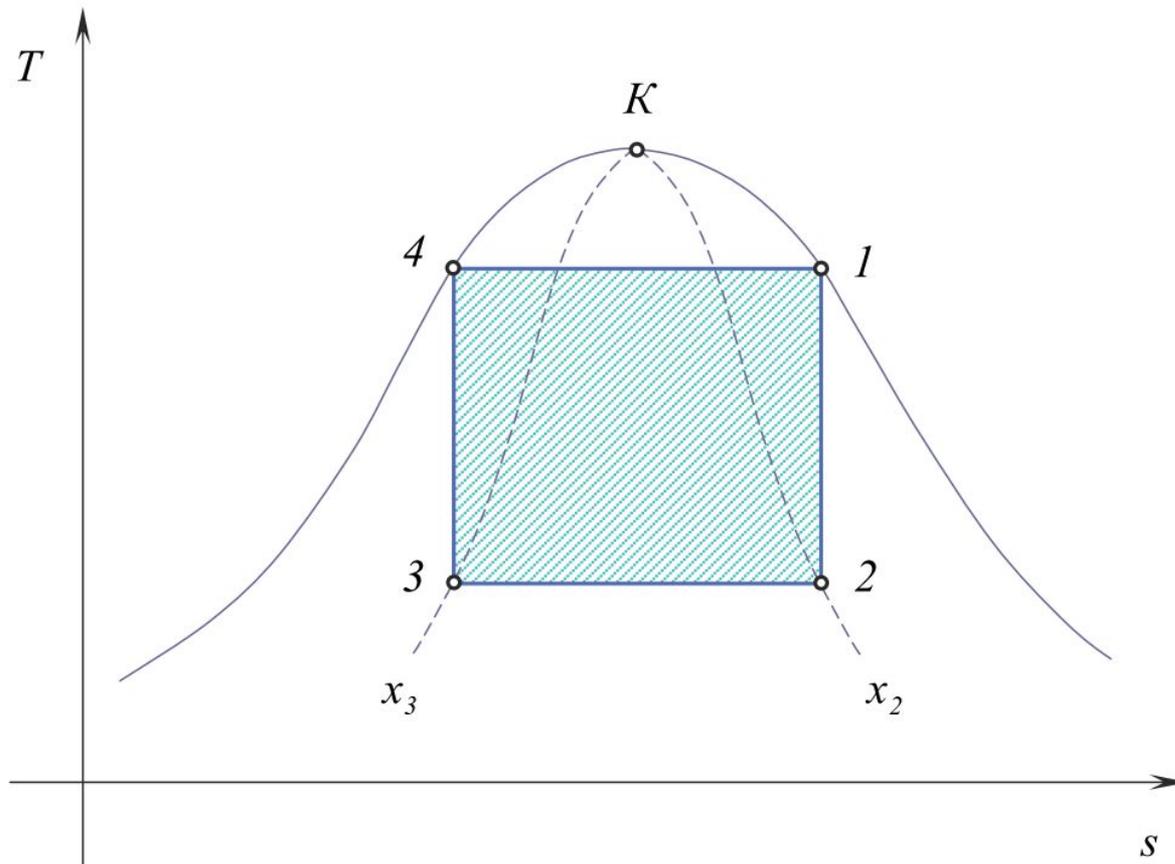
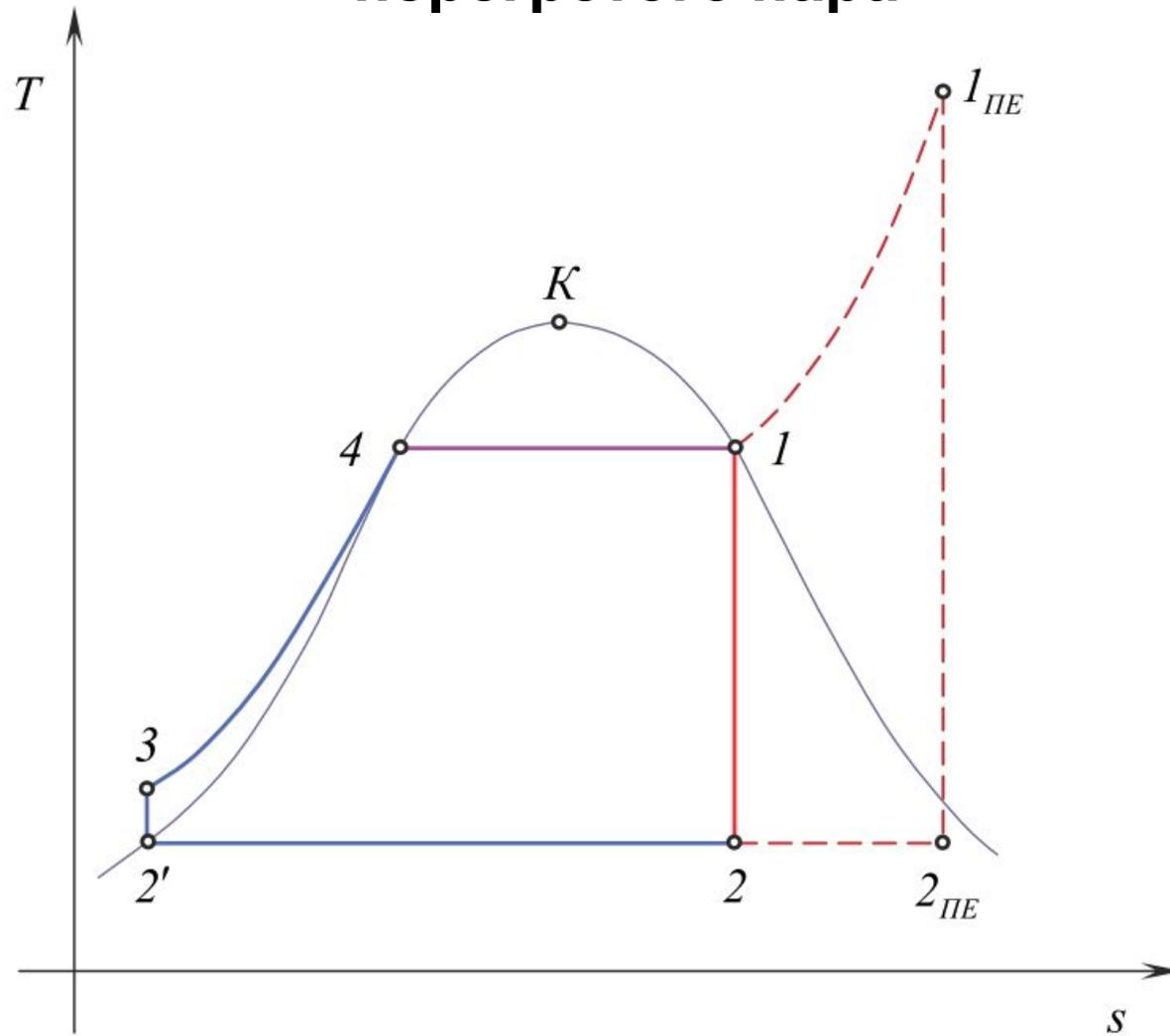
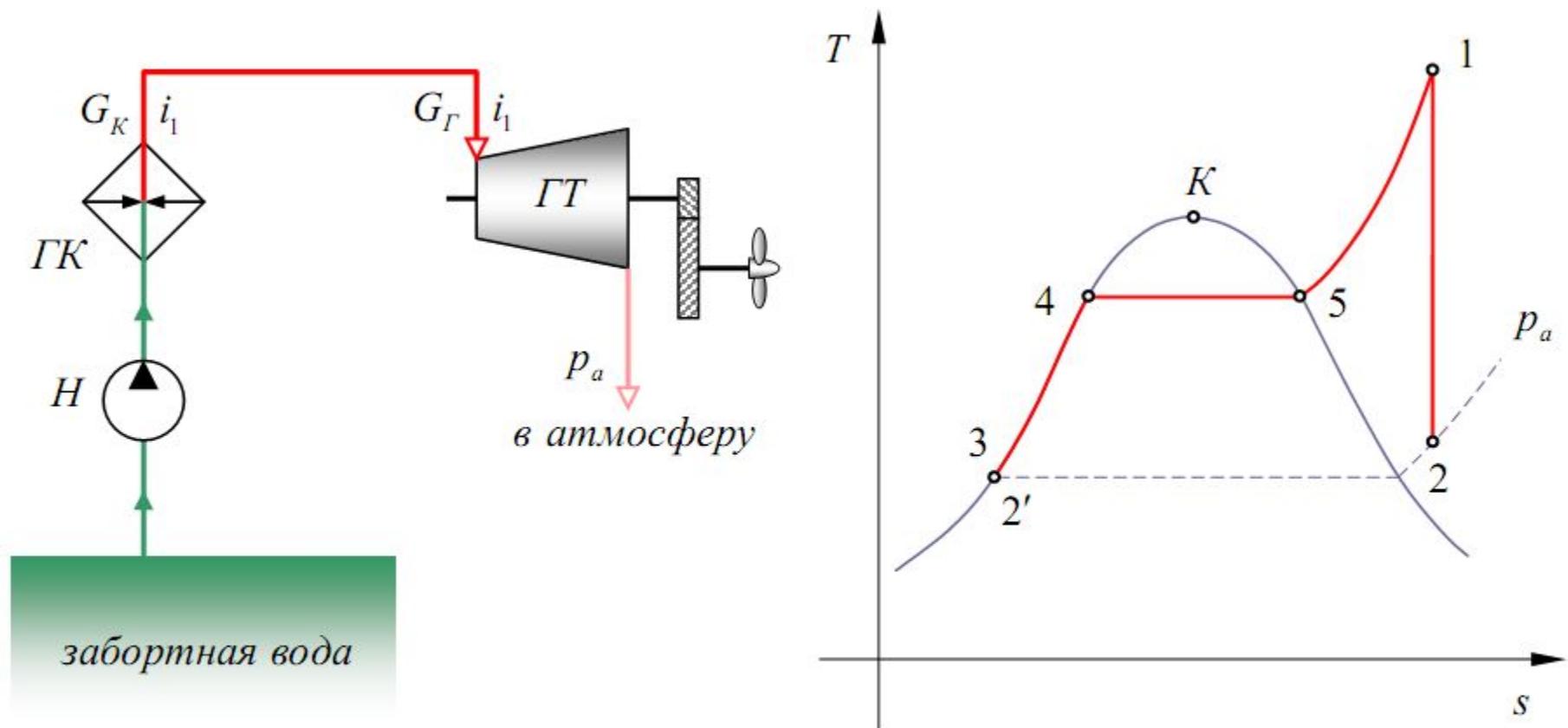


Цикл Карно для насыщенного пара



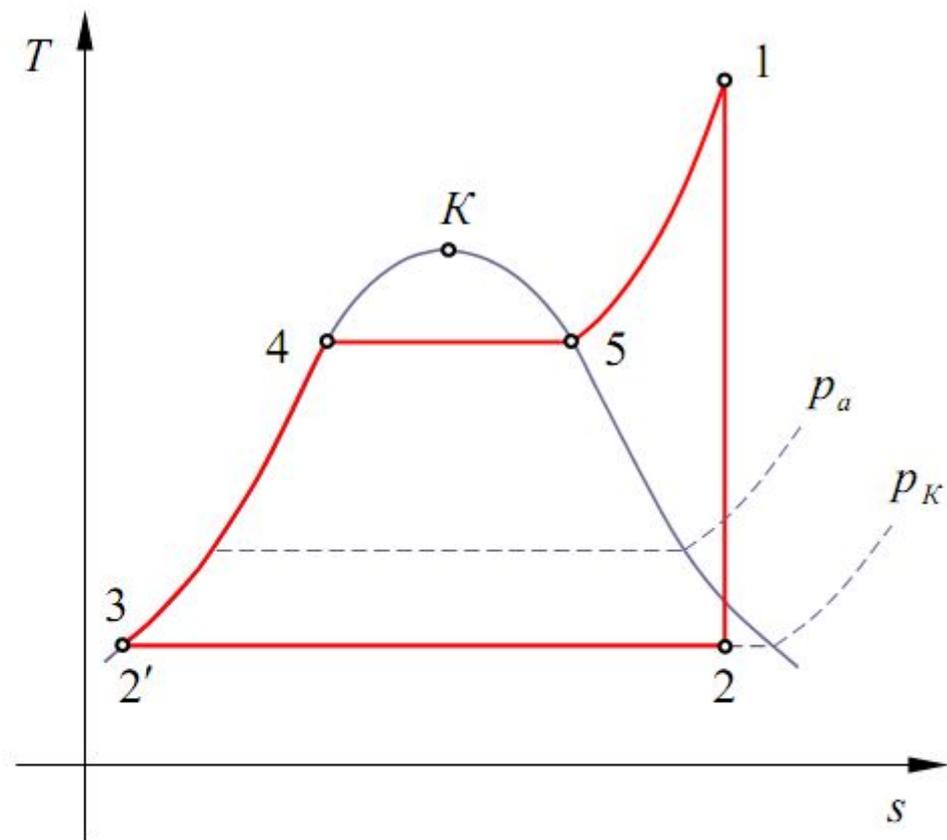
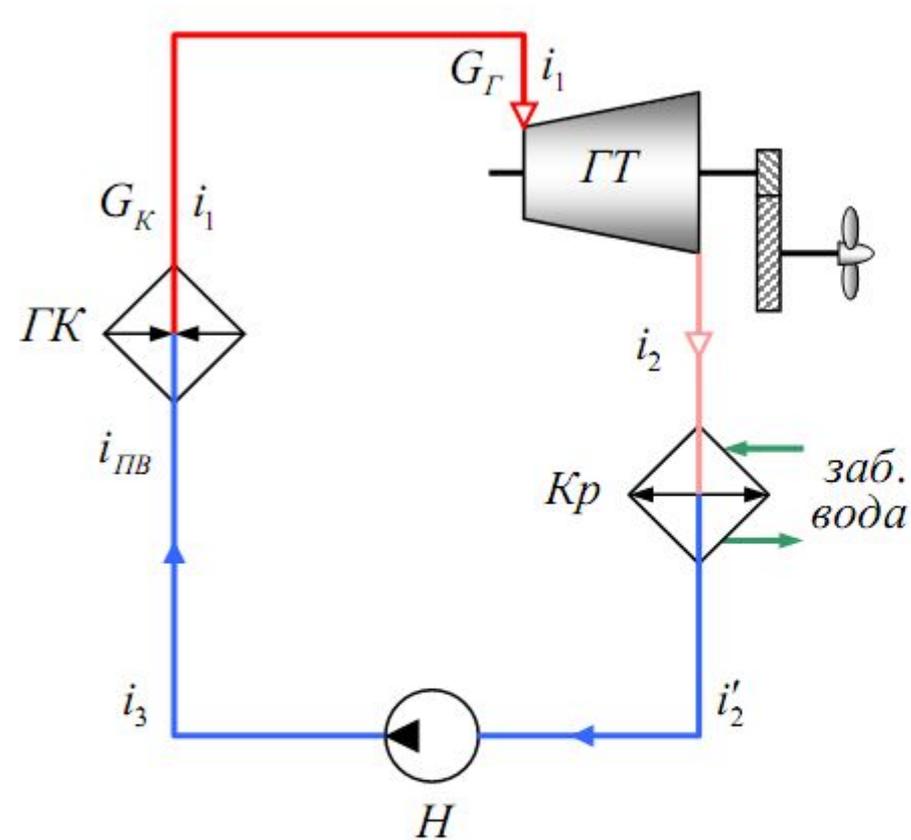
Циклы Ренкина для насыщенного и перегретого пара





Тепловая схема и термодинамический цикл простейшей КТЭУ открытого типа.

H – насос; $ГК$ – главный котел; $ГТ$ – главная турбина; p_a – атмосферное давление.



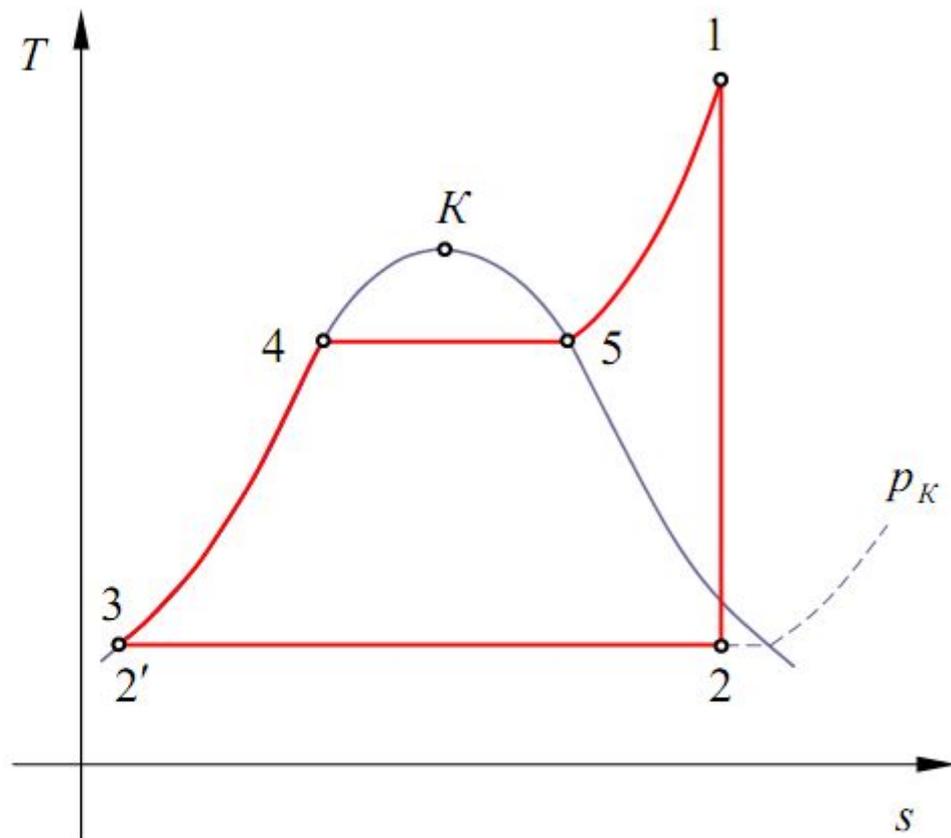
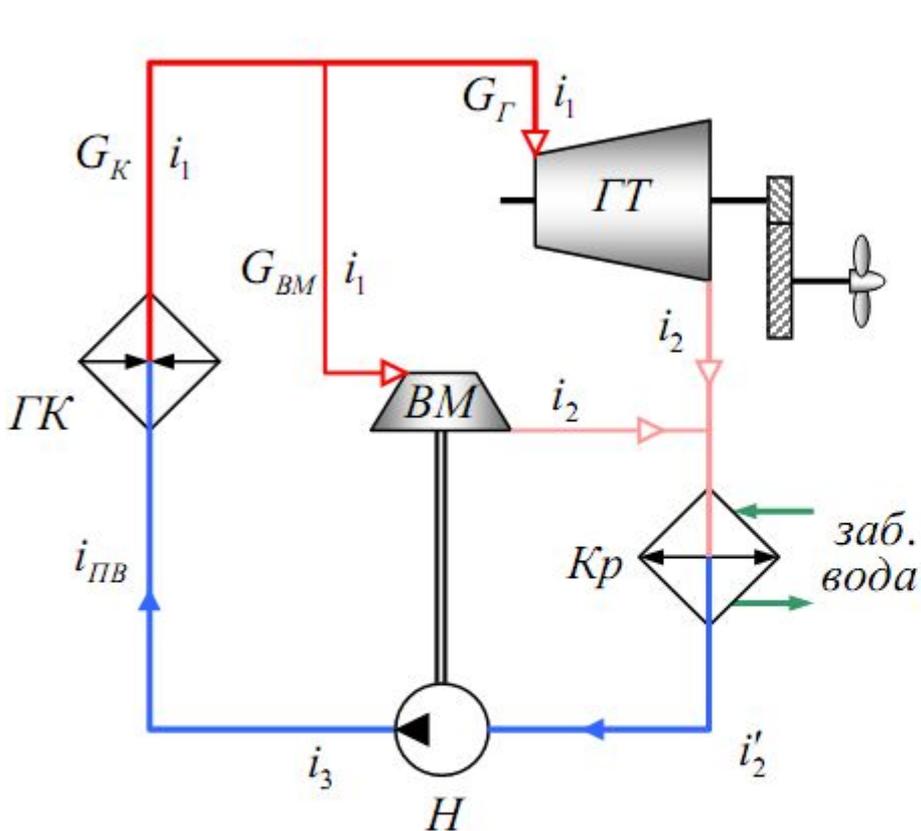
Тепловая схема и термодинамический цикл простейшей КТЭУ закрытого типа.

G_p – главный конденсатор;

p_K – давление в главном конденсаторе; p_a – атмосферное давление.

$$Q_{\text{ПОЛ}} = G_{\Gamma} (i_1 - i_2)$$

$$Q_{\text{ЗАТР}} = G_K (i_1 - i_{\text{ПВ}}) \left[i'_2 = i_3 = i_{\text{ПВ}} \right] = G_K (i_1 - i'_2) \quad \longrightarrow \quad \eta_R = \frac{Q_{\text{ПОЛ}}}{Q_{\text{ЗАТР}}} = \frac{G_{\Gamma} \cdot (i_1 - i_2)}{G_K \cdot (i_1 - i'_2)} = \frac{G_{\Gamma}}{G_K} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} \quad \longrightarrow \quad \eta_R = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2}$$

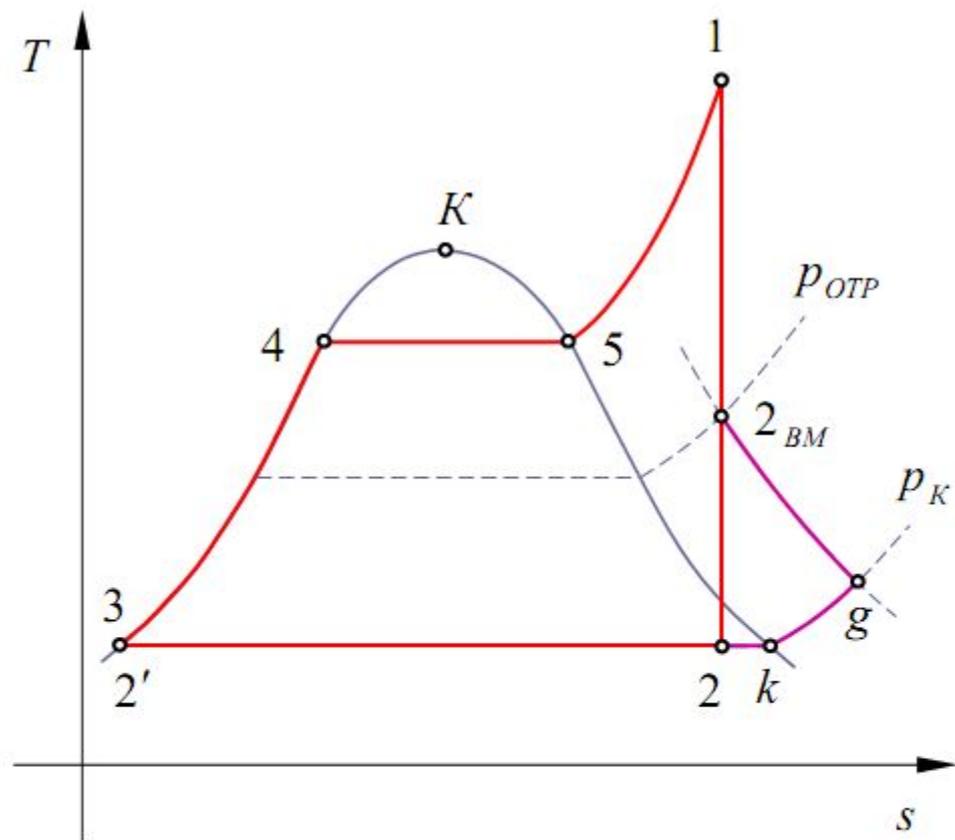
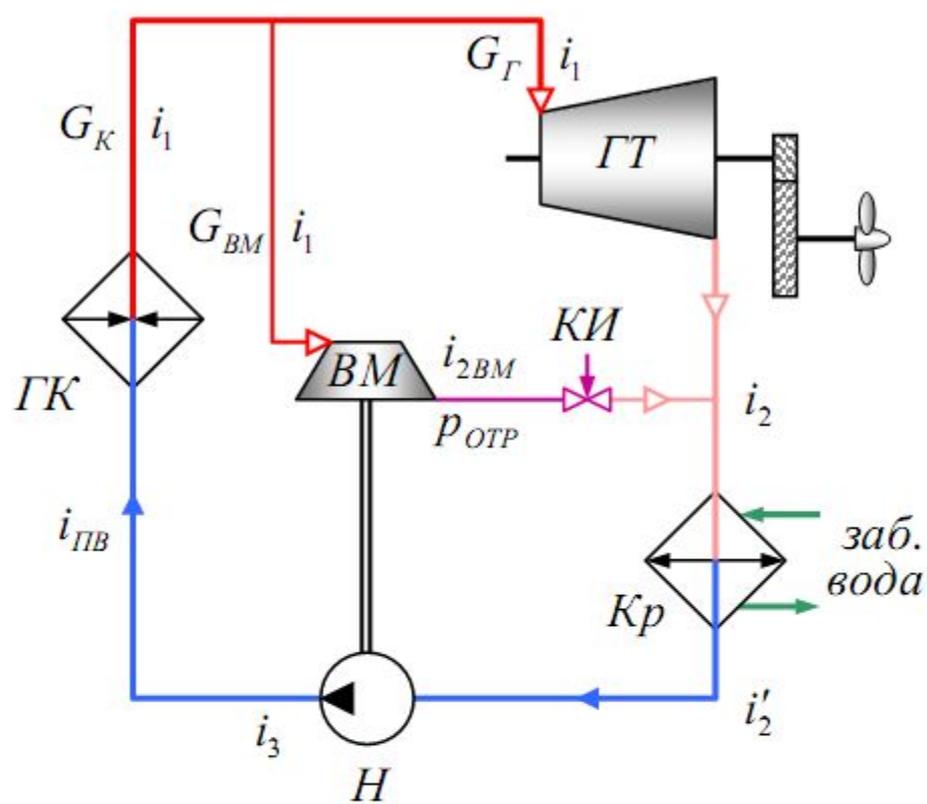


Тепловая схема и термодинамический цикл КТЭУ с ВМ, работающими на вакуум (схема «К»)

ВМ – турбоприводы вспомогательных механизмов.

$$Q_{\text{ПОЛ}} = G_{\Gamma}(i_1 - i_2) \quad \eta^{\text{К}} = \frac{Q_{\text{ПОЛ}}}{Q_{\text{ЗАТР}}} = \frac{G_{\Gamma} \cdot (i_1 - i_2)}{G_{\text{К}} \cdot (i_1 - i_2')} \quad \Rightarrow \quad \eta^{\text{К}} = \frac{\eta_{\text{R}}}{\beta}$$

$$\frac{G_{\text{К}}}{G_{\Gamma}} = \beta \text{ - относительная паропроизводительность КОТЛОВ}$$



Гепловая схема и термодинамический цикл КТЭУ с ВМ, работающими на противодавление (схема «П»).

$КИ$ – клапан излишков; p_{OTP} – давление в системе отработавшего пара ВМ;

Главный цикл КТЭУ: $1 - 2 - 2' - 3 - 4 - 5 - 1$;

Вспомогательный цикл КТЭУ: $1 - 2_{BM} - g - k - 2' - 3 - 4 - 5 - 1$.

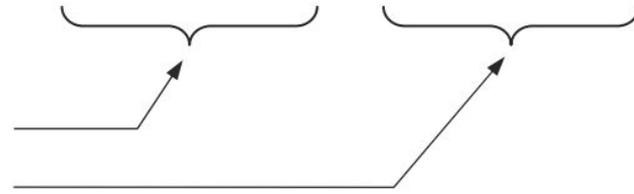
Дополнительные потери теплоты во вспомогательном цикле можно описать следующим выражением:

$$\Delta Q = \Delta Q_{II} + \Delta Q_B = G_{BM} (i_{2BM} - i_2) + G_{BM} (i'_{2BM} - i'_2)$$

где:

ΔQ_{II} – потеря тепла по пару

ΔQ_B – потеря тепла по воде



В общем виде, КПД цикла КТЭУ для тепловых схем со вспомогательными механизмами, можно выразить как отношение:

$$\eta = \frac{\eta_R}{\beta}$$

Относительную паропроизводительность котлов можно представить в следующем виде:

$$\beta = \frac{G_K}{G_\Gamma} = \frac{G_\Gamma + G_{BM}}{G_\Gamma} = 1 + \frac{G_{BM}}{G_\Gamma}$$

Расход пара на вспомогательные механизмы: $G_{BM} = \frac{3600 \cdot \sum N_{eBM}}{i_1 - i_{2BM}};$

Расход пара на главные механизмы: $G_\Gamma = \frac{3600 \cdot N_e}{i_1 - i_2}.$

Подставив значения G_{Γ} и G_{BM} в формулу для β , получим:

$$\beta = 1 + \frac{\sum N_{eBM}}{N_e} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2BM}} = 1 + \alpha \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2BM}}$$

где: $\alpha = \sum N_{eBM} / N_e$ – относительная суммарная мощность вспомогательных механизмов.

Умножим числитель и знаменатель дроби $\frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2BM}}$ на одно и то же

выражение $(i_1 - i'_2) \cdot (i_1 - i'_{2BM})$

$$\frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2BM}} \cdot \frac{(i_1 - i'_2) \cdot (i_1 - i'_{2BM})}{(i_1 - i'_2) \cdot (i_1 - i'_{2BM})} = \underbrace{\frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2}}_{\eta_R} \cdot \underbrace{\frac{i_1 - i'_2}{i_1 - i'_{2BM}}}_{K_{OХЛ}} \cdot \underbrace{\frac{i_1 - i'_{2BM}}{i_1 - i_{2BM}}}_{1/\eta_R^{BM}}$$

и рассмотрим получившееся выражение: η_R $K_{OХЛ}$ $1/\eta_R^{BM}$

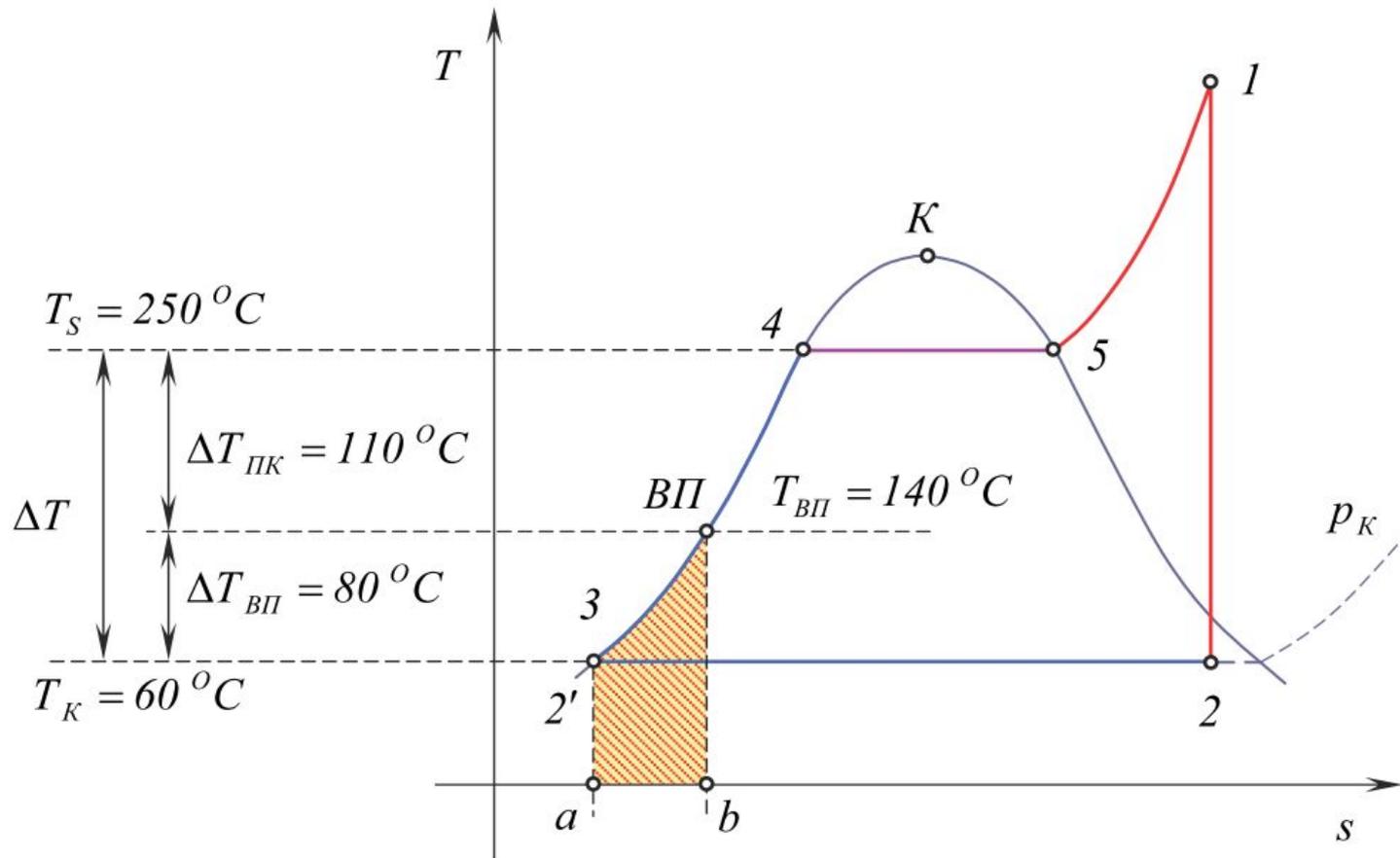
Здесь:

$$\frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} = \eta_R \quad \text{– КПД цикла Ренкина;}$$

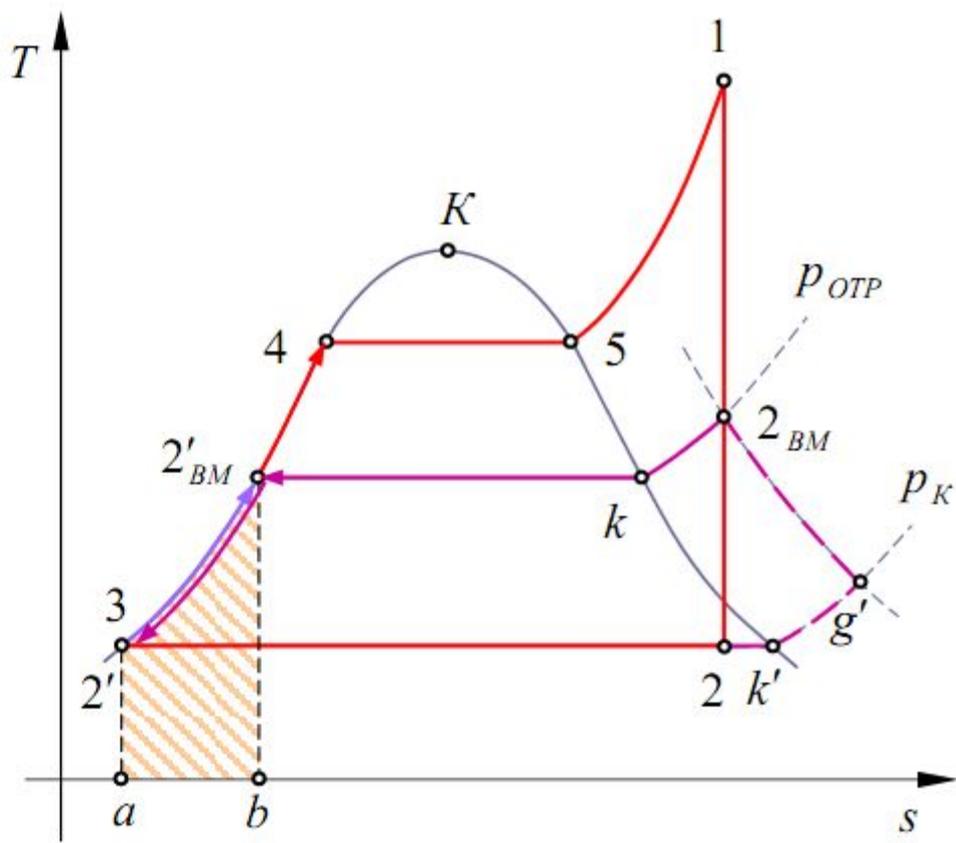
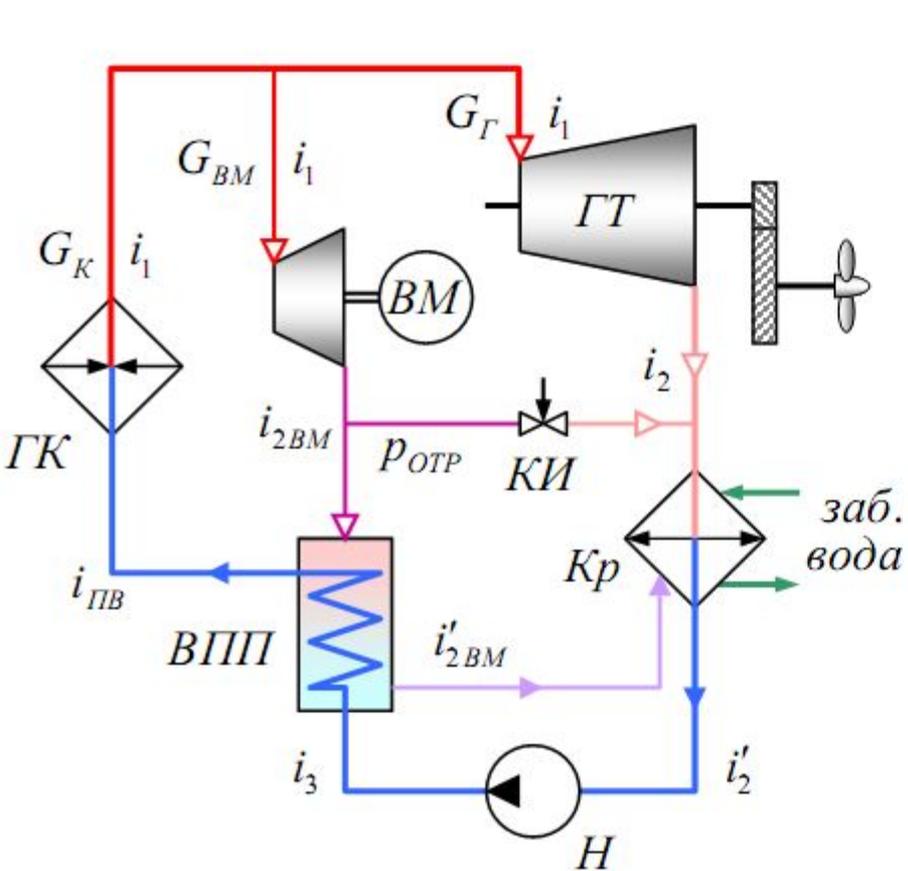
$$\frac{i_1 - i'_2}{i_1 - i'_{2BM}} = K_{OХЛ} \quad \text{– коэффициент охлаждения, показывающий относительное увеличение затрат тепла в котле на каждый 1 кг пара, работающего в турбоприводах вспомогательных механизмов;}$$

$$\frac{i_1 - i_{2BM}}{i_1 - i'_{2BM}} = \eta_R^{BM} \quad \text{– КПД цикла Ренкина для пара, работающего в турбоприводах вспомогательных механизмов.}$$

$$\eta^{\Pi} = \frac{\eta_R}{1 + \alpha \cdot K_{OХЛ} \frac{\eta_R}{\eta_R^{BM}}}$$



Использование регенеративного подогрева питательной воды



Тепловая схема и термодинамический цикл КТЭУ с водоподогревателем поверхностного типа (схема «ВПП»)

ВПП – водоподогреватель поверхностного типа;

Главный цикл КТЭУ: $1 - 2 - 2' - 3 - 4 - 5 - 1$;

Вспомогательный цикл КТЭУ: $1 - 2_{BM} - k - 2'_{BM} - 2' - 3 - 4 - 5 - 1$.

КПД для регенеративного цикла КТЭУ со вспомогательными механизмами:

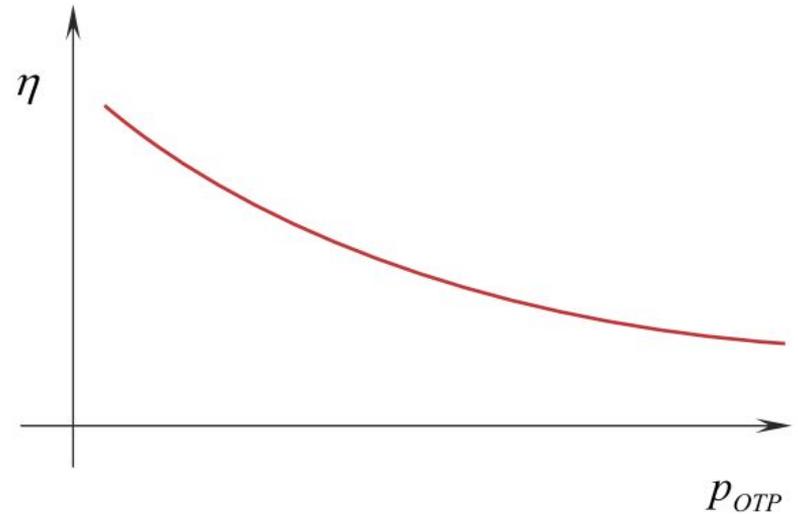
$$\eta = \frac{\eta_R}{\beta} = \frac{G_\Gamma}{G_K} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{ПВ}} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{ПВ}}$$

$$\left(\eta = \frac{\eta_R}{\beta} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} \right)$$

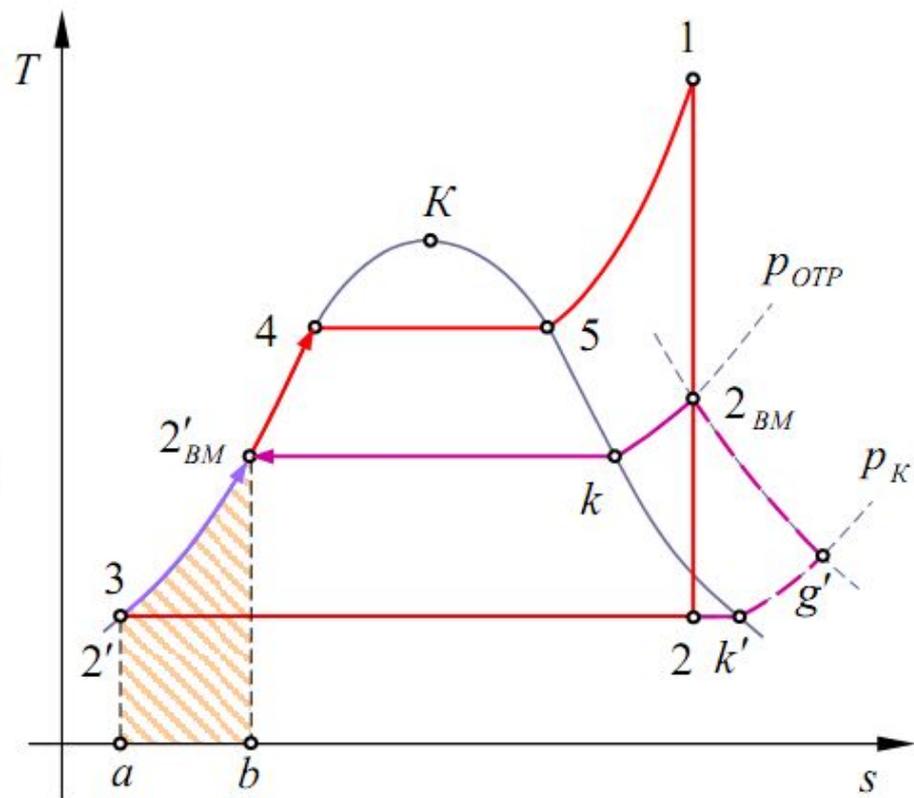
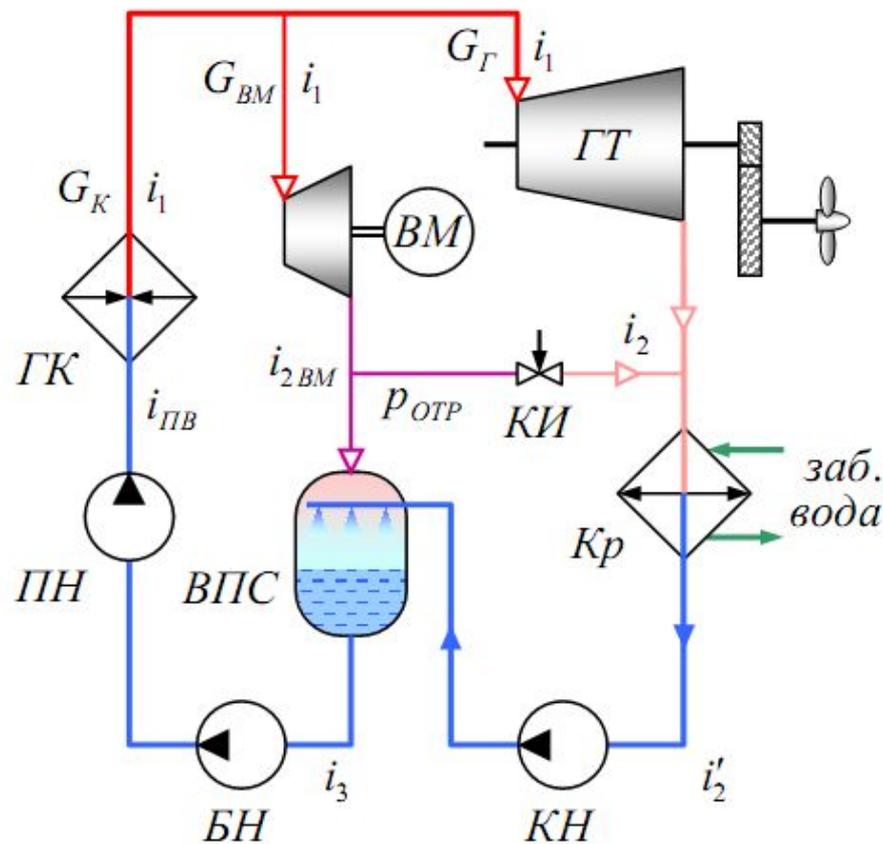
$$\eta = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{ПВ}} \cdot \frac{i_1 - i'_2}{i_1 - i'_2}$$

$$\eta = \frac{1}{\beta} \cdot \underbrace{\frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2}}_{\eta_R} \cdot \underbrace{\frac{i_1 - i'_2}{i_1 - i_{ПВ}}}_{K} = \frac{K\eta_R}{\beta}$$

$$\eta^{ВПП} = \frac{K\eta_R}{1 + \alpha \cdot K_{ОХЛ} \frac{\eta_R}{\eta_{ВМ}}}$$



Зависимость КПД схемы «ВПП» от давления отработавшего пара ВМ



. Тепловая схема и термодинамический цикл КТЭУ с водоподогревателем смешительного типа (схема «ВПС»).

ВПС – водоподогреватель смешительного типа (деаэратор);

КН – конденсатный насос; *БН* – бустерный насос; *ПН* – питательный насос;

Главный цикл КТЭУ: $1 - 2 - 2' - 3 - 4 - 5 - 1$;

Вспомогательный цикл КТЭУ: $1 - 2_{BM} - k - 2'_{BM} - 4 - 5 - 1$.

КПД КТЭУ, выполненной по схеме «ВПС»:

$$\eta^{ВПП} = \frac{K\eta_R}{\beta}$$

При равных параметрах пара со схемой «ВПП»

– $\eta_R = const$;

При равном значении $i_{ПВ}$ со схемой «ВПП»

– $K = const$.

$$\eta^{ВПС} = \frac{K\eta_R}{1 + \alpha \frac{\eta_R}{\eta_R^{BM}}}$$

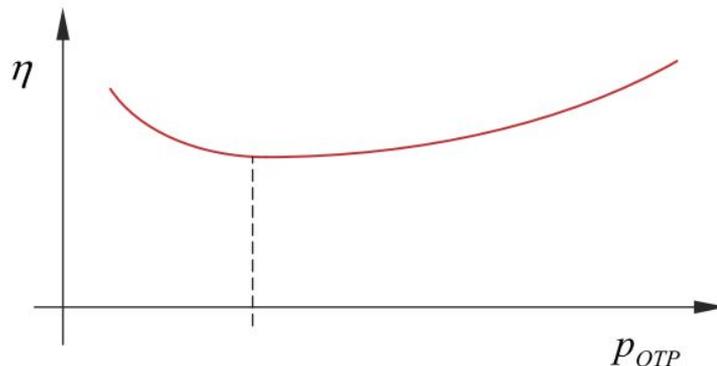
где:

K – коэффициент использования тепла отработавшего пара;

η_R – КПД цикла Ренкина;

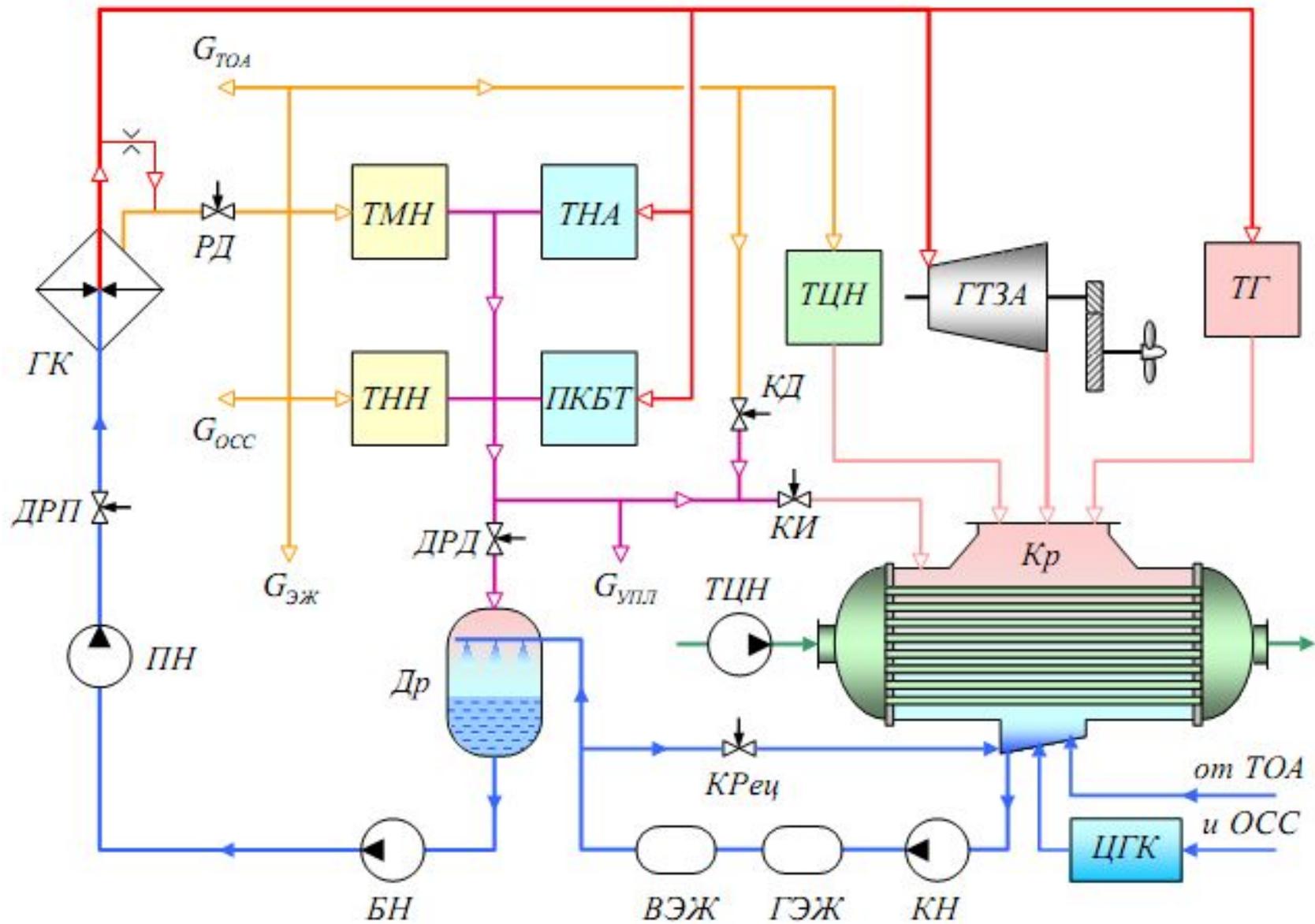
α – относительная мощность вспомогательных механизмов;

η_R^{BM} – КПД цикла Ренкина для пара, работающего в турбоприводах вспомогательных механизмов.



Зависимость КПД схемы «ВПС» от давления в системе отработавшего пара

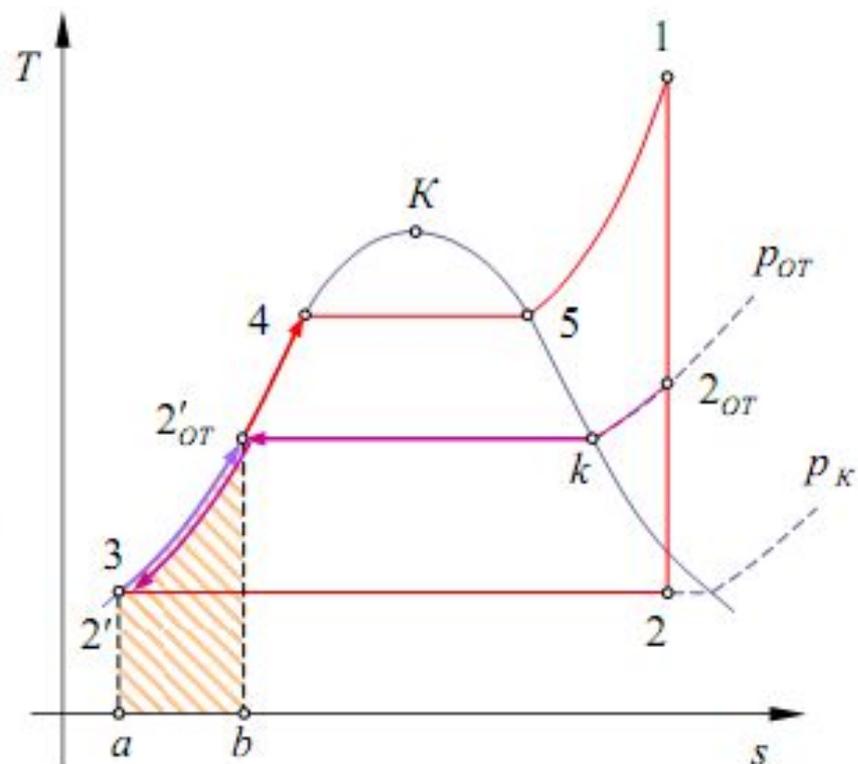
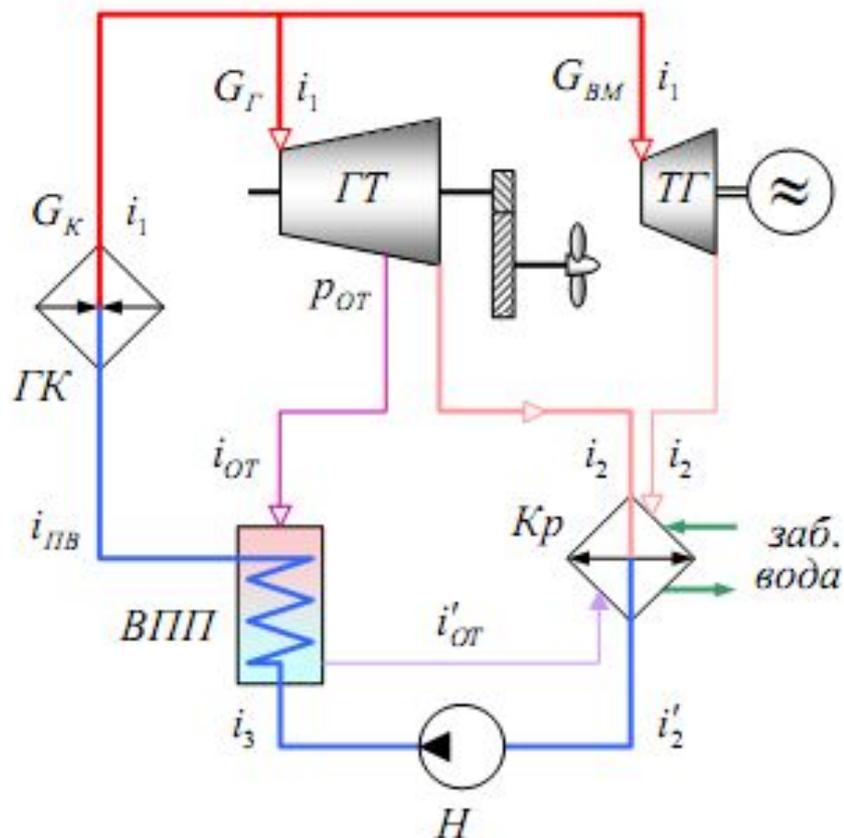
| <i>конечные параметры</i> | | <i>начальные параметры</i> | <i>группа А</i> | <i>группа Б</i> |
|-------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| | | | <i>полные параметры пара</i> | <i>пониженные параметры пара</i> |
| <i>группа 1</i> | <i>работа на систему отраб. пара</i> | | <i>ПКБТ ТНА</i> | <i>ТМН ТНН</i> |
| <i>группа 2</i> | <i>работа на вакуум (главный конденсатор)</i> | | <i>ТГ</i> | <i>ТЦН</i> |



Регенеративная тепловая схема 2-го рода с учетом разбивки турбоприводов ВМ на группы по начальным и конечным параметрам пара.

-  главный пар;
-  вспомогательный перегретый пар (группа А);
-  слабоперегретый пар (группа Б);
-  отработавший пар противодавленной группы механизмов (группа 1);
-  отработавший пар конденсационной группы механизмов (группа 2);
-  конденсат и питательная вода;
-  забортная охлаждающая вода.

ГК – главный котел; *ГТЗА* – главный турбозубчатый агрегат;
Кр – главный конденсатор; *КН* – конденсатный насос (гидравлическая часть);
ГЭЖ – главный эжектор; *ВЭЖ* – вспомогательный эжектор; *Др* – деаэратор;
БН – бустерный насос (гидравлическая часть); *ПН* – питательный насос (гидравлическая часть); *ТМН* – турбопривод масляного насоса; *ТНН* – турбопривод топливного насоса; *ТНА* – добавительная паровая турбина ТНА;
ПКБТ – питательный конденсатно-бустерный турбоагрегат (турбопривод *КН*, *БН* и *ПН*);
ТЦН – турбопривод циркуляционного насоса; *ТГ* – турбогенератор; *РД* – регулятор давления в системе слабоперегретого пара; *КД* – клапан добавки слабоперегретого пара; *КИ* – клапан излишков отработавшего пара; *ДРД* – дифференциальный регулятор давления в деаэраторе; *КРец* – клапан рециркуляции;
ДРП – двухимпульсный регулятор питания котла; *ЦГК* – цистерна грязных конденсатов; *ТОА* – теплообменные аппараты; *ОСС* – общесудовые системы и механизмы;
G_{ТОА} – пар на теплообменные аппараты; *G_{ОСС}* – пар на общесудовые потребители и системы; *G_{ЭЖ}* – пар на эжекторы; *G_{Упл}* – пар в систему уплотнений турбины.



Регенеративная тепловая схема и термодинамический цикл КТЭУ с одним отбором пара.

- ГК – главный котел; ГТ – главная турбина; ТГ – турбогенератор;
 Кр – главный конденсатор; ВПП – водоподогреватель поверхностного типа;
 Н – насос;
 P_{OT} – давление отбираемого пара (греющего пара);
 i_{OT} – энтальпия отбираемого пара; i'_{OT} – энтальпия конденсата греющего пара.

$$Q_{\text{ПОЛ}} = G_{\Gamma}(i_1 - i_2) - G_{\text{ОТ}}(i_{\text{ОТ}} - i_2)$$

$$Q_3 = G_K(i_1 - i_{\text{ПВ}}) = G_K(i_1 - i'_{\text{ОТ}})$$



$$\eta^{IP} = \frac{G_{\Gamma}}{G_K} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_{\text{ОТ}}} - \frac{G_{\text{ОТ}}(i_{\text{ОТ}} - i_2)}{G_K(i_1 - i'_{\text{ОТ}})}$$



$$\frac{G_{\Gamma}}{G_K} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_{\text{ОТ}}} \cdot \frac{i_1 - i'_2}{i_1 - i'_2} = \frac{G_{\Gamma}}{G_K} \cdot \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} \cdot \frac{i_1 - i'_2}{i_1 - i'_{\text{ОТ}}} = \frac{\eta_R K_P}{\beta}$$

$$\frac{G_{\text{ОТ}}}{G_K} \cdot \frac{i_{\text{ОТ}} - i_2}{i_1 - i'_{\text{ОТ}}} = \frac{G_{\text{ОТ}}}{G_K} \cdot \frac{G_{\Gamma}}{G_{\Gamma}} \cdot \frac{i_{\text{ОТ}} - i_2 + i_1 - i_1}{i_1 - i_{\text{ОТ}}} =$$

$$= \frac{G_{\Gamma}}{G_K} \cdot \frac{G_{\text{ОТ}}}{G_{\Gamma}} \cdot \frac{i_{\text{ОТ}} - i_2 + i_1 - i_1}{i_1 - i_{\text{ОТ}}}$$

где:

$$G_{\Gamma}/G_K = 1/\beta;$$

$G_{\text{ОТ}}/G_{\Gamma} = \omega_{\text{ОТ}}$ – коэффициент отбора пара

где $K_P = \frac{i_1 - i'_2}{i_1 - i'_{\text{ОТ}}}$ – коэффициент регенерации

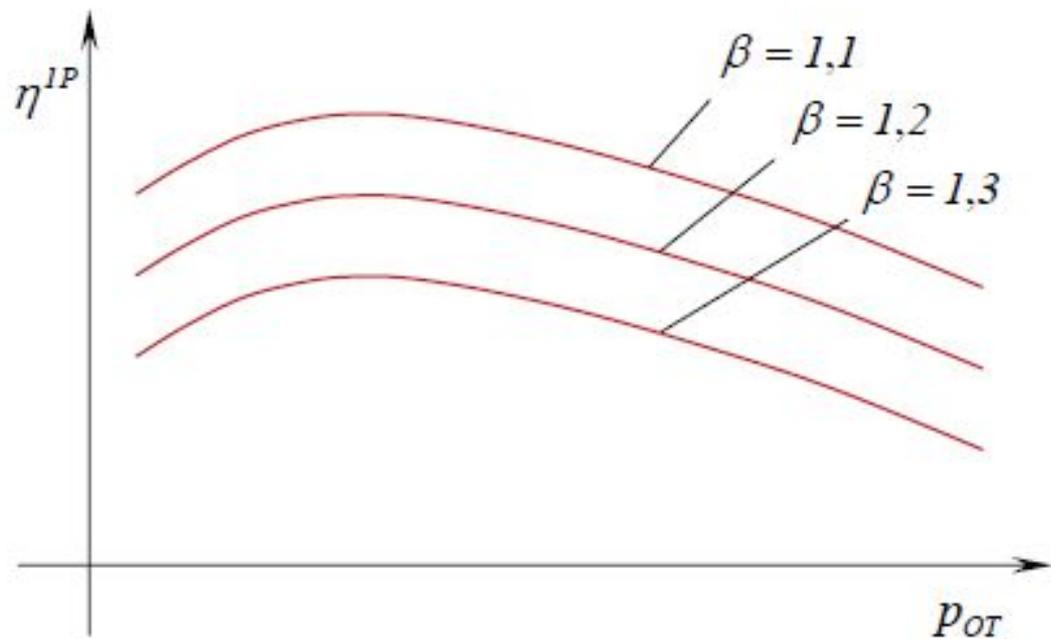


$$\eta^{IP} = \frac{K\eta_R}{\beta} \left(1 - \omega_{\text{ОТ}} \left(1 - \frac{i_1 - i_{\text{ОТ}}}{i_1 - i_2} \right) \right)$$



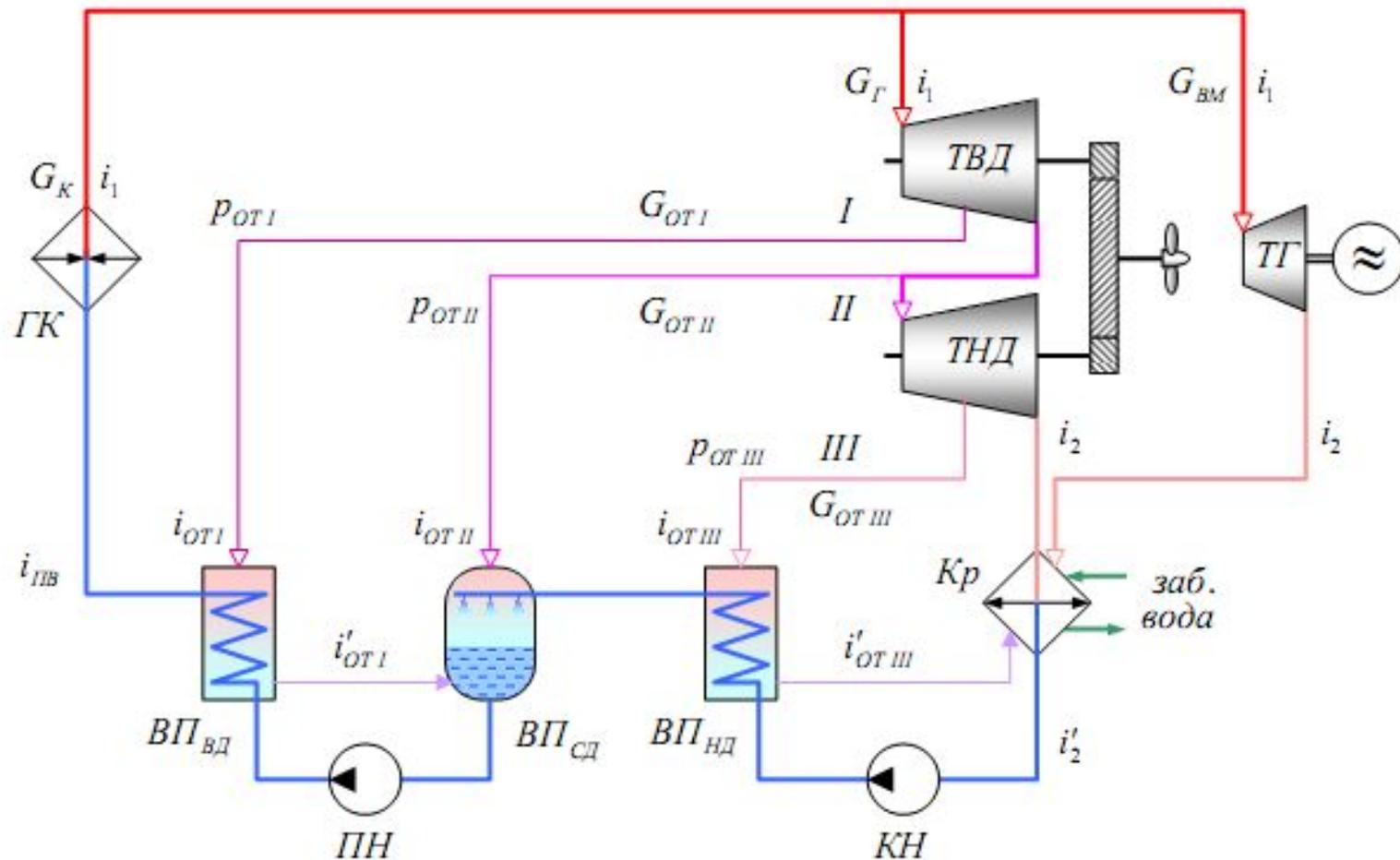
$$\frac{G_{\text{ОТ}}}{G_K} \cdot \frac{i_{\text{ОТ}} - i_2}{i_1 - i'_{\text{ОТ}}} = \frac{\omega_{\text{ОТ}}}{\beta} \left(\frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_{\text{ОТ}}} - \frac{i_1 - i_{\text{ОТ}}}{i_1 - i'_{\text{ОТ}}} \right) =$$

$$= \frac{\omega_{\text{ОТ}} K_P \eta_R}{\beta} \left(1 - \frac{i_1 - i_{\text{ОТ}}}{i_1 - i_2} \right)$$



Зависимость КПД схемы 1-го рода от давления отбираемого пара

$$\left(1 - \omega_{OT} \left(1 - \frac{i_1 - i_{OT}}{i_1 - i_2} \right) \right) > \beta$$



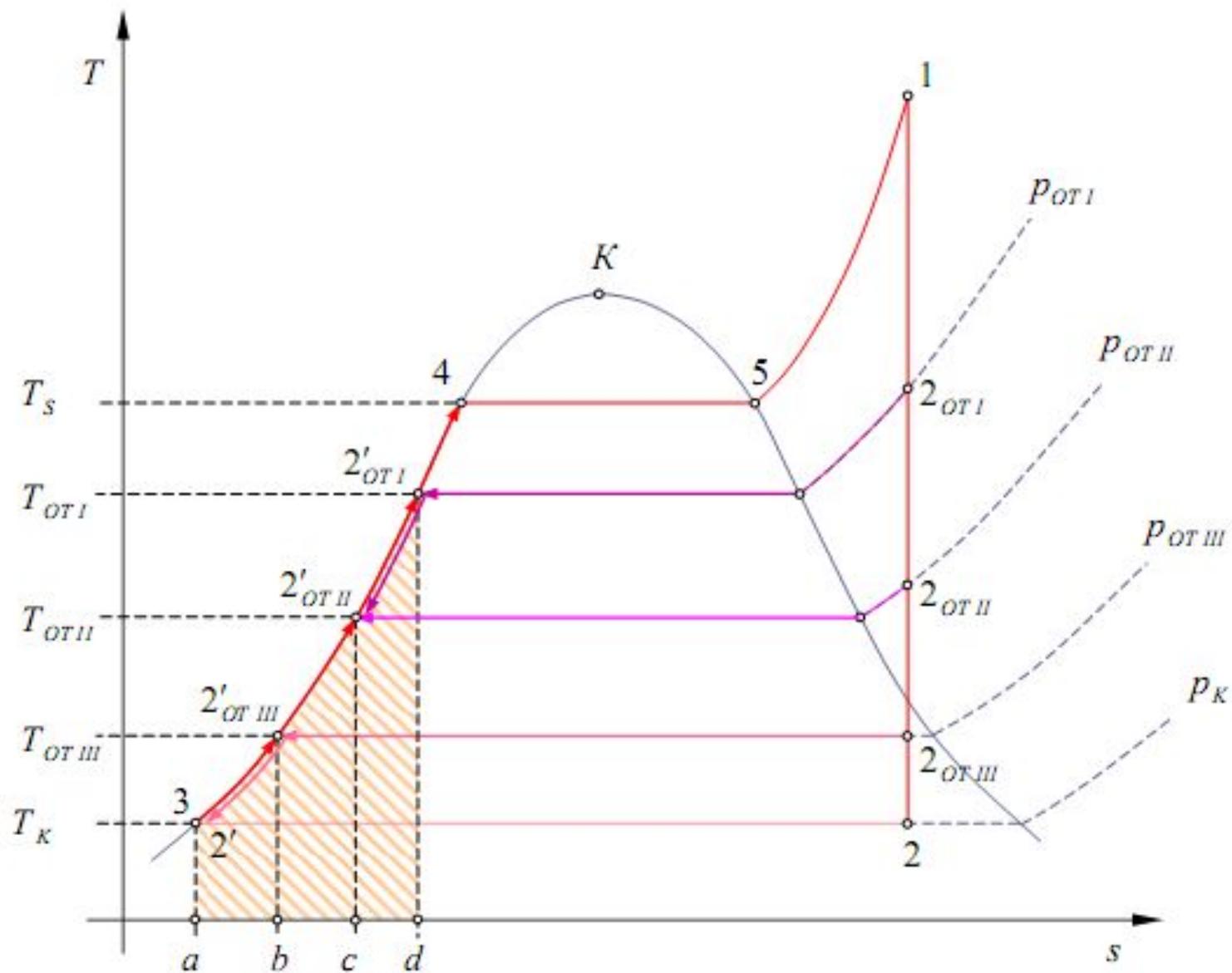
Регенеративная тепловая схема 1-го рода с тремя отборами пара.

I – 1-й отбор пара (из корпуса ТВД); *II* – 2-й отбор пара (из ресивера);

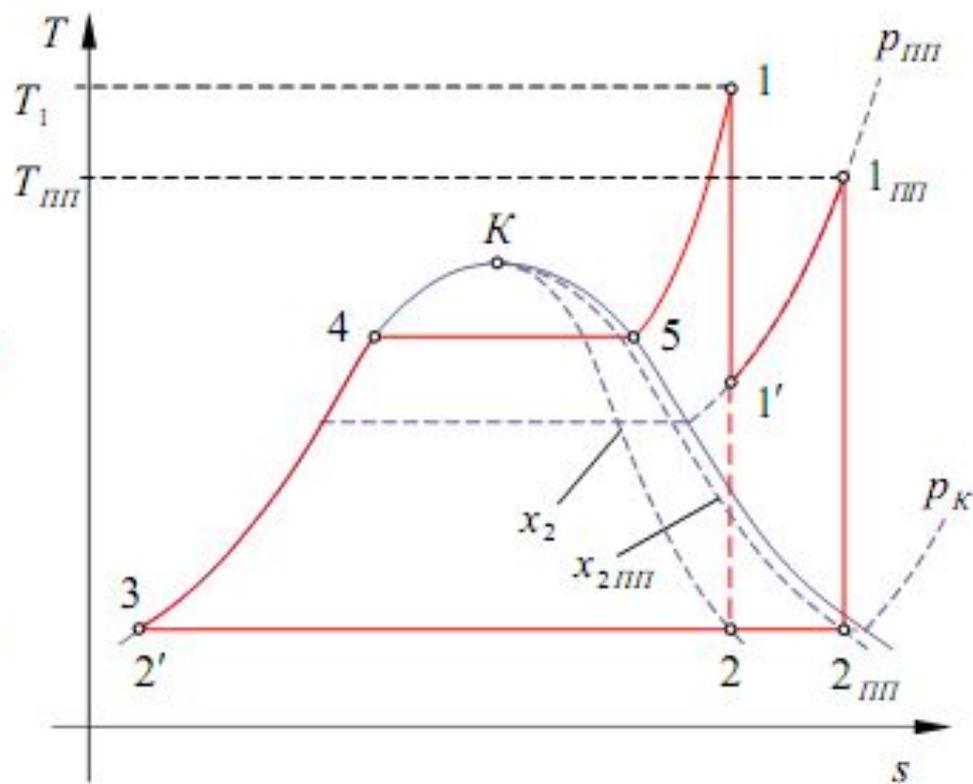
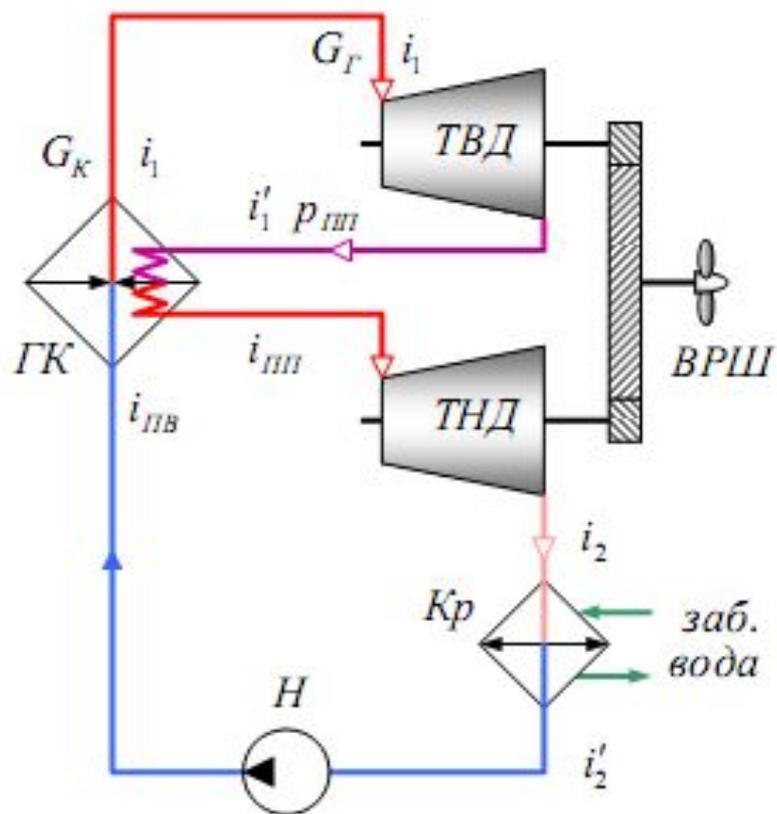
III – 3-й отбор пара (из корпуса ТНД); *КН* – конденсатный насос;

ПН – питательный насос; *ВП_{нд}* – водоподогреватель низкого давления (ВПП);

ВП_{сд} – водоподогреватель среднего давления (деаэратор); *ВП_{вд}* – водоподогреватель высокого давления (ВПП).



Термодинамический цикл для тепловой схемы 1-го рода с тремя отборами пара.



Тепловая схема и термодинамический цикл простейшей КТЭУ с однократным промежуточным перегревом пара.

ВРШ – винт регулируемого шага;