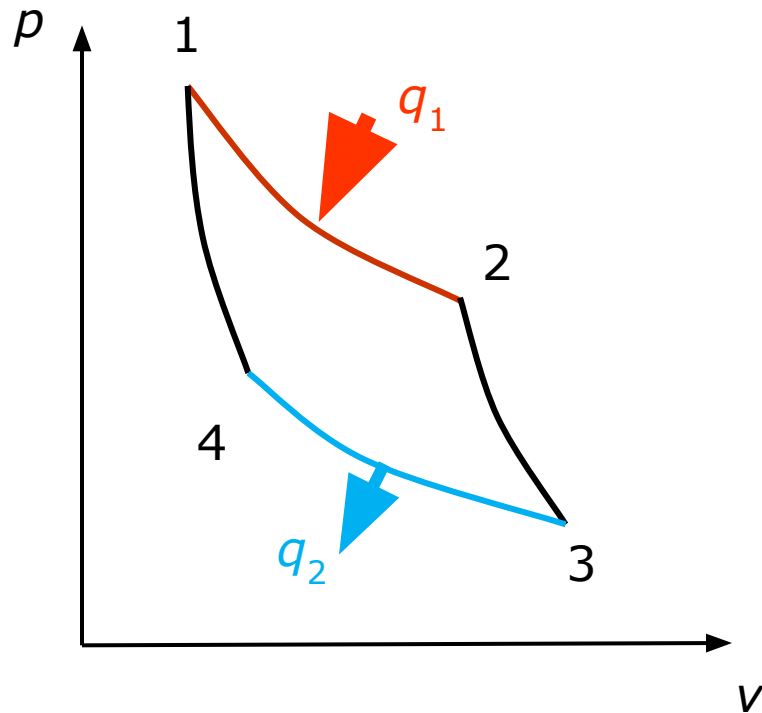


Термодинамические основы работы теплоэнергетических установок

Циклы ДВС

Цикл Карно



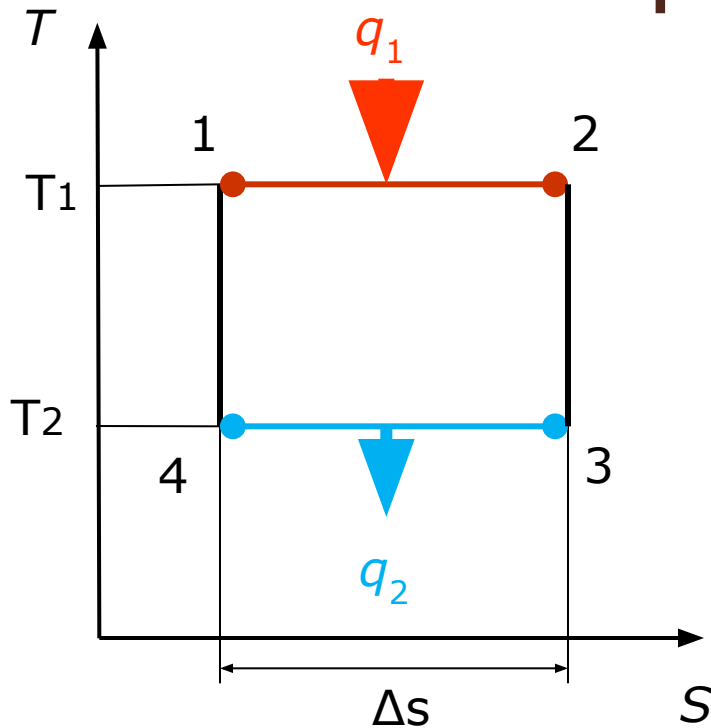
1-2 изотермическое
расширение

2-3 адиабатное расширение

3-4 изотермическое сжатие

4-1 адиабатное сжатие

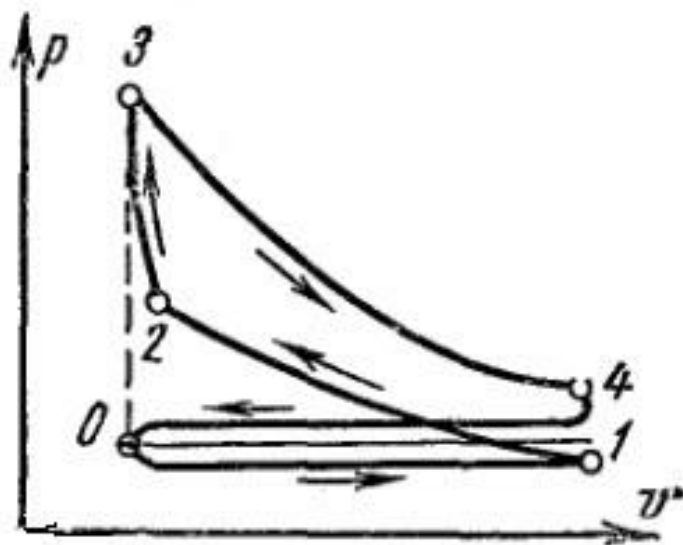
Цикл Карно



$$\begin{aligned}\eta_t &= \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \\ &= 1 - \frac{T_2 \Delta s}{T_1 \Delta s} = 1 - \frac{T_2}{T_1}\end{aligned}$$

Цикл Карно дает максимальное значение термического КПД в заданной диапazоне температур

Циклы ДВС



0- 1 – процесс всасывания воздуха из атмосферы в цилиндр двигателя

1-2 – процесс сжатия воздуха

т.2 – начало воспламенения топлива

2-3 – изохорный подвод теплоты

3-4 – процесс адиабатного расширения продуктов сгорания

т. 4 – открытие выхлопного клапана

4-0 – изохорный отвод теплоты (выхлоп дымовых газов в атмосферу)

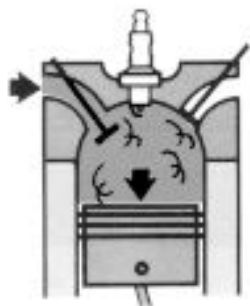
Циклы ДВС

- Масса рабочего тела не меняется
- При подводе теплоты (сжигании топлива) не происходит химических реакций.
- Не происходит побочных потерь теплоты, кроме основной – во время выпуска газов.
- Процессы сжатия и расширения происходят адиабатно.
- Процесс отвода рабочего тела заменяется отводом теплоты через стенки цилиндра
- Все процессы считаются обратимыми
- Рабочим телом принимается идеальный газ

Теоретические циклы ДВС



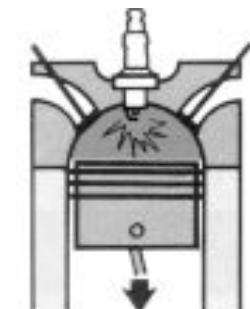
Цикл Отто



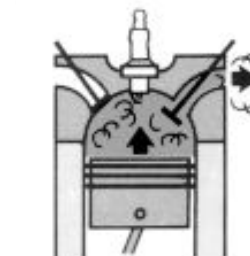
Открывается впускной клапан
Поршень движется вниз
Цилиндр заполняется
**ТОПЛИВОВОЗДУШНО
Й СМЕСЬЮ**
Закрывается впускной



2-й такт: СЖАТИЕ
Клапаны закрыты
Поршень движется
вверх
Повышаются давление и
температура

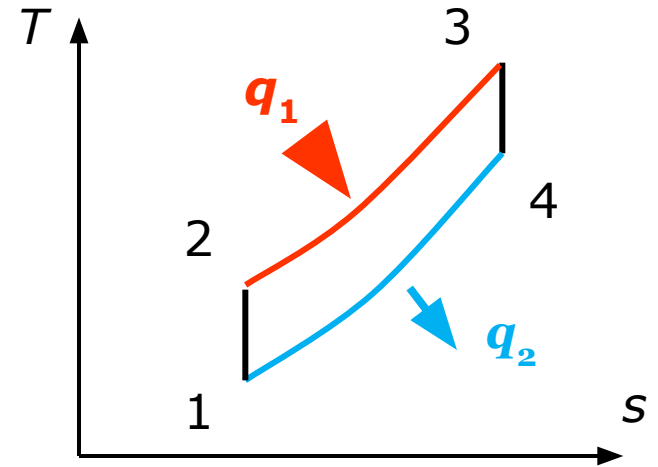
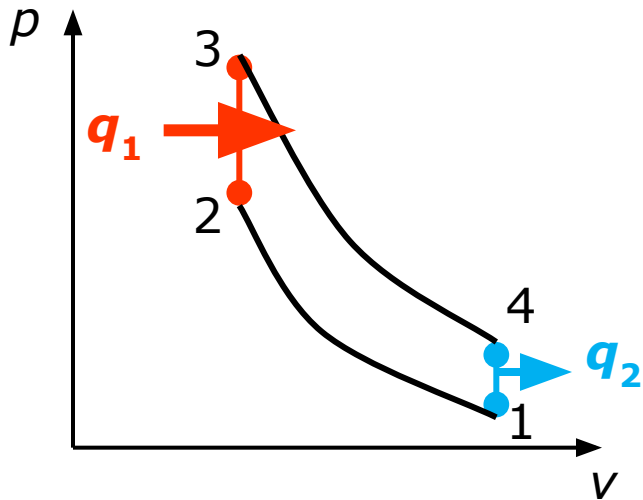


**3-й такт СГОРАНИЕ-
РАСШИРЕНИЕ**
Сгорание.
Расширение.



Открывается выпускной клапан
Поршень движется
вверх и выталкивает
продукты сгорания

Цикл Отто



- 1-2 адиабатное сжатие рабочего тела
- 2-3 изохорный подвод теплоты
- 3-4 адиабатное расширение рабочего тела
- 4-1 изохорный отвод теплоты
от рабочего тела к холодному источнику

Характеристики цикла Отто

- $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$

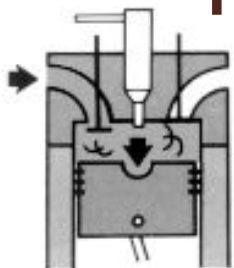
- $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$

- $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_v \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right) = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$

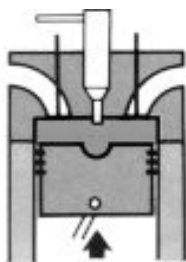
Необходимо отметить

- $\varepsilon = 7..11$
- Во время впуска в цилиндр поступает топливовоздушная смесь
- Топливовоздушная смесь воспламеняется благодаря электрическому заряду
- Сгорание происходит очень быстро
- $\eta_t = 25...30 \%$

Цикл Дизеля



Открывается впускной клапан
Поршень движется вниз
Цилиндр заполняется ВОЗДУХОМ
Закрывается впускной



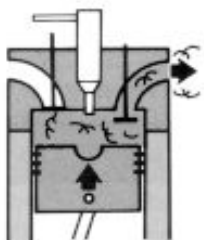
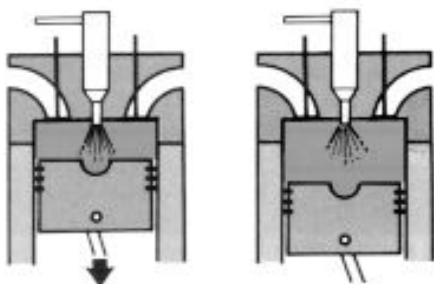
Клапаны закрыты
Поршень движется вверх
Значительно
повышаются давление и



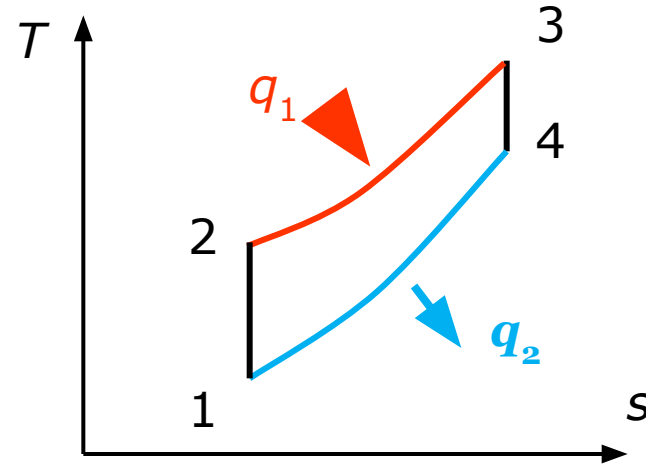
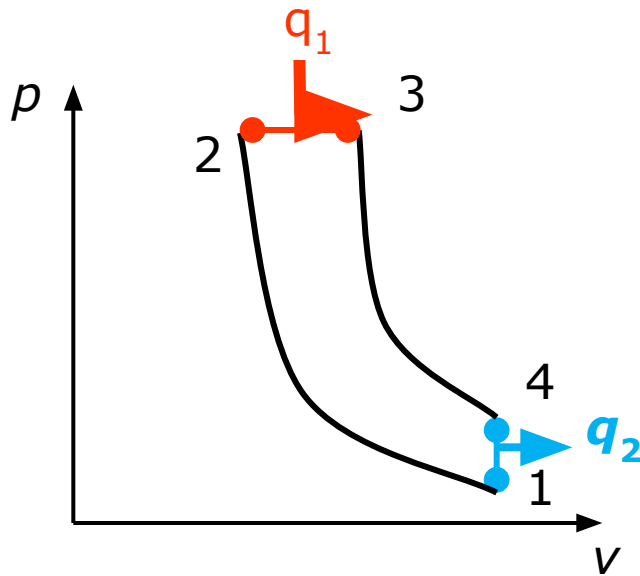
РАСШИРЕНИЕ
Топливо
впрыскивается под
высоким давлением



Открывается выпускной клапан
Поршень движется вверх и выталкивает
продукты сгорания



Цикл Дизеля



- 1-2 адиабатное сжатие рабочего тела
- 2-3 изобарный подвод теплоты
- 4-5 адиабатное расширение рабочего тела
- 5-6 изохорный отвод теплоты от рабочего тела к холодному источнику

Характеристики Цикла Дизеля

- $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$

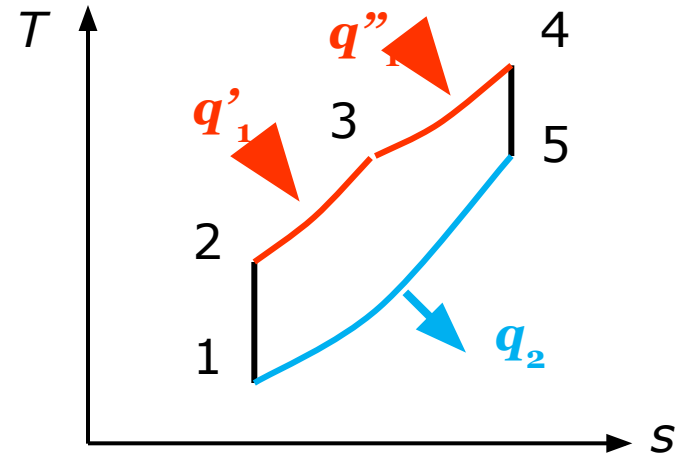
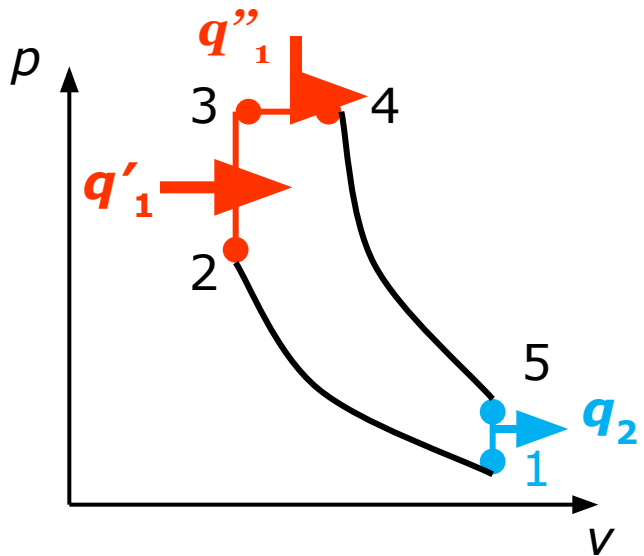
- $\rho = \frac{V_3}{V_2}$

- $$\eta = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{kT_2} \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right) = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{p^\kappa - 1}{\kappa(p - 1)}$$

Необходимо отметить

- $\varepsilon = 15 \dots 22$
- Во время впуска в цилиндр поступает воздух
- Топливо воспламеняется путем самовоспламенения
- Сгорание длится столько же, сколько длится процесс впрыскивания
- $\eta_t = 40 \dots 45 \%$

Цикл Тринклера (Сабатэ)



- 1-2 адиабатное сжатие рабочего тела
- 2-3 изобарный подвод теплоты
- 3-4 изохорный подвод теплоты
- 4-5 адиабатное расширение
- 5-6 изохорный отвод теплоты от рабочего тела к холодному источнику

Характеристики цикла Тринклера-Сабатэ

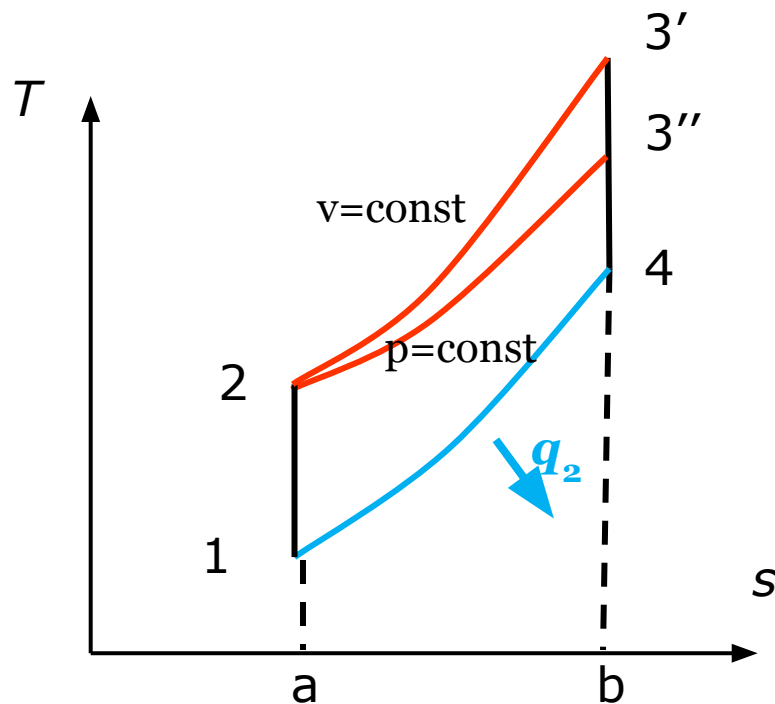
- $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$

- $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$

- $\rho = \frac{v_4}{v_3}$

- $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1' + q_1''} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\lambda \rho^{\kappa} - 1}{(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)}$

Сравнение циклов Отто и Дизеля при $\epsilon = \text{const}$



$123'4$ – цикл с изохорным
подводом теплоты

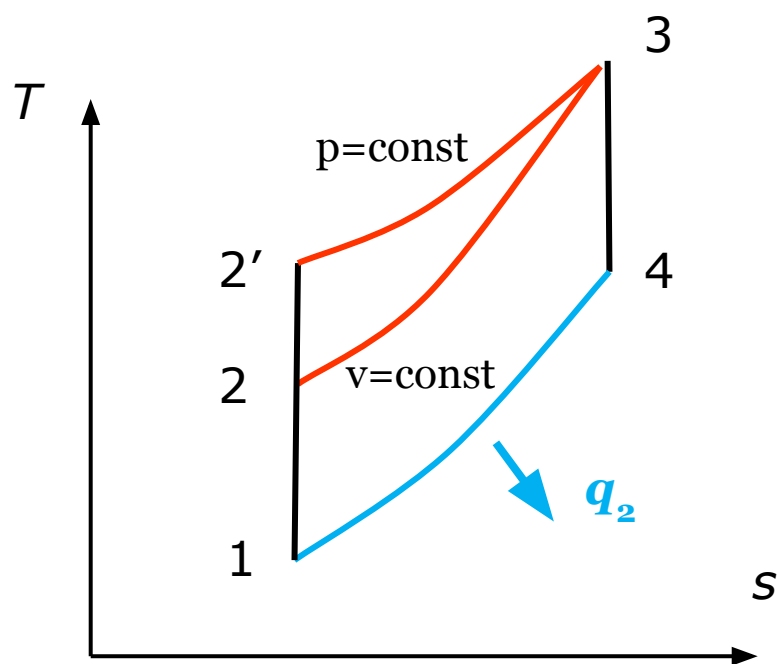
$123''4$ – цикл с изобарным
подводом теплоты

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

$$q_1^{\text{отто}} > q_1^{\text{дизеля}}$$

$$\eta_t^{\text{отто}} > \eta_t^{\text{дизеля}}$$

Сравнение циклов ДВС $T_3 = \text{const}$



1234 – цикл с изохорным
подводом теплоты

12'34 – цикл с изобарным
подводом теплоты

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

$$q_1^{\text{дизеля}} > q_1^{\text{отто}}$$

$$\eta_t^{\text{дизеля}} > \eta_t^{\text{отто}}$$

Термодинамические основы работы теплоэнергетических установок

Схемы и циклы ГТУ

Типы ГТУ

```
graph TD; A[Типы ГТУ] --> B[по способу сжигания топлива]; A --> C[способ передачи теплоты холодному источнику]; B --> D[p=const]; B --> E[v=const]; C --> F[открытые]; C --> G[закрытые];
```

по способу
сжигания
топлива

$p=\text{const}$

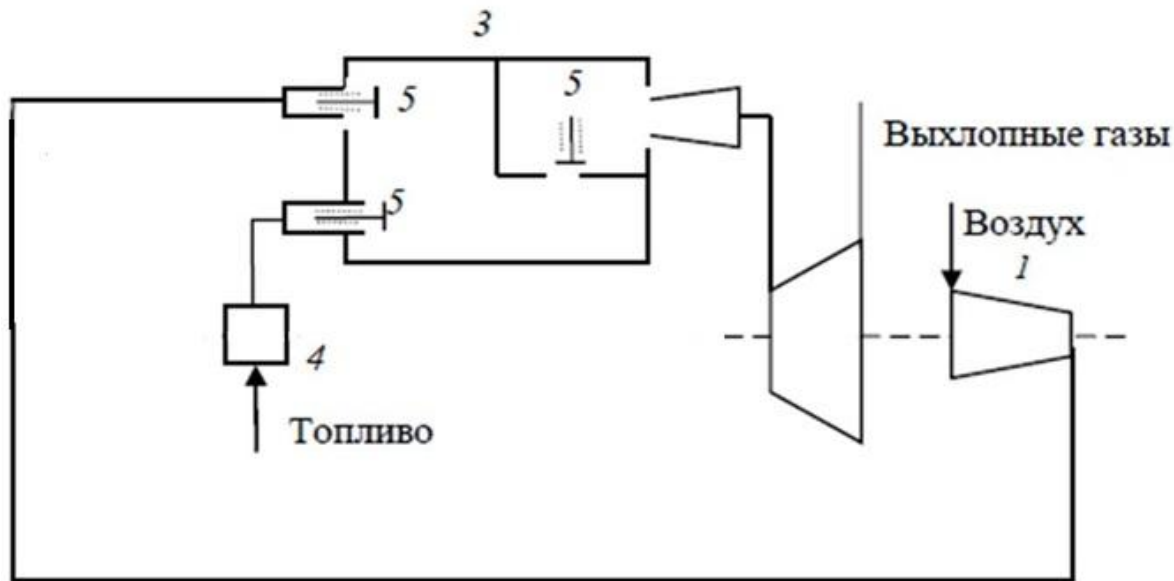
$v=\text{const}$

способ передачи теплоты
холодному источнику

открытые

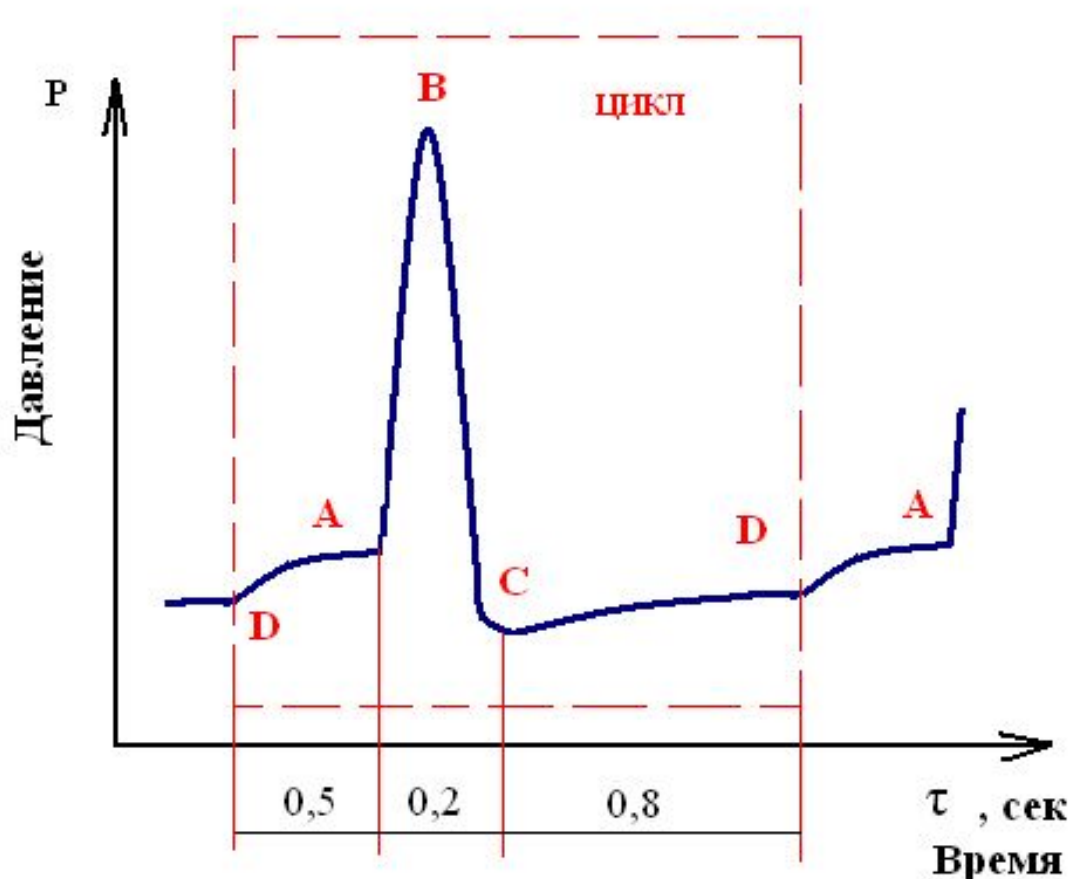
закрытые

Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $v=\text{const}$ (импульсная)

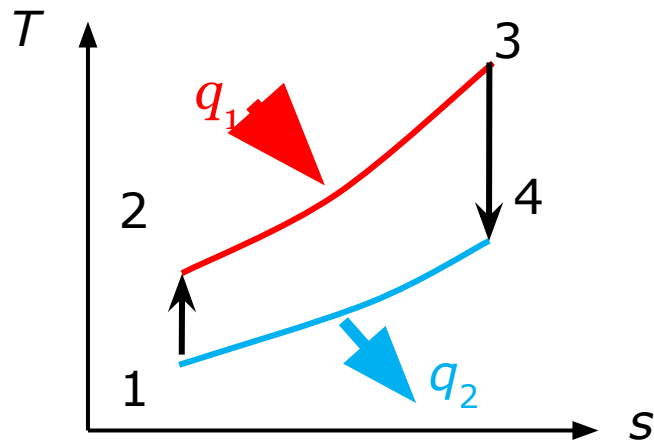
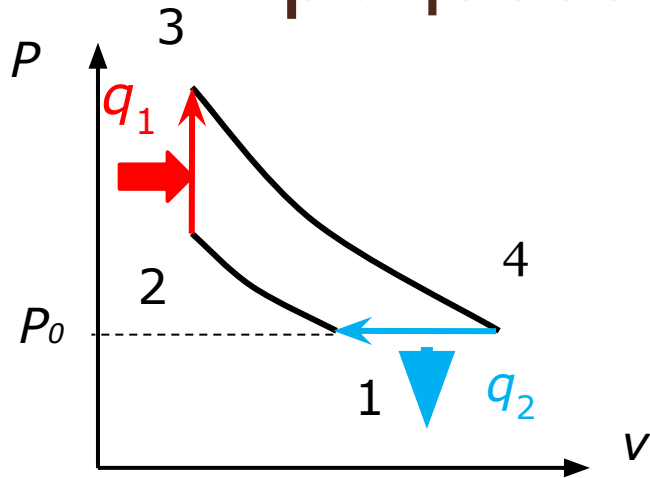


- 1 – компрессор
- 3 – камера сгорания
- 4 – топливный насос
- 5 – клапаны
- 6 – газовая турбина

Изменение давления в зависимости от времени в камере сгорания



Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $v=\text{const}$ (импульсная)

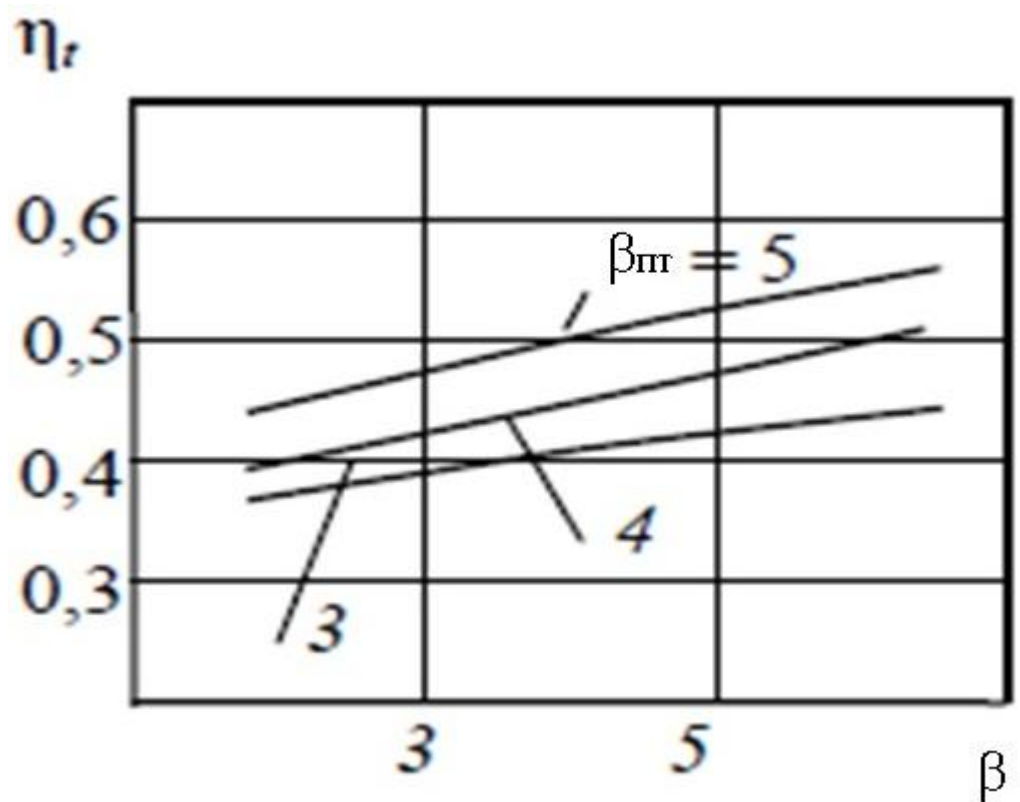


- 1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре
- 2-3 изохорный подвод теплоты ($v=\text{const}$)
- 3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине
- 4-1 изобарный отвод теплоты

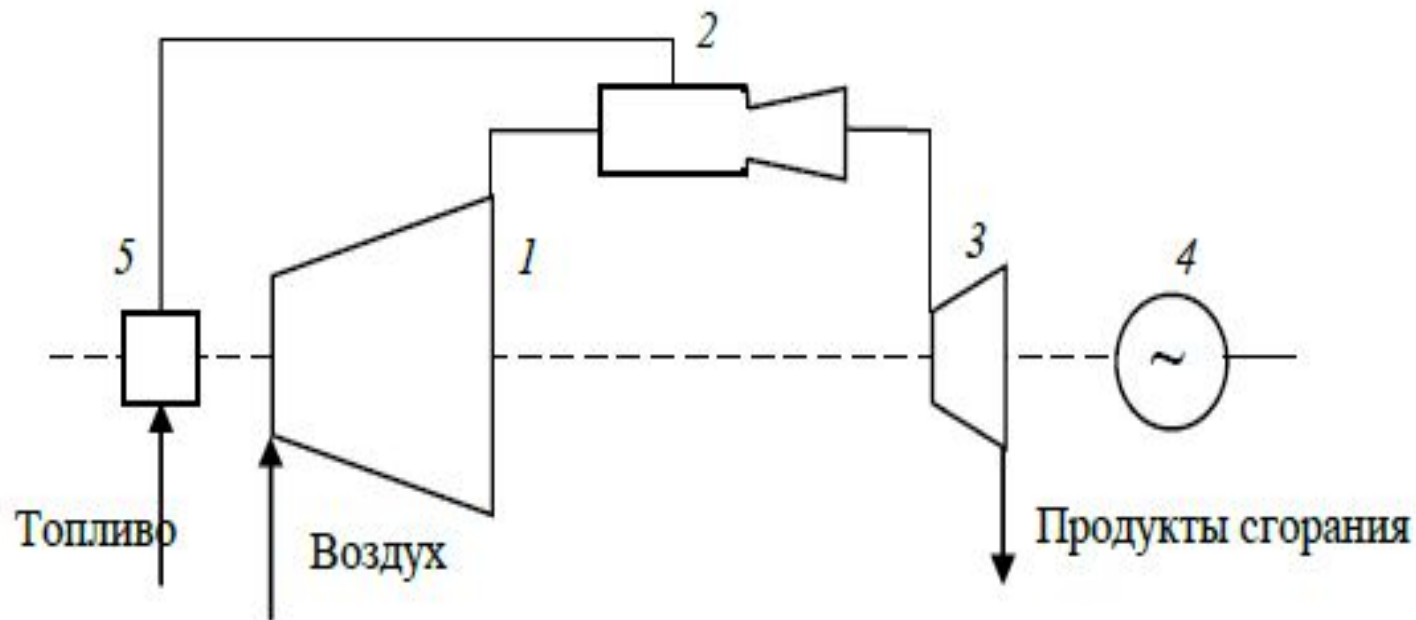
Характеристики цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $v=\text{const}$ (импульсная)

- $\beta(\pi) = \frac{p_2}{p_1}$
- $\beta_{\text{пт}} = \frac{p_3}{p_2}$
- $\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{(k-1)/k}} \frac{k(\beta_{\text{пт}}^{1/k} - 1)}{\beta_{\text{пт}} - 1}$

Экономичность цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $v=\text{const}$ (импульсная)

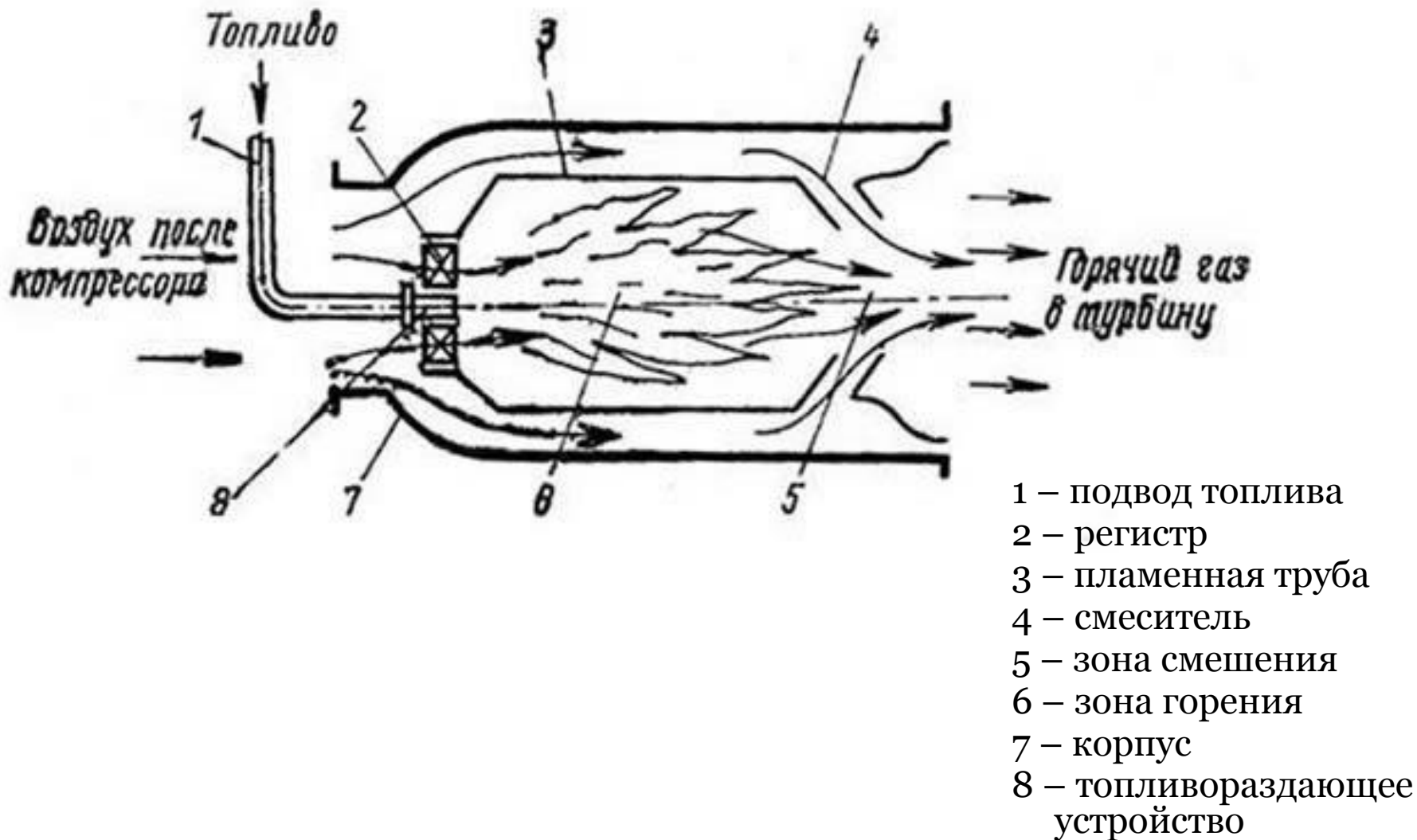


Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$

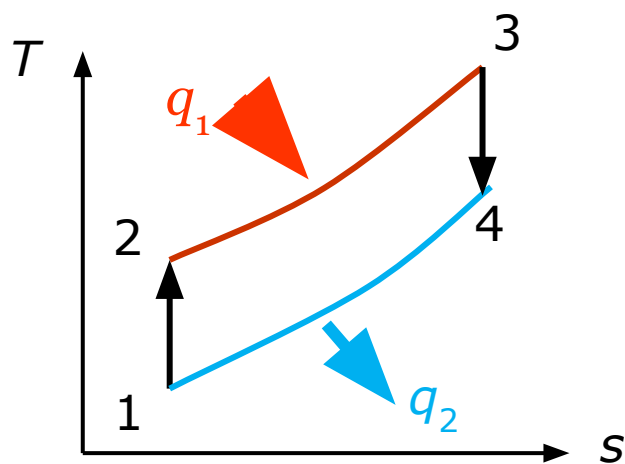
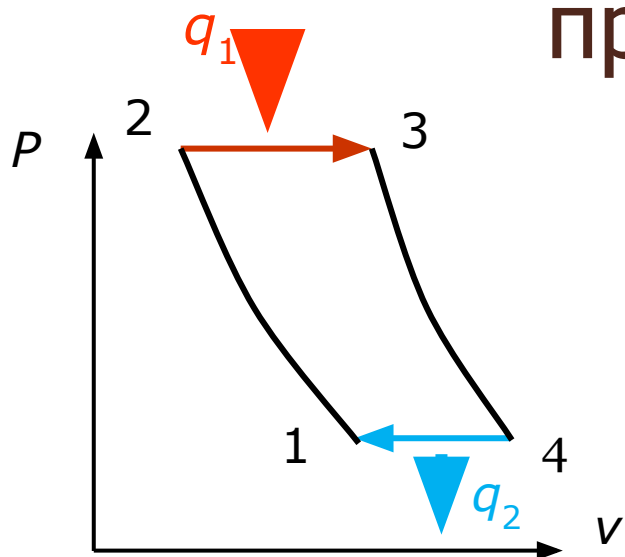


- 1 – компрессор
- 2 – камера сгорания
- 3 – газовая турбина
- 4 – электрогенератор
- 5 – топливный насос

Простейшая камера сгорания ГТУ



Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $p=\text{const}$



1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

2-3 изобарный подвод теплоты ($p=\text{const}$)

3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине

4-1 изобарный отвод теплоты

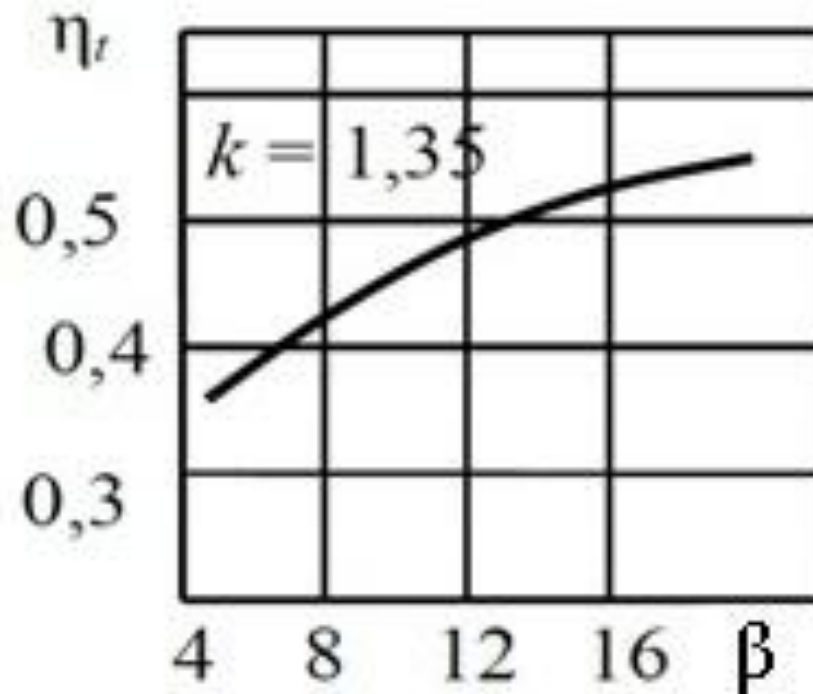
Характеристики цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $p=\text{const}$

- $\beta(\pi) = \frac{p_2}{p_1}$

- $\rho = \frac{v_3}{v_2}$

- $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$

Экономичность цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $p=\text{const}$



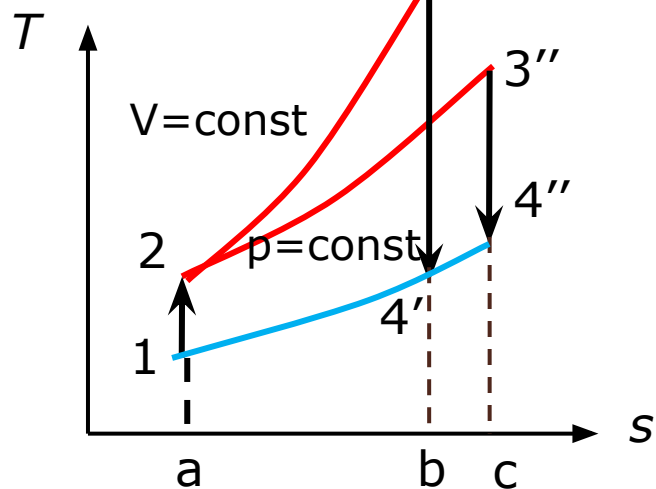
Сравнение циклов ГТУ

Условия сравнения:

$$\beta^{v=\text{const}} = \beta^{p=\text{const}}$$

$$q_1^{v=\text{const}} = q_1^{p=\text{const}}, \text{ то есть}$$

$$\text{пл } a123'b = \text{пл } a123''c$$



отведенная теплота разная,
то есть $\text{пл } a14'b < \text{пл } a14''c$

так как $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$, то

$$\eta_t^{v=\text{const}} > \eta_t^{p=\text{const}}$$

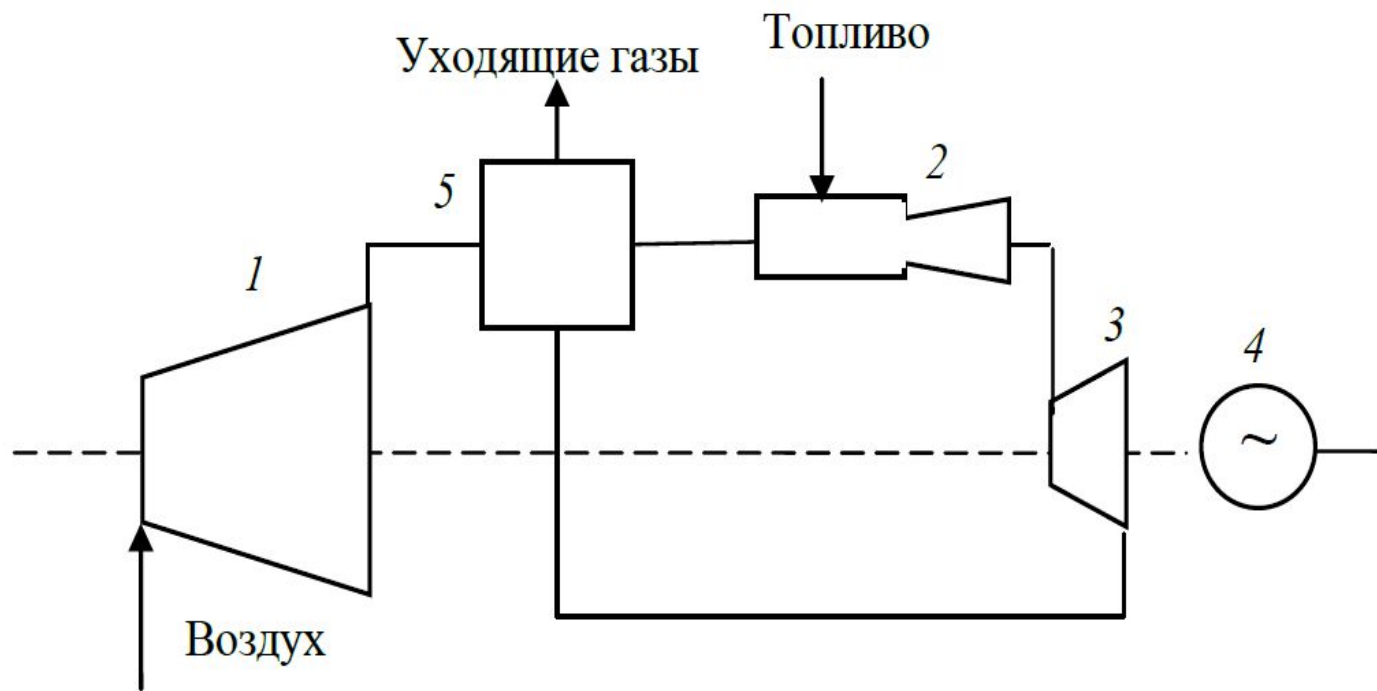
Сравнение циклов ГТУ

Однако, ГТУ с изохорным подводом теплоты не получили широкого распространения.

Недостатки

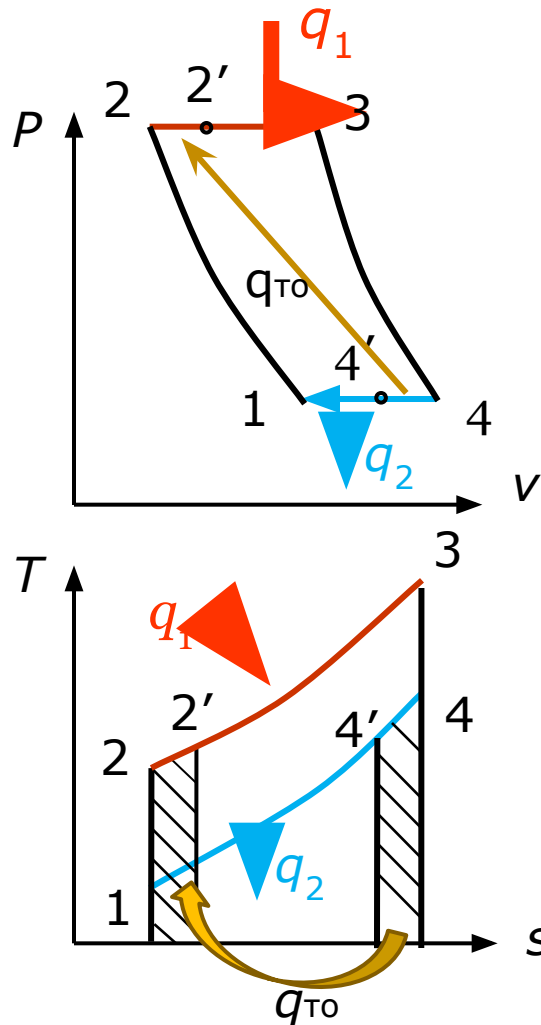
- Сложности в организации изохорного сгорания топлива
- Усложнение конструкции камеры сгорания
- Усиленный износ клапанов

Цикл ГТУ с регенерацией тепла



- 1 – воздушный компрессор
- 2 – камера сгорания
- 3 – газовая турбина
- 4 – электрогенератор
- 5 - регенератор

Цикл ГТУ с регенерацией тепла



1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

2-2' нагрев воздуха в регенераторе за счет теплоты уходящих газов

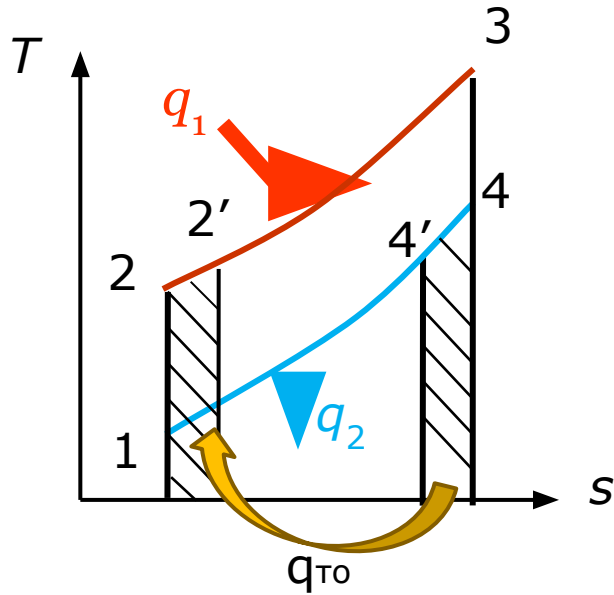
2'-3 нагрев рабочего тела в камере сгорания при $p=\text{const}$ в процессе подвода тепла при сжигании топлива

3-4 адиабатное расширение рабочего тела в турбине

4-4' – отвод теплоты от уходящих газов в регенераторе

4-1 – охлаждение газов в атмосфере

Характеристики цикла ГТУ с регенерацией тепла



$$\sigma = \frac{T_{2'} - T_2}{T_4 - T_2}$$

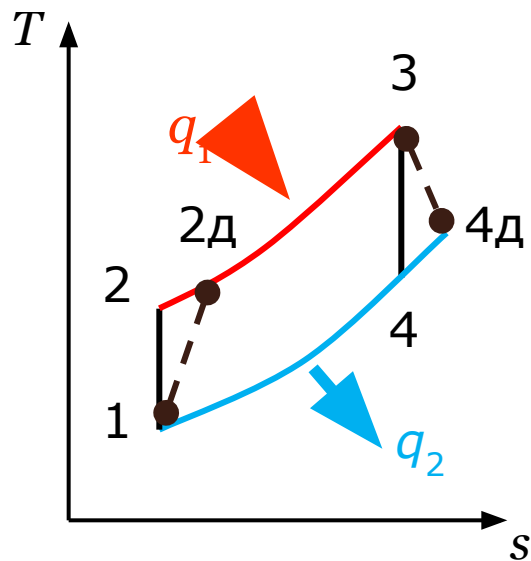
$$\beta = \frac{p_2}{p_1}$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_{2'}}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{(\rho\gamma - 1) - \beta^{\frac{k-1}{k}} (\gamma - 1)}{\gamma\beta^{\frac{k-1}{k}} (\rho - 1)}$$

$$\gamma = \frac{T_{2'}}{T_2}$$

Учет необратимости в ГТУ



1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

1-2д условное необратимое адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

2д-3 изобарный подвод теплоты ($p=\text{const}$)

3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине

3-4д условное необратимое адиабатное расширение рабочего тела в турбине

4-1 изобарный отвод теплоты

Учет необратимости в ГТУ

$$\eta_{\kappa}^{\text{ад}} = \frac{l_{\kappa}^{\text{T}}}{l_{\kappa}^{\text{Д}}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$

$$\eta_{0\text{i}}^{\text{T}} = \frac{l_{\text{T}}^{\text{Д}}}{l_{\text{T}}^{\text{T}}} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4}$$

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_{\text{Д}}} = \frac{l_{\text{T}}^{\text{Д}} - l_{\kappa}^{\text{Д}}}{h_3 - h_{2'}}$$

$$l_{\text{е}} = \left((h_3 - h_4) \eta_{0\text{i}}^{\text{T}} - (h_2 - h_1) / \eta_{\kappa}^{\text{ад}} \right) \eta_{\text{мех}}$$

$\eta_{\text{мех}}$ - механический КПД

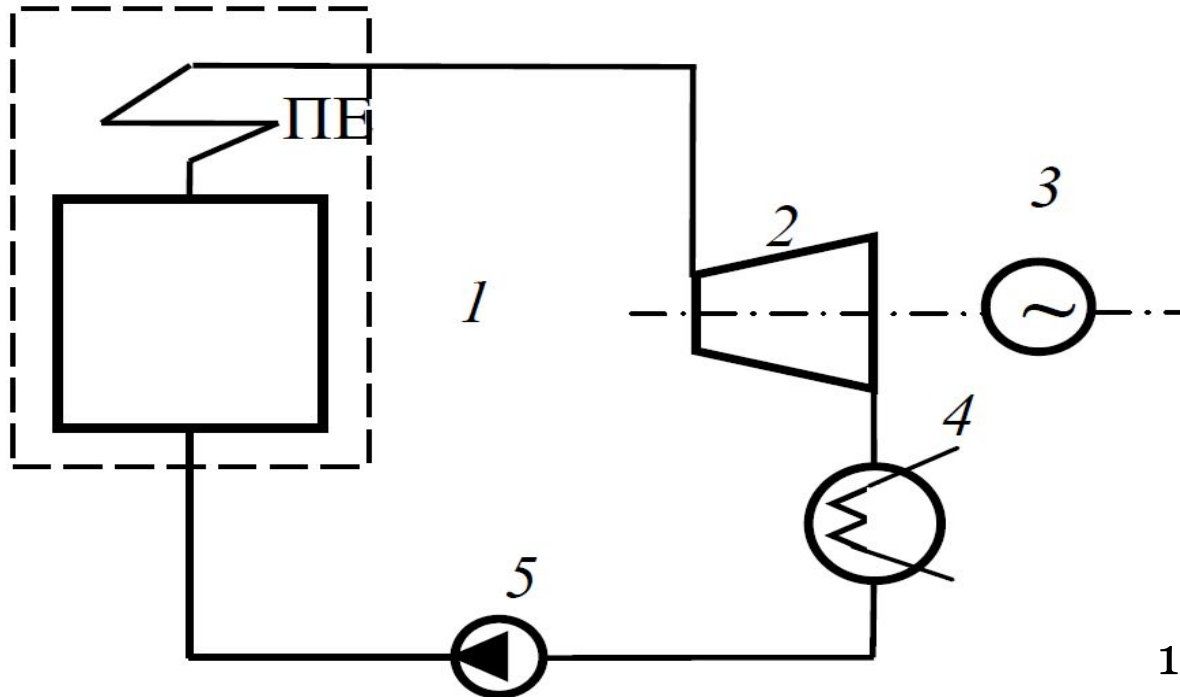
$$\eta_{\text{е}} = \frac{l_{\text{е}}}{q_{\text{Д}}}$$

$$N_{\text{е}} = G_{\text{возд}} l_{\text{е}}$$

Термодинамические основы работы теплоэнергетических установок

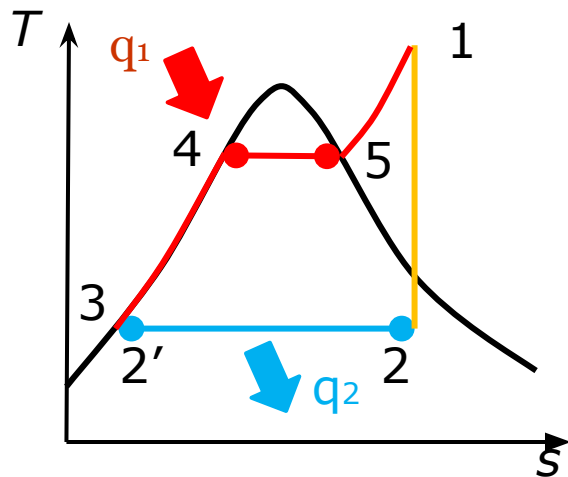
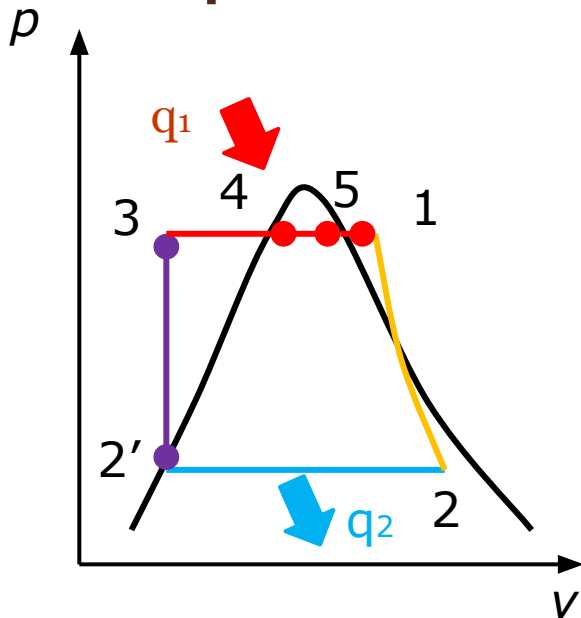
Схемы и циклы ПТУ

Цикл Ренкина на перегретом паре



- 1 – котлоагрегат
- 2 – турбина
- 3 – электрогенератор
- 4 – конденсатор
- 5 – питательный насос
- ПЕ – пароперегреватель

Цикл Ренкина на перегретом паре



1-2 расширение пара в турбине

2-2' конденсация пара в
конденсаторе

2' -3 сжатие воды в питательном
насосе

3-4 нагрев питательной воды до
температуры кипения

4-5 генерация пара в котле

5-1 перегрев пара в
пароперегревателе

Термический КПД цикл Ренкина на перегретом паре

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_3) - (h_2 - h_{2'})}{(h_1 - h_3)} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2'})}{(h_1 - h_3)} = \frac{l_t - l_n}{q_1}$$

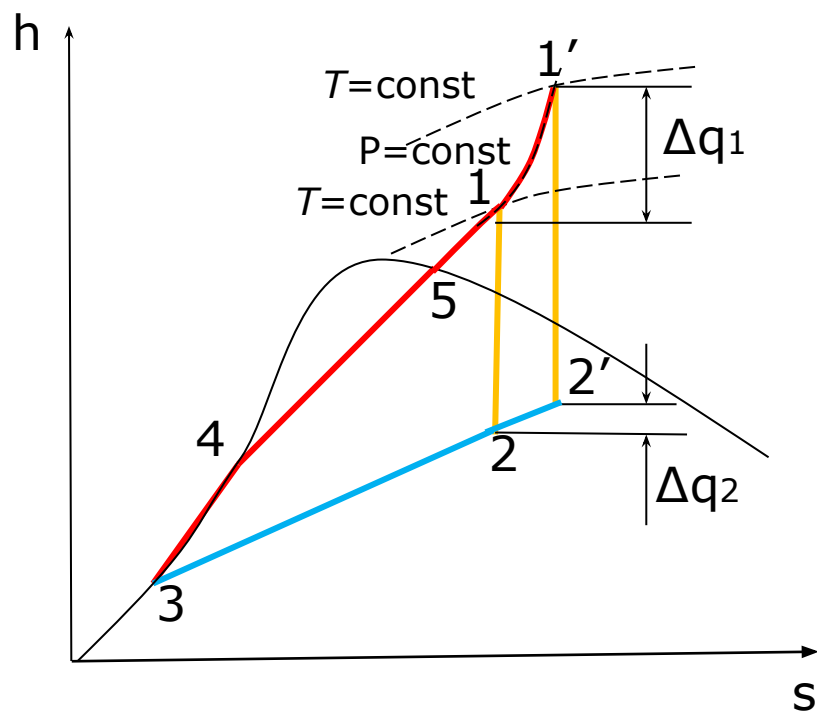
l_t - работа пара в турбине

l_n - работа сжатия в питательном насосе

q_1 - подведенная теплота в котлоагрегате

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_3)}$$

Влияние начальной температуры пара на термический КПД цикла Ренкина

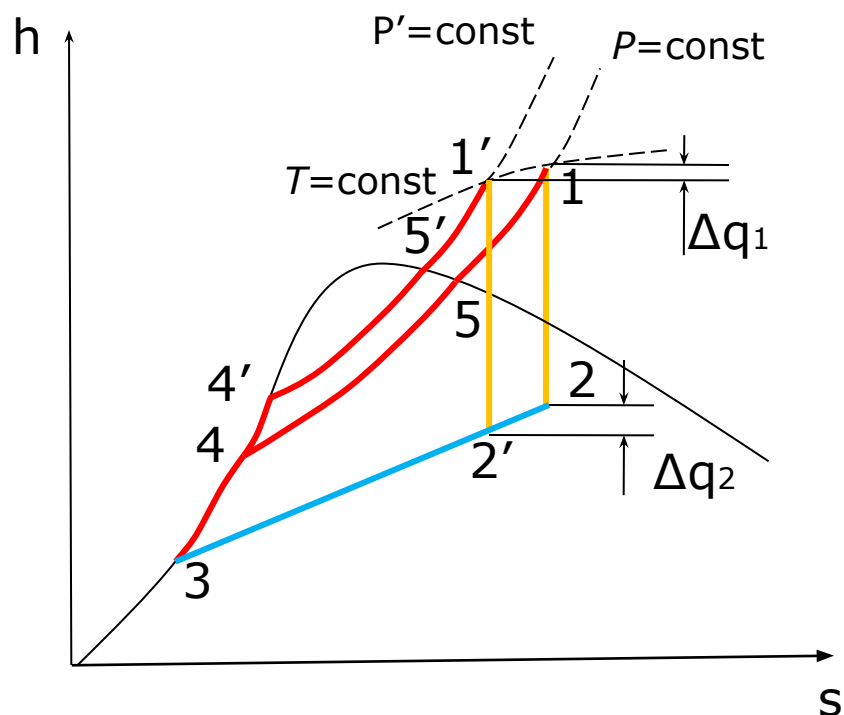


$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

$$\Delta q_1 > \Delta q_2$$

$$\eta_t < \eta'_t$$

Влияние начального давления пара на термический КПД цикла Ренкина

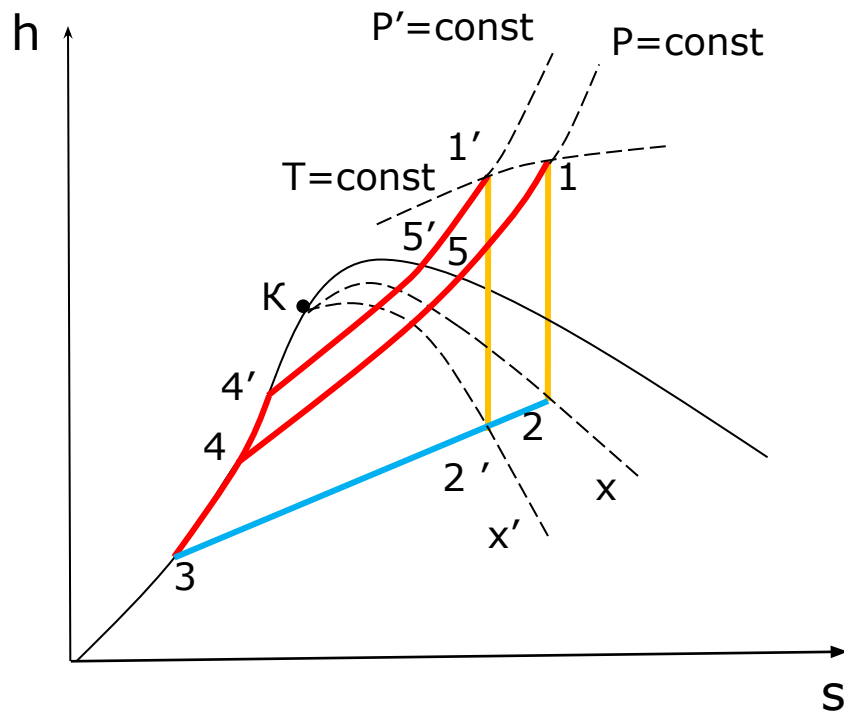


$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

$$\Delta q_1 < \Delta q_2$$

$$\eta_t < \eta'_t$$

Влияние начального давления пара на термический КПД цикла Ренкина



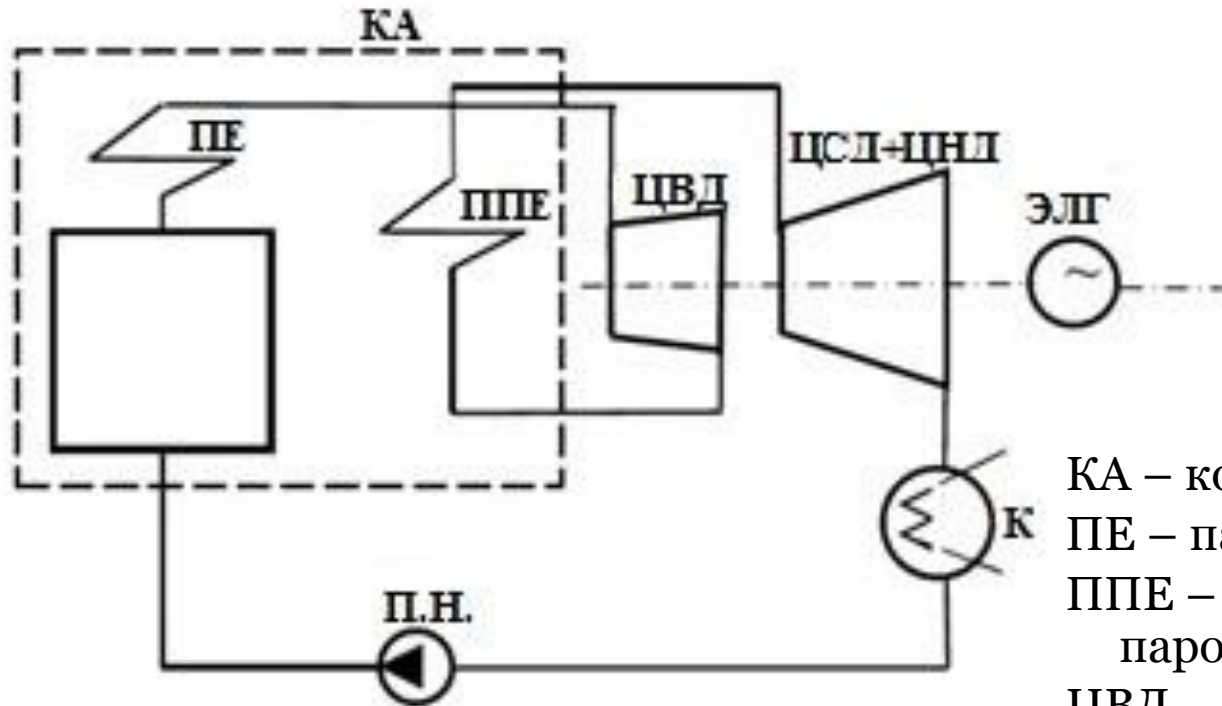
недостатки

- возрастает влажность и падает сухость
 - дополнительное сопротивление
 - эрозия лопаток турбины
- увеличивается работа насоса
- возрастает число ступеней

методы борьбы

- одновременное повышение давления и температуры пара перед турбиной
- промежуточный (вторичный) перегрев пара

Промежуточный перегрев пара (вторичный)



КА – котлоагрегат

ПЕ – пароперегреватель

ППЕ – промежуточный
пароперегреватель

ЦВД – цилиндр высокого давления

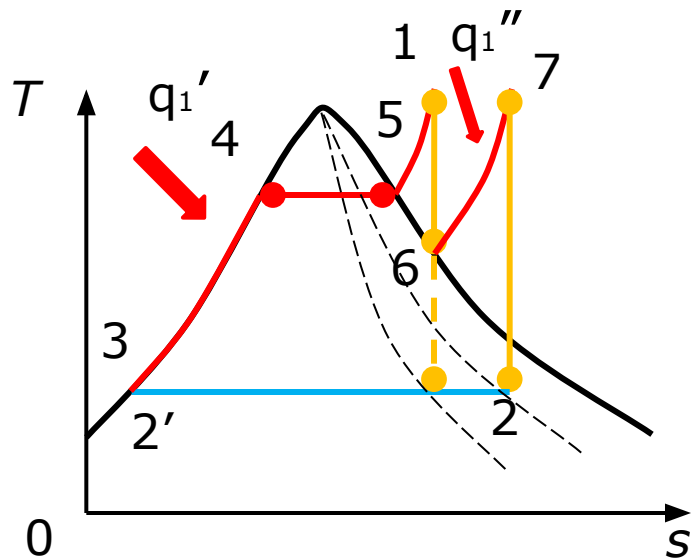
ЦСД – цилиндр среднего давления

ЦНД – цилиндр низкого давления

К – конденсатор

ПН – питательный насос

Промежуточный перегрев пара (вторичный)



1-6 расширение пара в ЦВД

6-7 промежуточный перегрев пара

7-2 расширение пара в ЦСД+ЦНД

2-2' конденсация пара в конденсаторе

2'-3 сжатие воды в питательном насосе

3-4 нагрев питательной воды до температуры кипения

4-5 генерация пара в котле

5-1 перегрев пара в пароперегревателе

Промежуточный перегрев пара (вторичный)

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_3) + (h_7 - h_6) - (h_2 - h_{2'})}{(h_1 - h_3) + (h_7 - h_6)} =$$

$$= \frac{(h_1 - h_6) + (h_7 - h_2) - (h_3 - h_{2'})}{(h_1 - h_3) + (h_7 - h_6)} = \frac{l_{\text{ЦВД}} + l_{\text{ЦСД+ЦНД}} - l_{\text{н}}}{q_1' + q_1''}$$

$l_{\text{ЦВД}}$ - работа пара в цилиндре высокого давления

$l_{\text{ЦСД+ЦНД}}$ - работа пара в цилиндрах среднего и низкого давления

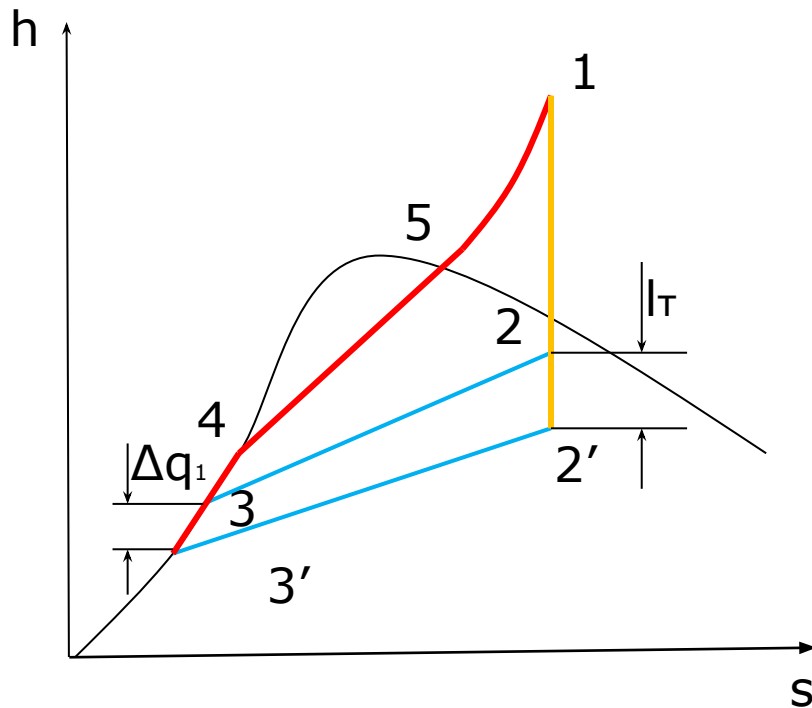
$l_{\text{н}}$ - работа сжатия в питательном насосе

q_1' - подведенная теплота в котлоагрегате

q_1'' - подведенная теплота в промежуточном пароперегревателе

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_6) + (h_7 - h_2)}{(h_1 - h_3) + (h_7 - h_6)}$$

Влияние конечных параметров пара на величину КПД цикла Ренкина

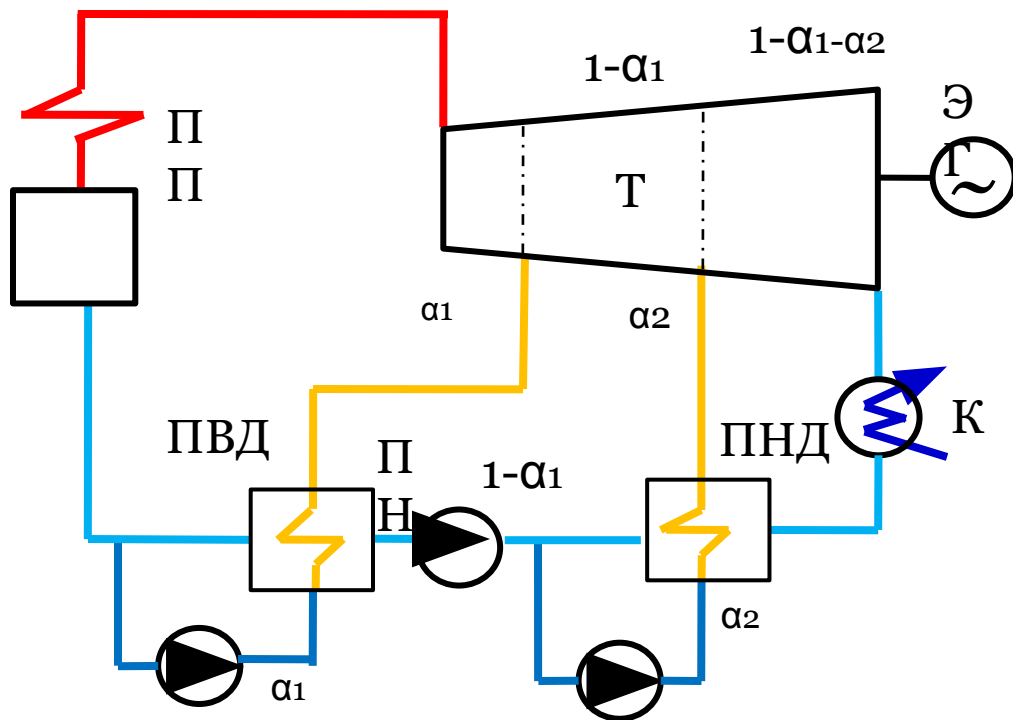


$$\eta_t = \frac{l_T}{q_1}$$

$$l_1 > \Delta q_1$$

$$\eta_t < \eta'_t$$

Регенеративный цикл



ПП – пароперегреватель

Т – турбина

ЭГ – электрогенератор

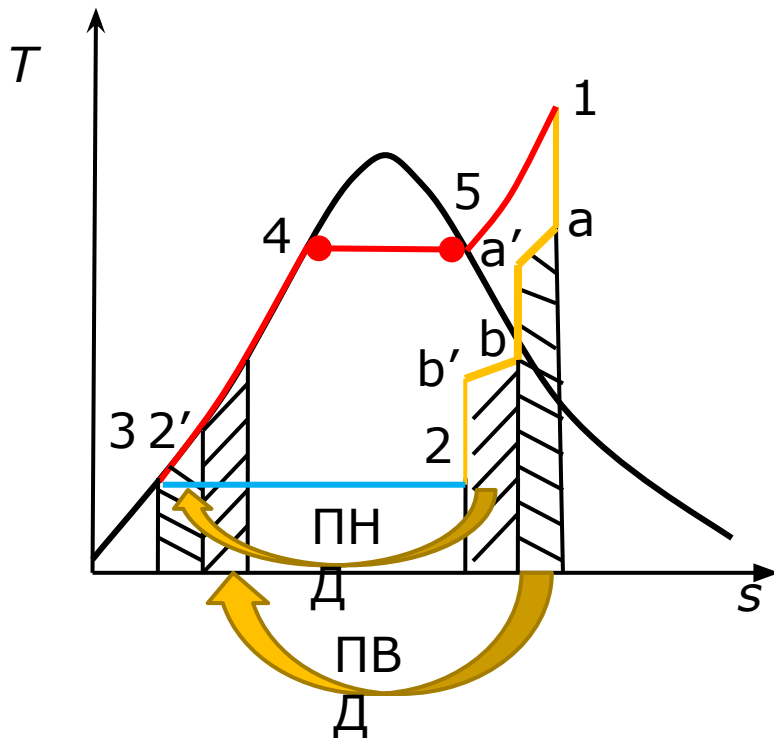
К – конденсатор

ПНД – подогреватель низкого давления

ПН – питательный насос

ПВД – подогреватель высокого давления

Регенеративный цикл



1-a расширение пара в первых ступенях турбины

a-a' изобарный отвод теплоты от пара в ПВД

a-b расширение в ступенях турбины

b-b' изобарный отвод теплоты от пара в ПНД

b'-2 расширение в ступенях турбины

2-2' конденсация пара в конденсаторе

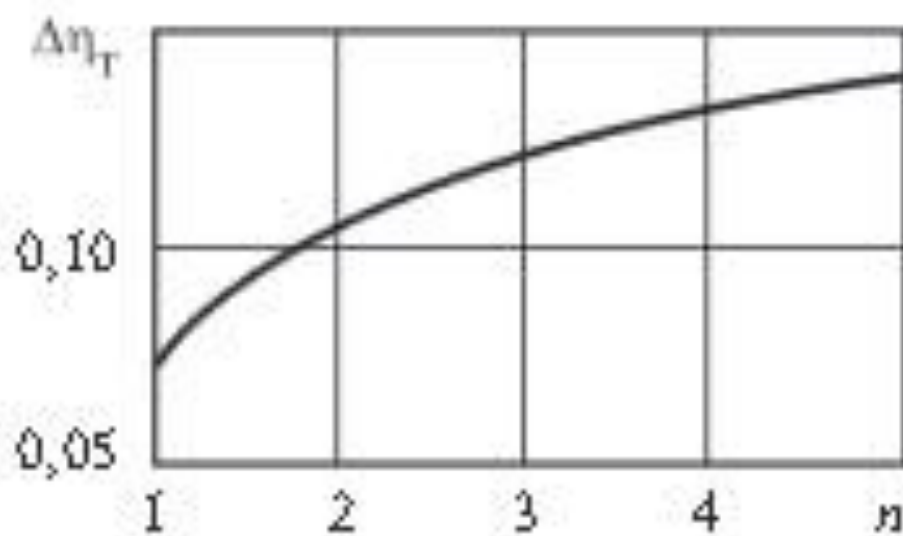
2'-3 сжатие воды в питательном насосе

3-4 нагрев питательной воды до температуры кипения

4-5 процесс парообразования

5-1 перегрев пара

Влияние числа отборов на прирост термического КПД



Основные характеристики цикла

- Теоретическая мощность турбины

$$N_T = D_0 (h_1 - h_2)$$

- Внутренняя мощность турбины

$$\eta_{oi} = \frac{h_{1i} - h_2}{h_1 - h_2}$$

$$N_i = D_{\text{д}} (h_1 - h_{2o}) = N \eta_i$$

- Эффективная мощность

$$N_{\text{э}} = N_i \eta$$

- Электрическая мощность

$$N_{\text{э}} = N_e \eta_{\Gamma}$$

Основные характеристики цикла

- Относительный эффективный КПД

$$\eta_{\text{oe}} = \eta_{oi} \eta$$

- Относительный электрический КПД

$$\eta_{\text{оэ}} = \eta_{iM} \eta$$

- Расход пара на турбину

$$D_0 = \frac{N_T}{h_3 - h_2} = \frac{N_i}{2\eta_{oi}(h_1 - h_2)} = \frac{N_e}{\eta_{oe}(h_1 - h_2)} = \frac{N_{\text{э}}}{\eta_{\text{оэ}}(h_1 - h_2)}$$

- Удельный расход пара

$$d_0 = \frac{D_0}{N_{\text{э}}} = \frac{1}{\eta_{\text{оэ}}(h_1 - h_2)}$$

Основные характеристики цикла

- Внутренний КПД цикла

$$\eta_i = \frac{l_{\text{пол}}}{q_1} = \frac{(h_1 - h_2)\eta_{oi}^T - (h_3 - h_{2'}) / \eta_{oi}^H}{(h_1 - h_{2'}) - (h_3 - h_{2'}) / \eta_{oi}^H}$$

- Эффективный КПД цикла

$$\eta_e = \eta_k \eta_i \eta_m$$

- КПД котлоагрегата

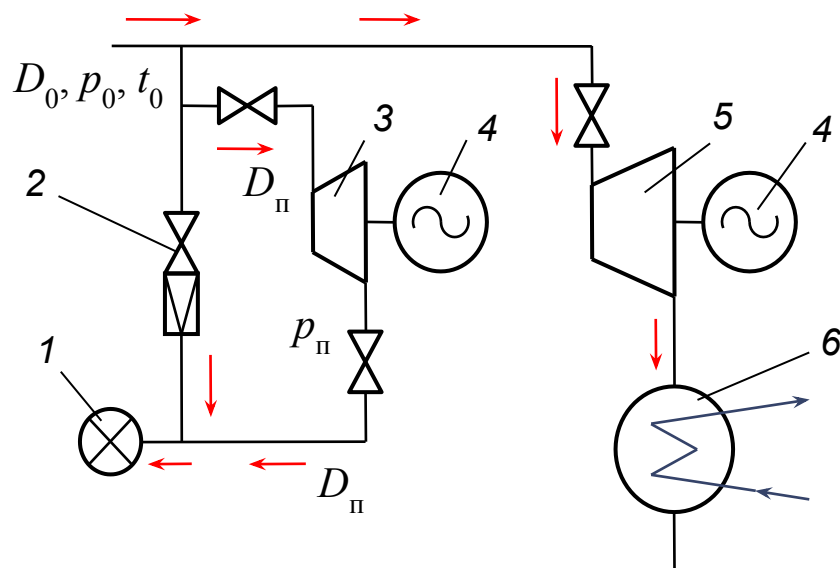
$$\eta_k = \frac{D_0 (h_1 - h_{2'})}{BQ_H^p}$$

Теплофикационные установки

Комбинированной выработкой на электростанциях электроэнергии и теплоты называют *теплофикацией*, а турбины, применяемые на таких электростанциях – *теплофикационными*

Тепловые электростанции, осуществляющие комбинированную выработку электроэнергии и теплоты называются *теплоэлектроцентралями (ТЭЦ)*, в отличии от *конденсационных электростанций (КЭС)*, вырабатывающих только электроэнергию

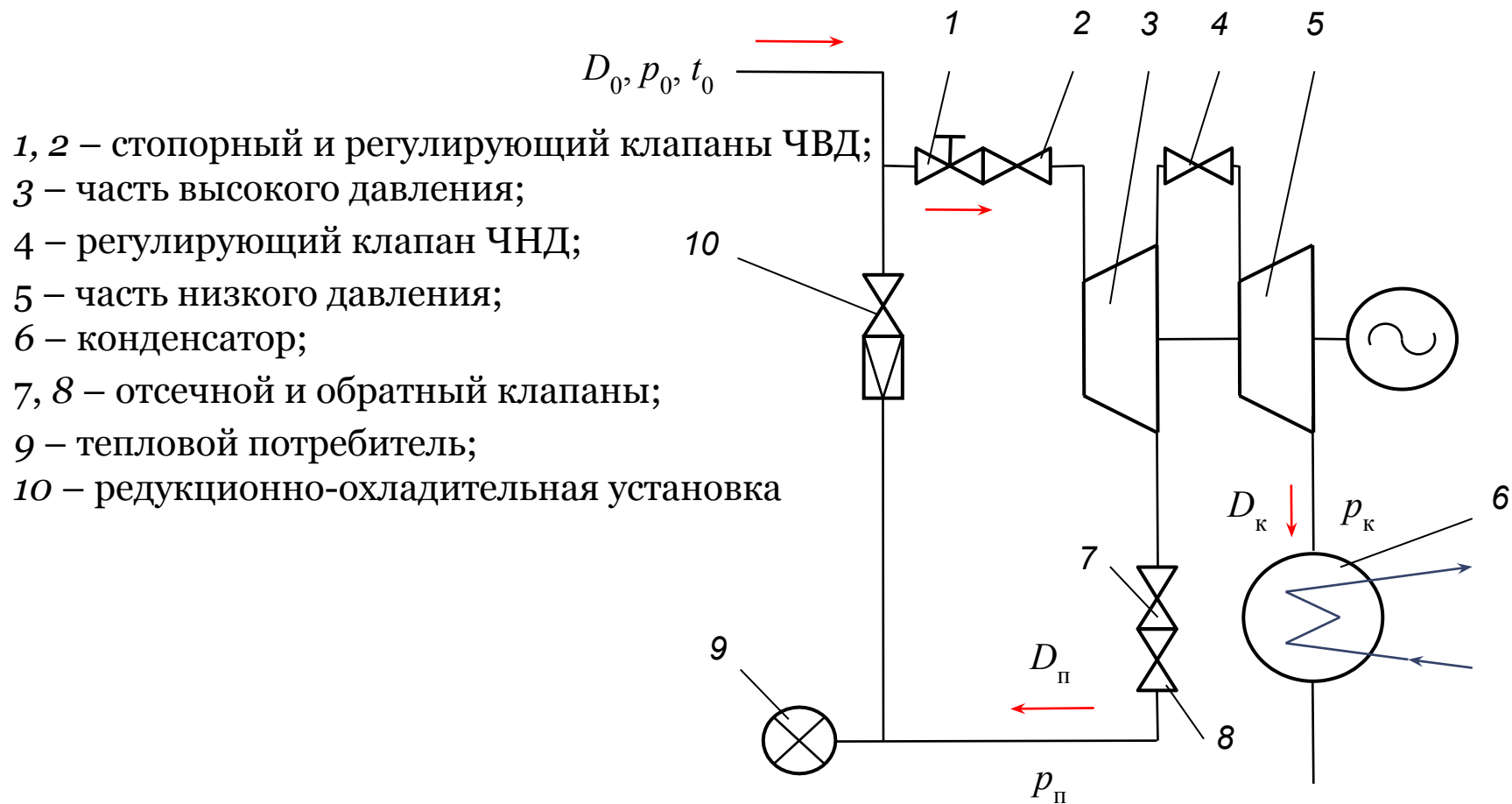
Турбины с противодавлением (типа Р)



- 1 – тепловой потребитель;
- 2 – редуционно-охладительная установка;
- 3, 5 – турбины с противодавлением и конденсационная,
- 4 – генераторы;
- 6 – конденсатор

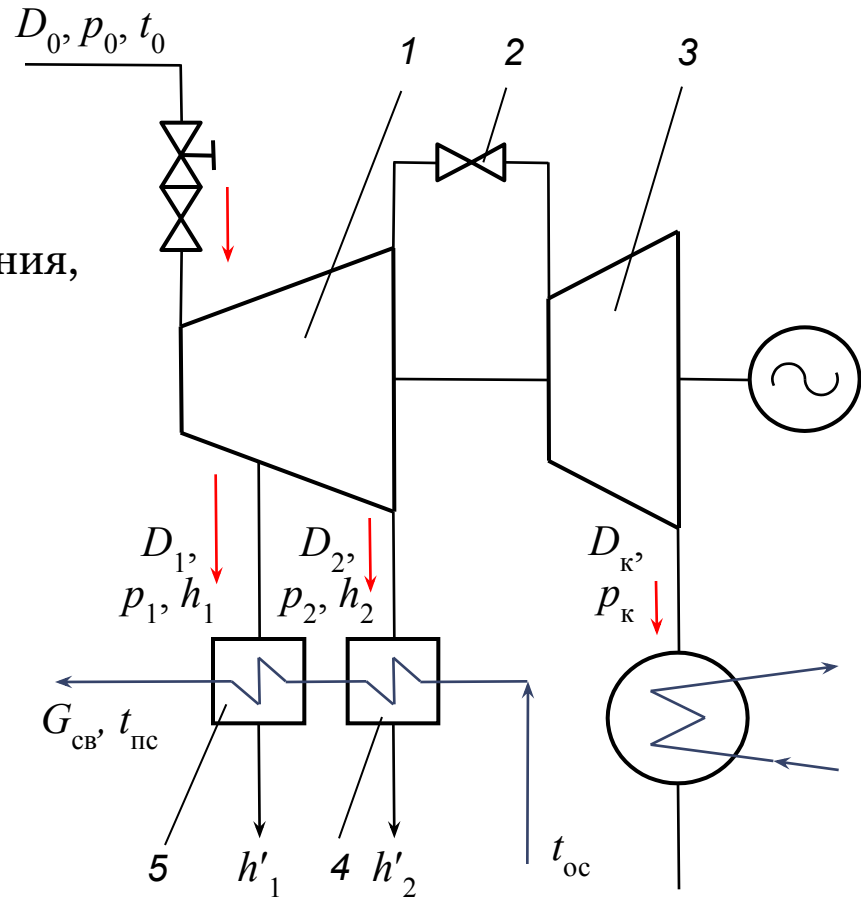
Если максимальные тепловые нагрузки не удастся покрыть с помощью противодавления турбины, то пар потребителю отпускается также через РОУ. Т.к. Р-турбина работает по тепловому графику нагрузок, то для обеспечения электрического потребителя обязательно имеется К-турбина.

Турбины с промежуточным регулируемым отбором пара (типа П)



Турбина с двухступенчатым подогревом сетевой воды (типа Т)

1, 3 – части высокого и низкого давления,
2 – регулирующий клапан;
4, 5 – нижняя и верхняя ступени
подогревателя сетевой воды



Маркировка паровых турбин

К – конденсационные

П – теплофикационные с производственным отбором пара

Т – теплофикационные с отопительным отбором пара

ПТ – теплофикационные с производственным и отопительным отбором пара

Р – с противодавлением, без регулируемого отбора пара

ПР – теплофикационные с противодавлением и с производственным отбором пара

Маркировка паровых турбин

ТР – теплофикационные с противодавлением и с отопительным отбором пара

ТК – теплофикационные с отопительным отбором пара, с большой привязанной конденсационной мощностью

КТ – теплофикационные с отопительными отборами нерегулируемого давления

Маркировка паровых турбин

- 1 цифра – электрическая мощность (номинальная/максимальная)
- 2 цифра – начальное давление в МПа (кгс/см²)

для П, ПТ, Р и ПР – давление производственного отбора и (или) противодавление в МПа (кгс/см²)
частота вращения (50/25) – дробью после давления

- 3 цифра - модификация

Примеры обозначений

- К-800-23,5-5 (или К-800-240-5)
- ПТ-140/165-12,8/1,5-2
- КТ-1070-5,9/25-3 (КТ-1070-60/1500-3)
- ПР-6-35/15/5

Термодинамические основы работы теплоэнергетических установок

Эксергия

A series of horizontal lines in yellow and white, located on the right side of the slide, extending from the left edge of the 'Эксергия' text block.

- Получение работы возможно, если система не находится в состоянии равновесия с окружающей средой
- Получение работы прекратиться при достижении состояния равновесия системы и окружающей среды
- Максимальную работу в цикле Карно можно получить при осуществлении обратимых адиабатных и изотермических процессов

Система «рабочее тело-окружающая среда»

- I закон термодинамики для системы

$$U'' - U' + L = Q = 0$$

- внутренняя энергия системы в начальном состоянии

$$U' = U_1 + U_{01}$$

- внутренняя энергия системы в конечном состоянии

$$U'' = U_2 + U_{02}$$

$$L = U_1 + U_{01} - U_2 - U_{02} = (U_1 - U_2) + (U_{01} - U_{02})$$

Система «рабочее тело-окружающая среда»

- Для окружающей среды

$$U_{02} - U_{01} = Q_0 + L_0$$

$$L_0 = p_0 (V_2 - V_1)$$

$$U_{01} - U_{02} = -Q_0 - p_0 (V_2 - V_1)$$

- Работа системы

$$L = (U_1 - U_2) - Q_0 - p_0 (V_2 - V_1)$$

Система «рабочее тело-окружающая среда»

- Теплота, сообщенная среде

$$Q_0 = T_0 (S_{02} - S_{01})$$

$$L = (U_1 - U_2) - T_0 (S_{02} - S_{01}) - p_0 (V_2 - V_1)$$

- Энтропия замкнутой адиабатной системы

$$S_{02} - S_{01} = S_1 - S_2$$

$$L = (U_1 - U_2) - T_0 (S_1 - S_2) - p_0 (V_2 - V_1)$$

Система «рабочее тело-окружающая среда»

- Получение работы прекратиться

$$p_0 = p_2 \quad T_0 = T_2 \quad \longrightarrow \quad U_0 = U_2 \quad V_0 = V_2$$

$$L_{\max} = (U_1 - U_0) - T_0(S_1 - S_0) + p_0(V_1 - V_0)$$

$$L_{\max} = (H_1 - H_0) - T_0(S_1 - S_0)$$

$$E = (H_1 - H_0) - T_0(S_1 - S_0)$$

Эксергия

- Эксергия является максимальной работой, которую можно совершить в **обратимом** процессе изменения состояния системы (рабочее тело) от начальных параметров до параметров окружающей среды (**состояние равновесия**)

Энергия и эксергия

Энергия системы	Эксергия системы
Зависит только от параметров системы и не зависит от параметров окружающей среды	Зависит как от параметров системы, так и от параметров окружающей среды
Всегда имеет величину отличную от нуля	Может иметь величину равную нулю
Подчиняется закону сохранения энергии в любых процессах и уничтожаться не может	Подчиняется закону сохранения только при обратимых процессах; в реальных необратимых процессах уничтожается частично или полностью
Преобразование одних форм в другие ограничено по условиям второго закона термодинамики для всех процессов, в том числе и обратимых	Преобразование одних форм в другие не ограничено по условиям второго закона термодинамики для обратимых процессов

Виды эксергии и ее составляющие

- Для безэнтропийных видов энергии
 - Механическая энергия $E_L = L$
 - Электрическая энергия $\mathcal{E}_\circ =$

Виды эксергии и ее составляющие

- Эксергия видов энергий, характеризующихся энтропией

- эксергия вещества в замкнутом объеме

$$E_v, \text{ Дж}; e_v, \text{ Дж/кг}$$

- эксергия потока вещества

$$E, \text{ Дж}; e, \text{ Дж/кг}$$

- эксергия потока теплоты

$$E_Q, \text{ Дж}; e_Q, \text{ Дж/кг}$$

- эксергия потока излучения

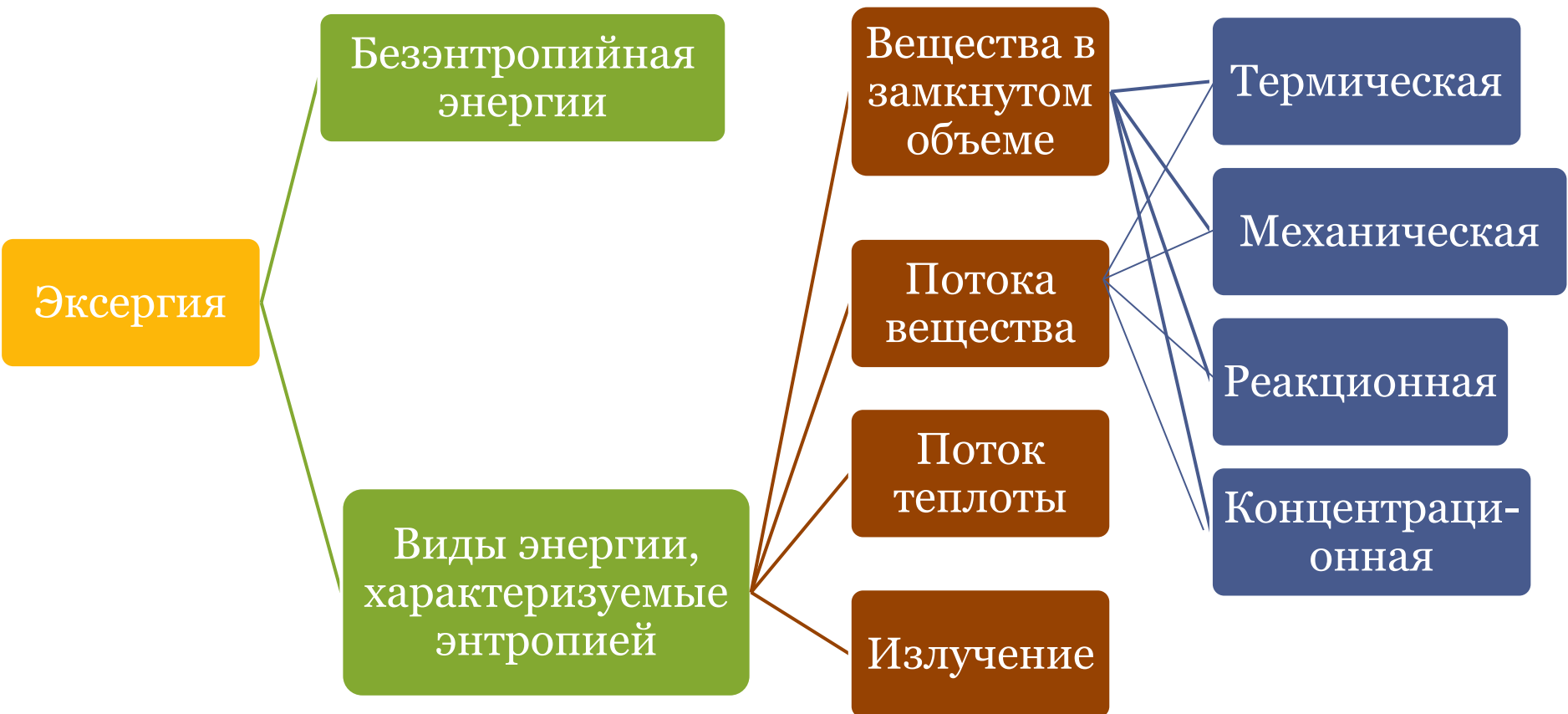
$$E_{\text{и}}, \text{ Дж}; e_{\text{и}}, \text{ Дж/м}^2$$

Виды эксергии и ее составляющие

- Эксергия вещества в замкнутом объеме E_v и потоке E состоит из следующих составляющих:
 - термической e_t
 - механической или (деформационной) e_p
 - реакционной e_r
 - концентрационной e_c

Виды эксергии и ее составляющие

- термическая (e_t) + механическая (e_p) = *термомеханическая* (термодеформационная, физическая)
- реакционная (e_r) + концентрационная (e_c) = *химическая (нулевая)* ($e_{\text{хим}}$)



Термодинамические основы работы теплоэнергетических установок

Виды эксергии и ее
составляющие

Эксергия вещества в замкнутом объеме

- оболочка
 - непроницаемая
 - неподвижная
 - способна деформироваться
 - проводить теплоту
- «нулевое» состояние, т.е. полное равновесие как внутри системы, так и с окружающей средой. $u_{o.c.}; s_{o.c.}; p_{o.c.}; v_{o.c.}; T_{o.c.}$
- $u; s; p; v; T$

Эксергия вещества в замкнутом объеме

- Взаимодействие системы и среды
 - термическое
 - механическое
- Максимальная полезная работа, которую может совершить вещество в замкнутом объеме, равна работе расширения (сжатия) за вычетом работы, затрачиваемой веществом на преодоление давления окружающей среды в обратимом процессе при $p_{o.c.} = \text{const}$

$$de_v = dl - p_{o.c.} d$$

Эксергия вещества в замкнутом объеме

$$de_v = dl - p_{o.c.}dv$$

$$dq = du + dl \rightarrow dl = dq - du$$

$$dq = T_{o.c.}ds$$

$$de_v = T_{o.c.}ds - du - p_{o.c.}dv$$

$$e_v = T_{o.c.}(s_{o.c.} - s) - (u_{o.c.} - u) - p_{o.c.}(v_{o.c.} - v)$$

$$e_v = (u - u_{o.c.}) - T_{o.c.}(s - s_{o.c.}) + p_{o.c.}(v - v_{o.c.})$$

Эксергия вещества в замкнутом объеме

Так как параметры окружающей среды постоянны, обозначим

$$u_{o.c} + T_{o.c} s_{o.c} + p_{o.c} v_{o.c} =$$

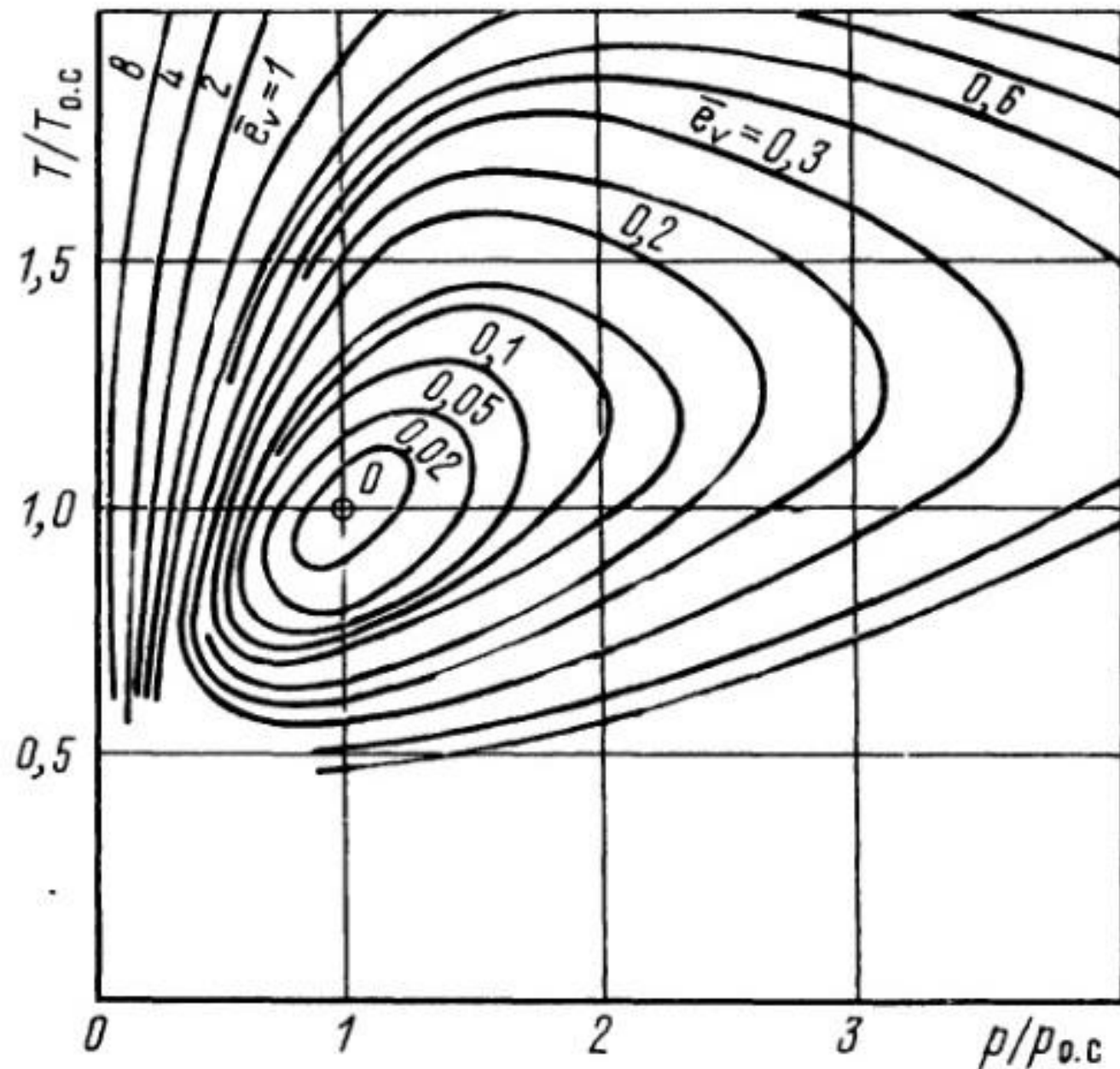
При определении эксергии при переходе из состояния 1 в состояние 2 значение величины C не меняется, тогда:

$$\Delta e_{v.c.} = \Delta u - T_{o.c} \Delta s - p_{o.c} \Delta v$$

$$e_{v.c.} - e_{v1} = (u_2 - u_{o.c}) - T_{o.c} (s_2 - s_{o.c}) - p_{o.c} (v_2 - v_{o.c})$$

Для всей массы вещества, находящейся в замкнутом объеме

$$E_v = m e_v$$



$$\bar{e}_v = \frac{e_v}{RT_{0.c.}}$$

$$0 \leq e_v \leq +\infty$$

Эксергия вещества в потоке

- оболочка
 - непроницаемая
 - подвижная
 - способна деформироваться
 - проводить теплоту
- «нулевое» состояние, т.е. полное равновесие как внутри системы, так и с окружающей средой. $u_{o.c.}; s_{o.c.}; p_{o.c.}; v_{o.c.}; T_{o.c.}$
- $u; s; p; v; T$

Эксергия вещества в потоке

- Взаимодействие системы и среды
 - термическое
 - механическое
- Функция e отличается от функции e_k количеством работы, связанной с перемещением потока вещества:

$$p\nu - p_{o.c}\nu = \nu(p - p_{o.c})$$

Эксергия вещества в потоке

$$e = (u - u_{o.c}) - T_{o.c.}(s_{o.c} - s) + p_{o.c}(v - v_{o.c}) + v(p - p_{o.c})$$

$$e = (u - u_{o.c}) - T_{o.c.}(s - s_{o.c}) + pv - p_{o.c}v_{o.c}$$

С учетом, что $h = u + pv$

$$e = h - h_{o.c} - T_{o.c.}(s - s_{o.c})$$

В дифференциальной форме:

$$de = dh - T_{o.c.}ds$$

Эксергия вещества в потоке

Так как параметры окружающей среды постоянны, обозначим

$$h_{o.c.} + T_{o.c.} s_{o.c.} = C$$

При определении эксергии при переходе из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta e = \Delta h - T_{o.c.} \Delta s$$

$$e_{o.c.} - e_1 = h_1 - h_2 - T_{o.c.} (s_1 - s_2)$$

Для всего потока вещества при его расходе m :

$$E = me$$

Эксергия вещества в потоке

Для идеального газа с учетом

$$dh = c_p dT$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

$$e = c_p (T - T_{o.c}) - T_{o.c} \left[p \ln \frac{T}{T_{o.c}} - \ln \frac{p}{p_{o.c}} \right]$$

Для изотермического потока идеального газа

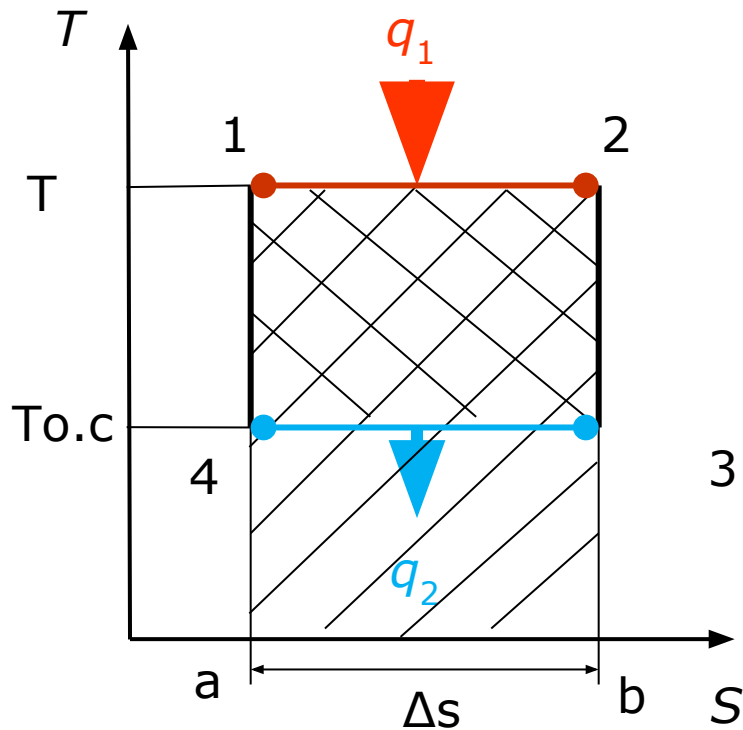
$$e = T_{o.c} R \ln \frac{p}{p_{o.c}}$$

$$-\infty \leq e \leq +\infty$$

Эксергия потока теплоты

- Эксергия теплоты называется максимальная работа, которая может быть получена за счет теплоты, переданной от горячего источника тепла с температурой T к рабочему телу, при условии, что холодным источником является окружающая среда с температурой T_{oc}

Эксергия потока теплоты



- Воспринимаемая теплота рабочим телом от горячего источника

$$q_1 = T \Delta s$$

- Эксергия теплоты

$$e_q = l = q_{\text{ф.с.}} - T_{\text{о.с.}} \Delta s$$

- Непревратимая в работу часть теплоты

$$T_{\text{o.c.}} \Delta s$$

Эксергия потока теплоты

термический КПД цикла Карно

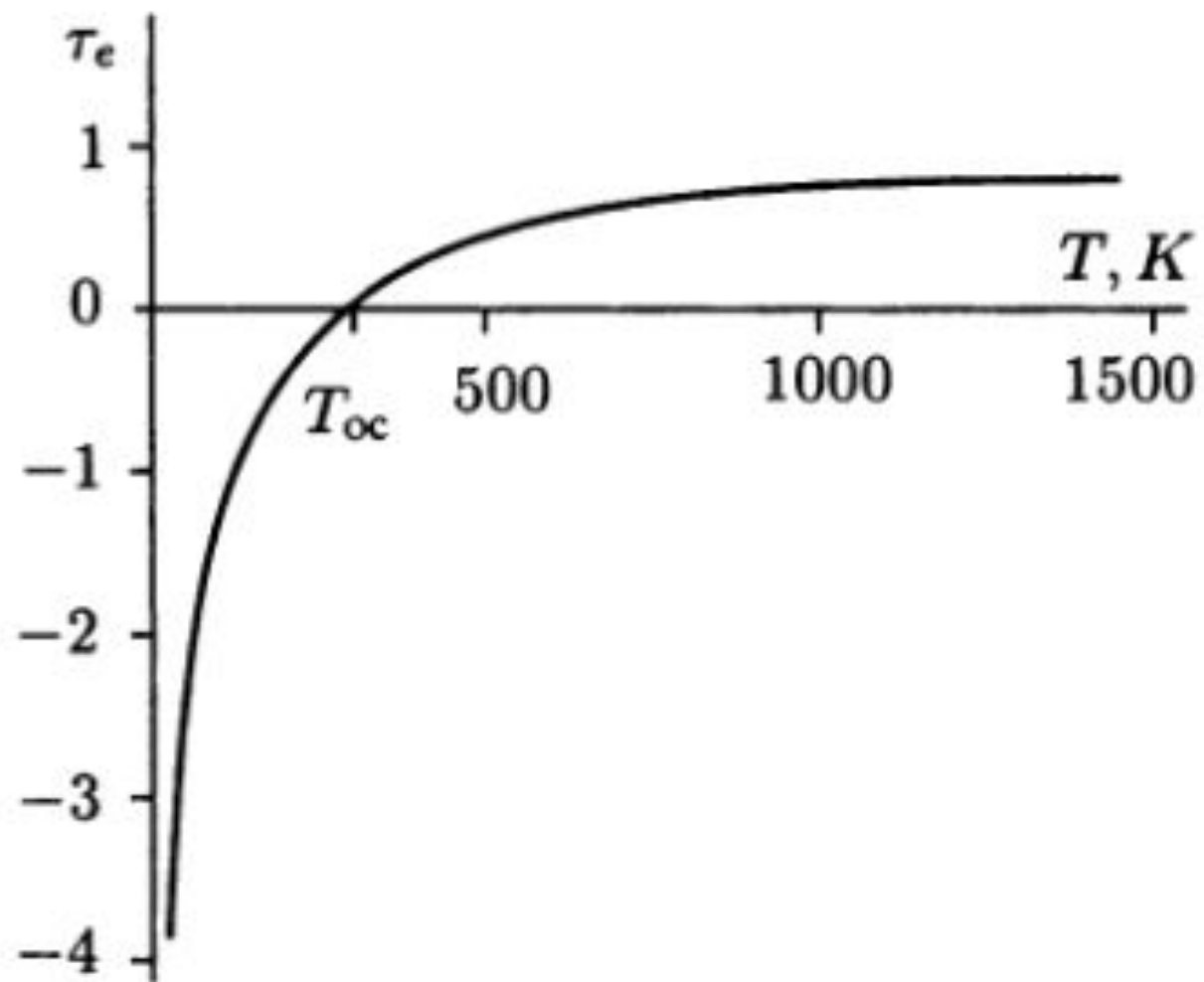
$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{T\Delta s - T_{o.c.}\Delta s}{T\Delta s} = 1 - \frac{T_{o.c.}}{T}$$

откуда $e_q = 1 - \frac{T_{o.c.}}{T} = 1 - \frac{273}{343} = 0,204$

для всего теплового потока

$$E_q = Q\tau_q$$

$\tau_q = 1 - \frac{T_{o.c.}}{T}$ - эксергетическая температурная функция (коэффициент работоспособности теплоты)



Физический смысл коэффициента работоспособности теплоты

- Количество работы, которую можно получить в идеальном прямом цикле от единицы теплоты

$$\tau_q = 1 - \frac{T_{o.c}}{T}$$

$$\tau_q = \eta_t$$

$$0 < \frac{T_{o.c}}{T} \leq 1,1 \quad \leq \tau_q <$$

$$\frac{T_{o.c}}{T} > 1,1 \quad \tau_q \notin$$

Эксергия потока теплоты при $p=\text{const}$

$$q_1 = \Delta h$$

$$\begin{aligned}\text{Тогда } e_q &= q_1 \left(1 - \frac{T_{o.c}}{T}\right) = \Delta h \left(1 - \frac{T_{o.c}}{T}\right) = \Delta h - \Delta h \frac{T_{o.c}}{T} = \\ &= \Delta h - q_{\phi.c} \frac{T_{o.c}}{T} = \Delta h - \Delta s T\end{aligned}$$

Эксергию теплового потока в процессах теплообмена при постоянном давлении можно вычислить как разность потока вещества до и после изменения температуры

Эксергия потока излучения

- Эксергия потока излучения $e_{\text{и}}$ определяет максимальную работу, которая может быть выполнена во время обратимого процесса приведения этого излучения в состояние равновесия с окружающей средой (при $T_{\text{o.c}}$)

$$e_{\text{и}} = \varepsilon C_0 \frac{3T^4_{\text{и}} - 4T_{\text{o.c}}^4}{3}$$

ε - степень черноты излучающей поверхности

$C_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Стефана-Больцмана

$$0 \leq e_{\text{и}} \leq +\infty$$

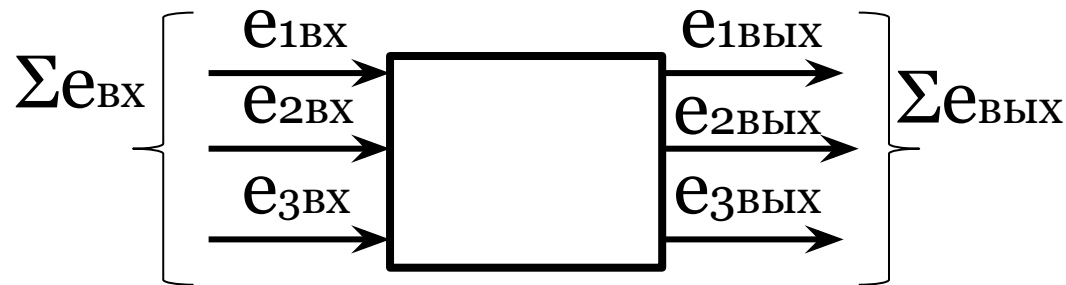
Эксергия потока излучения

- $T = 0,63T_0.c$, то энергия и эксергия излучения равны
- $T > 0,63T_0.c$, то эксергия излучения меньше его энергии
- $T < 0,63T_0.c$, эксергия излучения больше его энергии

Термодинамические основы работы теплоэнергетических установок

Эксергетический баланс
Эксергетические потери

Эксергетические балансы и эксергетическая производительность



$$\sum e_{\text{ВХ}} \geq \sum e_{\text{ВЫХ}}$$

$$\sum \Pi_{\text{ВХ}} - 0 \sum e_{\text{ВЫХ}} = \sum \geq$$

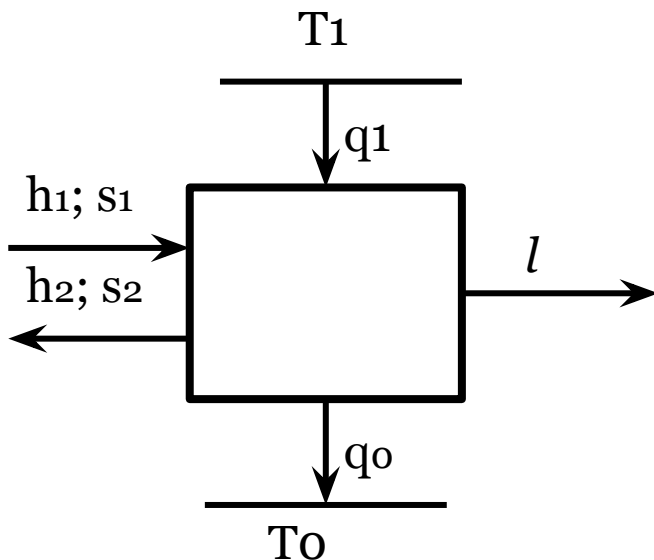
- В обратимых процессах $\sum \Pi = 0$ $\sum e_{\text{ВХ}} = \sum e_{\text{ВЫХ}}$

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}} = \frac{\sum E_{\text{ВХ}} - \sum \Pi}{\sum E_{\text{ВХ}}} = 1 - \frac{\sum \Pi}{\sum E_{\text{ВХ}}}$$

Виды потерь

- Внутренние потери – связанные с необратимостью процессов, протекающих внутри системы (трение)
- Внешние потери – связанные с условиями взаимодействия системы с окружающей средой и другими источниками и приемниками энергии (потери через тепловую изоляцию).

Закон Гюи-Стодолы



- Когда полезная работа будет максимальной?
 - Когда в системе протекают обратимые процессы
- Все процессы в системе протекают необратимо
- Необходимо рассчитать уменьшение полезной работы

Закон Гюи-Стодолы

- Установка, работающая обратимо
- Установка, работающая необратимо
 - Равное количество подведенной теплоты Q_1
 - Количество и параметры подведенного вещества равны
 - Количество и параметры отводимого вещества равны
 - Меняется количество отводимого тепла Q_0 (количество отведенного тепла для установки, работающей обратимо Q_{0s})
 - Работа, совершаемая обратимой установкой максимальна $l_{\text{макс}}$

Закон Гюи-Стодолы

- Энергетический баланс реальной установки

$$h_1 + q_1 = h_2 + q_0 + l$$

$$l = q_1 - h_1 - h_2 - q_0$$

- Энергетический баланс идеальной установки

$$h_{\text{макс}} + q_1 = h_2 + q_{0s} + l$$

$$l_{\text{макс}} = q_1 - h_1 - h_2 - q_{0s}$$

- Потери работы, вызванные необратимостью

$$\Delta e = l_{\text{макс}} - l = q_0 - q_{0s}$$

Закон Гюи-Стодолы

- Сумма приращений энтропии (для реальной установки)

$$\Delta s = -\frac{q_1}{T} + s_2 - s_1 + \frac{q_0}{T_0}$$

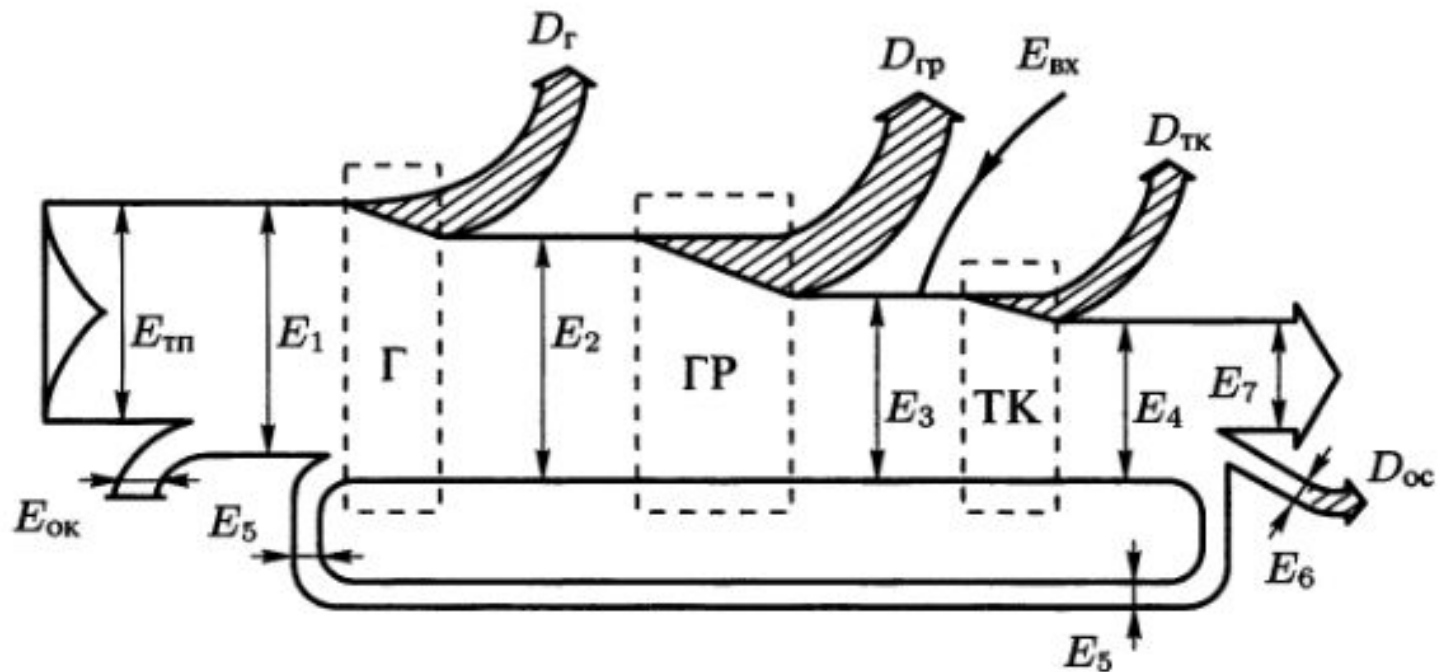
- Сумма приращений энтропии (для идеальной установки)

$$0 = -\frac{q_1}{T} + s_2 - s_1 + \frac{q_{0s}}{T_0}$$

$$\Delta s T_0 = q_0 - q_{0s} = \Delta e$$

$$\Delta e = (s_2 - s_1) T_0$$

Эксергетический анализ топливоиспользующих установок



$$\eta_{\text{erp}} = \frac{E_3}{E_2}$$

$$\eta_e = \frac{E_7}{E_{\text{тп}} - E_{\text{ок}} - E_{\text{вх}}}$$

Эксергия топлива

- жидкое топливо

$$e_{\text{ж}} \approx 0,975 q_{\text{в}}^{\text{п}}$$

- газообразное топливо

$$e_{\text{г}} \approx 0,95 q_{\text{в}}^{\text{п}}$$

- каменный уголь

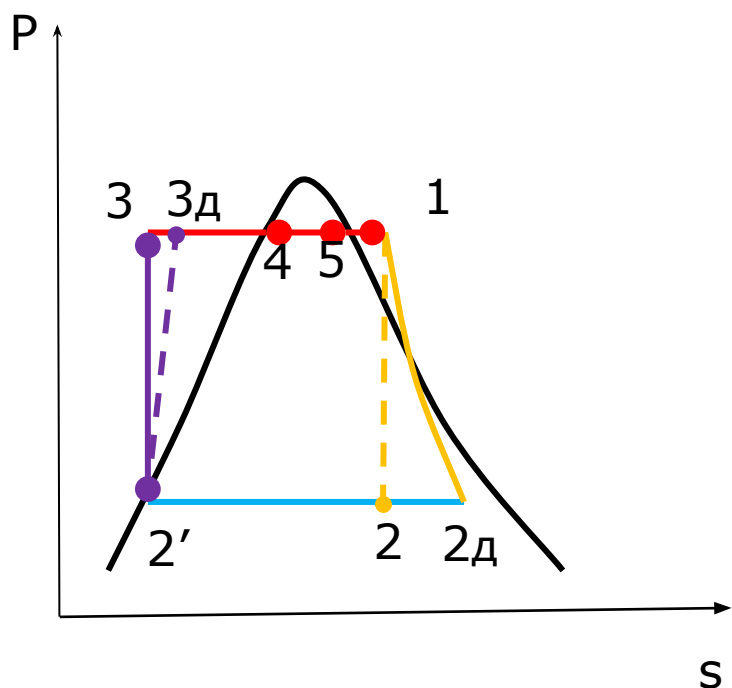
$$e_{\text{тв}} \approx 1,08 q_{\text{в}}^{\text{п}}$$

- бурый уголь

$$e_{\text{тв}} \approx (1,15 \dots 1,2) q_{\text{в}}^{\text{п}}$$

Потери эксергии

Паротурбинная установка



- 1-2 теоретическое расширение пара в турбине
- 1-2д реальное расширение пара в турбине
- 2д-2' – процесс конденсации пара в конденсаторе
- 2'-3 – теоретическое сжатие в насосе
- 2'-3 – практическое сжатие в насосе
- 3-1 – подвод теплоты к рабочему телу в котле

Потери эксергии Парогенератор

- В котельную установку входит поток воды с температурой $T_{\text{пв}}$ и давлением $P_{\text{пв}}$:

$$e_{\text{вх}}^{\text{к}} = T_{\text{пв}} (-h_{\text{о.с}}) - T_{\text{о.с}} (s_{\text{пв}} - s_{\text{о.с}})$$

- Суммарная эксергия топлива и окислителя

$$e_{q\text{вх}}^{\text{к}} = e_{\text{тв}} + e_{\text{ок}}$$

Потери эксергии Парогенератор

- Из котла выходит пар с температурой T_1^0 и давлением P_1^0

$$e_{\text{ВЫХ}}^{\text{К}} = (h_1^0 - h_{\text{o.c}}) - T_{\text{o.c}} (s_1^0 - s_{\text{o.c}})$$

- В котле полезная работа не производится, тогда потери в котле

$$e_{\text{ВХ}}^{\text{К}} + e_{\text{qВХ}}^{\text{К}} = \Delta e^{\text{К}} + e_{\text{ВЫХ}}^{\text{К}}$$

$$\Delta e^{\text{К}} = (e_{\text{ВХ}}^{\text{К}} + e_{\text{qВХ}}^{\text{К}}) - e_{\text{ВЫХ}}^{\text{К}}$$

Потери эксергии Парогенератор

- Удельная эксергия теплоты, полученной при сгорании топлива при температуре T_{Γ} :

$$e_q = Q_{\text{н}}^{\text{p}} \left(1 - \frac{T_{\text{о.с.}}}{T_{\Gamma}} \right)$$

- Потери эксергии из-за потерь тепла в окружающую среду:

$$D_{\text{окр}} = (1 - \eta) E_q$$

Потери эксергии Парогенератор

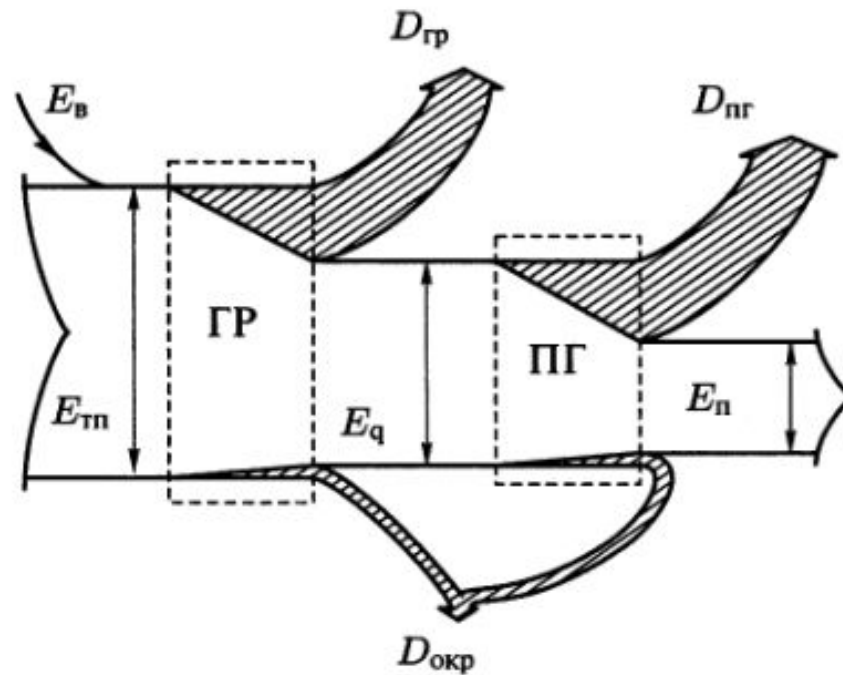
- Потери эксергии при переходе эксергии топлива в эксергию теплоты

$$D_{\text{гр}} = E_{\text{тп}} - E_q$$

- Потери эксергии при передаче полученной теплоты к образующемуся водяному пару:

$$D_{\text{пг}} = E_q - D_{\text{окр}} - E_{\text{п}}$$

Потери эксергии Парогенератор



$$\eta_e = \frac{E_{\text{п}}}{E_B + E_{\text{тп}}}$$

Потери эксергии. Паропровод

- Эксергия пара на входе в паропровод равна эксергии пара на выходе из котла

$$e_{\text{ВХ}}^{\text{ПП}} = e_{\text{ВЫХ}}^{\text{К}}$$

- Эксергия пара с температурой T_1 и давлением P_1 на выходе из паропровода

$$e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}} = (h_1 - h_{\text{o.c}}) - T_{\text{o.c}}(s_1 - s_{\text{o.c}})$$

Потери эксергии. Паропровод

- В паропроводе полезная работа не производится, тогда потери в паропроводе

$$\Delta e^{\text{ПП}} = e_{\text{ВХ}}^{\text{ПП}} - e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}}$$

- Эксергетический КПД паропровода

$$\eta_e^{\text{ПП}} = \frac{E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}}}{E_{\text{ВХ}}^{\text{ПП}}}$$

Потери эксергии. Турбогенераторная установка

- Пар в турбину подается с температурой T_1 и давлением P_1

$$e_{\text{ВХ}}^T = e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}}$$

- Пар на выходе из турбины имеет температуру $T_{2\text{д}}$ и давление $P_{2\text{д}}$

$$e_{\text{ВЫХ}}^T = (h_{2\text{д}} - h_{\text{o.c}}) - T_0(s_{2\text{д}} - s_{\text{o.c}})$$

Потери эксергии. Турбогенераторная установка

- Турбогенераторная установка производит работу l_e (работа, передаваемая внешнему потребителю (электроэнергия, отдаваемая в сеть))

$$l_e = q^{\text{уст}} \eta_e$$

$q^{\text{p}} = Q_{\text{H}}$ - теплота, выделяющаяся при сгорании топлива

$\eta_e^{\text{уст}}$ - эффективный абсолютный КПД всей теплосиловой установки

Потери эксергии. Турбогенераторная установка

- Потери эксергии в турбогенераторе

$$e_{\text{ВХ}}^T = e_{\text{ВЫХ}}^T + l_e + \Delta e^T$$

$$\Delta e^T = (e_{\text{ВХ}}^T - e_{\text{ВЫХ}}^T) - l_e$$

- Потери эксергии, обусловленные механическими потерями в турбине

$$\Delta e_{\text{М}}^T = (h_1 - h_{2\text{Д}})(1 - \eta_{\text{М}})$$

- Потери эксергии, обусловленные механическими и электрическими потерями в генераторе

$$\Delta e_{\text{Г}}^T = (h_1 - h_{2\text{Д}})\eta_{\text{М}}(1 - \eta_{\text{Г}})$$

Потери эксергии. Турбогенераторная установка

- Остальные вызваны необратимым характером процесса расширения пара в турбине
- Эксергетический КПД турбогенераторной установки

$$\eta_e^T = \frac{L_e}{E_{\text{ВХ}}^T - E_{\text{ВЫХ}}^T} = 1 - \frac{\Delta E^T}{E_{\text{ВХ}}^T - E_{\text{ВЫХ}}^T}$$

Потери эксергии. Конденсатор

- Эксергия пара, поступающего из турбины в конденсатор

$$e_{\text{ВХ}}^{\text{КОНД}} = e_{\text{ВЫХ}}^{\text{Т}}$$

- Эксергия конденсата, выходящего из конденсатора

$$e_{\text{ВЫХ}}^{\text{КОНД}} = (h_{2'} - h_{\text{o.c}}) - T_{\text{o.c}}(s_{2'} - s_{\text{o.c}})$$

- В конденсаторе полезная работа не производится, тогда потери эксергии

$$\Delta e^{\text{КОНД}} = e_{\text{ВХ}}^{\text{КОНД}} - e_{\text{ВЫХ}}^{\text{КОНД}}$$

Потери эксергии. Насос

- Эксергия воды, поступающей в насос

$$e_{\text{ВХ}}^{\text{Н}} = e_{\text{ВЫХ}}^{\text{КОНД}}$$

- Эксергия воды на выходе из насоса

$$e_{\text{ВЫХ}}^{\text{Н}} = e_{\text{ВХ}}^{\text{К}}$$

- Для привода насоса подводится работа

$$l_{\text{Н}} = h_{3\text{Д}} - h_2,$$

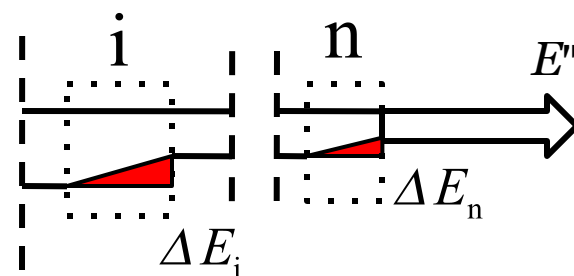
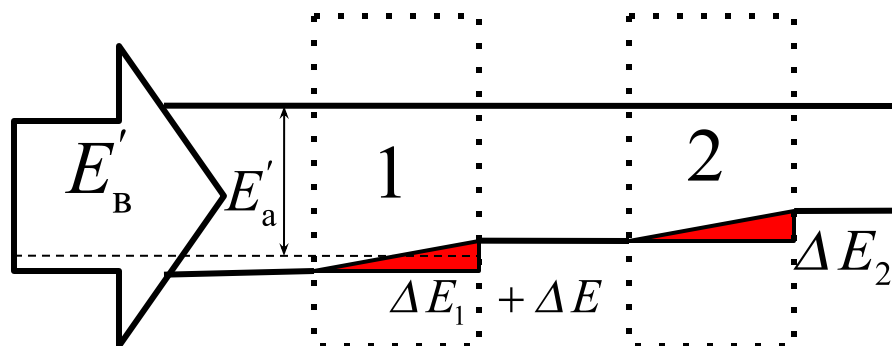
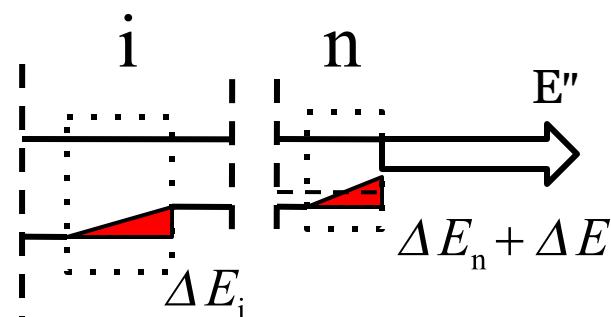
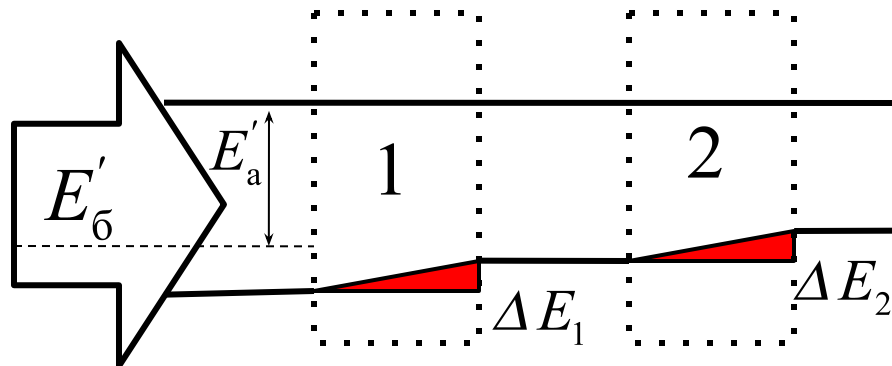
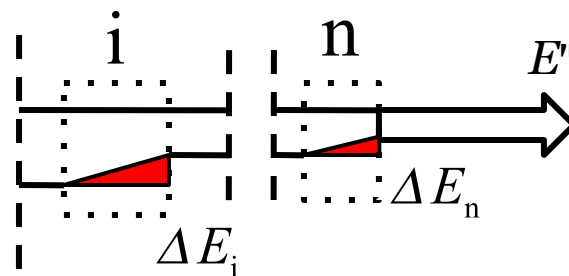
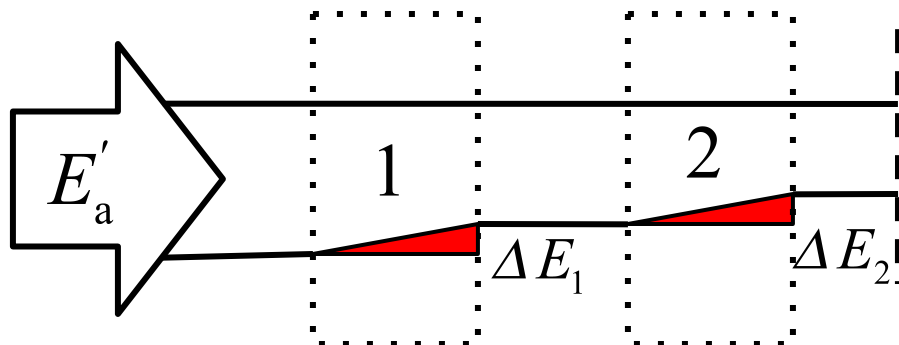
- Потеря эксергии воды в насосе

$$e_{\text{ВХ}}^{\text{Н}} + l_{\text{Н}} = e_{\text{ВЫХ}}^{\text{Н}} + \Delta e^{\text{Н}}$$

$$\Delta e^{\text{Н}} = e_{\text{ВХ}}^{\text{Н}} - e_{\text{ВЫХ}}^{\text{Н}} + l_{\text{Н}}$$

- Эксергетический КПД насоса

$$\eta_e = \frac{E_{\text{ВЫХ}}^{\text{Н}} - E_{\text{ВХ}}^{\text{Н}}}{L_{\text{Н}}}$$



Роль потерь эксергии в разных элементах системы

- Дополнительная первичная эксергия

$$\Delta E'_i = (\Delta E)_i \frac{1}{\prod_i \eta_i}$$

- Для первого элемента

$$\Delta E'_1 = (\Delta E) \frac{1}{\eta_1}$$

- Для элемента n

$$\Delta E'_n = (\Delta E) \frac{1}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_n}$$

$$\frac{\Delta E'_n}{\Delta E'_1} = \frac{\eta_1}{\prod_i^n \eta_i} = \frac{1}{\eta_2 \eta_3 \dots \eta_n}$$