{5'}$, а выпускные газы охлаждаются от $t_4 = 340$ °С до $t_{6'}$ = 210 °С (см. рис. 3.2, б и рис. 6.1). Температура окружающего воздуха $t_0 = 20$ °С. Считаем, что оба теплоносителя являются идеальными газами и что выпускные газы обладают свойствами воздуха.



$$t_{5'} = t_4 - t_{6'} + t_2 = 340 - 210 + 140 = 270 \text{ °С.}$$

1. Энтروпийный метод $\Pi = T_0 \sum \Delta s.$

Удельное изменение энтропии $\sum \Delta s$ складывается из уменьшения энтропии газов Δs_{Γ} и увеличения энтропии воздуха $\Delta s_{\text{В}}$ в изобарных процессах:

$$\Delta s_{\Gamma} = s_{6'} - s_4 = c_p \ln(T_{6'} / T_4);$$

$$\Delta s_{\text{В}} = s_{5'} - s_2 = c_p \ln(T_{5'} / T_2).$$

Сумма изменений энтропии

$$\sum \Delta s = \Delta s_{\Gamma} + \Delta s_{\text{В}} = c_p \ln \frac{T_{6'} T_{5'}}{T_4 T_2} = 1 \cdot \ln \frac{483 \cdot 543}{613 \cdot 413} = 0,0353 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Тогда эксергетические потери

$$\Pi = 293 \cdot 0,0353 = 10,34 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Тогда эксергетические потери

$$\Pi = 293 \cdot 0,0353 = 10,34 \text{ кДж/кг.}$$

По формуле (5.28) КП теплообменника

$$\eta_{\text{эт}} = \Pi / \Phi_{\text{вх}} = \Pi / ex_{q_{\text{вх}}}.$$

В соответствии с формулой (5.7) эксергия теплообменник

$$ex_q = q - T_0 \int dq / T$$

$$\begin{aligned} ex_{q_{\text{вх}}} &= c_p (T_{6'} - T_4) - T_0 \Delta s_{\Gamma} = (210 - 340) - 293 \ln(483 / 613) = \\ &= -60,16 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

и коэффициент эксергетических потерь

$$\eta_{\text{эт}} = 10,34 / 60,16 = 0,17.$$

Степень термодинамического совершенства теплообменника (см. формулу (5.32)):

$$\eta_{\text{с}}^y = 1 - \eta_{\text{эт}} = 1 - 0,17 = 0,83.$$

2. Эксергетический метод

Эксергетический метод. В соответствии с формулой (5.6) увеличение эксергии воздуха

$$\begin{aligned}\Delta ex_B &= h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1) = \\ &= 1,005(270 - 140) - 293 \cdot 0,275 = 50 \text{ кДж/кг};\end{aligned}$$

уменьшение эксергии газов

$$\begin{aligned}\Delta ex_T &= h_4 - h_3 - T_0(s_4 - s_3) = \\ &= 1,005(210 - 340) + 293 \cdot 0,24 = -60,3 \text{ кДж/кг}.\end{aligned}$$

Потери эксергии

$$\Pi = |\Delta ex_T| - \Delta ex_B = 60,3 - 50 = 10,3 \text{ кДж/кг}.$$

Полезным эффектом в данном случае является увеличение эксергии воздуха, а затраченной эксергией – уменьшение эксергии газов. Следовательно, в соответствии с формулой (5.17) эксергетический КПД теплообменника

$$\eta_{ex_T} = \Delta ex_B / |\Delta ex_T| = 50 / 60,3 = 0,83. \quad (6.2)$$

Пример 2. Расчет потери эксергии теплоты при теплообмене

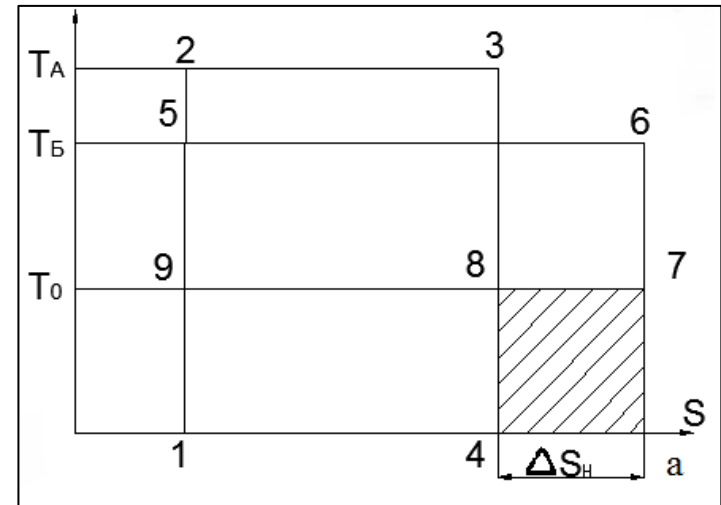
Пример. Теплота в количестве $q=1000$ кДж/кг передаётся от тела А с постоянной температурой $T_A=2000$ К к телу Б с постоянной температурой $T_B=500$ К. Температура окружающей среды $T_0=290$ К. Определить потери эксергии теплоты и КПД.

До теплообмена эксергия теплоты при $T_A=2000$ К

$$(ex_q)_{T_A} = q \left(1 - \frac{T_0}{T_A} \right) = 855 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергия той же теплоты, но при более низкой температуре $T_B=500$ К

$$(ex_q)_{T_B} = q \left(1 - \frac{T_0}{T_B} \right) = 420 \text{ кДж/кг.}$$



В процессах теплообмена между телами при конечной разности температур (внешне необратимый процесс) происходит потеря эксергии тепла.

$$\Delta ex_{пот} = (ex_q)_{T_A} - (ex_q)_{T_B} = 435 \text{ кДж/кг.}$$

2.6. Частные случаи расчета потерь от необратимости в различных узлах теплотехнического оборудования

1. Турбины, детандеры (производят работу l_D в процессе адиабатного расширения $q=0$)

$$\Delta ex_{ПOT} = (ex_{BX} - ex_{ВЫХ}) - l_D$$

2. Компрессоры, насосы (потребляют работу $-l_D$)

$$\Delta ex_{ПOT} = (ex_{BX} - ex_{ВЫХ}) + l_D$$

3. Котел, камера сгорания, испаритель теплового насоса (теплота подводится к рабочему телу, а работа не производится)

$$\Delta ex_{ПOT} = ex_{BX} - ex_{ВЫХ} + ex_q$$

4. Конденсатор теплового насоса, испаритель холодильной машины

$$\Delta ex_{ПOT} = ex_{BX} - ex_{ВЫХ} - ex_q$$

5. Дроссельные и регулирующие вентили, трубопроводы с тепловыми и гидравлическими потерями

$$\Delta ex_{ПOT} = ex_{BX} - ex_{ВЫХ}$$