

Elektrárny B1M15ENY

přednáška č. 6

**Tepelné oběhy:
Stavové změny
Typy oběhů
Možnosti zvýšení účinnosti**



Ing. Jan Špetlík, Ph.D.
ČVUT FEL Katedra elektroenergetiky
E-mail: spetlij@fel.cvut.cz

Základní pojmy v termodynamice

Termodynamika:

= obor fyziky, který se zabývá vlastnostmi a procesy makroskopických soustav spojených s teplem a tepelnými jevy

Termodynamický systém:

= makroskopická soustava, která je omezena myšleným nebo skutečným rozhraním (např. kondenzátor, turbína, píst motoru apod.). Tato soustava může být vzhledem ke svému okolí **izolovaná**, **neizolovaná**, **uzavřená** nebo **otevřená**. popř. dle míry stejnorodosti **homogenní** či **heterogenní**. Uvnitř této soustavy mohou probíhat změny. Stav této soustavy lze *jednoznačně* charakterizovat pomocí určitého počtu **stavových veličin** popř. **jejich funkcí**

Termodynamické veličiny:

stavové veličiny – intenzivní – nezávislé na velikosti systému, např.

teplota	tlak	měrný objem	měrná entropie	měrná entalpie	měrná vnitř. energie
T [K]	p [Pa]	v [m ³ .kg ⁻¹]	s [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	i [J.kg ⁻¹]	u [J.kg ⁻¹]

stavové veličiny – extenzivní – závislé na velikosti systému, mají aditivní charakter, např.

objem	látkové množství	entropie	entalpie	vnitř. energie
V [m ³]	n [mol]	S [J.K ⁻¹]	I [J]	U [J]

Základní pojmy v termodynamice

nestavové (procesní) veličiny – nepopisují stav (nejsou funkcemi stavových veličin), závislé na *změně stavu* systému, např.

práce	měrná práce	teplo	měrné teplo
A [J]	a [J.kg ⁻¹]	Q [J]	q [J.kg ⁻¹]

Termodynamický děj (proces):

= přechod systému od jednoho stavu k jinému. U **vratného (reverzibilního děje)** lze původního stavu dosáhnout obrácením pořadí jednotlivých úkonů narozdíl od **nevratného (ireverzibilního děje)**.

Tepelný oběh:

= sled změn po kterém se systém dostane do původního stavu (tj. všechny stavové veličiny nabývají svých počátečních hodnot, pro nestavové veličiny to neplatí!!)

Pozn. Skutečný oběh idealizujeme vratnými ději, v reálném oběhu jsou však *nevratné děje* a to v důsledku:

- změny rychlosti proudění
- změny hmotnosti pracovního média
- nevratné změny skupenství

Základní pojmy v termodynamice

Vnitřní energie: U [J], u [J.kg⁻¹]

= součet celkové kinetické energie všech neuspořádaně se pohybujících částic tělesa a celkové potenciální energie vzájemné polohy těchto částic, není však zahrnuta kinetická a potenciální energie systému jako celku. Vnitřní energie systému se může měnit, pouze tak, že část své energie (kinetické, tepelné, chemické, jaderné) předá či naopak získá od svého okolí.

Entropie: S [J.K⁻¹], s [J.kg⁻¹.K⁻¹]

= míra neuspořádanosti (poloh a rychlostí částic) systému, „míra pravděpodobnosti stavu“.

Pro dokonale uspořádaný systém (=krystalická mříž při 0 K) je $s=0$.

V důsledku průběhu nevratných dějů (např. tření, škrcení apod.) entropie *v izolované soustavě* vzrůstá ($ds > 0$), pro vratné děje ($ds = 0$).

Entalpie: I [J], i [J.kg⁻¹]

= „tepelný obsah“ tj. součet vnitřní (u) a mechanické ($p.v$, kde p =tlak, v =m. objem soustavy) energie látky. Pro jednotkové množství látky platí definiční vztah: $i = u + p.v$

Základní pojmy v termodynamice

Práce: A [J], a [J.kg⁻¹]

= uspořádanou formou předaná energie z jednoho systému do druhého



- práce není stavová, ale *procesní veličina*

- da není totální diferenciál, označujeme δa

- její velikost nezávisí jen na poč. a kon. stavu, ale i na cestě

$$\int_{(c1)}^2 \delta a \neq \int_{(c2)}^2 \delta a$$

- systém při přechodu ze stavu 1 do stavu 2 vykoná *objemovou (technickou) práci*: $a = \int_1^2 p.dv$
tedy $\delta a = p.dv$

Pozn. Další druhy práce: *chemická* $\delta a = \mu.dn$, *elektrická* $\delta a = \varphi_e.dq_e$

Teplo: Q [J], q [J.kg⁻¹]

= změna vnitřní energie systému, jejíž podstatou není práce



- teplo není stavová, ale *procesní veličina*

- dq není totální diferenciál, označujeme δq

- jeho velikost nezávisí jen na poč. a kon. stavu, ale i na cestě

$$\int_{(c1)}^2 \delta q \neq \int_{(c2)}^2 \delta q$$

- pro *vratné děje* platí, že $ds = \frac{\delta q}{T}$

Základní pojmy v termodynamice

Nultá věta termodynamická:

Je-li systém 1 v termodynamické rovnováze (tj. stavu, při kterém se stavové veličiny v čase samovolně nemění) se systémem 2 a současně je systém 2 v termodynamické rovnováze se systémem 3, potom je také systém 3 v rovnováze se systémem 1.

První věta termodynamická:

Změna vnitřní energie v uzavřené soustavě může probíhat pouze změnou práce nebo výměnou tepla

$$du = \delta q - \delta a$$

Druhá věta termodynamická:

Celková entropie izolované soustavy nemůže klesat

v izolované soustavě ($\delta q = 0$), nevratné děje: $ds > \frac{\delta q}{T} = 0$, vratné děje: $ds = \frac{\delta q}{T} = 0$

Třetí věta termodynamická:

Žádným konečným počtem tepelných oběhů nelze dosáhnout teploty $T=0$ K.

Základní pojmy v termodynamice

Pro systém konající pouze objemovou práci s konstantním počtem částic lze odvodit rovnice:

$$du = \delta q - \delta a = T.ds - p.dv$$

$$di = d(u + p.v) = du + p.dv + v.dp = \delta q + v.dp = T.ds + v.dp$$

Obecně tedy platí, že:

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v .ds + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_s .dv \quad \text{tedy} \quad \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v = T \quad \text{a} \quad \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_s = -p$$

$$di = \left(\frac{\partial i}{\partial s} \right)_p .ds + \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_s .dp \quad \text{tedy} \quad \left(\frac{\partial i}{\partial s} \right)_p = T \quad \text{a} \quad \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_s = v$$

Ideální plyn a jeho vlastnosti

Ideální plyn:

Dokonale stlačitelný plyn, jehož částice mají zanedbatelné rozměry, kromě srážek na sebe nijak nepůsobí, srážky částic jsou dokonale pružné. Platí *ekvipartiční teorém*.

Ekvipartiční teorém:

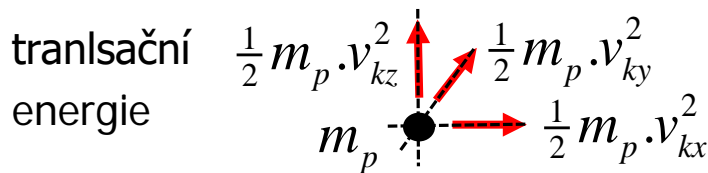
Vnitřní energie se ukládá do volných směrů posunů a otáčení částic = stupňů volnosti. Protože je mezi jednotlivými stupni volnosti možná dokonalá výměna energie, připadá na každý stupeň volnosti stejná energie, která má hodnotu:

na 1 molekulu $\frac{1}{2} kT$

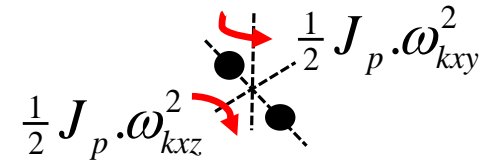
$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1}]$ Boltzmannova konstanta

na 1 mol $\frac{1}{2} rT$

$r = \frac{N_A \cdot k}{M}$ měrná plynová konstanta

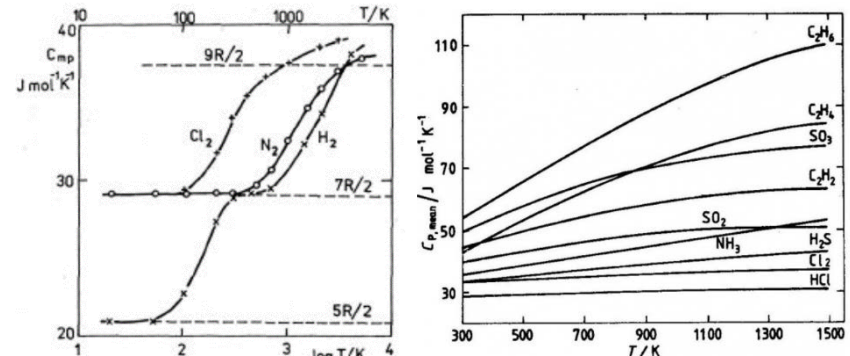


rotační energie



Pozn. Chování reálných plynů:

molekula	jednoatomová	dvouatomová	tříatomová
stupně volnosti	3 (<i>trans.</i>) celkem 3	3 (<i>trans.</i>) + 2 (<i>rot.</i>) celkem 5	3 (<i>trans.</i>) + 3 (<i>rot.</i>) celkem 6
příklady	<i>He, Ne, Ar</i>	<i>H₂, O₂, N₂</i>	<i>H₂O, CO₂</i>
měrná vnitřní energie	$\frac{3}{2} \cdot r \cdot T$	$\frac{5}{2} \cdot r \cdot T$	$3 \cdot r \cdot T$



příčina – energie je kvantována

Stavová rovnice plynů

Stavová rovnice ideálního plynu:

$$p \cdot v = r \cdot T$$

p [Pa] tlak plynu

r [J.K⁻¹.kg⁻¹] měrná plynová konstanta

T [K] termodynamická teplota

v [m³.kg⁻¹] měrný objem

Mayerův vztah:

Vztah mezi tepelnými kapacitami při stálém objemu a tlaku

$$\delta q = du - \delta a = du + p \cdot dv$$

$$\delta q|_{v=\text{konst}} = du = c_v \cdot dT$$

$$\delta q|_{p=\text{konst}} = du + p \cdot dv = c_p \cdot dT$$

$$c_v \cdot dT + p \cdot dv = c_p \cdot dT$$

$$\Downarrow \quad \uparrow_{=0}$$

$$p \cdot v = r \cdot T \Rightarrow p \cdot dv + v \cdot dp = r \cdot dT \Rightarrow c_v \cdot dT + r \cdot dT - v \cdot dp = c_p \cdot dT$$

c_v [J.K⁻¹.kg⁻¹] tepelná kapacita při stálém objemu c_p [J.K⁻¹.kg⁻¹] tepelná kapacita při stálém tlaku

$$c_p = c_v + r$$

Stavové změny

V tepelných obězích dělíme změny stavů na tyto základní změny:

Změna izobarická:

Např. ohřev napájecí vody, přehřívání a přihřívání páry, platí:

$$\delta q|_{p=\text{konst}} = du + p.dv = d i|_{p=\text{konst}}$$

$$\Rightarrow q|_{p=\text{konst}} = i_2 - i_1$$

$$\delta a|_{p=\text{konst}} = \delta q - du$$

$$\Rightarrow a|_{p=\text{konst}} = i_2 - i_1 + u_1 - u_2$$

Ze stavové rovnice navíc:

$$\delta q|_{p=\text{konst}} = c_v dT + r.dT = c_p .dT$$

$$\Rightarrow q|_{p=\text{konst}} = c_p .(T_2 - T_1)$$

$$\delta a|_{p=\text{konst}} = p.dv = r.dT$$

$$\Rightarrow a|_{p=\text{konst}} = p.(v_2 - v_1) = r.(T_2 - T_1)$$

Změna izochorická:

Např. najíždění při uzavřených ventilech, platí:

$$\delta q|_{v=\text{konst}} = du + p.dv = du$$

$$\Rightarrow q|_{v=\text{konst}} = u_2 - u_1$$

$$\delta a|_{v=\text{konst}} = dq - du = p.dv = 0$$

$$\Rightarrow a|_{v=\text{konst}} = 0$$

Ze stavové rovnice navíc:

$$\delta q|_{v=\text{konst}} = c_v dT$$

$$\Rightarrow q|_{v=\text{konst}} = c_v .(T_2 - T_1)$$

Stavové změny

Změna izotermická:

Např. pomalá komprese/expanze, platí:

$$\delta q|_{T=\text{konst}} = Tds$$

$$\delta a|_{T=\text{konst}} = \delta q - du$$

$$\Rightarrow q|_{T=\text{konst}} = T \cdot (s_2 - s_1)$$

$$\Rightarrow a|_{T=\text{konst}} = T \cdot (s_2 - s_1) + u_1 - u_2$$

Nemění-li se vnitřní struktura látky: $\delta a|_{T=\text{konst}} = \delta q|_{T=\text{konst}} \Rightarrow a|_{T=\text{konst}} = T \cdot (s_2 - s_1)$

Ze stavové rovnice navíc:

$$\delta q|_{T=\text{konst}} = \delta a|_{T=\text{konst}} = \frac{rT}{v} \cdot dv$$

$$\Rightarrow q|_{T=\text{konst}} = a|_{T=\text{konst}} = rT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = rT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Změna adiabatická (izoentropická):

Nedochází k výměně tepla s okolím, např. idealizovaná adiabatická expanze v turbíně, platí:

$$\delta q|_{s=\text{konst}} = Tds = 0$$

$$\delta a|_{s=\text{konst}} = \delta q - du = -du$$

$$\Rightarrow q|_{s=\text{konst}} = 0$$

$$\Rightarrow a|_{s=\text{konst}} = u_1 - u_2$$

Protože: $\delta q|_{s=\text{konst}} = 0 = du + p \cdot dv = c_v \cdot dT + p \cdot dv = c_v \cdot \frac{p \cdot dv + v \cdot dp}{r} + p \cdot dv$

Stavové změny

$$0 = (c_v + r) \cdot p \cdot dv + c_v \cdot v \cdot dp \Rightarrow c_p \cdot \frac{dv}{v} + c_v \cdot \frac{dp}{p} = \kappa \cdot \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} \Rightarrow p \cdot v^\kappa = konst$$

$$\text{Platí: } \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \text{ [-] Poissonova konstanta}$$

reálné plyny:

$$\kappa = \frac{c_v + r}{c_v} = \frac{\frac{du}{dT} + r}{\frac{du}{dT}} = \begin{cases} \frac{\frac{3}{2}r + r}{\frac{3}{2}r} = \frac{5}{3} & \text{jednoatomový plyn} \\ \frac{\frac{5}{2}r + r}{\frac{5}{2}r} = \frac{7}{5} & \text{dvouatomový plyn} \\ \frac{3 \cdot r + r}{3 \cdot r} = \frac{4}{3} & \text{víceatomový plyn} \end{cases}$$

$$H_2O : \kappa_{100^\circ C} = 1,33, \kappa_{500^\circ C} = 1,28$$

$$O_2 : \kappa_{20^\circ C} = 1,4, \kappa_{400^\circ C} = 1,34$$

$$CO_2 : \kappa_{20^\circ C} = 1,24, \kappa_{400^\circ C} = 1,28$$

$$\delta a \Big|_{s=konst} = -du = -c_v \cdot dT = -\frac{r}{\kappa - 1} \cdot dT$$

$$\Rightarrow a \Big|_{s=konst} = \frac{r}{\kappa - 1} (T_1 - T_2)$$

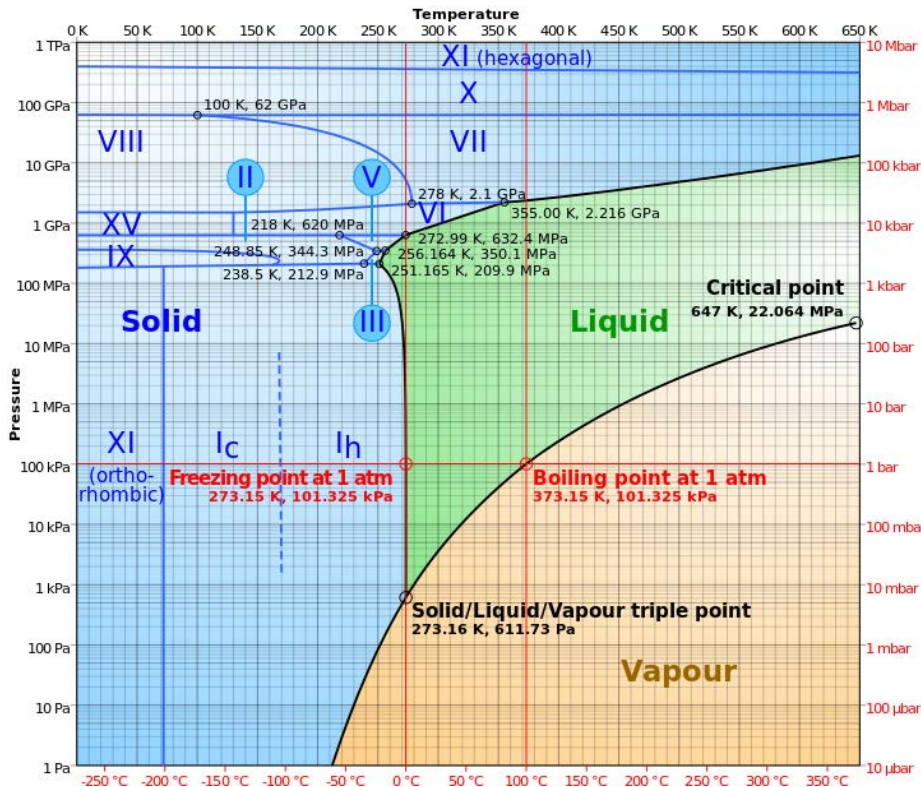
Změna polytropická:

Teplo vyměňované s okolím je úměrné teplotní změně, např. reálná polytropická expanze v turbíně, „něco mezi“ změnou izotermickou a adiabatickou platí:

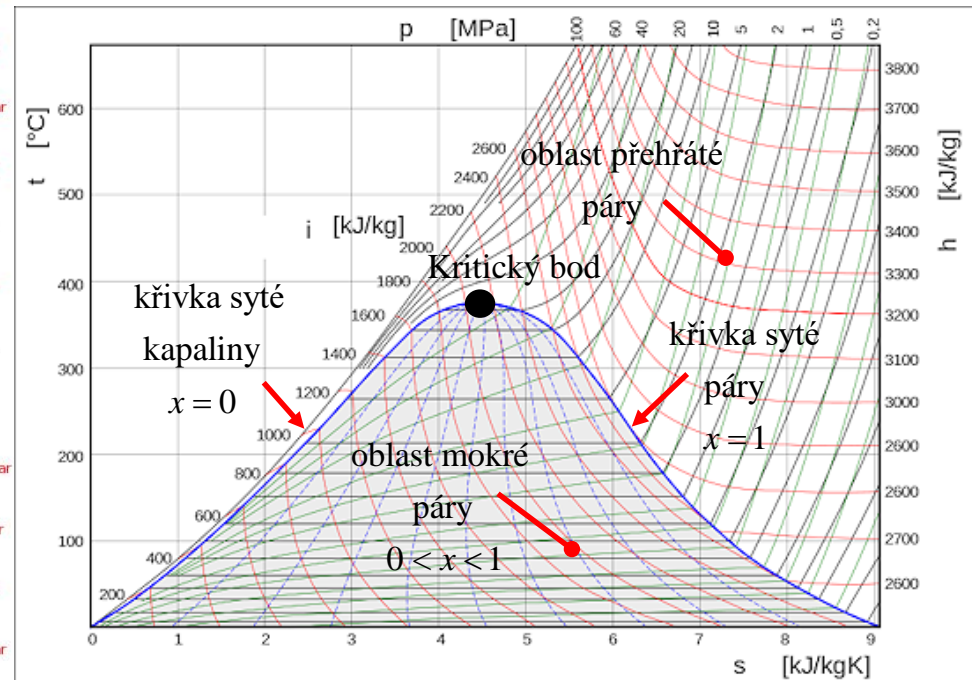
$$p \cdot v^n = konst \quad 1 < n < \kappa$$

Vlastnosti vody a vodní páry

Fázový diagram:



T-s diagram:

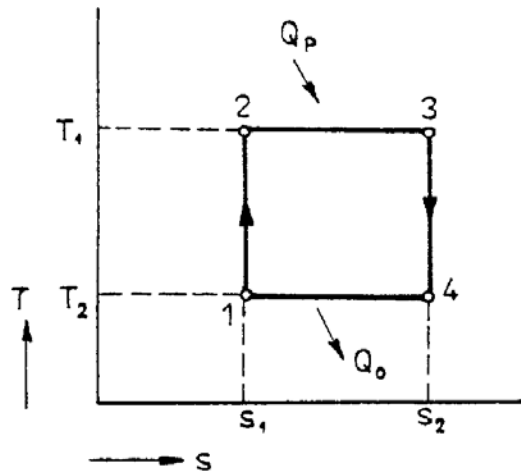
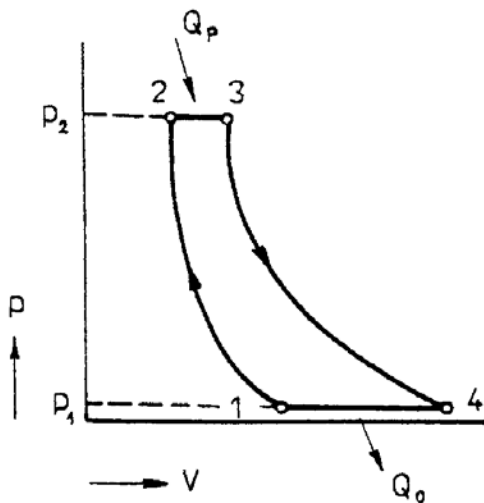


Používají se diagramy vodní páry T - s nebo i - s (měrná entalpie-entropie). Mezní křivky odpovídají syté kapalině ($x = 0$) a syté páře ($x = 1$) a protínají se v kritickém bodě. Oblast mokré páry je mezi mezními křivkami. Oblast přehřáté páry je nad mezní křivkou syté páry ($x=1$). Teplota je při fázovém přechodu za daného tlaku konstantní, v oblasti mokré páry je proto izoterma shodná s izobarou.

$$x = \frac{m_{\text{páry}}}{m_{\text{vody}} + m_{\text{páry}}} \quad [-] \quad \text{suchost páry (syťá pára: } x = 1, \text{ syťá kapalina: } x = 0)$$

Carnotův oběh

- největší účinnost
- jen pro ideální plyny (přibližně realizovatelný v oblasti mokré páry)
- 4 vratné změny pracovní látky:
 - 2→3 ... **izotermická expanze** (při teplotě ohřívacího tělesa T_1) {ohřev v kotli}.
Do systému se přivádí teplo q_p .
 - 3→4 ... **adiabatická expanze** (při poklesu teploty z T_1 na T_2) {turbína}
 - 4→1 ... **izotermická komprese** (při teplotě T_2 ochlazovacího tělesa) {kondenzátor}.
Odvod tepla q_o ze systému.
 - 1→2 ... **adiabatická komprese** (mezi teplotami T_1 a T_2) {stlačení v čerpadle (kompresoru)}



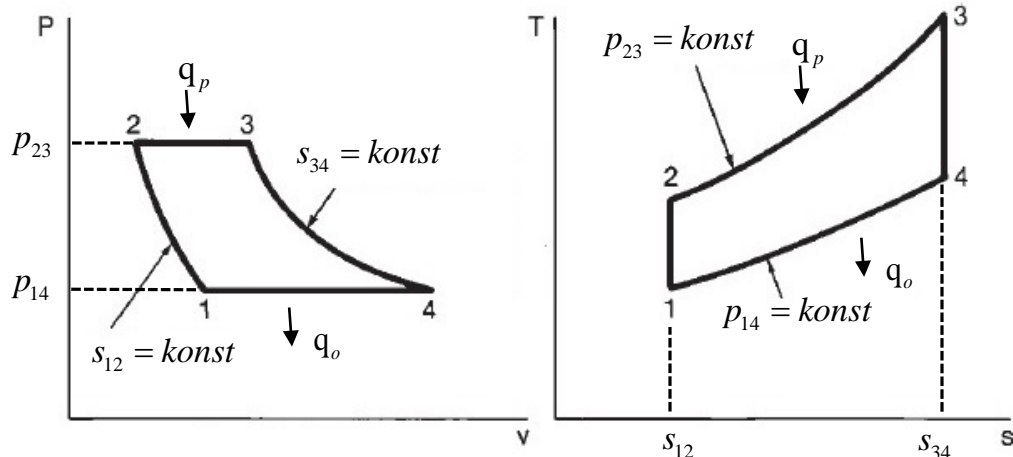
Účinnost:

$$\eta = \frac{q_p - q_o}{q_p} = \frac{T_1 \cdot (s_2 - s_1) - T_2 \cdot (s_2 - s_1)}{T_1 \cdot (s_2 - s_1)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Jouleův (Braytonův) oběh

- 1→2 ... **adiabatická komprese plynu** {kompresor}
- 2→3 ... **izobarický přívod tepla** {spalovací komora}
- 3→4 ... **adiabatická expanze plynu** {plynová turbína}
- 4→1 ... **izobarický odvod tepla** {v uzavřených obězích v tepelném výměníku, v otevřených obězích přes atmosféru}



Přivedené teplo: $q_p = i_3 - i_2 = c_p \cdot (T_3 - T_2)$

Odvedené teplo: $q_o = i_4 - i_1 = c_p \cdot (T_4 - T_1)$

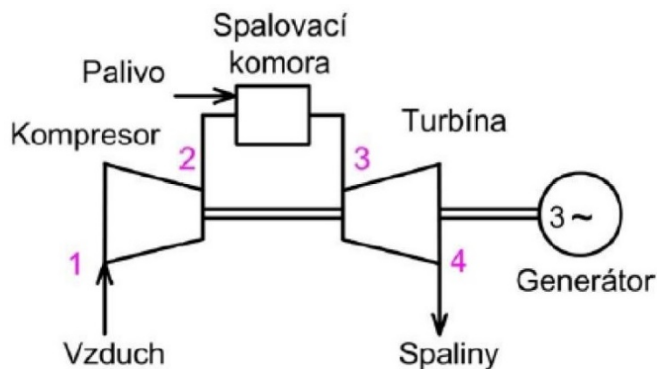
Práce: $a = (i_3 - i_2) - (i_4 - i_1)$

Kompresní poměr: $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}}$

Účinnost:

$$\eta = \frac{q_p - q_o}{q_p} = 1 - \frac{i_4 - i_1}{i_3 - i_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$\approx 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_{14}}{p_{23}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$



Clausius-Rankinův oběh

využívá skupenské změny mezi kapalinou a párou

⇒ úplná kondenzace páry na kapalinu

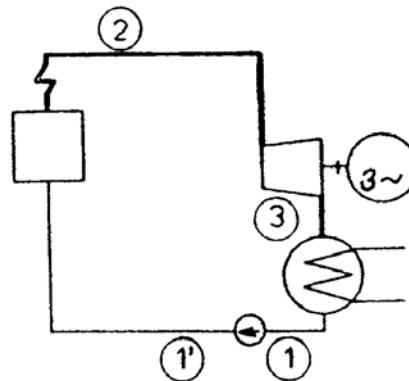
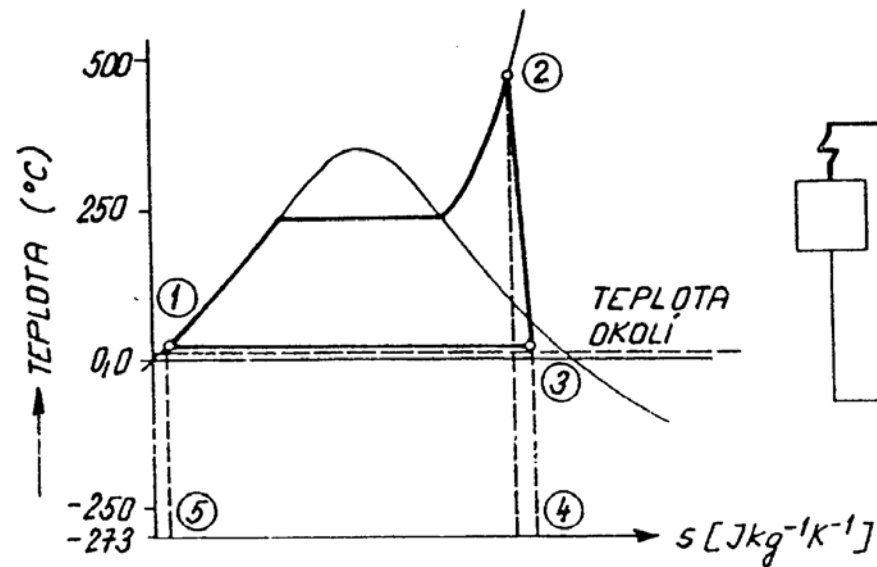
Příkon napájecího čerpadla je podstatně menší než příkon kompresoru !

1... stlačení kapaliny na pracovní tlak {čerpadlo}

1→2 ... dodání tepla q_p {kotel} = ohřev na bod varu + izotermické odpaření + přehřátí páry

2→3 ... adiabatická expanze {parní turbína}

3→4 ... izotermická kondenzace {kondenzátor} , odvod tepla q_o



Přivedené teplo: $q_p = i_2 - i_1$

Odvedené teplo: $q_o = i_3 - i_1$

Práce čerpadla: $a = (p_2 - p_1) \cdot v$

Účinnost:

$$\eta = \frac{q_p - q_o}{q_p} = \frac{i_2 - i_3 - (p_2 - p_1) \cdot v}{i_2 - i_1 - (p_2 - p_1) \cdot v} \approx \frac{i_2 - i_3}{i_2 - i_1}$$

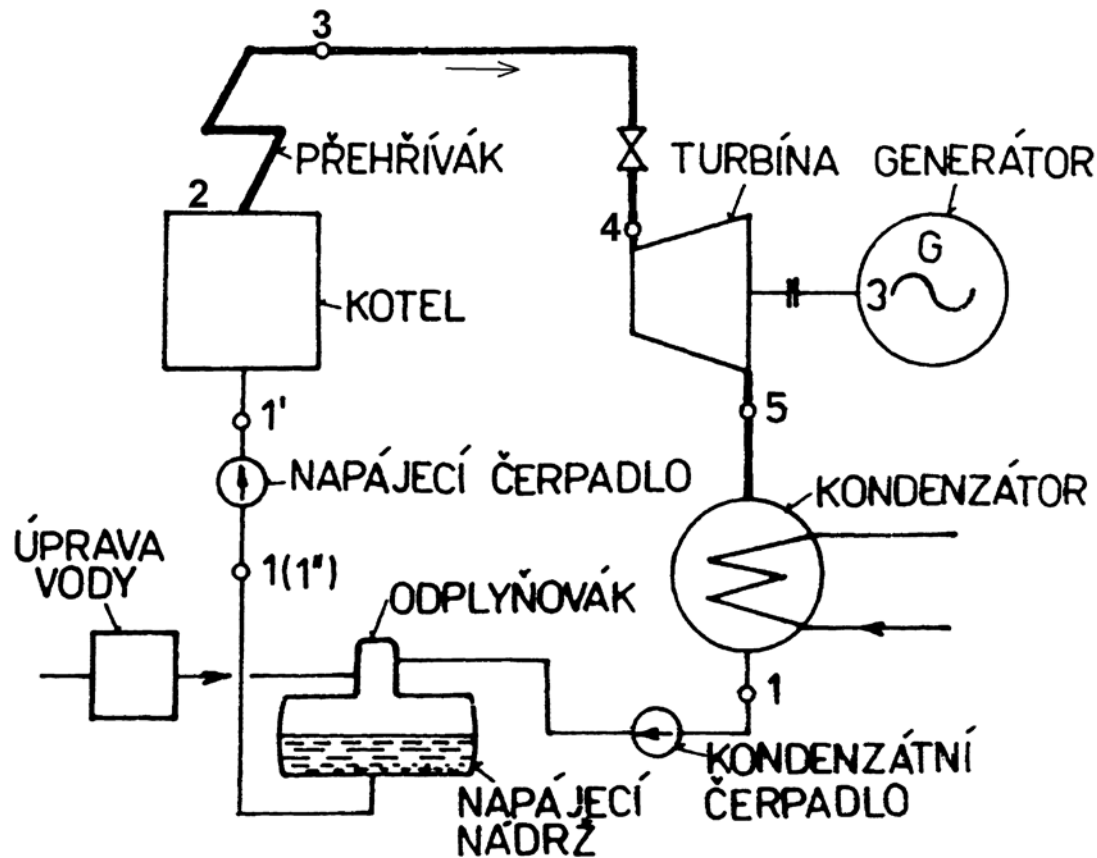
Elektrárna s kondenzační turbínou

Typ turbíny: kondenzační - chlazení výstupní páry z turbíny v kondenzátoru

Kondenzát: 25 – 40 °C

Napájecí voda: > 104 °C [vypuzení plynů (vzduchu, kyslíku) → koroze !] ⇒

~ 200 °C = kondenzáty + přídavková voda na krytí ztrát ve výrobním okruhu páry a vody

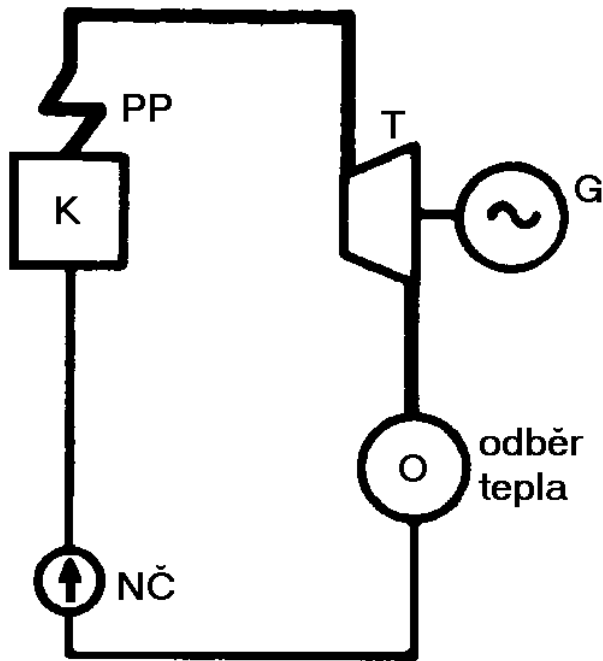


Elektrárna s protitlakou turbínou

Typ turbíny: protitlaká – pára z turbíny je využitelná pro teplotenský provoz

Nevýhoda: *Přímá závislost el. výkonu generátoru na tepelném zatížení spotřebiče v protitlaké síti turbíny*

$$\frac{Q}{P_{el}} = konst$$



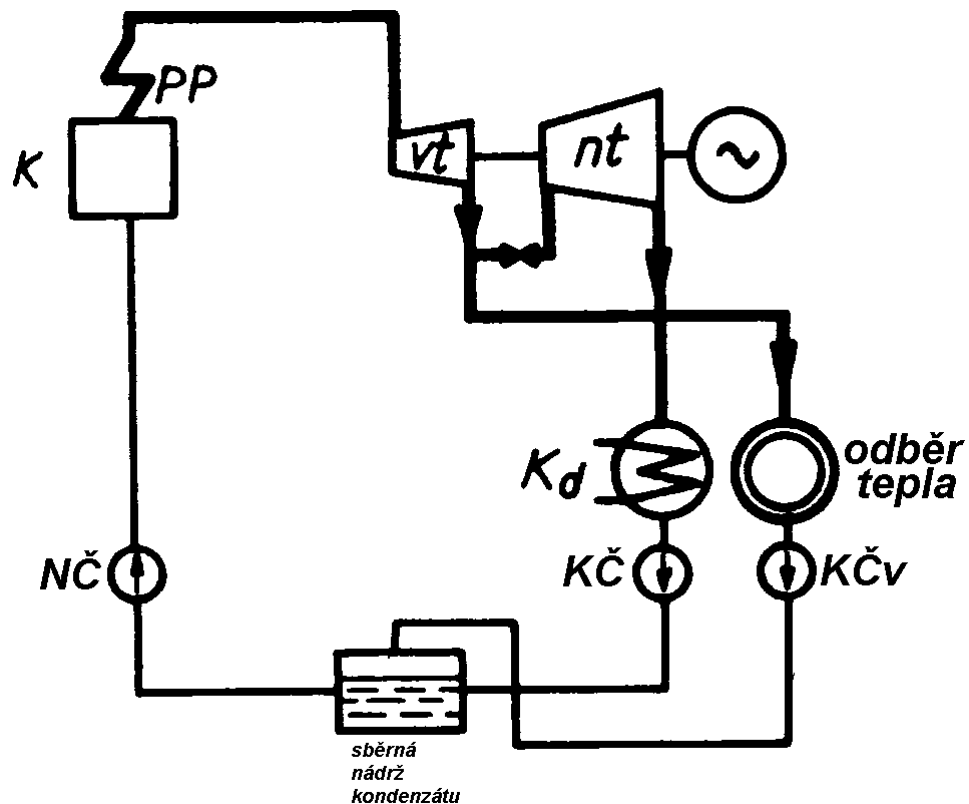
Pára z výstupu turbíny využita v ohřívácích pro teplotenský provoz kondenzuje za obdobných podmínek jako v kondenzátoru v ohříváku topné vody. Předává však teplo topné vodě a teplota kondenzátu je tedy vyšší – cca 100°C

Vzhledem k využitému předanému teplu skupenské změny pára-voda je protitlaká turbína při chodu na jmen. parametrech nejúčinnější

Elektrárna s odběrovou turbínou

kombinovaná výroba el. a tepel. energie (kondenzační elektrárna + teplárna) ⇒
turbína s dvěma odběry
Elektrárna s teplárenským provozem

Výhoda: El. výkon se může měnit v širokém rozsahu daném vt turbíny, nezávisle na zatížení tepelného spotřebiče (odběru tepla)



Přihřívání páry

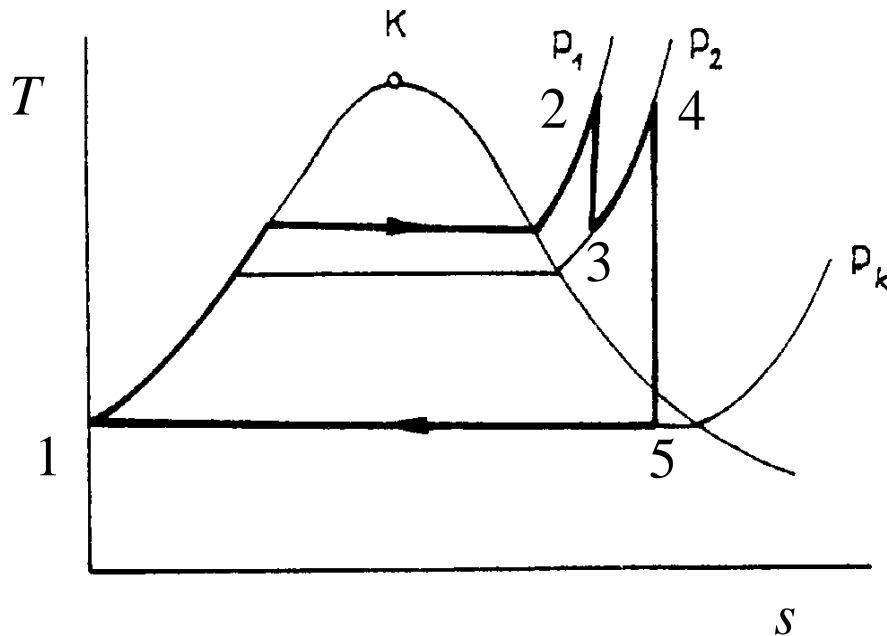
Částečná expanze páry ve vt (vysokotlaké) části turbíny - přihřátí páry v přihříváku - dokončení expanze v nt (nízkotlaké) části turbíny

Výhody:

výrazné zvýšení účinnosti (jednostupňové přihřátí: o cca 5-7 %, druhé přihřátí: o cca 1-2 %)

zmenšení vlhkosti páry na konci expanze (tj. na posledních lopatkách turbíny) \Rightarrow zvýšení termodynamické účinnosti turbíny

snížení nebezpečí eroze lopatek turbíny (vodní kapky na posledních lopatkách nt části turbíny)



Přivedené teplo: $q_p = i_2 - i_1 + i_4 - i_3$

Odvedené teplo: $q_o = i_5 - i_1$

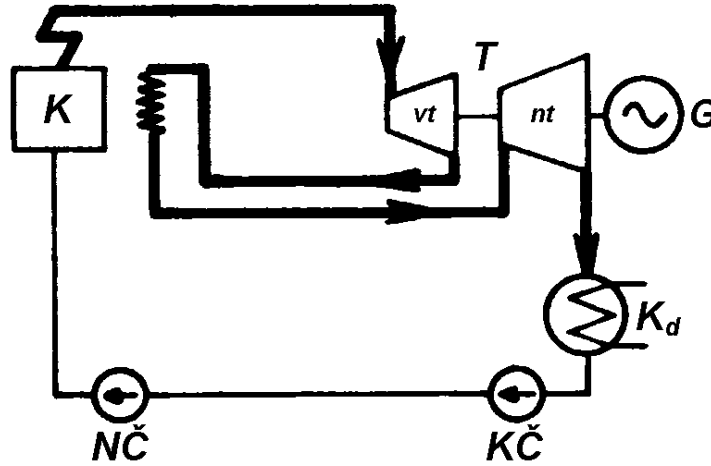
Práce čerpadla: $a = (p_2 - p_1) \cdot v$

Účinnost:

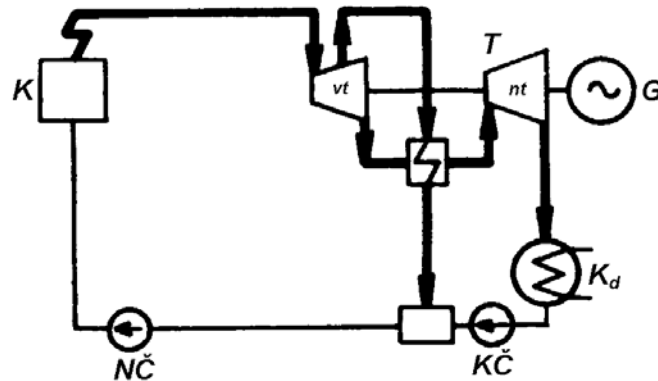
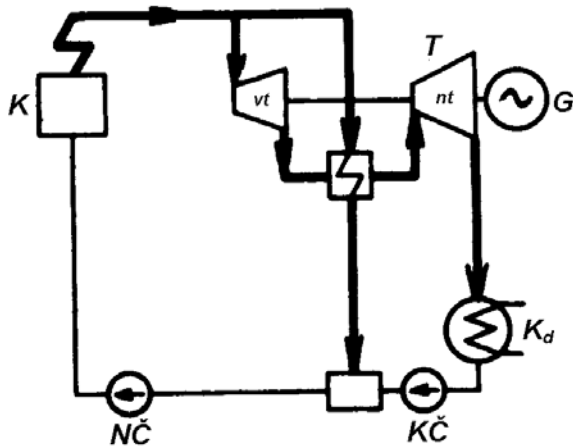
$$\eta = \frac{i_2 - i_5 + i_4 - i_3 - (p_2 - p_1) \cdot v}{i_2 - i_1 + i_4 - i_3 - (p_2 - p_1) \cdot v}$$
$$\approx \frac{i_2 - i_5 + i_4 - i_3}{i_2 - i_1 + i_4 - i_3}$$

Přihřívání páry

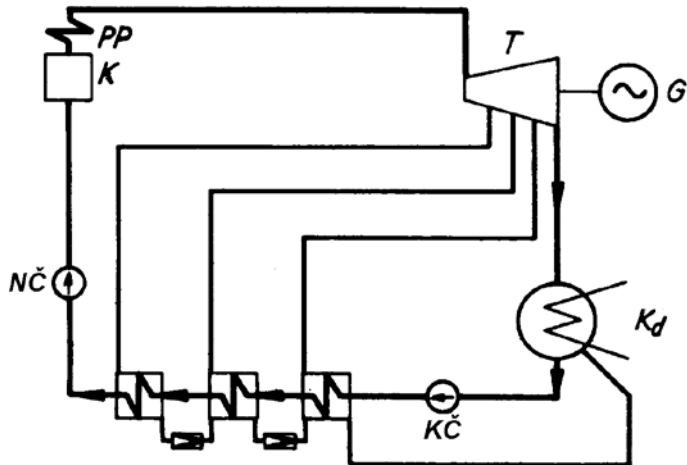
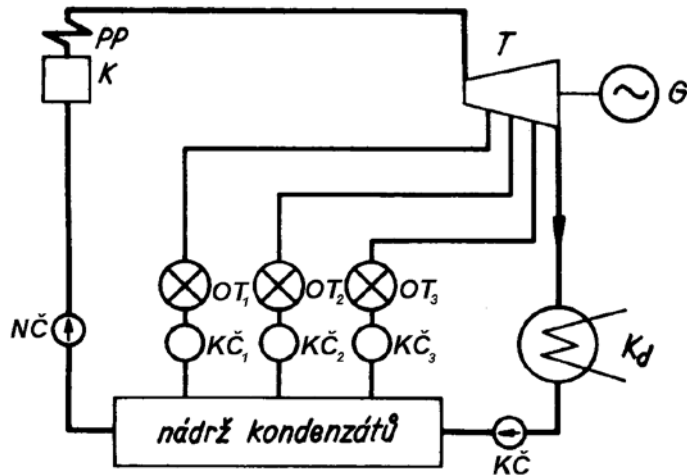
Přihřívání páry kouřovými plyny z kotle:



Přihřívání páry ostrou nebo odběrovou párou:



Rekuperační ohřev napájecí vody



Odebrání části páry (o vhodné teplotě) z turbíny („neregulovaný odběr“) její kondenzačního teplo je pak použito na ohřev kondenzátu a napájecí vody.
Max. počet ohřivačů: 8 až 10 (pak klesá účinnost).
zvýšení termodynamické účinnosti tepelného oběhu postupné zmenšování množství páry v posledních stupních turbíny (\Rightarrow **menší rozměry posledního stupně turbíny, větší průtok páry \Rightarrow zvýšení výkonu turbíny !**)

Snížení tlaku v kondenzátoru

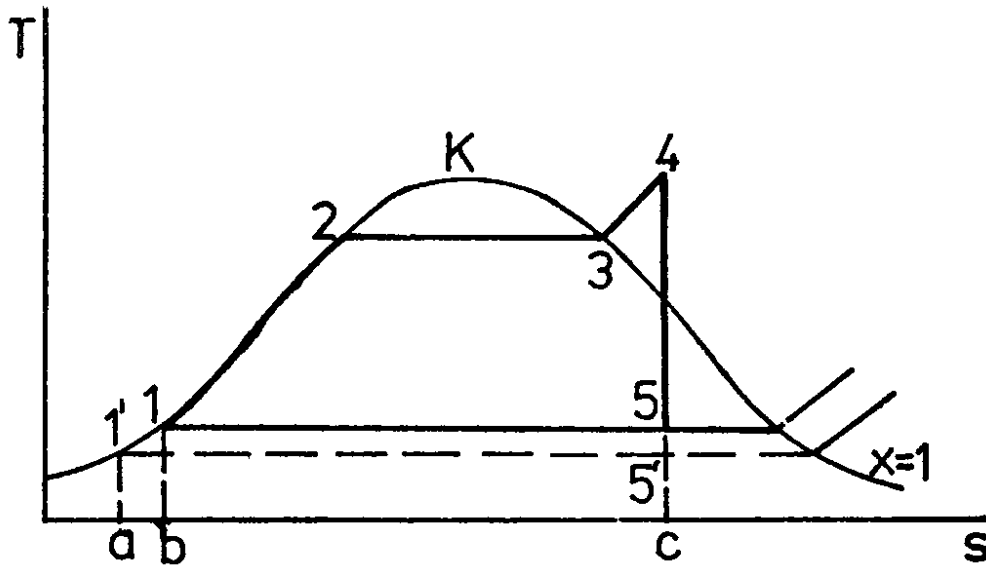
snížením tlaku a teploty v kondenzátoru dosáhnou větší q_o , ale celkově se účinnost zvýší

Možnosti snížení tlaku v kondenzátoru:

snížení teploty chladicí vody (**nejvýhodnější !**)

zvětšení průtoku chladicí vody (**nevýh.:** zvýš. výkonu čerpadel \Rightarrow zvýš. vlastní spotřeby)

zvětšení teplovýměnné plochy v kondenzátoru (**nevýh.:** zvýš. investič. nákladů)



↑
přírůstek odvedeného tepla

↑
přírůstek práce

Přivedené teplo: $q_p = i_4 - i_1$

Odvedené teplo: $q_o = i_5' - i_1$

Účinnost:

$$\eta = \frac{q_p - q_o}{q_p} =$$

$$= \frac{i_4 - i_5' - (p_2 - p_1) \cdot v}{i_4 - i_1 - (p_2 - p_1) \cdot v}$$

Zvyšování parametrů vstupní páry

vhodnou kombinací zvýšení tlaku a teploty vstupní („ostré“) páry

Zvyšování TLAKU vstupní páry

Omezení:

Zvyšuje se vlhkost páry na konci expanze \Rightarrow snížení termodynamické účinnosti turbíny.

Max. dovolená vlhkost páry na konci expanze: 12 až 14 %.

Omezení cirkulace v kotli. Kotle s přirozenou cirkulací: max. tlak páry 17 MPa; kotle průtláčné až 24 MPa !

Zvyšování TEPLOTY vstupní páry

zvýšení termické účinnosti oběhu

zvýšení termodynamické účinnosti turbíny (zmenší se vlhkost páry na konci expanze!)

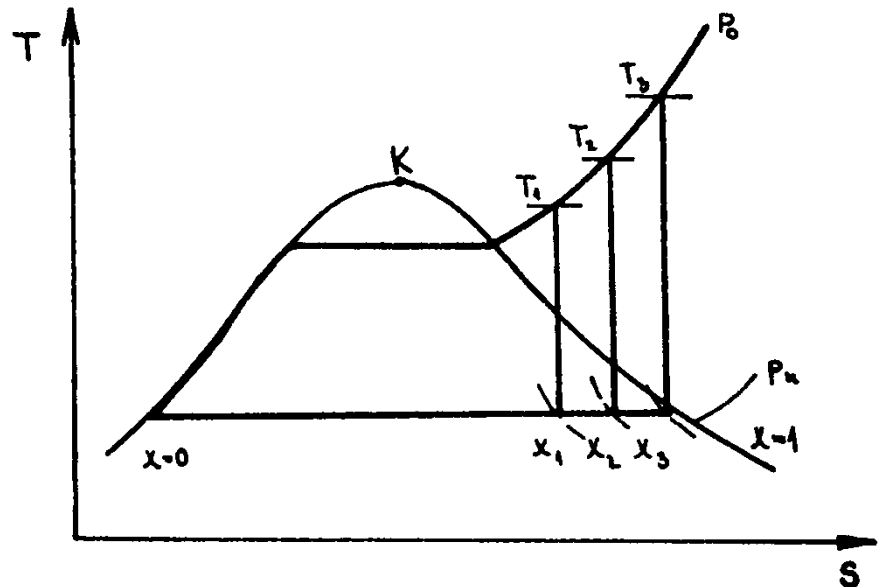
Omezení:

pouze materiálovými možnostmi \Rightarrow

Konstrukce z feriticko-perlitické oceli:
max. teplota páry 535 °C. Pro vyšší teploty: vysokolegovaná austenická ocel.

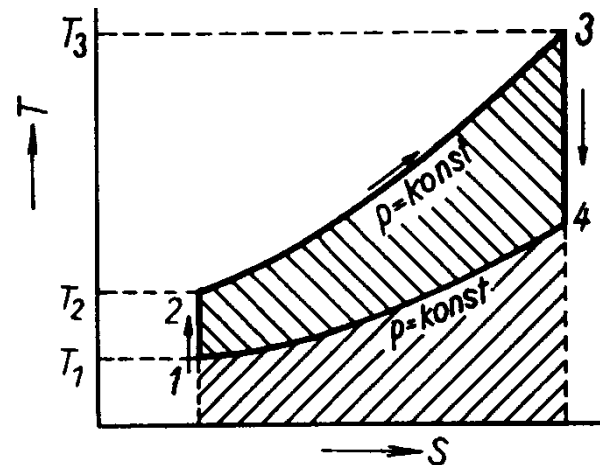
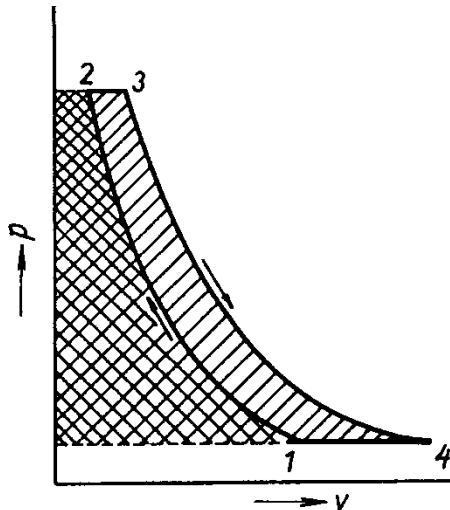
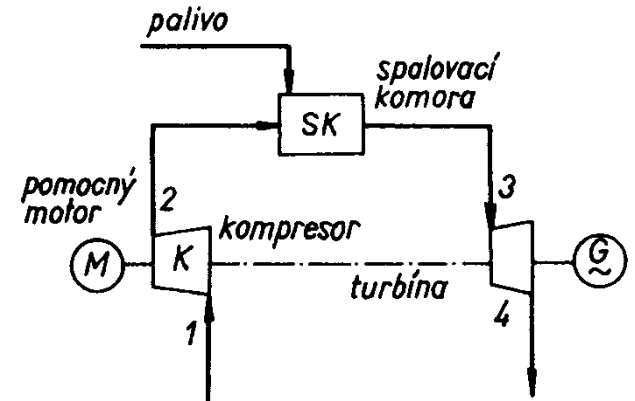
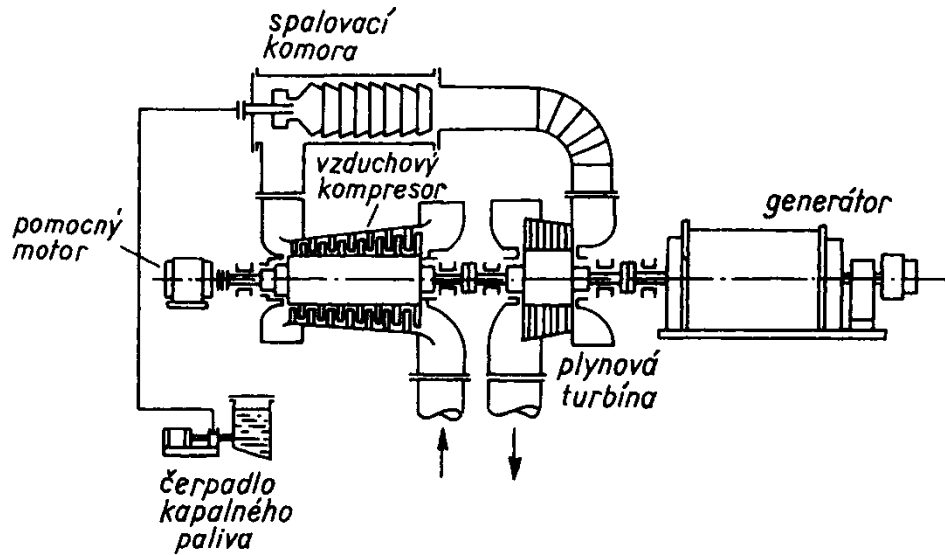
\Rightarrow **Používané teploty páry:**

pro bloky 110 a 200 MW: 535 až 545 °C,
pro 500 MW: 545 °C.



Plynový oběh

Spalovací turbína



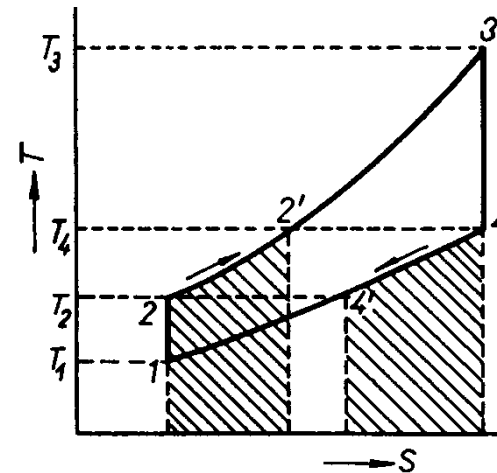
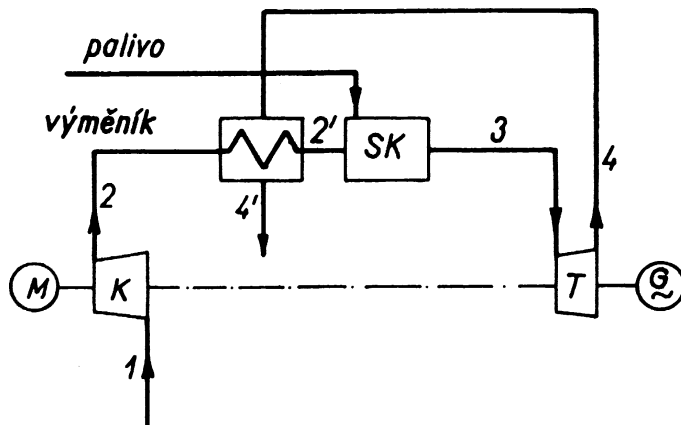
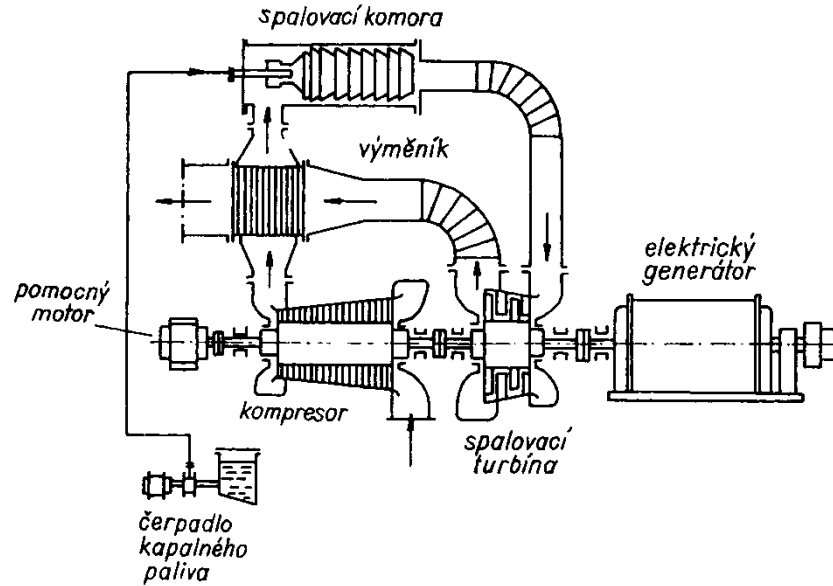
Plynový oběh

Výhody a nevýhody:

- rychlé najíždění a odstavování (výkonová pružnost)
- nízké pořizovací náklady (malá spotřeba materiálu)
- dobrá účinnost (25 až 35 %)
- vysoká provozní spolehlivost
- kompaktní uspořádání stroje, malý obestavěný prostor
- drahé kvalitní palivo (plyn, olej)
- náročnost na výrobu a použité materiály
- velký příkon kompresoru: až 70 % výkonu spalovací turbíny !
- vysoká teplota na výstupu z turbíny (\Rightarrow malá účinnost oběhu): Teplota spalin: $> 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ + vzduch (chlazení) \rightarrow teplota směsi před turbínou: 600 až $800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Regenerace odpadního tepla

Plyny po výstupu z turbíny ohřívají vzduch před vstupem do spalovací komory



Paroplynový cyklus

Teploty:

plynové oběhy:

přívod tepla: 600 až 800 °C (stacionární turbíny až 1300 °C),

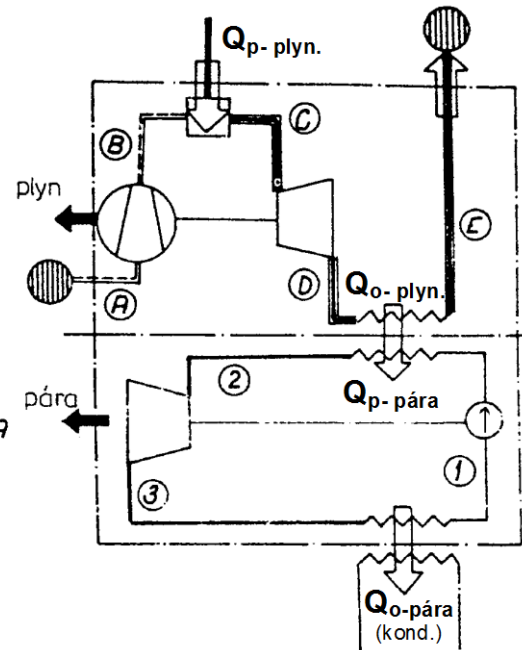
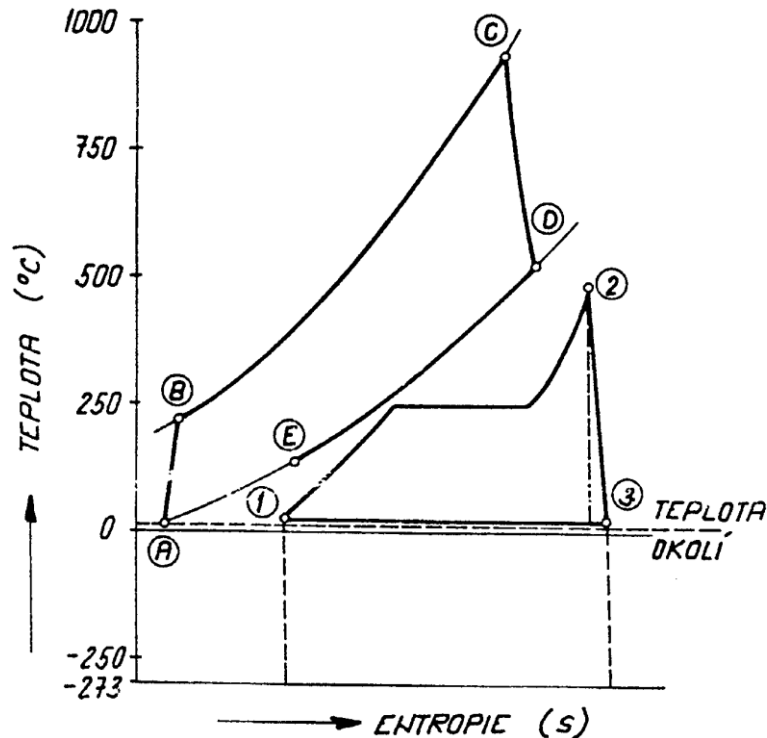
odvod tepla: vysoká teplota \Rightarrow nízká účinnost oběhu

parní oběhy:

přívod tepla: 250 až 350 °C (max. 650 °C),

odvod tepla: cca 30 °C

\Rightarrow kombinace:



Paroplynový cyklus

Výhody:

Vyšší účinnost:

elektrárna s čistě plynovým oběhem: $\eta_{el} = 0,28 - 0,38$

elektrárna s parním oběhem: $\eta_{el} = 0,28 - 0,42$

elektrárna s paroplynovým oběhem: $\eta_{el} = 0,42 - 0,58$

Kompresní práce plynového oběhu se zmenšuje. Díky kondenzaci vodní páry se několikanásobně zmenšuje její objem

⇒ příkon napájecího čerpadla činí řádově procenta výkonu parní turbíny (u čistě plynového oběhu to jsou 2/3 hrubého výkonu turbíny !)

Nevýhody:

Nutno spalovat jakostní palivo (plyn, olej) v plynové části oběhu

Účinnost:

Přivedené teplo (palivo - plyn):

$$q_{pal}$$

Práce plynového oběhu (Braytonův cyklus s účinností η_g):

$$a_g = \eta_g \cdot q_{pal}$$

Odvedené teplo = přivedené teplo do výměníku:

$$q_{og} = (1 - \eta_g) \cdot q_{pal}$$

Přivedené teplo z výměníku (účinnost η_k):

$$q_{ps} = \eta_k \cdot (1 - \eta_g) \cdot q_{pal}$$

Práce parního oběhu (Rankinův cyklus s účinností η_s):

$$a_s = \eta_s \cdot \eta_k \cdot (1 - \eta_g) \cdot q_{pal}$$

Celková účinnost PPC:

$$\eta = \frac{a_g + a_s}{q_{pal}} = \eta_g + \eta_s \cdot \eta_k \cdot (1 - \eta_g)$$

Glosa k 7. přednášce

Cyklus tepelné elektrárny pracuje s přehříváním páry. Tlak $p_2 = 12 \text{ MPa}$, teplota $T_2 = 530 \text{ °C}$, tlak $p_5 = 3,5 \text{ kPa}$. Přehřívání se provádí při tlaku $p_3 = 2,3 \text{ MPa}$ na teplotu $T_4 = 480 \text{ °C}$. Určete zvýšení termické účinnosti cyklu s přehříváním proti cyklu bez přehřívání páry!

