

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

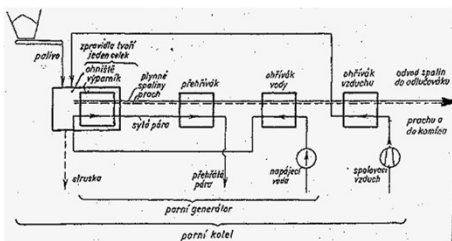
■ TLAKOVÉ VÝMĚNÍKY TEPLA

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

Uspořádání kotle

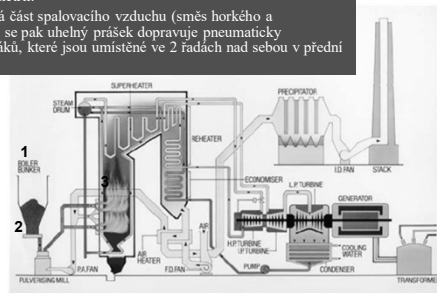
U kotle na pevná paliva mají samostatnou cestu tyto látky:

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



Cesta paliva – uhelný kotel

- Cesta paliva začíná u zásobníků surového uhlí - 1.
- Ve spodní části každého zásobníku je řetězový vynašeč uhlí.
- Palivo v zásobníku se sesouvá působením tíže do vynašeče, kterým se dopraví požadované množství uhlí do svodky a tou pak do mlýna 2.
- Ve mlýně se uhlí vysuší na požadovaný obsah vody a rozeřeje na potřebnou granulometrii.
- K sušení se používá část spalovacího vzduchu (směs horkého a studeného), kterým se pak uhlíkový prášek dopravuje pneumaticky praškodovými do hořáků, které jsou umístěny ve 2 řadách nad sebou v přední stěně kotle 3.



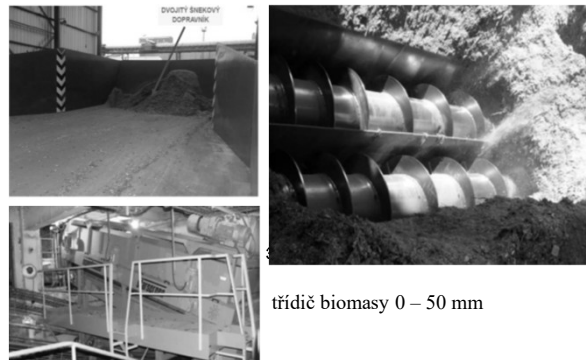
Cesta paliva – kotel na biomasu

- vykládka štěpky z kamionu
- velkokapacitní čelní nakladač



Cesta paliva – kotel na biomasu

- doprava ze skládky do kotelny



tríděč biomasy 0 – 50 mm

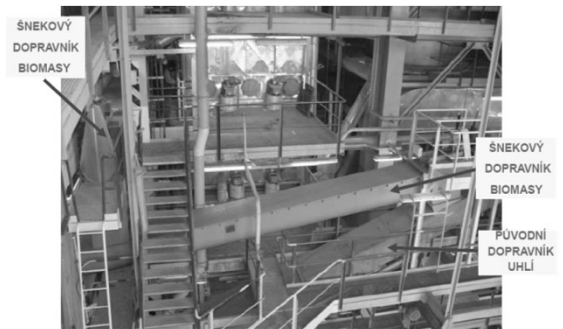
Cesta paliva – kotel na biomasu

- denní zásobník v kotelně
- problémem je váznutí biomasy - řešení
 - stěny zásobníku svislé nebo s negativním sklonem
 - polyblůvka celá podlaha zásobníku



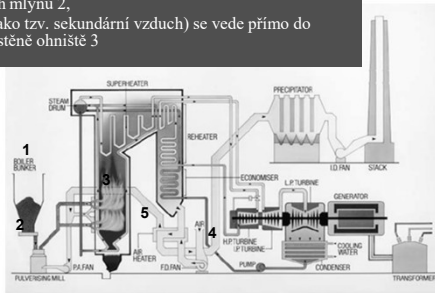
Cesta paliva – kotel na biomasu

- šnekový dopravník biomasy ze zásobníku do kotle



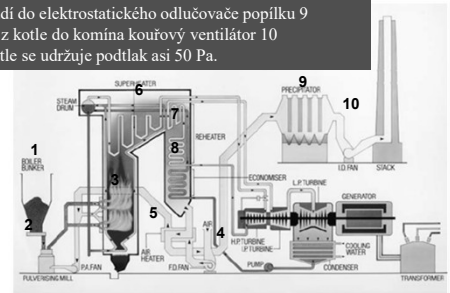
Cesta vzduchu

- Spalovací vzduch se nasává vzduchovým ventilátorem 4
 - jednak pod stropem kotelný
 - jednak z vnějšku.
- Vzduch se pak ohřívá spaliny v regenerativním ohříváku 5
- Vzduchovými kanály se jedna jeho část (jako tzv. primární vzduch) vede do uhelných mlynů 2,
- Zbývající část (jako tzv. sekundární vzduch) se vede přímo do hořáků v přední stěně ohniště 3



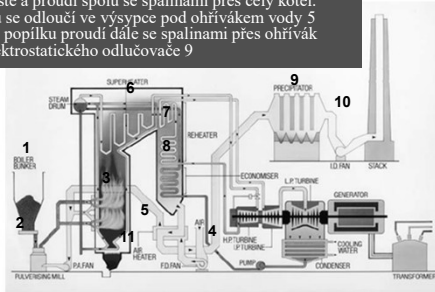
Cesta spalin

- Spaliny, které vznikají v ohništi spalování uhlí, proudí dále svisle nahoru konvekčním tahem, v němž jsou umístěny svazky přehříváku 6
- Dále pak proudí směrem dolů druhým konvekčním tahem přes přehřívák 7 a ohřívák 8 napájecí vody do regenerativního ohříváku 5 spalovacího vzduchu.
- Odtud pak proudí do elektrostatického odlučovače popílku 9
- Spaliny odsává z kotle do komína kouřový ventilátor 10
- Pod stropem kotle se udržuje podtlak asi 50 Pa.



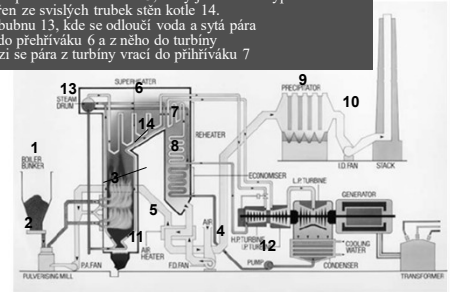
Cesta tuhých zbytků

- Tuhé zbytky po spalování se z kotle odvádí ve formě strusky a popílku.
- V práškovém granulačním ohništi se zachytí cca 15 až 25% z popela přivedeného s palivem. Zachycená struska ve výsypce padá do odstruskovacího zařízení 11
- Zbývající větší část z popela přivedeného palivem je vynášena spaliny z ohniště a proudí spolu se spaliny přes celý kotel.
- Malá část prachu se odloučí ve výsypce pod ohřívákem vody 5
- Většina jemného popílku proudí dále se spaliny přes ohřívák vzduchu 5 do elektrostatického odlučovače 9

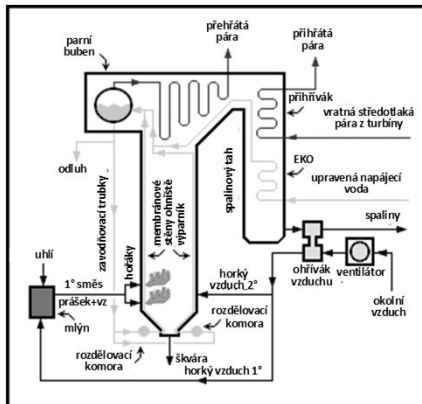


Cesta vody a páry

- Pracovní látka - voda a pára - protéká trubkami teplosměnných ploch tlakového systému. Voda se ohřívá, odpařuje a pára přehřívá na žádanou teplotu.
- Napájecí vodu o teplotě 105 až cca 290°C dopravuje do kotle napájecí čerpadlo 12.
- Voda vstupuje do ohříváku vody 8, který je proveden jako svazek vodorovných trubkových hadů.
- Ohřátá voda se vede potrubím do bubny 13, který je součástí výparníku.
- Výparník je vytvořen ze svislých trubek stěn kotle 14.
- Výparník končí v bubnu 13, kde se odloučí voda a sytá pára
- Sytá pára se vede do přehříváku 6 a z něho do turbíny
- Po částečné expanzi se pára z turbíny vrací do přehříváku 7



Elektrárenský parní kotel na práškové uhlí



Změna vody na páru v kotli v diagramu T-s

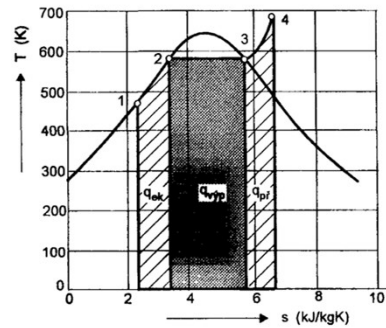
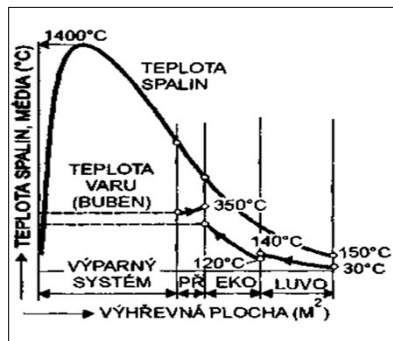
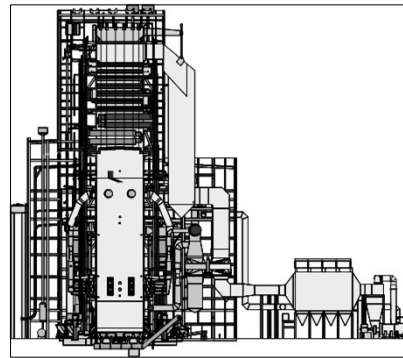


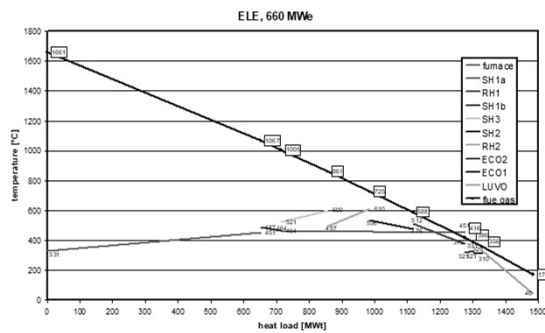
Diagram teplota - výměnná plocha



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 kominové ztráty
- nízká vlastní spotřeba

v souhrnu zaručují vysokou účinnost zdroje.

Dále

- omezení vzniku škodlivých produktů spalování na nejnižší možnou míru. Jsou to tuhé emise, SO_2 , NO_x , CO a uhlovodíky.
- vysoká provozní spolehlivost
- stabilita spalovacího procesu v pokud možno co nejširším výkonovém režimu.

Specifické požadavky na kotle pro průmyslové teplárny

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 teplárny,
- 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 akumulační 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 vytápny,
 - 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 výkonost [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 výkonosti 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 výkonosti.
- Jmenovitá teplota napájecí vody [°C] je teplota napájecí vody před napájecí hlavou nebo na vstupu do tlakového systému kotle při jmenovité výkonosti 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

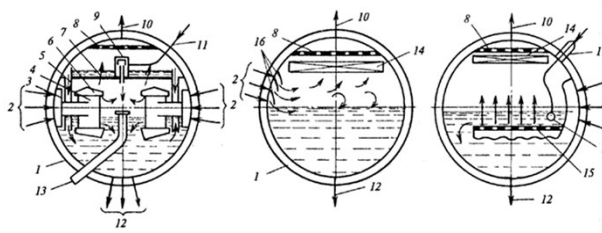
4,86 kg/s (75 t/h) - hmotnostní tok páry
16/3,8 MPa-tlak přehřáté/přihřáté páry
540/545 °C - teplota přehřáté/přihřáté páry
240 °C - teplota napájecí vody
na hnědé uhlí

$Q_i = 15$ MJ/kg – výhřevnost
 $W^* = 25\%$ - obsah vody v palivu
 $A^* = 15\%$ - 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

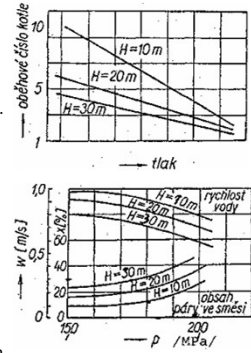
Různé provedení vestaveb v bubnu



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

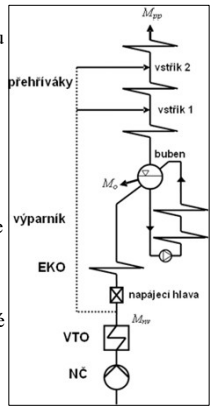
Nevýhody přirozené cirkulace

- Nízký užitečný vztlak vyžaduje minimalizaci flakových 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 sítě 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.



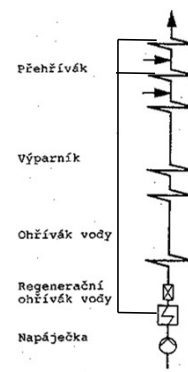
Kotle s nuceným oběhem (povzbuzenou cirkulací)

- 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 varnic 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 mezi 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 $Q = 1 \Rightarrow$ vychází výrazně menší počet paralelních trubek s velkou délkou - to vyžaduje specifické konstrukční řešení – vznikly 3 koncepce

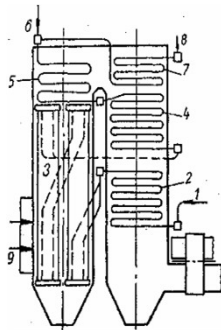


Průtočný výparník Benson

- Koncepce vychází z výparníku kotle s přirozenou cirkulací, který je proveden ze svislých trubek. Trubky výparníku jsou však rozděleny do sériově zapojených sekcí 3, každá sekce má vlastní vstupní a výstupní komoru.

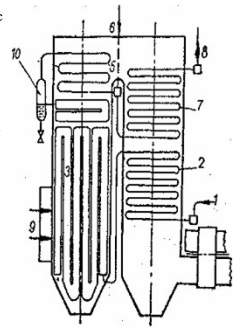
Zapojení ploch je následující.

- Napájecí voda 1 vstupuje do ohříváku vody 2 kde se ohřívá na teplotu nižší než bod varu
- Dále proudí vnějším spojovacím potrubím do vstupní komory (vždy dole) první sekce výparníku. Při průchodu první sekcí se voda dohřeje na teplotu bodu varu a částečně se odpaří.
- Parovodní směs z výstupu první sekce se vede vnějším spojovacím potrubím na vstup další sekce, atd. až v poslední sekci se dosáhne obsah páry v parovodní směsi $x = \text{cca } 80\%$.
- K odpaření zbývající vlhkosti ($x = \text{cca } 20\%$) dojde až v tzv. přechodníku 4, z něhož vystupuje již sytá pára ($x = 1$) nebo mírně přehřátá pára.
- Pára se pak v přehříváku 5 a 7 přehřívá na požadovanou teplotu.
- Regulace teploty páry se provádí vstříkem 6 napájecí vody.



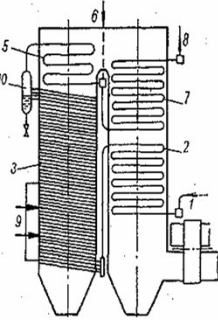
Průtočný výparník Sulzer

- V původním provedení měl tento kotel výparník z meandrovitě vinutého pásu několika paralelních varnic většího průměru (63 až 70 mm).
- Napájecí voda 1 se přivádí do ohříváku vody 2 a z něj do meandrovitého výparníku 3, jehož varnice jsou přímým prodloužením hadů ohříváku vody 2.
- Z meandrovitého výparníku 3 proudí parovodní směs o suchosti $x = 95$ až 98% do separátoru 10, v němž se zbytek vlhkosti, ve které by měla být obsažena většina soli z odpařované vody, odlučí a odvádí se jako odluh mimo kotel.
- Pára ze separátoru 10 se v přehříváku 5 a 7 ohřeje na požadovanou teplotu, regulace teploty páry se provádí vstříkem 6 napájecí vody.
- Charakteristické znaky původního kotle Sulzer :
 - varnice jsou prodloužením trubek ohříváku vody
 - výparník má pevný konec odpařování, který je určen separátorem
 - problém usazování soli řeší odluhem zahluštěn kotelni vody ze separátoru.
- Dnes se již meandrovitě vinutí na celý výparník nepoužívá – meandry někdy kryjí pouze část – např. výšpky



Průtočný výparník Ramzin

- Charakteristickým znakem je šroubovitě vinitý výparník ze svazku paralelních varnic.
- Počet paralelních trubek je určen výkonem kotle a požadovanou rychlostí vody $> 1 \text{ m/s}$
- Pro kotle velkých výkonů se provádí šroubovitě vinití jako dvouchodý závit, takže kotel má dvě paralelní větve samostatně regulované.
- Napájecí voda 1 se přivádí do ohříváku 2 vody a odtud se vede ohřátá voda na vstup do šroubovitě vinitého výparníku 3.
- Na výstup z výparníku je připojen separátor 10 pro odloučení zbytkové vlhkosti z parovodní směsi.
- Pára se přehřívá v přehříváku 5 a 7, teplota se reguluje vstříkem 6 napájecí vody.
- Původně se tento kotel stavěl se separátorem (pak měl výparník pevný konec odpařování jako Sulzer), dnes se staví i bez separátoru (výparník má pohyblivý konec odpařování jako Benson).



Cyklonový separátor vlhkosti na konci výparníku



Cyklonový separátor vlhkosti na konci výparníku



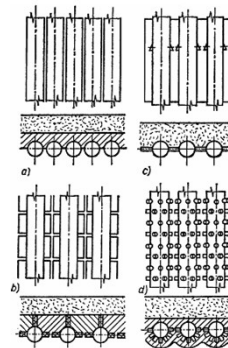
Provedení výparníku

- 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



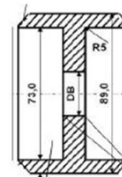
- a – holé volné trubky
- b- trubky s praporky
- c- membránová stěna
- d- otmněné trubky

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

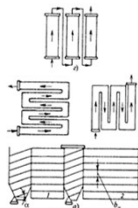
Konstrukční provedení výparníku bubnových kotlů s nucenou cirkulací

- 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 nitridované 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
- Odpařují 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 vinuté výparník
 - jednochodový
 - vícechodový



Výparník průtočných kotlů

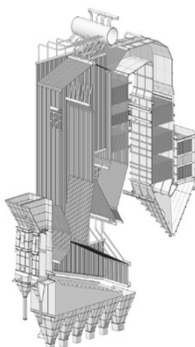
- Prakticky u všech koncepcí výparníků průtočných kotlů se provádí clonkování z důvodu
 - zajištění rovnoměrnosti průtoku
 - zamezení nestabilitě proudění.
- Škrťací clony se umísťují
 - na vstup každé varnice
 - do přívodního potrubí jednotlivých sekcí – neměly by být širší než 2 až 2,5 m
- Pro meandrové nebo 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 vyneseny 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 akumulační 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

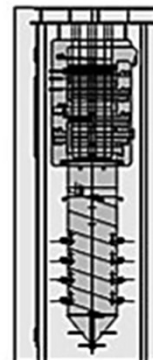


Výhody průtočných kotlů

- odpařá 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 – demi
- uplatnění v podstatě pouze v elektrárnách



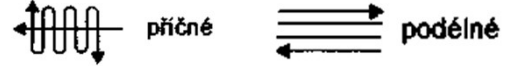
Konstrukční řešení výhřevných ploch

Výhřevné plochy dělíme

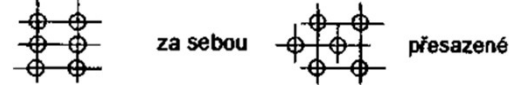
- podle funkce
 - ohříváky vody
 - výparníky
 - přehříváky, přihříváky
 - ohříváky vzduchu
- podle převažujícího mechanismu sdílení tepla na
 - sálavé – v oblasti nejvyšších teplot – výparník, plochy za SK
 - konvekční – husté trubkové svazky na konci kotle
 - kombinované
- podle způsobu obtékání teplosměnné 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

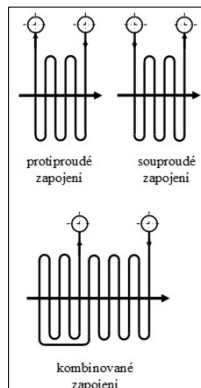
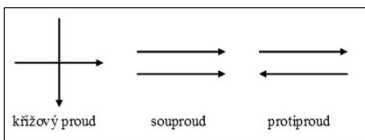


- Z hlediska uspořádání trubek rozeznáváme:
 - trubky za sebou (v zákrytu)
 - trubky přesazené (vystřídvané)

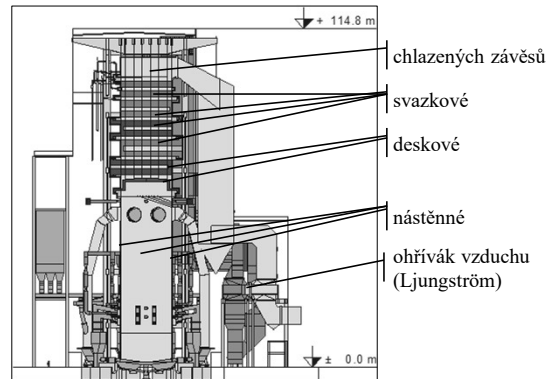


- Z hlediska zapojení rozeznáváme:

- křížové zapojení
- protiproudé zapojení
- souproudé zapojení
- kombinované zapojení



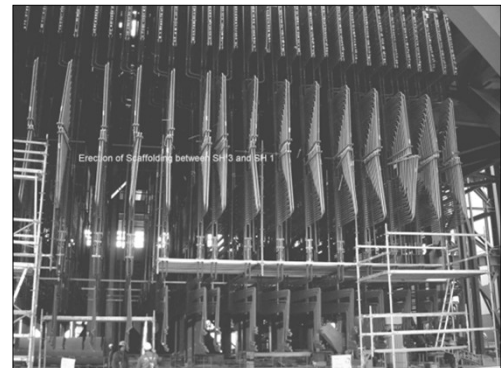
- Z hlediska provedení rozeznáváme plochy



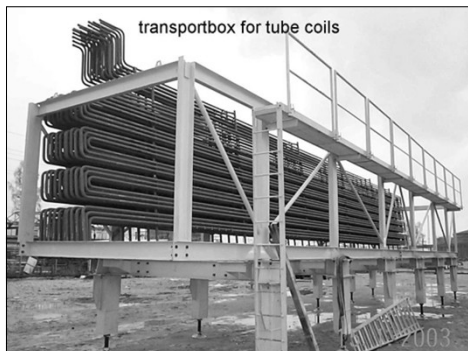
Deskový přehřívák na chlazených závěsích



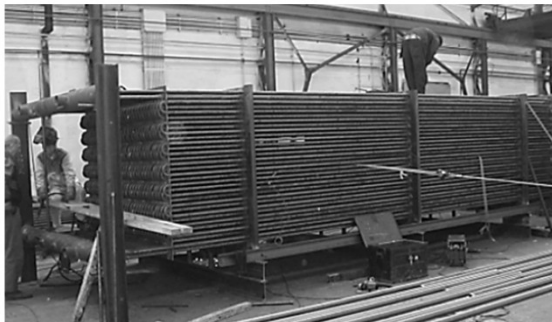
Deskový přehřívák na chlazených závěsích



Trubkový svazek před montáží do kotle



Trubkový svazek ohříváku vody



Trubkový ohřívák vzduchu

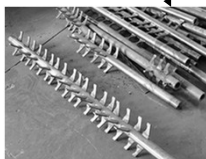


Membránová stěna

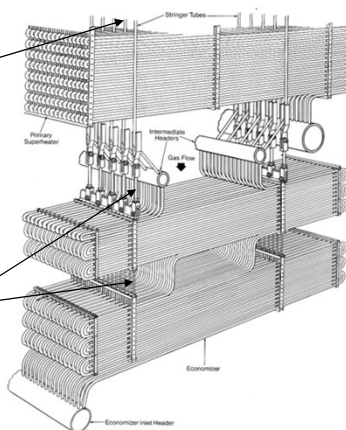


Závěsy

- 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

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

- metoda nepřímá

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

61

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 jejich 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.

62

Přímá metoda určení účinnosti kotle

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

- tok tepla přivedeného do kotle (tepelný příkon)

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

- tepelný výkon kotle

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

63

Nepřímá metoda určení účinnosti kotle

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

Poměrné tepelné ztráty kotle i jsou

- k - fyzickým teplem spalin (kominová)
 - 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 kominová, závisí na

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

64

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

- je způsobena obsahem uhlíku v tuhých zbytcích.

$$Z_c = \sum_i Q_c \cdot \frac{C_i}{1-C_i} \cdot \frac{X_i}{Q_i} \cdot A^r = \frac{32700 \cdot A^r}{Q_i} \cdot \left(\frac{C_i}{1-C_i} \cdot X_i + \frac{C_r}{1-C_r} \cdot X_r + \frac{C_p}{1-C_p} \cdot X_p \right) \quad [-]$$

škvára (struška) propad popelček (úlet ve spalinách)

- $Q_c = 32700$ 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 granulacních 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.

65

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

	X_s (%)	X_r (%)	X_p (%)
Ohniště roštová	62-77	0-6	13-33
Ohniště granulacní	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.

66

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

- spočívá v nevyužitém teple odcházejících TZ

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

- $i_i = c_i \cdot t_i$ (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.

67

Ztráta hořlavinou ve spalinách

- je dána chemickou nedokonalostí spalování
- projevující se obsahem nespálených plynů CO, H₂, CH_x event. dalšími ve spalinách

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

- $q_i = 12640 \cdot \omega_{CO} + 10800 \cdot \omega_{H_2} + 35800 \cdot \omega_{CH_4} + \dots$
- O_{SV} (Nm³/kg, Nm³/Nm³) je objem spalin z 1 kg paliva nebo 1 Nm³ plynu

68

Ztráta fyzickým teplem spalin

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

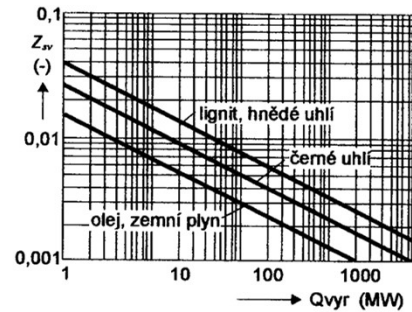
$$Z_k = (1-Z_C) \frac{I_S^{t_s, \alpha_s} - I_S^{t_v, \alpha_s}}{Q_i}$$

- $I_S^{t_s, \alpha_s}$ [kJ/kg_{paliva} resp. kJ/Nm³_{plynu}] je entalpie spalin za kotlem
- $I_S^{t_v, \alpha_s}$ [kJ/kg_{paliva} resp. kJ/Nm³_{plynu}] 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 α

69

Ztráta sdílením tepla do okolí

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



70

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 záložce atd.

71

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

72

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 $1,25$

73

Spalování zemního plynu

Vliv nedokonalosti spalování na účinnost kotle

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

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

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

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

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

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

74

Spalování zemního plynu

Vliv přebytku vzduchu na účinnost kotle

$$Z_k = \frac{I_S^{t_s, \alpha_s} - I_S^{t_{sc}, \alpha_s}}{Q_i^r}$$

Určení součinitele přebytku vzduchu

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

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

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

přesněji pro ZP

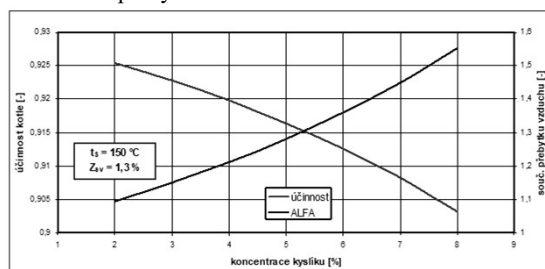
$$O_{VS\min} \doteq 0,9 O_{SS\min} \rightarrow$$

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

75

Spalování zemního plynu

Vliv přebytku vzduchu na účinnost kotle



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

76

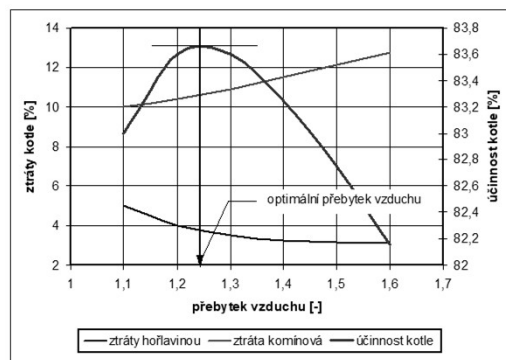
Spalování tuhých paliv

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 %

77

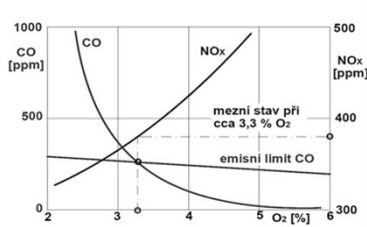
Optimalizace spalování tuhých paliv



78

Optimalizace spalování tuhých paliv

- provoz s optimálním přebytkem vzduchu je třeba konfrontovat s emisními limity
 - CO
 - NO_x
- při překročení emisního limitu
 - CO => je třeba přebytek vzduchu zvýšit
 - NO_x => je třeba přebytek vzduchu snížit



79

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

80

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

81

Kondenzační kotle

Problém :

- kondenzací části vodní páry se mění složení a objem spalin připadajících na 1 Nm³ spáleného plynu

Důsledek :

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

Možné řešení :

- použít návod dle :
Dlouhý T. a kol: Určení účinnosti kondenzačního kotle nepřímou metodou – viz časopis Energetika 3/2024

Pozor :

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

82