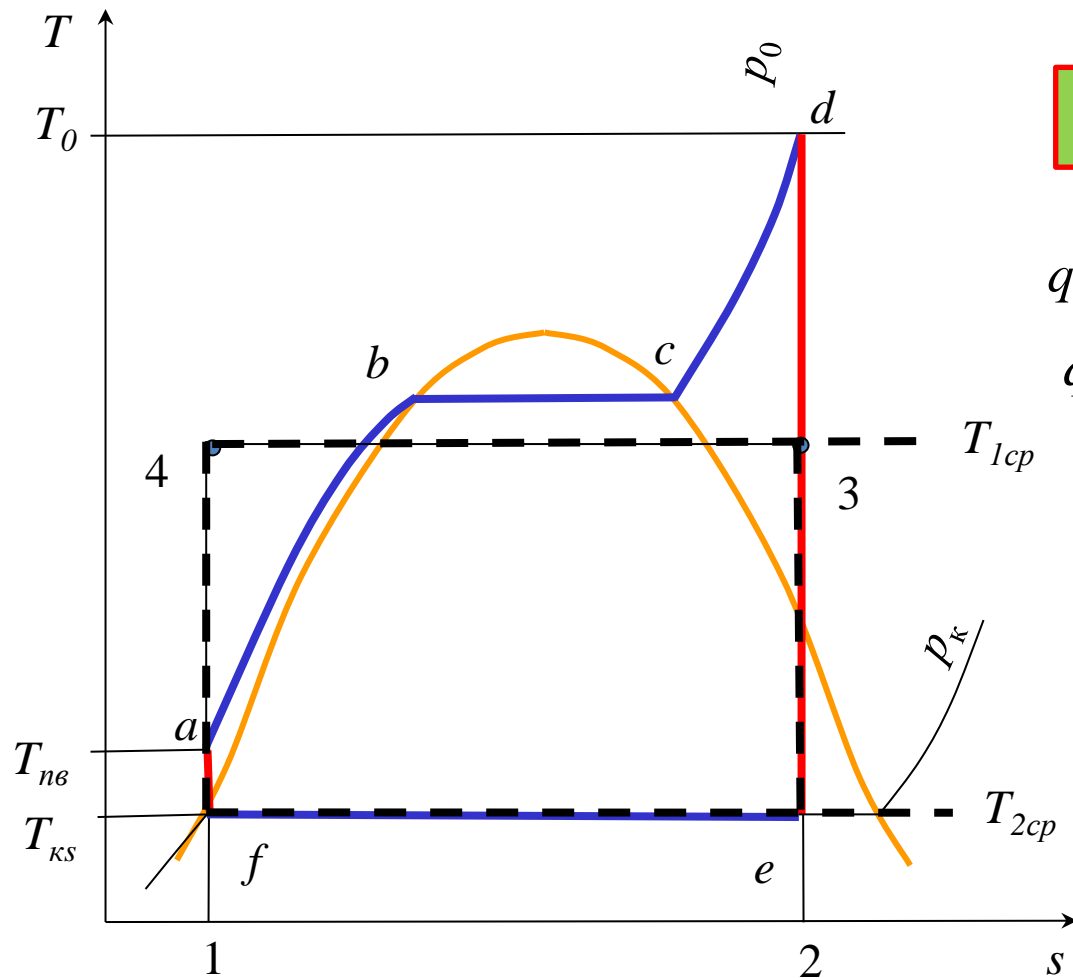


## 2.1. Методы термодинамического анализа циклов



$$\eta_t = 1 - \frac{q_K}{q_{TY}} = 1 - \frac{T_{2cp}}{T_{1cp}}$$

$$q_{TY} = \text{пл. } 1abcd21 = \text{пл. } 12341$$

$$q_{TY} = T_{1cp} (s_2 - s_1) = h_0 - h_{нс}$$

$$T_{1cp} = \frac{h_0 - h_{нс}}{s_2 - s_1}$$

$$q_K = \text{пл. } 1fe21 = T_{2cp} (s_2 - s_1)$$

$$T_{2cp} = \frac{h_{кт} - h'_k}{s_2 - s_1}$$

\*\* КПД цикла не зависит от свойств рабочего вещества и определяется только отношением средних температур отвода и подвода теплоты.

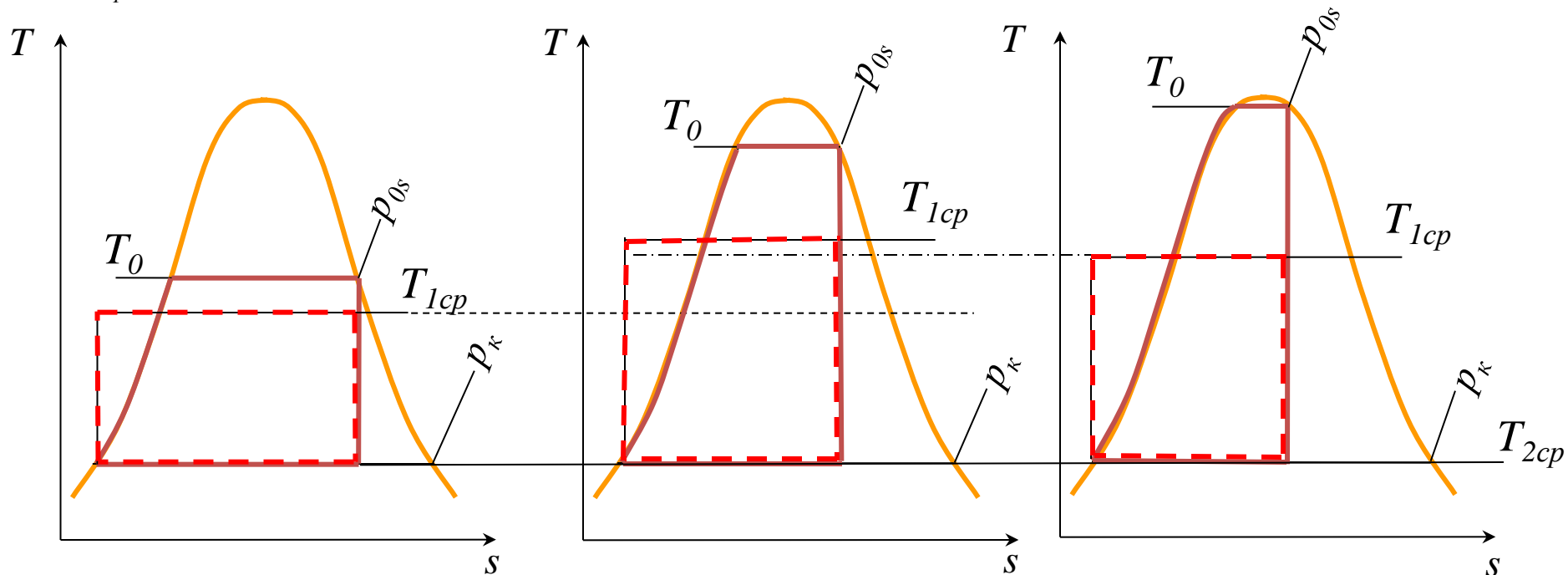
## 2.2. Влияние начальных параметров на КПД ПТУ

### А) КПД идеального цикла

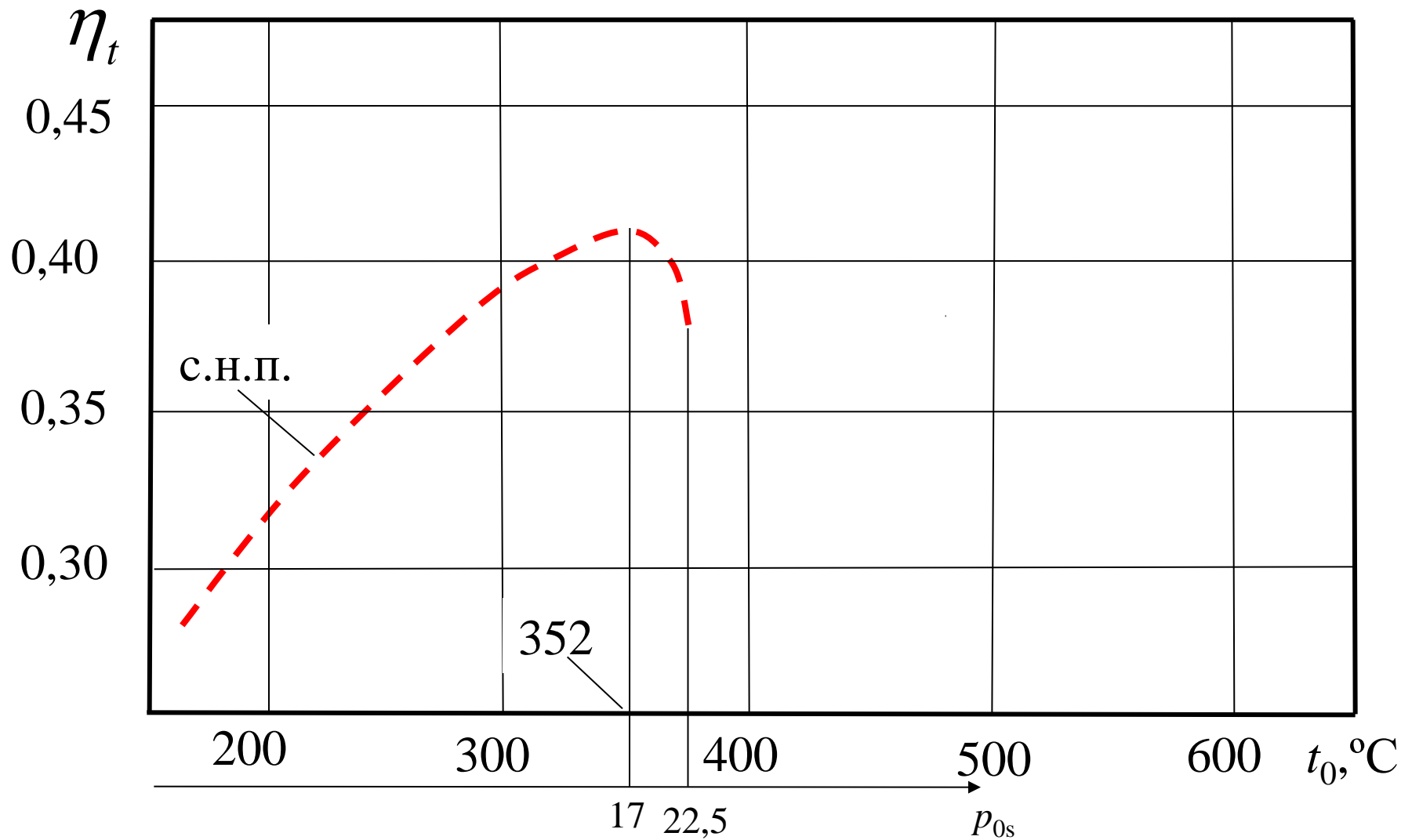
#### ■ цикл сухого насыщенного пара

- докритическое давление:

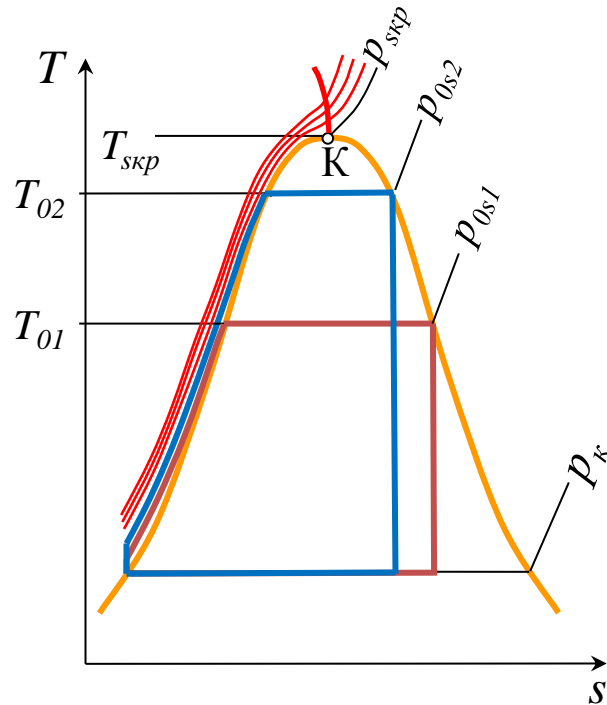
**I**  $t_{0s} = 210^{\circ}\text{C}$  ( $p_{0s} = 1,9\text{МПа}$ )    **II**  $t_{0s} = 350^{\circ}\text{C}$  ( $p_{0s} = 16,5\text{МПа}$ )    **III**  $t_{0s} = 370^{\circ}\text{C}$  ( $p_{0s} = 21,05\text{МПа}$ )  
 $T_{1cp} = 450,9\text{К}$                        $T_{1cp} = 510,0\text{К}$                        $T_{1cp} = 505,4\text{К}$



$\eta_t^I < \eta_t^{II} > \eta_t^{III}$     так как     $T_{1cp}^I < T_{1cp}^{II} > T_{1cp}^{III}$



**- сверхкритическое давление (СКД):**



К:  $t_{кр}=375^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{кр}=22,5\text{МПа}$ .

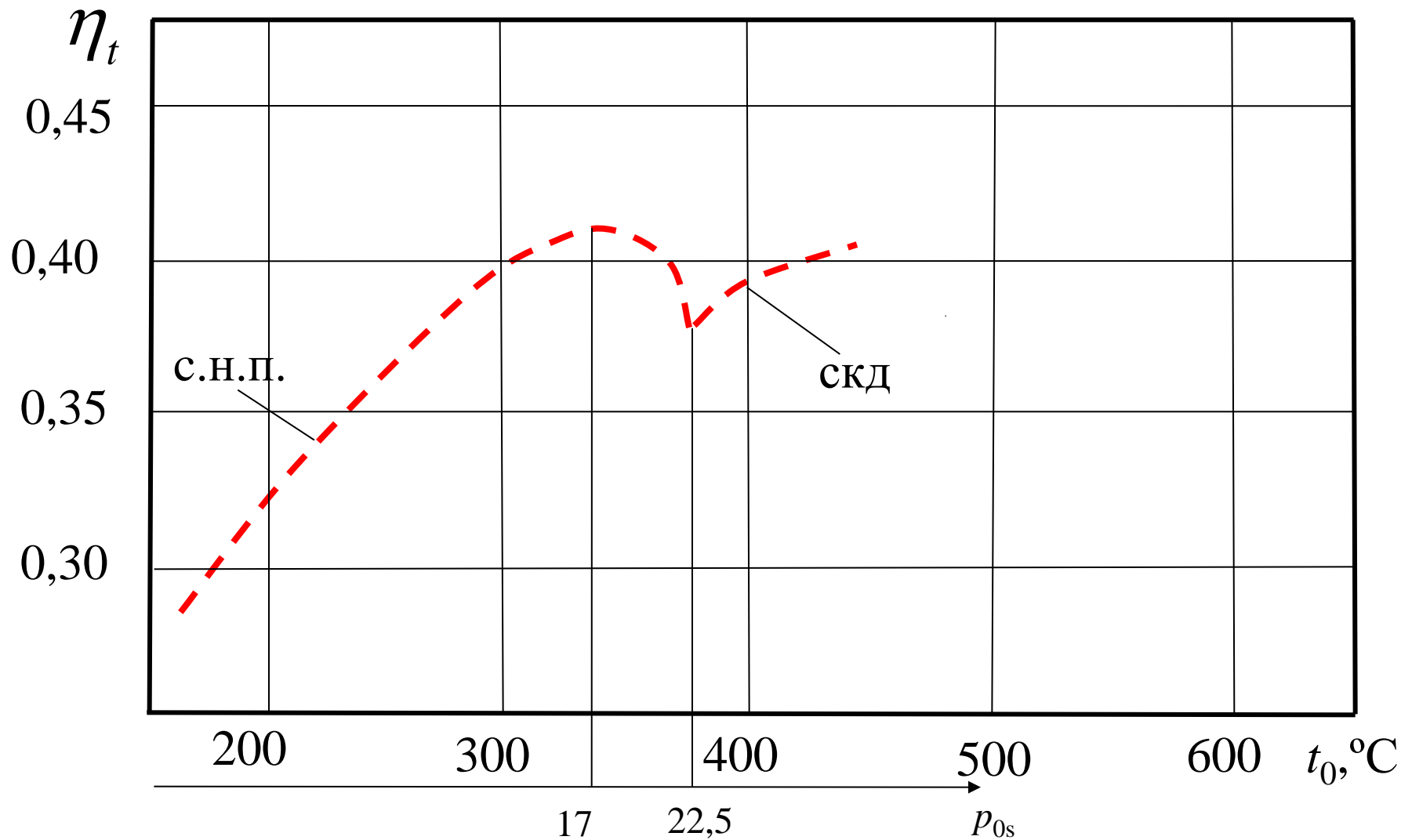
— - изобары при сверхкритических давлениях

При сверхкритических давлениях за точку фазовых переход принимается температура максимума изобарной теплоемкости.

— - линия насыщения при сверхкритических давлениях

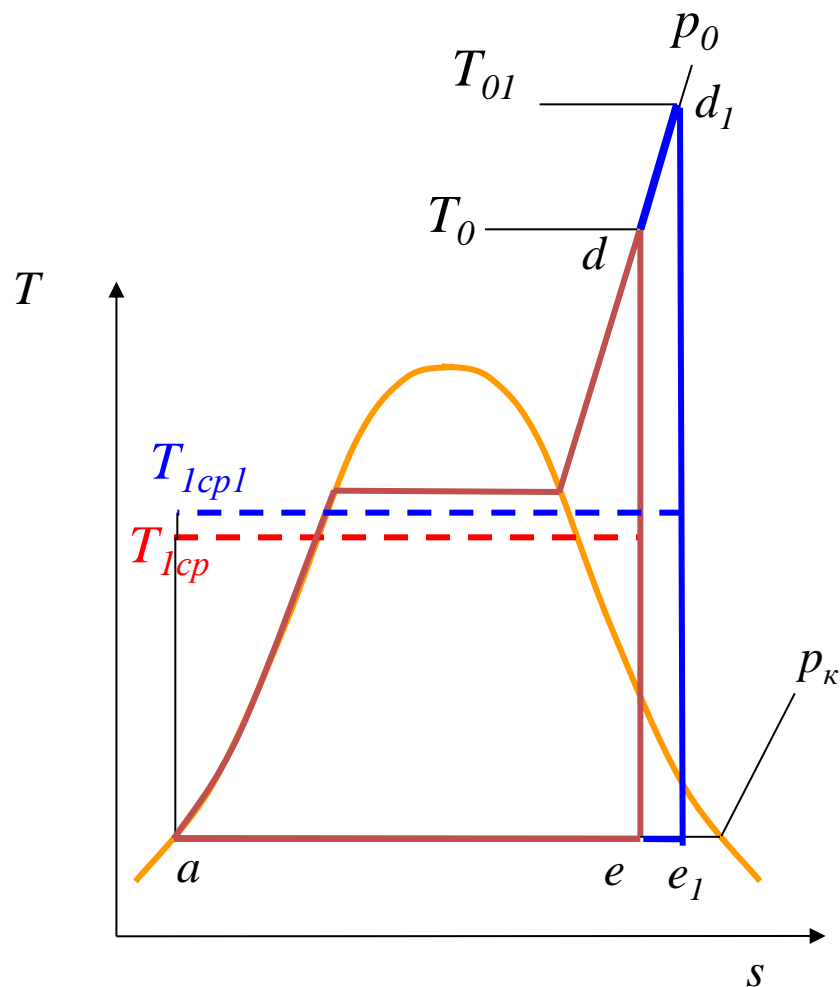
Значения параметров в точках фазового перехода при сверхкритических параметрах

$p_{sf}$ , МПа	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
$t_{sf}$ , К	680	705	730	750	765
$c_p$ кДж/(кг·К)	26,0	13,2	9,6	7,9	6,9

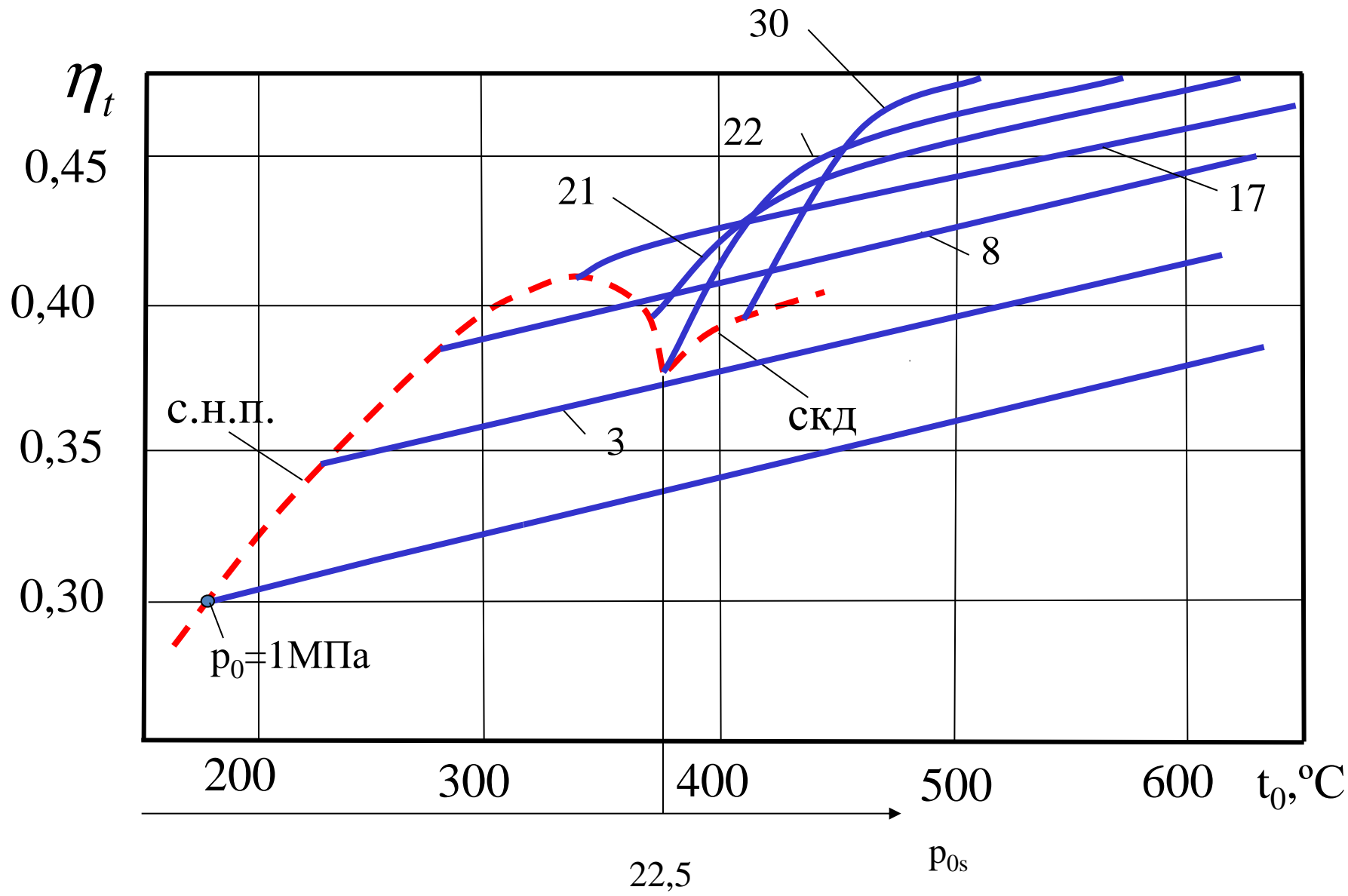


## ■ цикл перегретого пара

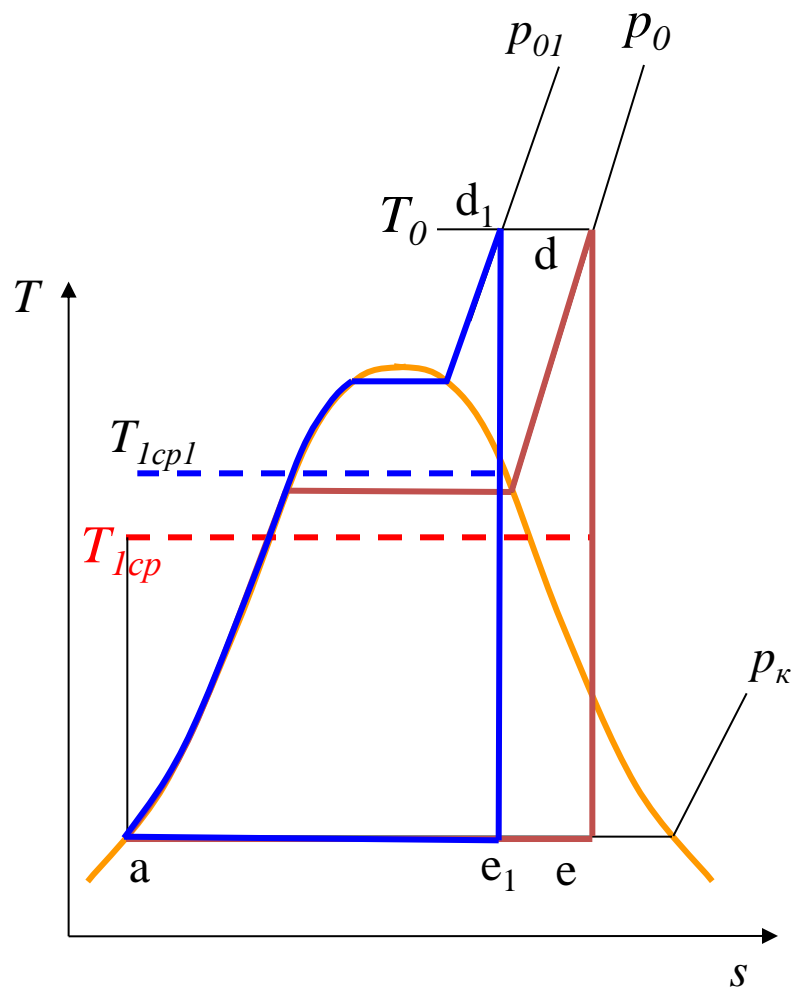
а) влияние начальной температуры (при  $p_0 = const$ )



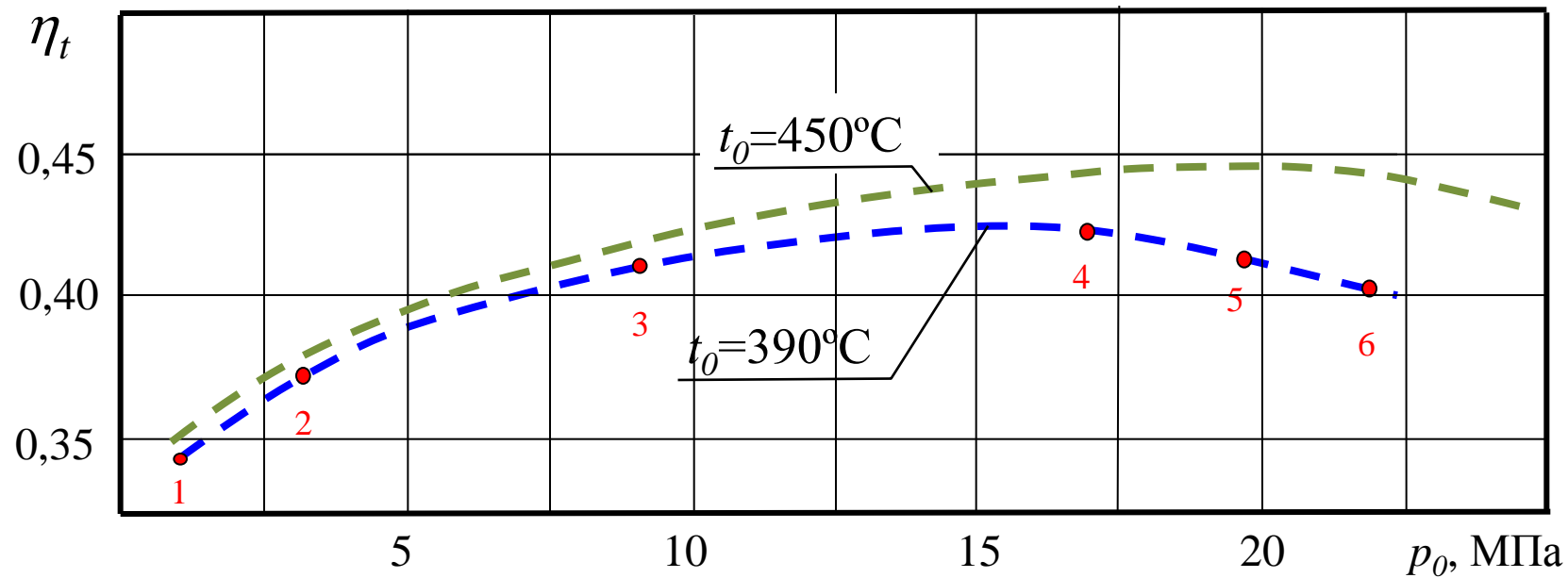
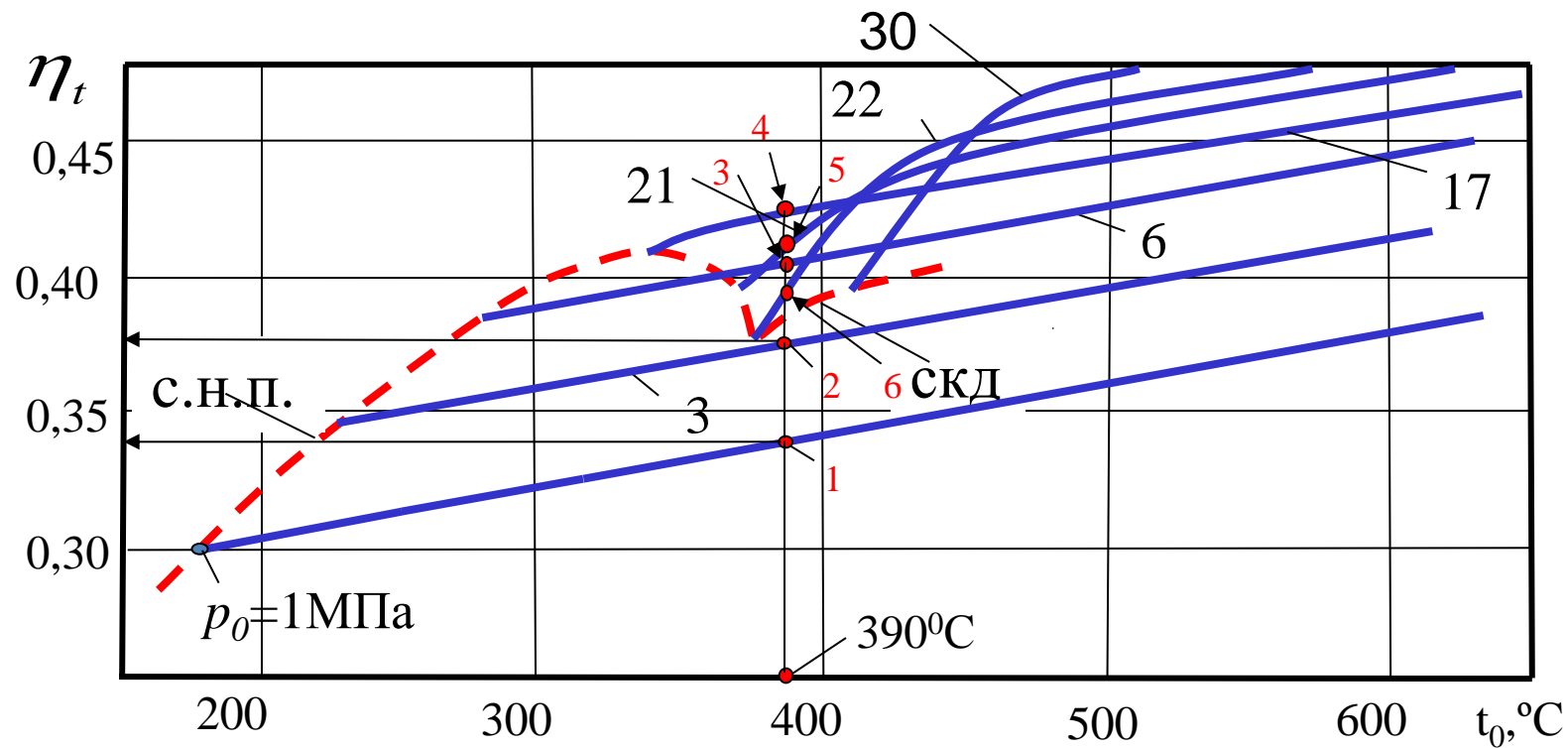
Повышение начальной температуры при постоянном давлении всегда приводит к повышению термического КПД.

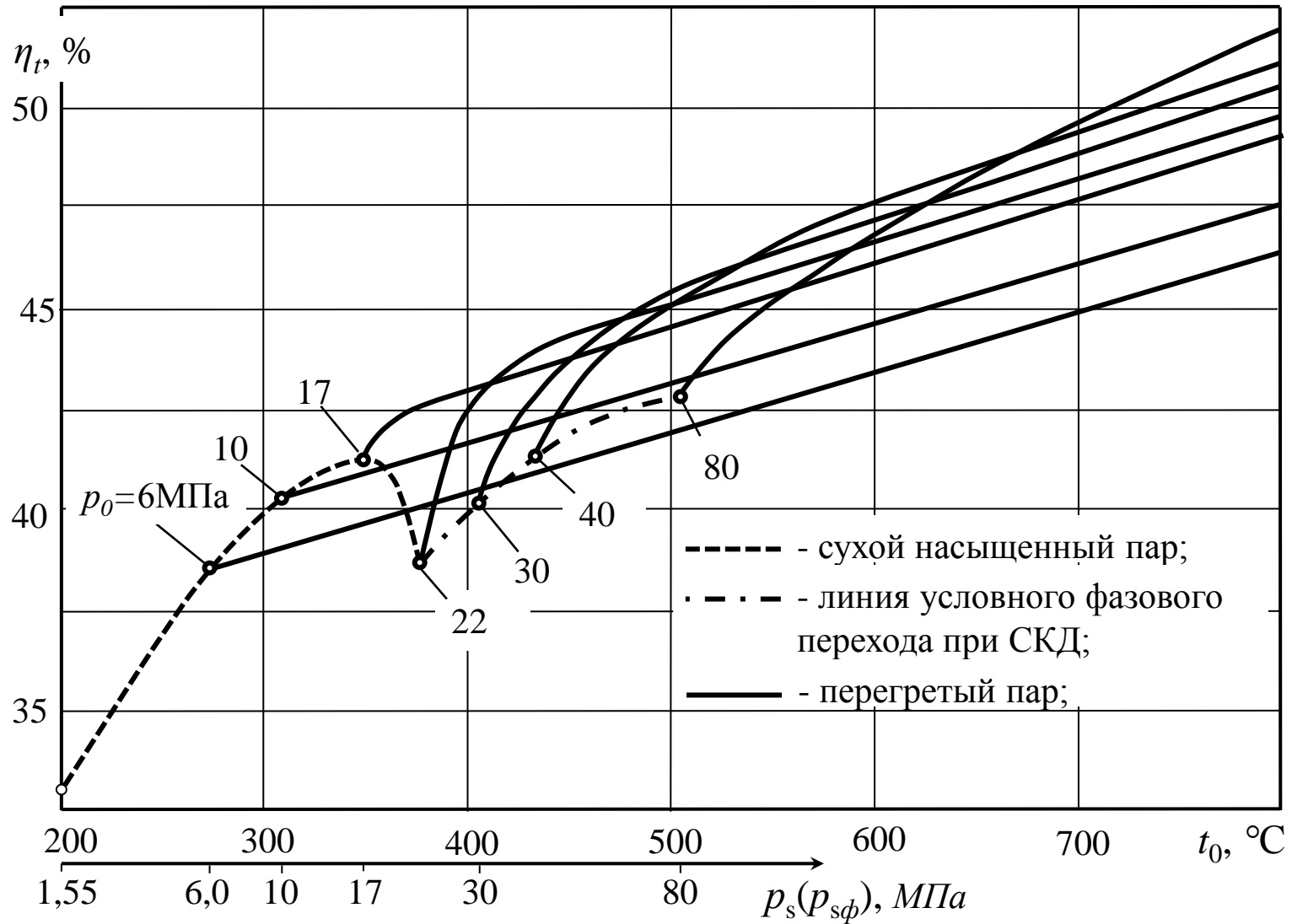


**б) влияние начального давления (при  $t_0 = const$ )**









Зависимость термического КПД ( $\eta_t$ ) от начальной температуры ( $t_0$ ) при различных начальных давлениях ( $p_0$ ).

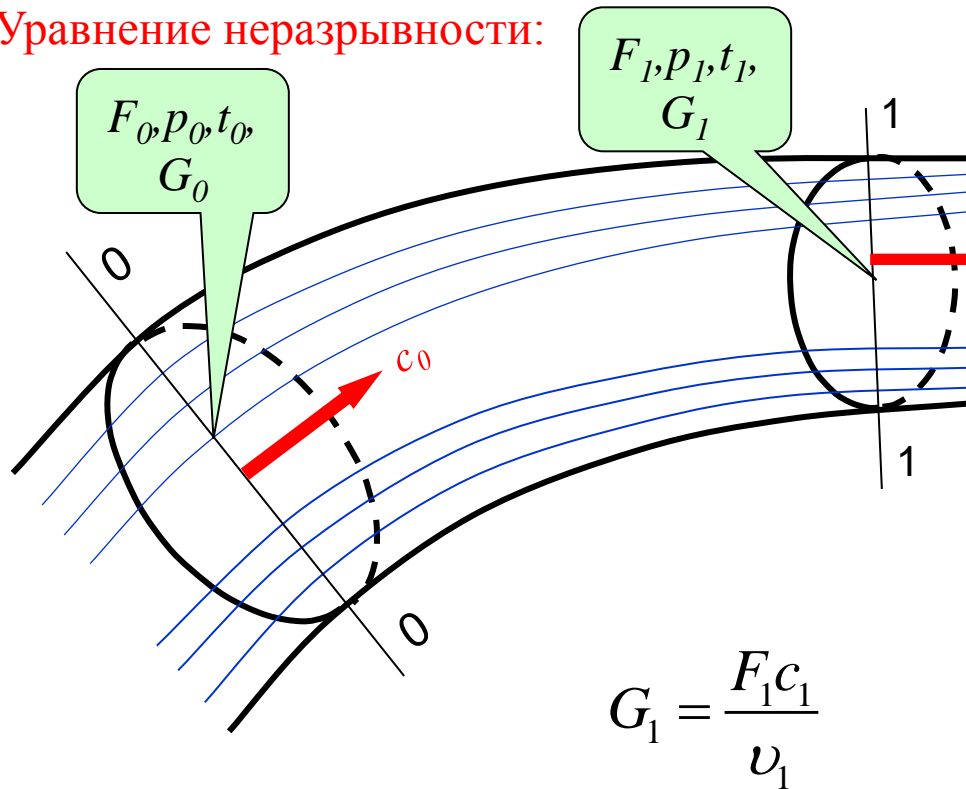
$p_s(p_{s\phi})$  – давление насыщения (при сверхкритических давлениях).

Отступление 3. Взгляд в будущее.

Какие параметры процесса расширения влияют на характеристики турбины?  
(Конструктивные и эффективности).

### 1. Влияние удельного объема на высоты лопаток первых ступеней:

Уравнение неразрывности:



Определим **объемный расход** [м<sup>3</sup>/с], проходящий через сечение 0-0:

$$V_0 = F_0 c_0 = G_0 \nu_0$$

$$\frac{\text{м}^3}{\text{с}} = \text{м}^2 \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{кг} \text{ м}^3}{\text{с} \text{ кг}}$$

$$\nu = f(p_0, t_0)$$

$$G_0 = \frac{F_0 c_0}{\nu_0}$$

$$G_1 = \frac{F_1 c_1}{\nu_1}$$

$$G_0 = G_1 \quad \frac{F_0 c_0}{\nu_0} = \frac{F_1 c_1}{\nu_1}$$

$$G = F \frac{c}{\nu} = \text{const}$$

$$F_1 = \frac{Gv_1}{c_1}$$

Площадь проходного сечения зависит от объемного расхода  $Gv_1$

В турбинной ступени пар проходит по кольцу, образованному рабочими и сопловыми лопатками:  
Например, для сопловых лопаток:

$$F_1 = \pi d_1 l_1 \sin \alpha_1$$

Таким образом: уменьшение удельного объема приведет к снижению высоты лопаток, а это приводит к **уменьшению экономичности ступени. (почему ???)**

## 2. Влияние влажности пара на экономичность ступеней и эрозию лопаток:

В области влажного пара термодинамическое состояние характеризуется степенью сухости (степенью влажности):

$$x = \frac{m_n}{m_n + m_g}, \quad y = \frac{m_g}{m_n + m_g} = 1 - x$$

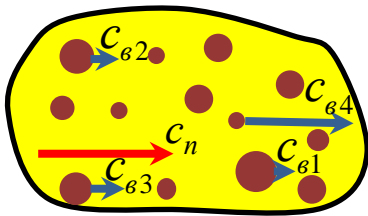
а) **равновесное** состояние (что соответствует равновесной  $hs$  – диаграмме):

**В любой (сколь угодно малой) области среда характеризуется параметром  $x$  ( $y$ )**

Диаграмма водяного пара представляет влажный пар как гомогенную среду.

Влажный пар – гетерогенная среда: состоит из сухого насыщенного пара и частичек жидкости.

б) **реальное** состояние в процессе расширения: Влажный пар – двухфазная среда:



Неравновесное состояние:

$$c_{\epsilon i} \neq c_n; t_{\epsilon} \neq t_n.$$

Неравновесный процесс  $\longrightarrow$  прирост энтропии (необратимость),  
т.е. существует потеря располагаемой энергии.

**Практически:** один процент средней влажности приводит к снижению внутреннего относительного КПД на один процент

Рассогласование скоростей и, соответственно, направлений движения пара и частиц жидкости приводит к тому, что частицы жидкости ударяют о кромки лопаток и вызывают **эрозию** входных кромок рабочих лопаток.

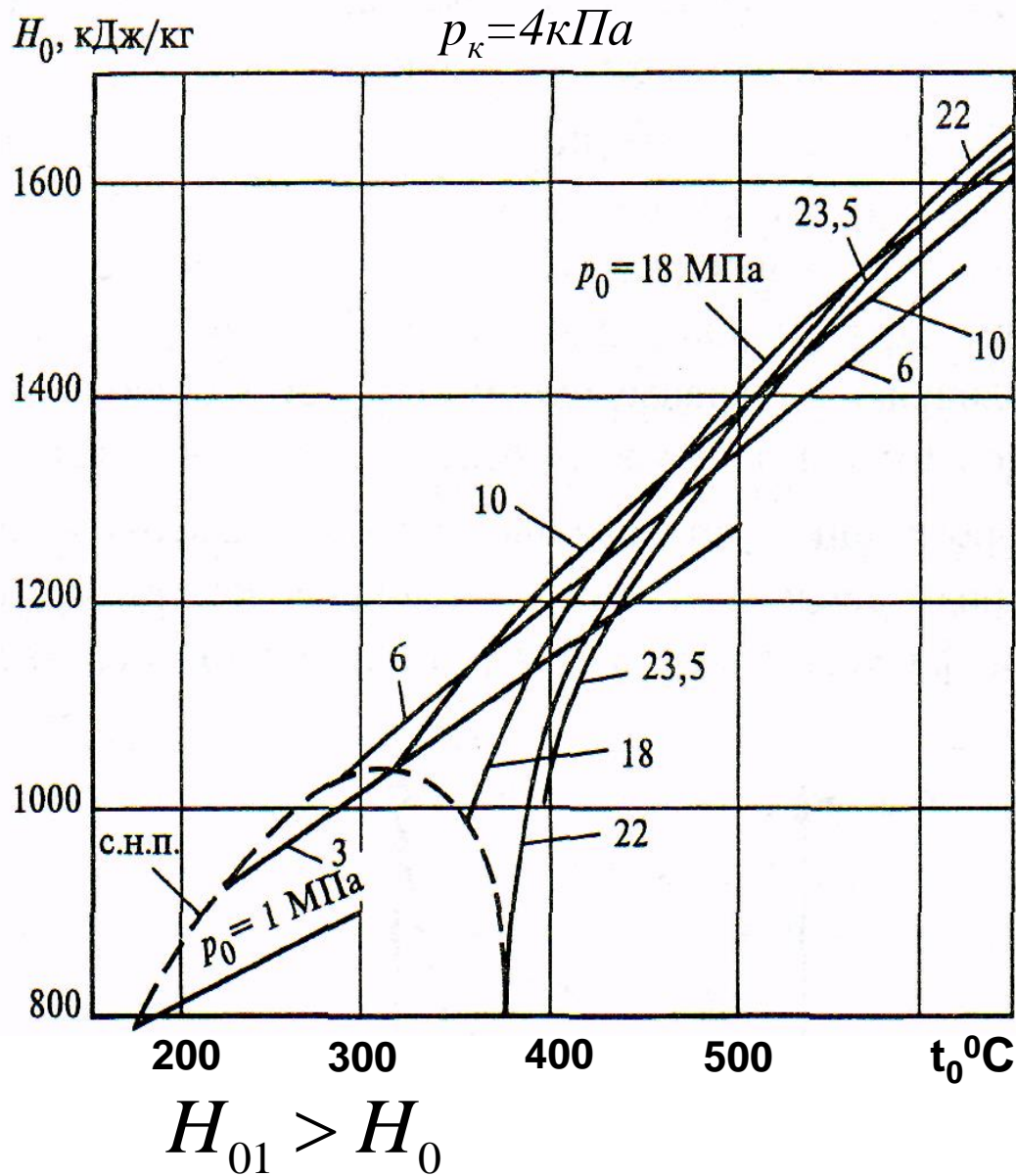
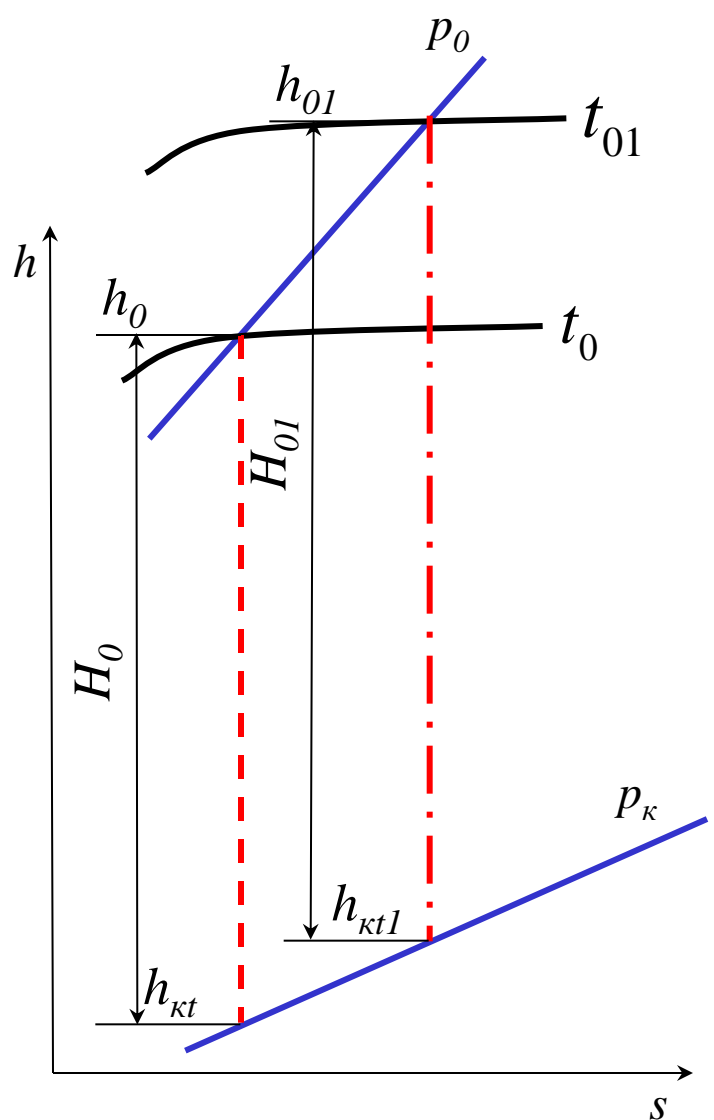
Эрозия – механическое разрушение поверхности.

**Допустимая влажность:**  $y_{don} = 0,15 \div 0,16$   $(x_{don} = 0,85 \div 0,86)$

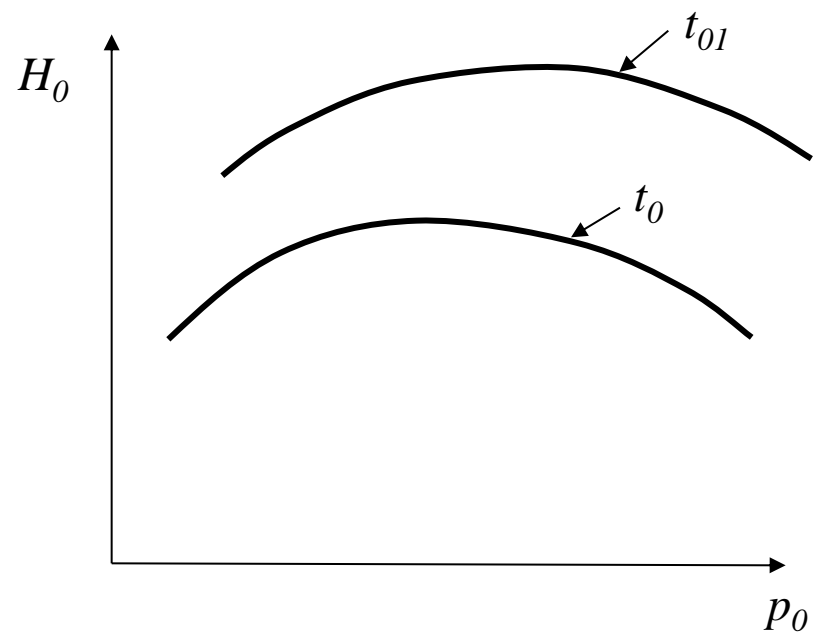
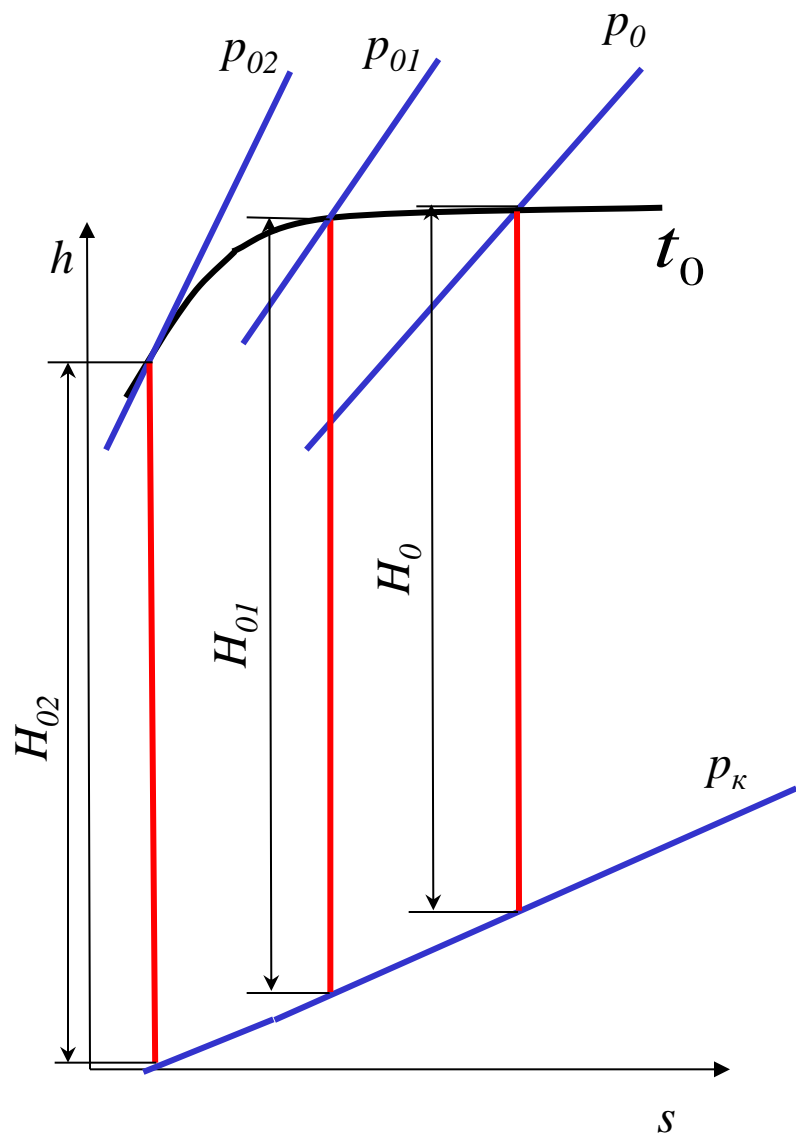
# Б) Влияние начальных параметров на располагаемый теплоперепад турбины

$$H_0 = h_0 - h_{kt}$$

## влияние начальной температуры

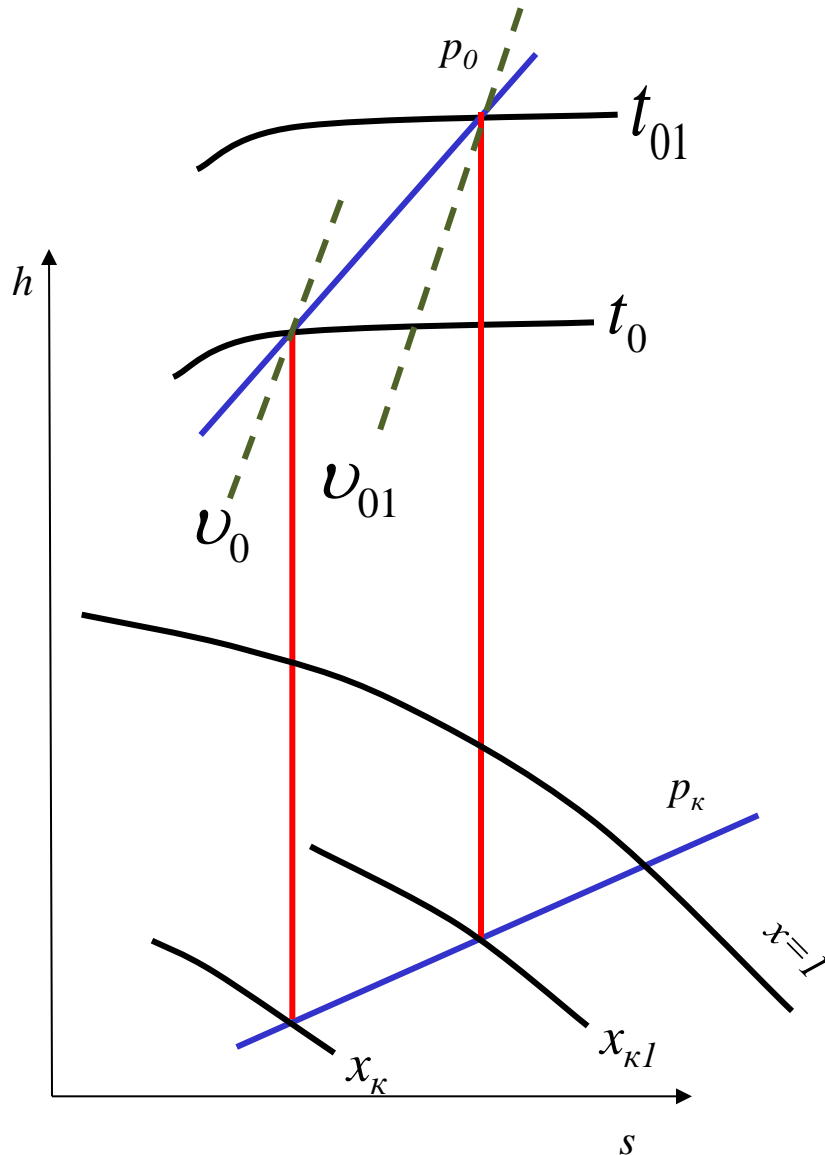


■ влияние начального давления



## Б) Влияние начальных параметров на начальный удельный объем и конечную степень сухости

### ■ влияние начальной температуры



$$t_0 \uparrow \Rightarrow v_0 \uparrow$$

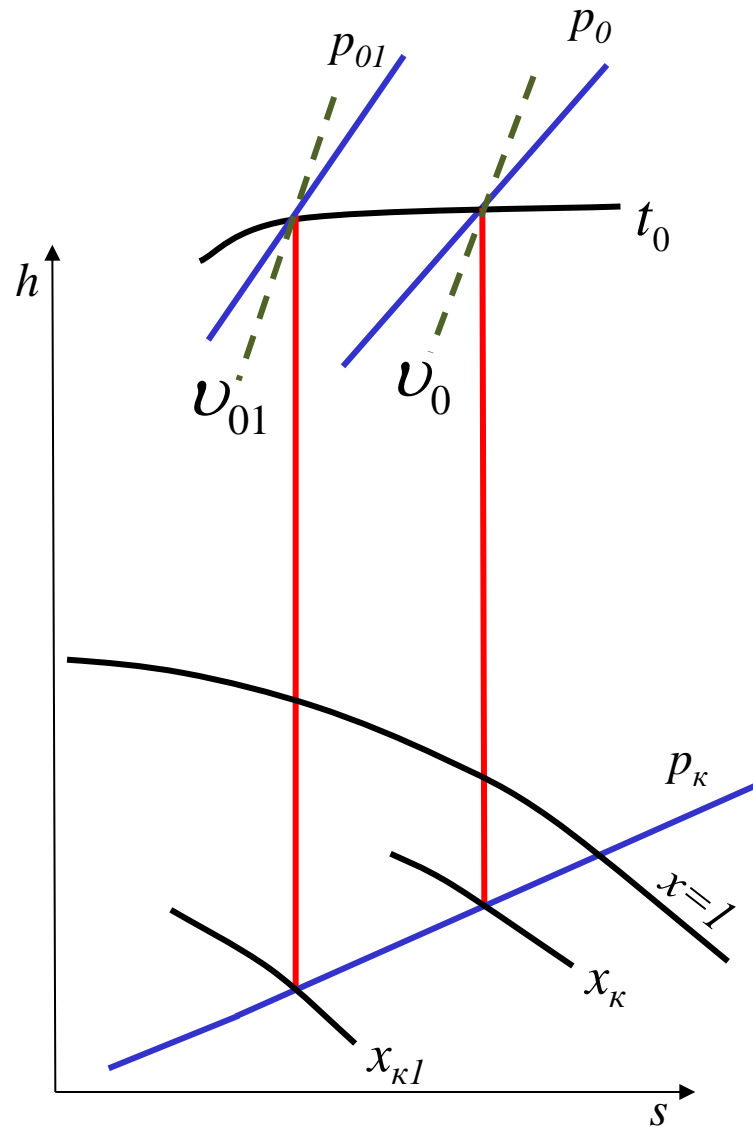
$$t_0 \uparrow \Rightarrow x_k \uparrow \quad (y_k \downarrow)$$

$$y = 1 - x$$

$$x = \frac{m_{II}}{m_{II} + m_B}$$



■ влияние начального давления



$$p_0 \uparrow \Rightarrow v_0 \downarrow$$

$$p_0 \uparrow \Rightarrow x_K \uparrow$$

## 1.2.2. Влияние начальных параметров на КПД паротурбинной установки (ВЫВОДЫ)

А. Повышение начальной температуры:

- приводит к росту  $\eta_t$
- положительно влияет на  $\eta_{oi}$   
(т.к.: -увеличивается удельный объем пара в начале процесса расширения и, следовательно, возрастает высота лопаток первых ступеней турбины;
- уменьшается конечная степень влажности и, следовательно, уменьшаются потери от влажности в последних ступенях турбины.)

+

**Однако:** Существует ограничение начальной температуры по тепломеханическим свойствам современных материалов и их стоимости.

А. Повышение начального давления:

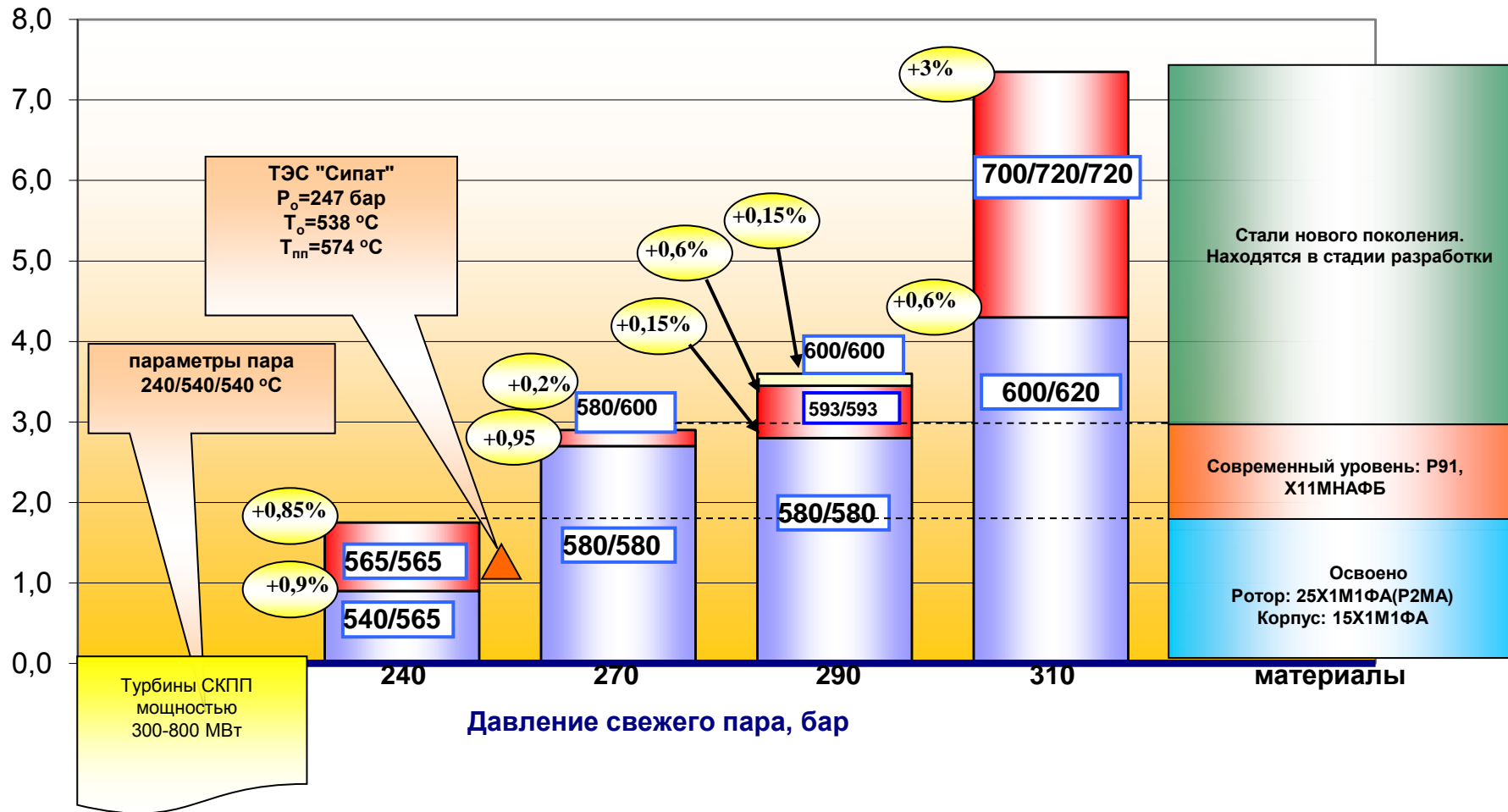
- имеет максимальное значение  $\eta_t$
- отрицательно влияет на  $\eta_{oi}$   
(т.к.: -уменьшается удельный объем пара в начале процесса расширения и, следовательно, уменьшается высота лопаток первых ступеней турбины;
- увеличивается конечная степень влажности и, следовательно, увеличиваются потери от влажности в последних ступенях турбины.)

+ ?

**С учетом современных состояний и способов компенсации негативного влияния, а именно:**

- современная энергетика при возможных начальных температурах еще очень далека от начальных давлений обеспечивающих максимум  $\eta_t$ ;
- отрицательное влияние уменьшения начального объема можно скомпенсировать совместным увеличением  $p_0$  и  $t_0$ , а также увеличением мощности турбины, соответственно, увеличением расхода пара на турбину и объемного пропуская;
- отрицательное влияние увеличения конечной влажности можно исключить применением **промежуточного перегрева пара**

Относительное повышение КПД блока, %

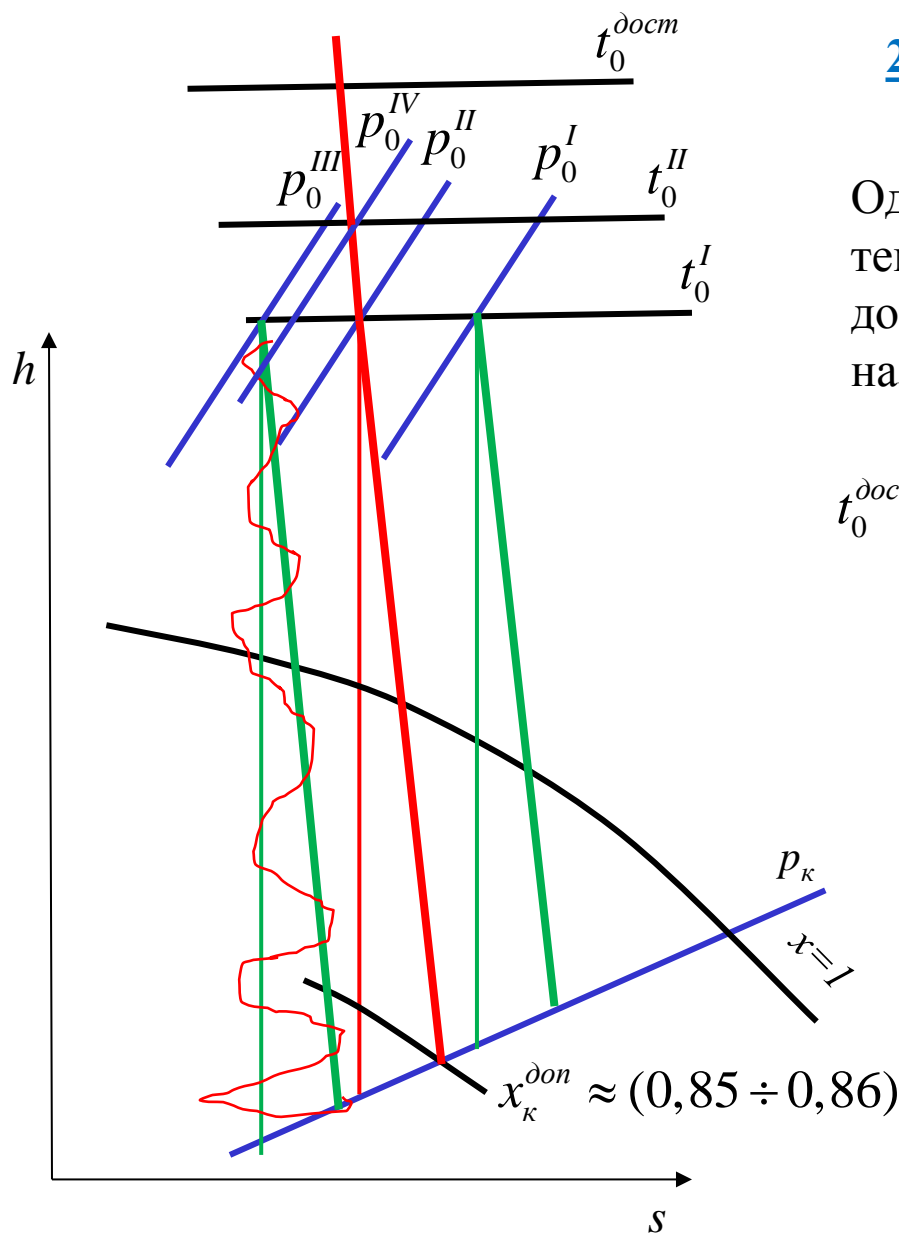


## 2.3. Влияние промежуточного перегрева пара на КПД ПТУ

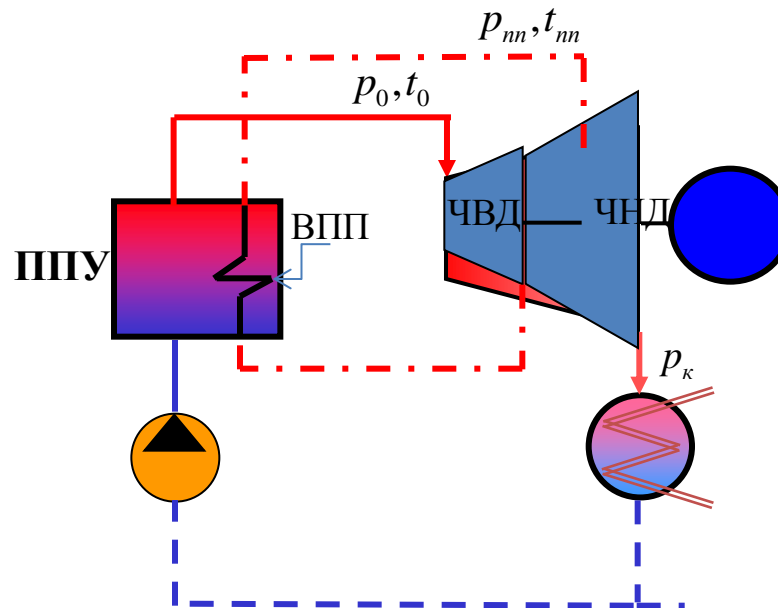
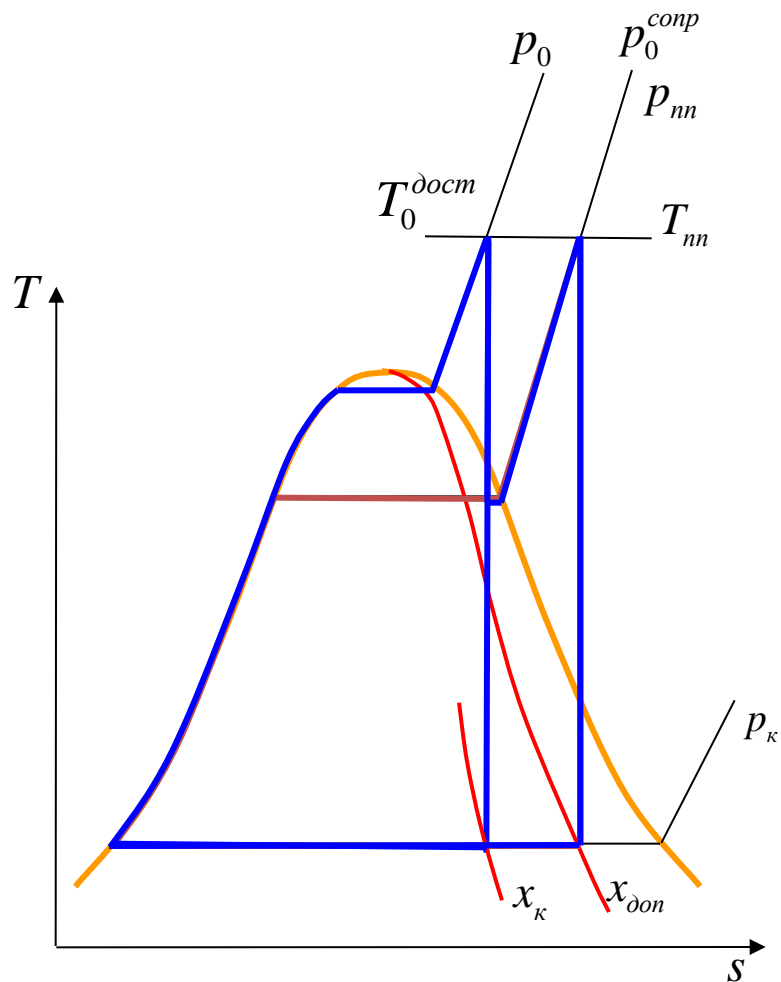
### 2.3.1. Сопряженные параметры пара

Одновременные значения начальной температуры и давления, отвечающих допустимой конечной степени сухости, называются **сопряженными параметрами**.

$t_0^{\text{дост}}$  - начальная температура достижимая на данном этапе развития науки и техники по техническим и экономическим соображениям:



## 2.3.2. Схема и цикл ПТУ с промежуточным перегревом пара



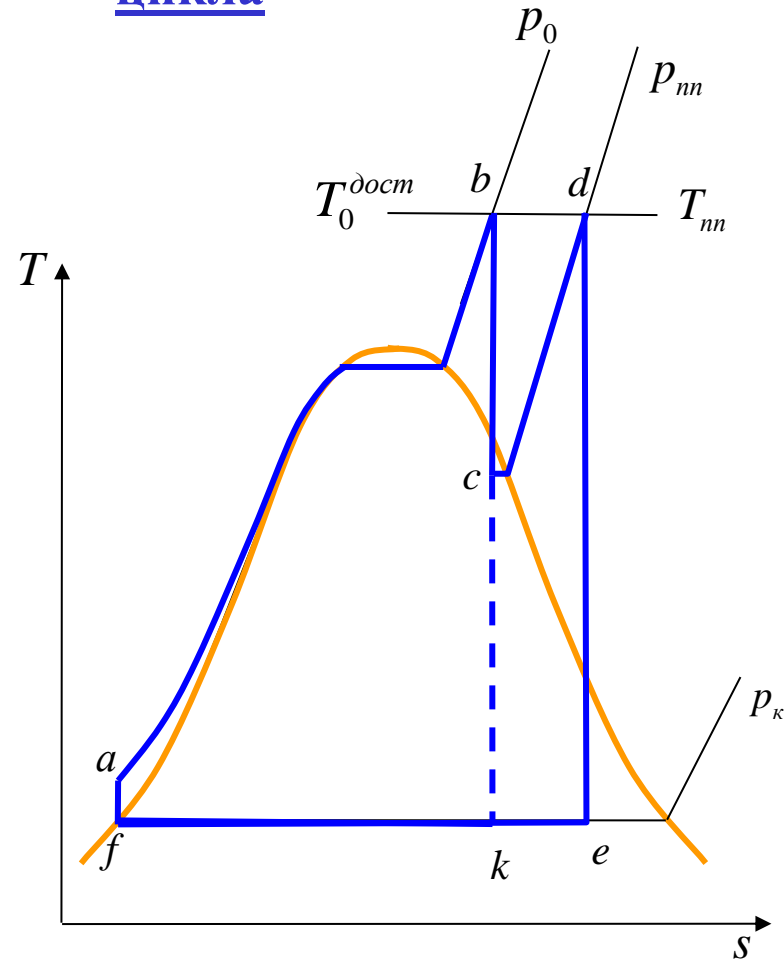
$$t_{nn}^{opt} \approx t_0$$

$$p_{nn}^{opt} = (0,15 \div 0,25) p_0$$

$$\Delta \eta_t = \frac{\eta_t^{cIII} - \eta_t^{безIII}}{\eta_t^{безIII}} = 0,04 \div 0,06$$

Приведенная схема соответствует так называемому **огневому** промежуточному перегреву пара.

## 2.3.3. Влияние промежуточного перегрева пара на экономичность цикла



Основной цикл  $abkfa - o$ .

Дополнительный цикл  $cdekcs - \Delta$ .

$$\eta_t^{cIII} = \frac{l_u}{q_{TY}}$$

$$l_u = l_o + l_{\Delta}$$

$$q_{TY} = q_o + q_{\Delta}$$

$l_u$  – процесс  $bc+de-af$

$q_{TY}$  – процесс  $ab+cd$

$l_o$  – процесс  $bk-af$

$q_o$  – процесс  $ab$

$l_{\Delta}$  – процесс  $de-ck$

$q_{\Delta}$  – процесс  $cd$

$$\eta_t^{cIII} = \frac{l_o + l_{\Delta}}{q_o + q_{\Delta}} = \frac{l_o}{q_o} \frac{1 + \frac{l_{\Delta}}{l_o}}{1 + \frac{q_{\Delta}}{q_o}}$$

$$\frac{l_o}{q_o} = \eta_o \quad - \text{КПД основного цикла};$$

$$\frac{l_{\Delta}}{l_o} = A_{\Delta} \quad - \text{энергетический коэффициент дополнительного цикла};$$

$$\frac{q_{\Delta}}{q_o} = \frac{q_{\Delta} l_o l_{\Delta}}{q_o l_o l_{\Delta}} = A_{\Delta} \frac{\eta_o}{\eta_{\Delta}}$$

$$\eta_t^{cIII} = \eta_o \frac{1 + A_{\Delta}}{1 + A_{\Delta} \frac{\eta_o}{\eta_{\Delta}}}$$

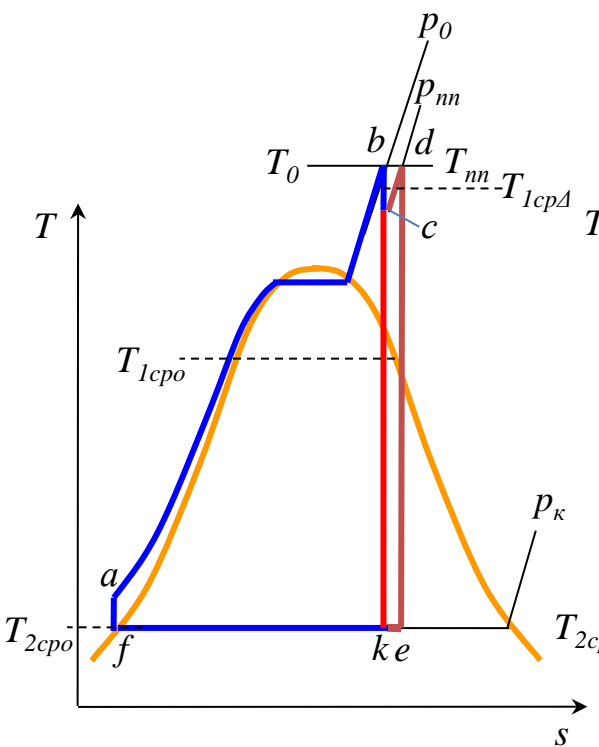
$$\eta_t^{cIII} = \eta_o \frac{1 + A_3}{1 + A_3 \frac{\eta_o}{\eta_\Delta}}$$

$$\delta\eta = \frac{\eta_t^{cIII} - \eta_t^{\text{безIII}}}{\eta_t^{\text{безIII}}} = \frac{\eta_t^{cIII} - \eta_o}{\eta_o} = \frac{1 + A_3}{1 + A_3 \frac{\eta_o}{\eta_\Delta}} - 1 = \frac{A_3 - A_3 \frac{\eta_o}{\eta_\Delta}}{1 + A_3 \frac{\eta_o}{\eta_\Delta}}$$

$$\delta\eta = \frac{1 - \frac{\eta_o}{\eta_\Delta}}{\frac{1}{A_3} + \frac{\eta_o}{\eta_\Delta}}$$

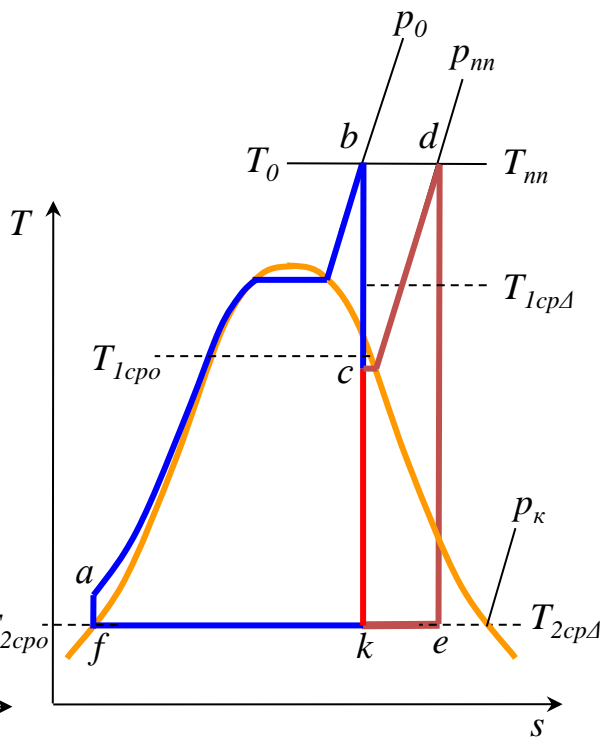
Числитель определяет знак величины  $\delta\eta$ .

- Если:
- A.  $\eta_\Delta > \eta_o$  ( $\frac{\eta_o}{\eta_\Delta} < 1$ , числитель положительный)  $\delta\eta > 0$
  - B.  $\eta_\Delta < \eta_o$  ( $\frac{\eta_o}{\eta_\Delta} > 1$ , числитель отрицательный)  $\delta\eta < 0$
  - C.  $\eta_\Delta = \eta_o$  ( $\frac{\eta_o}{\eta_\Delta} = 1$ , числитель равен нулю)  $\delta\eta = 0$



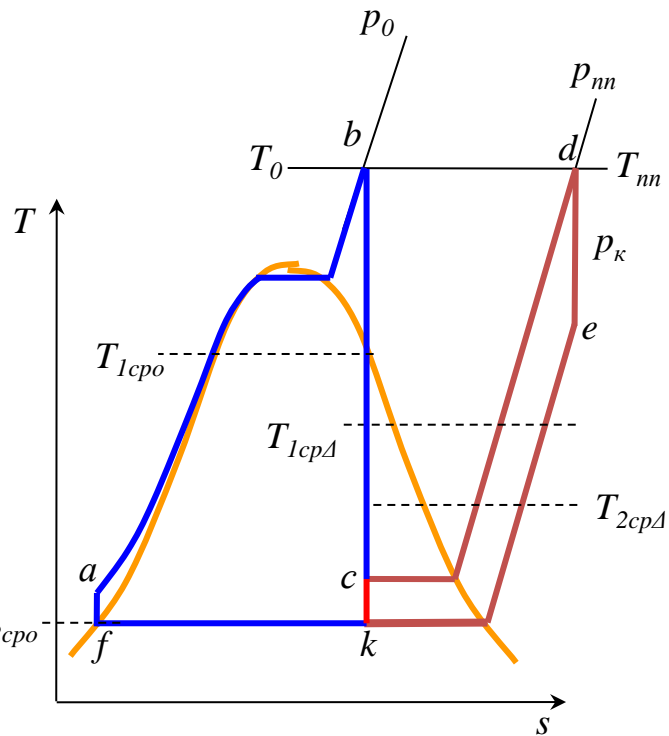
$\eta_{\Delta} > \eta_o$ , т.к.  $T_{1cp\Delta} > T_{1cpo}$

$\delta\eta > 0$



$\eta_{\Delta} > \eta_o$ , т.к.  $T_{1cp\Delta} > T_{1cpo}$

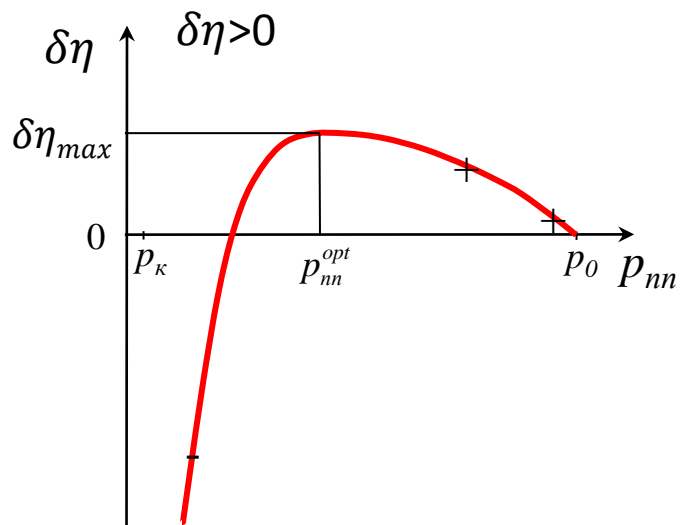
$\delta\eta > 0$



$\eta_{\Delta} < \eta_o$ , т.к.  $T_{1cp\Delta} < T_{1cpo}$

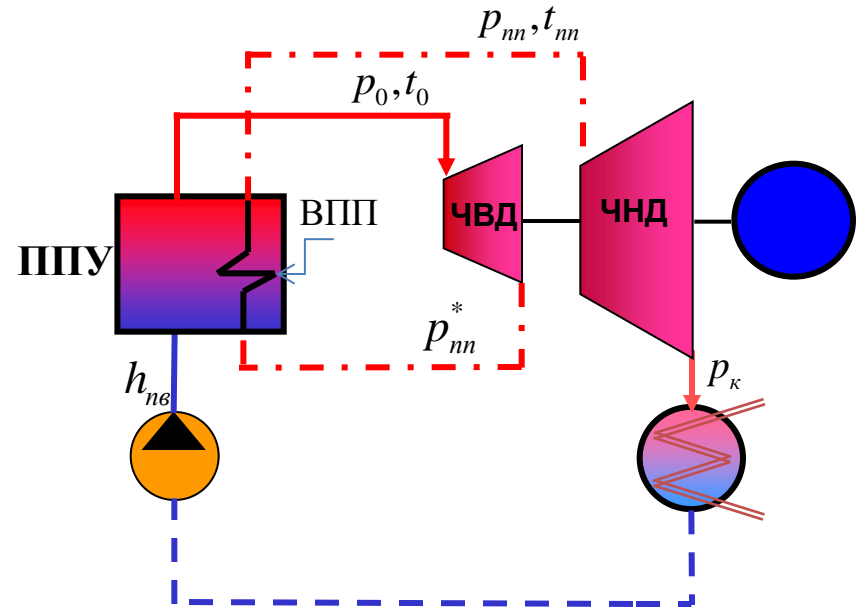
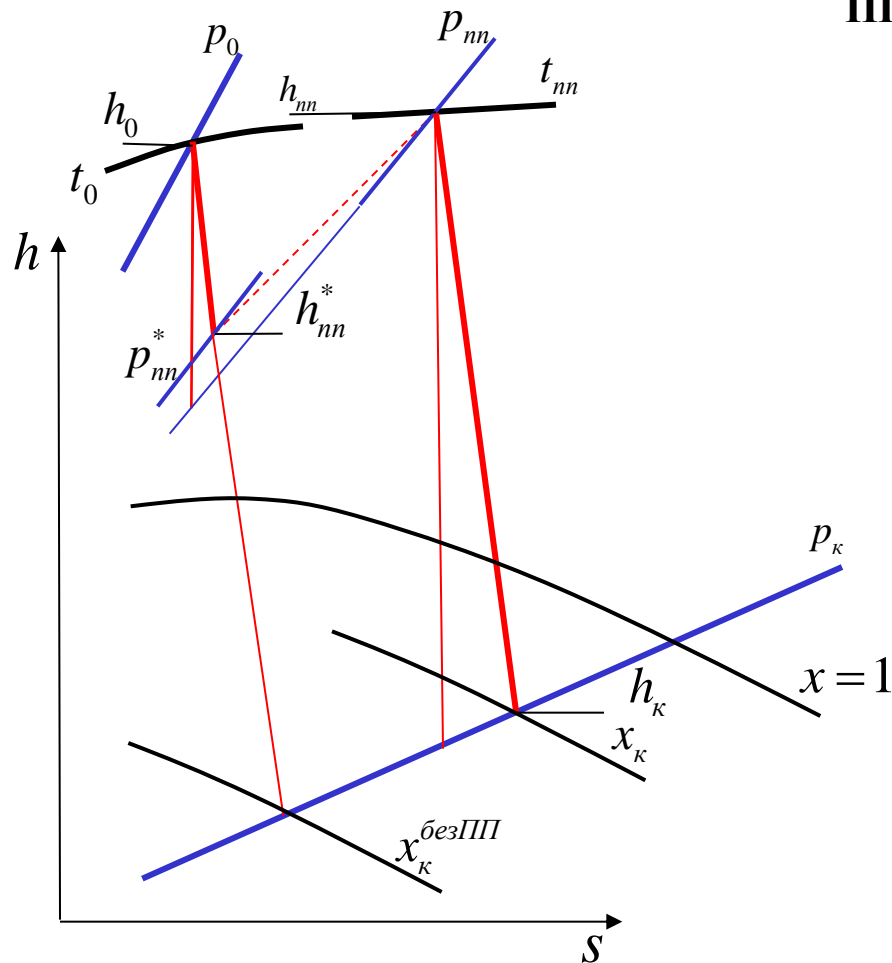
и  $T_{2cp\Delta} > T_{2cpo}$

$\delta\eta < 0$





# Процесс расширения пара в турбине с промежуточным перегревом



$$p_{nn}^* = (1,07 \div 1,1) p_{nn}$$

$$H_i = (h_0 - h_{nn}^*) + (h_{nn} - h_k) = H_i^{\text{ЧВД}} + H_i^{\text{ЧНД}}$$

$$q_{TY} = (h_0 - h_{n6}) + (h_{nn} - h_{nn}^*)$$