

# KOTLE

dělení, typy, názvosloví

## Základní pojmy

**Parní kotel tvoří**

■ **SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ A JEHO PŘÍSLUŠENSTVÍ**

- spalovací komora - ohniště
- rošt nebo hořáky
- zařízení k přípravě paliva
- zařízení k odstraňování zbytků po spálení
- zařízení k ohřevu vzduchu
- zařízení k dopravě vzduchu a spalin

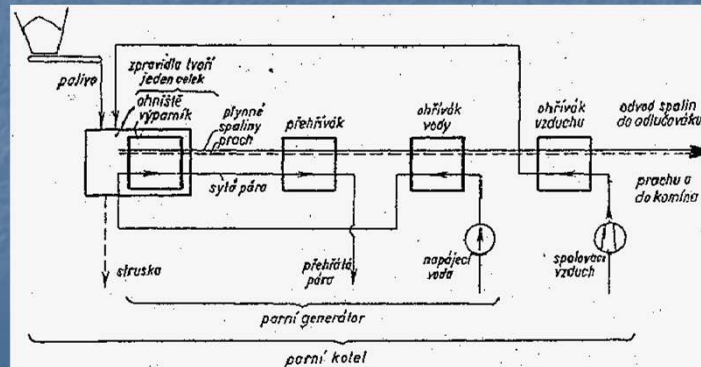
■ **TLAKOVÉ VÝMĚNÍKY TEPLA**

- ohřívák vody (ekonomizér - EKO)
- výparný (varný) systém průtočný nebo s kotelním bubnem (souhrnně označovaný jako výparník)
- přehřívačky páry
- přihřívák páry (pouze u kotlů zapojených na elektrárenskou turbínu) – někdy označovaný též mezipřehřívák

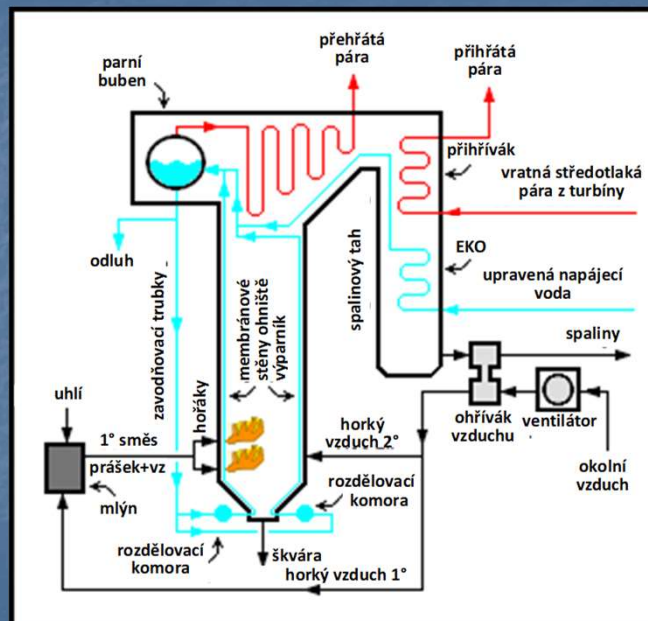
## Uspořádání kotle

U kotle na pevná paliva mají samostatnou cestu tyto látky:

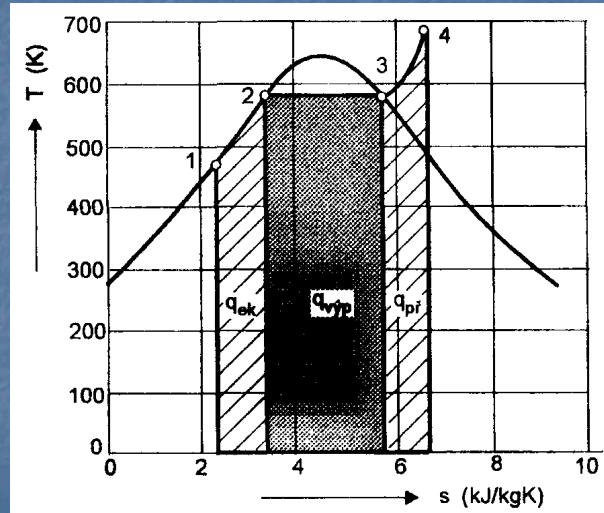
- palivo
- spalovací vzduch
- spaliny
- tuhé zbytky po spalování (struska, popílek)
- pracovní látka - voda a pára.



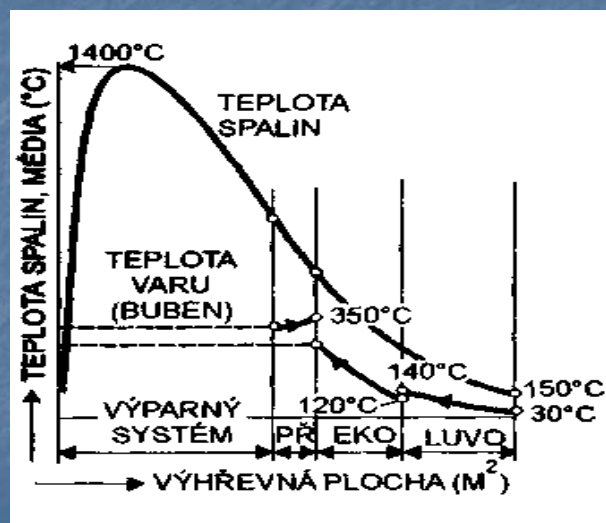
## Elektrárenský parní kotel na práškové uhlí



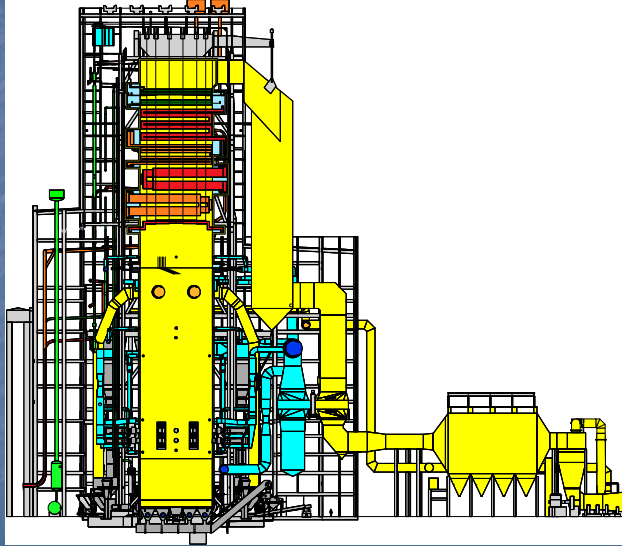
## Změna vody na páru v kotli v diagramu T-s



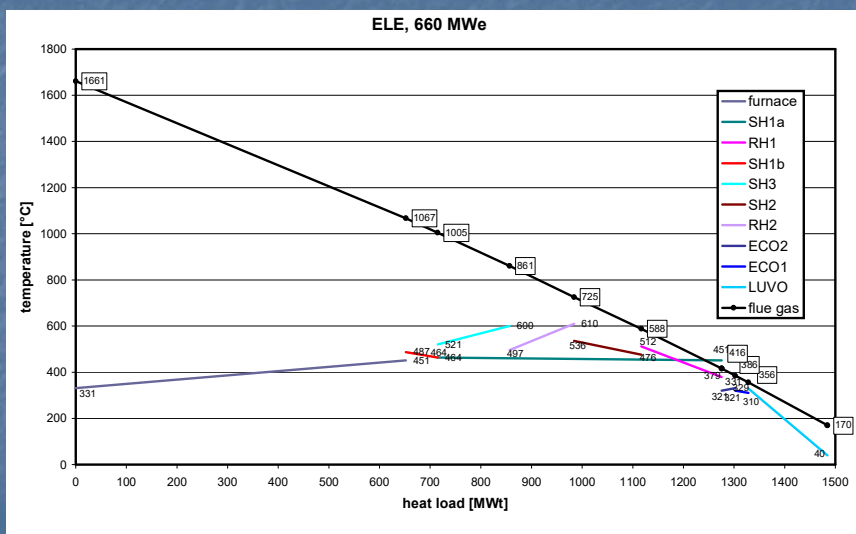
## Diagram teplota - výměnná plocha



## Tepelné schéma kotle ELE 660 MWe



## Q-t diagram



## Požadované vlastnosti kotlů

### Obecné požadavky

- zajištění dokonalého spálení paliva s minimálními ztrátami,
- dobré vychlazení spalin pro omezení komínové ztráty
- nízká vlastní spotřeba

v souhrnu zaručují vysokou účinnost zdroje.

### Dále

- omezení vzniku škodlivých produktů spalování na nejnižší možnou míru. Jsou to tuhé emise,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO a uhlovodíky.
- vysoká provozní spolehlivost
- stabilita spalovacího procesu v pokud možno co nejširším výkonovém režimu.

## Specifické požadavky na kotle pro PTC

### Dány

- charakterem provozu resp. časovým průběhem odběru tepla a elektrické energie,
- teplárenským modulem výroby elektrické energie  $e = E/Q$
- absolutní velikostí dodávky tepla a elektrické energie, resp. výkonem TC,
- předpokládaným nasazením v oblasti čáry trvání výkonu.

## Charakter provozu kotlů

Může být

- převážně **ustálený**, bez velkých a rychlých výkonových výkyvů
- **s rychlými výkonovými změnami** převážně v odběru tepla

**Kotel by měl být schopen pokrýt rychlé změny výkonu.**

Teoreticky jsou dvě cesty, jak toho dosáhnout :

- **lehký tzv. pružný kotel**, který by byl schopen zvýšit výkon rychlým zvýšením příkonu
- **kotel s velkou akumulací konstantou** - požadavek zvýšené dodávky páry řešit s využitím tepla akumulovaného v kotli poklesem tlaku páry v kotli

## Rozdělení kotlů

Existuje celá škála různých způsobů dělení kotlů :

- **podle použití**
  - elektrárenské,
  - teplárenské,
  - kotle pro vytápění,
  - pro spalovny,
  - utilizační (na odpadní teplo)
- **podle provedení**
  - stacionární,
  - mobilní,
  - zvláštní skupinu tvoří kotle balené
- **podle použitého paliva**
  - kotle na tuhá paliva
    - roštové,
    - práškové,
      - granulární,
      - výtavné,
      - cyklónové,
    - fluidní,
  - kotle na kapalná paliva
  - kotle na plynná paliva

- podle pracovního média
  - teplovodní, horkovodní
  - parní
- podle konstrukce výparníku lze parní kotle rozdělit na
  - velkoprostorové (plamencový, žárotrubný, kombinovaný),
  - vodotrubné
    - s přirozeným oběhem ve výparném okruhu,
    - s povzbuzeným oběhem ve výparníkovém okruhu,
    - průtočné.
- podle tlaku se někdy dělí kotle na
  - nízkotlaké (do 2,5 MPa),
  - středotlaké (do 6,4 MPa),
  - vysokotlaké (do 22,5 MPa),
  - s nadkritickým tlakem
- podle způsobu nasazení se vyrábějí kotle jako
  - špičkové,
  - pološpičkové
  - pro základní zatížení.

## Základní parametry kotle

Základní názvosloví :

- **Jmenovitá výkonnost** [kg/s], [t/h] je hmotnostní průtok páry na výstupu z kotle, který musí kotel trvale dosahovat při dodržení jmenovitých hodnot základních parametrů při spalování záručního paliva (BMCR - Boiler Maximum Continuous Rating)
- **Jmenovitý tlak páry** [MPa] je tlak přehřáté páry na výstupu z kotle nebo u hlavního parního uzávěru. Zpravidla se udržuje konstantní v celém regulačním rozsahu kotle.
- **Jmenovitá teplota páry** [°C] je teplota přehřáté (přihřáté) páry na výstupu z kotle nebo u hlavního parního uzávěru. Zpravidla se udržuje konstantní v předepsaných (nebo dohodnutých) tolerancích jen v dohodnutém regulačním rozsahu kotle.
- **Nejvyšší tlak páry** [MPa] je roven nejnižšímu otevíracímu tlaku pojistného ventilu na přehříváku, resp. přihříváku páry.
- **Nejvyšší teplota páry** [°C] je nejvyšší trvale přípustná hodnota teploty.
- **Konstrukční přetlak** [MPa]
  - u **bubnových kotlů** je nejvyšší hodnota přetlaku syté páry (proti atmosféře) při nejvyšším tlaku páry a jmenovité výkonnosti kotle.
  - u **průtočných kotlů** se konstrukční přetlak stanoví samostatně pro jednotlivé části tlakového celku (přehřívák, výparník, ohřívák vody). Rovná se nejvyšší hodnotě vyskytujícího se přetlaku v dané části při nejvyšším tlaku páry a jmenovité výkonnosti.
- **Jmenovitá teplota napájecí vody** [°C] je teplota napájecí vody před napájecí hlavou nebo na vstupu do tlakového systému kotle při jmenovité výkonnosti kotle.
- **Základní parametry kotle** jsou jmenovitý tlak přehřáté páry, jmenovitá teplota přehřáté a přihřáté páry a jmenovitá teplota napájecí vody.

## Příklad označení parního kotle

### KOTEL PARNÍ, PRÁŠKOVÝ, GRANULAČNÍ

4,86 kg/s (75 t/h) - hmotnostní tok páry  
16/3,8 MPa-tlak přehřáté/přihřáté páry  
540/545 °C - teplota přehřáté/přihřáté páry  
240 °C - teplota napájecí vody  
na hnědé uhlí

$Q_i = 15$  MJ/kg – výhřevnost

$W^r = 25\%$  - obsah vody v palivu

$A^r = 15\%$  - obsah popelovin v palivu

### HORKOVODNÍ KOTEL

198 kg/s (715 t/h) - hmotnostní průtok vody ( $M_w$ )

1,2 MPa - tlak vody

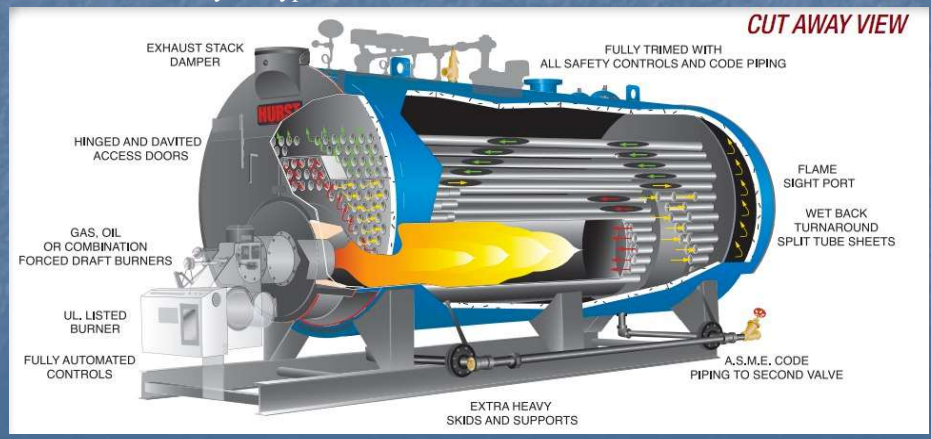
150/90 °C - výstupní/vstupní teplota vody ( $tw_1/tw_2$ )

na zemní plyn

## Typy parních kotlů dle konstrukce výparníku

### Velkoprostorový plamencový žárotrubný parní kotel

- sytá pára se vyrábí varem vody v celém objemu uvnitř pláště
- má relativně velký obsah vody
- kotle menších výkonů nízkotlaké nebo středotlaké, u nichž nedochází k cirkulaci vody ve výparníku





## Vodotrubné parní kotle

- základním konstrukčním prvkem těchto kotlů je trubka
- v trubkách proudí voda/pára
- trubky jsou z vnější strany omývány spalinami
- z trubek jsou vytvořeny
  - výhřevné plochy ve tvaru trubkových svazků
  - chlazené obvodové stěny kotle.
- kotle mají relativně malý vodní obsah - jsou citlivé na změny odběru páry
- zmenšenému vodnímu obsahu kotle odpovídá rychlejší najíždění.

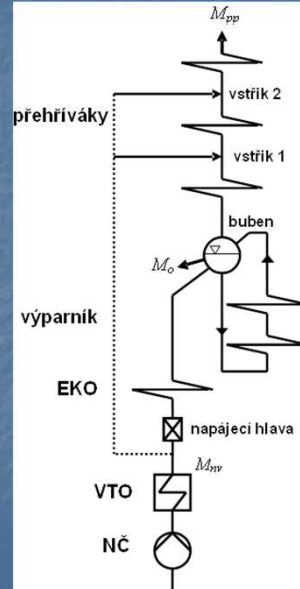
## Vodotrubné parní kotle

- umožňují stavbu kotlů od nejmenších výkonů až po nejvyšší
- tlak a teplotu páry lze volit od barometrického tlaku až po parametry nadkritické.
- kotle lze stavět s ohništi všech typů na kvalitní i méně hodnotná paliva včetně odpadů.
- liší se konstrukcí výparníku
  - s přirozenou cirkulací
  - s nucenou cirkulací
  - průtočný (průtlačný)

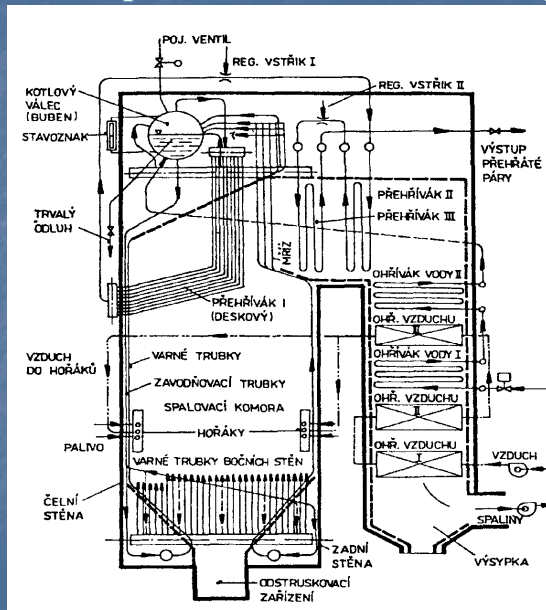
    } bubnové kotle  
    } průtočné kotle

## Kotel s přirozenou cirkulací vody ve výparníku

- voda ve výparníku cirkuluje a částečně se odpařuje – četnost oběhu vody výparníkem udává oběhové číslo  $O = l/x$  ( $x$  = výstupní suchost parovodní směsi)
- průtok v systému výparníku je zajištěn rozdílnou hustotou vody a parovodní směsí  $\Delta\rho$  – užitečný vztlak je dán
 
$$\Delta p = h \cdot \Delta\rho \cdot g$$
 ( $h$  = stavební výška výparníku)
- typickým znakem tohoto výparníku je :
  - pevný konec odpařování daný bubnem
  - do varnic vstupuje sytá voda z bubnu při  $x = 0$
  - z bubnu vystupuje sytá pára při  $x = 1$
- ve vodní části bubnu dochází k zahušťování solí obnažených v obíhající kotelní vodě – nutný odluh  $M_o$



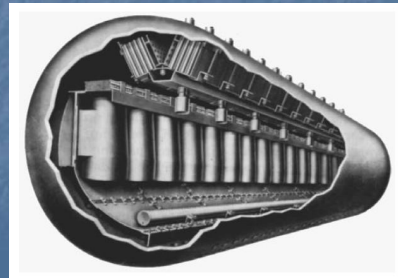
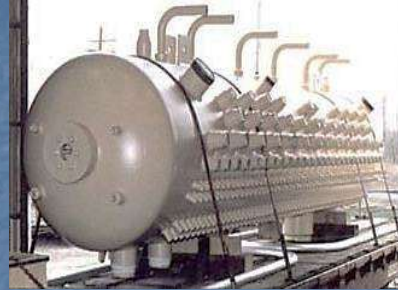
## Kotel s přirozenou cirkulací vody ve výparníku



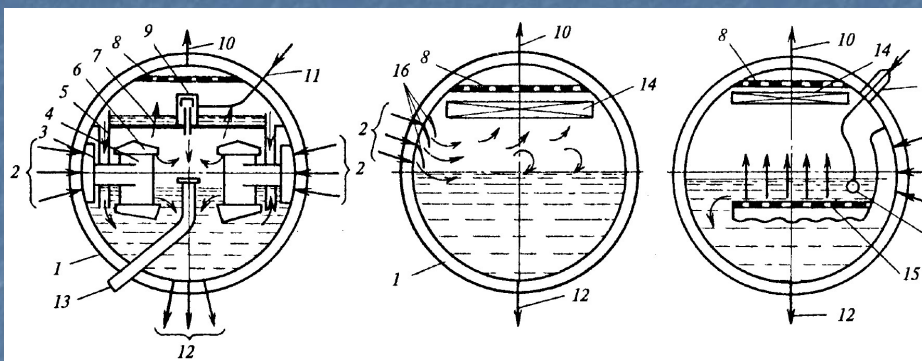
plynotěsná  
membránová  
stěna  
zapojená do  
systému  
výparníku

## Funkce bubnu

- Úlohou bubnu je
  - čištění páry – dokonalé oddělení kotelní vody od páry
  - udržování dostatečné zásoby vody v kotli.
- Buben tvoří spojovací článek mezi ohřívákem vody a přehřívákem
  - do bubnu vstupuje
    - voda z EKA
    - parovodní směs z výparníku
  - z bubnu vystupuje
    - sytá pára do přehříváku
    - sytá voda do výparníku
    - odluh
- K bubnu je připojen
  - vodoznak – pro kontrolu výšky hladiny
  - manometr
  - přípojky pojistných ventilů
  - odvzdušňovací ventily
- Uvnitř bubnu jsou vestavby pro dokonalou separaci vodních kapek z páry
  - odlučovací cyklony
  - plechové žaluzie



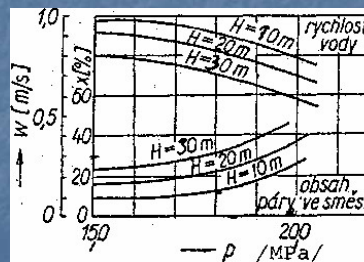
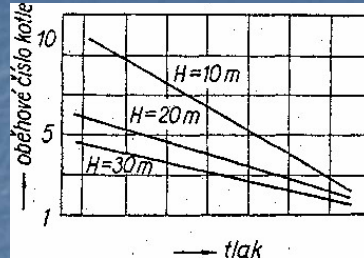
## Různé provedení vestaveb v bubnu



1- buben, 2- vstup parovodní směsi, 3- sběrna, 4- cyklon, 5- parní sběrna, 6- stříška, 7- děrovaný plech mytí páry, 8- stropní vestavba, 9- rozdělovací komora napájecí vody, 10- výstup páry, 11- přívod napájecí vody, 12- zavodňovací trubky, 13- trubka havarijního přepadu vody, 14- žaluziový separátor, 15- potopený děrovaný plech, 16- usměrňovací plech

## Nevýhody přirozené cirkulace

- Nízký užitečný vztlak vyžaduje minimalizaci tlakových ztrát celého systému – použití svislých přímých trubek většího průměru (60 mm)
  - S rostoucím tlakem a s rostoucí výškou se zvyšuje obsah páry  $x$  ve směsi a snižuje se rychlost vody (oběhové číslo).
    - S rostoucím tlakem vyráběné páry se zmenšuje rozdíl hustoty vody a syté páry - oběhové číslo výparníku se snižuje.
    - Čím je větší výška výparníku (pokud výparník tvoří stěny ohniště) tím je cirkulační číslo menší. S rostoucí výškou výparníku roste jeho parní výkonost (suchost  $x$ ) rychleji než rychlost vody (hmotnostní průtok) na vstupu do varnice.
- ↓
- Použití výparníku s přirozeným oběhem je omezeno tlakem.
  - Za provozně ověřený tlak při spolehlivé funkci výparníku se považuje tlak kolem 14,0 MPa.



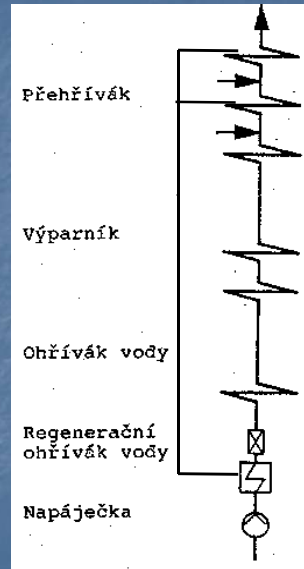
## Kotle s nuceným oběhem (povzbuzenou cirkulací)

- Nucený oběh, který je vyvolán oběhovým čerpadlem, zajišťuje stabilní funkci výparníku i v oblasti vyšších tlaků (do 18 MPa)
- Schéma se výrazně neodlišuje od kotle s přirozenou cirkulací
  - ohřívák napájecí vody je rovněž připojen k bubnu
  - do varnice vstupuje voda z bubnu o stavu sytosti
- Rozdíl je v zařazení oběhového čerpadla v zavodňovacím potrubí výparníku (dopravní přetlak kolem 0,3 až 0,6 MPa), které zajišťuje dostatečný průtok pro spolehlivý provoz výparníku
- Výparník s nuceným oběhem může být proveden z trubek menšího průměru (oběhové čerpadlo pokryje větší tlakové ztráty) – je lehčí a levnější, může mít menší výšku
- Pro tyto kotle používá název La Mont



## Kotle průtočné

- Ohřev vody na bod varu, odpaření vody a přehřátí vyrobené páry je v principu soustředěno do „jedné“ trubky, do které se na vstupu přivádí napájecí voda a z výstupu se odvádí přehřátá pára
- Průtočný systém nemá bubnu a jednotlivé části tlakového systému navzájem na sebe navazují (nemají žádný společný prvek).
- Obecně u průtočného systému není pevný začátek a konec odpařování – poloha výparníku v kotli se mění v závislosti na výkonu, změně teploty napájecí vody, struskování stěn ohniště apod.
- Rozdíl proti cirkulačnímu výparníku je
  - ve stavu vody na vstupu do výparníku – voda musí být bezpečně pod mezí sytosti
  - ve stavu páry vstupující do přehříváku, s níž se vzhledem k vyšší rychlosti proudění směsi ve varnici strhává i vodní mlha.
- Rozdíl je i ve způsobu regulace kotle – odpadá regulace hladiny v bubnu a kotel se reguluje tak, že se trvale udržuje stálý poměr mezi průtokem vody napájené do kotle a tepelným výkonem ohniště.
- Průtok vody výparníkem odpovídá  $O = 1$  => vychází výrazně menší počet paralelních trubek s velkou délkou - to vyžaduje specifické konstrukční řešení – vznikly 3 koncepce



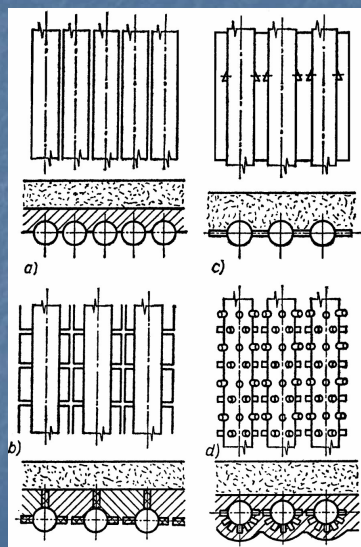
## Provedení výparníku

- Výparník pokrývá stěny spalovací komory případně dalších prostor kotle.
- U nízkotlakých a středotlakých kotlů mohou být další části výparníku tvořeny
  - deskovými plochami
  - kotlovým svazkem
- Dochází v něm k varu vody za vzniku páry
  - u kotlů bubnových nebo se superponovanou cirkulací je odpaření 1 kg vody při jednom průchodu výparníkem pouze částečné - charakterizováno cirkulačním číslem,
  - u průtočných kotlů je odpaření vody ve výparníku úplné, případně může být dokončeno v tzv. přechodníku

## Konstrukční provedení výparníku bubnových kotlů s přirozenou cirkulací

- Proudění výparníkem je zajištěno termosifonovým efektem v důsledku rozdílu hustoty vody na vstupu a parovodní směsi na výstupu z varnic.
- Využitelný tlakový spád je relativně malý, proto musí být minimalizovány tlakové ztráty.
- Výparník sestává ze svislých přímých trubek většího průměru, nejčastěji 60 mm, pouze na stropě evt. nosu spalovací komory bývají trubky šikmé se sklonem minimálně 20° k horizontále.
- Jednotlivé varnice mohou být
  - volné holé,
  - opatřené žebry,
  - trny a omazem
  - svařené ocelovou pásovinou do membrány.

## Způsob provedení stěnového výparníku



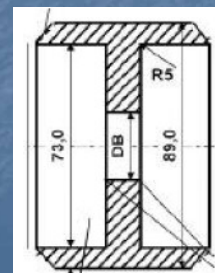
- a – holé volné trubky
- b- trubky s praporky
- c- membránová stěna
- d- otrněné trubky

## Konstrukční provedení výparníku bubnových kotlů s nucenou cirkulací

- Navrhuje se pro bubnové kotle s vyššími parametry páry.
- Pro návrh platí podobné principy jako u přirozené cirkulace.
- Oběhové čerpadlo zajišťuje
  - větší využitelný přetlak
  - stabilní průtok nezávisle na výkonu kotle.
- Je možné užít trubky menšího průměru 32 až 38 mm,
  - výparník vychází lehčí,
  - kotel je nižší s menším cirkulačním číslem 5 až 8.
  - varnice mohou být meandrovitě vinuté (klasického provedení La Mont)
- Oběhové čerpadlo je většinou bezucpávkové s pracovní přetlakem 0,3 až 0,6 MPa
- Odpovídající konstrukční délka varnic 20 až 40 m při vstupní rychlosti vody 1,0 až 1,5 m/s

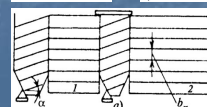
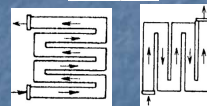
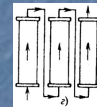
## Konstrukční provedení výparníku bubnových kotlů s nucenou cirkulací

- Všechny trubky výparníku s nuceným oběhem se clonkují
- Clonka představuje konstantní odpor, který
  - zmenšuje nerovnoměrnosti průtoku v paralelních trubkách
  - kompenzuje konstrukční nebo provozní rozdíly
- Clonky
  - vyrábějí se z nitrídané oceli
  - průměr bývá 6 až 12 mm
  - jejich odpor má být řádově srovnatelný s odporem varnice.
- Clonky se instalují na vstupu do jednotlivých sekcí výparníku



## Výparník průtočných kotlů

- Dochází v něm k postupnému a úplnému odpaření přivedené vody
- Konec odpaření není pevně dán a posouvá se s výkonem kotle
- Odpadají zavodňovací trubky, takže se skládá
  - z rozváděcí a sběrné komory
  - ze soustavy paralelních varnic o vnějším průměru 32 až 38 mm,
- Délka varnic průtočných kotlů vychází větší - tři klasická vinutí varnic ve výparníku :
  - Bensonův kotel
    - výparník ze sekcí se svislými varnicemi,
    - sekce vzájemně propojeny převáděcími trubkami průměru 102 mm
  - Sulzerův kotel
    - výparník vytvořený jako svislý nebo vodorovný meandr z trubek o průměru 72 až 76 mm
    - separátor vlhkosti za výparníkem
  - Ramzinův kotel - šroubovitě vinutý výparník
    - jednochodý
    - vícechodý



## Výparník průtočných kotlů

- Prakticky u všech koncepcí výparníků průtočných kotlů se provádí clonkování z důvodu
  - zajištění rovnoměrnosti průtoku
  - zamezení nestabilitě proudění.
- Škrtící clony se umísťují
  - na vstup každé varnice
  - do přívodního potrubí jednotlivých sekcí – neměly by být širší než 2 až 2,5 m
- Pro meandrové anebo spirálové vinutí se používá trubek o vnějším průměru 32, 38, 44,5 a 51 mm.
- Větších průměrů varných trubek se používá na odpařovacím a přehřívákovém úseku výparníků kotle.
  - vstupní úseky varnic mají průměr 32 mm nebo 38 mm.
  - trubky o průměru 44,5 mm se používají v případě, že na výstupu z výparníku je parovodní směs - tj. kotel má vnesený přechodník
  - trubky o průměru 51 mm se používají v přehřívákovém úseku výparníků, tj. když přechodové pásmo představuje nedílnou součást odpařovací plochy kotle.
- Odstupňování průměru varnice se používá z důvodů zmenšení tlakové ztráty výparníku.

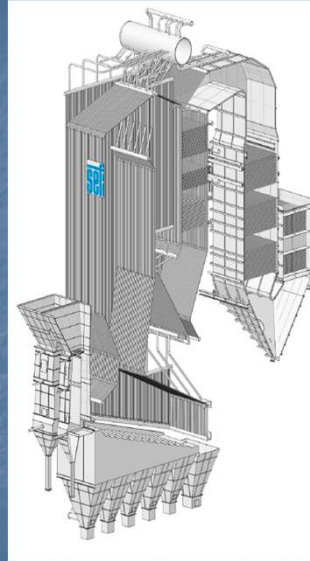


## Výhody bubnových kotlů

- mohou pracovat s napájecí vodou horší kvality při dodržení kvality páry
- mají velký vodní obsah => vyšší akumulární schopnost je předurčuje k průmyslovým aplikacím
- nízká tlaková ztráta => nižší příkon napáječky
- univerzální použití – teplárny, elektrárny, průmyslové energetické centrály

## Nevýhody bubnových kotlů

- tlakové a výkonové omezení
- těžší a dražší konstrukce
- menší provozní pružnost
- pomalejší najíždění

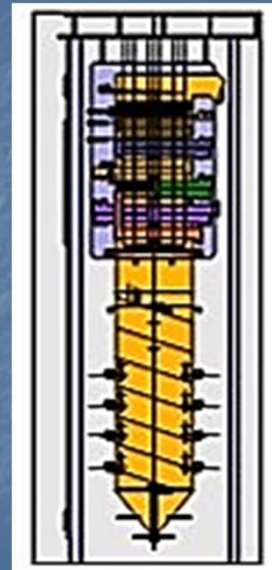


## Výhody průtočných kotlů

- odpadá parní buben
  - levnější řešení
  - provozně pružnější
- použitelné pro velmi vysoký a nadkritický tlak

## Nevýhody průtočných kotlů

- velká tlaková ztráta výparníku (1,0 – 1,6 MPa) vynucená zajištěním stabilního vyrovnaného průtoku ve všech varnicích při nízkém výkonu kotle
- složitější regulace
- menší akumulace ve výparníku – citlivost na rychlé změny odběru páry
- složitější najíždění – nutný separátor vlhkosti na konci výparníku
- vyšší nároky na kvalitu vody – demineralizace
- uplatnění v podstatě pouze v elektrárnách



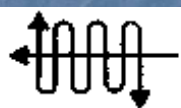
## Konstrukční řešení výhřevných ploch

Výhřevné plochy dělíme

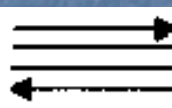
- podle funkce
  - ohříváky vody
  - výparníky
  - přehříváky, přihříváky
  - ohříváky vzduchu
- podle převažujícího mechanismu sdílení tepla na
  - sálavé – v oblasti nejvyšších teplot – výparník, plochy za SK
  - konvekční – husté trubkové svazky na konci kotle
  - kombinované
- podle způsobu obtékání teplosměnné plochy
  - s podélným obtékáním – deskové, nástěnné i žárotrubné
  - s příčným obtékáním – svazkové, trubkové mříže
  - s kombinovaným obtékáním

## Svazkové výhřevné plochy

- Z hlediska změn proudění rozeznáváme:
  - omývání příčné, tj. kolmo na výhřevnou plochu trubek
  - omývání podélné, tj. rovnoběžně s osou trubek



příčné



podélné

- Z hlediska uspořádání trubek rozeznáváme:
  - trubky za sebou (v zákrytu)
  - trubky přesazené (vystřídané)

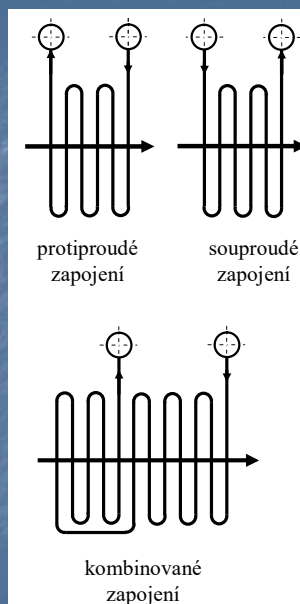
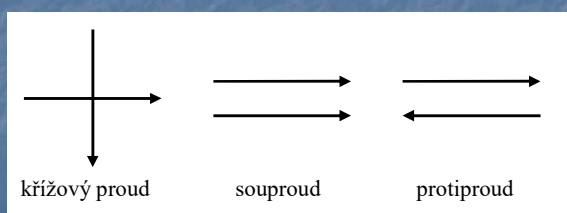


za sebou

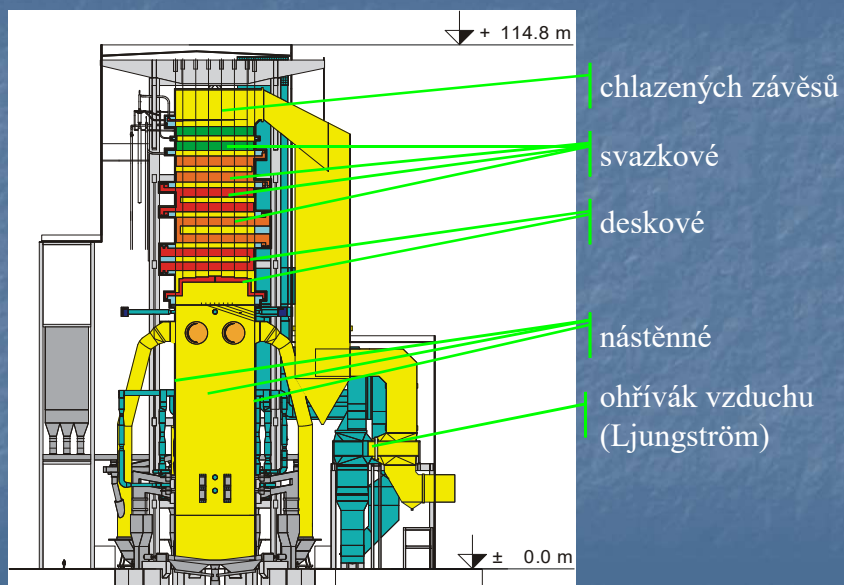


přesazené

- Z hlediska zapojení rozeznáváme:
  - křížové zapojení
  - protiproudé zapojení
  - souproudé zapojení
  - kombinované zapojení



- Z hlediska provedení rozeznáváme plochy



## Deskový přehřívák na chlazených závěsech



## Deskový přehřívák na chlazených závěsech



## Trubkový svazek před montáží do kotle



## Trubkový svazek ohříváku vody



## Trubkový ohřívák vzduchu



## Membránová stěna

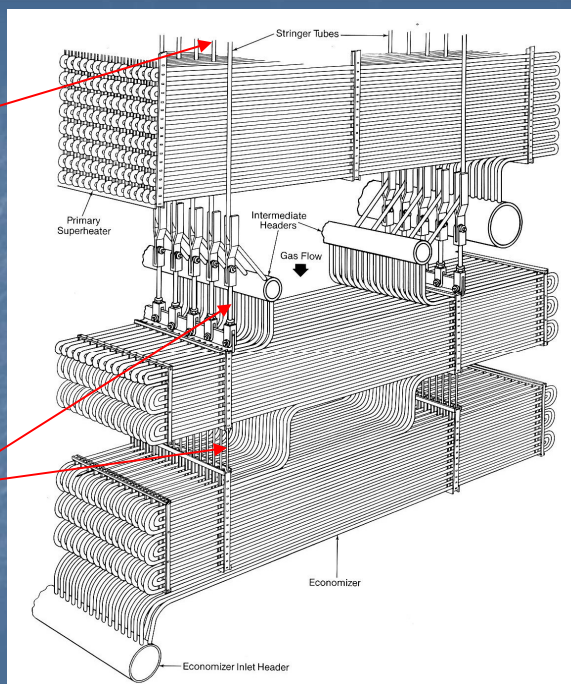


## Závěsy

- chlazené



- nechlazené  
lze je použít  
pouze v nižších  
teplotách spalin



## Určení účinnosti kotle a tepelných ztrát

Metodicky je určení účinnosti kotlů měřením dáno normou  
**ČSN EN 12952-15 Vodotrubné kotle a pomocná zařízení**  
– Část 15: Přejímací zkoušky

- norma uvádí základní požadavky na zkoušky tepelného výkonu (přejímací zkoušky) používané u parních nebo horkovodních kotlů s přímým ohřevem
- zkoušky prokazují, že byly splněny garance s ohledem na účinnost a výkon nebo jiné parametry
- norma obsahuje (mimo jiné):
  - doporučení pro provádění přejímacích zkoušek
  - definici vnějšího okruhu kotelní sestavy a definici účinnosti
  - podrobnosti o nejistotě měření

## Určení účinnosti kotle a tepelných ztrát

Zjednodušená metodika:

- používá se při návrhu nových kotlů – je zakomponována do návrhové metodiky
- při běžných provozních bilancích

Lze požit dvě metody určení účinnosti kotle :

- metoda přímá – vychází z definice účinnosti

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{\dot{Q}_{pr}}$$

- metoda nepřímá

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{pr} - \dot{Q}_z}{\dot{Q}_{pr}} = 1 - \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{pr}} = 1 - \sum Z_i$$

47

## Určení účinnosti kotle a tepelných ztrát

Volba metody:

- přímá
  - je-li možné provést přesná měření průtoku paliva – zemní plyn, olej
  - u malých kotlů - zahrnuje ztráty sáláním a konvekcí, čímž eliminuje nejistotu jejích měření
- nepřímá
  - pro pevná paliva, kdy není možné nebo je velmi obtížné přesně změřit velké hmotnostní průtoky
  - kdy se velmi mění vlastnosti paliv
- metody mají různé úrovně nejistoty měření - vždy by měla být použita metoda s největší přesností.

48



## Přímá metoda určení účinnosti kotle

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{\dot{Q}_{pr}}$$

- tok tepla přivedeného do kotle (tepelný příkon)

$$\dot{Q}_{pr} = M_{pal} \cdot Q_i \quad [kW]$$

$$\dot{Q}_{pr} = V_{pl} \cdot Q_i \quad [kW]$$

- tepelný výkon kotle

$$\dot{Q}_{vyr} = M_w \cdot c_p \cdot (t_w - t_{nv}) \quad \text{resp.} \quad M_p \cdot (i_{pp} - i_{nv}) \quad [kW]$$

49

## Nepřímá metoda určení účinnosti kotle

$$\eta_V = 1 - \sum Z_i$$

Poměrné tepelné ztráty kotle  $i$  jsou

- $k$  - fyzickým teplem spalin (komínová)
- $sv$  - sdílením tepla do okolí
- $CO$  - hořlavinou ve spalinách
- $C$  - hořlavinou v tuhých zbytcích
- $f$  - fyzickým teplem tuhých zbytků

} plynové kotle

} kotle na tuhá paliva

Nejvýznamnější je **ztráta komínová**, závisí na

- teplotě spalin za kotlem
- přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem

50

## Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

- je způsobena obsahem uhlíku v tuhých zbytcích.

$$Z_c = \sum_i Q_c \cdot \frac{C_i}{1-C_i} \cdot \frac{X_i}{Q_i} \cdot A^r = \frac{32700 \cdot A^r}{Q_i} \cdot \left( \overset{\text{škvrá (struska)}}{\frac{C_s}{1-C_s} \cdot X_s} + \overset{\text{propad}}{\frac{C_r}{1-C_r} \cdot X_r} + \overset{\text{popílek (úlet ve spalínách)}}{\frac{C_p}{1-C_p} \cdot X_p} \right) \quad [-]$$

- $Q_c = 32700$  kJ/kg je výhřevnost uhlíku (nebo laboratorně zjištěná výhřevnost hořlaviny),
- $C_i$  (-) - obsah uhlíku v uvažovaném druhu tuhých zbytku.
  - u roštových kotlů (9-16%, v propadu až 35 %),
  - u granulačních ohnišť 2 -15 %,
  - u výtavných 0 %.
- $X_i$  - poměr hmotnosti popela v uvažovaném druhu tuhých zbytků k hmotnosti popelovin v palivu (kg/kg).  
Součet  $X_s + X_r + X_p = 1$ .
- $A^r$  (-) je obsah popelovin v palivu.

51

## Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

	$X_s$ (%)	$X_r$ (%)	$X_p$ (%)
Ohniště roštová	62-77	0-6	13-33
Ohniště granulační	10-20	-	75-80
Ohniště výtavná	35-50	-	40-55
Ohniště fluidní (stacionární)	68-80	0-2	20-30
Ohniště cyklonová	70-80	-	10-20

- Ztráta, hořlavinou v tuhých zbytcích se nazývá též ztráta mechanickým nedopalem.

52

## Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

- spočívá v nevyužitém teple odcházejících TZ

$$Z_f = \sum_i \frac{1}{1-C_i} \cdot \frac{X_i \cdot i_i}{Q_i^r} \cdot A^r = \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot \left( \frac{X_s \cdot i_s}{1-C_s} + \frac{X_r \cdot i_r}{1-C_r} \right)$$

- $i_i = c_i \cdot t_i$  (kJ/kg) je entalpie tuhých zbytků.
- Při výpočtech se pro teplotu TZ dosazuje
  - teplota škváry 600 °C,
  - teplota strusky 1500 °C .
- Ztráta fyzickým teplem popílku se obvykle zahrnuje do ztráty fyzickým teplem spalin formou entalpie úletu
- Ztráta  $Z_f$  je při spalování kapalných a tuhých paliv nulová.

53

## Ztráta hořlavinou ve spalinách

- je dána chemickou nedokonalostí spalování
- projevující se obsahem nespálených plynů CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>x</sub> event. dalšími ve spalinách

$$Z_{CO} = (1 - Z_C) \cdot O_{SV} \cdot \frac{\sum q_i}{Q_i^r}$$

- $q_i = 12640 \cdot \omega_{CO} + 10800 \cdot \omega_{H_2} + 35800 \cdot \omega_{CH_4} + \dots$
- $O_{SV}$  (Nm<sup>3</sup>/kg, Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>) je objem spalin z 1 kg paliva nebo 1 Nm<sup>3</sup> plynu

54

## Ztráta fyzickým teplem spalin

- je dána energií odcházejících plyných spalin.
- přibližně ji lze určit ze vztahu

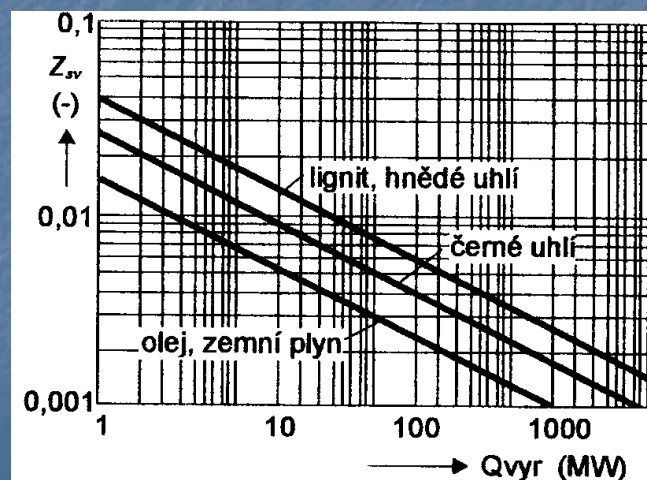
$$Z_k = (1 - Z_C) \frac{I_S^{t_k, \alpha_k} - I_S^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_i}$$

- $I_S^{t_k, \alpha_k}$  [kJ/kg<sub>paliva</sub> resp. kJ/Nm<sup>3</sup><sub>plynu</sub>] je entalpie spalin za kotlem
- $I_S^{t_{vz}, \alpha_k}$  [kJ/kg<sub>paliva</sub> resp. kJ/Nm<sup>3</sup><sub>plynu</sub>] je entalpie spalin při teplotě vzduchu v kotelně  $t_{vz}$  [°C]
- obvykle se označuje jako komínová ztráta
- bývá většinou největší ztrátou kotle
- rozhodující vliv má
  - teplota spalin za kotlem  $t_s$
  - součinitel přebytku vzduchu za kotlem  $\alpha$

55

## Ztráta sdílením tepla do okolí

- představuje teplo ztracené sáláním a vedením pláštěm kotle
- je funkcí velikosti kotle a druhu spalovaného paliva.



56

## Je třeba si uvědomit

- účinnost kotle **není konstantní**, mění se
  - s výkonem kotle
  - se změnou provozních parametrů kotle
  - se změnou teploty pracovního média
  - s vlastnostmi paliva
  - s teplotou okolního vzduchu
  - se zanesením výhřevných ploch kotle

Proto v ročních bilancích nelze počítat se jmenovitou účinností kotle, nýbrž s **účinností průměrnou**, která respektuje

- závislost účinnosti na výkonu kotle
- počet najíždění kotle ze studeného stavu
- udržování kotle v teplé záloze atd.

57

## Optimalizace spalování

Cílem optimalizace spalování je  
**dosažení maximální účinnosti kotle**

- nejčastěji se provádí optimalizací **množství a distribuce spalovacího vzduchu**
- s rostoucím přebytkem spalovacího vzduchu
  - klesají ztráty hořlavinou ve spalinách a TZ
  - roste ztráta komínová

58

## Optimální přebytek spalovacího vzduchu

Závisí na

- druhu spalovaného paliva
- možnostech spalovacího zařízení

Spalování plynu

- atmosférické hořáky  $\alpha \sim 1,5$  až 2
- přetlakový hořáky  $\alpha \sim 1,05$  až 1,25

Spalování uhlí

- na pevném roštu  $\alpha \sim 2$  až ???
- na mechanickém roštu  $\alpha \sim 1,5$  až 2,5
- ve formě prášku  $\alpha \sim 1,12$  až 1,25

59

## Spalování zemního plynu

Vliv nedokonalosti spalování na účinnost kotle

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SSmin}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_i^r}$$

$$O_{2ref} = 3 \%$$

$$O_{SSmin} = 8,54 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$Q_i^r = 36\,400 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$mgCO = 100 \text{ mg/Nm}^3$$

$$Z_{CO} = 0,028 \%$$

60

# Spalování zemního plynu

Vliv přebytku vzduchu na účinnost kotle

$$Z_k = \frac{I_S^{t_k, \alpha_k} - I_S^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_i^r}$$

Určení součinitele přebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{0,21 + \left( \frac{O_{SS\min}}{O_{VS\min}} - 1 \right) \cdot o_{O_2}}{0,21 - o_{O_2}}$$

$$O_{VS\min} \doteq O_{SS\min}$$



$$\alpha = \frac{0,21}{0,21 - o_{O_2}}$$

přesněji pro ZP

$$O_{VS\min} \doteq 0,9 O_{SS\min}$$

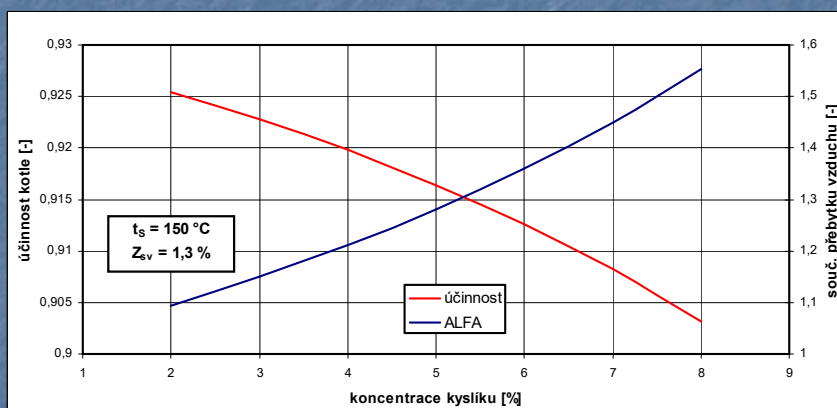


$$\alpha = \frac{0,21 - 0,1 o_{O_2}}{0,21 - o_{O_2}}$$

61

# Spalování zemního plynu

Vliv přebytku vzduchu na účinnost kotle



Optimální seřízení hořáku plynového kotle – na minimální přebytek vzduchu kdy je ještě dodržen emisní limit CO

62

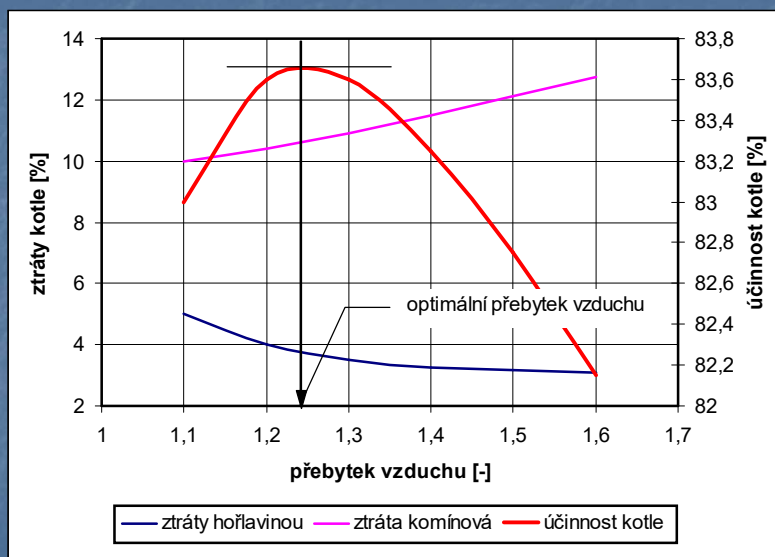
# Spalování tuhých paliv

přibývají další dvě ztráty

- fyzickým teplem tuhých zbytků
  - závisí na obsahu popela v palivu
  - pohybuje se v řádu desetin %
- hořlavinou v tuhých zbytcích
  - závisí na
    - vlastnostech paliva
    - způsobu spalování
    - přebytku spalovacího vzduchu
  - pohybuje se v řádu jednotek %

63

## Optimalizace spalování tuhých paliv

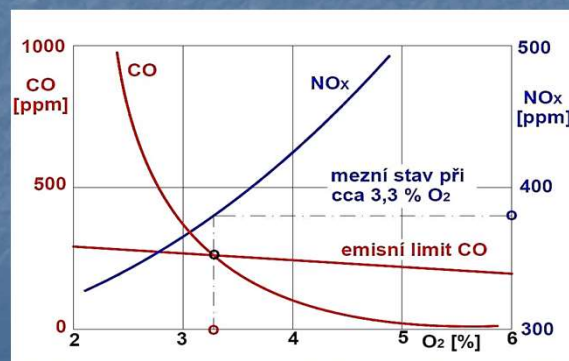


64



## Optimalizace spalování tuhých paliv

- provoz s optimálním přebytkem vzduchu je třeba konfrontovat s emisními limity
  - CO
  - NO<sub>x</sub>
- při překročení emisního limitu
  - CO => je třeba přebytek vzduchu zvýšit
  - NO<sub>x</sub> => je třeba přebytek vzduchu snížit



65

## Komplikace při určování účinnosti kotlů na tuhá paliva

- **přímou metodu nelze obvykle použít** – problém s určením průtoku paliva do kotle
- je třeba znát přesné **složení paliva**
- reálná **výhřevnost paliva se mění** v závislosti na obsahu vody
- přesné **určení ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích** vyžaduje laboratorní analýzu

66

## Shrnutí

- **Přímá metoda** určení účinnosti kotle
  - je poměrně jednoduchá, neboť vyžaduje minimální počet měřených veličin
  - dobře aplikovatelná u plynových a olejových kotlů
  - podává jen všeobecnou informaci o účinnosti kotle
  - nedostačující informace pro posuzování kvality provozu a zejména pak pro rozbor dosažených výsledků a návrh opatření
- **Nepřímá metoda** určení účinnosti kotle
  - poskytuje přesnější výsledky a podrobnější informaci o provozních vlastnostech kotle

67

## Kondenzační kotle

### Problém :

- kondenzací části vodní páry se **mění složení a objem** spalin připadajících na 1 Nm<sup>3</sup> spáleného plynu

### Důsledek :

- u **nepřímé metody** nelze použít **klasické vztahy** pro určení tepelné kapacity spalin

### Možné řešení :

- použít návod dle :  
Dlouhý-Valenta : Zjišťování tepelné účinnosti plynových kotlů a kotelen – viz [www.TZBinfo.cz](http://www.TZBinfo.cz)

### Pozor :

- metoda vztahuje účinnost kotle ke **spalnému teple plynu**  
=> **výsledek není porovnatelný s účinností vyjádřenou pomocí výhřevnosti, která dává vyšší hodnoty**

68