

Základní koncepční otázky projektování elektráren

Technická optimalizace vstupních parametrů R-C cyklu

Cíl: $\eta_{RC} = \max$ $\eta_{RC} = \frac{h_a - h_e}{h_a - h_k}$

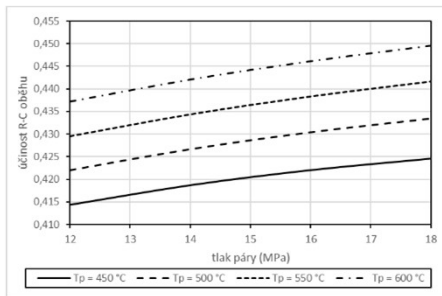
pozor! zanedbána práce NČ $P_{NČ} = \frac{M}{\rho} \cdot \frac{p_a - p_k}{\eta_{NČ}}$

zde $M = 1 \text{ kg/s}$, pro ideální oběh $\eta_{NČ} = 1, p_a \gg p_k \Rightarrow p_k = 0$

$\eta_{RC} = \frac{h_a - h_e - \frac{p_a}{\rho}}{h_a - h_k - \frac{p_a}{\rho}}$ podrobena analýze

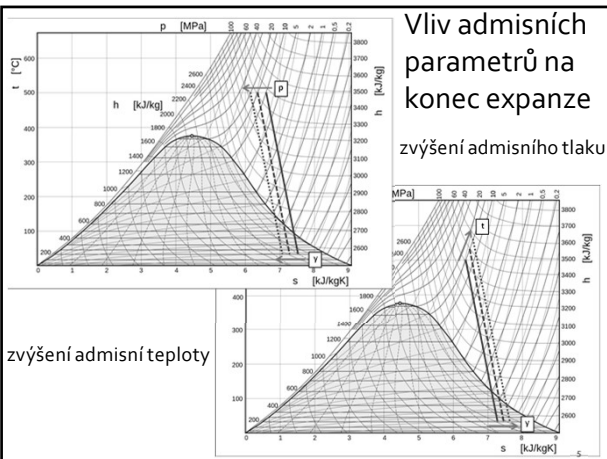
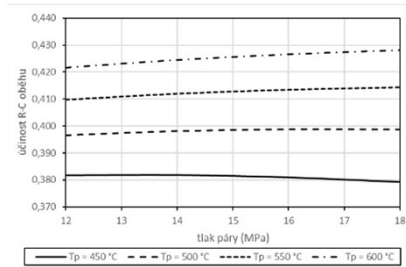
Výsledek výpočtu: - pro ideální R-C cyklus

- s rostoucí teplotou η_{RC} roste
- s rostoucím tlakem η_{RC} roste



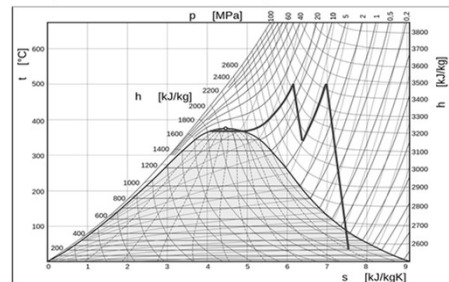
Vliv termodynamické účinnosti turbíny na η_{RC} (vliv expanze v mokré páře u koncových stupňů)

$\eta_{td} = 1 - \frac{H_m}{H} \cdot \frac{1-x_2}{2}$ $\eta = \eta_{RC} \cdot \eta_{td}$
- účinnost se zhoršuje lineárně



Vliv admissních parametrů na konec expanze
zvýšení admissního tlaku

Závěr: 1) s rostoucí teplotou η_{RC} roste
2) vliv tlaku není jednoznačný
s růstem tlaku roste podíl expanze v mokré páře – nutno řešit přehříváním



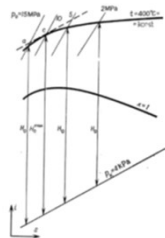
Teplota páry

$t_p \uparrow$: $-\eta_t \uparrow$
 ($p_p = \text{konst.}$)
 $-\eta_{td} \uparrow$ } $M_{pv} \downarrow \rightarrow N_{pv} \downarrow$ - menší zařízení } $N_i \downarrow$
 $H \uparrow$ (izobary v i-s nejsou rovnoběžné) - $M_p \downarrow$
 $x \uparrow$ - doba životnosti koncového stupně turbíny $T_z \uparrow \rightarrow N_{ou} \downarrow$

Je zřejmé, že teplota páry by měla být co nejvyšší, ve skutečnosti je limitována materiálem teplosměnných ploch

Provozní hledisko :

- $t_p \uparrow$: 1) větší pravděpodobnost vzniku poruch \rightarrow spolehlivost \downarrow
 2) provozní pružnost \downarrow
 3) životnost \downarrow



Tlak páry

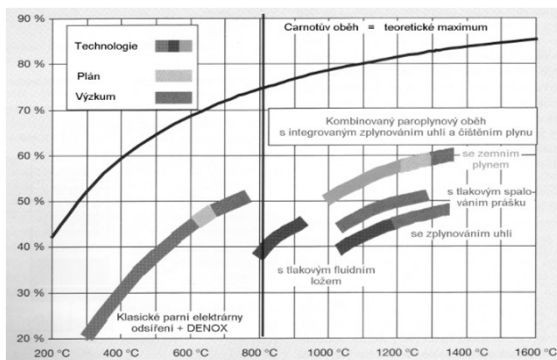
z úvodního rozboru vyplývá, že existuje určitý optimální tlak, kdy je η_t maximální
 zvýšení tlaku nemá lineární vliv na velikost (cenu) zařízení

např. hmotnost výparnickového systému kotle

- pro 12 MPa \rightarrow 65 t
- pro 24 MPa \rightarrow 72 t

S rostoucím tlakem se zvětšuje tloušťka stěn použitých komponent, což se negativně odráží na provozní pružnosti zařízení.

Účinnost technologií na bázi využití uhlí



V celosvětovém měřítku uhlí v energetice nekonečí

Stát	počet jednotek			instalovaný výkon (MW)		
	plánováno	ve výstavbě	v provozu	plánováno	ve výstavbě	v provozu
China	212	189	2955	106176	99710	1004948
India	43	56	871	29327	36698	228964
United States	0	0	561	0	0	246187
Russia	9	2	345	4945	120	46862
Indonesia	99	44	171	19360	11840	32373
Poland	1	4	166	500	2470	30870
Japan	5	16	134	2612	9269	46682
Germany	1	1	116	920	1100	44470
Ukraine	2	0	107	660	0	22265
South Africa	7	6	106	6280	4770	41435
Kazakhstan	0	1	91	0	636	12704
South Korea	0	7	83	0	7260	37600
Czech Republic	2	1	79	180	660	8517
Turkey	50	3	75	31715	1465	19514
Vietnam	51	16	63	22262	8680	18432
Australia	4	0	58	2980	0	24382

V celosvětovém měřítku uhlí v energetice nekonečí

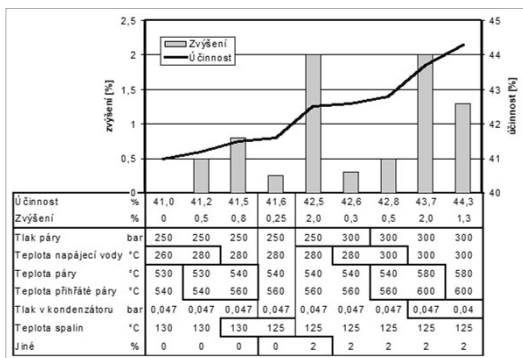
	Subcritical	Supercritical	Ultra-super	celkem (MW)
plánováno	22325	64863	123374	210562
ve výstavbě	9239	72395	103069	184703
v provozu	1172623	516851	304503	1993977
celkem	1204187	654109	530946	2389242
plánováno	11%	31%	59%	100%
ve výstavbě	5%	39%	56%	100%
v provozu	59%	26%	15%	100%
celkem	50%	27%	22%	100%

Klasické parní elektrárny

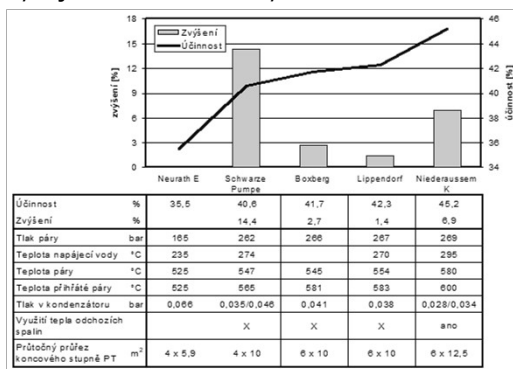
Pro zvyšování účinnosti se u tradiční osvědčené technologie parního oběhu používají všechna carnotizační opatření:

- intenzifikace parametrů
 - admissních - zvyšování tlaku a teploty
 - emisních - snižování protitlaku
- opakované přehřívání páry
- regenerační ohřev napájecí vody

Způsoby zlepšení účinnosti elektráren



Vývoj účinnosti německých elektráren



Dosažený stav i výhled

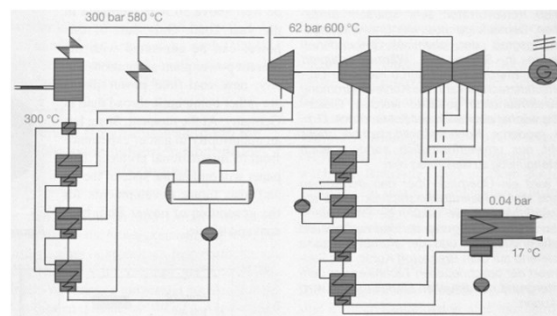
Standard - starší podkritické i nadkritické bloky s průměrnou čistou účinností v Evropě $\eta_{netto}=0.35$.

Stávající špička „Generace 600“ s tlakem kolem 30 MPa, dvojnásobným mezipřehřátím a teplotami ostré páry i přehřátých par až do hodnot těsně nad 600°C. V závislosti na ostatních parametrech se čistá účinnost pochopitelně mění, ale dosaženy byly hodnoty až $\eta_{netto}=0.50$ - pro zemní plyn a 0.47 - pro uhlí. (Mezní parametry této generace jsou patrně 33MPa/610 °C)

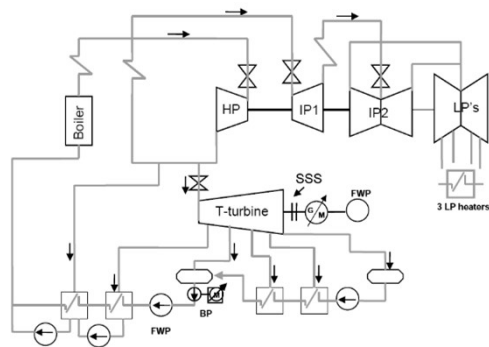
Aktuální vývoj „Generace 700“ (AD700 Project - start 1998, očekávaná realizace ???) s tlakem do 35-37,5 MPa, maximálními teplotami páry 700-720°C a čistou účinností až $\eta_{netto}=0.54$.

Výhled směřovaný na období po roce 2020 „Generace 800“ s maximální teplotou páry v oblasti 800°C a čistou účinností vyšší než $\eta_{netto}=0.55$.

Technologie současných uhelných elektráren



AD 700 – tepelné schéma



„Generace 700“

Phase	Description	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
1A	Conceptual feasibility																			
1B	Material property demonstration																			
2A	Basic design for Phase 3																			
2B	Material property demonstration																			
3	Large test facility and test programme																			
4	Construction of demonstration plant																			
5	Operation of demonstration plant																			
6	Feedback to partners																			

COMTES 700

- 3. fáze projektu AD700
- testovací zařízení 12 kg/s na elektrárně Scholven F Gelsenkirchen

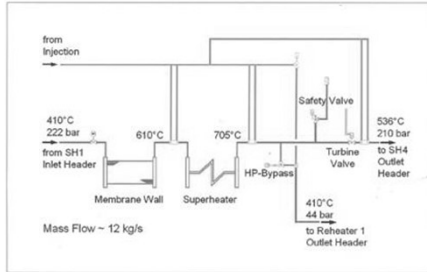
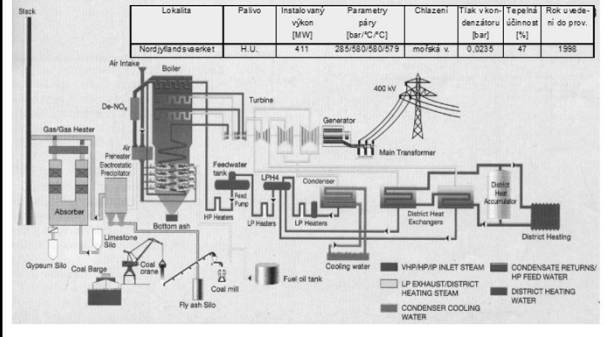
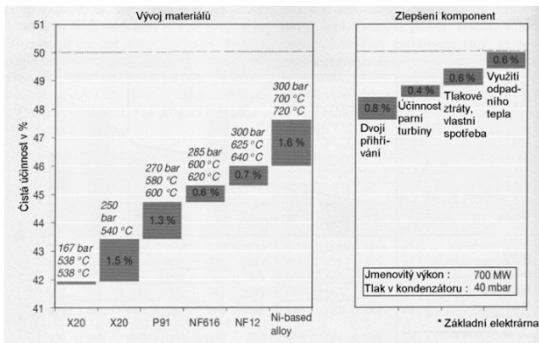


Schéma elektrárny Nordjyllandsvaerket blok 3 dvoji přehřívání páry

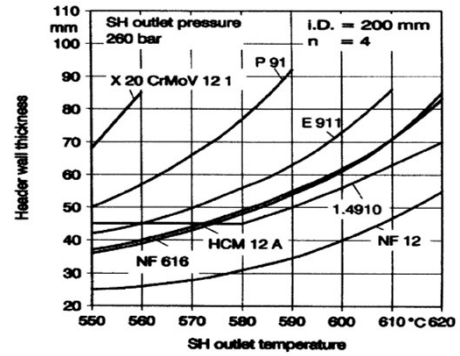


Zvýšení účinnosti elektrárny podmíněno vývojem nových materiálů



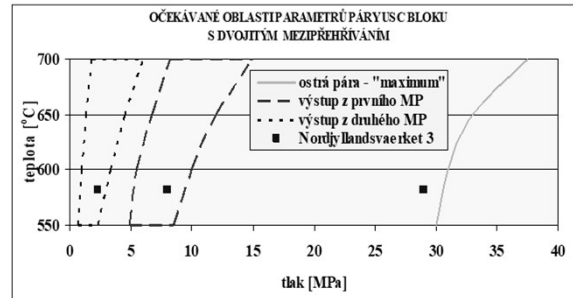
Materiály

Tloušťka stěny sběrné komory přehříváku

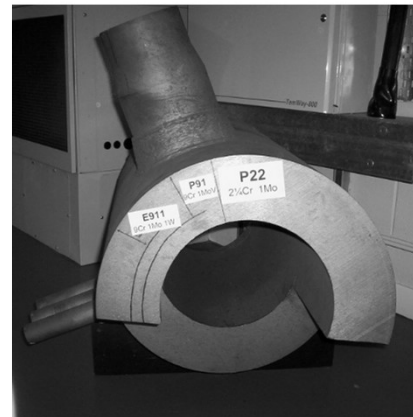
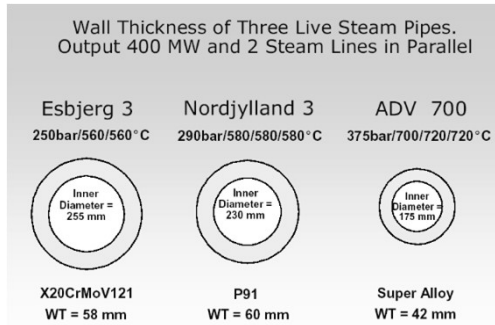


Složení materiálů na bázi Ni

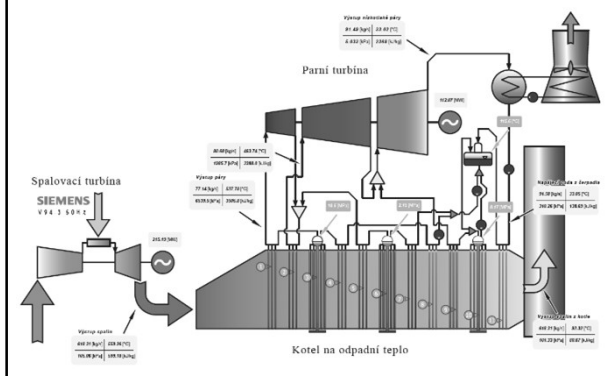
Element	Ni	Cr	Co	Mo	Other
Material					
625	63,5	21,5	0	9	6
617	52	22	12	9,5	4,5
C263	51	20	20	6	3
740	50	24	20	0	6



Vliv parametrů páry a materiálů na tloušťku stěny a průměr potrubí ostré páry



Paroplynové elektrárny



Paroplynové elektrárny

Paroplynový cyklus Počerady

- Celkový výkon 838 MW
- Uspořádání 2× GT, 2× HRSG, 1× ST
- Palivo zemní plyn, tlak 40 bar
- Chlazení věžové, přirozený tah
- Provozní režim pološpičkový, noci a víkendy - odstávky

Garantované parametry

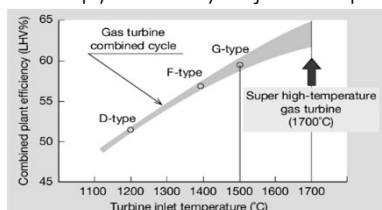
- Hrubá účinnost 58,4 %
- Hrubý výkon 838 MWe
- Vlastní spotřeba 13 MWe
- Emise NO_x, CO 40 mg/Nm³



Paroplynové elektrárny

účinnost cyklu je závislá

- na parametrech plynové turbíny – zejména vstupní teplotě spalin



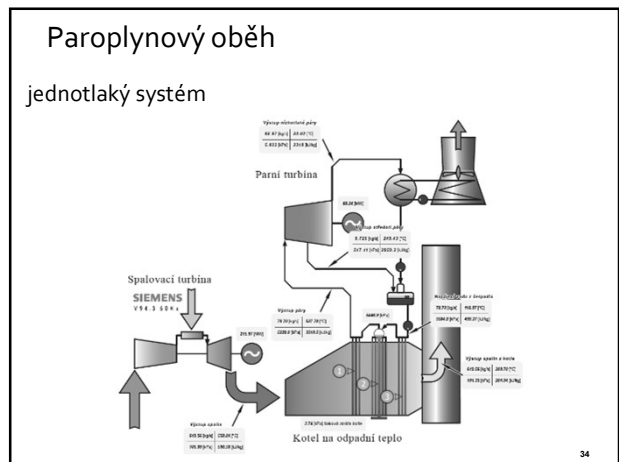
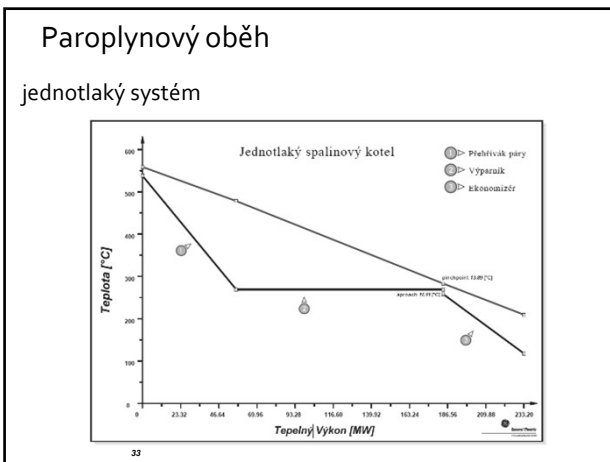
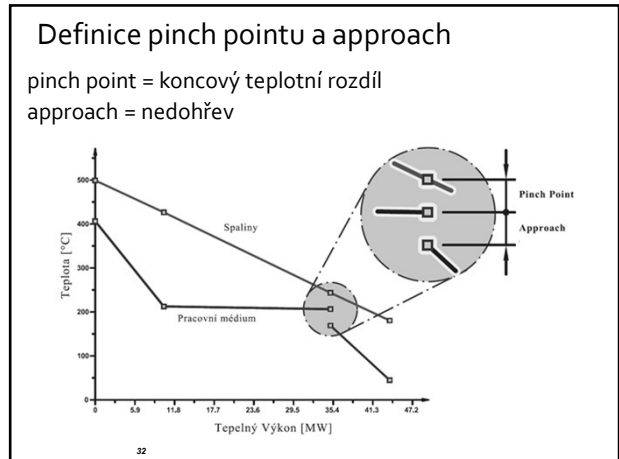
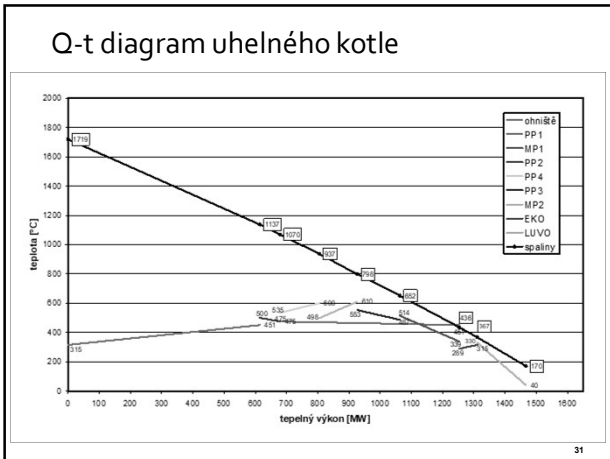
- na optimalizaci návrhu parní části
- vícetlakový HRSG s přihříváním
- nadkritický HRSG

Specifika kotle na odpadní teplo

kotel nemá spalovací zařízení

rozdíly proti klasickým kotlům jsou

- výrazně nižší teplotní úroveň spalin v kotli => důsledky
 - nižší parametry páry
 - pokles teplotních spádů na výhřevných plochách
 - použití žebrovaných trubek
 - obvykle vícetlakový systém
- přísně protiproudé uspořádání a zapojení výhřevných ploch v kotli
- ryze konvekční charakteristika všech ploch
- chybí ohřívák vzduchu => horší podmínky pro dochlazení spalin za kotlem



Teplotní poměry v HRSG

určení optimálních teplotních poměrů je složitá úloha
 výsledek je funkcí řešení

- energetických bilančních rovnic
- podmínek přenosu tepla ve spalínovém kotli

do výpočtu vstupuje

- hmotnostní průtok spalin z plynové turbíny M_s
- hmotnostní průtok vody vstupující do kotle M_w
- jejich podíl $y = M_w / M_s$
- teploty médií v uzlových bodech

Tepelná bilance HRSG

$$c_p \cdot (t'_4 - t_g) = y \cdot (i_6 - i_g)$$

$$c_p \cdot (t'_4 - t'_g) = y \cdot (i_6 - i_g)$$

$$c_p \cdot (t'_5 - t_g) = y \cdot (i_9 - i_g) = y \cdot c_w \cdot (t_g - t_g)$$

současně musí platit

$$(t_5 - t_g); (t'_5 - t_g); (t_4 - t_g) > \Delta t_{min}$$

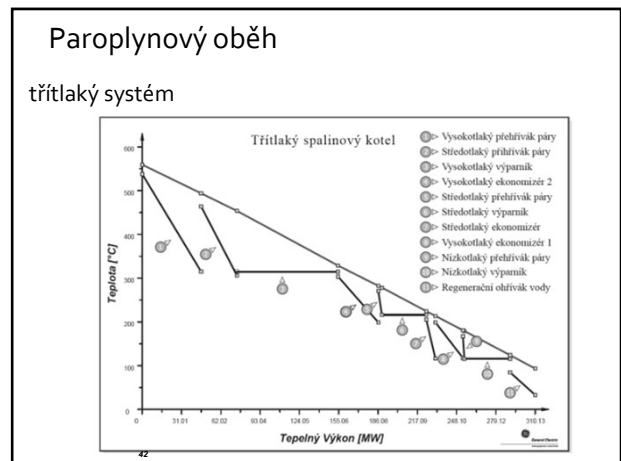
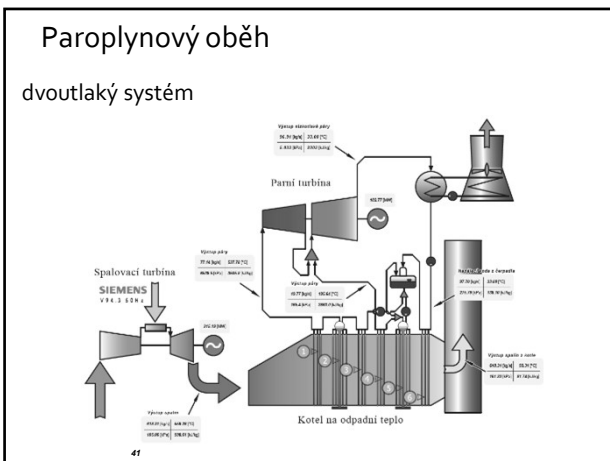
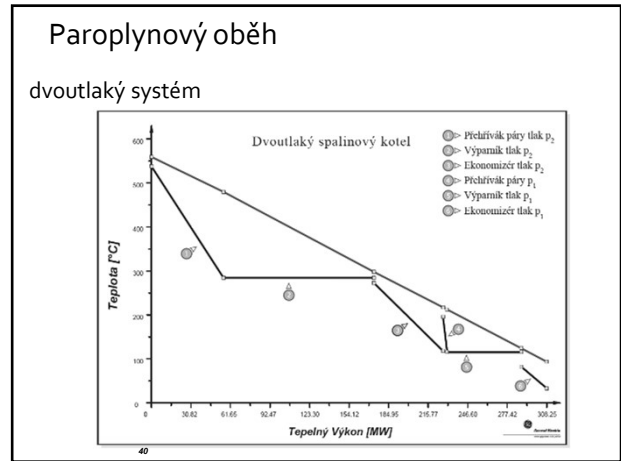
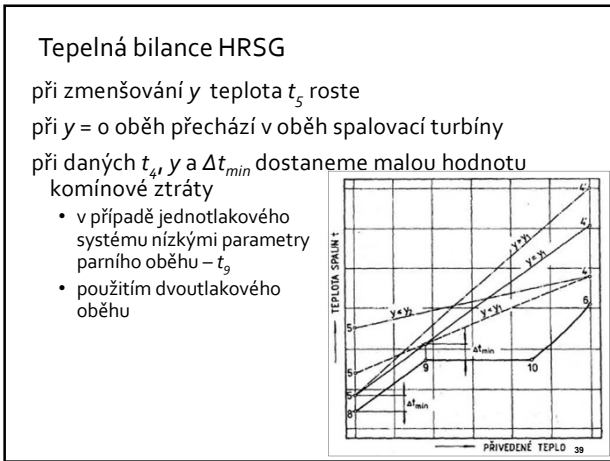
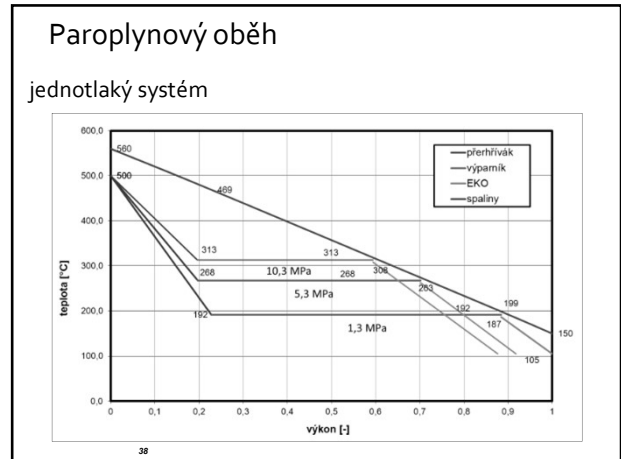
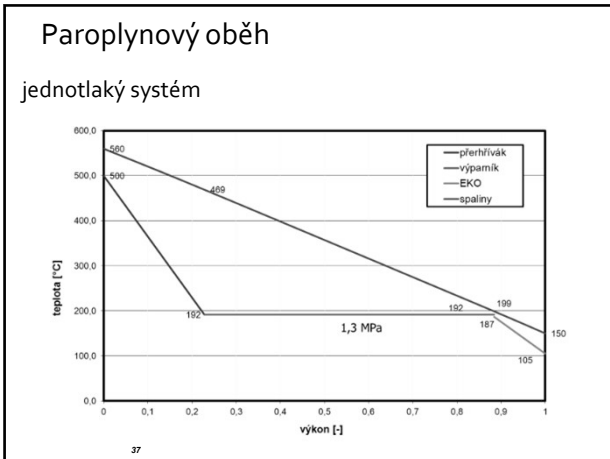
Δt_{min} má rozhodující vliv na velikost výhřevných ploch

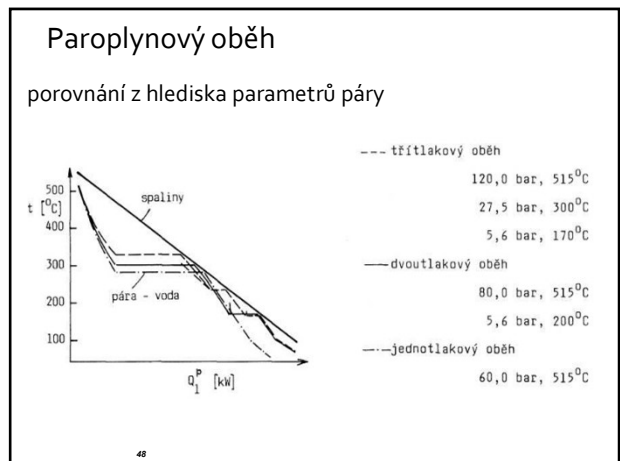
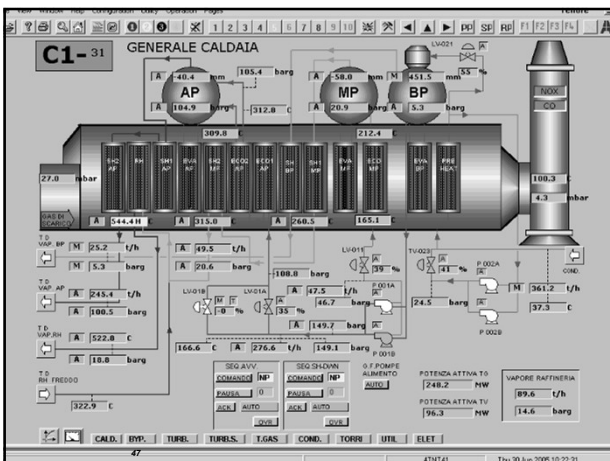
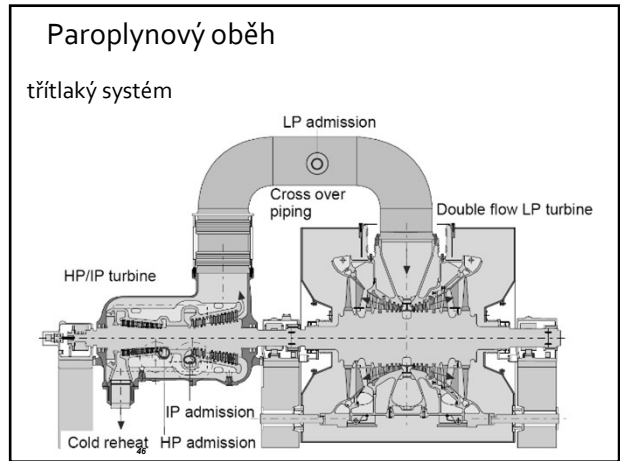
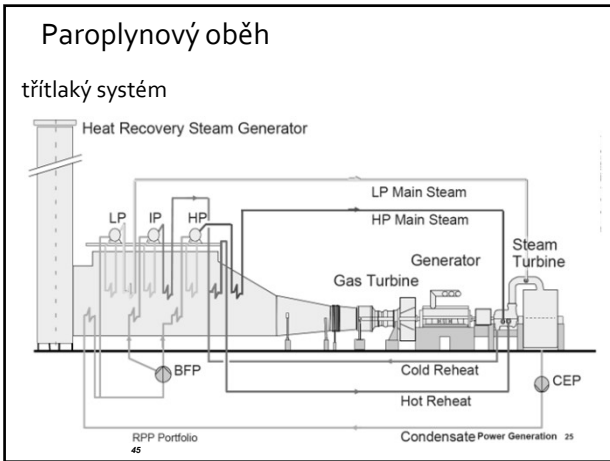
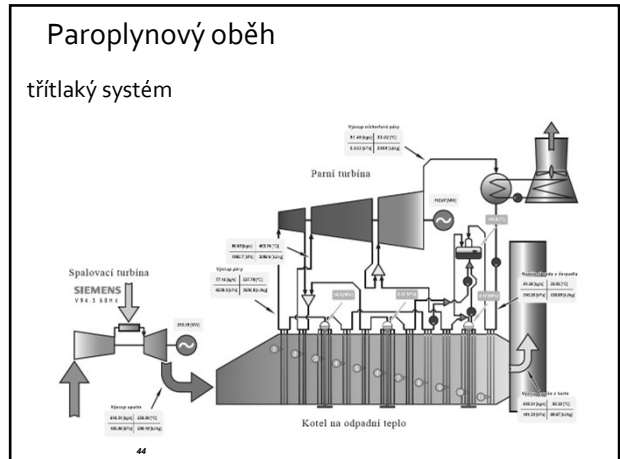
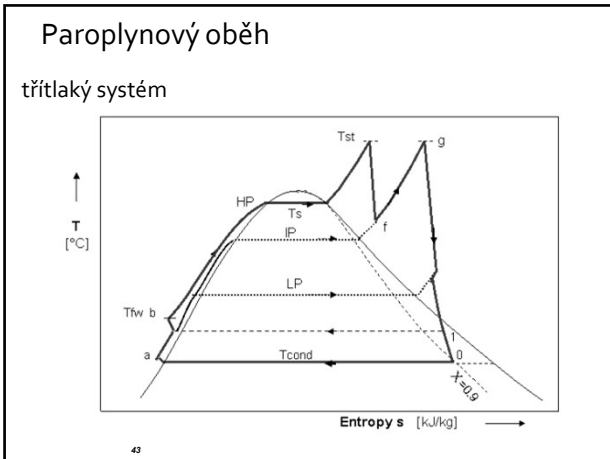
Δt_{min} se volí 5 až 40 °C

teplota t_5

- určuje velikost kominové ztráty, a tedy i účinnosti HRSG
- je funkcí y a Δt_{min}

The graph shows temperature in °C on the y-axis (-273 to 1000) against heat output in MW on the x-axis. It illustrates the temperature profiles for the flue gas and the working medium, with various points labeled (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) and heat flows indicated.





Koncová teplota spalin

HRSG nemá ohřívák vzduchu
koncovou plochou kotle je EKO

při $t_{NVmin} = 105\text{ °C}$ by byla koncová teplota spalin příliš vysoká a účinnost kotle nízká

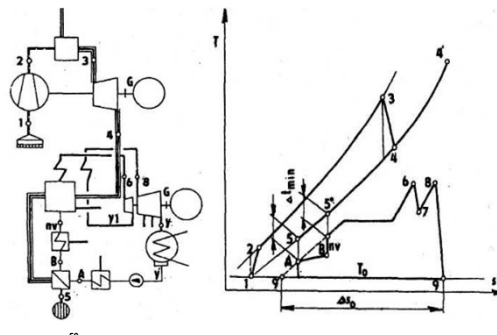
pro lepší dochlazení spalin se za EKO řadí ještě spalínový regenerační ohřívák napájecí vody, který je zapojen k parnímu regeneračnímu ohřevu

- sériově
- paralelně

49

Spalínový regenerační ohřívák

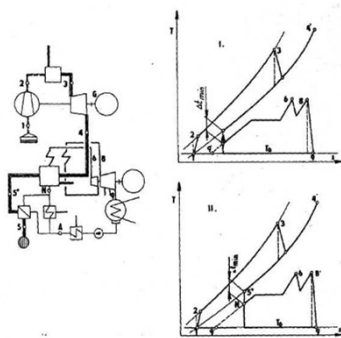
zapojený sériově k parnímu regeneračnímu předehřevu



50

Spalínový regenerační ohřívák

zapojený paralelně k parnímu regeneračnímu předehřevu



51

Účinnost HRSG

účinnost závisí na

- vstupní teplotě spalin
- výstupní teplotě spalin
- přebytku spalovacího vzduchu
- velikosti a teplotě povrchu kotle

Příklad:

- vstupní teplota spalin 580 °C
- výstupní teplota spalin 90 °C
- přebytek spalovacího vzduchu 2,35
- ztráta sdílením tepla do okolí 0,5 %

účinnost HRSG vztažená k teplu spalin na vstupu 88 %

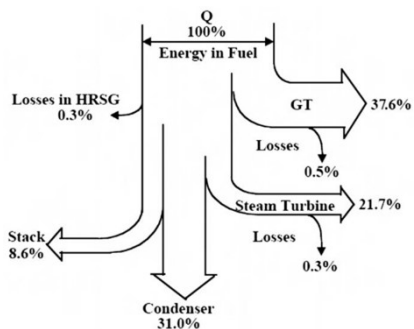
účinnost HRSG vztažená k výhřevnosti plynu 93,5 %

účinnost samotného HRSG se obvykle negarantuje a není předmětem přejímacího řízení – garantuje se účinnost PPC

52

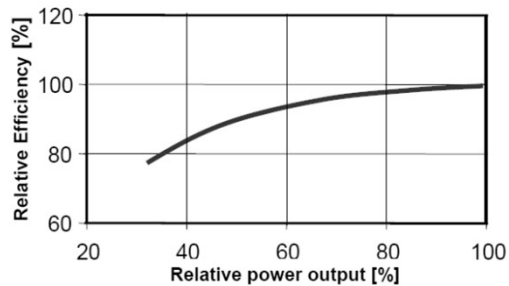
Účinnost HRSG

(vztaženo ke spalnému teplu)



53

Vliv výkonu na účinnost PPC



54

Optimalizace návrhu HRSG

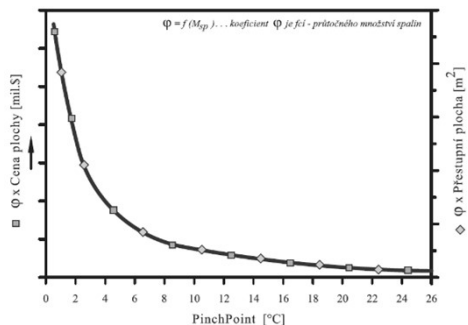
složitá úloha s velkým počtem stupňů volnosti
optimalizovanými parametry jsou

- koncová teplota spalin
- počet tlakových hladin
- pinch point a nedohřev na výhřevných plochách
- dělení a řazení výhřevných ploch

Provádí se pomocí výpočtových softwarů
Thermoflow (GT PRO)
Gate Cycle (GE)
Tempo Cycle (volně šiřitelný)

55

Vliv pinch pointu na velikost a cenu plochy



56

Konstrukční provedení HRSG

Konstrukční varianty

- horizontální uspořádání
- vertikální uspořádání

Provedení výparníku

- bubnové s přirozenou nebo nucenou cirkulací
- průtočné

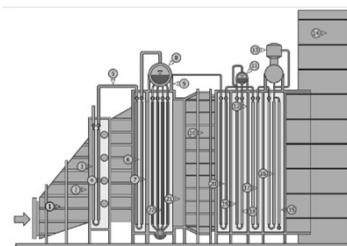
Pracovní tlak

- podkritický
- nadkritický

57

Horizontální HRSG

- výparník s přirozenou cirkulací
- je z technického hlediska jednodušší



- 1- Vstup spalin z plynové turbíny
- 2- Spalinový kanál
- 3- Třísňová kotlička
- 4- Vysokotlaké parní potrubí
- 5- Vysokotlaký přehřívák páry
- 6- CO katalyzátor
- 7- Vysokotlaký buban
- 8- Nosná konstrukce kotle
- 9- SCR katalyzátor NO_x
- 10- Středotlaký buban
- 11- Nosná konstrukce kotle
- 12- Odhýbovací nádrž
- 13- Komin
- 14- Regenerační odhřívák
- 15- Nízkotlaký výparník
- 16- Vysoko a středotlaký ekonomizér
- 17- Středotlaký výparník
- 18- Středotlaký přehřívák páry
- 19- Vysokotlaký ekonomizér
- 20- Vstup NH₃ do spalin
- 21- Vysokotlaký výparník

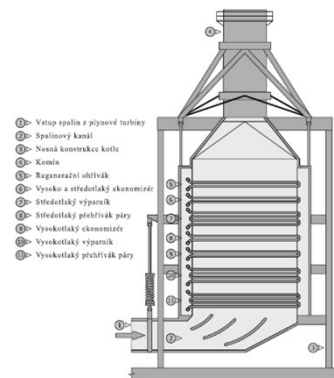
58

Horizontální HRSG



Vertikální HRSG

- výparník s nucenou cirkulací
- vhodné pro případy s prostorovým omezením
- ohyb proudu spalin před vstupem je zdrojem větší nerovnoměrnosti proudění v prvních plochách



- 1- Vstup spalin z plynové turbíny
- 2- Spalinový kanál
- 3- Nosná konstrukce kotle
- 4- Komin
- 5- Regenerační odhřívák
- 6- Vysoko a středotlaký ekonomizér
- 7- Středotlaký výparník
- 8- Středotlaký přehřívák páry
- 9- Vysokotlaký ekonomizér
- 10- Vysokotlaký výparník
- 11- Vysokotlaký přehřívák páry

60

Vertikální HRSG



Horizontální x vertikální konstrukce

Výhody vertikálního provedení

- menší zastavěný půdorys
- menší velikost kotle z důvodu použití trubek menšího průměru
- menší citlivost na vznik parních zátek v EKU při najždění

Výhody horizontálního provedení

- rovnoměrnější průřezové rozdělení spalin za GT
- přirozená cirkulace nevyžaduje čerpadlo – platí do tlaku 100 bar
- vertikální orientace trubek ve výparníku podporuje cirkulaci v tepelně více zatížených trubkách

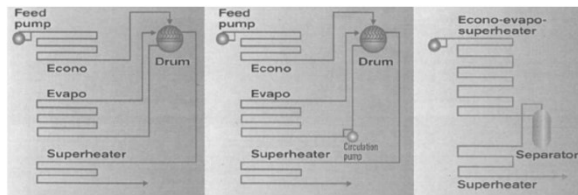
Zásadní rozdíl není – výrobci nabízejí obě provedení

Celosvětově převažují instalace horizontálních kotlů s přirozenou cirkulací

62

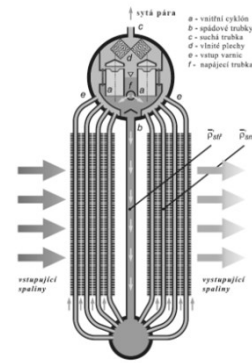
Systém výparníku HRSG

s přirozenou cirkulací s nucenou cirkulací průtočný



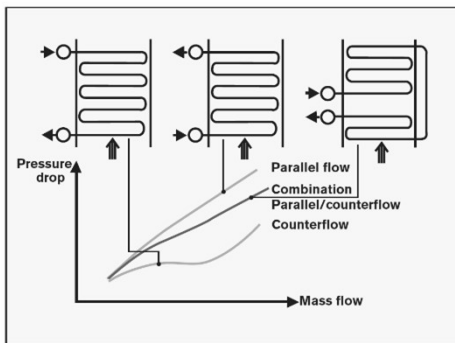
63

Výparník s přirozenou cirkulací



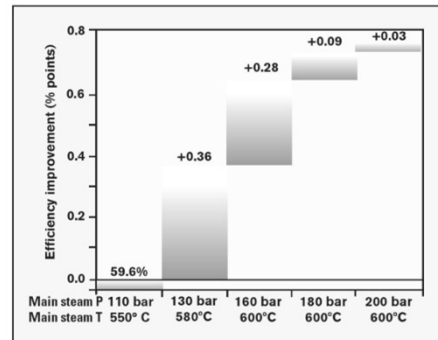
64

Výparník s nucenou cirkulací



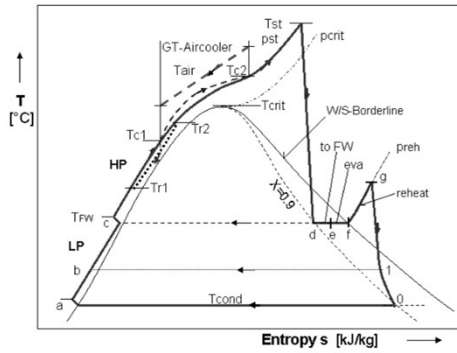
65

Vliv parametrů páry na účinnost PPC



66

Nový jednotlaký nadkritický HRSG



73