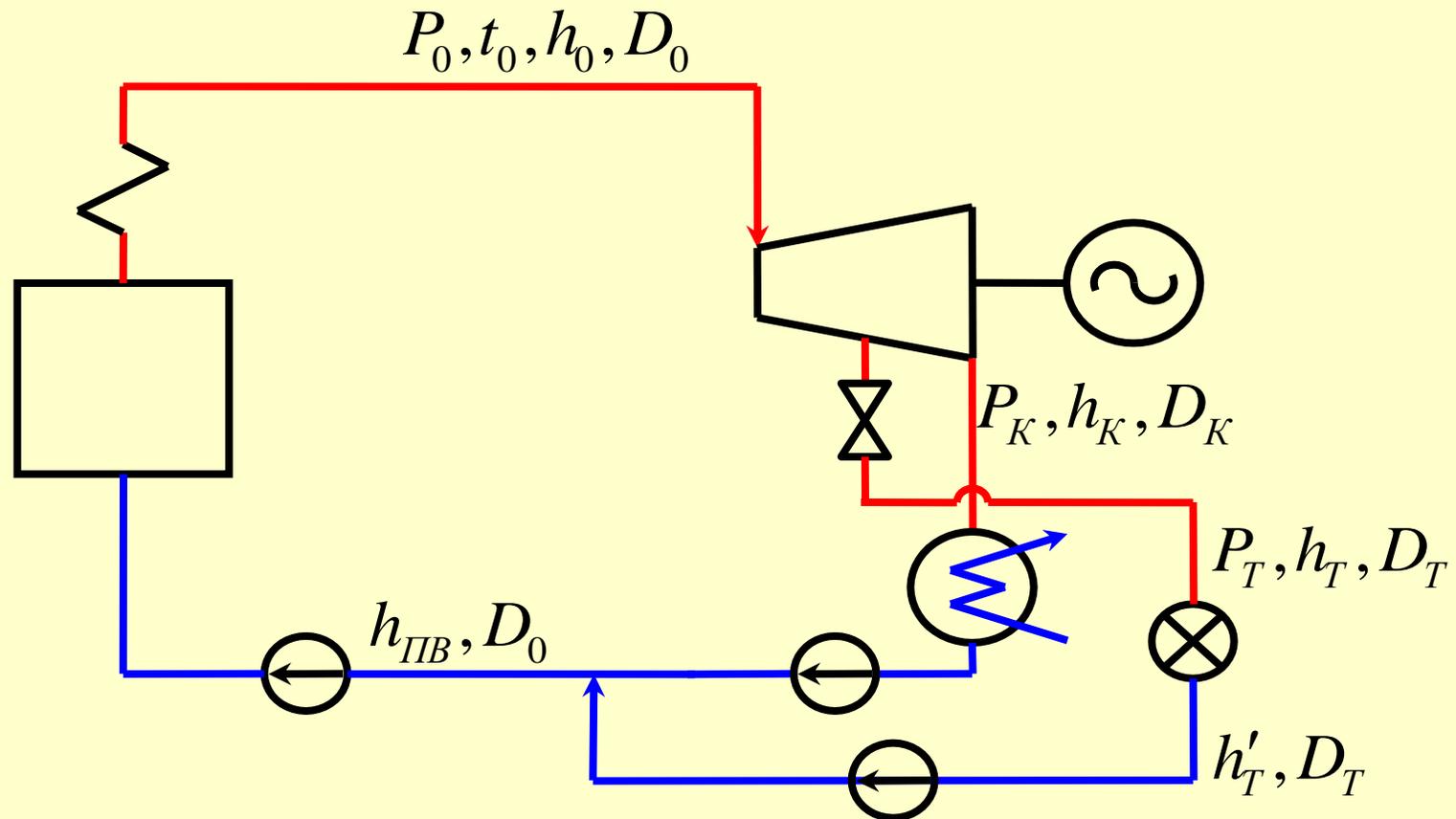
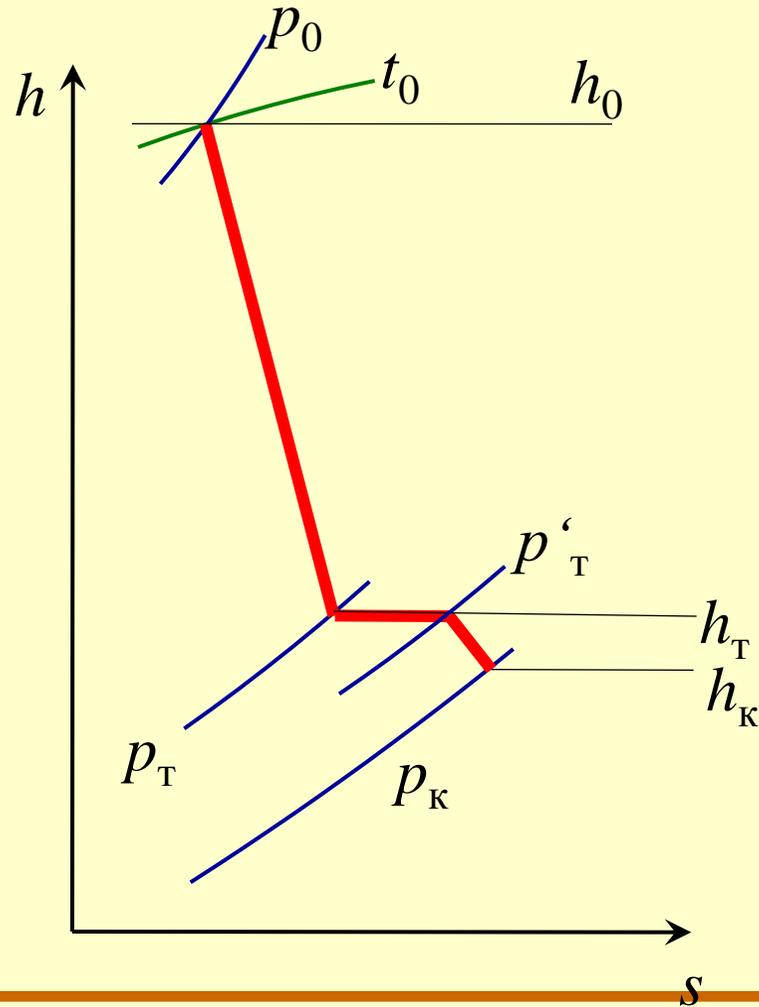


РАСХОДЫ ПАРА, ТЕПЛОТЫ И ТОПЛИВА НА ТЭЦ

Схема паротурбинной установки с отпуском тепла потребителю



Процесс расширения пара в турбоустановке типа Т в h - s диаграмме



Мощность, вырабатываемая турбиной

$$N_{\text{э}} = \left[D_0 \cdot (h_0 - h_T) + (D_0 - D_T) \cdot (h_T - h_K) \right] \cdot \eta_M \cdot \eta_T$$

Расходы пара

Расход пара на турбину:

$$D_0^T = D_K + D_T + \sum D_{OTB i}, \left[\frac{кг}{с} \right]$$

$D_T, \left[\frac{кг}{с} \right]$ - расход пара к тепловому потребителю

Расходы пара

Расход пара на турбину:

$$D_0^T = \frac{N_{\text{Э}}}{H_i \cdot \eta_M \cdot \eta_{\Gamma}} + \frac{h_T - h_K}{h_0 - h_K} \cdot D_T, \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$$

Коэффициент недовыработки мощности: $Y_T = \frac{h_T - h_K}{h_0 - h_K}$

Расход пара на конденсационную турбину: $\frac{N_{\text{Э}}}{H_i \cdot \eta_M \cdot \eta_{\Gamma}} = D_0^K$

Расходы пара

Расход пара на турбину:

$$D_0^T = D_0^K + Y_T \cdot D_T, \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$$

РАСХОДЫ ТЕПЛА

Тепло рабочего тела (перегретого пара), поступившее в турбоустановку:

$$Q_{TY} = D_0^T \cdot (h_0 - h_{ПВ}), [кВт]$$

Тепло, отданное тепловому потребителю:

$$Q_T = D_T \cdot (h_T - h'_T), [кВт]$$

$$Q_{TY} = Q_{Э} + Q_T$$

РАСХОДЫ ТЕПЛА

Тепло рабочего тела (перегретого пара), поступившее в турбоустановку:

$$Q_{\text{ТУ}} = D_0^{\text{T}} \cdot (h_0 - h_{\text{ПВ}}) = (D_0^K + Y_T \cdot D_T) \cdot (h_0 - h_{\text{ПВ}})$$

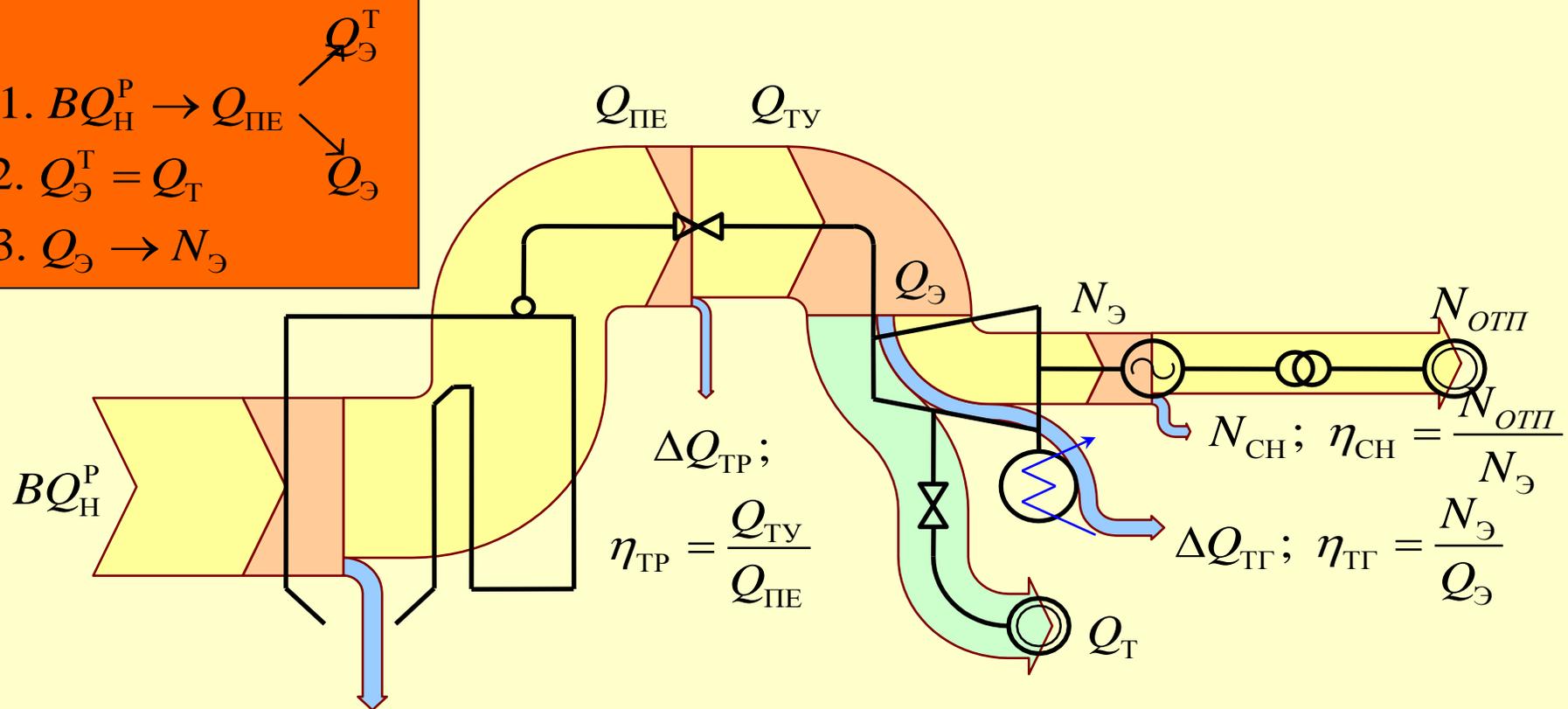
После преобразований получим:

$$Q_{\text{ТУ}} = Q_0^K + \xi_T \cdot Q_T$$

$$\xi_T = Y_T \cdot \frac{h_0 - h_{\text{ПВ}}}{h_T - h_K} \quad \text{коэффициент ценности тепла отборного пара}$$

Применение метода энергобалансов к ТЭЦ

1. $BQ_H^P \rightarrow Q_{ПЕ}$
2. $Q_{Э}^T = Q_T$
3. $Q_{Э} \rightarrow N_{Э}$



$$\Delta Q_{TP}; \quad \eta_{TP} = \frac{Q_{ТУ}}{Q_{ПЕ}}$$

$$N_{CH}; \quad \eta_{CH} = \frac{N_{ОПН}}{N_{Э}}$$

$$\Delta Q_{TG}; \quad \eta_{TG} = \frac{N_{Э}}{Q_{Э}}$$

$$\Delta Q_K = \sum_2^6 Q_j; \quad \eta_{КА} = \frac{Q_{ПЕ}}{BQ_H^P}$$

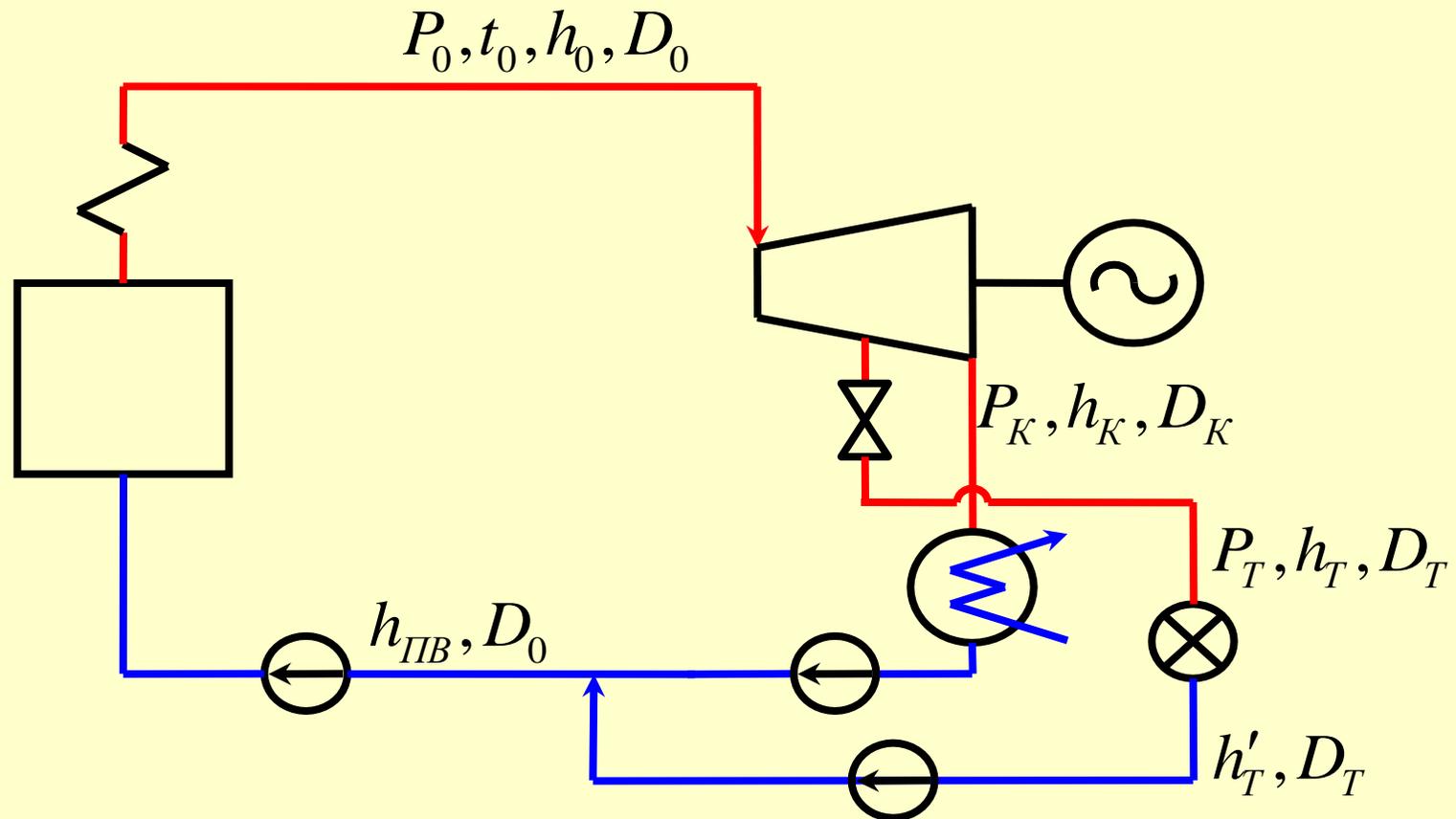
ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТЭЦ

ТЕПЛОВАЯ ЭКОНОМИЧНОСТЬ ТЭЦ

характеризуется:

- показателями тепловой экономичности **по производству и отпуску электроэнергии**
- показателями **по отпуску теплоты тепловым потребителям**

Схема паротурбинной установки с отпуском тепла потребителю



Абсолютный электрический КПД

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{N_{\text{Э}}}{Q_{\text{ТУ}} - Q_{\text{Т}} / \eta_{\text{ТП}}} = \frac{N_{\text{Э}}}{Q_{\text{Э}}}$$

$\eta_{\text{ТП}}$ – коэффициент, учитывающий потери теплоты в теплообменных аппаратах и в трубопроводах от турбины до упомянутых аппаратов 0,98-0,99.

КПД станции брутто по производству ЭЭ:

$$\eta_{\text{СТ}}^{\text{ВЫР}} = \eta_{\text{Э}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{КА}}$$

КПД станции нетто по отпуску ЭЭ:

$$\eta_{\text{СТ}}^{\text{ОТП}} = \eta_{\text{СТ}}^{\text{ВЫР}} \cdot (1 - \beta_{\text{сн}})$$

Удельный расход тепла по выработке ЭЭ на ТЭЦ

$$q_{\text{ст}}^{\text{бр}} = \frac{Q_{\text{ТУ}} - Q_{\text{T}}}{N_{\text{Э}}} = \frac{Q_{\text{Э}}}{N_{\text{Э}}}$$

$$\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{час}} \right]$$

$$\left[\frac{\text{ккал}}{\text{кВт} \cdot \text{час}} \right]$$

Удельный расход топлива

По выработке электроэнергии

$$b_{\text{Э}}^{\text{выр}} = \frac{B_{\text{Э}}}{N_{\text{Э}}}$$

По отпуску электроэнергии

$$b_{\text{Э}}^{\text{отп}} = \frac{B_{\text{Э}}}{N_{\text{Э}} \cdot (1 - \beta_{\text{сн}})}$$

Удельный расход условного топлива

По выработке электроэнергии

$$b_{\text{Эу}}^{\text{выр}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{СТ}}^{\text{выр}}}, \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{час}} \right]$$

По отпуску электроэнергии

$$b_{\text{Эу}}^{\text{отп}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{СТ}}^{\text{отп}}}, \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{час}} \right]$$

Удельный расход топлива

По отпуску тепла

$$b_{\text{T}}^{\text{отп}} = \frac{B_{\text{T}}}{Q_{\text{T}}}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{ГДж}} \right], \left[\frac{\text{кг}}{\text{Гкал}} \right]$$

КПД ТЭЦ по производству теплоты

$$\eta_{СТ}^T = \eta_{ТП} \cdot \eta_{ТР} \cdot \eta_{КА}$$

**Удельный расход условного топлива по отпуску
тепла**

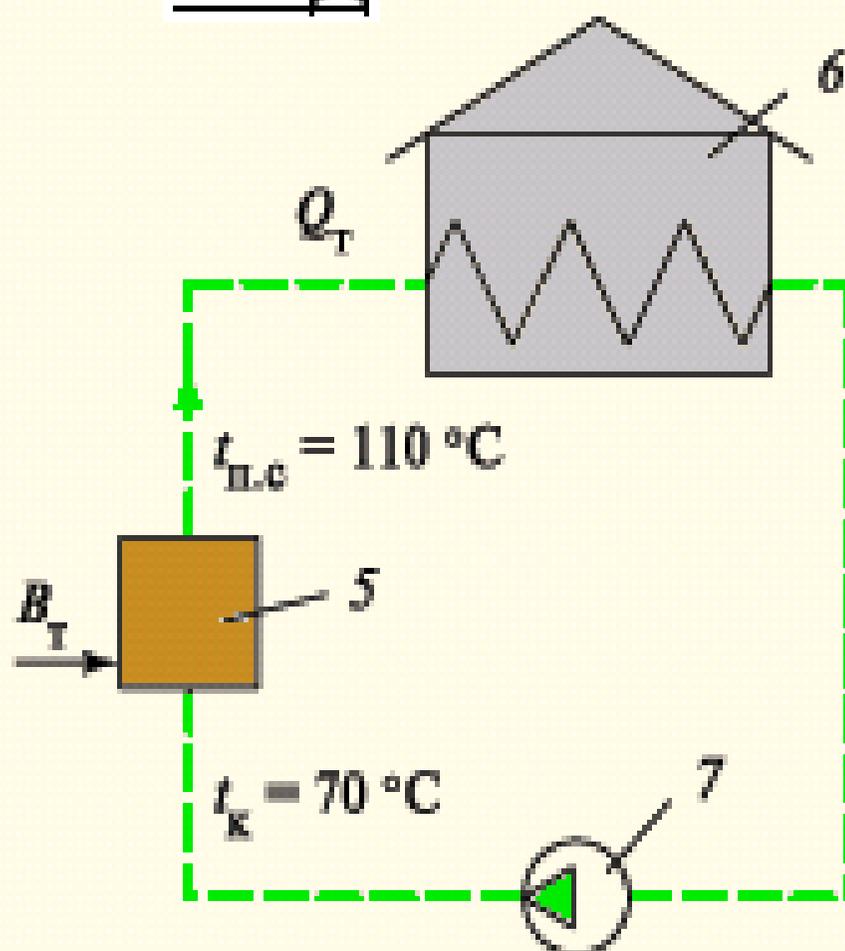
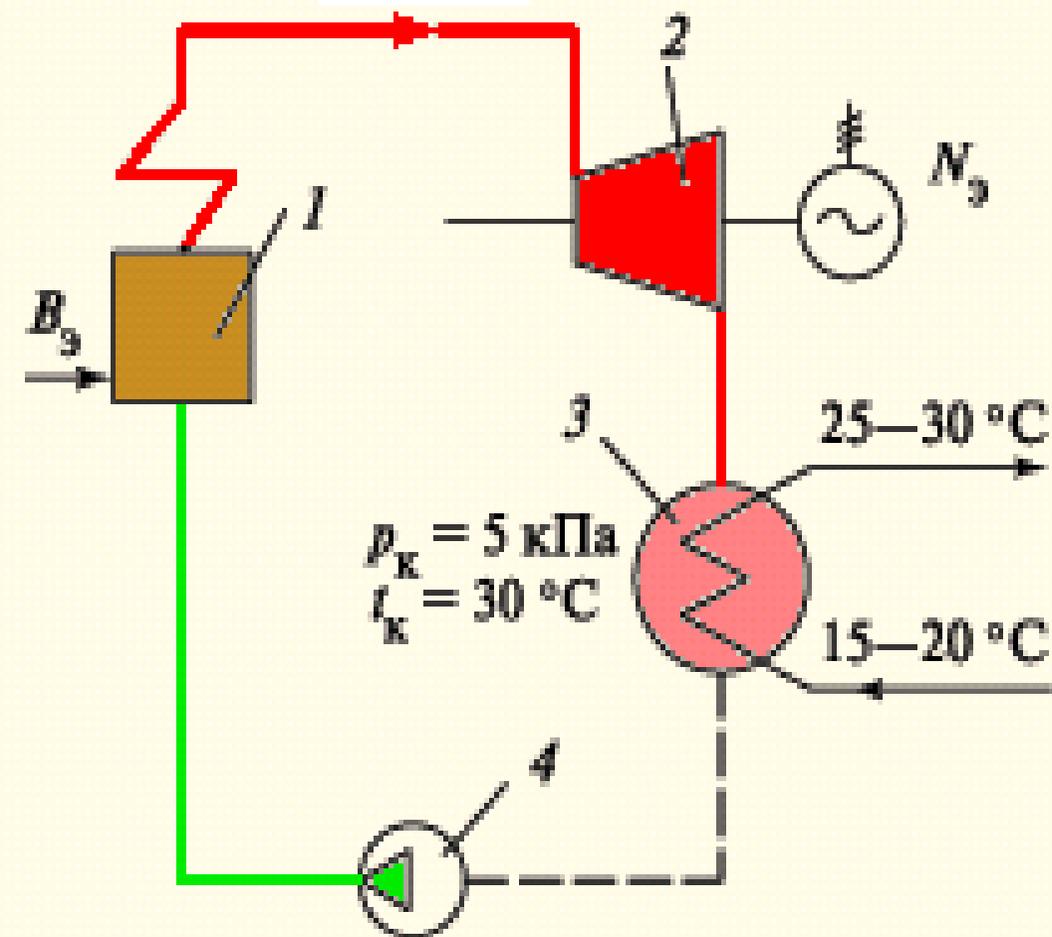
$$b_{Т у}^{отп} = \frac{34,121}{\eta_{СТ}^T} \approx 39,08 \frac{кг}{ГДж} \approx 164 \frac{кг}{Гкал}$$

**ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА ОТ
КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

РАЗДЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

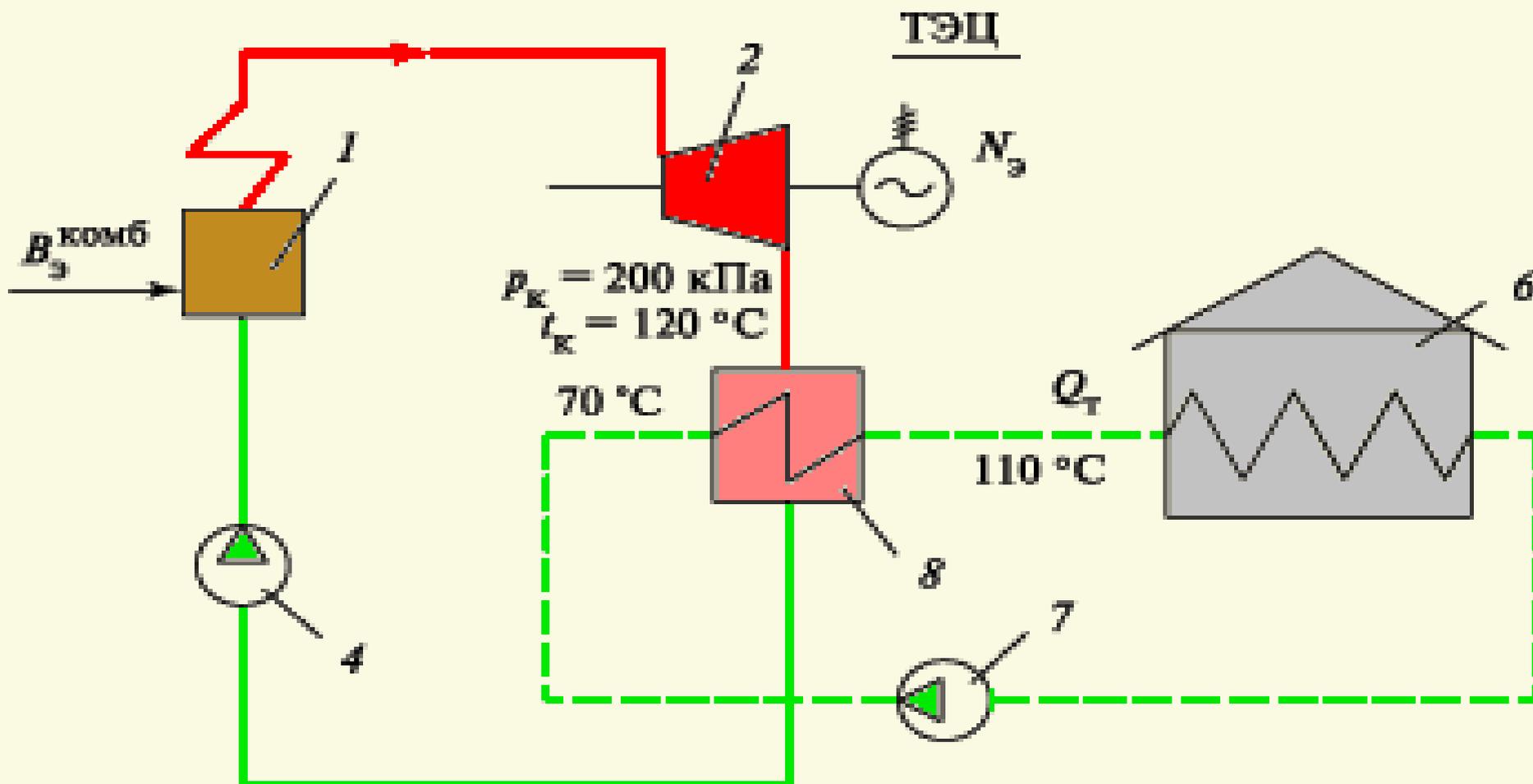
КЭС

КНД



а)

КОМБИНИРОВАННАЯ УСТАНОВКА



б)

РАСХОДЫ ПАРА

Раздельная установка

$$\begin{aligned} D_{PY} &= D_{KЭС} + D_{КНД} = \\ &= D_{KЭС} + D_T \end{aligned}$$

Комбинированная
установка

$$\begin{aligned} D_{KY} &= D_0^{TЭЦ} = \\ &= D_0^{KЭС} + Y_T \cdot D_T \end{aligned}$$

ЭКОНОМИЯ

$$\begin{aligned} \Delta D &= D_{PY} - D_{KY} = \\ &= (1 - Y_T) \cdot D_T \end{aligned}$$

РАСХОДЫ ТЕПЛА

Раздельная установка

$$\begin{aligned} Q_{PY} &= Q_{KЭС} + Q_{КНД} = \\ &= Q_{KЭС} + Q_T \end{aligned}$$

Комбинированная
установка

$$\begin{aligned} Q_{KY} &= Q_0^{TЭЦ} = \\ &= Q_0^{KЭС} + \xi_T \cdot Q_T \end{aligned}$$

ЭКОНОМИЯ

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q_{PY} - Q_{KY} = \\ &= (1 - \xi_T) \cdot Q_T \end{aligned}$$

РАСХОДЫ ТОПЛИВА

Раздельная установка

$$B_{PY} = B_{KЭС} + B_{KНД}$$

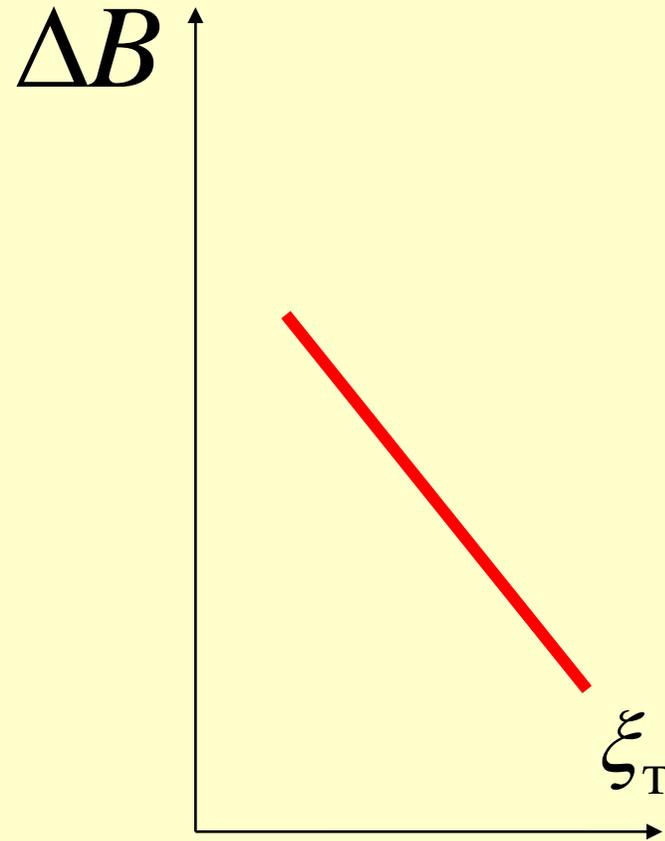
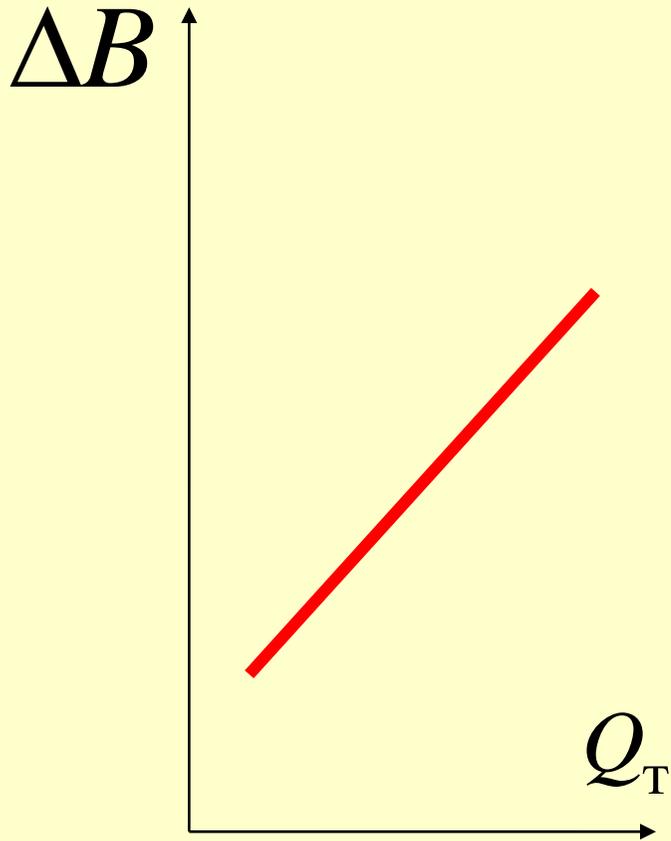
Комбинированная
установка

$$\begin{aligned} B_{КУ} &= B_{ТЭЦ} = \\ &= B_{Э} + B_{Т} \end{aligned}$$

ЭКОНОМИЯ

$$\Delta B = \frac{(1 - \xi_T) \cdot Q_T}{Q_H^p \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_K}$$

Зависимость экономии топлива от различных факторов



ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЦИКЛА ПТУ

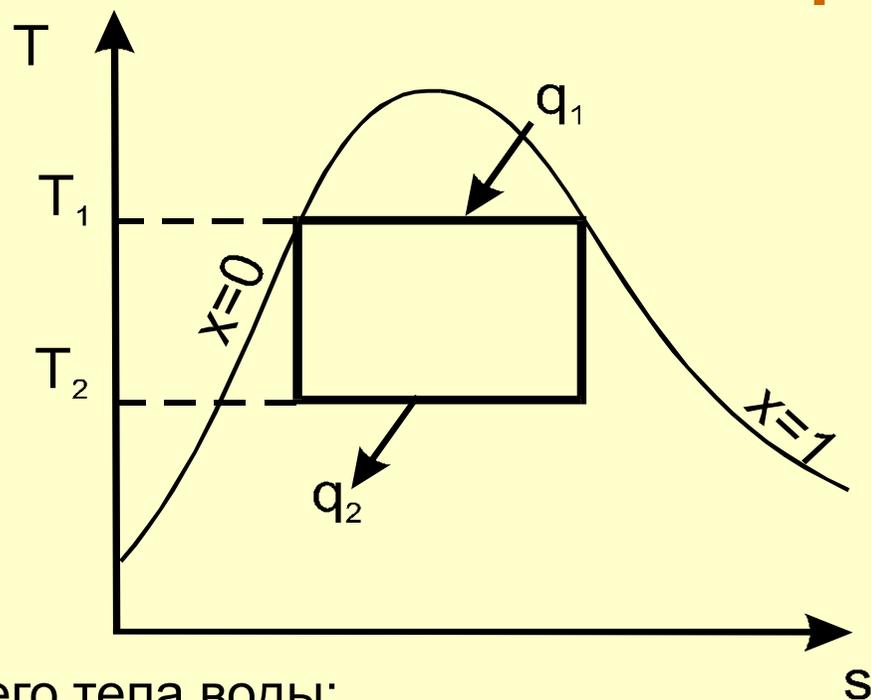
Цикл Карно и цикл Ренкина на насыщенном и перегретом паре

Цикл Карно на водяном паре

Цикл Карно является наиболее эффективным циклом теплового двигателя

Цикл Карно состоит из

- **двух адиабатных** процессов - расширения и сжатия
- **двух изотермических** процессов - подвода и отвода теплоты



Удобство применения в качестве рабочего тела воды:

*на участке парообразования и конденсации пара **изобарный процесс** подвода или отвода тепла является одновременно **изотермическим***

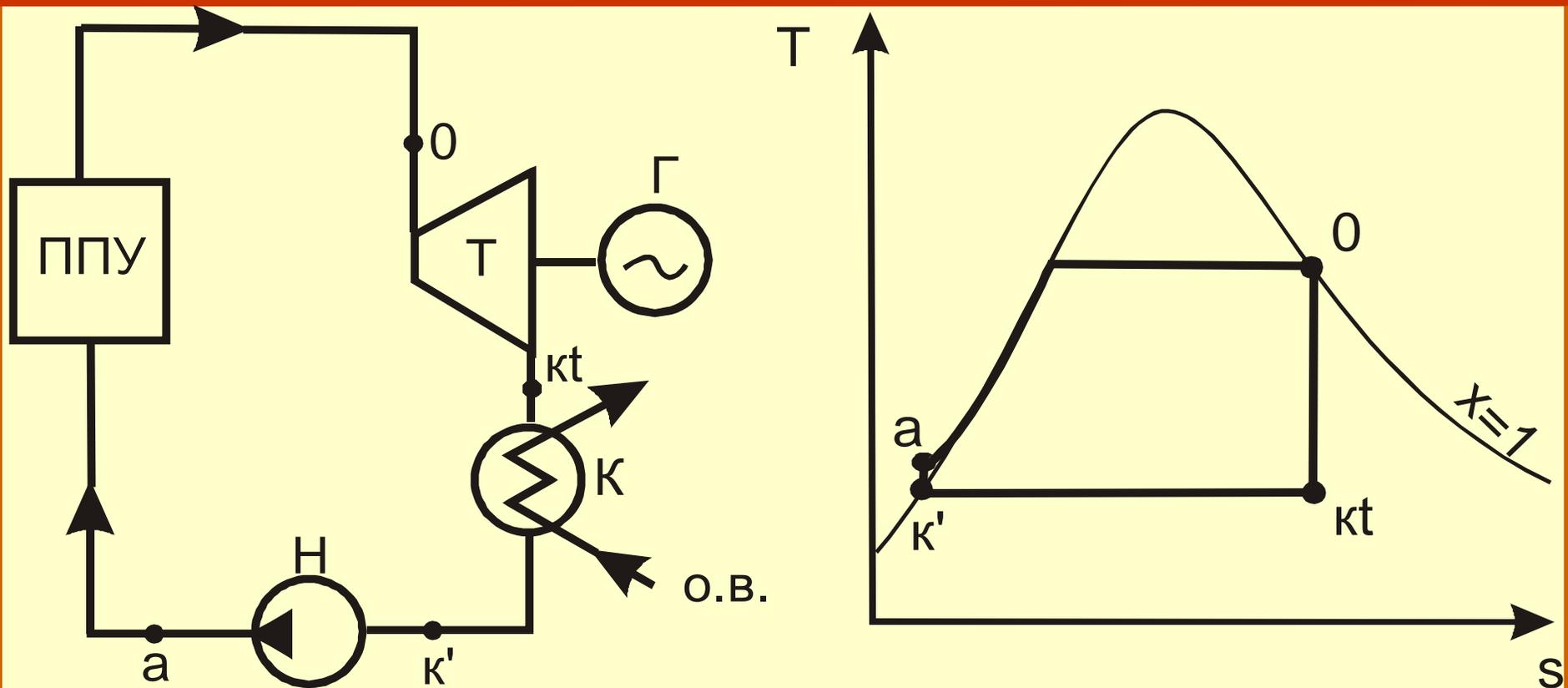
Неосуществимость цикла Карно на водяном паре

Использование в цикле Карно насыщенного водяного пара оказалось **неосуществимым** на практике по ряду причин

Идеальным термодинамическим циклом тепловых и атомных электростанций является **цикл Ренкина**.

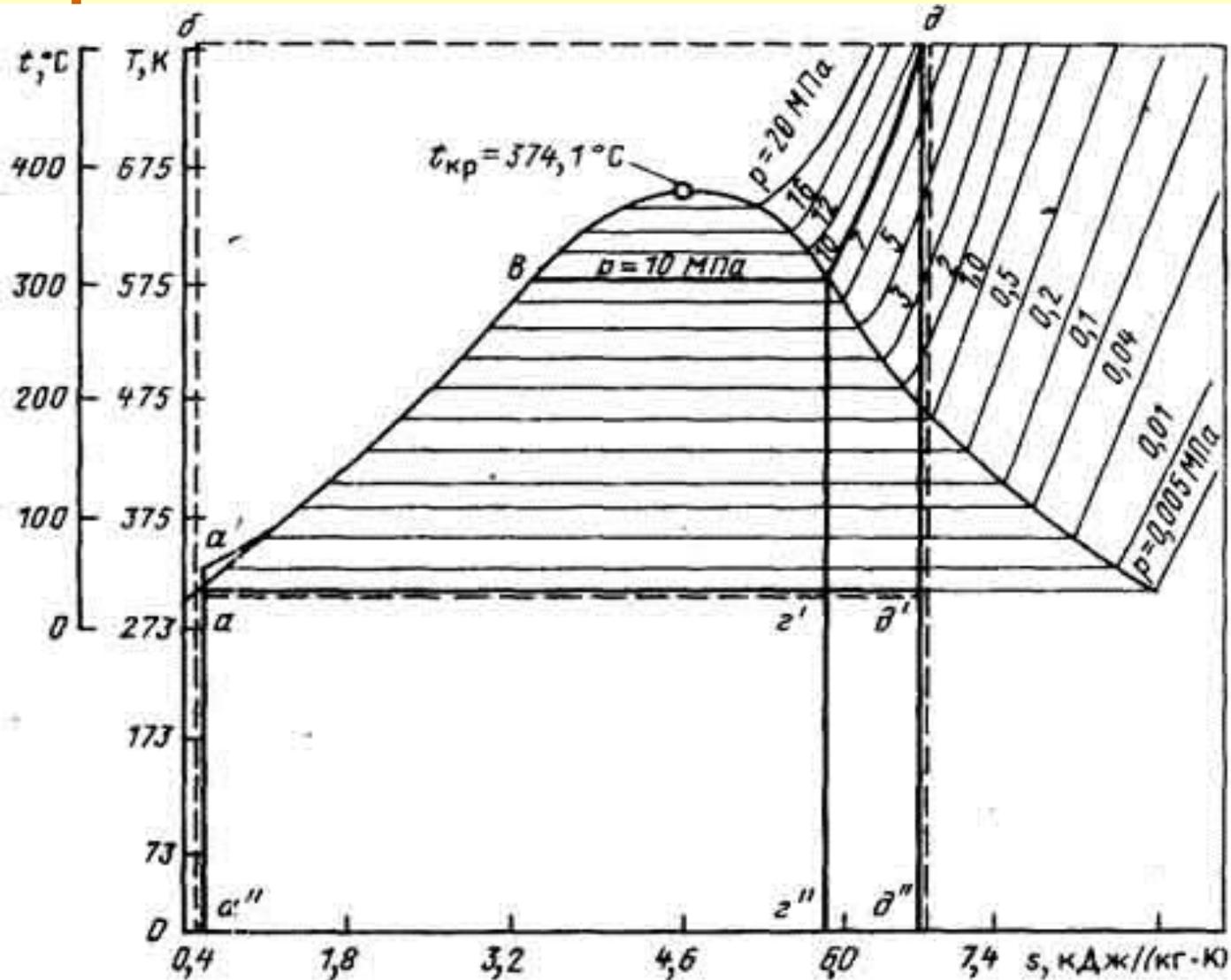
Ренкин предложил заменить частичную конденсацию пара в процессе отвода теплоты полной конденсацией

Цикл Ренкина на насыщенном паре



Термический КПД идеального цикла Ренкина η_t меньше, чем КПД цикла Карно в том же интервале температур

Цикл Ренкина на перегретом паре



При равном начальном давлении пара за счет перегрева получается дополнительная работа, которая больше, чем дополнительный отвод теплоты в холодном источнике

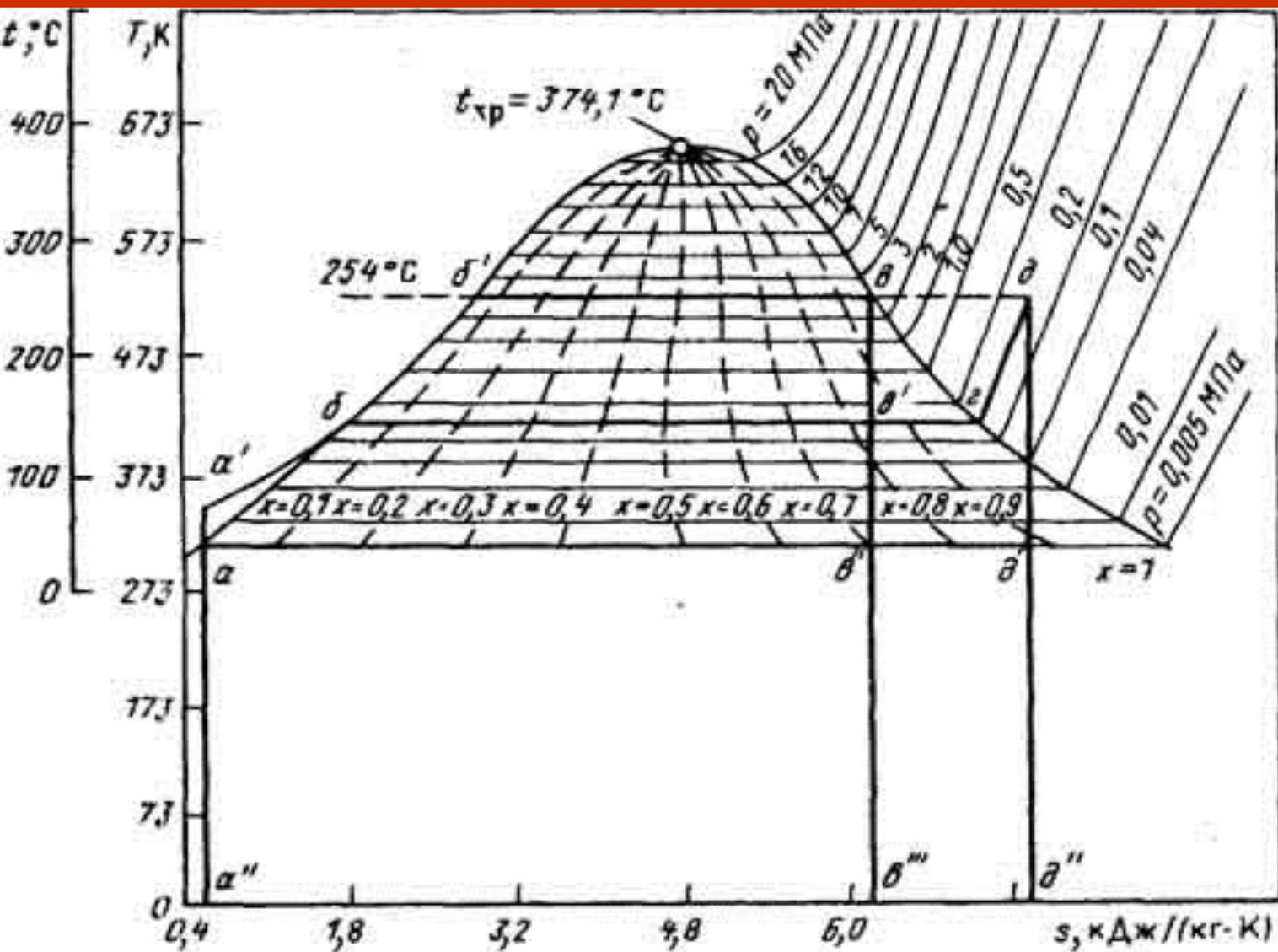
Цикл Ренкина на перегретом паре

Следствия перехода к перегретому пару:

- ❖ термический КПД цикла на перегретом паре выше, чем на насыщенном при одинаковом p_0
- ❖ облегчение конструирования паровой турбины (уменьшение расхода пара)
- ❖ удешевление всего оборудования

Перегрев пара всегда повышает тепловую экономичность, если сопоставлять его работу с насыщенным паром **того же давления.**

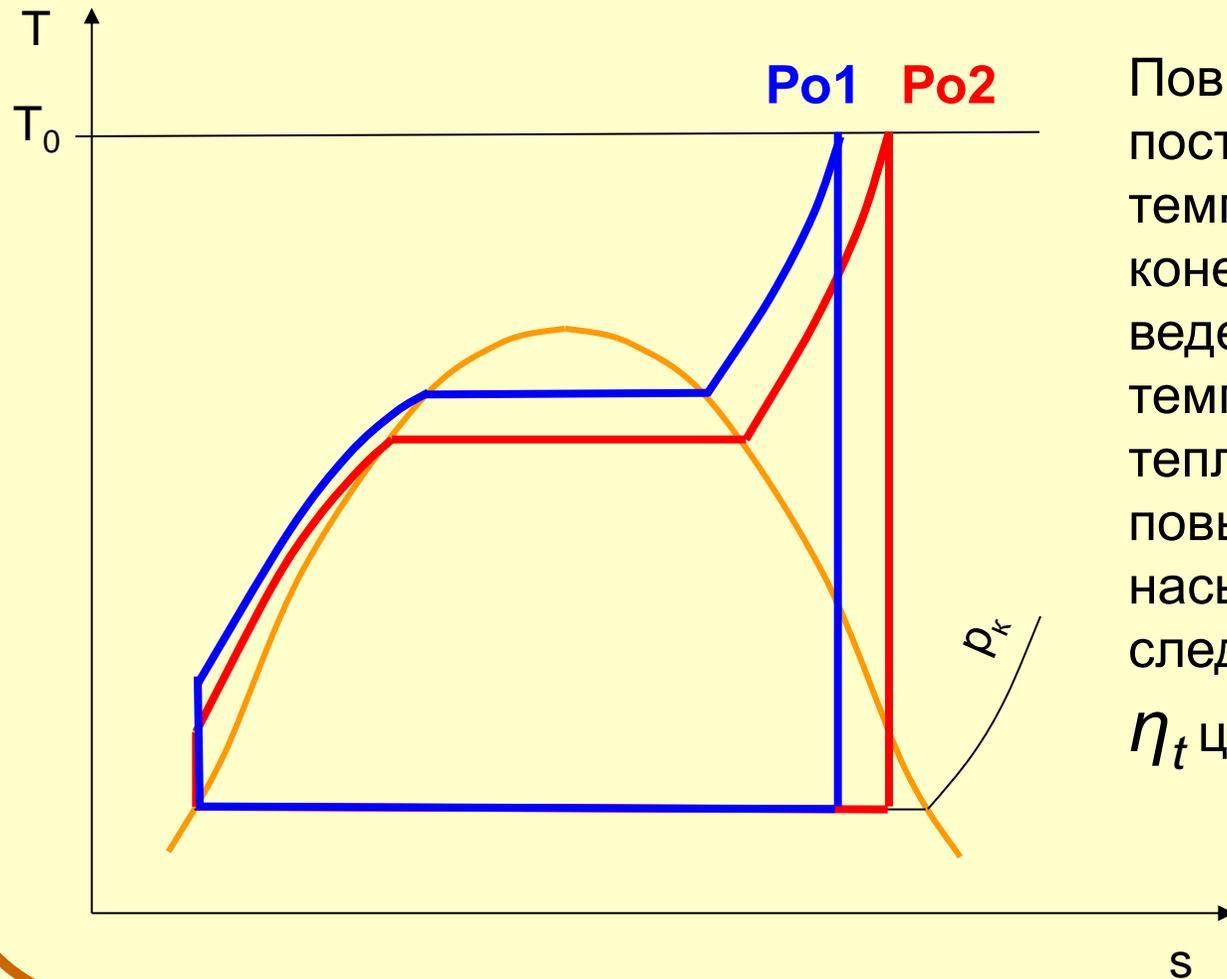
Цикл Ренкина на перегретом паре



При одинаковом значении начальной температуры насыщенный пар оказывается более выгодным

1. ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЦИКЛА ПТУ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

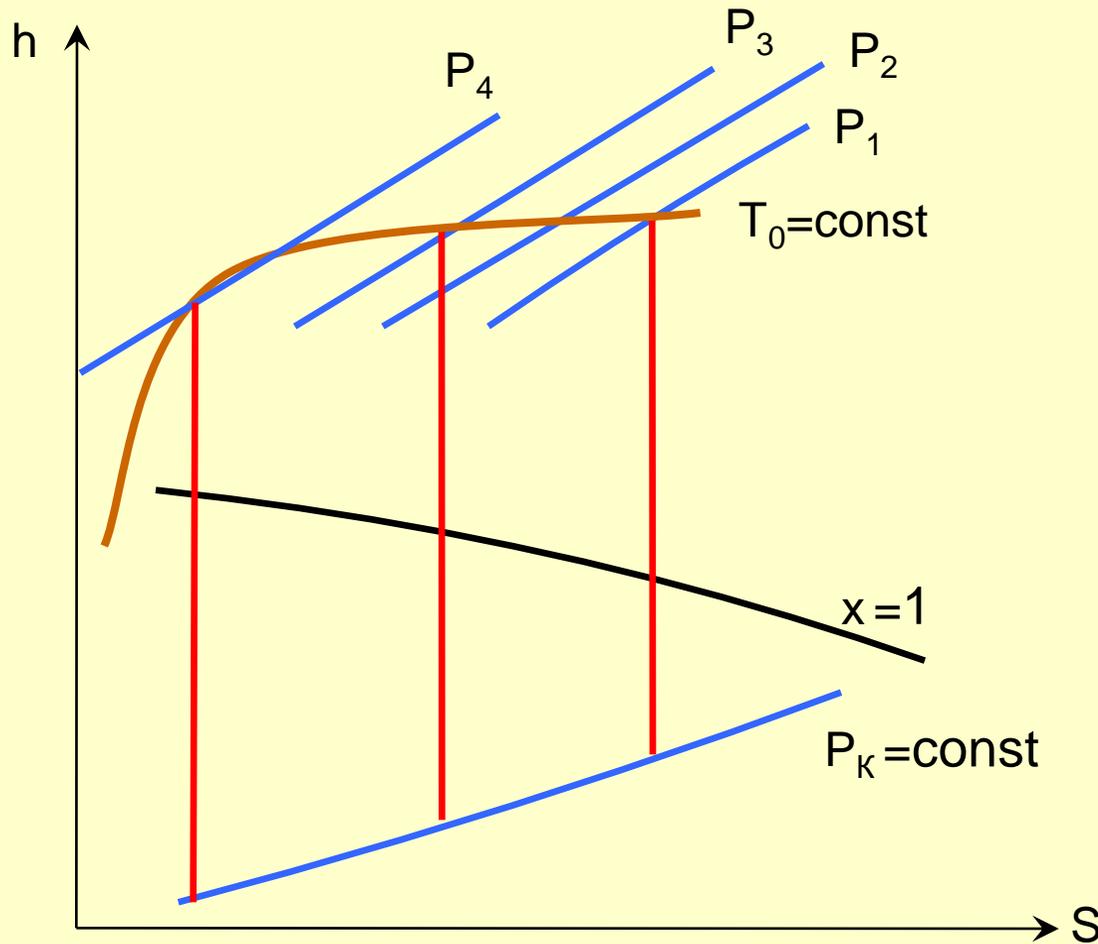
Цикл простейшей идеальной паротурбинной установки



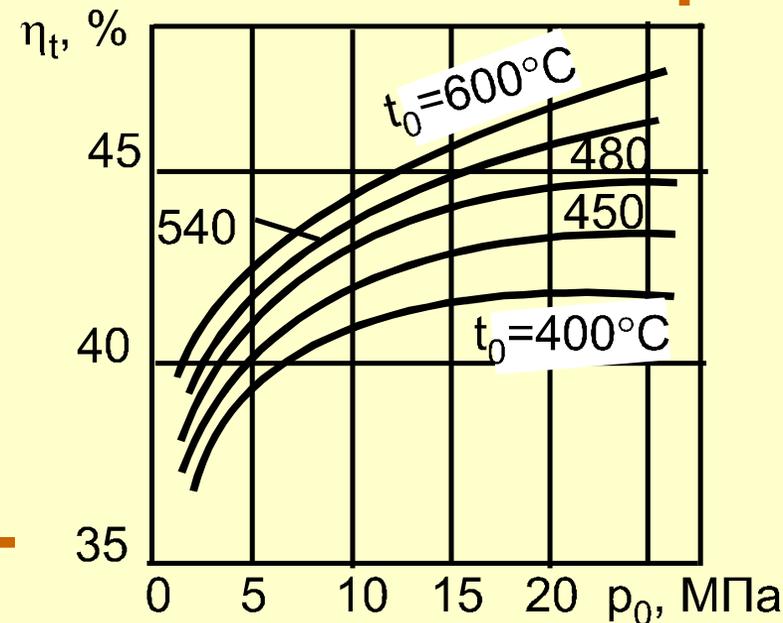
Повышение P_0 при постоянных значениях температуры T_0 и конечного давления P_k ведет к росту средней температуры подвода теплоты за счет повышения температуры насыщения, а следовательно, к росту и η_t цикла Ренкина.

$$\eta_t = 1 - \frac{T_k}{T_{0\text{ЭКВ}}}$$

Процесс расширения пара идеальной паротурбинной установки



$$\eta_t = \frac{h_0 - h_{Kt}}{h_0 - h'_K} = \frac{H_0}{h_0 - h'_K}$$



ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЦИКЛА ПТУ

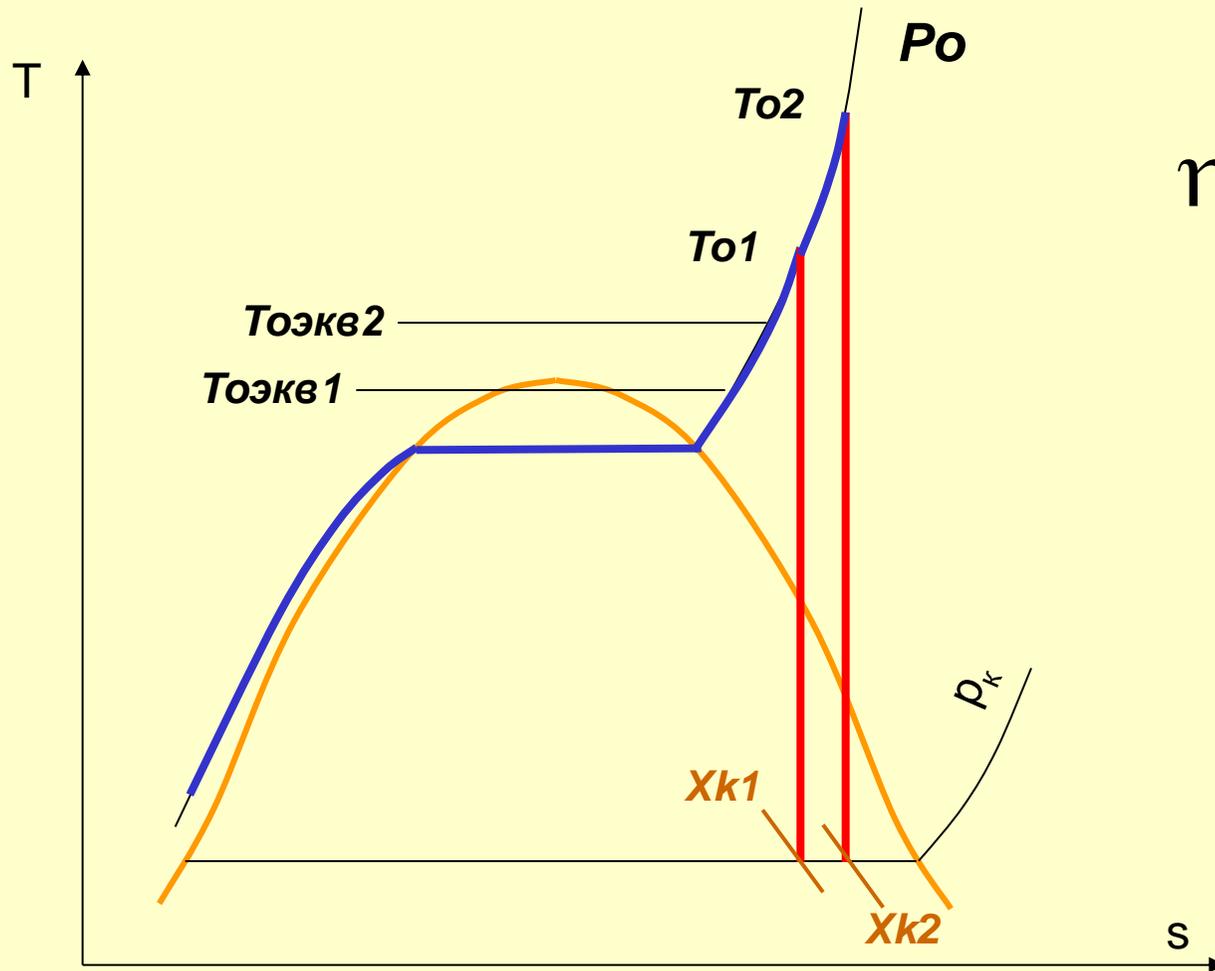
ВЫВОДЫ:

1. С одной стороны повышение начального давления (до некоторой величины) приводит к повышению термического КПД цикла ПТУ.
2. Это же повышение давления обуславливает снижение степени сухости на выходе из проточной части турбины (увеличивает влажность пара). В результате снижается относительный внутренний КПД турбины.
3. Повышение давления увеличивает стоимость оборудования (толщина стенки растет, растут капзатраты, растет расход ЭЭ на привод ПН).

Поэтому вопрос выбора оптимального значения начального давления нужно решать на основе технико-экономических расчетов

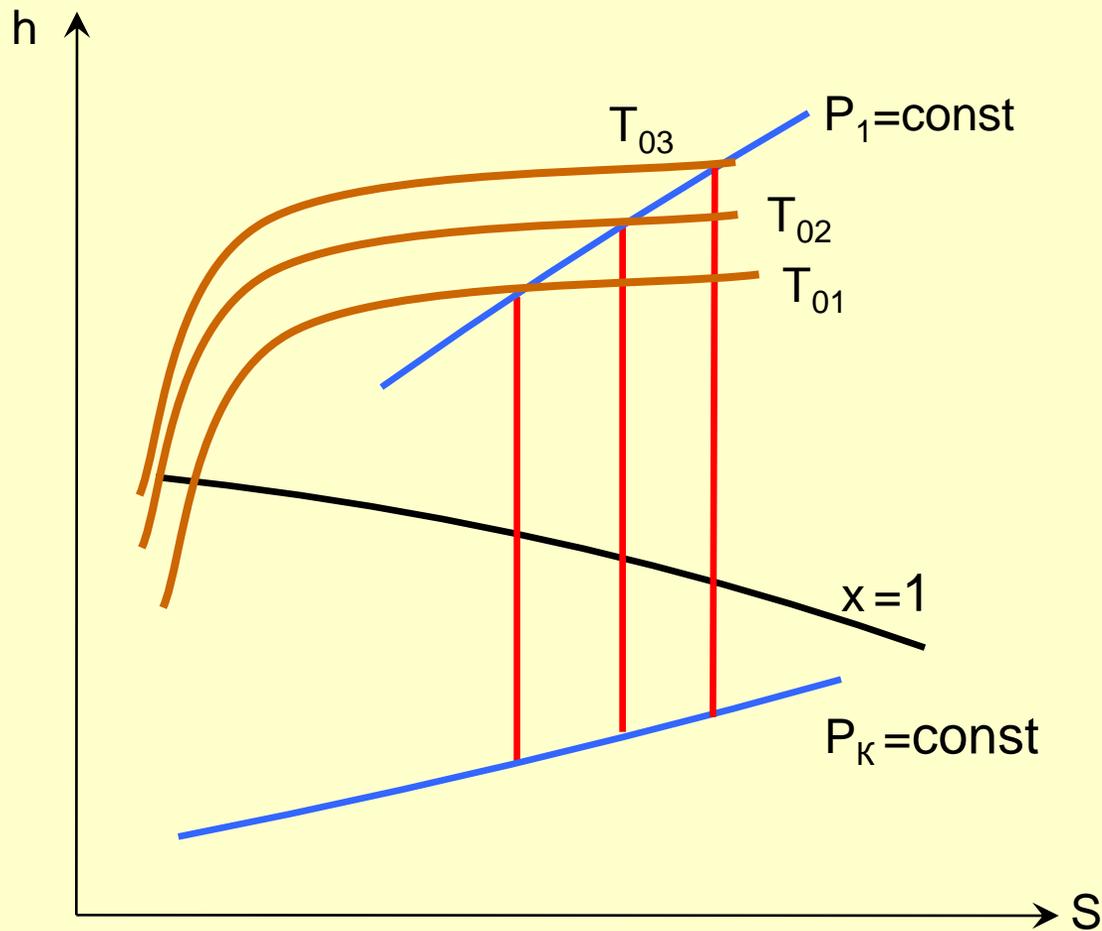
2. ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЦИКЛА ПТУ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

Цикл простейшей идеальной паротурбинной установки

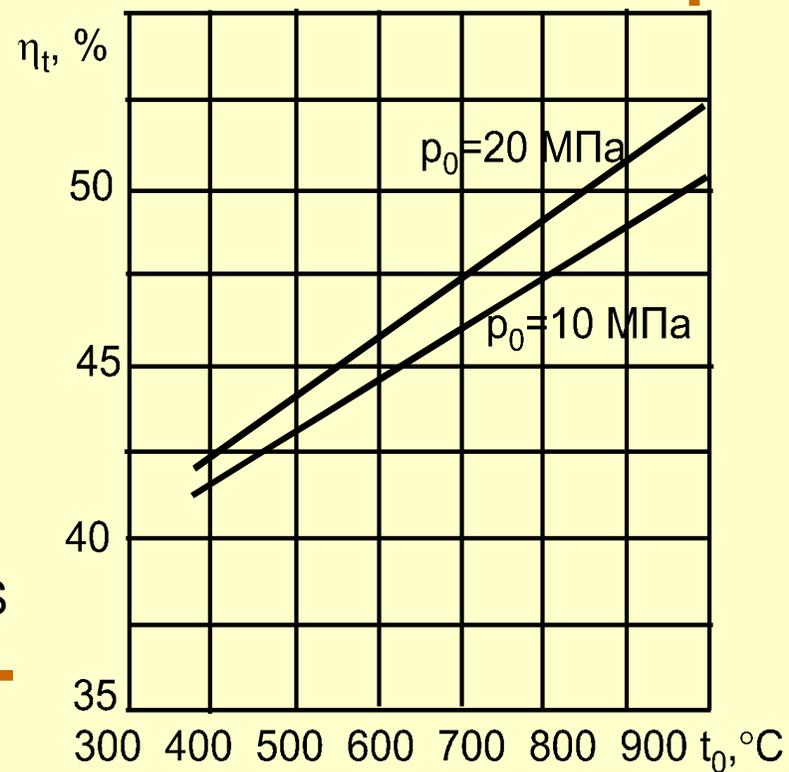


$$\eta_t = 1 - \frac{T_K}{T_{0ЭКВ}}$$

Процесс расширения пара идеальной паротурбинной установки



$$\eta_t = \frac{h_0 - h_{Kt}}{h_0 - h'_K} = \frac{H_0}{h_0 - h'_K}$$



ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЦИКЛА ПТУ

ВЫВОДЫ:

- 1. Повышение T_0 всегда приводит к росту термического КПД, так как возрастает средняя температура подвода теплоты в цикле.**
- 2. Повышение T_0 обуславливает увеличение степени сухости на выходе из проточной части турбины. В результате снижаются потери от влажности и растет относительный внутренний КПД турбины.**
- 3. Повышение T_0 увеличивает стоимость оборудования (растут капитальные затраты в более дорогие материалы).**

Поэтому вопрос выбора оптимального значения начальной температуры нужно решать на основе технико-экономических расчетов

Соотношение в стоимостях сталей

углеродистые стали обыкновенного качества	1
теплоустойчивые легированные стали (перлитного класса)	5
жаропрочные легированные стали (аустенитного класса),	20
сплавы на никелевой основе для работы при 900...1100 °С	100.

3. НАЧАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА НА АЭС

Рост давления в одноконтурном реакторе

Начальные параметры пара на АЭС находятся в прямой зависимости от параметров **теплоносителя** отличающихся для разных типов АЭС

Для водного теплоносителя температура пара перед турбиной ниже критической

Для одноконтурной АЭС теплоноситель реактора - вода и пароводяная смесь

С ростом давления в реакторе одноконтурной АЭС повышаются параметры пара и тепловая экономичность паротурбинной установки (растет термический КПД), но одновременно увеличивается толщина стенок технологических каналов.

Это приводит к ухудшению нейтронно-физических характеристик реактора и может потребовать применения более обогащенного урана.

На основе технико-экономических расчетов и опыта эксплуатации давление теплоносителя **в реакторе одноконтурной АЭС** в настоящее время принимается равным **7 МПа**

Соответственно парообразование в реакторе одноконтурной АЭС происходит при **температуре насыщения воды**, равной **285 °С**
начальные параметры пара перед турбиной составляют **6,5 МПа** и **280 °С**

Рост давления в двухконтурном реакторе

Для двухконтурной АЭС теплоносителем является вода под давлением, которая одновременно служит **и замедлителем**, циркониевые сплавы кассет активной зоны **не испытывают перепада давлений**.

Это позволяет выбрать давление теплоносителя максимально возможным по условиям изготовления мощных корпусов.

При современном состоянии реакторостроения таким давлением является **16 МПа**.

По **условию однофазности** теплоносителя на выходе из реактора ограничивается не только температура теплоносителя на выходе из реактора, но и температура на входе в реактор (на выходе из парогенератора), которая принимается равной 290 °С.

Оптимальный подогрев теплоносителя в реакторе составляет **25 - 40 °C**

Необходимый перепад температур в парогенераторе между теплоносителем и пароводяной смесью составляет **10 – 15 °C**.

Температура парообразования составляет **278 °C**, что отвечает давлению **6,4 МПа**

Начальные параметры пара перед турбиной **6 МПа** и **274 °C**

Начальное давление пара в ПТУ АЭС

Термический КПД для ПТУ на насыщенном паре в зависимости от начального давления

