


Zlepšování účinnosti Clausius–
Rankinova oběhu vodní páry
při výrobě elektrické energie
v parních elektrárnách



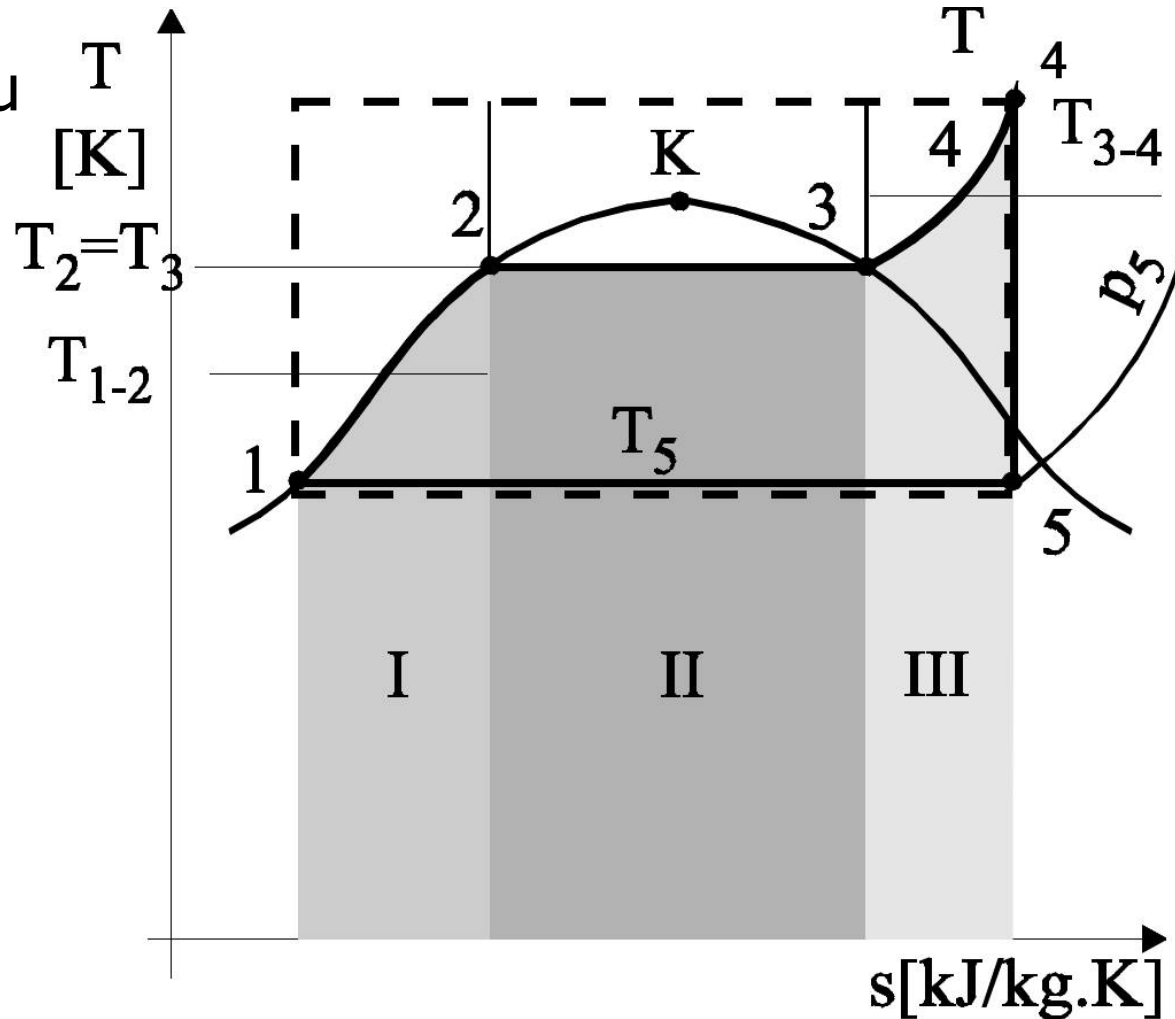
Střední teplota přívodu tepla

Hledáme střední teplotu při přívodu tepla s konstantní teplotou jako u ideálního Carnotova cyklu:

$$q_{X-Y} = i_Y - i_X =$$

$$q_{X-Y} = T_{X-Y} (s_Y - s_X)$$

$$T_{X-Y} = \frac{i_Y - i_X}{s_Y - s_X}$$



Střední teplota přívodu tepla

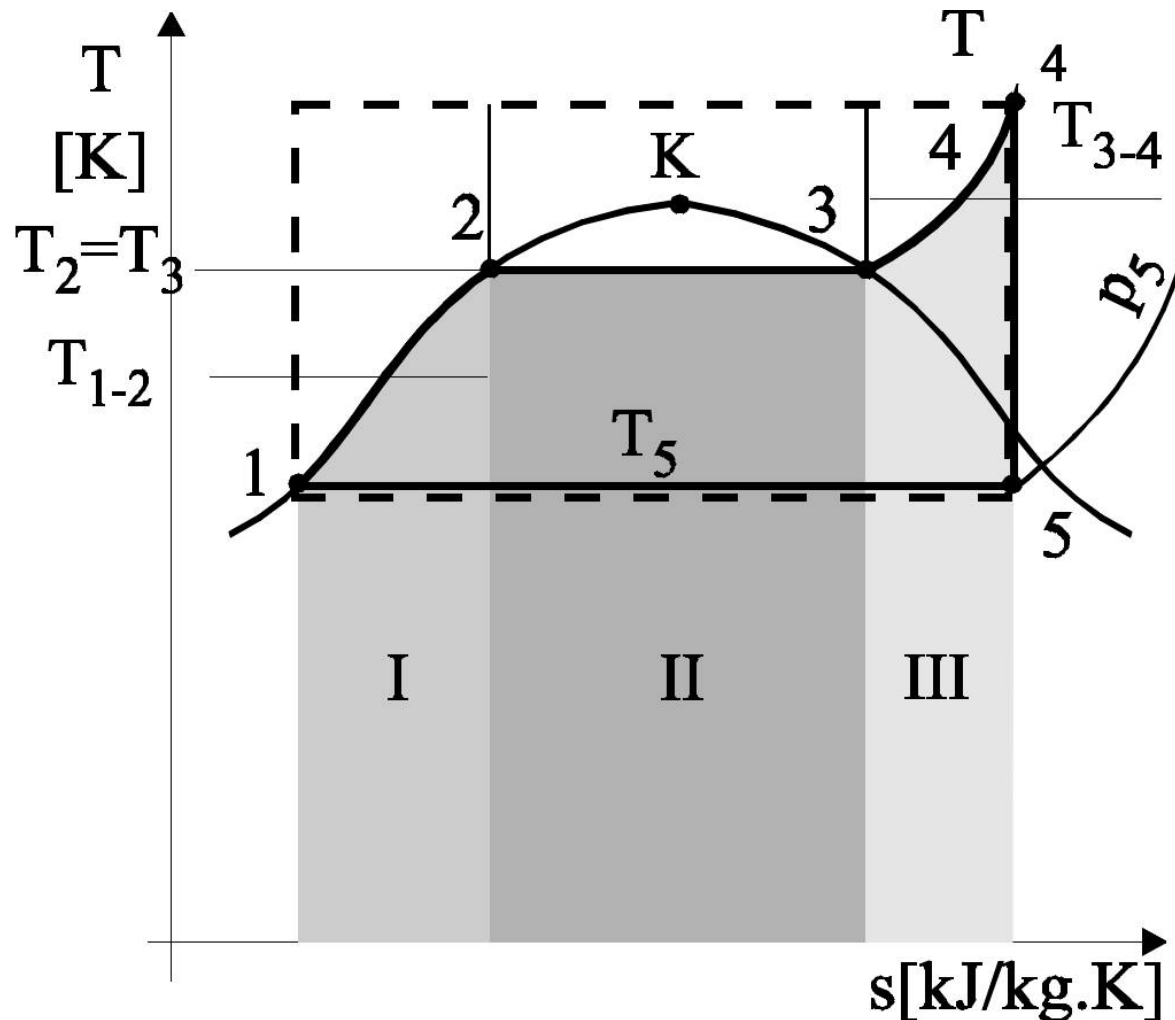
Dílčí účinnost fáze
výroby páry
(dle Carnotova cyklu):

$$\eta = 1 - \frac{T_5}{T_{X-Y}}$$

Tedy:

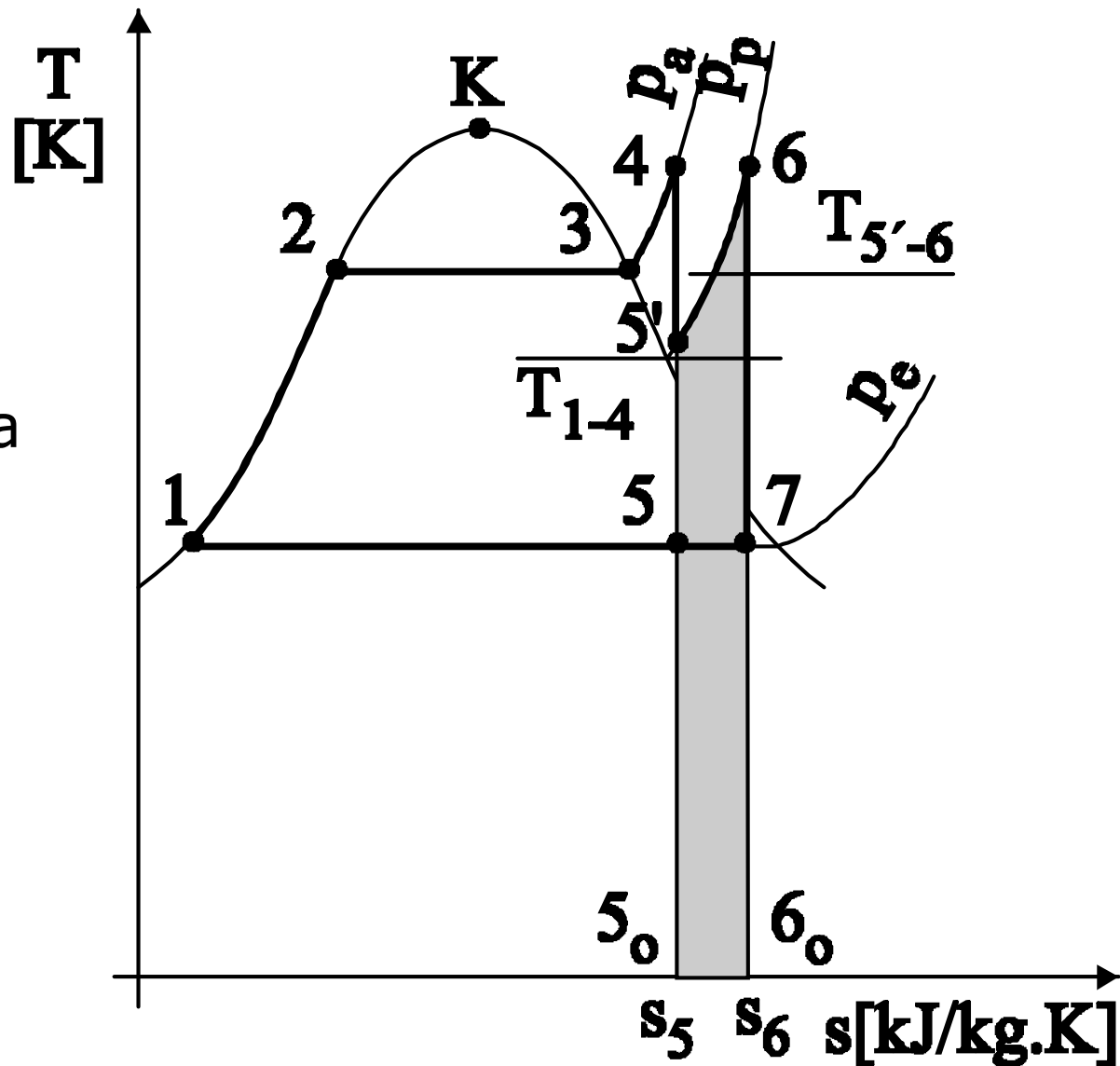
$$T_{1-2} < T_{2-3} < T_{3-4}$$

$$\eta_{1-2} < \eta_{2-3} < \eta_{3-4}$$

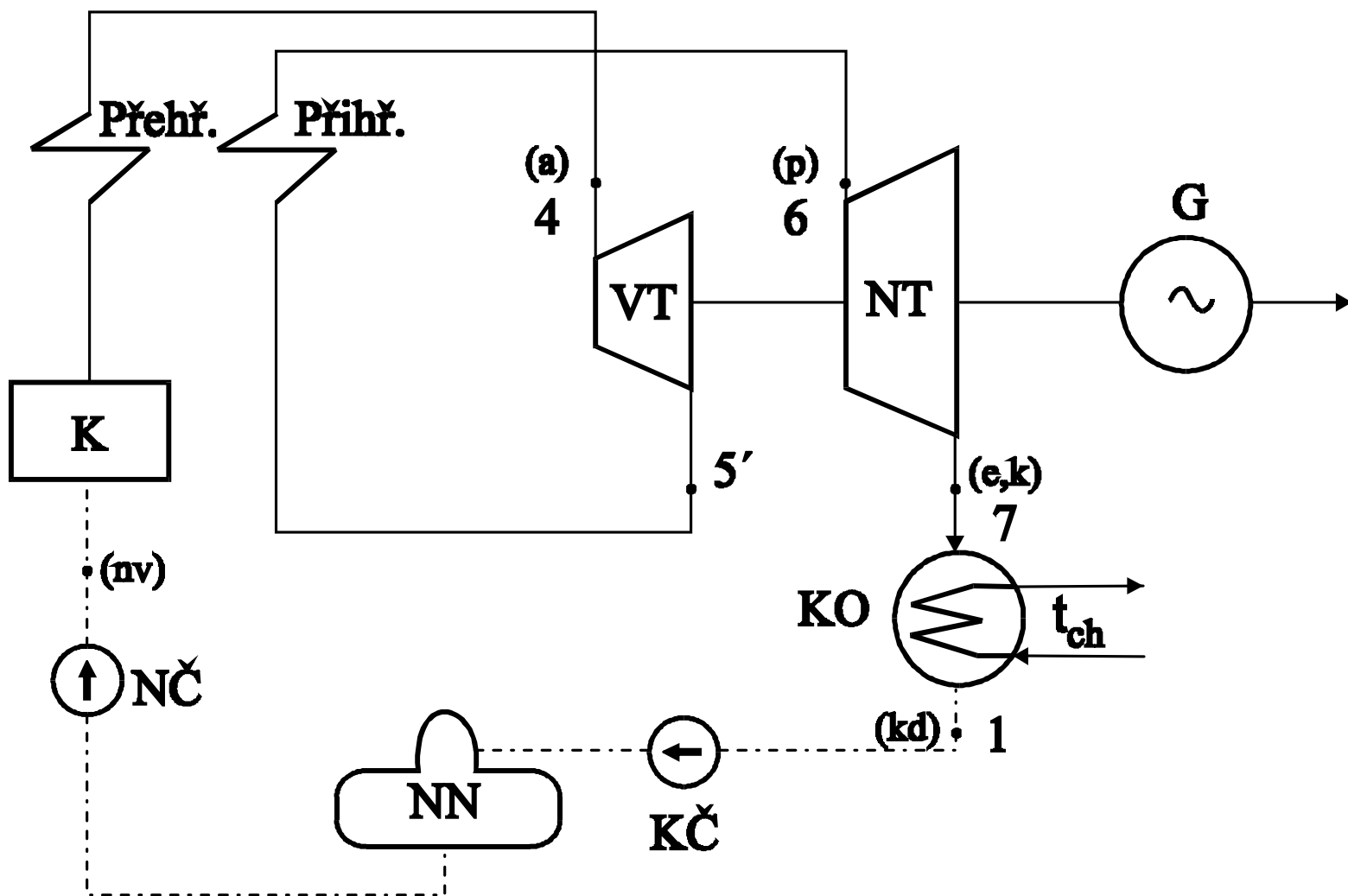


Přihřívání páry

Snaha o rozšíření pracovní oblasti s nejvyšší střední teplotou přívodu tepla a tedy s nejvyšší účinností.



Přihřívání páry



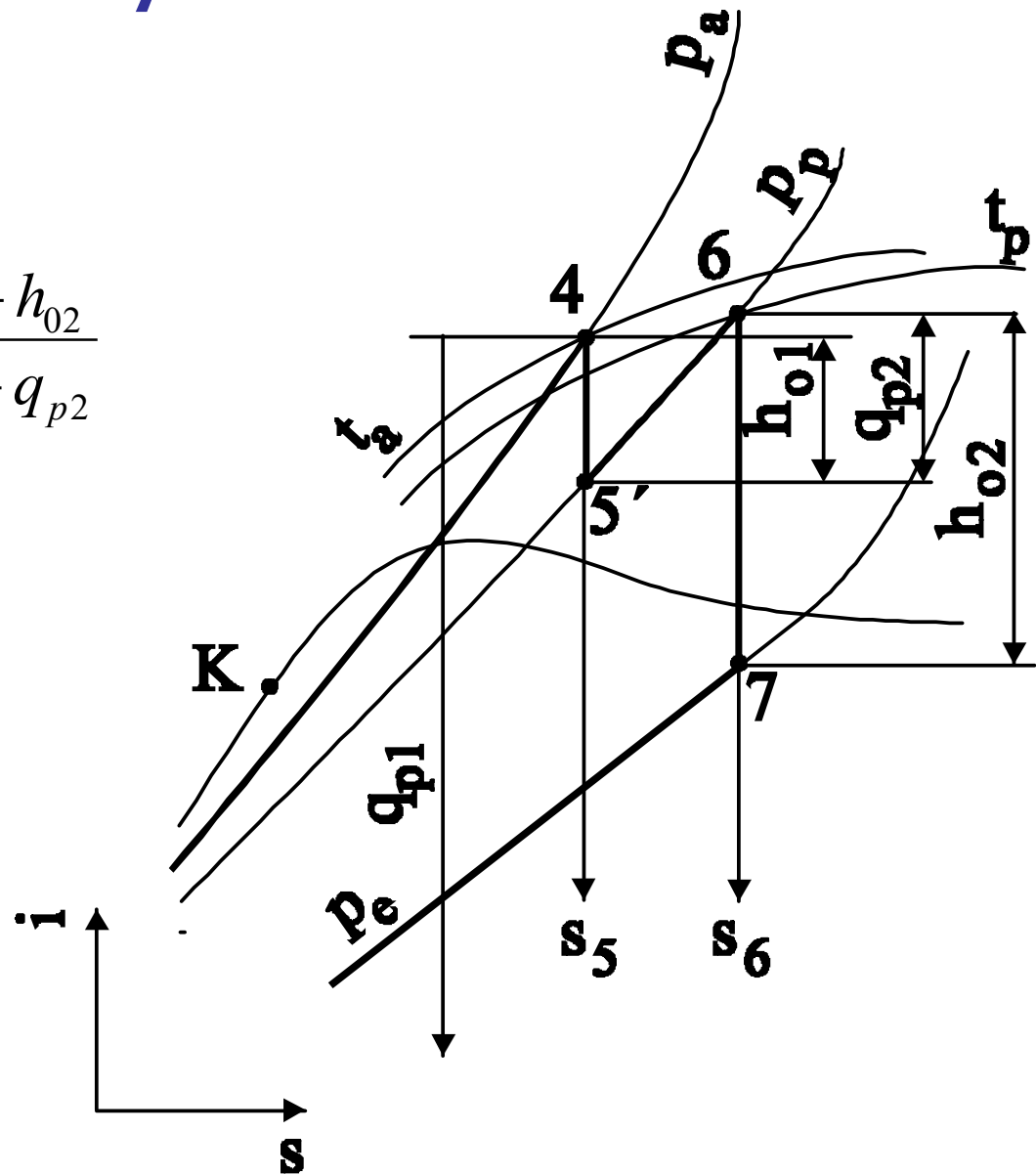
Přihřívání páry

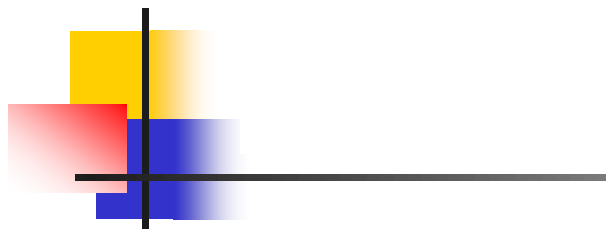
$$\eta_{T0} = \frac{(i_4 - i_5') + (i_6 - i_7)}{(i_4 - i_1) + (i_6 - i_5')} = \frac{h_{01} + h_{02}}{q_{p1} + q_{p2}}$$

Podmínkou
smysluplnosti
přihřívání je:

$$T_{1-4} < T_{5'-6}$$

Zlepšení tepelné účinnosti díky
přihřívání je v praxi 2 až 4 %.
Proto se používá jen u velkých
elektrárnách, kde navíc
zlepšuje termodynamickou
účinnost.





Zadání:

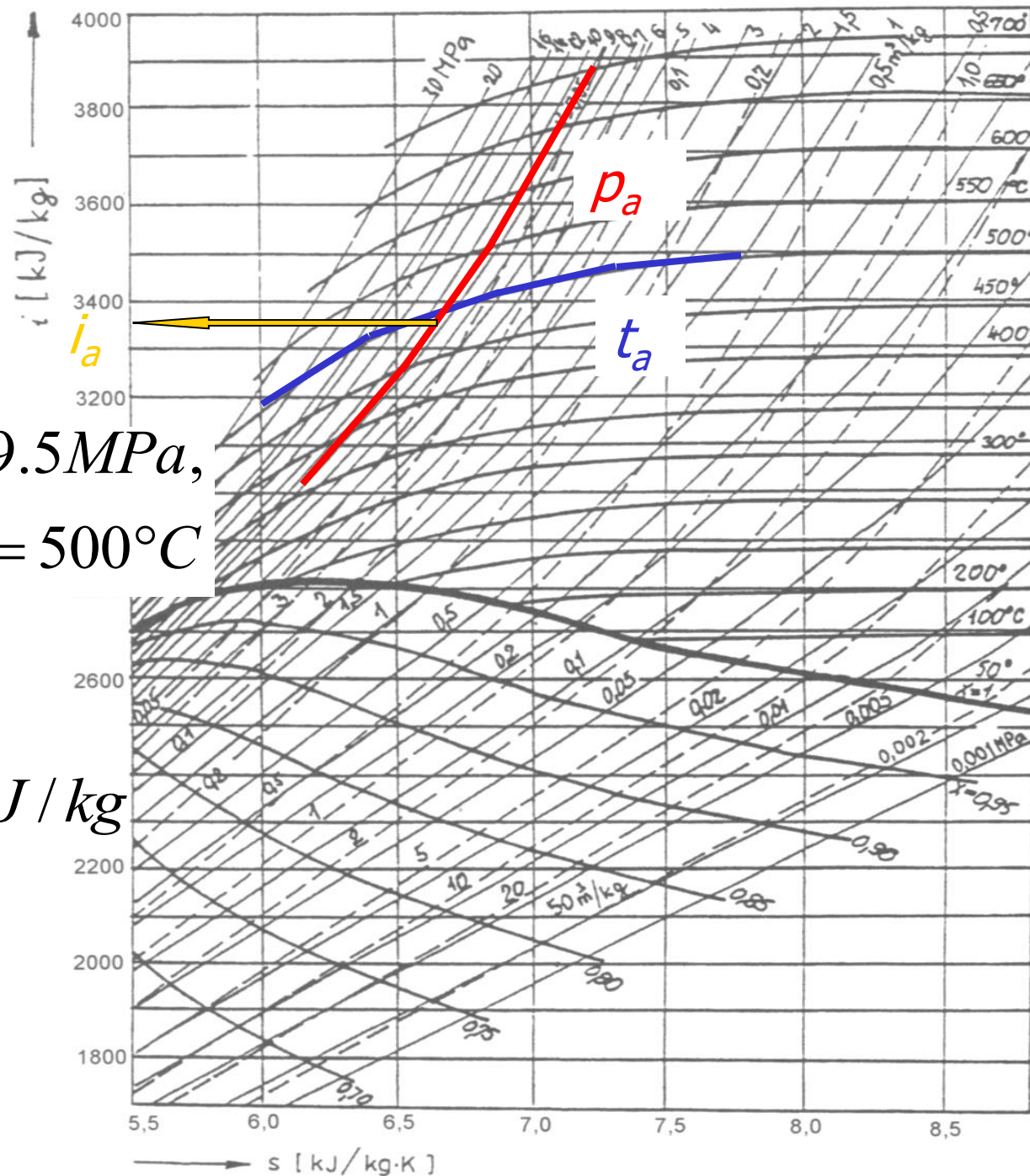
$$t_a = 500^\circ\text{C}, \quad p_a = 9.5\text{MPa},$$

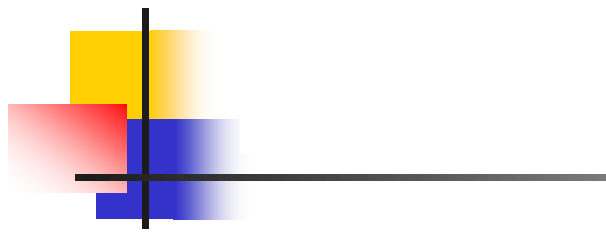
$$p_p = 2.5\text{MPa}, \quad t_p = 500^\circ\text{C}$$

Okruh bez
přihřívání páry:

$$p_a, t_a \Rightarrow i_a = 3350\text{kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} i_{kd} &= t_{kd} \cdot c_p = \\ &= 33 \cdot 4.1868 = \\ &= 138.16\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

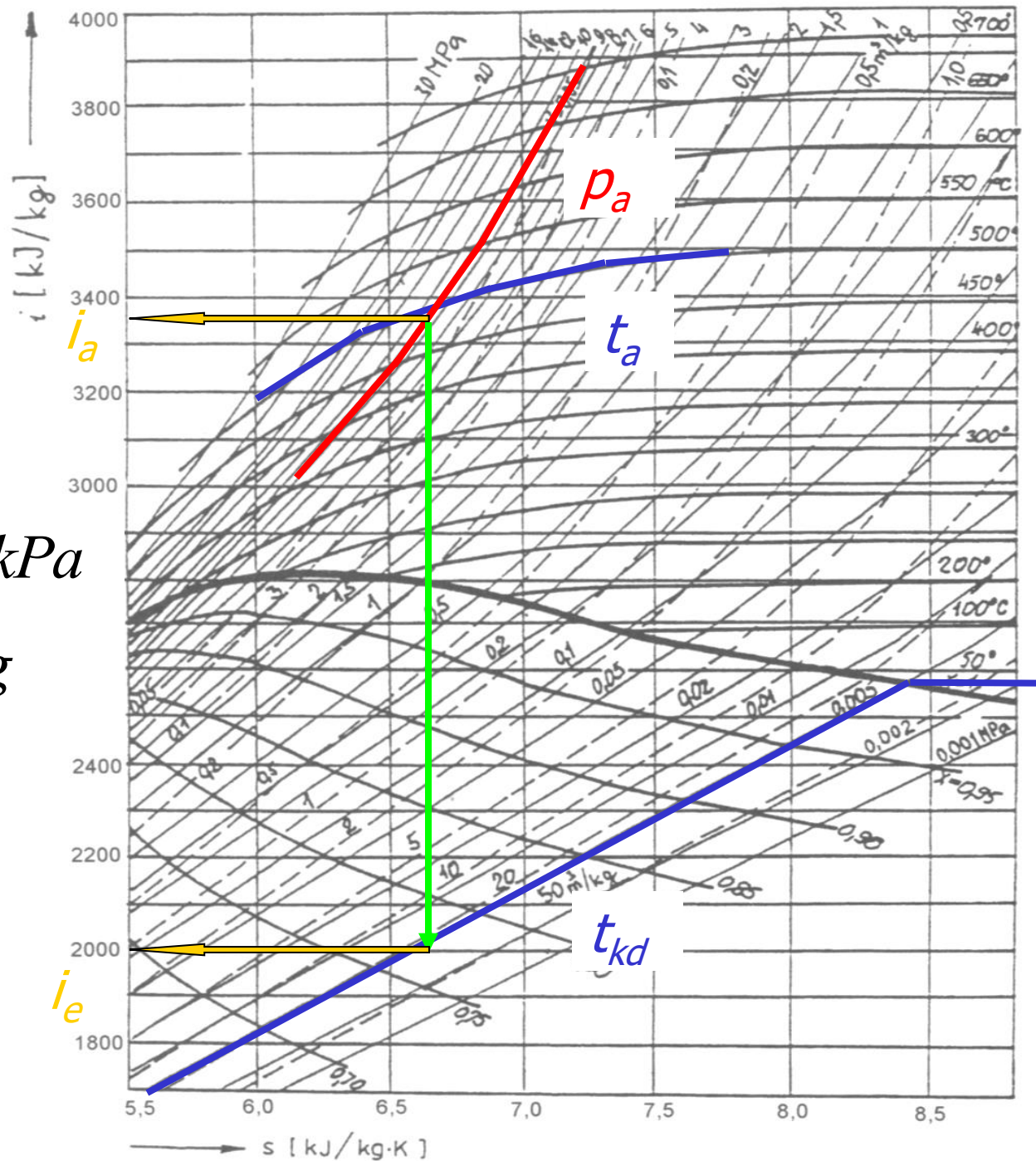




Okruh bez
přehřívání páry:

$$t_k = 33^\circ\text{C} \Rightarrow p_e = 5\text{kPa}$$

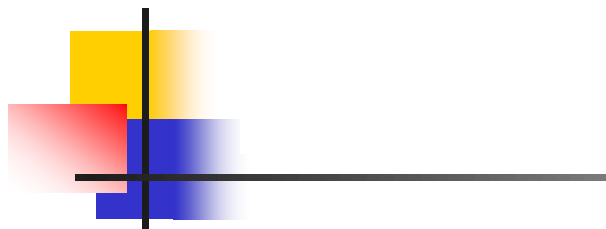
$$\Rightarrow i_e = 1985\text{kJ/kg}$$



Vyhodnocení účinnosti C-R cyklu s přehřívání páry

Okruh bez přehřívání páry:

$$i_{NV} \approx i_{kd} \quad \eta_{T0} = \frac{i_a - i_e}{i_a - i_{NV}} = \frac{3350 - 1985}{3350 - 138} = 0.42$$



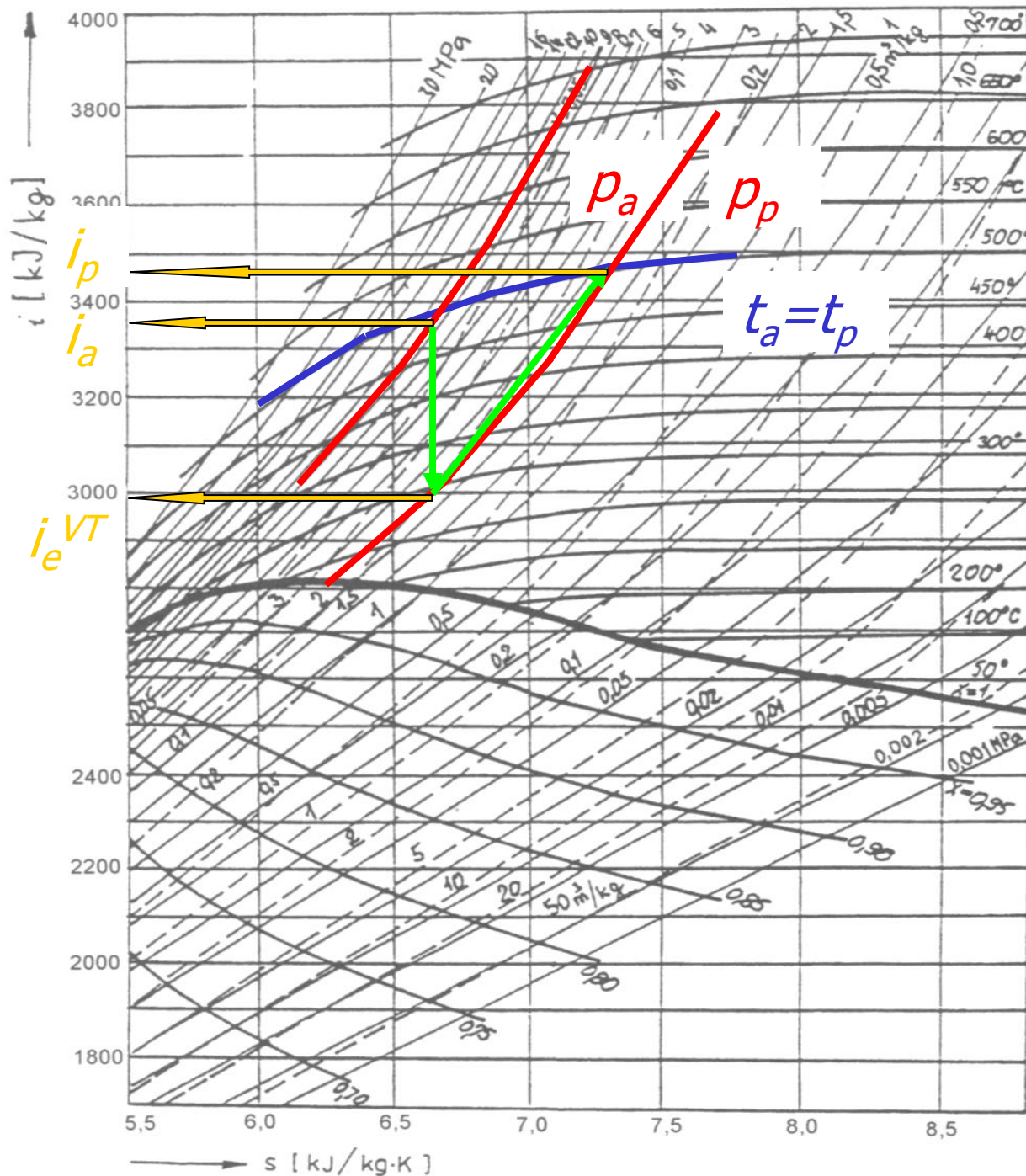
Okruh s
přehříváním páry:

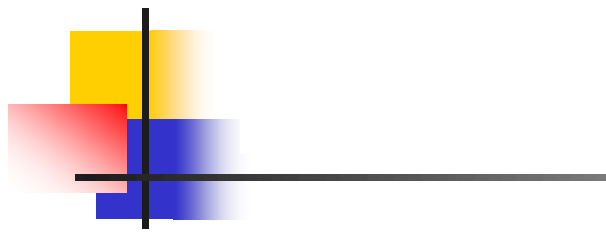
$$p_p = 2.5 \text{ MPa} \Rightarrow$$

$$i_e^{VT} = 2995 \text{ kJ/kg}$$

$$p_p, t_p = 500^\circ \text{C} \Rightarrow$$

$$i_p = 3465 \text{ kJ/kg}$$



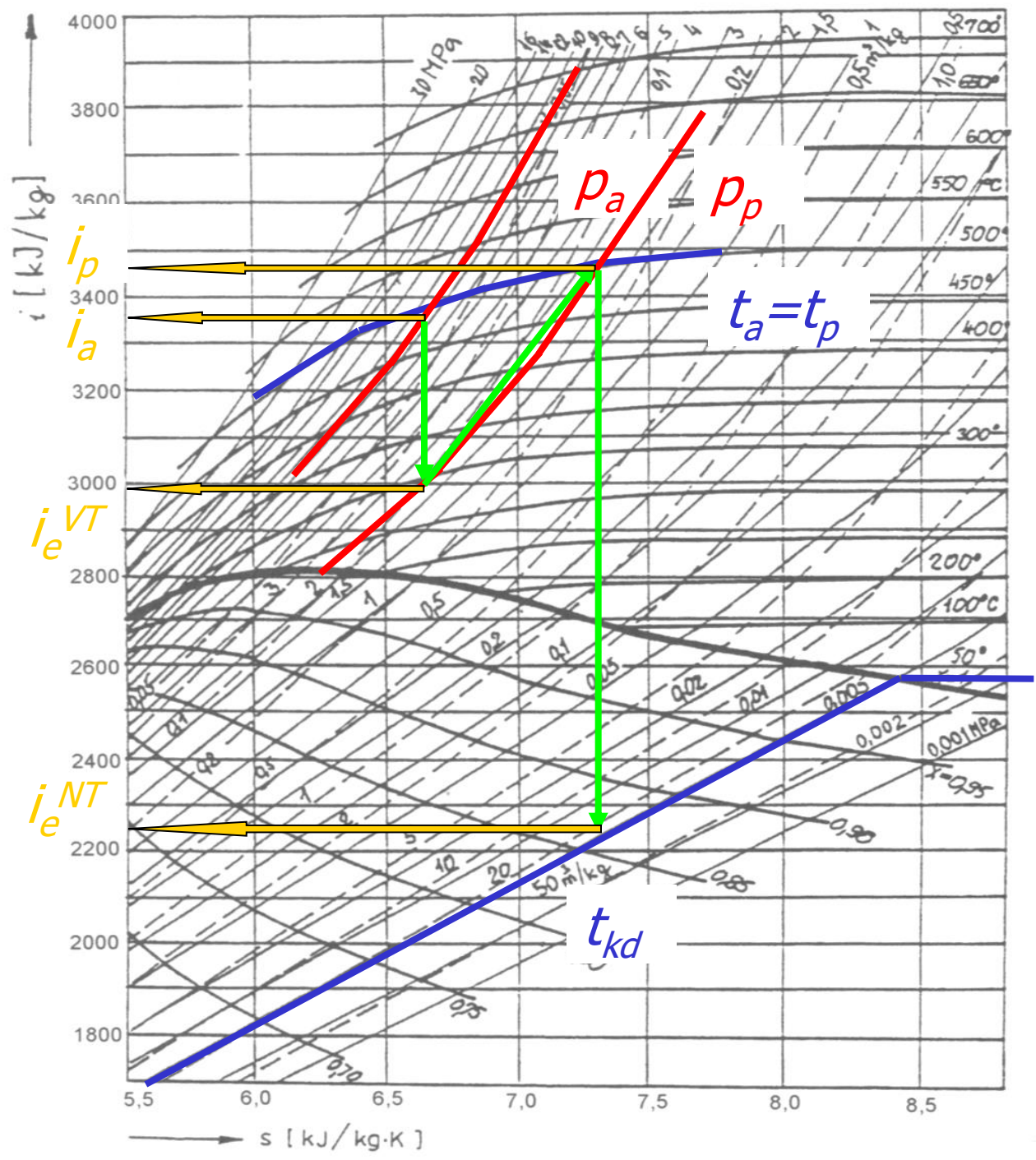


Okruh s
přehříváním páry:

$$t_{kd} = 33^{\circ}\text{C} \Rightarrow$$

$$p_e = 5\text{kPa} \Rightarrow$$

$$i_e^{NT} = 2235\text{kJ} / \text{kg}$$



Vyhodnocení účinnosti C-R cyklu s přehřívání páry

Okruh bez přehřívání páry:

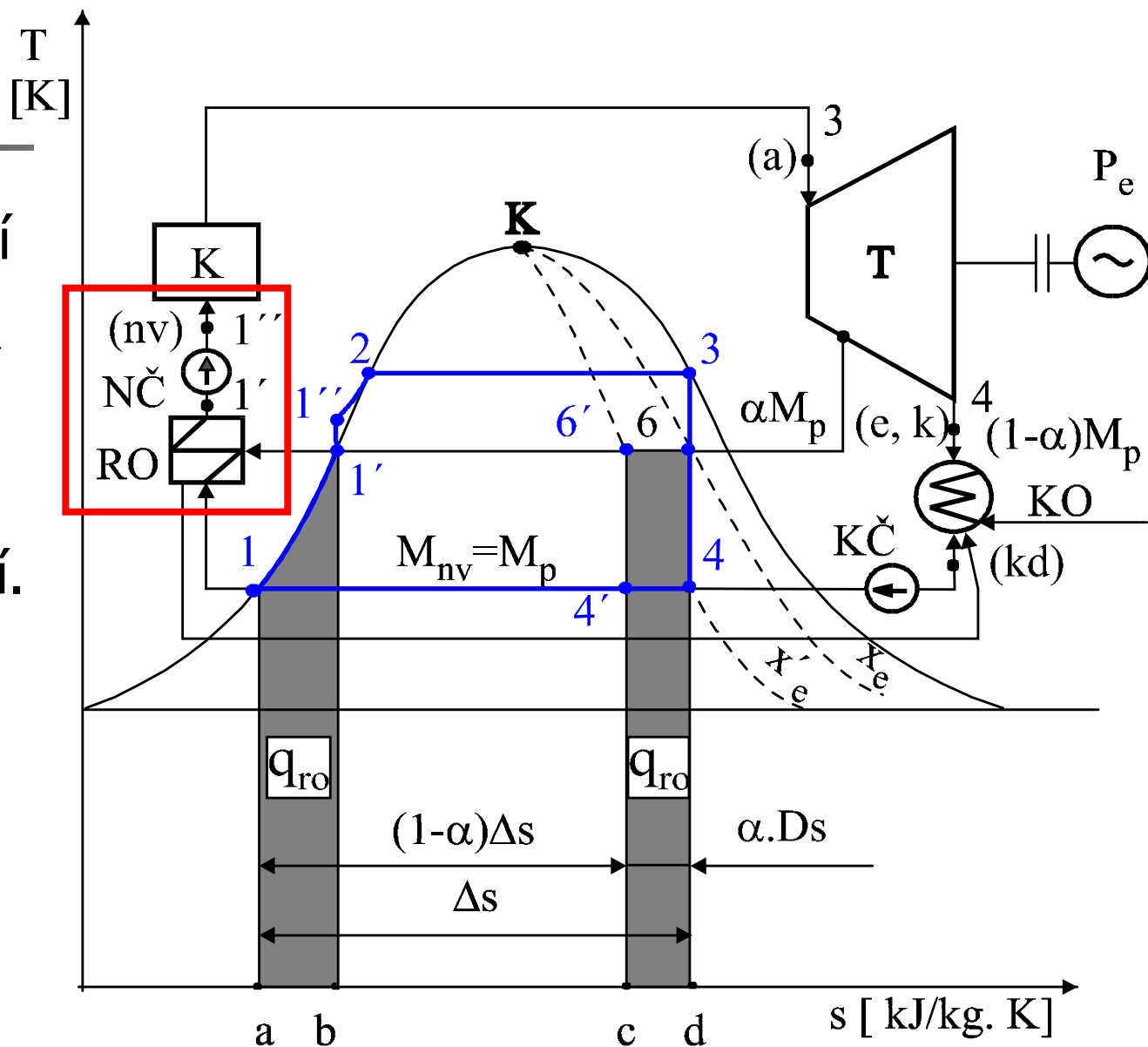
$$i_{NV} \approx i_{kd} \quad \eta_{T0} = \frac{i_a - i_e}{i_a - i_{NV}} = \frac{3350 - 1985}{3350 - 138} = 0.42$$

Okruh s přehříváním páry:

$$\begin{aligned} i_{NV} \approx i_{kd} \quad \eta_{T0} &= \frac{(i_a - i_e^{VT}) + (i_p - i_e^{NT})}{(i_a - i_{NV}) + (i_p - i_e^{VT})} = \\ &= \frac{(3350 - 2995) + (3465 - 2235)}{(3350 - 138) + (3465 - 2995)} = 0.43 \end{aligned}$$

Regenerativní ohřev napájecí vody

Snaha o omezení pracovní oblasti s nejnižší střední teplotou přívodu tepla a tedy s nejnižší účinností.



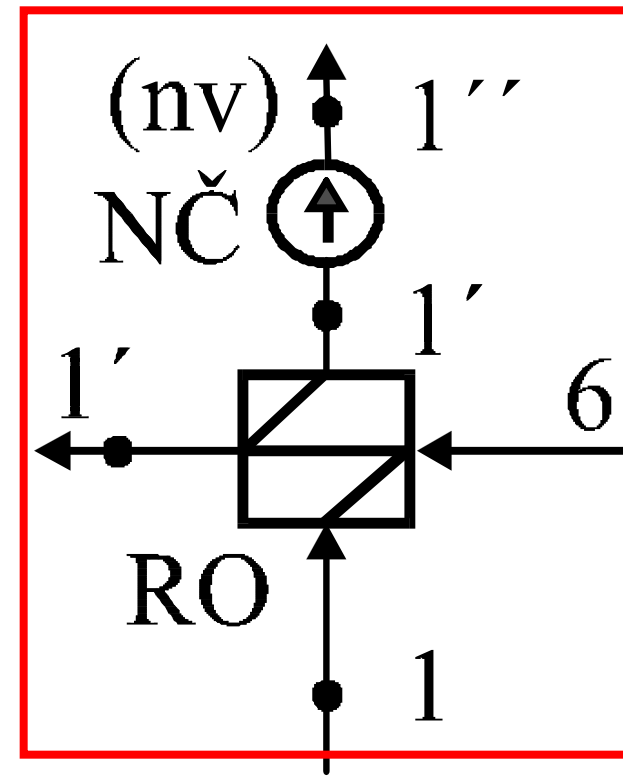
Vyhodnocení účinnosti C-R cyklu s regenerativním ohřevem napájecí vody

Okruh s regenerativními ohříváky (RO):

Z tepelné bilance RO určíme potřebné poměrné množství odběrové páry:

$$\alpha M_p i_6 + M_p i_1 = M_p i_1' + \alpha M_p i_1'$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{i_1' - i_1}{i_6 - i_1'}$$

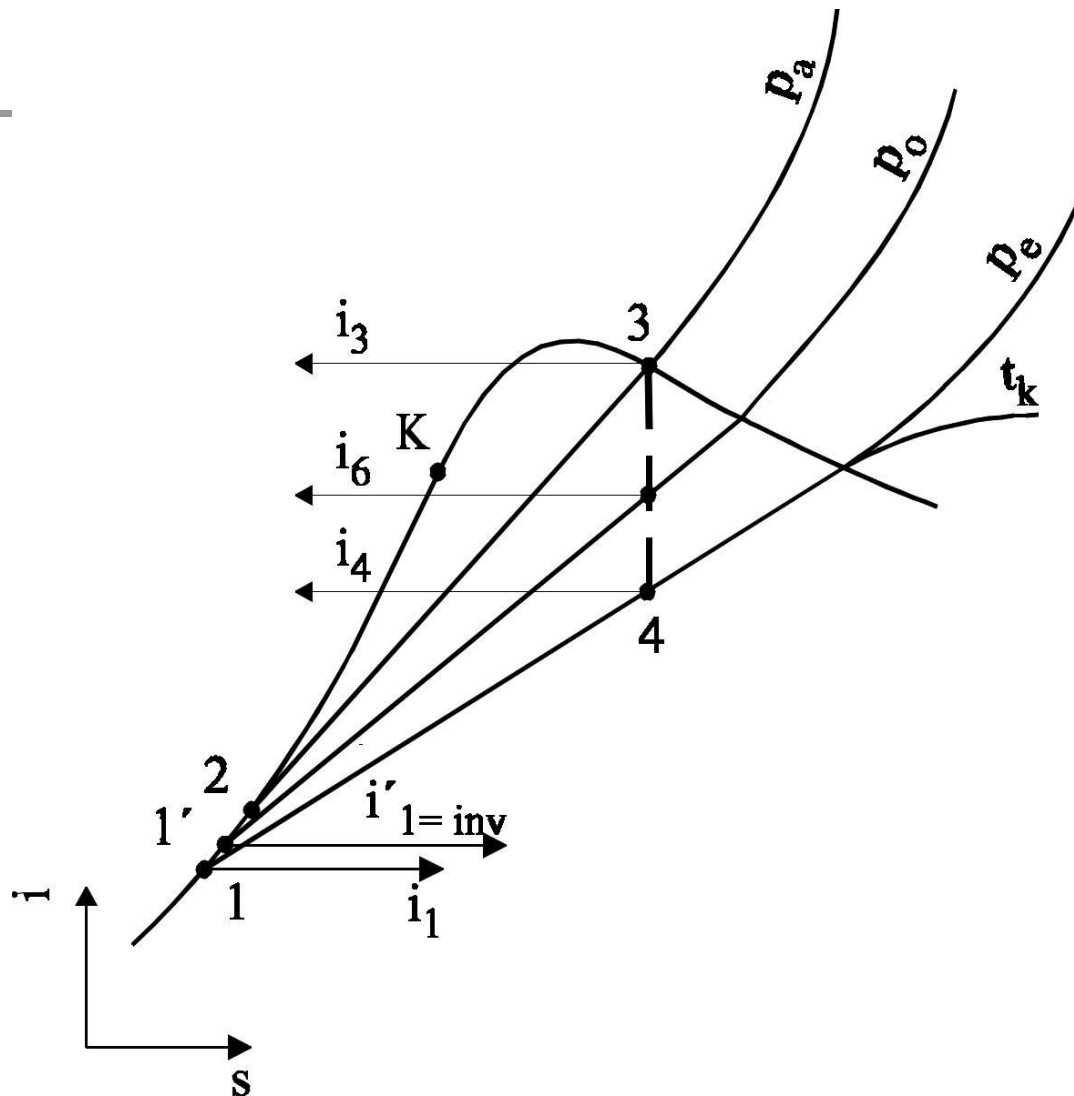


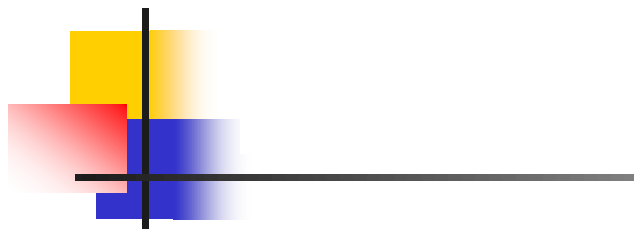
Regenerativní ohřev napájecí vody



$$\eta_{T0} = \frac{i_3 - i_4 - \alpha(i_6 - i_4)}{i_3 - i_1'}$$

Zlepšení tepelné účinnosti díky regenerativnímu ohřevu napájecí páry je v praxi opět okolo 3%. Proto se opět používá jen u velkých elektrárenských bloků.





Zadání

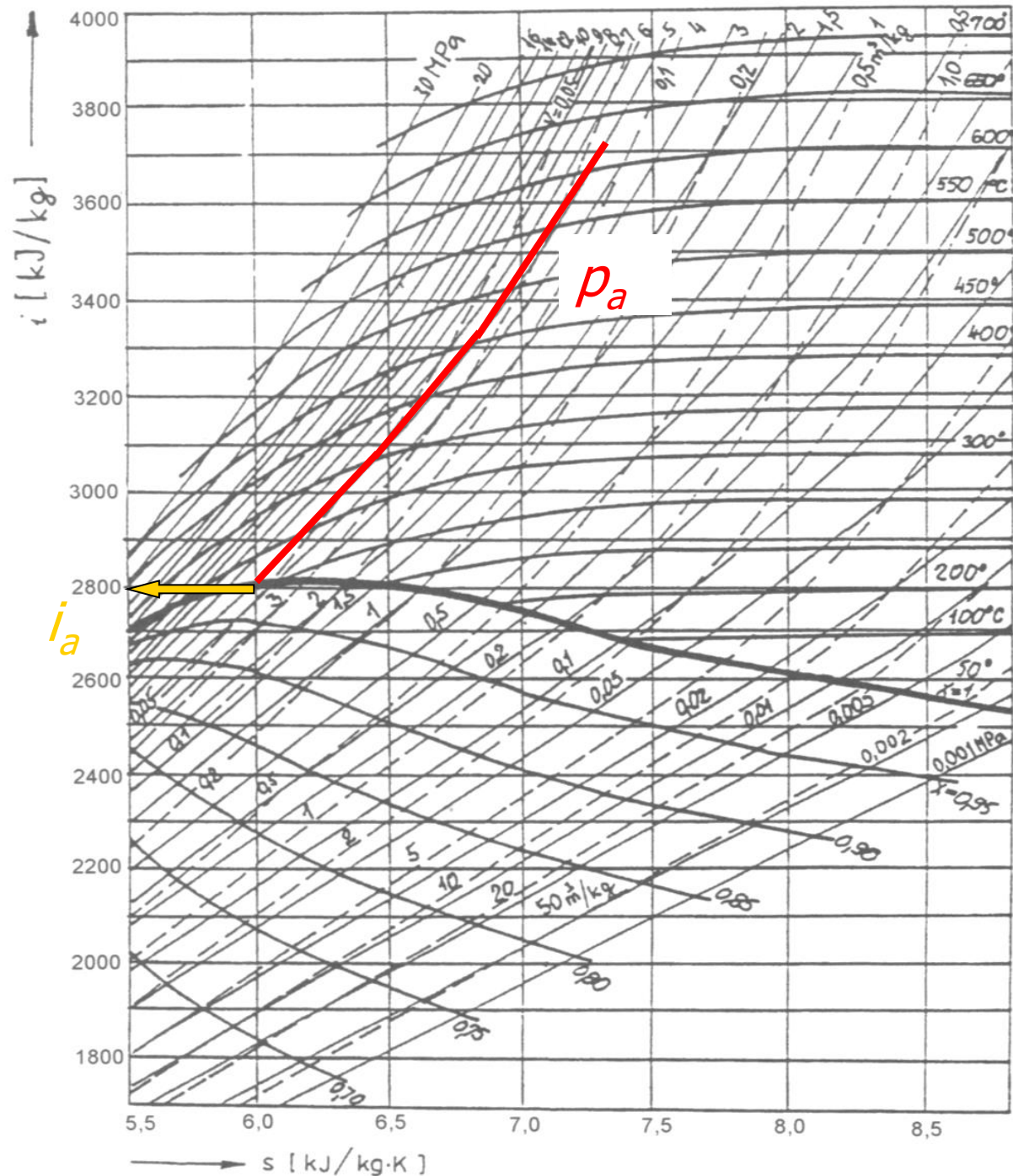
(pro admisní
sytou páru):

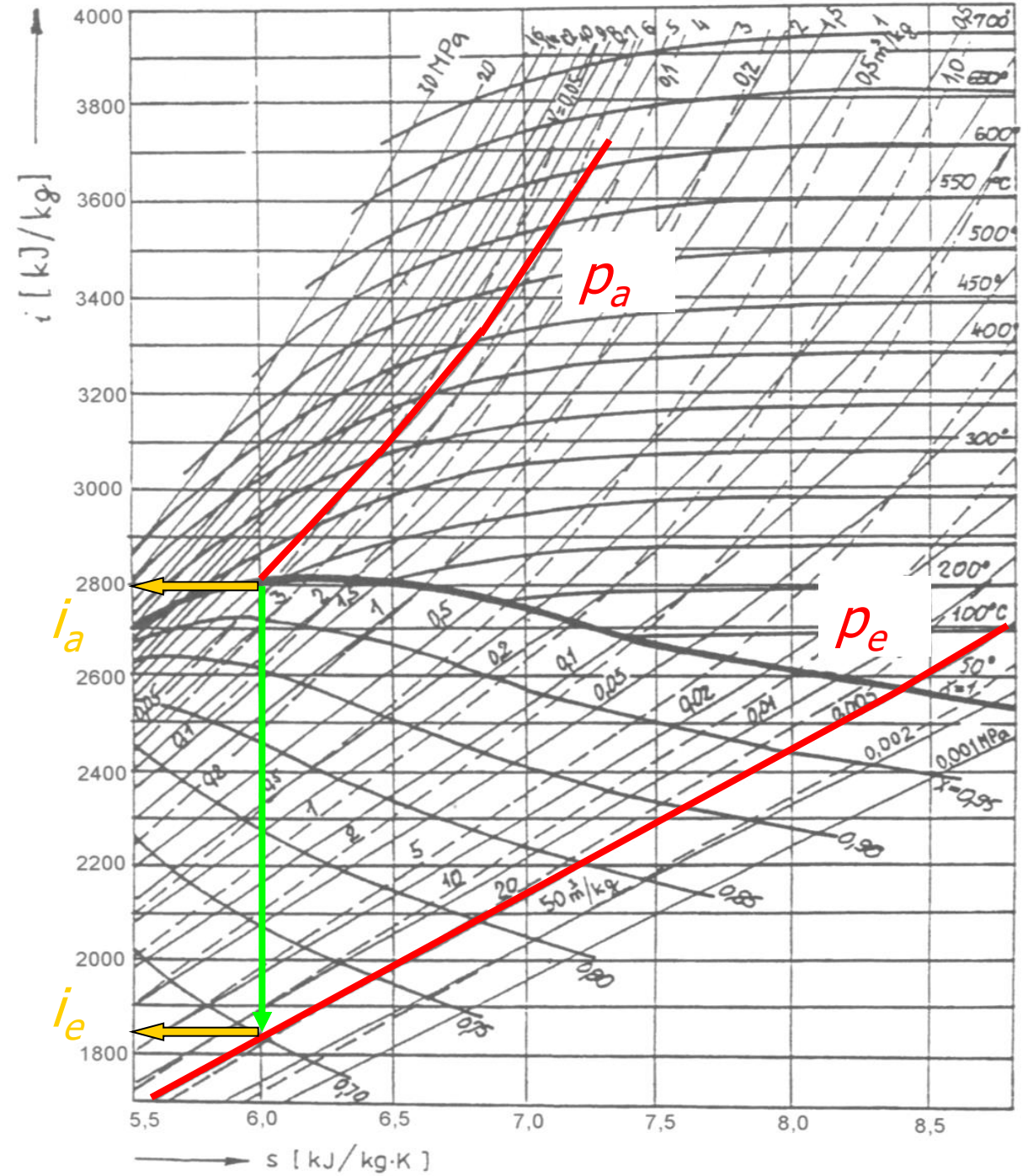
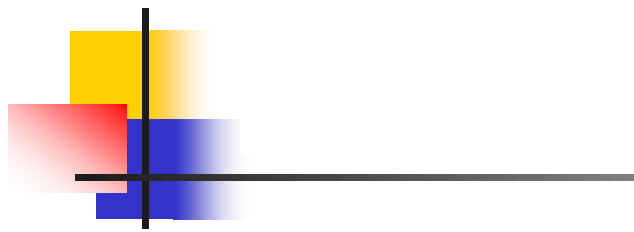
$$p_a = 5 \text{ MPa}$$

$$p_e = 5 \text{ kPa}$$

$$p_a \Rightarrow i_3 = i_a$$

$$i_a = 2794 \text{ kJ/kg}$$





$$p_e \Rightarrow i_4 = i_e$$

$$i_e = 1860 \text{ kJ/kg}$$

$$p_e \Rightarrow t_{kd} \Rightarrow$$

$$i_1 = i_{kd} = t_{kd} \cdot c_p =$$

$$= 33 \cdot 4.1868 =$$

$$i_1 = 138.16 \text{ kJ/kg}$$

Vyhodnocení účinnosti C-R cyklu s regenerativním ohřevem napájecí vody

Okruh bez regenerativních ohříváků napájecí vody:

$$\eta_{T0} = \frac{i_a - i_e}{i_a - i_1} = \frac{2794 - 1860}{2794 - 138.16} = 0.352$$

Vyhodnocení účinnosti C-R cyklu s regenerativním ohřevem napájecí vody

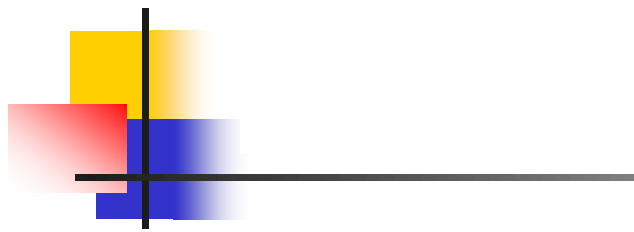
Okruh s regenerativními ohříváky (RO) napájecí vody:

Z tepelné bilance RO určíme potřebné poměrné množství odběrové páry:

$$\eta_{T0}^{RO} = \frac{i_a - i_e - \alpha(i_6 - i_e)}{i_a - i_1'} = \frac{2794 - 1860 - \alpha(i_6 - 1860)}{2794 - i_1'}$$

Postup vyhodnocení účinnosti:

$$t_1' \approx t_{NV} \rightarrow i_1' = t_1' \cdot c_P \approx t_{NV} \cdot c_P \quad t_{NV} \rightarrow \text{z } i - s \text{ diagramu } i_6$$



$$t_{NV} = 100^{\circ}\text{C}$$

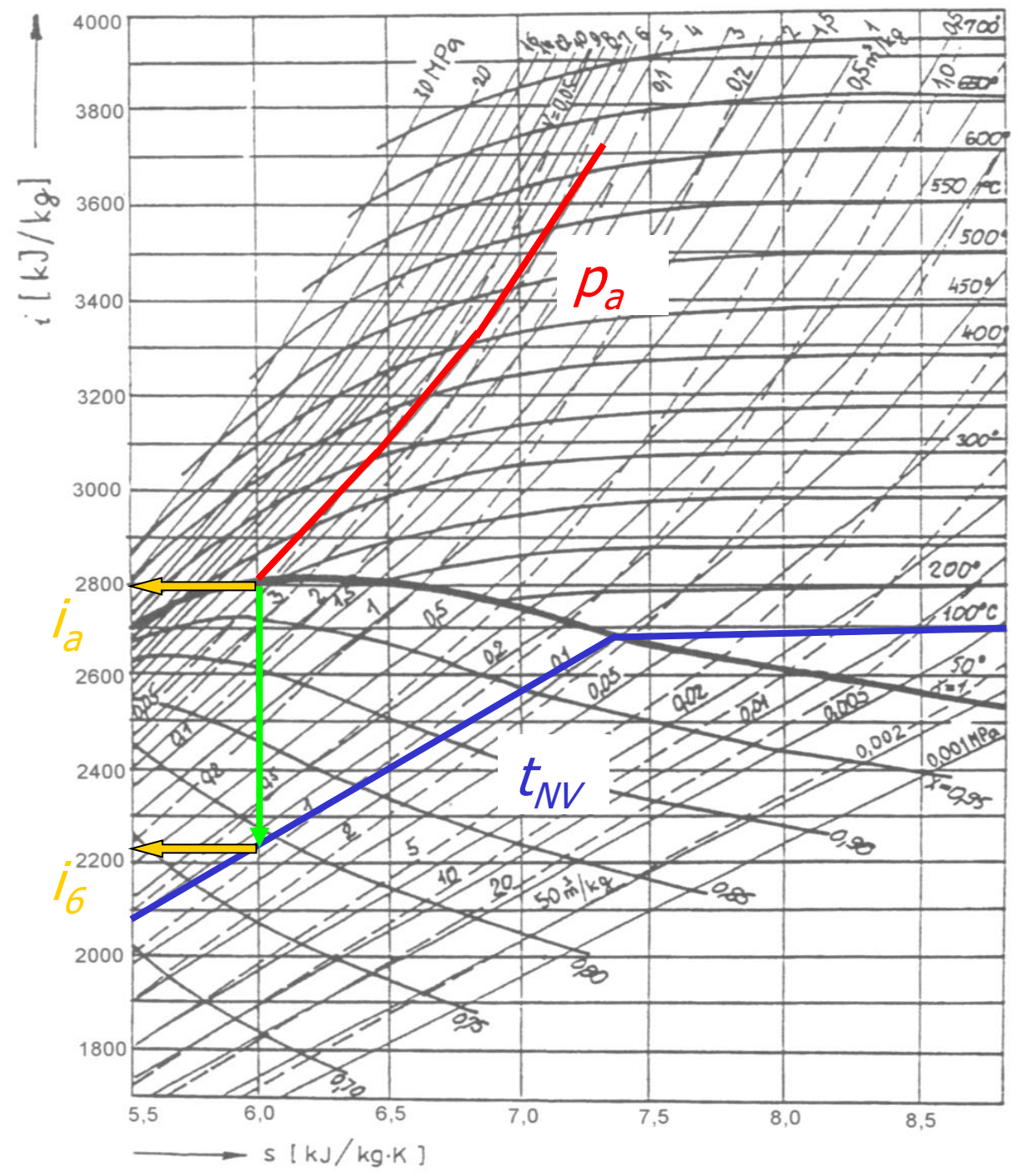
$$i_1' = 100 \cdot 4.61 \text{ kJ/kg}$$

$$i_1' = 461 \text{ kJ/kg}$$

$$t_{NV} = 100^{\circ}\text{C} \rightarrow$$

z $i - s$ diagramu

$$i_6 = 2215 \text{ kJ/kg}$$



Vyhodnocení účinnosti C-R cyklu s regenerativním ohřevem napájecí vody

Okruh s regenerativními ohříváky (RO) napájecí vody:

$$\alpha = \frac{i_1' - i_1}{i_6 - i_1'} = \frac{461 - 138.16}{2215 - 461} = 0.185$$

$$\eta_{T0}^{RO} = \frac{i_a - i_e - \alpha(i_6 - i_e)}{i_a - i_1'} = \frac{2794 - 1860 - \alpha(i_6 - 1860)}{2794 - i_1'}$$

$$\eta_{T0}^{RO} = \frac{2794 - 1860 - 0.185(2215 - 1860)}{2794 - 461} = 0.373$$

Vyhodnocení účinnosti C-R cyklu s regenerativním ohřevem napájecí vody

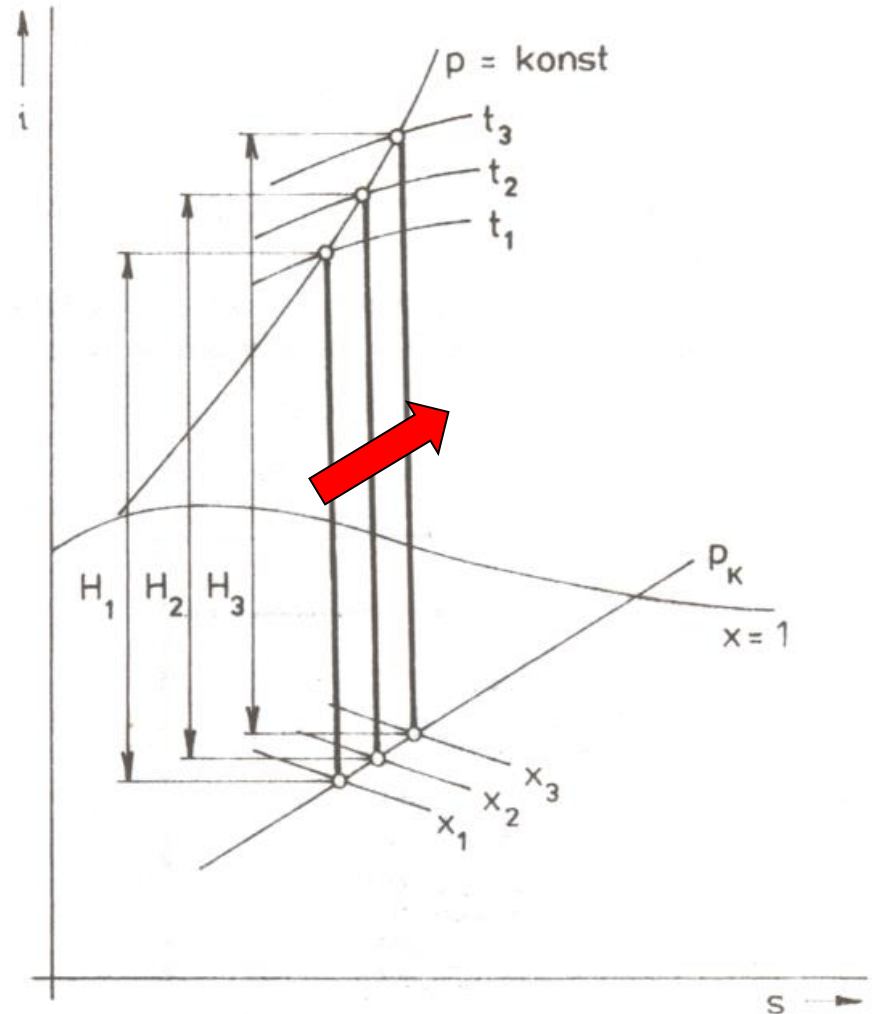
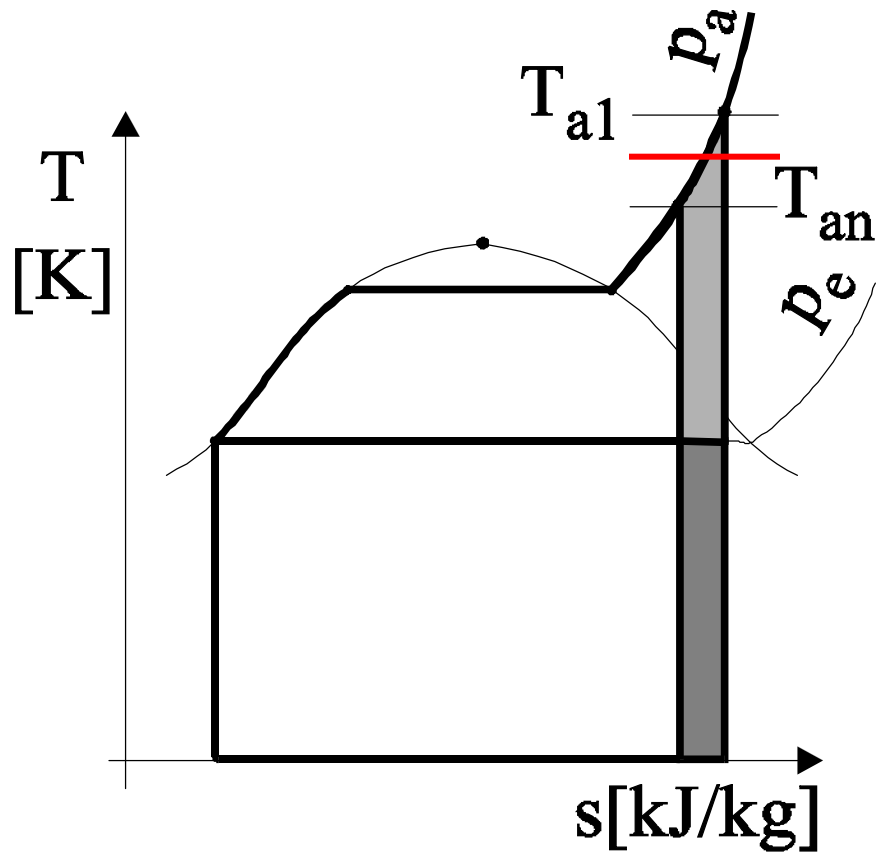
Okruh s regenerativními ohříváky (RO) napájecí vody:

$t_{NV} [^{\circ}C]$	$i_1' [kJ/kg]$	$i_6 [kJ/kg]$	$\alpha [-]$	$\eta_{to} [-]$
50	209	1955	0.041	0.360
80	335	2112	0.111	0.369
100	461	2215	0.185	0.373
130	546	2300	0.200	0.376
160	675	2465	0.220	0.379
190	808	2590	0.260	0.375

Úprava parametrů admissní páry

- **přrůstek technické práce**
- **přrůstek odvedeného tepla**

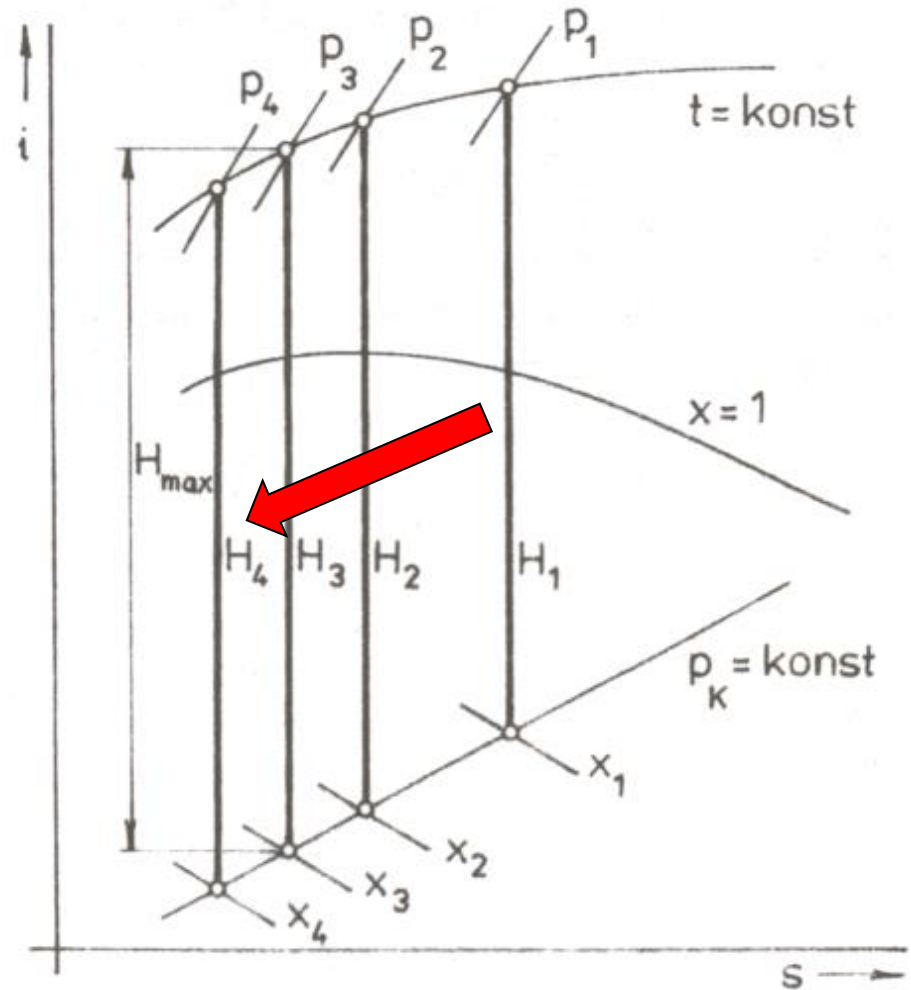
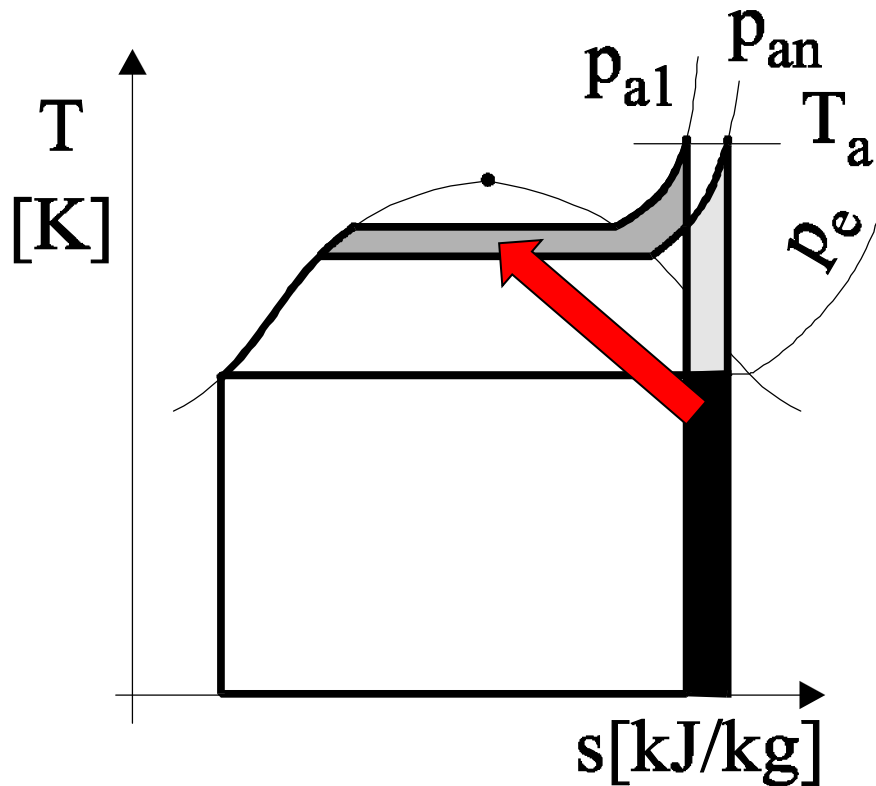
Navýšení teploty admissní páry



Úprava parametrů admisní páry

- **přírůstek technické práce**
- **pokles technické práce**
- **pokles odvedeného tepla**

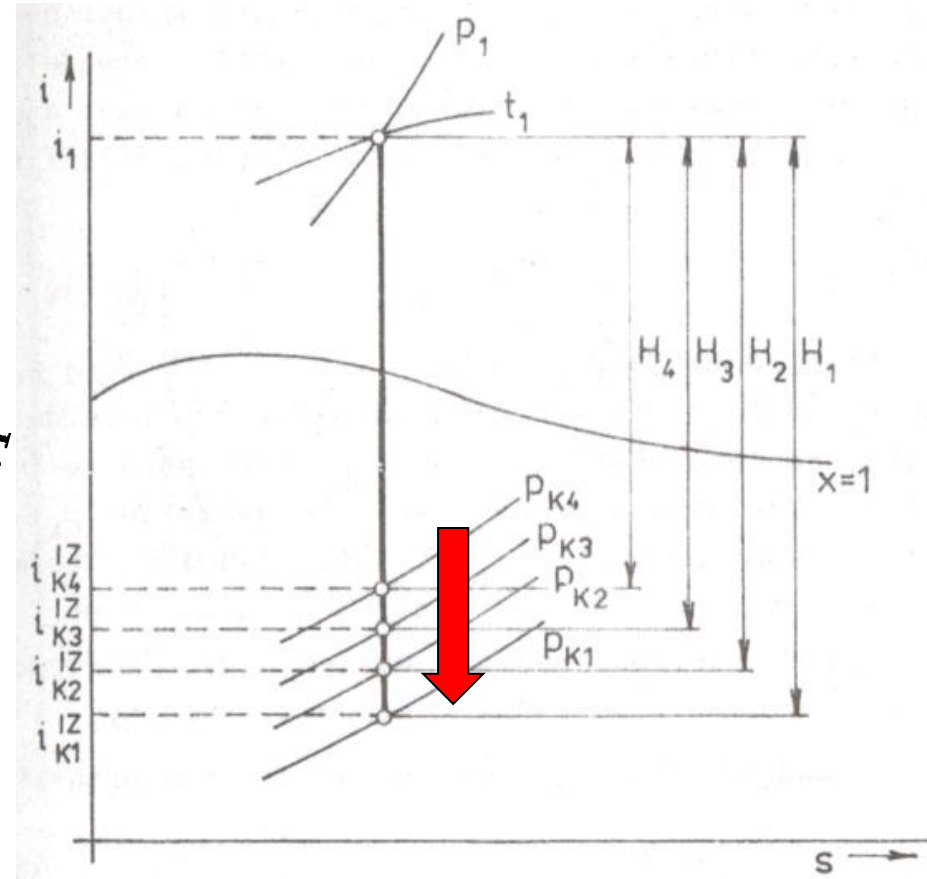
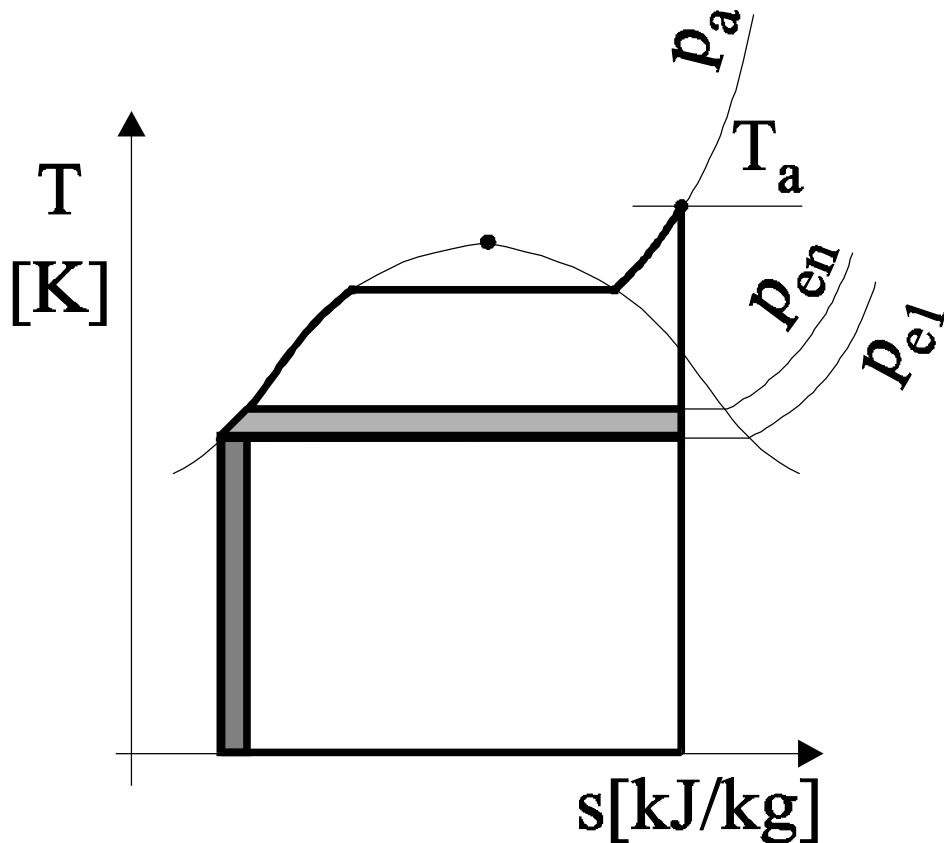
Navýšení tlaku admisní páry



Úprava parametrů páry po expanzi

- **přrůstek technické práce**
- **přrůstek odvedeného tepla**

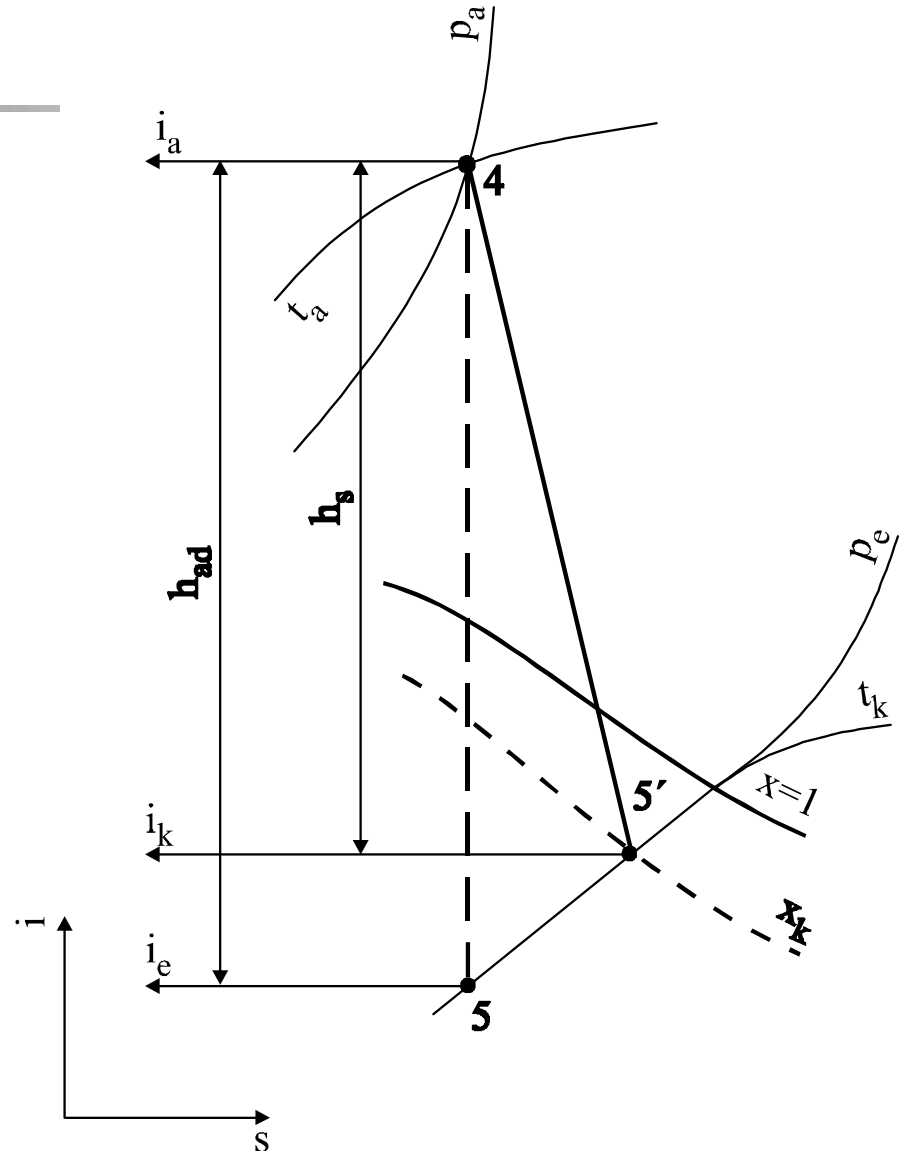
Snížení tlaku páry po expanzi



Termodynamická účinnost

Účinnost respektující nedokonalost termodynamické přeměny v turbině (děj není zcela adiabatický a dochází k navyšování entropie sdílením tepla do okolí) je tzv. termodynamická účinnost.

$$\eta_{TD} = \frac{h_S}{h_{ad}} = \frac{i_a - i_K}{i_a - i_e} \approx 0.7 \div 0.9$$



Výsledná a celková tepelná účinnost

Výsledná tepelná účinnost respektuje jak tepelnou účinnost cyklu, tak termodynamickou účinnost turbíny:

$$\eta_T = \eta_{T0} \cdot \eta_{TD}$$

Celková účinnost elektrárenského bloku respektuje navíc účinnost kotle, parovodů, mechanickou účinnost soustrojí, účinnost generátoru a blokového transformátoru:

$$\eta_T^{el} = \eta_K \cdot \eta_P \cdot \eta_{T0} \cdot \eta_{TD} \cdot \eta_M \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tr}$$

η_K - účinnost kotle 0.8 až 0.9

η_P - účinnost parovodů 0.97 až 0.99

η_M - mechanická účinnost soustrojí
0.97 až 0.99

η_G - elektrická účinnost alternátoru
0.97 až 0.99

η_{Tr} - elektrická účinnost
transformátoru 0.97 až 0.99