



Эксергетический анализ и технико-экономическое обоснование технологий преобразования энергии

Томский политехнический университет

Ромашова Ольга Юрьевна



Тема 3.
ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ТЕПЛОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Эксергетический анализ

– уровни исследования

Первый уровень -

- определение потерь от необратимости во всех элементах системы;
- выяснение причин, их вызывающих.

Второй уровень -

- определение эксергетических коэффициентов отдельных элементов.
- Оценка достоинств и недостатков отдельных узлов установки.

Третий уровень -

- выявление связей взаимовлияния элементов системы;
- термодинамическая оптимизация технической системы (варьирование исходных параметров или изменении структуры системы для достижения максимального эксергетического КПД).

Методы эксергетического анализа

- *Энтропийный метод* (основан на работах Р. Клаузиуса)
- *Эксергетический метод* (связан с работами Ж. Гюи и А. Стодолы)

Эксергия теплоты ex_q

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

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

Эксергия потока рабочего тела ex

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

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

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

Связь работы обратимого процесса с эксергией

$$l = ex_1 - ex_2 + ex_q$$

Потеря эксергии $\Delta ex_{пот}$

$$\Delta ex_{пот} = l_{ОБР} - l_{Д}$$

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

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

Потеря эксергии $\Delta ex_{пот}$

$$\Delta ex_{ПOT} = l_{OBR} - l_{Д}$$

L_{OBR} – работоспособность тепла (эксергия тепла) или работа обратимого процесса

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

Энтропийный метод

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

Увеличение энтропии от необратимости

Эксергетический метод

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

Эксергия потока на входе и выходе

Частные случаи расчета потерь от необратимости в различных узлах теплотехнического оборудования

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

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

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

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

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

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

4. Конденсатор теплового насоса, испаритель холодильной машины

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

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

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

3.1. Использование эксергетического метода в ЭА

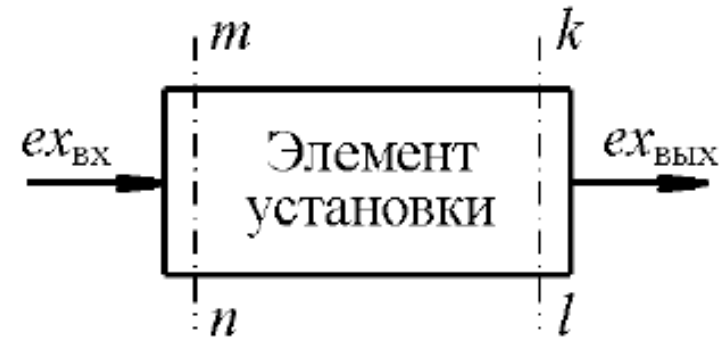
- Установка условно разбивается на несколько элементов.
- Определенный элемент установки отделяют от остальных ее элементов условными границами (например mn и kl), через которые данный элемент взаимодействует с соседними
- Для каждого элемента
 - определяются входящие $ex_{вх}$ и выходящие $ex_{вых}$ через эти границы потоки эксергии.

- рассчитываются потери эксергии;

$$\Pi_i = ex_{вхi} - ex_{выхi}$$

- определяется эксергетический КПД

$$\eta_{ex} = ex_{вых} / ex_{вх}$$



3.2. Использование энтропийного метода в ЭА

Используется понятия работы и эксергии теплоты и не используется понятие эксергии потока.

Каждый элемент рассматривают отдельно от других.

Для каждого элемента установки рассчитывают эксергетические потери, после чего сумму потерь во всех элементах вычитают из вводимой в установку превратимой энергии:

- эксергии теплоты в ТСУ или
- работы в холодильных или теплонасосных установках.

В результате этого получают превратимую энергию на выходе из установки:

- в ТСУ - механическую работу,
- в холодильных и ТНУ - эксергию теплоты, передаваемой от менее нагретого тела к более нагретому (холода).

$$Ex_{вх} = Ex_{вых} + \sum \Pi_i$$

Сумма потерь эксергии в отдельных элементах установки

Превратимая часть энергии на входе в установку

Превратимая часть энергии на выходе из установки

n – число элементов в установке

1. Эксергетические потери в отдельном элементе установки

$$\Pi_i = T_0 \cdot (\Sigma \Delta s)_i$$

Увеличение уд. энтропии, вызванное необратимостью процесса в i -м элементе.

2. Коэффициент эксергетических потерь (КЭП) для каждого элемента - отношение эксергетических потерь в этом элементе к превратимой энергии на входе в установку

$$k_{\text{Э}i} = \Pi_i / E_{X_{\text{ВХ}}}$$

3. Эксергетические потери всей установки в целом (равны сумме эксергетических потерь в отдельных элементах)

$$\Pi_y = T_0 \sum_{i=1}^n \Delta s_i = \sum_{i=1}^n \Pi_i.$$

n – число элементов в установке

Значения Π_i покажут, в каких элементах установки необратимые процессы вносят основной вклад в величину Π_y .

4. Полный К-т экс. потерь установки
(равен сумме КЭП всех ее элементов)

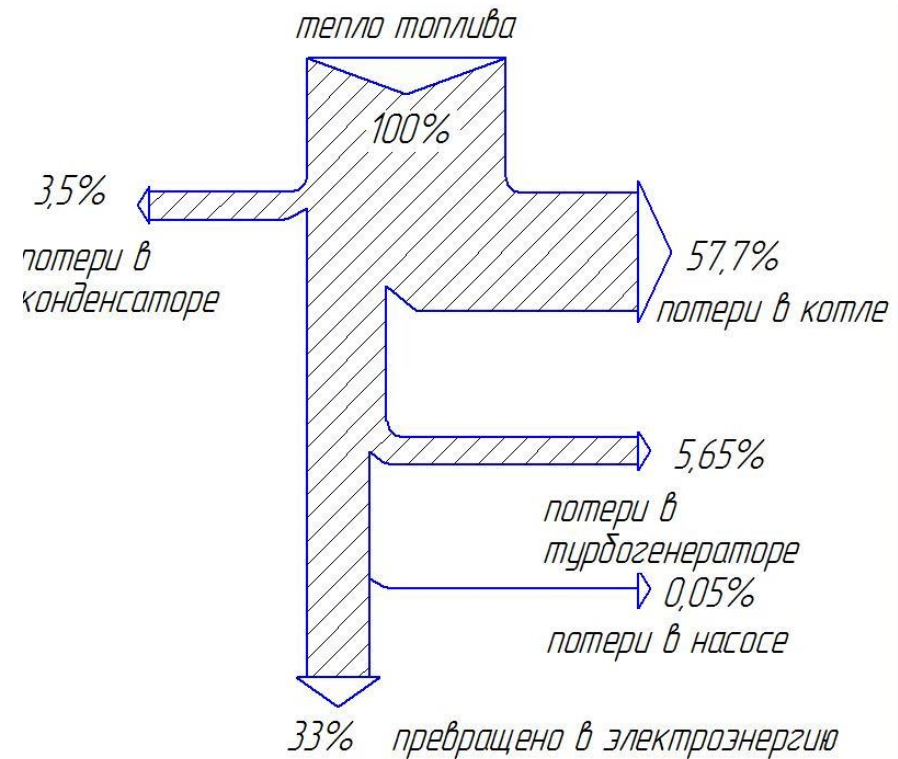
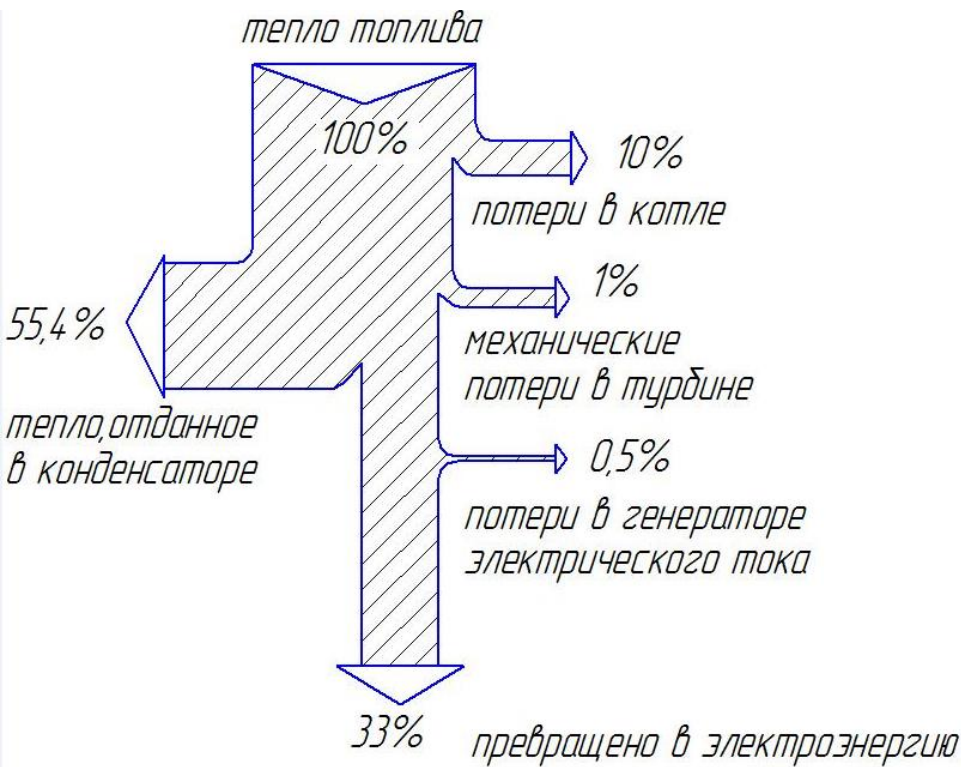
$$k_{\text{ЭУ}} = \Pi_y / \text{Ex}_{\text{вх}} =$$
$$\sum_{i=1}^n \Pi_i / \text{Ex}_{\text{вх}} = k_{\text{Э1}} + k_{\text{Э2}} + \dots + k_{\text{Эn}} = \sum_{i=1}^n k_{\text{Эi}}$$

5. Степень термодинамического совершенства установки

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{\text{Ex}_{\text{вых}}}{\text{Ex}_{\text{вх}}}$$

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{\text{Ex}_{\text{вых}}}{\text{Ex}_{\text{вх}}} = \frac{\text{Ex}_{\text{вх}} - \sum_{i=1}^n \Pi_i}{\text{Ex}_{\text{вх}}} = 1 - k_{\text{ЭУ}}$$

Пример энергетической и эксергетической диаграмм для КЭС



3.3. Эксергетический коэффициент полезного действия $\eta_{\text{экс}}$

Эксергетический КПД характеризует степень необратимости реальных процессов и циклов, протекающих в различном теплотехническом оборудовании

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\text{отведённая эксергия}}{\text{подведённая эксергия}} = \frac{ex_{\text{ОТВ}}}{ex_{\text{ПОДВ}}}$$

Подведенная эксергия $ex_{\text{ПОДВ}}$ – затраченная упорядоченная энергия

- ХМ и ТН с эл. приводом – это электрическая мощность привода – $N_{\text{э}}$,
- ПТУ и ГТУ (на органическом топливе) – химическая эксергия топлива (максимальная работа окисления горящего топлива,

...

$$ex_{\text{ТОПЛ}} \approx Q_{\text{Н}}^P$$

$$ex_{\text{ПОДВ}} - ex_{\text{ОТВ}} = \Delta ex_{\text{ПОТ}}$$

Отведённая эксергия $ex_{\text{ОТВ}}$

– эксергия вырабатываемого продукта:

- турбогенераторы - электрическая энергия,
- ДВС - механическая энергия
- ХМ - эксергия вырабатываемого холода,

$$\Delta ex_{\text{ПОТ}} \approx 0, \eta_{\text{экс}} = 1$$

В обратимых процессах и циклах

Расчетные формулы $\eta_{\text{экс}}$

1. ДВС, ГТД (выработка механической энергии)

$$ex_{\text{ПОДВ}} = ex_{\text{ТОПЛ}}$$

$$ex_{\text{ОТВ}} = l_e$$

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{l_e}{ex_{\text{ТОПЛ}}} = \frac{N_e}{B \cdot Q_H^P} = \eta_e$$

Абсолютный эффективный КПД

2. ГТУ, ПТУ (выработка электрической энергии)

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{l_{\text{э}}}{ex_{\text{ТОПЛ}}} = \frac{N_{\text{э}}}{B \cdot Q_H^P} = \eta_{\text{э}}$$

Абсолютный электрический КПД

3. ТЭЦ

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{N_{\text{э}} + E_{Q_T}}{B \cdot Q_H^P}$$

Эксергия теплоты, использованная потребителем

4. Паровой котел, камера сгорания

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{ex_{\text{ВЫХ}} - ex_{\text{ВХ}}}{ex_{\text{ТОПЛ}}}$$

$$ex_{\text{ПОДВ}} = ex_q = ex_{\text{ТОПЛ}}$$

$$ex_{\text{ТОПЛ}} \approx Q_H^P$$

$$ex_{\text{ОТВ}} = ex_{\text{ВЫХ}} - ex_{\text{ВХ}}$$

5. Испаритель холодильной машины

$$ex_{\text{ПОДВ}} = ex_{\text{ВХ}} - ex_{\text{ВЫХ}}$$

$$ex_{\text{ОТВ}} = ex_{\text{Q}_X}$$

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{ex_{\text{Q}_X}}{ex_{\text{ВХ}} - ex_{\text{ВЫХ}}}$$

6. Конденсатор теплового насоса

$$ex_{\text{ПОДВ}} = ex_{\text{ВХ}} - ex_{\text{ВЫХ}}$$

$$ex_{\text{ОТВ}} = ex_{\text{Q}_T}$$

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{ex_{\text{Q}_T}}{ex_{\text{ВХ}} - ex_{\text{ВЫХ}}}$$

7. Холодильная машина и тепловой насос с электрическим приводом

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{ex_{\text{Q}_X}}{N_{\text{Э}}}$$

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{ex_{\text{Q}_T}}{N_{\text{Э}}}$$

8. Турбина, детандер

$$ex_{\text{ПОДВ}} = ex_{\text{ВХ}} - ex_{\text{ВЫХ}}$$

$$ex_{\text{ОТВ}} = l_{\text{Д}}$$

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{l_{\text{Д}}}{ex_{\text{ВХ}} - ex_{\text{ВЫХ}}} = \frac{N_i}{G \cdot (ex_{\text{ВХ}} - ex_{\text{ВЫХ}})}$$

$N_i = l_{\text{Д}} \cdot G$ - внутренняя мощность, кВт

G - расход рабочего тела, кг/с.

9. Компрессоры, насосы

$$ex_{\text{ПОДВ}} = l_{\text{Д}}$$

$$ex_{\text{ОТВ}} = ex_{\text{ВЫХ}} - ex_{\text{ВХ}}$$

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{ex_{\text{ВЫХ}} - ex_{\text{ВХ}}}{l_{\text{К}}} = \frac{G \cdot (ex_{\text{ВЫХ}} - ex_{\text{ВХ}})}{N_{\text{К}}}$$

$N_{\text{К}}$, кВт – мощность привода компрессора

10. Охлаждаемые компрессоры (если эксергия отводимой теплоты используется)

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{G \cdot (ex_{\text{ВЫХ}} - ex_{\text{ВХ}}) + E_{\text{ОТВ}}}{N_{\text{К}}}$$

11. Трубопроводы, регулирующие и дроссельные вентили

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{ex_{\text{ВЫХ}}}{ex_{\text{ВХ}}}$$

$$ex_{\text{ПОДВ}} = ex_{\text{ВХ}}$$

$$ex_{\text{ОТВ}} = ex_{\text{ВЫХ}}$$

12. Теплообменники (регенераторы, воздухоподогревателей и т.д.)

$$ex_{\text{ПОДВ}} = \Delta ex_{\text{ОХЛ}}$$

← уменьшение эксергии охлаждаемого теплоносителя

$$ex_{\text{ОТВ}} = \Delta ex_{\text{НАГР}}$$

← прирост эксергии нагреваемого теплоносителя

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{\Delta ex_{\text{НАГР}}}{\Delta ex_{\text{ОХЛ}}}$$

13. Регенераторы холодильных машин

$$\Delta ex_{\text{ПОДВ}} = ex_{\text{НАГР}}$$

$$\Delta ex_{\text{ОТВ}} = \Delta ex_{\text{ОХЛ}}$$

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{\Delta ex_{\text{ОХЛ}}}{\Delta ex_{\text{НАГР}}}$$

14. Конденсаторы (холодильных машин, паротурбинных установок), предназначенные для отвода теплоты из системы в окружающую среду

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{К}} = \frac{\eta_{\text{ЭКС}}}{\eta'_{\text{ЭКС}}}$$

← эксергетический КПД установки (холодильной, паротурбинной)

← эксергетический КПД установки при условии, что потери эксергии в конденсаторе равны нулю $\Delta ex_{\text{ПОТ}}^{\text{К}} = 0$

Если отводимая в конденсаторе теплота передаётся какому-либо рабочему телу при $T \neq T_0$, эксергия которого в дальнейшем используется, то конденсатор должен рассматриваться как обычный теплообменник и его эксергетический КПД следует рассчитывать

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{\Delta ex_{\text{НАГР}}}{\Delta ex_{\text{ОХЛ}}}$$

15. Циклы тепловых двигателей

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{l_{\text{Д}}}{ex_{q_1}}$$

← работа действительного цикла

← эксергия подведённой в цикле теплоты

3.4. Примеры расчета эксергетических потерь и КПД

Пример 1. Эксергетический КПД котельной установки

Эксергия топлива - теплота, выделенная при сгорании

$$ex_{топл} \approx q' = \frac{B \cdot Q_H^p}{G}, \text{ кДж} / \text{кг}$$

Составляющие потерь эксергии

1. Потери теплоты в котле (с ух газ, с недожогом и др.)

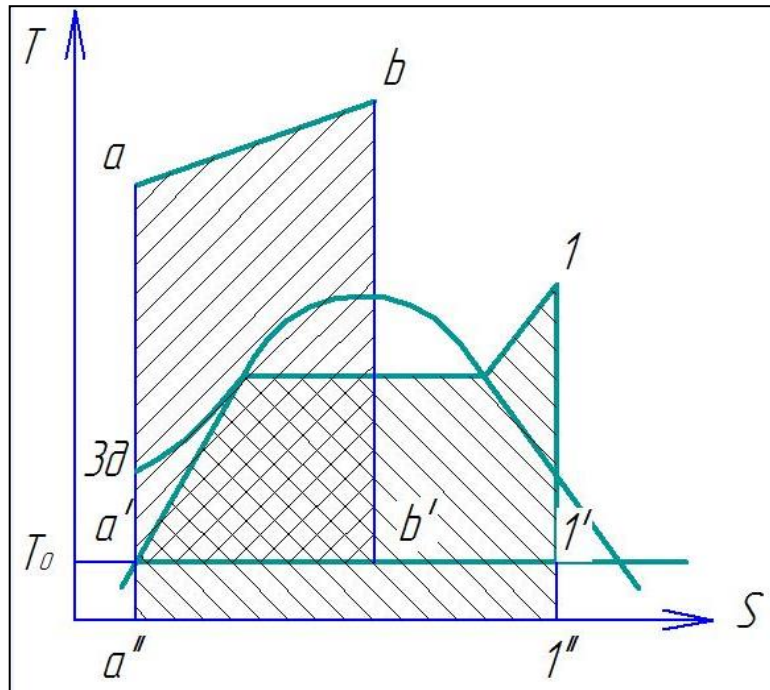
$$\Delta ex_{nom1} = (1 - \eta_{KY}) \cdot q'$$

$$\eta_{KY} = \frac{q_1}{q'}$$

$$q_1 = \eta_{KY} \cdot q' = h_1 - h_{3\partial}$$

2. Потери эксергии от внешней необратимости (из-за разности температур между продуктами сгорания и р. Т.

$$\Delta ex_{nom2} = T_0 \cdot (S_1 - S_{3\partial}) = \text{пл. } a'' a' 1' 1''$$



(3\partial-1) – подвод тепла к воде и водяному пару

(a-b) – процесс горения топлива

$$\Delta ex_{nom}^{KY} = ex_{3\partial} - ex_1 + ex_q^{\leftarrow}$$

$$ex_q = ex_{топл} = q'$$

$$\Delta ex_{пот}^{КУ} = ex_{3\partial} - ex_1 + ex_{топл}$$

$$ex_1 = h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0) = 3500 - 42,12 - 283 \cdot (6,76 - 0,1511) = 1588$$

Повышением энтальпии в насосе пренебрежем

$$ex_{3\partial} = h_2' - h_0 - T_0(s_2' - s_0) = 121 - 42,12 - 283 \cdot (0,4224 - 0,1511) = 2,102$$

$$\Delta ex_{пот}^{КУ} = ex_{3\partial} - ex_1 + ex_{топл} = 2,102 - 1588 + 3754 = 2168$$

$$\eta_{ЭКС} = \frac{ex_{вых} - ex_{вх}}{ex_{топл}} = \frac{ex_1 - ex_{3\partial}}{ex_{топл}} = \frac{ex_{топл} - \Delta ex_{пот}^{КУ}}{ex_{топл}}$$

$$\eta_{ЭКС} = \frac{ex_1 - ex_{3\partial}}{ex_{топл}} = \frac{1588 - 2,102}{3754} = 0,4225$$

$$P_1 = 100 \text{ бар}, t_1 = 530 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$P_2 = 0,04 \text{ бар} \quad \eta_{КУ} = 0,9$$



$$h_0 = f(P_0 = 0,1 \text{ МПа}; t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}) = 42,12 \text{ кДж/кг}$$

$$s_0 = f(P_0 = 0,1 \text{ МПа}; t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,1511 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$s_1(P_1, t_1) = 6,76 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$h_1(P_1, t_1) = 3500 \text{ кДж/кг}$$

$$h_2'(P_2) = 121,4 \text{ кДж/кг}$$

$$s_2'(P_2) = 0,4224 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

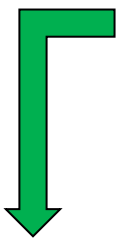
$$q_1 = h_1 - h_2' = 3500 - 121 = 3379 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$ex_{топл} = q_1' = q_1 / \eta_{КУ} = 3379 / 0,9 = 3754 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta ex_{пот}^{КУ} \rightarrow 57,75 \%$$

Наибольшие ЭКС. потери в котле связаны с

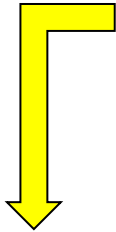
- 1) необратимостью горения и
- 2) необратимостью теплопередачи
- 3) от продуктов сгорания к раб. Т.



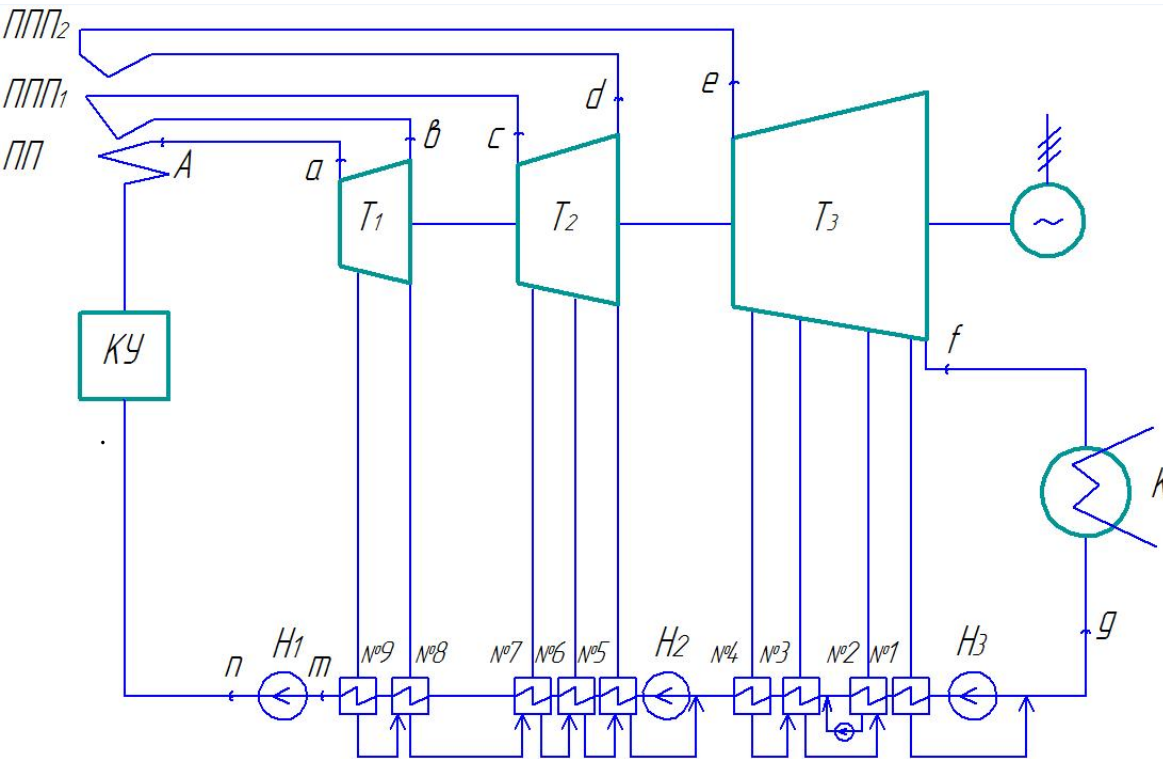
Неустранимы, пока есть горение. Выход – замена процесса сжигания топлива (на окисление в топливных элементах или на химическую переработку)



Могут быть уменьшены

- 
- 1) увеличение средней температуры подвода тепла за счёт регенеративного подогрева питательной воды;
 - 2) предварительный нагрев воздуха, подаваемого в топку;
 - 3) промежуточным перегревом пара.
 - 4) применение комбинированных циклов (ПГУ, установки с МГД-генераторами).

Паротурбинная установка с двумя промежуточными перегревателями и регенеративным подогревом питательной воды



$P_1=300$ бар, $t_1=670$ °С,
 $P_2=0,04$ бар $\eta_{кУ} = 0,93$
 $P_{пп1}=60$ бар
 $P_{пп2}=15$ бар $t_{пв} = t_{пп2} = t_1$
 $t_{пп1} = t_{пп2} = 565$

Параметры воды и водяного пара в узловых точках цикла

Параметр	Состояние								
	A	a	b	c	d	e	f	g	N
P, бар	294	284	60,8	54,7	15,2	13,67	0,034	0,034	372
t, °С	660	650	418	565	387	565	26,1	26,1	297
h, кДж/кг	3634,7	3612,5	3222,3	3584,0	3229,0	3618,0	2480,4	110,0	1313,0
S, кДж/(кг К)	6,4543	6,4442	6,5573	7,1154	7,2226	7,7899	8,2982	0,386	3,1277

№	9	8	7	6	5	4	3	2	1
α	0,0438	0,0859	0,0267	0,0329	0,0553	0,0252	0,0309	0,0391	0,0294

$$q_1 = h_A - h_n + (h_c - h_b)(1 - \sum_8^9 \alpha_j) + (h_e - h_d)(1 - \sum_5^9 \alpha_j) = 2930,1 \text{ кДж / кг}$$

Потери эксергии с уходящими газами и очаговыми остатками

$$\Delta ex_{nom1} = q' \cdot (1 - \eta_{KY}) = 220,5 \text{ кДж / кг.}$$

$$q' = 3150,6 \text{ кДж / кг}$$

Потери эксергии от неравновесного теплообмена между продуктами сгорания топлива и водой и водяным паром, от необратимости процесса горения и т.д. (связанны с увеличением энтропии)

$$\Delta ex_{nom2} = T_0 \cdot \left[(S_A - S_n) + (S_c - S_b) \cdot (1 - \sum_8^9 \alpha_j) + (S_e - S_d) \cdot (1 - \sum_5^9 \alpha_j) \right] = 1229,8 \text{ кДж / кг}$$

Суммарные потери эксергии в котельной установке

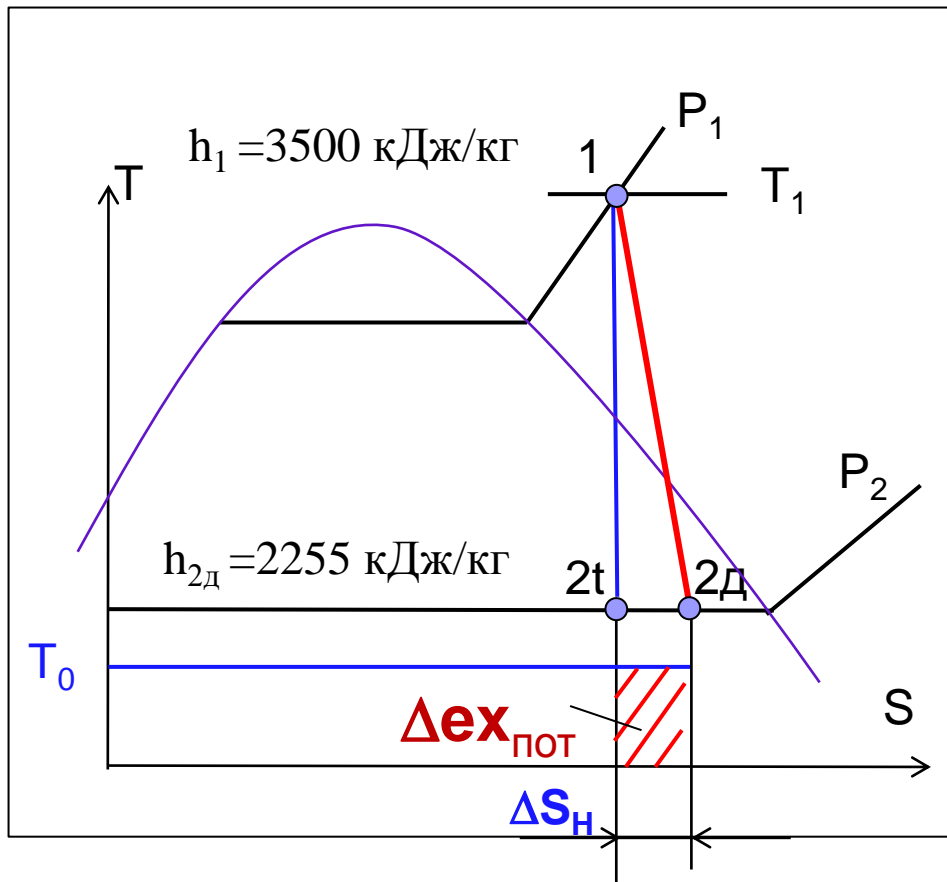
$$\Delta ex_{nom}^{KY} = \Delta ex_{nom1} + \Delta ex_{nom2} = 1450,3 \text{ кДж / кг}$$

Эксергетический КПД котельной установки

$$\eta_{\text{экс}}^{KY} = \frac{q' - \Delta ex_{nom}^{KY}}{q'} \cdot 100 = 54 \%$$

Пример 2. Эксергетический КПД турбины

Рассчитать потери энергии от необратимости расширения и эксергетический КПД турбины



Исх. данные:

Параметры пара на входе в паровую турбину
 $P_1=100$ бар, $t_1=550$ °С,
 давление в конденсаторе $P_2=0,04$ бар.
 Внутренний относительный КПД турбины 0,85
 Температура окружающей среды $t_0=10$ °С.

$$\Delta ex_{пот} = T_0 \cdot (s_{2d} - s_1) = T_0 \cdot \Delta S_H$$

$$ex_1 = h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0) = 3500 - 42,12 - 283 \cdot (6,76 - 0,1511) = 1588$$

$$ex_{2d} = h_{2d} - h_0 - T_0(s_{2d} - s_0) = 2255 - 42,12 - 283 \cdot (7,485 - 0,1511) = 137,4$$

$$l_d = h_1 - h_{2d} = 3500 - 2255 = 1245$$

$$\eta_{ex} = \frac{l_d}{ex_1 - ex_2}$$

$$\eta_{ex} = \frac{1245}{1588 - 137,4} = 0,858$$

$$s_1 = 6,76 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad s_{2d} = 7,485 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$h_0 = f(P_0 = 0,1 \text{ МПа}; t_0 = 10 \text{ °С}) = 42,12 \text{ кДж} / \text{кг}$$

$$s_0 = f(P_0 = 0,1 \text{ МПа}; t_0 = 10 \text{ °С}) = 0,1511 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$$

Энтропийный метод

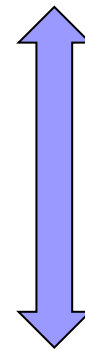
$$\Delta ex_{nom} = T_0 \cdot (s_{2\partial} - s_1) = T_0 \cdot \Delta S_H$$

$$\Delta ex_{nom} = T_0 \cdot (s_{2\partial} - s_1) = T_0 \cdot \Delta S_H = 283 \cdot (7,485 - 6,76) = 205 \text{ кДж / кг}$$

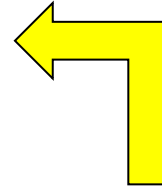
Эксергетический метод

$$\Delta ex_{nom} = ex_1 - ex_2 - l_\partial, \text{ кДж / кг}$$

$$\Delta ex_{nom} = ex_1 - ex_{2\partial} - l_\partial = 1588 - 137,4 - 1245 = 205,6 \text{ кДж / кг}$$



$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{l_{\partial}}{ex_1 - ex_{2\partial}} = \frac{h_1 - h_{2\partial}}{(h_1 - h_{2\partial}) - T_0 \cdot (s_1 - s_{2\partial})}$$



$$\eta_{oi}^T = \frac{h_1 - h_{2\partial}}{h_1 - h_{2t}} = \frac{h_1 - h_{2\partial}}{(h_1 - h_{2t}) - T' \cdot (S_1 - S_{2\partial})}$$

T' – средняя термодинамическая температура реального процесса

Эксергетический КПД сравнивает два эффекта одного и того же реального процесса

Внутренний относительный КПД сравнивает одни и те же эффекты разных процессов: реального и идеального.

Пример 3. Эксергетические потери и КПД конденсатора (потери в окр ср)

$$\Delta ex_{nom} = ex_{2\partial} - ex_{2'}$$

$$ex_{2\partial} = 137,4 \text{ кДж} / \text{кг}$$

$$\begin{aligned} ex_{2'} &= h_{2'} - h_0 - T_0(s_{2'} - s_0) = \\ &= 121,4 - 42,12 - 283 \cdot (0,4224 - 0,1511) = 2,5 \text{ кДж} / \text{кг} \end{aligned}$$

$$\Delta ex_{nom}^K = ex_{2\partial} - ex_{2'} = 137,4 - 2,5 = 134,9 \text{ кДж} / \text{кг}$$

$$P_2 = 0,04 \text{ бар}$$

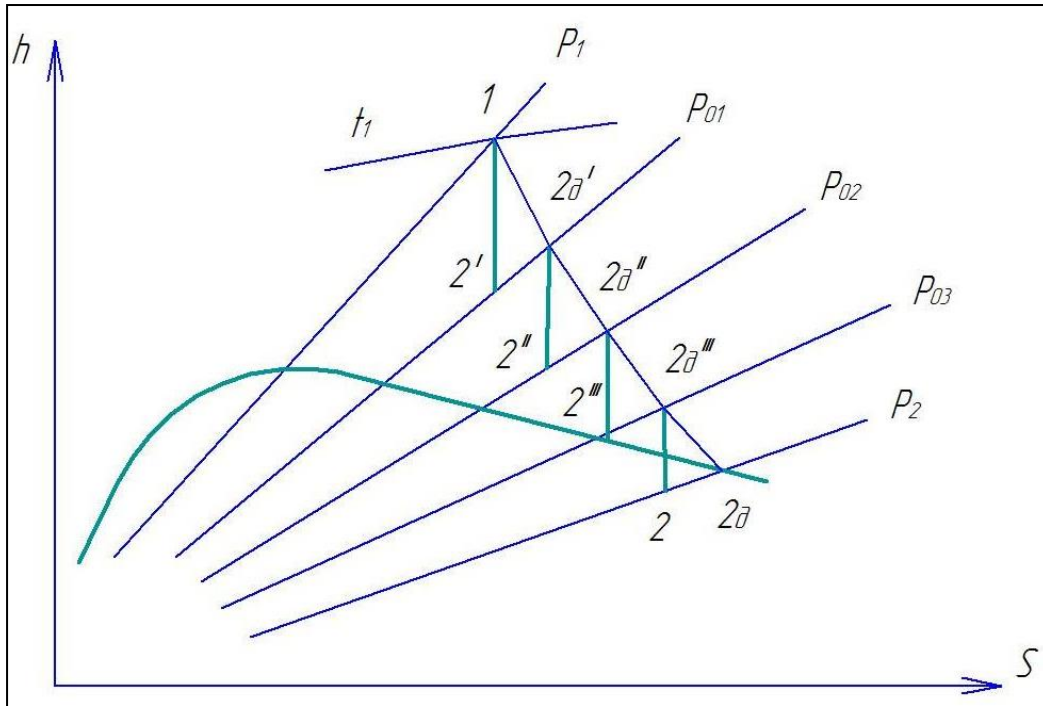
$$\eta_{ex} = \frac{l_{\text{Э}}}{l_{\text{Э}} + \Delta ex_{nom}^K}$$

$$s_{2'} = 0,4224 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$h_{2'} = 121,4 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$l_{\text{Э}} = q' \cdot \eta_{\text{Э}} = 1217,6 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Пример 4. Эксергетический КПД отдельных ступеней многоступенчатой турбины



Исх. данные:

Турбина имеет 4-е ступени.

$P_1=30$ бар, $t_1=550$ °С.

$P_2=0,04$ бар.

Внутренний относительный КПД ступеней одинаков - 0,85.

Температура окружающей среды $t_0=10$ °С

$$\begin{aligned}\eta_{\text{экс1}} &= 92,4 \%, \\ \eta_{\text{экс2}} &= 90,3 \%, \\ \eta_{\text{экс4}} &= 87,4 \%, \\ \eta_{\text{экс4}} &= 84,9 \%\end{aligned}$$

Экс. КПД уменьшается в каждой последующей ступени

- Экс. КПД учитывает влияние температурного уровня и рабочего интервала давлений
- Совершенствовать следует, в первую очередь проточную часть последних ступеней турбины, имеющих низкий экс КПД .

Пример 5. Компрессоры.

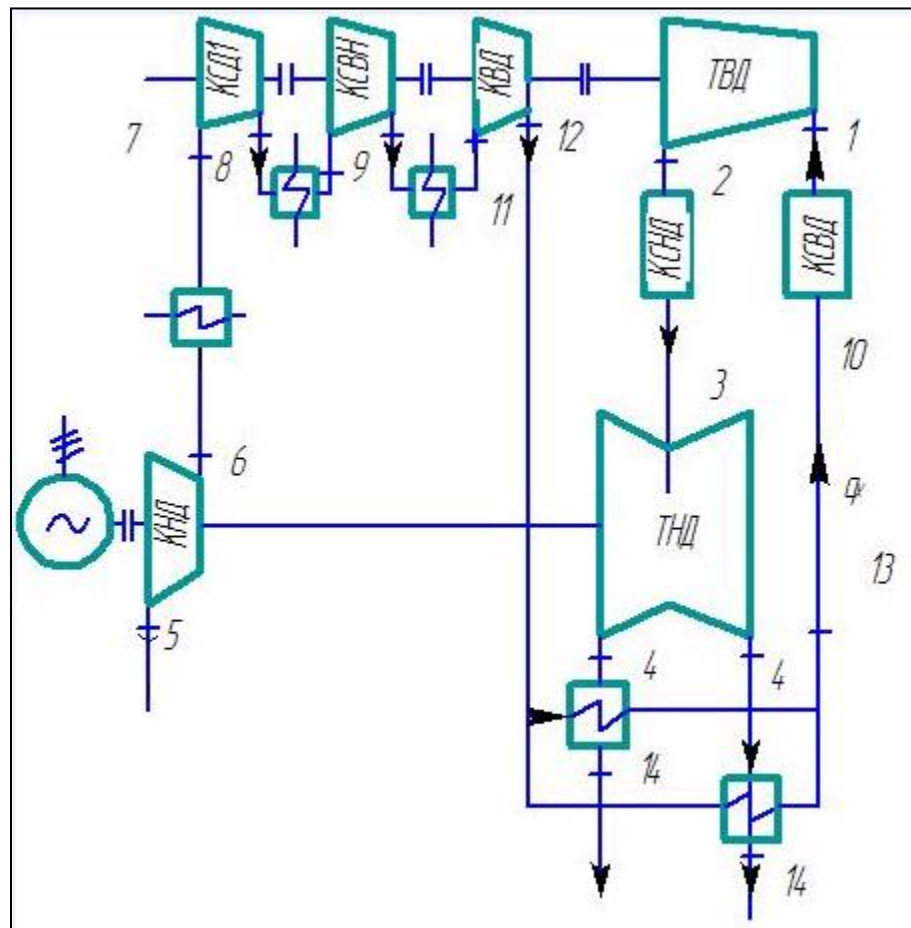
$$\Delta ex_{\text{ПОТ}} = (ex_{\text{ВХ}} - ex_{\text{ВЫХ}}) + l_{\text{Д}}$$

$$l_1 = h_6 - h_5 = 85,2 \text{ кДж / кг}$$

$$\Delta ex_1 = ex_6 - ex_5 = 77,3 \text{ кДж / кг}$$

$$\Delta ex_{\text{ном}_1} = l_1 - \Delta ex_1 = 7,9 \text{ кДж / кг}$$

$$\eta_{\text{экс}_1} = \frac{\Delta ex_1}{l_1} \cdot 100 = 90,7\%$$

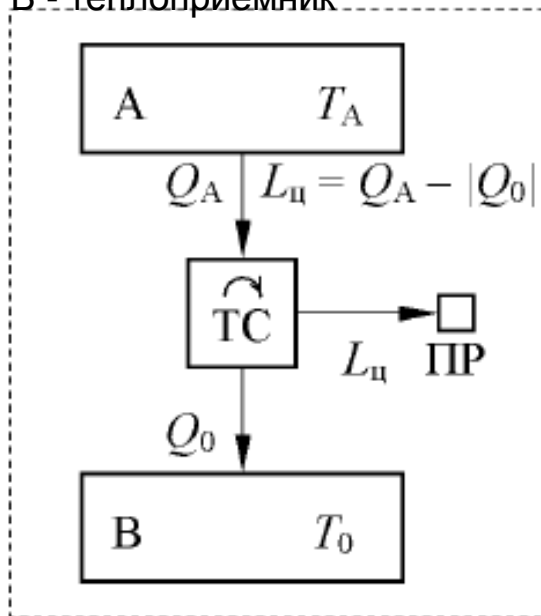


Потери эксергии в промежуточных
охладителях (в окр. ср.)

$$\Delta ex_{nom}^{no} = (ex_6 - ex_7) + (ex_8 - ex_9) + (ex_{10} - ex_{11}) = 44,7 \text{ кДж / кг}$$

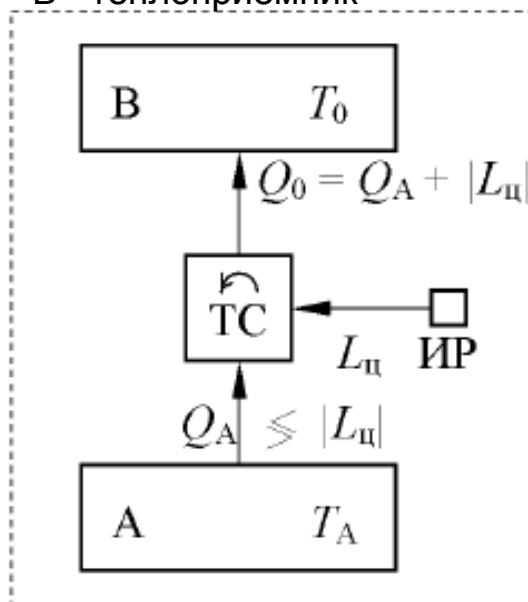
3.5. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

$T_A > T_0$, А – теплоотдатчик,
В - теплоприемник



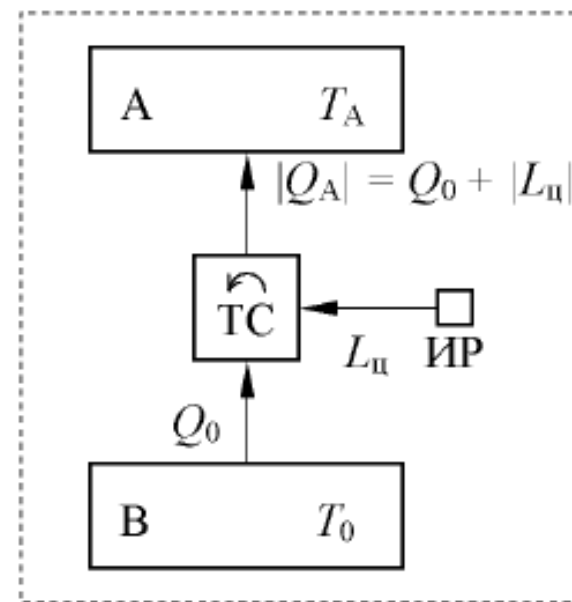
теплосиловая

$T_A < T_0$, А – теплоотдатчик,
В - теплоприемник



холодильная

$T_A < T_0$, В – теплоотдатчик,
А - теплоприемник



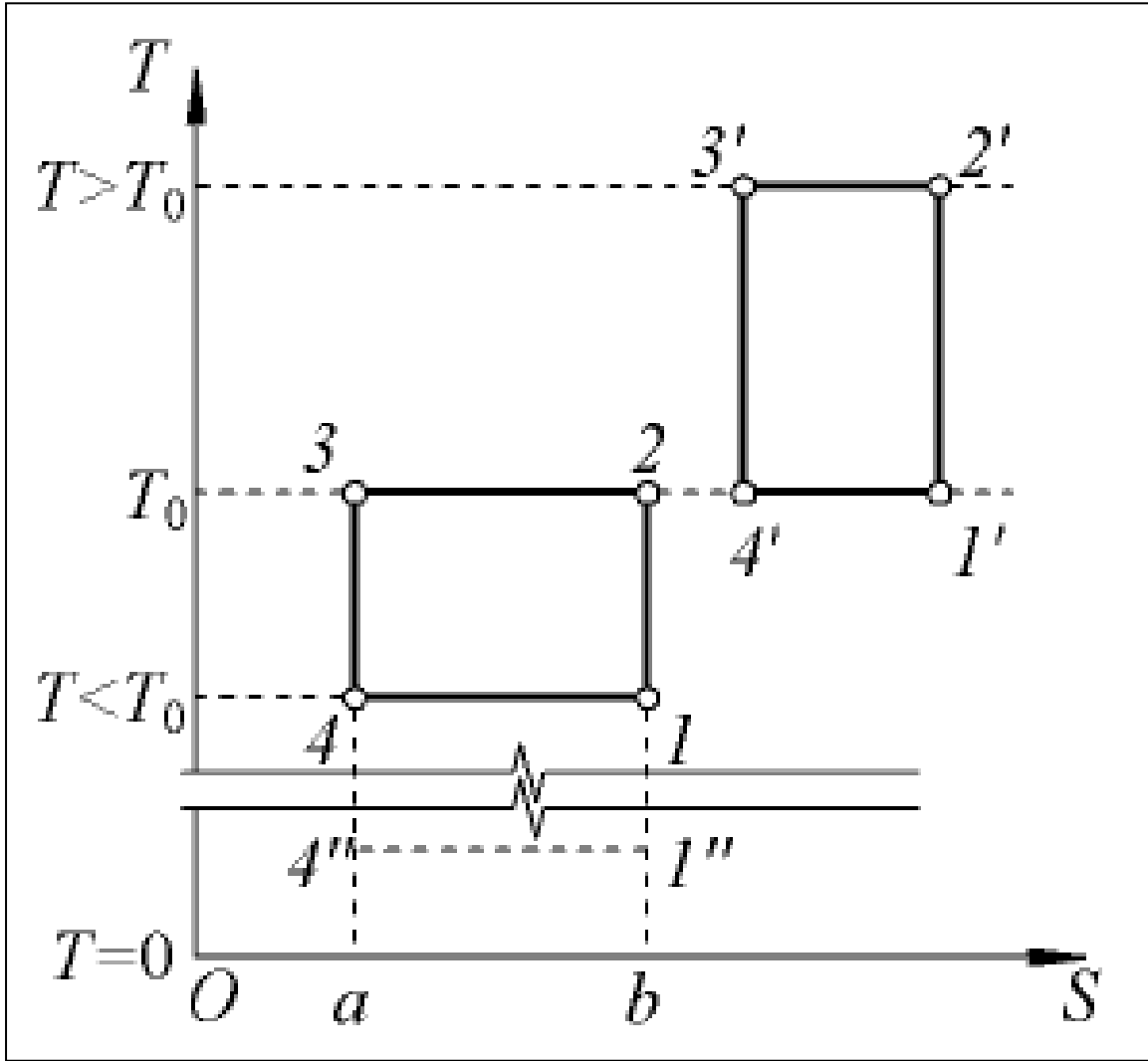
теплонасосная

Принципиальные схемы теплоэнергетических установок

ТС – термодинамическая система

ПР - потребитель работы;

ИР - источник работы;



Температурные зоны
холодильной машины и
теплового насоса:
12341 - цикл ХМ;
1'2'3'4'1' - цикл ТН;
 T_0 температура
окружающей среды

Для превращения теплоты в работу необходимо иметь как минимум два тела: теплоотдатчик с температурой T_A и теплоприемник с температурой T_0 (обычно атмосферный воздух или естественные или искусственные водоемы);

Для охлаждения некоторого тела с температурой $T_A < T_0$, где T_0 - температура теплоприемника, необходимо иметь источник работы и теплоприемник (обычно атмосферный воздух или естественные водоемы);

для нагрева некоторого тела с температурой $T_A > T_0$, где T_0 - температура теплоотдатчика, необходимо иметь источник работы и теплоотдатчик (обычно атмосферный воздух, естественные водоемы или отходы производственных процессов).

Тип установки	Основной процесс	Характеристики цикла		Процесс, сопутствующий основному
		Затраты энергии	Полезный эффект	
Теплосиловая (см. рис. 2.1, а)	Превращение теплоты в работу	Q_A	$Q_A - Q_0 $	Переход теплоты от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой
Холодильная (см. рис. 2.1, б)	Охлаждение тела с более низкой температурой	$L_{\text{т}}$	Q_A	Превращение работы в теплоту
Теплонасосная (см. рис. 2.1, в)	Нагрев тела с более высокой температурой	$L_{\text{т}}$	$Q_0 + L_{\text{т}} $	

Эффективность цикла холодильной машины оценивается *холодильным коэффициентом*, представляющим собой отношение количества теплоты Q_2 , воспринятой холодильным агентом на низшем температурном уровне, к затраченной работе $L_{ц}$.

$$\varepsilon_x = Q_x / L_{ц}$$

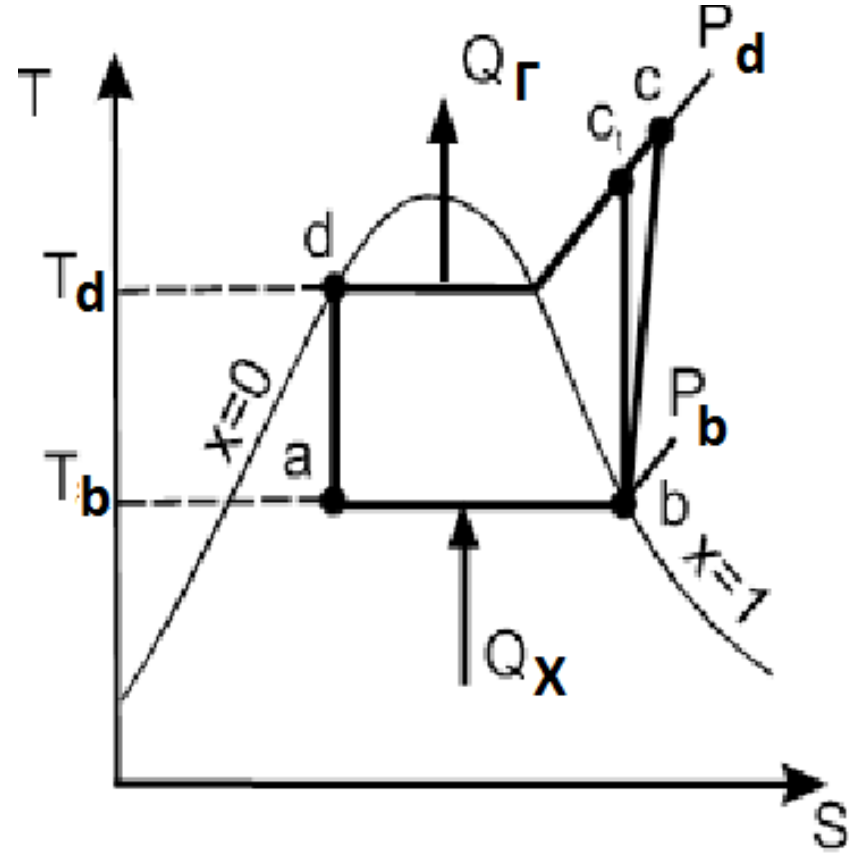
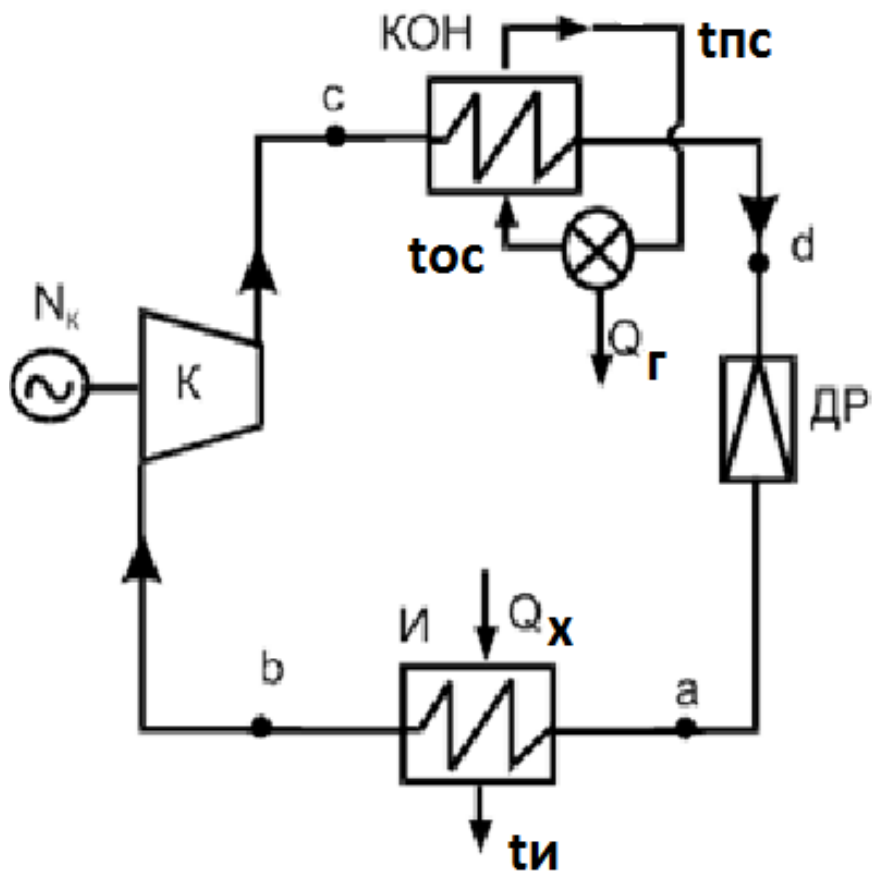
Холодильный коэффициент может быть как меньше, так и больше единицы.

Эффективность цикла теплового насоса оценивается *отопительным коэффициентом*.

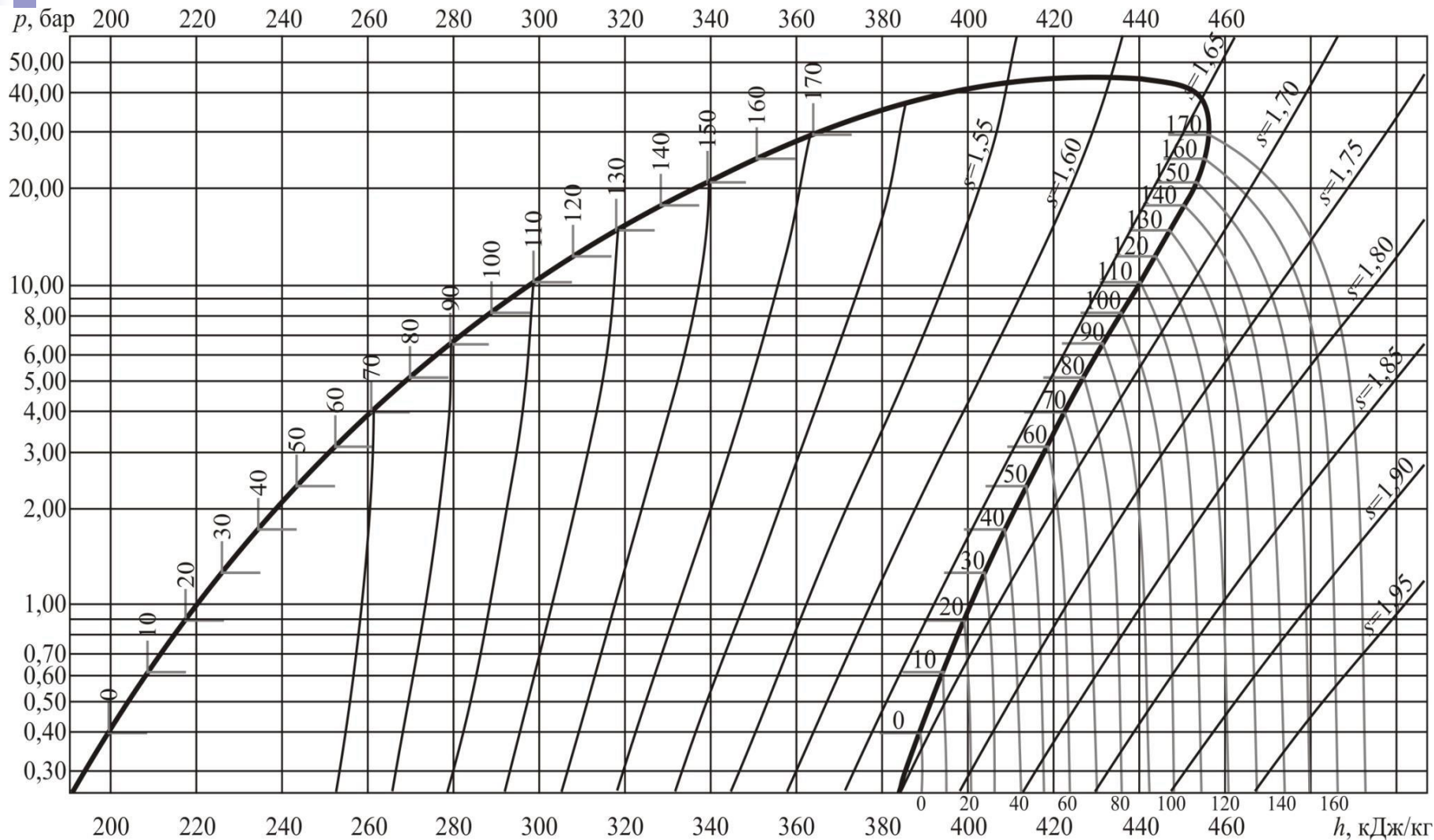
Этот коэффициент представляет собой отношение количества теплоты, отведенного от холодильного агента на высшем температурном уровне, к количеству затраченной работы.

$$\varphi = Q_{г} / L_{ц} = (Q_x + L_{ц}) / L_{ц}$$

всегда
больше единицы

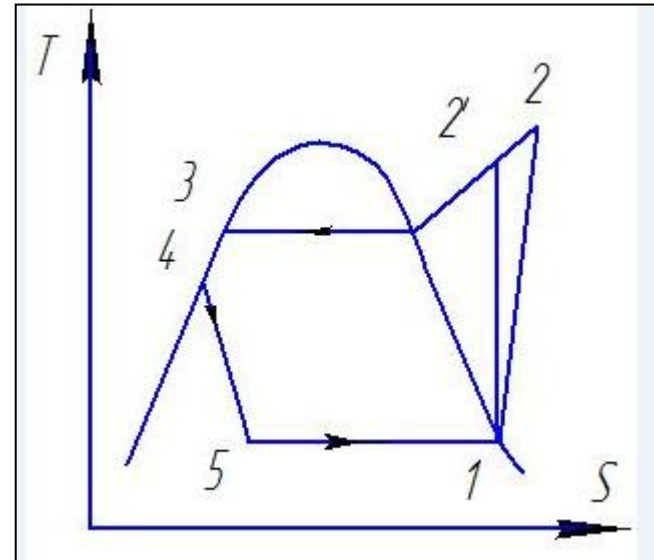
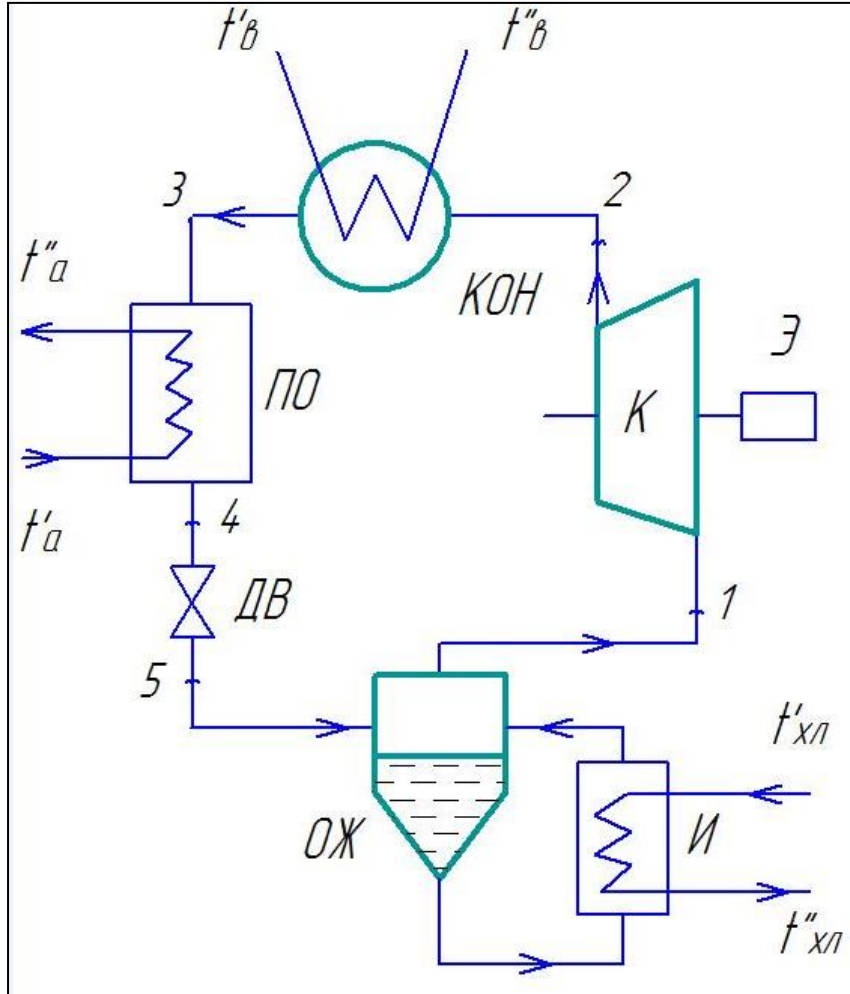


Принципиальная схема установки
 И - испаритель, К - компрессор, ДР -
 дроссель, КОН – конденсатор



р, h- диаграмма хладона R11

Пример. 6. Парокомпрессионная холодильная машина



$$E_{\text{подв}} = N_{\text{э}} = 551,5 \text{ кВт}.$$

$$E_{Q_x} = -Q_x (1 - T_o / T_{xl}) = 191,9 \text{ кВт}$$

$$T_{\kappa} = \frac{T'_{xl} + T''_{xl}}{2} = 251,5 \text{ K}.$$

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{E_{Q_x}}{E_{\text{подв}}} \cdot 100 = 34,8\%.$$

Компрессор ХМ

Изменение эксергии хладагента в компрессоре

$$\Delta ex_k = ex_2 - ex_1 = 397,5 \text{ кДж / кг.}$$

Потеря эксергии в компрессоре от необратимости процесса сжатия

$$\Delta E_{nom1}^k = G(l_k - \Delta ex_k) = 76,6 \text{ кВт.}$$

Электромеханические потери в компрессоре

$$l_k = h_2 - h_1 = 470 \text{ кДж / кг.}$$

$$\Delta E_{nom2}^k = N_{\text{э}} - Gl_k = 55,2 \text{ кВт.}$$

Суммарные потери в компрессоре

$$\Delta E_{nom}^k = \Delta E_{nom1}^k + \Delta E_{nom2}^k = 131,8 \text{ кВт.}$$

Эксергетический КПД компрессора (с учетом механических потерь)

$$\eta_{\text{экс}}^k = \left(1 - \frac{\Delta E_{nom}^k}{Gl_k}\right) \cdot 100 = 73,4\%.$$

Потери эксергии в конденсаторе ХМ

$$\Delta E_{nom}^K = G(ex_2 - ex_3) = 123,5 \text{ кВт}.$$

Потери эксергии в переохладителе

$$\Delta E_{nom}^{ПО} = G(ex_3 - ex_4) = 4,2 \text{ кВт}.$$

где $\eta_{\text{ЭКС}}$ – эксергетический КПД установки (холодильной, паротурбинной);

$\eta'_{\text{ЭКС}}$ – эксергетический КПД установки при условии, что потери эксергии в конденсаторе равны нулю.

Для конденсаторов (холодильных машин, паротурбинных установок), предназначенных для отвода теплоты из системы в окружающую среду, оценка эксергетического КПД производится косвенно по уравнению

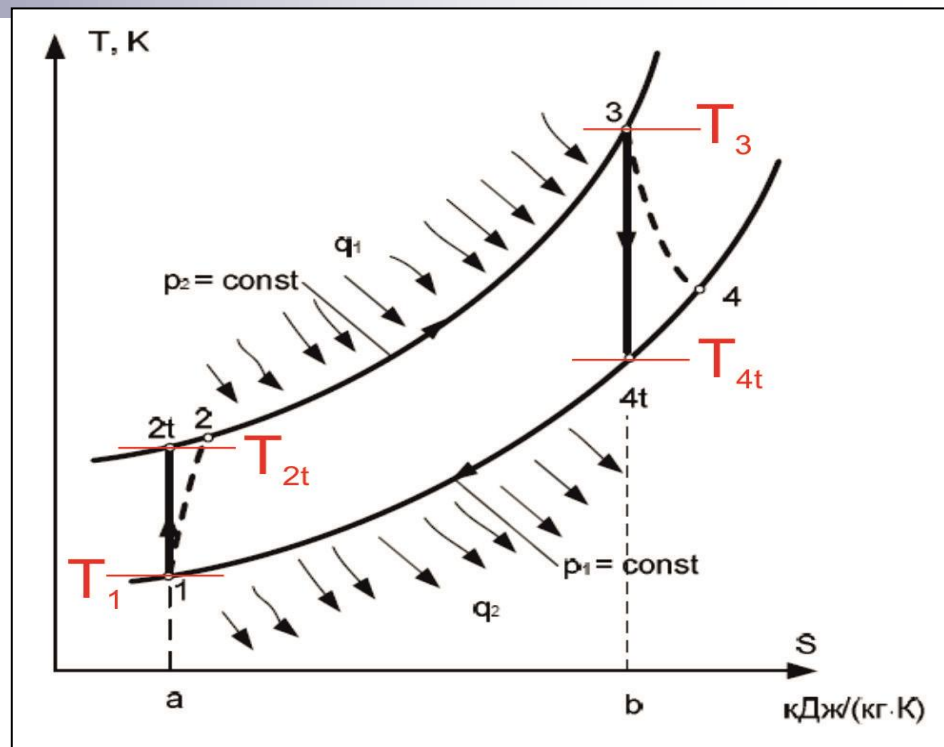
$$\eta_{\text{ЭКС}}^K = \frac{\eta_{\text{ЭКС}}}{\eta'_{\text{ЭКС}}}$$

$$\eta_{\text{ЭКС}}^K = \frac{\eta_{\text{ЭКС}}}{\eta'_{\text{ЭКС}}} = \left(\frac{34,8}{34,8 + \frac{123}{551} \cdot 100} \right) = 0,61$$

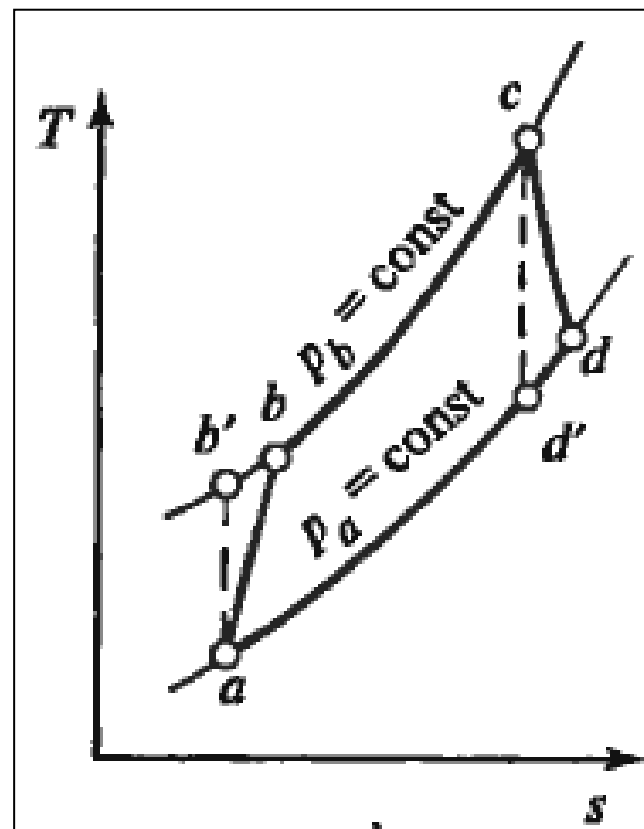
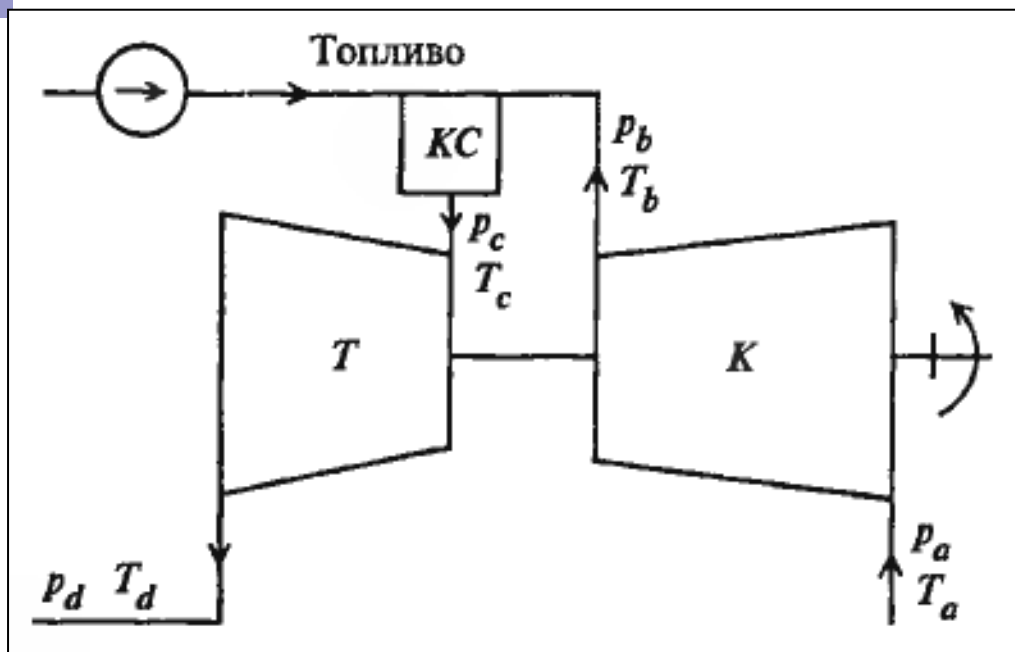
$$E_{\text{подв}} = N_{\text{э}} = 551,5 \text{ кВт}.$$

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{E_{Q_x}}{E_{\text{подв}}} \cdot 100 = 34,8\%.$$

$$\eta_{\text{ЭКС}}^K = 60,8\%, \quad \eta_{\text{ЭКС}}^{ПО} = 97,9\%.$$



Состояние	Параметры			
	P, бар	t, °C	h, кДж/кг	S, кДж/(кг·К)
1	18,9	750	1072,4	7,1449
2t	6,7	520	814,4	7,1859
2	6,0	750	1072,4	7,4744
3	1,06	422	708,1	7,5440
4t	0,99	17	290,3	6,6663
4	2,21	101,5	375,5	6,6935



Состояние	Параметры			
	P, бар	t, °C	h, кДж/кг	S, кДж/(кг К)
a	1	15	-10,03	7,1449
b	16	408	395	7,1859
c	6,0	750	1357	7,4744
d	1,06	560	708,1	7,5440
4t	0,99	17	290,3	6,6663
4	2,21	101,5	375,5	6,6935