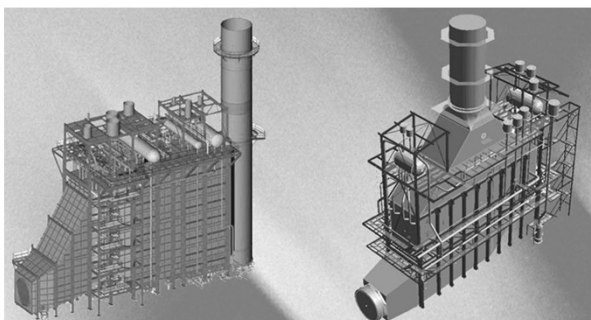


Kotel na odpadní teplo pro PPC



1

1

Kotel na odpadní teplo pro PPC

Označení

- KNOT (Doc. Kolovratník)
- HRSG = Heat Recovery Steam Generator

Funkce

- ochladit spaliny odcházející z plynové turbíny
- vyrobit páru pro pohon parní turbíny

Dvě základní koncepce

- bez přitápění – pro PPE
- s přitápěním – teplárenské aplikace

2

2

Zemní plyn

- je nejčastěji užívaným palivem pro pohon plynových turbín
- typické složení a výhřevnost zemního plynu

CH ₄	0,980830
C ₂ H ₆	0,005910
C ₃ H ₈	0,002020
C ₄ H ₁₀	0,000791
C ₅ H ₁₂	0,000212
C ₆ H ₁₄	0,000172
CO ₂	0,001380
N ₂	0,008680
Výhřevnost plynu	35 900 kJ/Nm ³
	46 800 kJ/kg

3

3

Spalování zemního plynu

- výsledky stechiometrického výpočtu

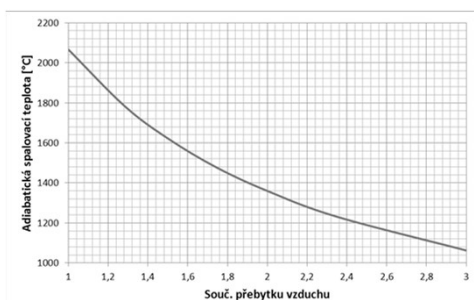
	Nm ³ /Nm ³	Nm ³ /kg
Spotřeba vzduchu :		
minimální objem kyslíku	2,0009	2,7401
minimální objem suchého vzduchu	9,5282	13,0792
minimální objem vlhkého vzduchu	9,6418	13,2885
Vzniklé spaliny :		
objem oxidu uhličitého	1,0022	1,3680
objem oxidu siřičitého	0,0000	0,0000
objem dusíku	7,4454	10,2299
objem vzácných plynů	0,0877	0,1205
objem suchých spalin	8,5353	11,7185
objem vodní páry ve spalinách	2,1075	2,9411
objem vlhkých spalin	10,6428	14,6596

4

4

Spalování zemního plynu

Závislost adiabatické spalovací teploty na součiniteli přebytku vzduchu



5

5

Spalování zemního plynu

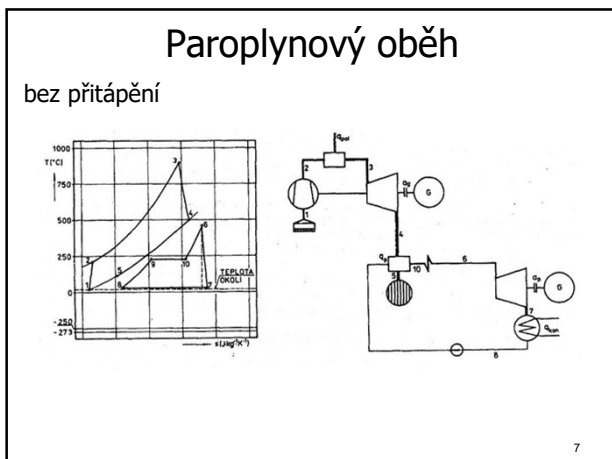
složení spalin na výstupu ze spalovací turbíny

Teplota	550 - 600 °C	
Tlak	max. 0,03500 bar	
Složení	N ₂	74,59 %vol.
	O ₂	12,62 %vol.
	CO ₂	3,73 %vol.
	H ₂ O	8,19 %vol.
	Ar	0,87 %vol.

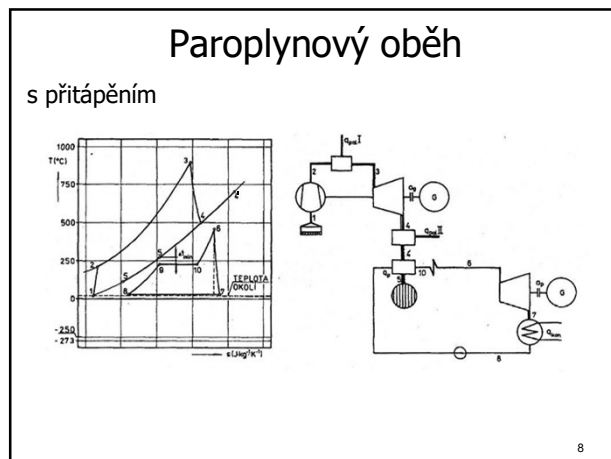
obsah O₂ = 12,62 % odpovídá spalování s přebytkem vzduchu ~ 2,35

6

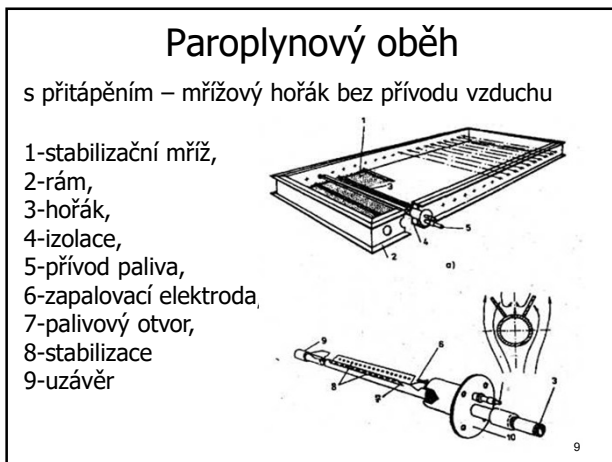
6



7



8



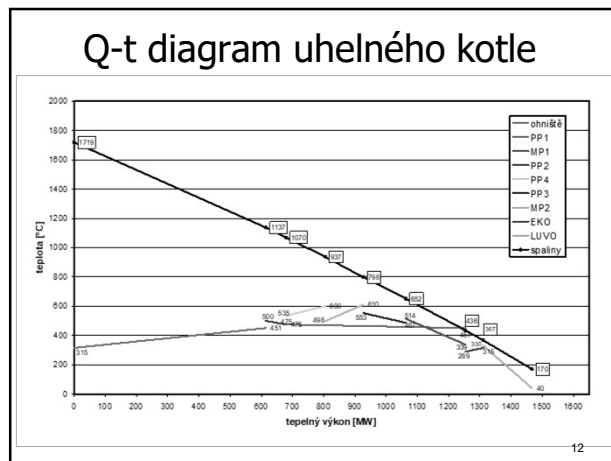
9



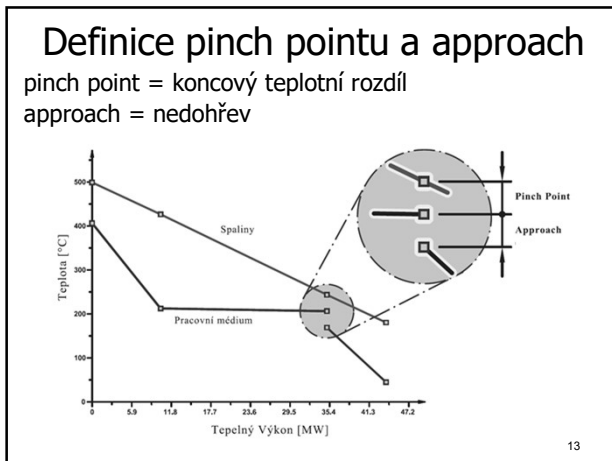
10

- ### 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
- 11

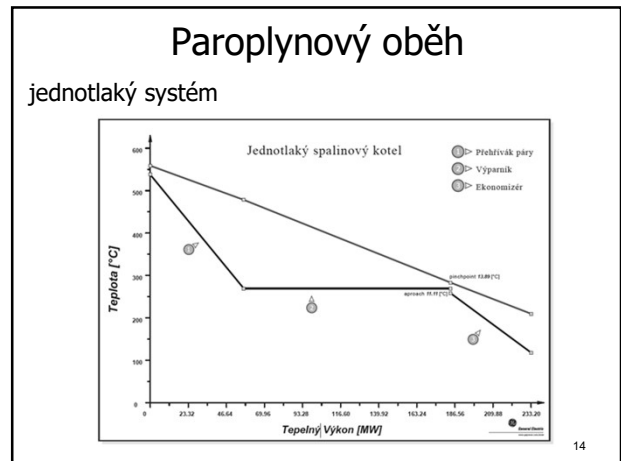
11



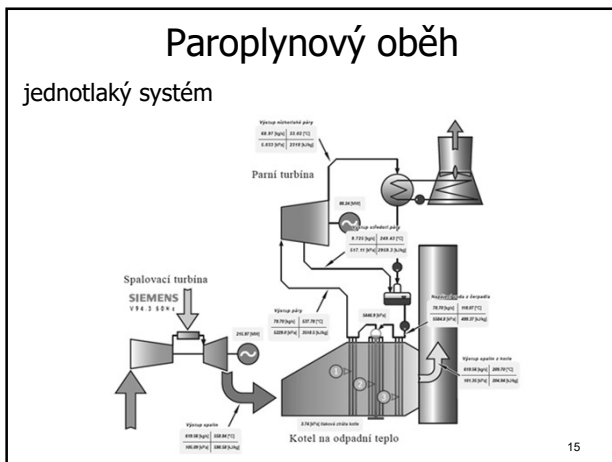
12



13



14



15

- ### 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 $\gamma = M_w / M_s$
 - teploty médií v uzlových bodech

16

Tepelná bilance HRSG

$$c_p \cdot (t'_4 - t'_5) = \gamma \cdot (i_6 - i_8)$$

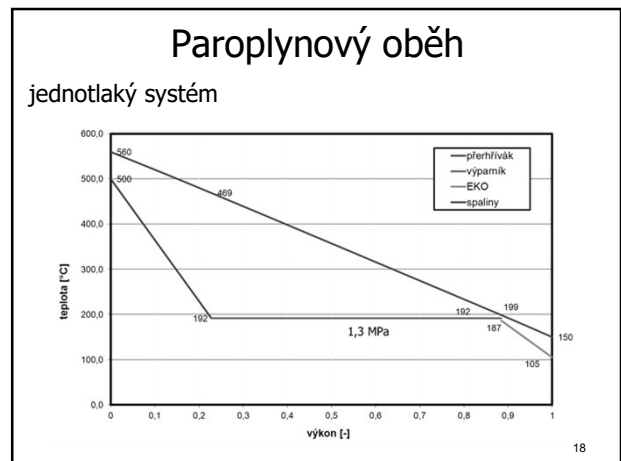
$$c_p \cdot (t'_4 - t'_5) = \gamma \cdot (i_6 - i_9)$$

$$c_p \cdot (t'_5 - t'_2) = \gamma \cdot (i_9 - i_8) = \gamma \cdot c_w \cdot (t_9 - t_8)$$

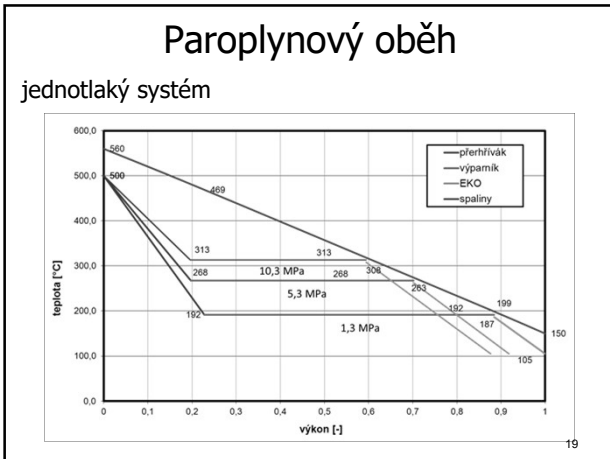
současně musí platit
 $(t_5 - t_8); (t'_5 - t_9); (t_4 - t_6) > \Delta t_{min}$

- Δt_{min} má rozhodující vliv na velikost výhřevných ploch
- Δt_{min} se volí 5 až 40 °C
- teplota t_5
 - určuje velikost komínové ztráty, a tedy i účinnosti HRSG
 - je funkcí γ a Δt_{min}

17



18

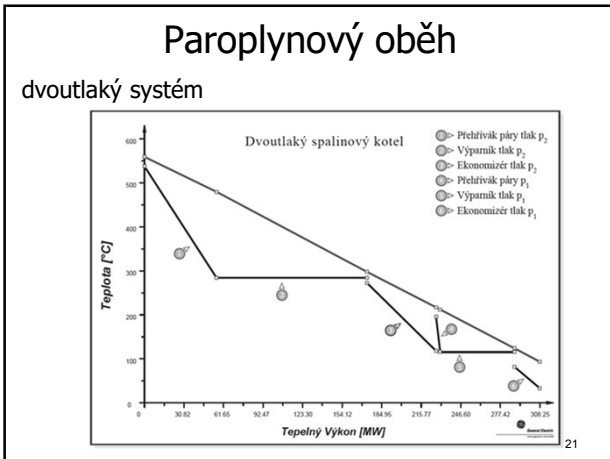


19

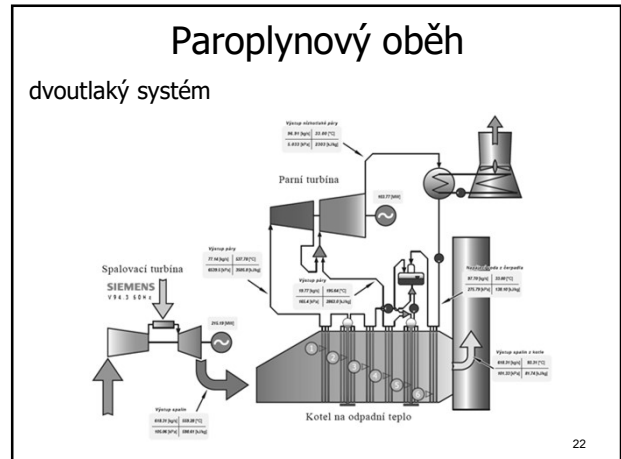
Tepelná bilance HRSG

- při zmenšování γ teplota t_5 roste
- při $\gamma = 0$ oběh přechází v oběh spalovací turbíny
- při daných t_4, γ a Δt_{min} dostaneme malou hodnotu komínové ztráty
 - v případě jednotlakového systému nízkými parametry parního oběhu – t_9
 - použitím dvoutlakového oběhu

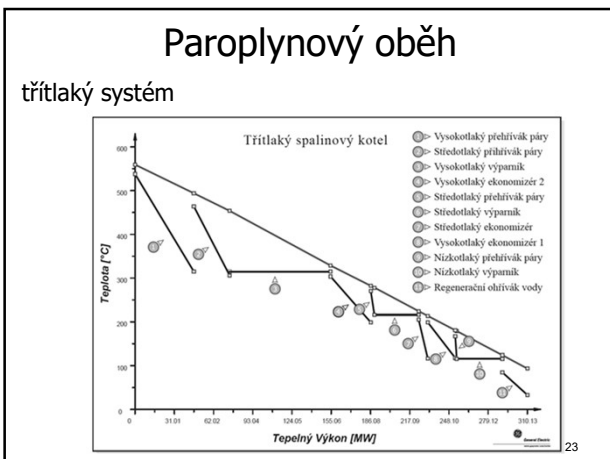
20



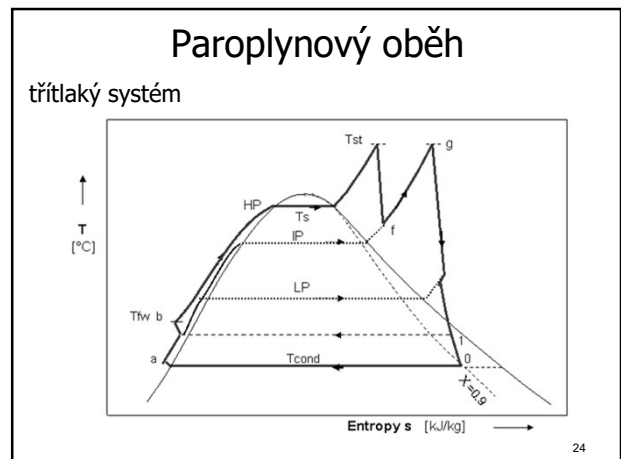
21



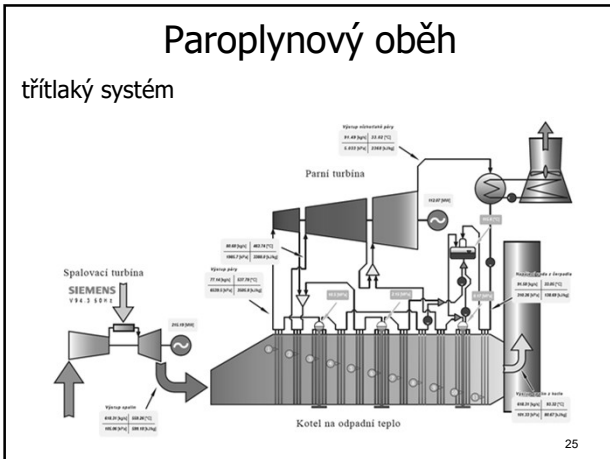
22



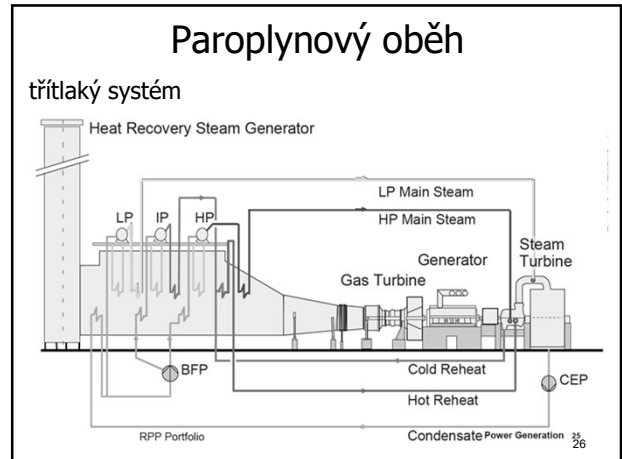
23



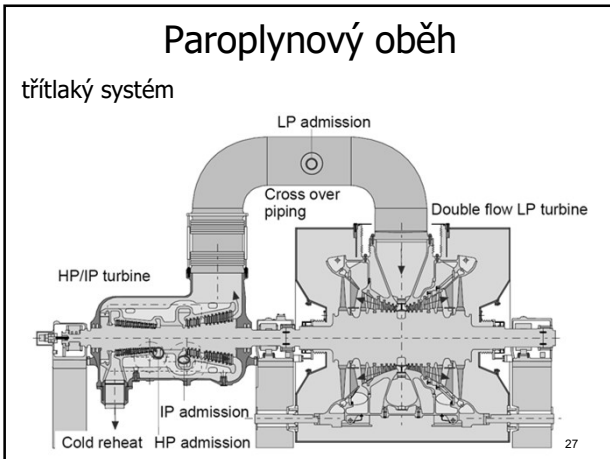
24



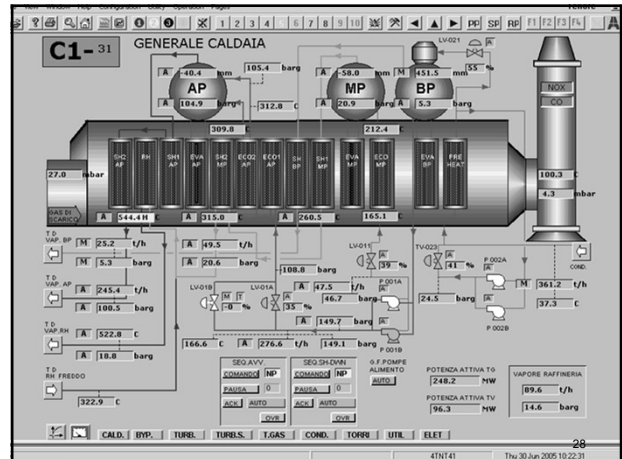
25



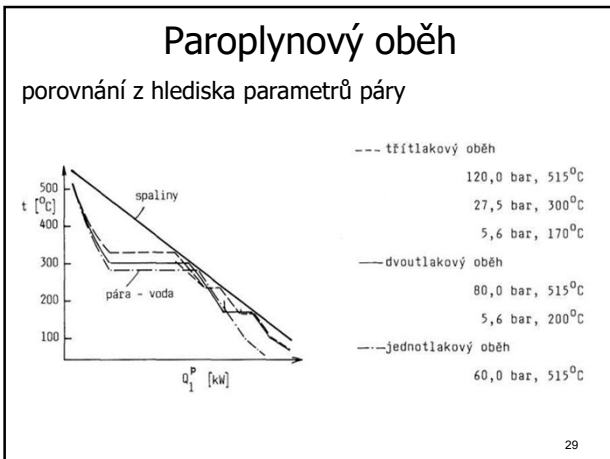
26



27



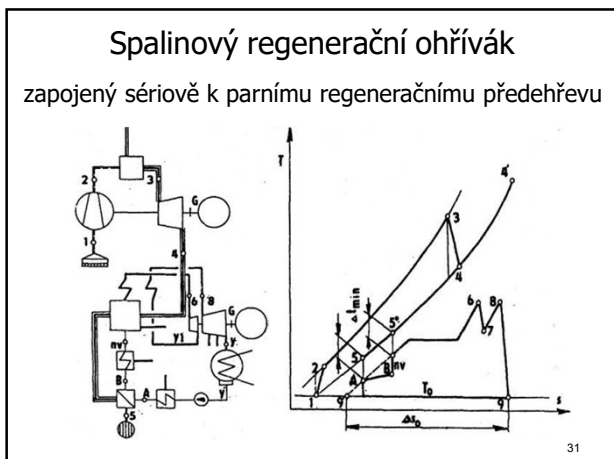
28



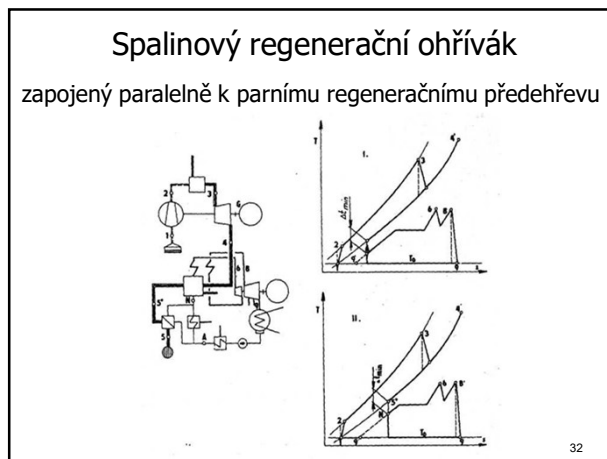
29

- ### Koncová teplota spalin
- HRSG nemá ohřívák vzduchu
 - koncovou plochou kotle je EKO
 - při $t_{Vmin} = 105 \text{ °C}$ by byla koncová teplota spalin příliš vysoká a účinnost kotle nízká
 - pro lepší dochlazení spalin se za EKO řadí ještě spalinový regenerační ohřívák napájecí vody, který je zapojen k parnímu regeneračnímu ohřevu
 - sériově
 - paralelně
- 30

30



31



32

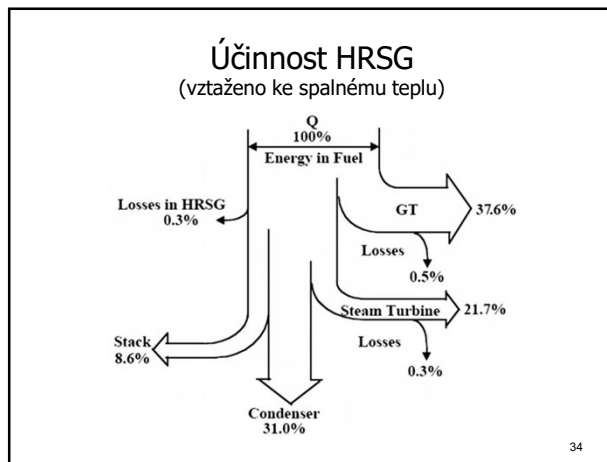
Účinnost HRSG

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

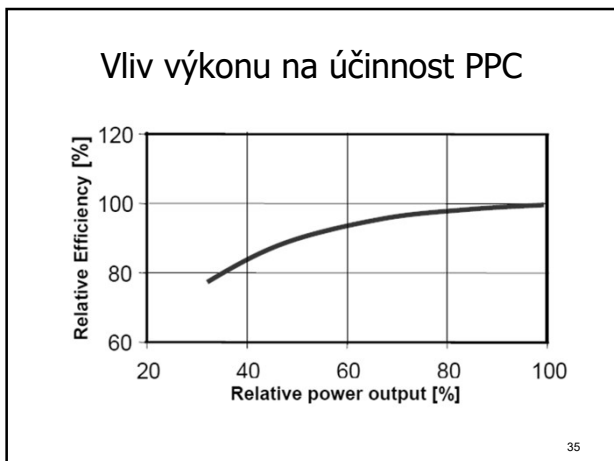
Příklad:

- vstupní teplota spalin 580 °C
- výstupní teplota spalin 90 °C
- přebytek spalovacího vzduchu 2,35
- ztráta sdílením tepla do okolí 0,5 %
- účinnost HRSG vztážená k teplu spalin na vstupu 88 %
- účinnost HRSG vztážená k výhřevnosti plynu 93,5 %
- účinnost samotného HRSG se obvykle negarantuje a není předmětem přejímacího řízení – garantuje se účinnost PPC

33



34



35

Optimalizace návrhu HRSG

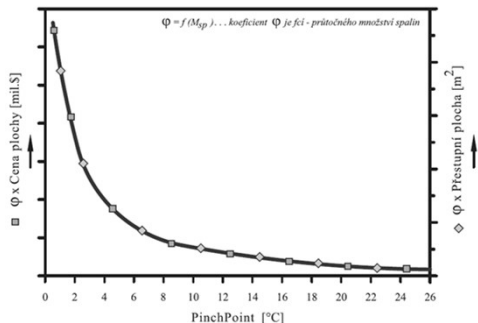
- složitá úloha s velkým počtem stupňů volnosti
- optimalizovanými parametry jsou
 - koncová teplota spalin
 - počet tlakových hladin
 - pinch point a nedohřev na výhřevných plochách
 - dělení a řazení výhřevných ploch

Provádí se pomocí výpočtových softwarů

- Thermoflow (GT PRO)
- Gate Cycle (GE)
- Tempo Cycle (volně šiřitelný)

36

Vliv pinch pointu na velikost a cenu plochy



37

37

Konstrukční provedení HRSG

Konstrukční varianty

- horizontální uspořádání
- vertikální uspořádání

Provedení výparníku

- bubnové s přirozenou nebo nucenou cirkulací
- průtočné

Pracovní tlak

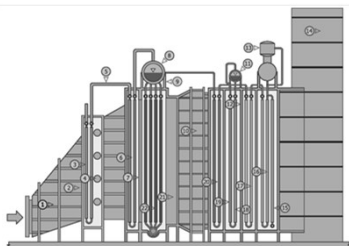
- podkritický
- nadkritický

38

38

Horizontální HRSG

- výparník s přirozenou cirkulací
- je z technického hlediska jednodušší



- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ① Vstup spalín z plynové turbíny | ⑩ Nosná konstrukce kotle |
| ② Spalinový kanál | ⑪ Odplyňovací nádrž |
| ③ Vysokotlaký přehřívák páry | ⑫ Komin |
| ④ Plynové hořáky | ⑬ Regenerační obřívk |
| ⑤ Vysokotlaký parní potrubí | ⑭ Nizkotlaký výparník |
| ⑥ Vysokotlaký přehřívák páry | ⑮ Vysoko a středotlaký ekonomizér |
| ⑦ CO katalyzátor | ⑯ Středotlaký výparník |
| ⑧ Vysokotlaký bubon | ⑰ Středotlaký přehřívák páry |
| ⑨ Nosná konstrukce kotle | ⑱ Vysokotlaký ekonomizér |
| ⑫ SCR katalyzátor NO _x | ⑲ Vstup N ₂ do spalín |
| ⑬ Středotlaký bubon | ⑳ Vysokotlaký výparník |

39

39

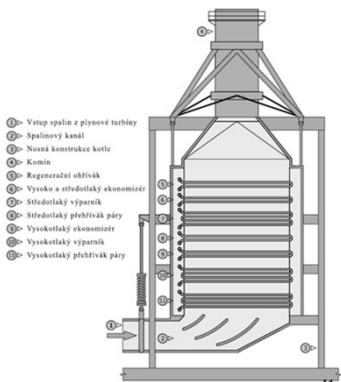
Horizontální HRSG



40

Vertikální HRSG

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



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

41

41

Vertikální HRSG



42

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 najíždění

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

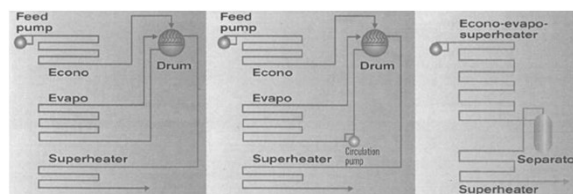
Zásadní rozdíl není – výrobci nabízejí obě provedení
Celosvětově převažují instalace horizontálních kotlů s přirozenou cirkulací

43

43

System výparníku HRSG

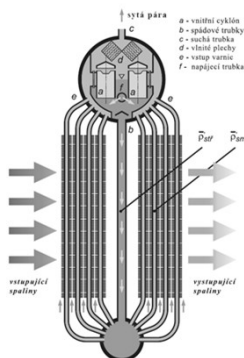
s přirozenou cirkulací s nucenou cirkulací průtočný



44

44

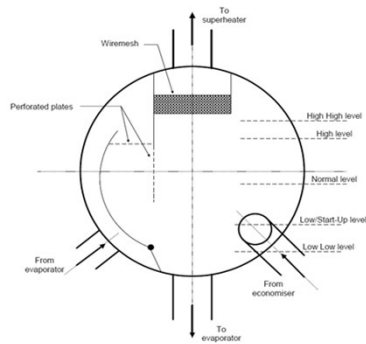
Výparník s přirozenou cirkulací



45

45

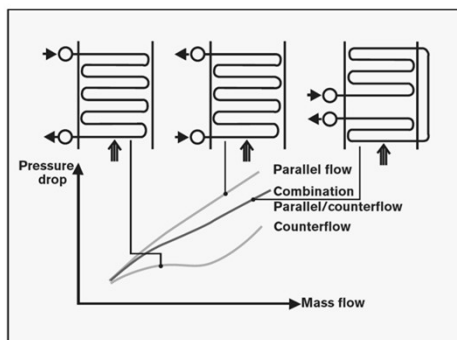
Výparník s přirozenou cirkulací



46

46

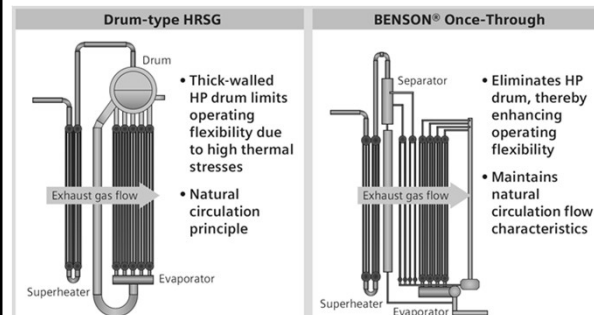
Výparník s nucenou cirkulací



47

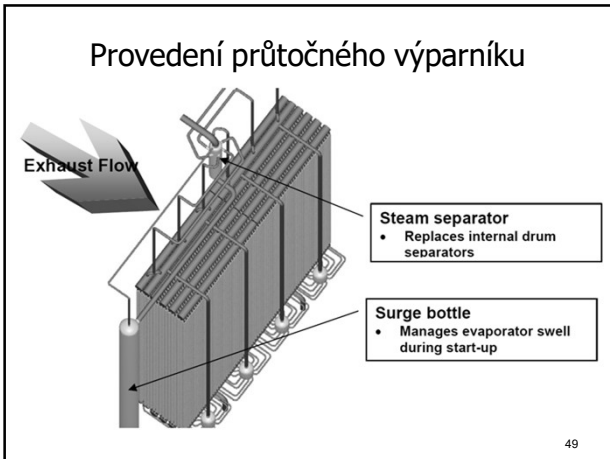
47

Přechod z cirkulačního na Bensonův průtočný systém výparníku

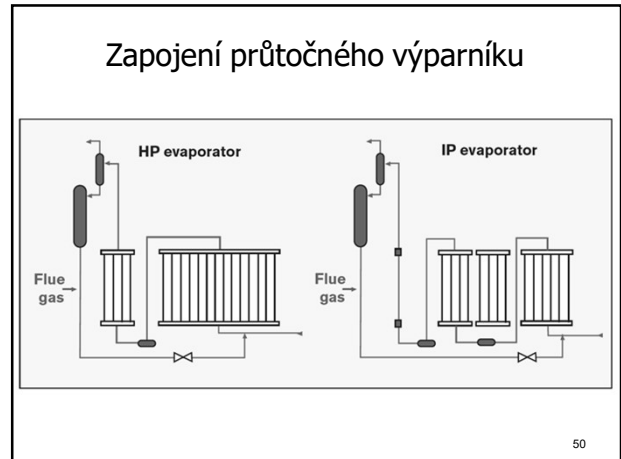


48

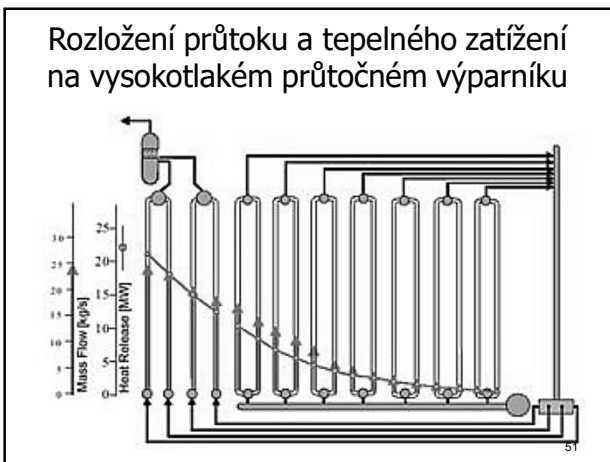
48



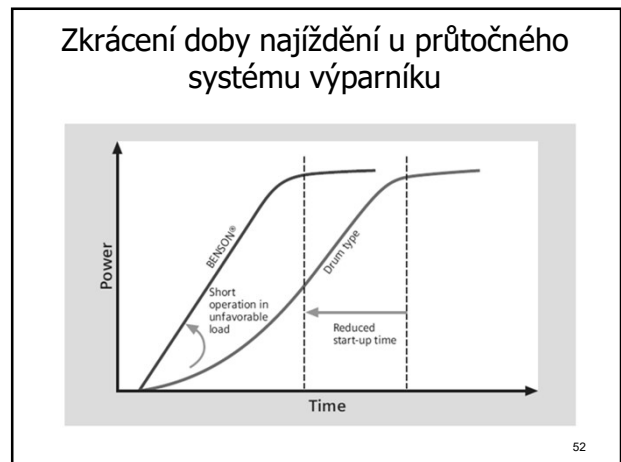
49



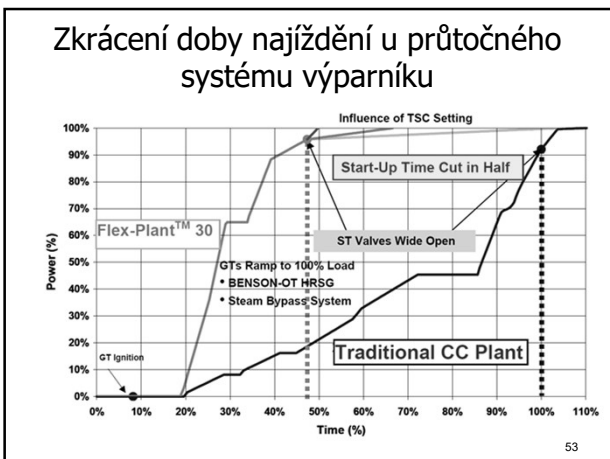
50



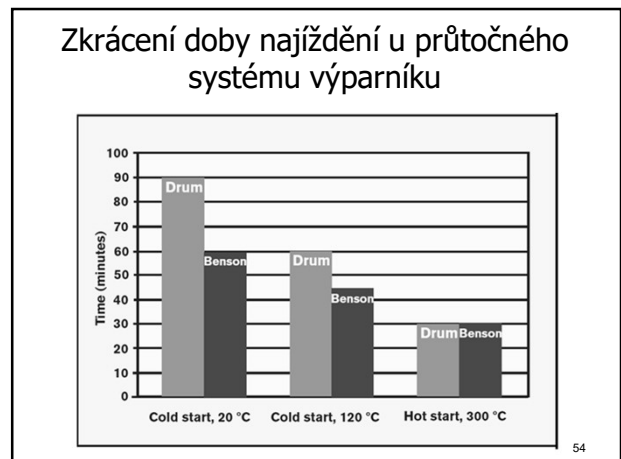
51



52



53



54

Cirkulační x průtočný výparník

Nevýhody cirkulačního systému výparníku

- vyžaduje buben
- s rostoucím tlakem (nad 100 bar) klesá cirkulační číslo – riziko špatného chlazení trubek
- menší provozní pružnost v důsledku většího vodního objemu

Výhody průtočného systému výparníku

- odpadá buben
- neexistuje tlakové omezení
- zkrácení doby pro najíždění a změnu výkonu

55

55

Nadkritický HRSG

Podmínkou výroby páry s nadkritickým tlakem v HRSG je

- užití průtočného systému výparníku
- vyšší teplota spalin na výstupu z GT

Motivace

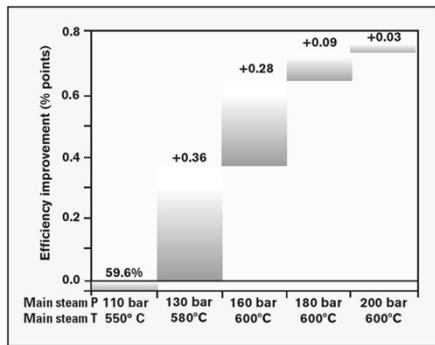
- zvýšení účinnosti bloku
- zjednodušení koncepce HRSG

Z pohledu klasických bloků se jedná pouze o mírně nadkritické parametry

56

56

Vliv parametrů páry na účinnost PPC



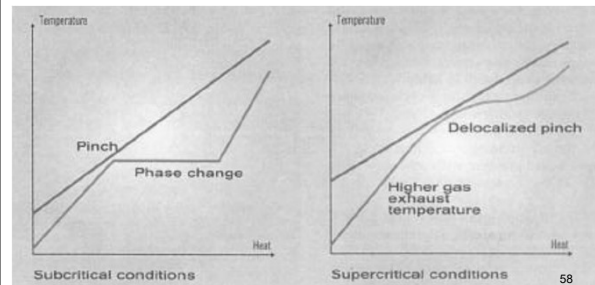
57

57

Nadkritický HRSG

přechodem na nadkritický tlak

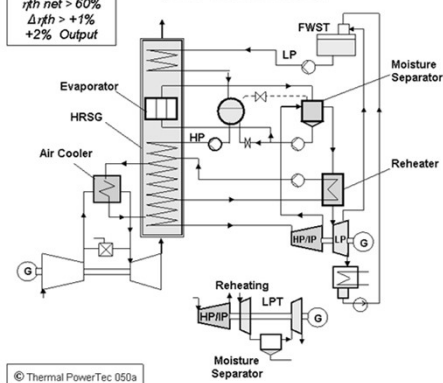
- mizí pinch point na začátku výparníku
- roste teplota spalin za VT



58

58

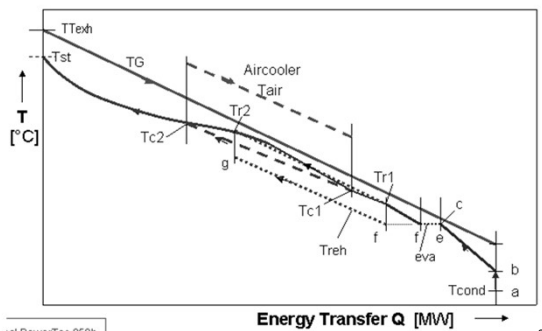
New Combined Cycles Power Plant with a single-supercritical-pressure HRSG (CCPP with SSP HRSG)



59

59

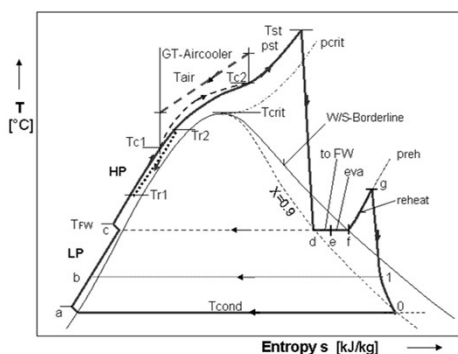
Nový jednotlakový nadkritický HRSG



60

60

Nový jednotlakový nadkritický HRSG

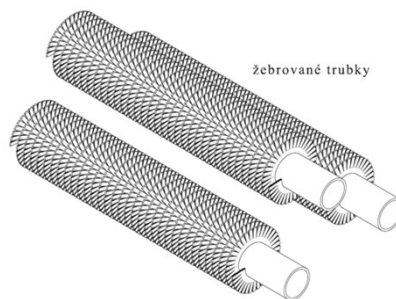


61

61

Provedení výhřevných ploch HRSG

- základním stavebním prvkem je žebrovaná trubka

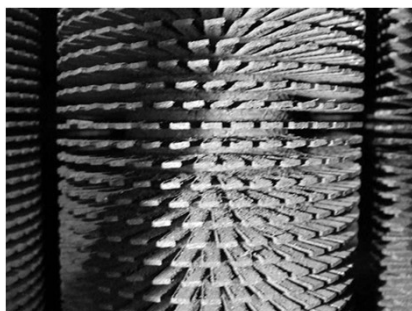


62

62

Provedení výhřevných ploch HRSG

- základním stavebním prvkem je žebrovaná trubka

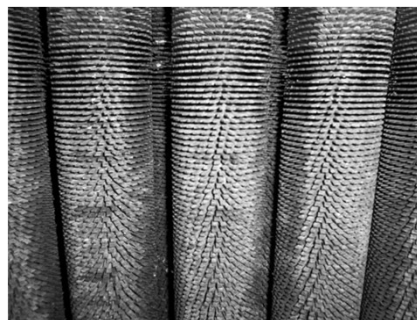


63

63

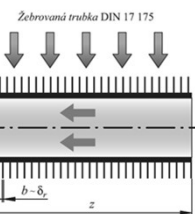
Provedení výhřevných ploch HRSG

- základním stavebním prvkem je žebrovaná trubka



64

64



D _e	s	a ₀ × b × δ ₀				z
		10×1,3	13×1,3	15×1,3	19×1,5	
16	1,8	•				170
21,3	2	•				170
25	2	•	•			170
31,8	2,6	•	•	•		170
38	3,2	•	•	•	•	170
48,3	3,2	•	•	•	•	170
51	3,2	•	•	•	•	170
57	3,2	•	•	•	•	170
60,3	3,2	•	•	•	•	170
76,1	3,2	•	•	•	•	170
88,9	3,2	•	•	•	•	170

65

65

Provedení stěn HRSG

Stěny HRSG jsou většinou nechlazené
Dvě možnosti

- studené provedení s vnitřní izolací
- horké provedení s vnější izolací

Studené provedení stěn

- výhodné při vysoké teplotě spalin za GT
- běžnější u kotlů s přirozenou cirkulací

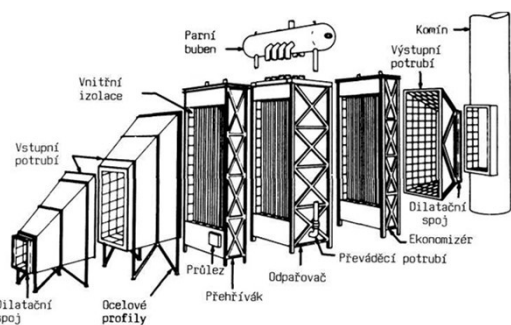
Horké provedení stěn

- výhodné při nižší teplotě spalin za GT
- běžnější u vertikálních kotlů
- může trpět korozí na studeném konci

66

66

Modulová koncepce HRSG



67

67

Modulová koncepce HRSG



68

68

Modulová koncepce HRSG

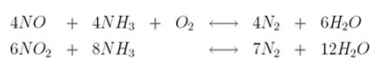


69

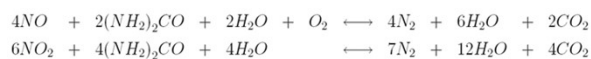
69

DeNOx

- preferována metoda SCR
- redukčním činidlem je
 - čpavek – levnější



- močovina

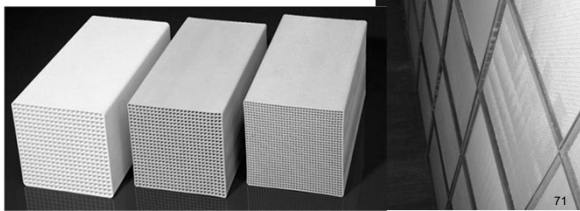


70

70

DeNOx

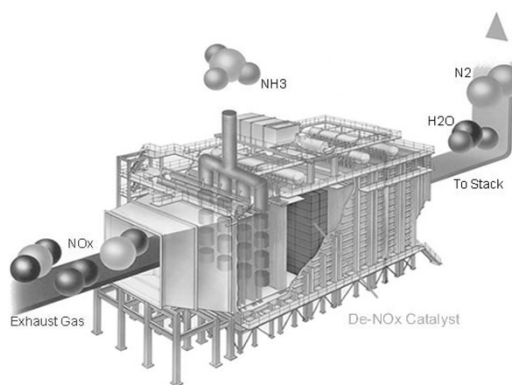
- katalyzátorem jsou
 - oxidy těžkých kovů (Ti, V, W, Mo, Cu, Cr) (300 až 450°C)
 - zeolity – aluminosilikáty (350 až 600°C)
 - oxidy železa s obsahem fosforečnanů železa
 - aktivní uhlí (100 až 220°C)



71

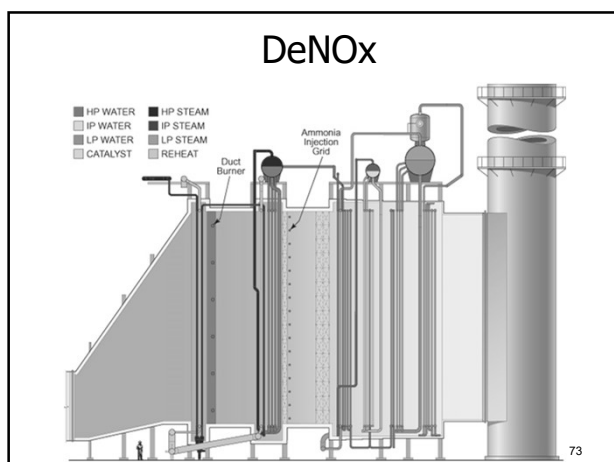
71

DeNOx



72

72



73

Provozní rizika HRSG

vysokoteplotní koroze

- u ZP při vhodné volbě materiálu riziko malé
- spalování oleje a mazutu
 - riziko vanadové koroze (V_2O_5) na přehřívácích s teplotou nad $500\text{ }^\circ\text{C}$
 - riziko sírové koroze v kombinaci s chlorem

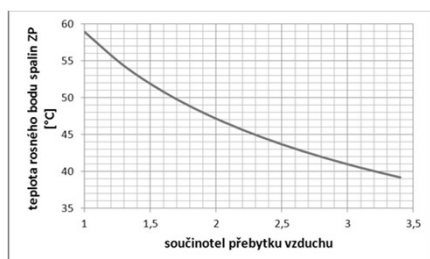
74

74

Provozní rizika HRSG

nízkoteplotní koroze

- u ZP riziko malé – nízká teplota rosného bodu spalin
- riziko roste při spalování sirnatých plynů nebo mazutu



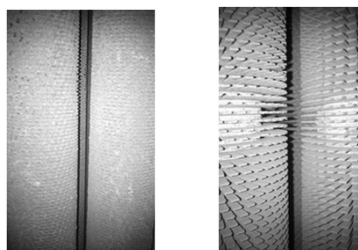
75

75

Provozní rizika HRSG

zanášení výhřevných ploch

- u ZP riziko malé
- při spalování oleje zanášení žebrovaných trubek – je třeba volit větší rozteč žeber a plochy čistit



76

76