

1. Vlastní návrh kotle

1.1. Tepelné schéma a řazení teplosměnných ploch

Výhřevné plochy kotle tvoří ohřívák vzduchu, ohřívák vody, výparník evt. s přechodníkem, přehřívák a přihřívák (mezipřehřívák). Mohou být jedno i vícedílné.

Ohřívák vzduchu je vždy řazen jako poslední plocha ve směru proudění spalin. Jako dvoudílný je jej nutno řešit při požadovaném velkém ohřátí vzduchu, nízké teplotě spalin do komína, malém poměru tepelných kapacit ohřívajícího vzduchu a spalin. Mezi oba díly ohříváku vzduchu se pak řadí ohřívák vody. Při použití Ljungstroemova ohříváku vzduchu je snaha vystačit s jednodílným provedením. Pokud nelze dosáhnout dostatečného ohřátí vzduchu v jednom dílu, jsou oba díly ohříváku vzduchu řešeny na jednom hřídeli a ohřívák vody je řazen k vysokoteplotovému dílu ohříváku vzduchu paralelně.

Ohřívák vody (EKO) se řadí jako další plocha před ohřívák vzduchu (po toku spalin) nebo výjimečně v kombinaci s ním. Míra ohřevu vody v EKO závisí především na pracovním tlaku. Při nízkém a středním tlaku je výparné teplo velké (60 až 70 % výrobního tepla páry), a protože v ohništi se obvykle odevzdá jen asi 40 až 60% tepla, je nutno odpařit část vody v odpařovacím dílu ekonomizéru nebo v kotlovém svazku. Na výstupu z neodpařovacího dílu EKA musí být při všech provozních stavech entalpie vody

$$i''_{EKO} < i'_w - (125 \div 170) \text{ kJ/kg} \quad (1.1)$$

kde i'_w [kJ/kg] je entalpie vody na mezi sytosti. Při vysokém tlaku klesá výparné teplo pod 50% výrobního tepla páry, takže se vystačí s neodpařovacím ekonomizérem. Při velmi vysokém tlaku (14 ÷ 18 MPa) se v širší míře uplatňují kotle průtočné. Na výstupu z konvekčního EKA platí opět výše uvedená podmínka pro výstupní entalpii vody, neboť je nutné, aby v rozdělovací komoře dílu výparníku průtočného kotle, který se někdy též označuje jako sálavý ekonomizér, byla za všech provozních podmínek voda. Tato plocha tvoří stěny výsypky resp. spodní části ohniště.

Výparník všech kotlů je umístěn v ohništi, jelikož tak lze nejspíše zajistit dostatečné chlazení výhřevné plochy při velkých tepelných tocích. U průtočných kotlů končí výparník tzv. přechodníkem, kde se dokončuje odpařování a usazuje zbytek solí, není-li voda zcela demineralizovaná. V tom případě se umísťuje přechodník v oblasti menších tepelných toků a vstupní suchost parovodní směsi se volí $x = 0,75 \div 0,85$. Entalpie výstupní páry z přechodníku bývá

$$i_p = i''_p + (85 \div 170) \text{ kJ/kg} \quad (1.2)$$

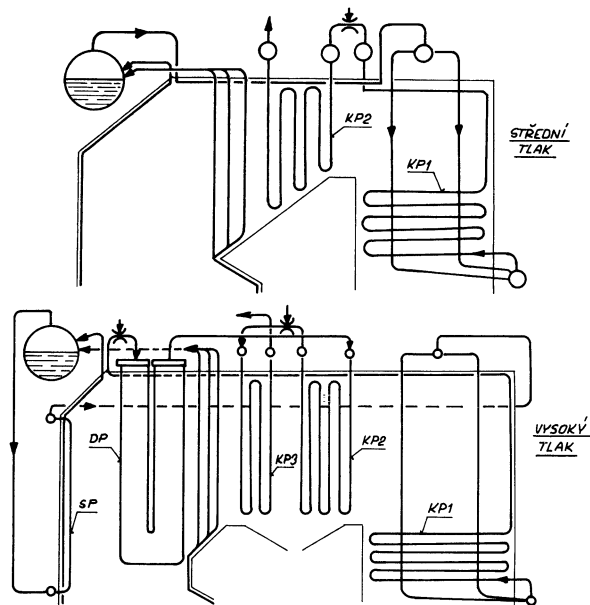
kde i''_p [kJ/kg] je entalpie páry na mezi sytosti.

Přehřívák je tvořen dvěma až pěti sériově řazenými díly. O jejich skutečném počtu rozhoduje tlak páry, teplota přehřátí, nároky na dynamické vlastnosti a roční využití kotle. Rozdíl v počtu a řazení přehříváků pro středotlaký a vysokotlaký kotel je vidět na obrázku.

Uspořádání přehříváků pro střední a vysoký tlak páry

KP – konvekční přehřívák, DP – deskový přehřívák, SP – sálavý přehřívák

Pro špičkové kotle a nízkou teplotu přehřátí se užívá menší počet dílů. Při teplotě páry 540°C se u dvoutahových kotlů obvykle řadí jako první přehřívák, který chladí strop evt. stěny vrchní části ohniště či převáděcího kanálu a obrátové komory. U věžových kotlů jsou jako první zapojeny chlazené závěsy konvekčních svazků. Řazení dalších dílů se řídí druhem paliva, teplotou napájecí vody, spalin za kotlem a teplotou ohřátí vzduchu. Při spalování nízkokalorického hnědého uhlí, nízké teplotě spalin za kotlem a teplotě ohřátého vzduchu a vysoké teplotě napájecí vody, se řadí druhý díl přehříváku před ohřívák vody. Ohřev páry v něm se volí o 200 ÷ 300 kJ/kg, tj. výstupní teplota bývá cca 370 až 400°C. Jako třetí díl následuje deskový přehřívák s ohřevem páry na 460 až 515°C, s předřazeným vstřikem. Přehřátí na 530 až 540°C se dokončuje ve výstupním konvekčním přehříváku s Δi_p menším než 125 ÷ 200 kJ/kg. Velké ohřátí v posledním dílu přehříváku zhoršuje dynamické vlastnosti regulace teploty přehřáté páry a zvětšuje



rozptyl výstupní teploty páry jednotlivých paralelních hadů. Při teplotě páry 565°C je nutno řadit ještě další přehřívák z feriticko-martenzitických chromových ocelí nebo austenitických ocelí. Výstupní přehřívák bývá zapojen jako souproudý a musí být před přímým sáláním z ohniště chráněn předřazenou mříží, svazkem nebo jinou plochou. Při spalování vysocevýhřevných paliv je možné řazení druhého dílu přehříváku do ohniště (jako deskového či nástěnného) s ohřátím páry na 370 ÷ 400°C, z něhož se teprve přejde do konvekčního přehříváku v druhém tahu s ohřátím páry na 420 ÷ 460°C. Přehřátí se pak dokončí v jednom či dvou konvekčních přehřívácích. Zmenšením počtu dílů se kotel zlevňuje.

1.1.1. Návrh celkového uspořádání kotle

Hlavními kritérii pro posouzení vhodnosti volby celkového uspořádání kotle, tj. typu a tvaru ohniště s hořáky a průtahů, jakož i pomocných zařízení, jsou :

- minimální investiční náklady kotle, nosné konstrukce i budovy kotelny,
- minimální provozní náklady
- maximální provozní spolehlivost a provozní pružnost kotle

Volí se způsob spalování a typ spalovacího zařízení, tvar ohniště evt. rozmístění a počet hořáků a prostorové uspořádání dodatkových ploch a průtahů. Současně je nutno navrhnout dispozici palivového hospodářství a uspořádání všech vzduchových, spalinových, palivových i parních potrubí.

Nalezení optimální koncepce je v důsledku velkého počtu ovlivňujících faktorů a tudíž i variant a současně velkého počtem často obtížně souměřitelných kritérii značně obtížný úkol, jenž vyžaduje značné zkušenosti a použití moderní výpočetní a modelovací techniky.

Základní koncepce kotlů lze dělit do čtyř hlavních skupin :

- pro spalování jakostních tuhých paliv
- koncepce vhodné pro spalování méněhodnotných tuhých paliv
- koncepce pro spalování alternativních paliv (např. odpadů) a biopaliv
- pro spalování kapalných nebo plyných paliv pro velké výkony
- pro spalování kapalných nebo plyných paliv pro malé výkony

1.1.2. Jednotlivé koncepční typy

Klasické koncepční varianty kotlů ukazuje obrázku. Z nich jsou nejčastěji užívané následující :

Jednotahové (věžové) uspořádání.

Výhody : u olejových a plynových přetlakových ohnišť spaliny jdou přímo do komína na střeše kotelny, u práškových ohnišť je menší abraze a lepší spalovací poměry, odpadá obrátová komora.

Nevýhody : těžší nosná konstrukce, obtížná montáž u velkých výkonů, u práškových ohnišť nutný prázdný průtah k sacímu ventilátoru evt. ohříváku vzduchu, nízké rychlosti spalín na konci kotle. Celkově investičně je kotel většinou dražší.

Dvoutahové uspořádání tvaru II.

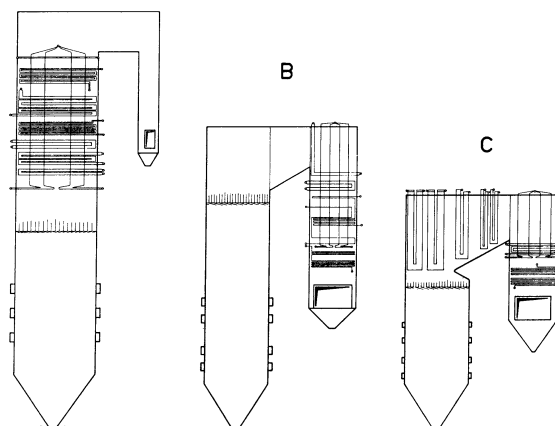
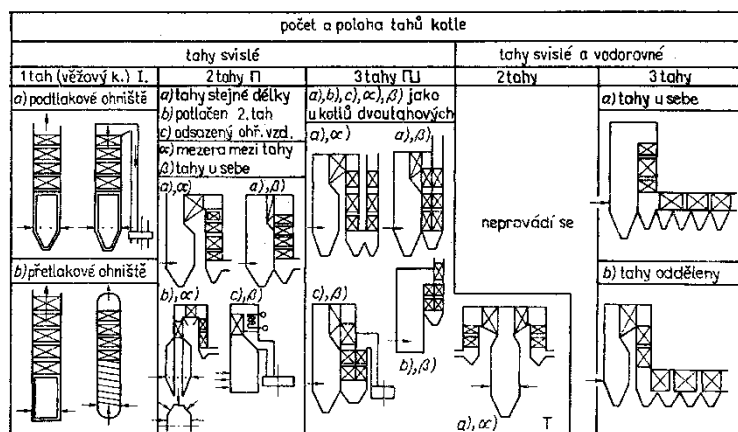
Výhody : jednoduchá konstrukce, snadná možnost protiproudého uspořádání dodatkových ploch, vhodná dispozice spalínových ventilátorů, možnost dobrého čištění dodatkových ploch, snadná možnost rozdělení ohniště dělicími stěnami.

Nevýhodou je nerovnoměrnost koncentračních a rychlostních profilů ve druhém tahu velkých jednotek, větší abrasní účinek popílkových částic, značný objem málo využitě obrátové komory, obtíže s umístěním velkého rekuperačního ohříváku ve 2. tahu. Ohřívák vzduchu se proto často umísťuje na samostatné nosné konstrukci (Ljungstroem vždy).

Třítahové uspořádání s tahy za sebou.

Výhody : částečné odloučení popílku ve 2. tahu, snížení teploty spalín před konvekčními plochami, snížení zanášení výhřevných ploch. Možná je i varianta se stropními hořáky. Je vhodné pro průmyslové kotle s nižším tlakem a kotle pro spalovny odpadů.

Současné koncepce uhelných granulačních kotlů vysokých a velmi vysokých výkonů jsou vidět na obrázku.



Granulační kotle pro spalování uhlí

A – věžový kotel, B – dvoutahový II kotel, C – dvoutahový II kotel s přehříváky v přechodovém tahu

2. Vliv parametrů páry na koncepci kotle

Kotle se dělí podle tlaku na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké. K nízkotlakým patří kotle velkoprostorové s provozním tlakem do 2,5 MPa. Středotlaké kotle se počítají až do tlaku 6,4 MPa. Nad 6,4 MPa je oblast vysokého tlaku, která se dělí na oblast tlaku podkritického a nadkritického. Hranicí je kritický tlak 22,5 MPa. U vysokotlakých kotlů, které se uplatňují především jako zdroj páry pro pohon parních turbín v energetických centrálách, je nezbytné zvýšení teploty napájecí vody regenerací tepla z nízkotlakých případně i vysokotlakých odběrů turbíny. Jinak by teplo pro dohřev napájecí vody k mezi sytosti bylo příliš velké a účinnost cyklu nízká. Doporučené teploty napájecí vody a páry v závislosti na tlaku uvádí tab. 2-1.

tab. 2-1 Rozdělení výrobního tepla páry podle jejích parametrů

Parametry			Celkové předané teplo $i_{pp} - i_{nv}$ [kJ/kg]	Části tepla na		
tlak páry p_{pp} [MPa]	teplota páry t_{pp} [°C]	teplota nap. vody t_{nv} [°C]		ohřátí k bodu varu $\frac{i' - i_{nv}}{i_{pp} - i_{nv}}$ [%]	odpařování $\frac{r}{i_{pp} - i_{nv}}$ [%]	přehřátí $\frac{i_{pp} - i''}{i_{pp} - i_{nv}}$ [%]
1,3	350	105	2708	14,9	72	13,1
3,8	445	145	2708	18,8	62	19,2
9,4	540	225	2511	19,2	49,9	30,9
13,6	570	230	2519	25,5	38,1	36,4
17,5	570	250	2390	26,2	34,3	39,5
25,4	570	260	2261			

Rostoucí parametry páry mají rozhodující vliv na konstrukci kotle. Celkové množství tepla odevzdaného napájecí vodě pro výrobu přehřáté páry je dáno rozdílem entalpií $i_{pp} - i_{nv}$ [kJ/kg]. Rozdělení tepla na jednotlivé výhřevné plochy v kotli ukazuje tab. 2-1. S růstem parametrů páry skupenské teplo výparné r [kJ/kg] klesá a roste teplo na ohřev vody k mezi sytosti $i' - i_{nv}$ [kJ/kg] a na přehřátí páry $i_{pp} - i''$ [kJ/kg]. To má za následek, že u kotlů s vysokými parametry, kdy se ještě používá přehřívání páry, tvoří podstatnou část teplosměnných ploch přehříváky a přihříváky. Protože teplota spalín na výstupu z ohniště je nezávislá na parametrech páry a volí se především s ohledem na vlastnosti paliva, nastává u vysokých tlaků přebytek tepla v ohništi a je nutné používat sálavé a polosálavé (deskové) přehříváky páry. Tento faktor z hlediska regulace zlepšuje charakteristiku přehříváku, neboť u sálavých přehříváků při snižování výkonu kotle teplota páry roste, u konvekčních je tomu naopak. Tím lze docílit přijatelné charakteristiky přehříváku málo závislé na výkonu.

3. Vliv tlaku na tepelné schéma kotle

Střední tlak

Středotlaké kotle se uplatňují v průmyslových energetických zdrojích nebo v menších teplárnách. Řeší se většinou jako bubnové s přirozenou cirkulací. Převážná část tepla se využívá pro odpaření vody, proto musí být patřičně dimenzován výparník. Ten obvykle nestačí umístit na stěny spalovací komory a musí být doplněn o konvekční část. Proto se do druhého spalínového tahu umísťuje kotlový svazek ze svislých trubek nebo meandrovitě tvarovaných desek. Bilanci výparníku může zlepšit též použití ekonomizéru s částečným odparem vody.

U středotlakých kotlů s jednostupňovým ohřívákem vzduchu postupně za ohništěm následuje mříž, kotlový svazek, přehřívák, ekonomizér a ohřívák vzduchu. Přírůstek entalpie pracovní látky v ekonomizéru Δi_{EKO} [kJ/kg] a v kotlovém svazku Δi_{KS} [kJ/kg] musí splňovat podmínku

$$\Delta i_{EKO} + \Delta i_{KS} = (i_{pp} - i_{nv}) - (\Delta i_o + \Delta i_p) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.1)$$

kde Δi_o , Δi_p [kJ/kg] je přírůstek entalpie v ohništi a přehříváku. Pokud se teplota na výstupu z ohniště t_{ok} odvozuje od vlastností paliva, je možné prohlásit, že potřebný přírůstek entalpie v EKO a kotlovém svazku je určen použitým palivem.

Stěny spalovací komory pokrývá výparník. Obecně se v ohništi odevzdá 45 až 60 % z celkového přivedeného tepla podle druhu spalovaného paliva. Dle tab. 2-1 je v závislosti na tlaku pro odpaření vody potřeba 60 až 70 % z celkového množství tepla. Proto je zapotřebí zbytek tepla na odpařování získat mimo ohniště v kotlovém svazku a odpařovacím ekonomizéru. Výhodnější je dávat více tepla na odpařovací EKO až do suchosti páry na výstupu $x = 15$ až 20 %. Zbytek tepla se dává na kotlový svazek, který musí mít svislé nebo strmě skloněné trubky, tudíž pro přestup tepla nepříznivé podélné obtékání spaliny. Při rozdělení EKA na dva díly je nutno dbát na to, aby na výstupu z prvního dílu byla ještě voda při všech provozních stavech, tj.

$$i_{EKO1} \leq i' - (125 \div 170) \text{ [kJ/kg]} \quad (3.2)$$

Vysoký tlak

Vysokotlaké kotle se využívají v elektrárnách nebo větších teplárnách a zajišťují dodávku páry pro pohon parní turbíny kondenzační nebo protitlaké. Dle provozních požadavků mohou být konstruovány jako bubnové s nucenou cirkulací nebo průtlačné.

Při vysokém tlaku se snižuje výparné teplo na hodnotu menší než 50% celkového výrobního tepla, což plně postačuje pro výrobu syté páry ve výparníku umístěném na stěny ohniště, u paliv s malým obsahem vlhkosti lze dokonce hovořit o přebytku tepla v ohništi. Proto se voda v EKO neohřívá na bod varu a v ohništi se umísťuje sálavý koncový díl ekonomizéru a k výstupu polosálavý přehřívák. U vysokotlakých bubnových kotlů odpadá kotlový svazek a stačí použití mříže, která vzniká rozvedením trubek zadní stěny ohniště při jejich průchodu vodorovným přehřívákovým tahem kotle. Přírůstek entalpie pracovní látky v mříži se určí kontrolním výpočtem mříže. Potom přírůstek entalpie v ekonomizéru (obou stupních) se vypočte jako zbytek tepla podle vztahu

$$\Delta i_{EKO} = (i_{pp} - i_{nv}) - (\Delta i_o + \Delta i_{mr} + \Delta i_p) \text{ [kJ/kg]} \quad (3.3)$$

kde Δi_o , Δi_{mr} , Δi_p [kJ/kg] je přírůstek entalpie v ohništi, mříži a přehříváku

Velmi vysoký tlak

Kotle s velmi vysokým tlakem páry se navrhuje pro kondenzační elektrárny, kde je zapotřebí zajistit maximální termickou účinnost cyklu výroby elektrické energie. Řeší se převážně jako průtlačné nebo se superponovanou cirkulací ve výparníku, vyjimečně mohou být i bubnové.

Použití vyšších tlaků do 14 ÷ 18 MPa je spojeno se zavedením přehřívání (mezipřehřívání) páry. Přírůstek entalpie páry v přehříváku představuje asi polovinu přírůstku entalpie ostré páry. Proto je vhodné přehřívák dělit na dva díly. Výstupní svazek přehříváku se zpravidla umísťuje za výstupním dílem přehříváku, a to v oblasti teplot spalin 800 až 900 °C v závislosti na použitém schématu najíždění bloku. Vstupní díl přehříváku se umísťuje před nebo za první konvekční přehřívák.

Průtlačné kotle s podkritickým tlakem

Průtlačné kotle se používají při vysokém a nadkritickém tlaku. Rozdělení tepla mezi jednotlivými díly a výběr schématu se poněkud zjednodušuje vzhledem k bubnovým kotlům. U průtlačného kotle se udržuje konstantní entalpie pracovní látky ve třech místech a sice :

- za ekonomizérem
- ve výparníku
- za přechodníkem.

Na vstupu do sálavého ekonomizéru umístěného ve výsypce ohniště musí být za všech provozních stavů voda z důvodu rovnoměrného rozdělení pracovní látky do jednotlivých varnic výparníku, a proto maximální entalpie vody na výstupu z konvekčního ekonomizéru (na vstupu do výparníku) musí být

$$i_{EKO2} = i_{lvyp} \leq i' - (170 \div 210) \text{ [kJ/kg]} \quad (3.4)$$

Poslední část výparníku průtlačného kotle, kde končí odpaření vody a začíná přehřívání, se označuje jako přechodník a nechává se buď ve spalovací komoře jako nepřerušené pokračování výparníku nebo se umísťuje do oblasti nižších teplot (do konvekčního tahu). V případě, kdy se přechodník vynáší z ohniště, je nutné z hlediska rovnoměrného rozdělení proudění směsi do jednotlivých hadů přechodníku, aby suchost páry na výstupu z výparníku, neboli na vstupu do přechodníku, byla v rozmezí $x = 0,75$ až 0,85. Výstupní entalpie z přechodníku i_{2p} [kJ/kg] se volí tak, aby na výstupu z přechodníku byla vždy

mírně přehřátá pára za účelem zabránění usazování solí v následující přehřívákové ploše, která se obvykle umísťuje do horní části ohniště

$$i_{2p} = i'' + (85 \div 170) \text{ [kJ/kg]} \quad (3.5)$$

Pro snížení tepelné nerovnoměrnosti v jednotlivých dílech přehříváku a pro dosažení příznivé charakteristiky se dělí přehřívák na několik dílů (4 až 5). Přírůstek entalpie páry v jednotlivých stupních se volí v rozsahu $\Delta i_p = 125 \div 330 \text{ kJ/kg}$, přičemž menší hodnota se volí pro výstupní díl přehříváku z důvodu lepší regulace teploty páry. Čím blíže k syté páře, tím větší přírůstek lze v daném rozsahu volit. Ve většině případů se používá následující posloupnost řazení jednotlivých dílů přehříváku: sálavý (nástěnný, stropní), první konvekční (ležatý), polosálavý (deskový, také nazývaný šotový), výstupní konvekční (visutý). Toto schéma odpovídá klasické dvoutahové koncepci kotle.

Výstupní díl přehříváku se často navrhuje jako souproudý, aby se snížilo extrémní teplotní namáhání a prodloužila životnost daná materiálovými vlastnostmi trubek.

U průtlačných kotlů obvykle vystačíme s menším počtem konvekčních dílů přehříváku než u bubnových, neboť horní část spalovací komory a další stěny jsou pokryty stěnovými přehříváky.

Průtlačné kotle s nadkritickým tlakem

Přestože v nadkritické oblasti tlaků kotle již teoreticky nemají výparník, neboť se předpokládá skoková (nebo velmi rychlá) změna skupenství vody přímo v páru, přesto se zachová klasické členění i umístění ploch v kotli (včetně tzv. výparníku). Důvody jsou dva:

- místo fázové změny se s výkonem kotle mění (průtlačné kotle nemají pevný konec odpaření)
- při regulaci výkonu bloku s klouzavým tlakem může při sníženém výkonu dojít k poklesu tlaku páry do podkritické oblasti. Kotel pak funguje jako podkritický a musí splňovat všechny požadavky stabilního a bezpečného provozu i v tomto režimu uvedené výše. Proto může být pro návrh nadkritického kotle určující jeho provozní režim při minimálním výkonu.

4. Vliv paliva na konstrukční provedení kotle

Typ spalovacího zařízení je do značné míry určen zadáním druhu a vlastností paliva a výkonem kotelní jednotky. Mimořádnou pozornost je třeba těmto otázkám věnovat při spalování pevných paliv, kde přichází v úvahu tři technologie spalování. Jedná se o spalování:

- roštové – ve vrstvě
- práškové, jinak též prostorové – palivo vyhořívá v letu
- fluidní – ve vznosu

Volba způsobu spalování tuhého paliva závisí na vlastnostech paliva i na výkonu kotle. Na malé výkony $M_{pp} \leq 12 \text{ t/h}$ se používají kotle roštové nebo se stacionární fluidní vrstvou. U středních výkonů $M_{pp} = 12 \div 45 \text{ t/h}$ jsou možné všechny způsoby spalování, přičemž rozhodující jsou vlastnosti paliva. Pro výkony do $M_{pp} = 350 \text{ t/h}$ lze použít kotle s cirkulující fluidní vrstvou nebo práškové, pro vyšší výkony už jen kotle práškové.

Širšímu využití kapalných či plyných paliv pro energetické účely brání především jejich vysoká cena, proto je jejich použití vhodné pouze pro malé výkony, kdy olejová či plynová ohniště nahrazují účelně roštová, neboť jejich provoz lze plně automatizovat. U velkých výkonů se úspěšně uplatní pro špičkové a pološpičkové bloky, neboť jsou investičně podstatně levnější, a u paroplynových elektráren, kde pro plynovou turbínu nelze jiný druh paliva přímo použít.

4.1. Vliv paliva na řešení palivového hospodářství

Zvolený druh paliva předurčuje i koncepci vnitřního palivového hospodářství zdroje. Ta je při spalování plynu poměrně jednoznačná (redukční či pojistné a uzavírací armatury). Při spalování kapalných paliv se volí způsob ohřívání a regulace teploty paliva.

Při spalování tuhých paliv závisí koncepce palivového hospodářství na způsobu jeho spalování. Palivové hospodářství musí zabezpečovat nejen přísun paliva do kotle, ale i vhodný způsob jeho přípravy pro spalování. Při spalování na roštu stačí přípravu paliva provádět tříděním, výjimečně pedsoušením, kdy je nutno volit způsob a druh sušicího média a způsob jeho transportu.

U fluidního způsobu spalování je zapotřebí dodržet požadovanou granulometrii paliva, aby byla zajištěna stabilita vrstvy především u stacionárních fluidů. Velikost zrn se pohybuje v rozpětí od desetin

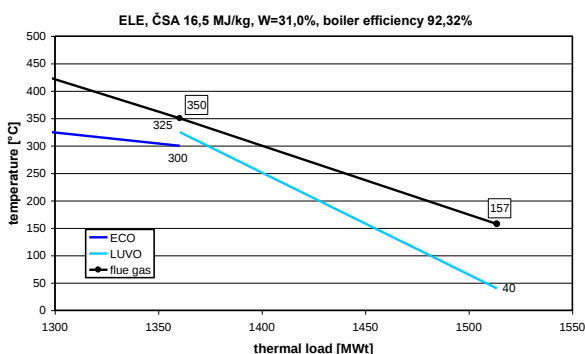
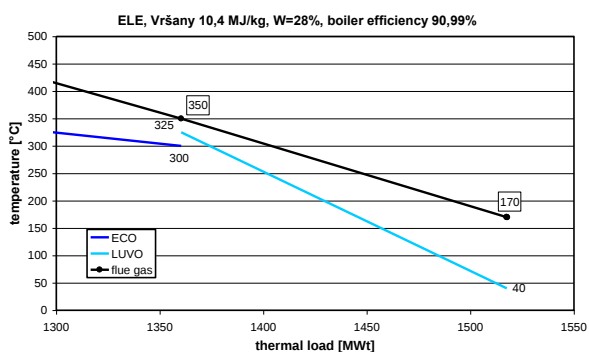
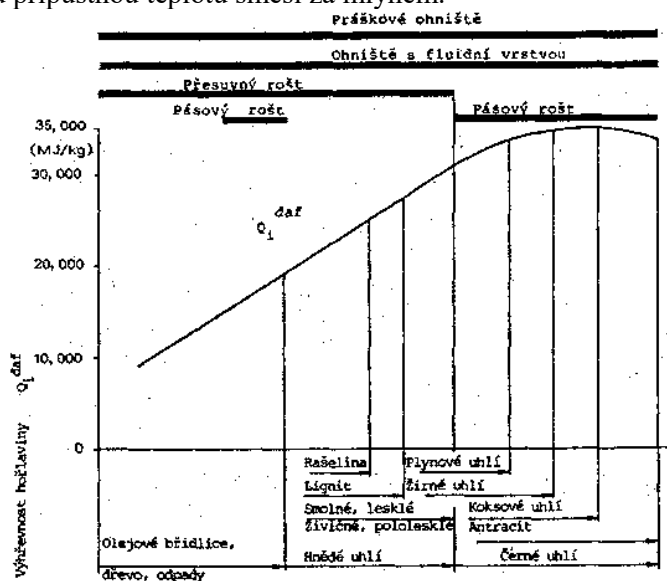
do několika milimetrů. K tomu obvykle postačí zařadit homogenizační drtič. V některých případech se požadovaná granulometrie fluidní vrstvy upravuje dávkováním inertního materiálu (písek, keramzit apod.) s definovanou velikostí zrn. Toto opatření je naprosto nezbytné při spalování paliv s nízkým obsahem popelovin, kdy tuhý zbytek není schopen vytvořit stabilní fluidní vrstvu. To se týká především fluidního spalování dřevních odpadů a biomasy.

Při spalování paliva ve formě prášku je nutné palivo před spalováním rozemlít na prach o velikosti zrn desítek až stovek mikrometrů a usušit. K tomuto účelu je nutné navrhnout vhodný typ mlecího okruhu (přímé foukání nebo pomocný zásobník) a stanovit způsob a stupeň sušení paliva. U okruhů s pomocným zásobníkem je třeba určit teplotu evt. podíl primárního vzduchu s přihlédnutím k vlastnostem prášku, zvláště k velikosti prchavého podílu a typu hořáků. Volba typu mlýna závisí na melitelnosti paliva, typu mlecího okruhu, způsobu sušení a požadavcích na dynamické vlastnosti kotle. Statická charakteristika mlýna a třídíče určuje velikost průtoku sušícího prostředí mlýnem. Vstupní teplota sušícího prostředí do mlýna, resp. předřazené sušky, se při již známé velikosti průtoku sušícího média určí z tepelné bilance sušky pro známou přípustnou teplotu směsi za mlýnem.

4.2. Vliv výhřevnosti

Výhřevnost je jedním ze základních palivových jakostních znaků, často se používá pro hodnocení vlivu paliva na určitý technologický proces.

- Rozhodování o způsobu spalování, resp. při volbě typu ohniště. První orientační představu o rozsahu použitelnosti různých typů ohnišť v závislosti na druhu paliva (výhřevnosti hořlaviny) si lze učinit podle obrázku.
- Výhřevnost paliva má bezprostřední vliv na dimenzování mlýnice, skladování a dopravy paliva,
- Výhřevnost paliva souvisí s obsahem popela a vody v palivu (tedy s obsahem balastu).
- Výhřevnost paliva ovlivňuje provedení tzv. partií za kotlem – EOP a spalínového ventilátoru.
- S výhřevností paliva souvisí i koncepce kotle z hlediska počtu a uspořádání tahů kotle.
- S výhřevností paliva souvisí i návrh tvaru a velikosti ohniště. Tak např. s klesající výhřevností paliva se snižuje doporučené objemové zatížení ohniště [kW/m^3], což vede ke zvětšení měrného obestavěného prostoru [m^3/kW]. Rovněž se snižuje i měrné průřezové zatížení ohniště [kW/m^2] a zvětšuje se tak potřebný průřez ohniště a tedy i zastavěná plocha.
- Výhřevnost určuje teplotní poměry v SK (teplotu nechlazeného plamene). Je jejím poklesem souvisí zmenšení teplotních spádů v kotli. U nadkritických bloků s vysokou teplotou napájecí vody pak může být výhřevnost paliva limitující pro stupeň dochlazení spalín a tedy pro dosažitelnou účinnost.



Obrázky zachycují koncovou část Q-t diagramu zachycující teplotní poměry na koncových plochách kotle, tedy ohříváku vody a vzduchu. Diagram byl vypočten pro návrhovou variantu nového bloku ELE s výkonem 660 MWe a nadkritickými parametry páry. Palivem je hnědé uhlí z dolu Vršany nebo ČSA. Z průběhu teplot je jasné patrné, že kritickým místem, které v podstatě určuje koncovou teplotu spalin, je konec ohříváku vzduchu resp. začátek ohříváku vody. V tomto bodě vycházejí minimální teplotní spády jak u EKA – zde 50°C, tak i u OVZ – zde 25°C. Hodnota koncového teplotního spádu ovlivňuje velikost potřebné výhřevné plochy výměníku a s jeho zmenšováním velikost výměníku progresivně roste. Je zřejmé, že u paliva s vyšší výhřevností lze docílit při zachování stejných koncových teplotních spádů lepšího dochlazení spalin, a tedy i lepší účinnosti kotle.

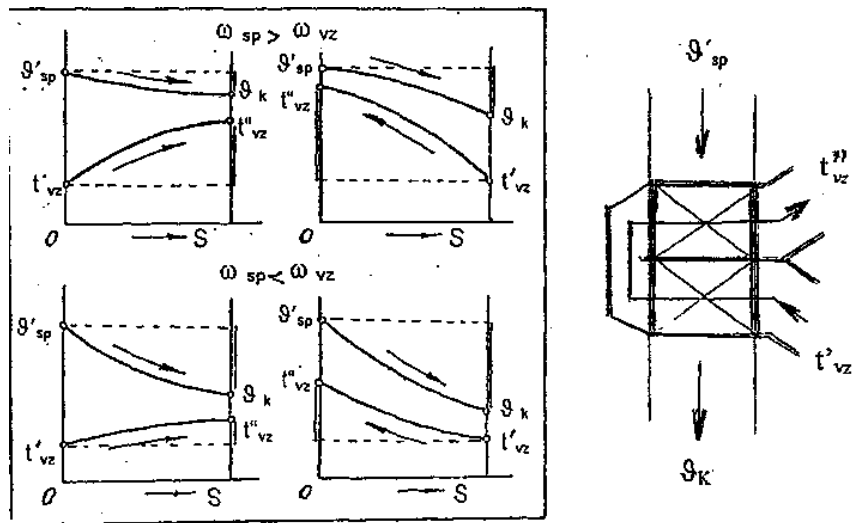
4.3. Obsah vody

Obsah vody v palivu patří k základním jakostním znakům paliva a zjišťuje se laboratorním rozbořem vzorku paliva.

4.3.1. Zohlednění obsahu vody v palivu při rozhodování o koncepci kotle a jeho základním návrhu

Vyšší obsah vody v palivu má následující důsledky (kromě uhlí se týká především biomasy) :

- Větší obsah vodní páry ve spalinách, tedy množství spalin – při větším množství spalin se musí zvětšit průřez konvekčního tahu a spalinových kanálů, zvětší se tedy kotel a zastavěná plocha.
- Vyšší velikost tzv. vodního ekvivalentu spalin (jinak též tepelné kapacity spalin) – čím větší bude hodnota vodního ekvivalentu spalin, než hodnota vodního ekvivalentu vzduchu, tím menší ohřátí vzduchu se dosáhne při použití jednostupňového ohříváku vzduchu. Průběhy teplot vzduchu a spalin u souproutého a protiproutého zapojení ohříváku vzduchu při obrácených poměrech vodních ekvivalentů vzduchu a spalin jsou znázorněny na obrázku. Protože ohřev vzduchu v případě většího vodního ekvivalentu spalin probíhá strměji než ochlazování spalin, musí se (v případě, že je potřebná vyšší teplota vzduchu) provést ohřívák vzduchu jako dvoustupňový, samozřejmě dvoustupňový musí pak být i ohřívák napájecí vody. Konvekční tah kotle bude v takovém případě složitější a tedy i dražší.
- Snižuje se účinnost kotle, protože se zvětšuje komínová ztráta kotle v důsledku většího množství spalin.



4.3.2. Zohlednění obsahu vody v palivu na zařízení pro přípravu paliva a druhu sušícího média

Obsah vody v palivu má také bezprostřední vliv na rozhodování o systému zařízení na přípravu paliva a o druhu sušícího média. U ohniště s přímým foukáním uhlénoho prášku pak přímo ovlivňuje volbu použitého typu mlýna. Při sušení vzduchem (např. kroužkový, případně kladkový mlýn, nebo tlukadlový mlýn) se pro větší obsah vody v palivu musí zvýšit teplota vzduchu, což vede ke konstrukci dvoustupňového ohříváku vzduchu i ohříváku vody, jak je zdůvodněno výše. Při vysokém obsahu vody v palivu však již pro sušení nestačí horký vzduch, ale musí se použít horké spaliny. Často se v takovém případě používají ventilátorové mlýny, které pro sušení ve spádové sušce nasávají spaliny na konci ohniště. Teplota ohřátí vzduchu se obvykle volí v závislosti na druhu paliva, typu mlýnice a technologii spalování. Orientační hodnoty jsou uvedeny v tabulce.

Orientační hodnoty teploty ohřátí spalovacího vzduchu

Typ ohniště	Druh paliva	Teplota vzduchu [°C]
Granulační ohniště při uzavřeném mlecím okruhu a sušení vzduchem	Černé uhlí a uhlí s malým obsahem prchavé hořlaviny	300 – 350
	Hnědé uhlí, rašelina	350 – 400
	Břidlice	250 – 300
Výtavná ohniště při uzavřeném mlecím okruhu a sušení vzduchem	Černé uhlí a uhlí s malým obsahem prchavé hořlaviny	350 – 400
	Hnědé uhlí	300 – 320
Granulační ohniště při uzavřeném mlecím okruhu při sušení spalinami nebo směsí spalin a vzduchu	Hnědé uhlí a lignity	300 – 350*
Výtavná ohniště při uzavřeném mlecím okruhu při sušení spalinami nebo směsí spalin a vzduchu	Hnědé uhlí	350 – 400*
Granulační ohniště při otevřeném mlecím okruhu při sušení spalinami	Všechna paliva	méně než 350
Výtavná ohniště při otevřeném mlecím okruhu při sušení spalinami	Všechna paliva	350 – 400*
Roštové ohniště s pásovým roštem	Hnědé uhlí	200 – 250**
	Černé uhlí	150 – 200**
Olejová a plynová ohniště	Těžký topný olej, zemní plyn, vysokopecní plyn	250 – 300
Fluidní ohniště s cirkulující fluidní vrstvou	Všechna paliva	(cca 120 – 200)***

* Vyšší hodnoty platí pro větší obsah vody v palivu

** Souvisí rovněž s teplotou napájecí vody

*** U fluidních ohnišť nelze teplotu ohřátí vzduchu volit jen v závislosti na palivu. Musí se současně přihlížet k tepelné bilanci ohniště (tedy i k tlaku vody ve výparníku) a především k požadované reálné dosažitelné hodnotě teploty spalin za kotlem. (Tedy i k teplotě napájecí vody).

- Při zvolené vysoké teplotě ohřevu spalovacího vzduchu bude ohřívák vzduchu větší, kdežto ohřívák vody vyjde menší. U FK to ovšem znamená (při konstantní teplotě v ohništi např. 860°C), že se musí zvětšit i potřebný chladicí výkon teplosměnných ploch v ohništi (protože se zvětšilo množství přivedeného tepla do ohniště). Při dané výšce spalovací komory (je navržena z hlediska spalování a odsiřování) to vede k tomu, že do spalovací komory se musí umístit šotové teplosměnné plochy zapojené (podle tlaku páry) buď jako výparník, nebo přehřívák. Tyto plochy jsou ovšem dražší a navíc pracují v extrémnějších podmínkách ve srovnání s konvekčními plochami ve druhém tahu kotle. Z toho vyplývá, že tyto plochy by se měly používat jen v případech nezbytně nutných a to pro zajištění pouze té tepelné bilance ohniště, která vyplývá ze zadaných parametrů paliva a páry. (Není žádoucí, u běžných paliv, zvyšovat tepelný příkon do ohniště. Může to však být jediné řešení při spalování paliv s extrémně nízkou výhřevností pro dosažení teploty v ohništi, např. 860°C).
- V případě zvoleného nízkého ohřátí spalovacího vzduchu bude ohřívák vzduchu menší, ale větší se ohřívák vody - aby se dosáhlo stejné vychlazení spalin za kotlem. Ohřívák vody pak pracuje v oblasti nevhodných teplot (malý teplotní spád) a jeho plocha je velká.

Z konstrukčního hlediska je vhodnější jednostupňové uspořádání ohříváku vzduchu, což je možné užit v případě, kdy se palivo suší spalinami nebo u paliv, která pro sušení a spalování nevyžadují vysoké teploty ohřátí vzduchu. V tomto případě optimální teplotu horkého vzduchu t''_{OVZ} v závislosti na teplotě napájecí vody t_{nv} a teplotě spalin za kotlem t_k lze přibližně určit ze vztahu

$$t''_{OVZ} = t_{nv} + 40 + 0,7 \cdot (t_k - 120) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.1)$$

Takto určenou teplotu je třeba zkontrolovat, zda vyhovuje podmínce sušení paliva při maximální vlhkosti paliva. Při dvoustupňovém uspořádání ohříváku vzduchu lze výše uvedený vztah použít pro výpočet teploty vzduchu na výstupu z prvního stupně.

4.3.3. Zohlednění obsahu vody v palivu na koncovou teplotu spalín

Teplota spalín na výstupu z uhelného kotle lze v prvním přiblížení odhadnout podle následující tabulky.

Palivo	Teplota spalín na výstupu z kotle podle druhu ohniště a paliva [°C]			
	Práskové ohniště	Fluidní ohniště CFBC	Roštové ohniště *1	
			do 3,3 kg/s	nad 3,3 kg/s
Černé nebo hnědé uhlí s obsahem vody W^r do 30%	130 – 140	130 – 135	170 – 180	150 – 160
Hnědé uhlí s obsahem vody W^r nad 30%	150 – 160	130 – 140	190 – 200	170 – 180

* 1 Dnes se především u kotlů větších výkonů používají nižší hodnoty teploty spalín za kotlem, např. 140 – 150°C. Při napájení kotle odplyněnou vodou 105°C se v případě potřeby provede předehřev napájecí vody v parním bubnu kotle.

Poměrný obsah vody v palivu v původním stavu $w^r = \frac{W^r}{Q_i^r}$		Teplota spalín na výstupu z kotle podle obsahu vody v palivu a teploty napájecí vody [°C]*2		
		150	215 – 245	250 – 265
w^r	< 0,7 (suché uhlí)	110 – 120	120 – 130	130 – 140
	= 0,7 – 4,8 (mokrý uhlí)	120 – 130	140 – 150	150 – 160
	> 4,8 (velmi mokrý uhlí)	130 – 140	160 – 170	170 – 180

* 2 Hodnoty platí pro přímé foukání nebo uzavřený mlecí okruh. Při otevřeném mlecím okruhu se poměrný obsah vody w^r počítá z obsahu vody W ve vysušeném prášku.

Tabulky uvádí orientační hodnoty tzv. ekonomické teploty spalín za kotlem, což je teplota zohledňující hospodárné využití primární energie paliva (účinnost) a velikost (cenu) teplosměnných ploch. Skutečná teplota spalín za kotlem však musí respektovat i teplotu rosného bodu spalín a její hodnota je opět výsledkem kompromisu - tentokrát mezi ekonomickou teplotou a spolehlivostí kotle (koroze). Pro návrh kotle je rozhodující tato teplota. Závisí na teplotě sytosti vodní páry odpovídající jejímu parciálnímu tlaku ve spalínách a na poměrném obsahu síry v palivu resp. SO_2 ve spalínách. S rostoucím obsahem SO_2 rosný bod spalín stoupá. Pro ilustraci, rosný bod spalín zemního plynu, který neobsahuje žádný oxid siřičitý, se pohybuje kolem 65°C, rosný bod spalín sirnatého hnědého uhlí může dosahovat 130°C.

Rosným bodem spalín je označována teplota, při které je dosaženo stavu nasycení par ve spalínách a začíná jejich kondenzace. Pokud v palivu není obsažena síra, dochází ke kondenzaci vodní páry. Jestliže je spalováno sirnaté palivo, dochází nejprve ke kondenzaci par kyseliny sírové, která má teplotu sytosti výrazně vyšší než vodní pára. Teplotu rosného bodu dále zvyšuje přítomnost jemných tuhých částic ve spalínách, které fungují jako kondenzační jádra.

Ke kondenzaci dochází především na studeném povrchu výhřevných ploch nebo kanálů, které pak trpí tzv. **nízkoteplotní korozí**. Aby k tomu nedocházelo, musí teplota stěny ležet nad rosným bodem spalín. Při mírném podkročení rosného bodu koroze není příliš intenzivní. Měření na uhelných kotlích s teplotou koncových ploch mezi 80 až 110 °C ukázala postup koroze v rozsahu 0,1 až 0,2 mm za rok. Při nižších teplotách však koroze progresivně roste.

Určení teploty rosného bodu je poměrně složitý úkol. Přímé měření se nedá provést, jeho hodnota navíc není provozně stálá. Většinou se určuje podle poloempirických výpočtových vztahů.

Palivo	Redukovaný obsah síry S_r [kg/MJ]	Rosný bod t_r [°C]
Mazut	0,065	120
Antracitické uhlí	0,086	107
Chudé T-uhlí	0,090	125
Rašelina	0,067	64

Rosný bod pro některé druhy paliv lze odhadnout z tabulky. Pro ostatní paliva lze přibližně rosný bod spalín vypočítat podle vztahu

$$t_r = t_k + \frac{\beta \cdot \sqrt[3]{S_r}}{1,2266^{X_u \cdot A_r}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (4.2)$$

kde t_k [°C] je teplota sytosti vodní páry při parciálním tlaku vodní páry ve spalínách,
 X_u [-] je poměrný obsah popela,

β [-] se volí $\beta = 195$ pro přebytek vzduchu za ohništěm $\alpha_{ok} = 1,20$ a $\beta = 208$ pro $\alpha_{ok} = 1,4$ až 1,5.

Redukovaný obsah síry v surovém palivu (měrná sirnatost) S_r [% kg/MJ] je

$$S_r = \frac{S^r}{Q_i^r} \cdot 10^5 \quad [\% \text{ kg/MJ}] \quad (4.3)$$

kde S^r [-] je obsah síry v původním palivu a Q_i^r [kJ/kg] je výhřevnost paliva.

Redukovaný obsah popela v surovém palivu A_r (měrná popelnatost) [% kg/MJ] se určí analogicky

$$A_r = \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot 10^5 \quad [\% \text{ kg/MJ}] \quad (4.4)$$

kde A^r [-] je obsah popela v původním palivu a Q_i^r [kJ/kg] je výhřevnost paliva.

Pro úplné vyloučení koroze koncové teplosměnné plochy kotle, kterou bývá převážně ohřívák vzduchu, musí být teplota kovu o 10°C vyšší než teplota rosného bodu spalin. Teplota stěny oddělující spaliny a vzduch bude ležet mezi jejich teplotami a bude se více blížit k teplotě média s intenzivnějším přestupem tepla. Přibližně platí vztah

$$t_{st} = \frac{\alpha_s \cdot t_s + \alpha_v \cdot t_v}{\alpha_s + \alpha_v} \quad [^\circ\text{C}] \quad (4.5)$$

kde α_s , α_v [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] jsou součinitele přestupu tepla na straně spalin a vzduchu a t_s , t_v [$^\circ\text{C}$] jejich teploty.

Součinitelé přestupu tepla na straně spalin i vzduchu jsou řádově stejné (u trubkového ohříváku bývá o něco vyšší u média proudícího napříč svazkem). Přibližně lze proto odhadnout, že teplota stěny bude rovna střední hodnotě obou teplot. Znamená to, že nejkritičtější poměry budou na studeném konci spalinového ohříváku vzduchu. Pokud vyjde teplota rosného bodu 110°C a teplota přiváděného vzduchu bude 20°C, musela by být teplota odcházejících spalin 220°C. Takové opatření by způsobilo značné překročení výše uvedených ekonomických hodnot. Proto se provádějí speciální opatření pro vyloučení nízkoteplotní koroze koncových ploch v důsledku podkročení rosného bodu spalin.

Nízkoteplotní koroze

Při spalování uhlí jsou nízkoteplotní koroze zcela běžným a předpokládaným jevem. Konstruktor kotle může pouze omezit jejich rozsah a zmenšit jejich účinek a při řešení tohoto problému může v zásadě postupovat dvěma směry:

- zaměřit se na odstranění příčin vzniku této koroze
- zaměřit se na omezení jejich účinků.

V praxi se pak kombinují oba způsoby, pokud je to možné.

Odstranění (omezení) příčin potíží, tj. především snížení obsahu SO_3 ve spalinách, lze provést např.:

- snížením obsahu síry ve spalovaném palivu - není dnes k dispozici komerčně využitelný způsob,
- omezením konverze SO_2 na SO_3 . Tato souvisí s parciálním tlakem kyslíku ve spalinách - tedy s přebytkem vzduchu v kotli. U moderních kotlů je tato možnost - v rámci reálných řešení - již vyčerpána. Spalovací proces se řídí s minimálním možným přebytkem vzduchu z důvodu snížení emisí NO_x . Kotle jsou konstruovány s plynotěsnými stěnami (membránové stěny), takže přísátí vzduchu v tazích kotle je nulové. Prísátí vzduchu (leakage) u regenerativního ohříváku vzduchu je při použití nových systémů těsnění sníženo rovněž na minimum. Další snížení přebytku vzduchu ve spalinách tedy již nelze dnes rovněž považovat za reálné řešení tohoto problému.
- snížením obsahu SO_3 ve spalinách aditivním odsiřováním spalin v ohništi kotle. Tato je jediný dnes uskutečnitelný způsob. Využívá se zejména u kotlů s fluidním ohništěm s cirkulující fluidní vrstvou - při dávkování aditiva do ohniště se dosahuje účinnosti odsiřování nad 90%. Tuto metodu pro snížení obsahu SO_3 lze využít i u kotlů s roštovým ohništěm. Při přidávání práškového aditiva s uhlím na rošt lze dosáhnout účinnosti odsiřování 30 až 40% a při dávkování práškového aditiva do horní

části ohniště pak až 60%. (Při sníženém obsahu SO_3 ve spalínách se sníží teplota rosného bodu a kotel se může navrhnout s nižší teplotou spalin za kotlem. Zvýší se tím účinnost kotle a zmenší se průtočný průřez spalínových kanálů za kotlem, průřez odlučovačů či filtrů popílku a velikost kouřového ventilátoru.)

Konstrukční opatření pro omezení rozsahu působení koroze a snížení jejího účinku mohou být dvojí. Bud' se jedná o volbu vhodného materiálu pro teplosměnné plochy nebo o zajištění provozní teploty povrchu teplosměnných ploch nad teplotou bezpečnou z hlediska teploty rosného bodu spalin (kondenzace směsi $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$).

- návrh vhodného materiálu teplosměnných ploch v oblasti nízkoteplotní koroze. Prakticky se jedná o spalinový ohřívák vzduchu, ať již trubkový nebo regenerativní. Vhodné materiály pro tyto teplosměnné plochy mohou být kovové nebo nekovové, případně mohou být použity vhodné korozivzdorné povlaky kovových teplosměnných ploch. Použití některého z uvedených materiálů nebo povlaků je především otázka ekonomická.

- o kovové materiály - vysoce legované oceli obecně nejsou považovány za perspektivní, neboť „zvýšená“ odolnost proti korozi není úměrná ceně. Vhodnější se zdají některé speciální nízkolegované oceli se zvýšenou odolností. Litina se u velkých kotlů nemůže použít.

- o nekovové materiály - pro určité podmínky lze použít např. skleněné trubky pro studený konec trubkových ohříváků vzduchu. I když v zahraničí byly, dá se říci ojediněle, tyto použity i pro bloky velkých výkonů (až do 600 MWe) u nás se jejich používání nerozšířilo. V některých případech byly použity keramické materiály pro studený konec regenerativního ohříváku vzduchu.

- o korozivzdorné povlaky a nátěry - ty mohou být kovové (např. olovo pro ochranu studených kouřovodů a komínů) nebo nekovové, jako např. smalty, makromolekulární hmoty a nátěry. Korozivzdorné smalty se uplatňují především u plechů studeného konce regenerativních ohříváků vzduchu. Jejich využití u trubkových ohříváků vzduchu se již tak nerozšířilo pro určité obtíže při jejich zavaření nebo zaválcování do trubkovnic. Povlaky z makromolekulárních látek (fluorované plasty, fenolplasty, pryskyřice) a korozivzdorné nátěry se osvědčily jako jednoduchá a účinná ochrana kouřovodů.

- konstrukční řešení pro udržení provozní teploty stěny teplosměnné plochy nad teplotou bezpečnou z hlediska nízkoteplotní koroze. Konstrukční řešení lze uplatnit jak u ohříváku vody, tak i u ohříváku vzduchu.

- o Ohřívák vody - nebezpečí nízkoteplotní koroze hrozí jen při nízké teplotě napájecí vody (přívod napájecí vody do kotle). Tzn. při napájení kotle odplyněnou vodou (105°C) nebo málo ohřátou vodou, s teplotou nižší než 140°C (160°C). Protože součinitel přestupu tepla na straně vody je výrazně vyšší než součinitel přestupu tepla na straně spalin, blíží se teplota stěny teplosměnné plochy teplotě vody a situování ohříváku vody do spalin s vyšší teplotou není řešením. Jediným účinným opatřením je zvýšit teplotu napájecí vody na vstupu do ohříváku vody. Toto lze provést (kromě regeneračního předehřevu napájecí vody odběrovou parou před kotlem) např. ohřevem napájecí vody v parním bubnu.

- o Ohřívák vzduchu - teplotu stěny lze udržet nad teplotou bezpečnou z hlediska teploty rosného bodu spalin vhodnými konstrukčními úpravami (kromě snížení teploty rosného bodu, což bylo popsáno dříve), kterými se

- ☐ příznivě ovlivní přestup tepla ve spalinovém ohříváku vzduchu
- ☐ zvýší teplotu vzduchu na vstupu do spalinového ohříváku vzduchu
- ☐ využije pro sdílení tepla ze spalin do vzduchu vhodná (pomocná) teplonosná látka.

a) ovlivnění součinitele přestupu tepla u trubkového ohříváku vzduchu.

Příznivé změny součinitele přestupu tepla (poměru $\frac{q}{s \cdot \Delta t}$) se dosáhne např. změnou způsobu obtékání trubek, kdy ohřívák vzduchu místo se svislými trubkami s prouděním spalin uvnitř trubek a s příčným prouděním vzduchu (kolmo na trubky) se provede s vodorovně uspořádanými trubkami, kdy vzduch proudí uvnitř trubek a spaliny kolmo na trubky (příčné obtékání).

b) zvýšení teploty vzduchu na vstupu do ohříváku vzduchu lze dosáhnout prakticky dvěma způsoby:

- o recirkulací ohřátého vzduchu
- o předehřevem vzduchu jiným médiem, např. parou

Pro sirnaté uhlí se v praxi provádí předehřev vzduchu na teplotu 65°C až 80°C a velikost ohřevu (Δt) je výrazně odlišná při provozu kotle v létě a v zimě. Proto se někdy s výhodou používá kombinace obou uvedených způsobů.

Recirkulace ohřátého vzduchu

Nejčastěji se část ohřátého vzduchu z výstupu ohříváku vzduchu recirkuluje zpět do sání vzduchového ventilátoru (zvyšuje se průtočné množství a teplota u ventilátoru) nebo před vstup do ohříváku vzduchu (do výtlačku vzduchového ventilátoru - v tomto případě musí být v recirkulaci samostatný recirkulační ventilátor pro zvýšení tlaku vzduchu). V obou případech se zvýší příkon el. energie na dopravu spalovacího vzduchu, částečně se zvýší i investiční náklady. Výhodou je jednoduchost provedení a spolehlivost.

Při přehřevu recirkulací vzduchu se nemění přivedené teplo do kotle, potřebné teplo se získá ze spalín v oblasti ohříváku vzduchu. S tímto musí konstruktér kotle počítat při návrhu ohříváku vzduchu (vliv změny teploty nasávaného vzduchu na vstupu do ohříváku).

Přehřev vzduchu parou

Nejčastěji se používá cizí pára, např. odběrová pára z turbíny o teplotě 120°C. Obvykle veškerý spalovací vzduch se přehřívá ve výměníku ze žebrovaných trubek. Pára uvnitř trubek kondenzuje a kondenzát se vrací zpět do parního oběhu elektrárny nebo teplárny. Z hlediska termické účinnosti parního cyklu má takový přehřev podobný efekt jako regenerační ohřev napájecí vody - zvýší se nepatrně účinnost bloku, ale u kotle je navíc tlakový systém. Teplo předané ve výměníku je „cizí“ teplo přivedené do kotle, musí se zahrnout do tepelné bilance. Spalinový ohřívák vzduchu pracuje na vstupu s konstantní teplotou vzduchu, neprojevuje se změna teploty okolí.

c) Přehřev vzduchu ve výměníku s pomocným teplotním nositelem

Jedná se o výměník tepla z tepelných trub (Perkinsovy trubky), v nichž je pomocná teplotní látka. Jejich výhodou je v tom, že prokorodování tepelné trubice nemá vliv na těsnost ohříváku vzduchu (čímž se dosahuje vysoké spolehlivosti) a provedení přehřevu je jednoduché. Podobně jako u spalínové odparky se pro přehřev vzduchu využívá teplo spalín, snižuje se tak komínová ztráta a zvyšuje se účinnost kotle.

Při spalování plynu lze volit teplotu spalín na odchodu z kotle velmi nízkou, vhodným konstrukčním řešením lze připustit i kondenzaci páry na koncových plochách (kondenzační kotle), podmínkou tohoto řešení je však dostatečně nízká teplota ohřívaného média. Vzhledem k tomu, že pro spalování plynu se obvykle neohřívá vzduch, je nejchladnějším médiem vstupujícím do parního kotle napájecí voda, která musí být odplyněná, tudíž s teplotou min. 105°C. Tomu odpovídá koncová teplota spalín $t_k = 120 \div 140$ °C. Plynové parní kotle jsou proto opatřovány mohutnými konvekčními ekonomizéry, v některých případech jsou pro dochlazení spalín navrhovány spalínové regenerační ohříváky napájecí vody. U horkovodních plynových kotlů lze snáze dosáhnout většího vychlazení spalín evtl. částečné kondenzace s ohledem na nižší teplotu napájecí vody, která bývá 40 až 80 °C.

Obsah vody v palivu má rovněž vliv na provedení tzv. partie za kotlem. Větší množství spalín vede k zvětšení rozměrů odlučovače popílku i kanálů a k použití výkonnějšího spalínového ventilátoru.

4.4. Obsah popela

K základním jakostním znakům paliva patří i obsah popela (A), který se zjišťuje laboratorním rozбором vzorku paliva.

Takto stanovený obsah popela (A) není totožný s obsahem popelovin (M) - tj. s minerální částí surového paliva. Při přeměně popelovin (M) na analytický popel (A), tj. při spalování probíhají reakce, jejichž důsledkem je i změna hmotnosti. Tak např. se odpařuje hydrátová voda, kalcinací uhličitánů se odštěpuje CO₂ a dochází k vazbě SO₂ - vzniklého spalováním siřníků železa - na zbylý CaO. Dále dochází k rozkladu chloridů, oxidaci FeO atd. Laboratorně stanovený obsah popela (A) je tedy vždy menší než obsah popelovin (M) v daném palivu.

Obsah popelovin (M) se ze zjištěného obsahu popela (A) stanoví jednoduchým přepočtem pomocí korekčního součinitele (f), který se nazývá popelový faktor, podle vztahu

$$M = f \cdot A \quad [\text{kg/kg}]$$

Popeloviny jsou nerostné látky, které pocházejí jednak z anorganických složek vegetace, z níž uhlí vzniklo (tzv. složky primární - syngenetické, které tvoří jen malou část popelovin), jednak z minerálů vniklých do usazenin (po jejich vytvoření) např. naplavením, navátím apod., (tzv. složky sekundární - epigenetické, původní). Kromě toho tvoří třetí složku popelovin tzv. vnější popeloviny, což je určité množství hlušiny z nadloží i podloží, které se do uhlí dostanou při těžbě uhlí, čemuž nelze prakticky zabránit.

Číselná hodnota popelového faktoru (f) je tedy pro každý druh uhlí jiná. Pro česká uhlí je popelový faktor $f > 1,1$, blíže k hodnotě 1,1 leží hodnoty pro černá uhlí, blíže k 1,2 pak hodnoty pro hnědá uhlí. Jiní autoři uvádí pro česká uhlí popelový faktor v rozmezí $f = 1,03$ až 1,1.

Rozhodující vliv na složení a jakost popelovin mají popeloviny epigenetické (sekundární) a popeloviny vnější. To

vysvětluje, proč se tak značně liší mineralogické i chemické složení popelovin z jednotlivých druhů uhlí. Mineralogické složení popelovin je velmi různorodé, některé nejdůležitější minerály obsažené v uhlí jsou uvedeny v tabulce.

Skupina	Minerál	Chemické složení	Přibližná teplota [°C]	
			rozkladu	tání
Jílové minerály	kaolinit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	1800
	halloysit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-	-
	illit	$\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	1400
	montmorillorit	$(\text{Na}, \text{Ca}) (\text{Mg}, \text{Al}) [(\text{OH})_2 \text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot 11 \text{H}_2\text{O}$	-	-
Karbonáty	kalcit	CaCO_3	850	-
	dolomit	$(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$	750	-
	siderit	FeCO_3	500	-
	ankerit	$\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn} (\text{CO}_3)$	-	-
Sulfidy	pyrit, markazit	FeS_2	265-490	-
	pyrrhotin	$\text{Fe}_5\text{S}_6\text{-Fe}_{15}\text{Si}_{17}$	700	-
Sulfáty	sádrovec	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	1450
		MgSO_4	-	-
		Na_2SO_4	-	-
		$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	-
Oxidy	křemen	SiO_2	-	1450
	hematit	Fe_2O_3	-	1540
	magnetit	$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-
	diaspor	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-	1750
	cyanit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	-	1750
Halogenní minerály	hallit	NaCl	-	800
	sylvin	KCl	-	770
Jiné akcesorní minerály	ortoklas	$\text{K}, \text{Al}, \text{Si}_3\text{O}_8$	-	1450
	biolit	$\text{K} (\text{Mg}, \text{Fe})_3 (\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) (\text{OH}_2)$	-	1600
	apatit	$9\text{CaO} \cdot 3\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{CaF}_2$	-	-

U převážné většiny našich hnědých uhlí tvoří rozhodující část popelovin (i více než 95%) minerály prvních tří skupin, přičemž kvantitativně nejvýznamnější bývají jílové materiály. Z chemického složení popela se často usuzuje i na další fyzikální vlastnosti popela, např. na sklon ke struskování. Při tomto je třeba si vždy uvědomit, že chemické složení popela není a nemůže být totožné s chemickým složením popelovin spalovaného paliva. Chemické složení popela dává jen částečnou představu o chemickém složení popelovin, neposkytuje však žádnou informaci o jejich mineralogickém složení. Tak například z údaje o obsahu SiO_2 v popelu nelze usuzovat, je-li v popelovině obsažen křemík ve formě křemene (písku) nebo křemičitanů (jílů).

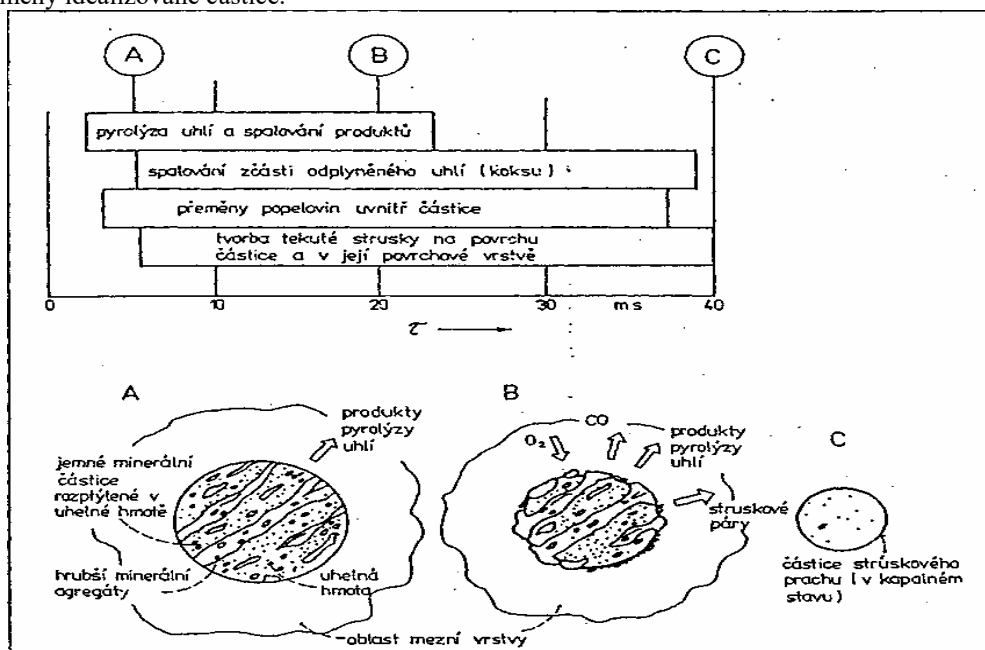
I obsah tzv. stopových prvků může mít za určitých podmínek značný význam, např. obsah chloru nebo výskyt toxických prvků. Tyto se mohou zplyňovat a odcházejí komínem do ovzduší a nebo se zachycují v popelu. (Buď přímo nebo jejich sloučeniny.) V tuhých zbytcích (struska, popílek) zachycené toxické složky pak mohou přecházet do spodních vod (na složišti) nebo do ovzduší a to jako prach ze složiště nebo jako jemné částice popílku nezachycené v odlučovači. Koncentrace fluoru v popelu u severočeských hnědých uhlí jsou asi 200 g/t, opět se uvádí, že z toho do ovzduší odchází asi 70% až 75%. Fyzikální a chemické vlastnosti popela patří rovněž mezi důležité charakteristiky spalovaného paliva.

Popeloviny se při spalování paliva v laboratorních podmínkách (vzorek) mění v popel, v provozních podmínkách (při spalování v ohništi kotle) přechází v tzv. tuhé zbytky po spalování, z nichž část zůstává v ohništi jako struska (granulační a výtavná prášková ohniště) nebo jako škvára (roštová ohniště), či případně jako nenatavené popelové částice (neškvárující fluidní ohniště) a zbývající část odchází jako popílek unášený spaliny.

Pouze u kotlů s roštovým ohništěm se do tuhých zbytků započítává i tzv. propad, což je směs drobných částic škváry a malých částí nevyhořelého paliva, která propadáva mezerami mezi roštnicemi.

Během ohřevu (při procesu spalování) mění popeloviny plynule své fyzikální a chemické vlastnosti, až v závěrečném stadiu vytvoří roztavenou směs původních minerálů a různých eutektik i prvků. Proto při opětovném ochlazení této roztavené směsi probíhá její tuhnutí (zvyšování viskozity) podle jiné křivky než zahřívání (tavení). Popeloviny mají pak po takovém „tepelném zpracování“ některé fyzikální a chemické vlastnosti odlišné od vlastností původní minerální hmoty.

Vznik struskové částice při spalování popelnatého uhlí v práškovém ohništi je znázorněn pomocí modelu na obrázku. V horní části obrázku je naznačen i přibližný časový průběh hlavních dějů a odpovídající tři stadia (A, B, C) přeměny idealizované částice.



Tento model respektuje již současný stav poznání o spalování částice uhlí, když u části s rozměrem menším než 90 μm předpokládá převládající přímou oxidaci uhlíku na CO s následným spalováním CO mimo mezní vrstvu. (Nikoliv zplyňování uhlíku složkami spalín jako je H_2O či CO_2 , kteréžto je charakteristické pro spalování hrubších částic.)

Struska vzniká na povrchu částice (B) souběžně se spalováním hořlaviny, přičemž tavení popelovin začíná vlivem teplotního rázu již uvnitř částice a postupuje dále v závislosti na dynamice ohřevu hmoty celé částice. Žhavý uhlík a CO v mezní vrstvě vytváří redukční prostředí, které určuje charakter a intenzitu dílčích dějů a snižuje viskozitu struskové taveniny. Po spálení odplyněného uhlí (koks) zůstane částice struskového prachu (C).

Samotné částice popelovin (přivedené spolu s částicemi uhlí) nemají ve srovnání s částicemi uhlí vlastní prostředí a mění se v částice strusky (nebo popílku) rychlým ohřevem při průchodu plamenem. Vliv prostředí (složení spalín) na průběh přeměny popelovin se mění v závislosti na trase, po níž se částice pohybuje.

Chování popelovin při vysokých teplotách v ohništi, především pak průběh měknutí, tavení a tečení částice popela, charakterizují termoplastické vlastnosti popela. Na ty má rozhodující vliv poměr kyselých a zásaditých oxidů, pro jehož číselné vyjádření se užívají různá kritéria pro hodnocení sklonu popela ke struskování.

Další důležitou termoplastickou vlastností popela (pro kotle s výtavným ohništěm) je viskozita tekuté strusky.

Pro experimentální zjišťování termoplastických vlastností popela v podmínkách více či méně simulujících poměry v ohništi kotle byla vyvinuta řada metod pro laboratorní stanovení tzv. charakteristických teplot popela: t_A - bod měknutí; t_B - bod tání; t_C - bod tečení. Někdy se určuje ještě teplota sintrace - spékání. Používají se dnes dvě základní skupiny metod pro laboratorní určení charakteristických teplot popela:

- do první skupiny (a) patří metody založené na sledování deformace volného (nezatíženého) zkušebního popelového tělíska pomocí žárového mikroskopu. Deformace se fotograficky zaznamenává. Sem patří i u nás používaná metoda, která je popsána v normě.
- do druhé skupiny (b) patří metody založené na grafickém záznamu změny výšky zkušebního tělíska zatíženého svisle působící silou. (Metoda, kterou do praxe zavedli Bunte a Baum).

Zohlednění obsahu popela při rozhodování o koncepci kotle a jeho základním návrhu

S množstvím popela v palivu a především s jeho složením a vlastnostmi souvisí celá řada problémů jak z hlediska návrhu kotle, tak i jeho spolehlivého provozu.

- **Účinnost kotle** S vyšším obsahem popela se zvyšuje ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování (odsiřování) a ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích. Při nižší účinnosti kotle se spálí větší množství paliva.
- **Koncepce a dimenzování mlýnice, zařízení pro skladování a dopravu paliva** (tzv. vnitřní zauhlování). S větším obsahem popela se zvyšuje obsah balastu a snižuje se výhřevnost paliva, tím se zvyšuje i množství paliva do kotle přivedeného.
- **Návrh systému odvodu strusky (popela) ze spalovací komory.** S množstvím strusky a s předpokládaným

obsahem spalitelných látek ve strusce souvisí rozhodnutí o použití dohořivacího roštu. S množstvím odváděných tuhých zbytků ze spalovací komory je svázána koncepce a dimenzování (velikost, typ a počet) jednotlivých zařízení systému odstruskování kotle, jakož i systém odtahu a skladování strusky z kotelny.

Orientační hodnoty zachycení popela v ohništi (škvára, struska, popel), jakož i množství popela v propadu (u roštových ohnišť) a v úletu, jsou uvedeny v tabulce. Skutečné hodnoty pro dimenzování zařízení však volí výrobce kotle podle zkušeností se zvoleným typem ohniště a se spalováním zadaného paliva.

Ohniště		Uhlí	Zrnění [mm]	Podíl zrn pod 2 mm	Podíl popela [-]*)		
					ve škváře X_s	v propadu X_r	v úletu X_u
Roštové	s pásovým roštem	hnědé	0 ÷ 30	0,25	0,74	0,06	0,15
		černé	0 ÷ 25	0,20	0,77	0,05	0,13
	s přesuvným roštem	hnědé	0 ÷ 30	0,3 ÷ 0,4	0,62	0 ÷ 0,06**)	0,33 ÷ 0,27
		černé	0 ÷ 25	0,4	0,66	0 ÷ 0,06**)	0,29 ÷ 0,23
	s vratným roštem	hnědé	0 ÷ 30	0,3 ÷ 0,4	0,60	0,03	0,32
	pásový rošt s pohazováním	hnědé	0 ÷ 30	0,40	0,68	-	0,27
		černé	0 ÷ 25	0,40			
Granulační	trubnatý a středoběžný mlýn				0,08	-	0,87
	s ventilátorovými mlýny				0,15	-	0,80
	dvoutahová komora				0,20	-	0,75
	ostatní				0,10	-	0,85
Tavicí	jednoduché				0,40 ÷ 0,35	-	0,50 ÷ 0,35
	dvoupřístavkové				0,50 ÷ 0,40	-	0,40 ÷ 0,50
	cyklonové s vestavbou				0,80 ÷ 0,75	-	0,10 ÷ 0,15
	vertikální cyklonové bez vestavby				0,75 ÷ 0,70	-	0,15 ÷ 0,20
Fluidní	se stacionární vrstvou				0,60 ÷ 0,50	0,05	0,30 ÷ 0,40
	s cirkulující vrstvou				0,30 ÷ 0,60	-	0,45 ÷ 0,70

Poznámky :*) Předpokládá se, že část popela se zplyní a část odchází ve velmi jemné frakci, která neobsahuje spalitelné látky. Tento zbytek do jednotky činí u výtavných ohnišť 0,1, u ostatních typů 0,05.

**) Určí se podle toho, zda je instalováno zařízení na vrácení propadu.

Tuhé částice unášené spaliny způsobují mechanický ořez, který při současném působení koroze ze strany spaliny vede k úbytku materiálu stěny teplosměnných ploch kotle. Při relativně rovnoměrném, nepříliš hlubokém a plošném ořezu hovoříme o **abrazi**, naproti tomu místní (nerovnoměrné) opotřebení materiálu do značné hloubky se označuje jako **eroze**.

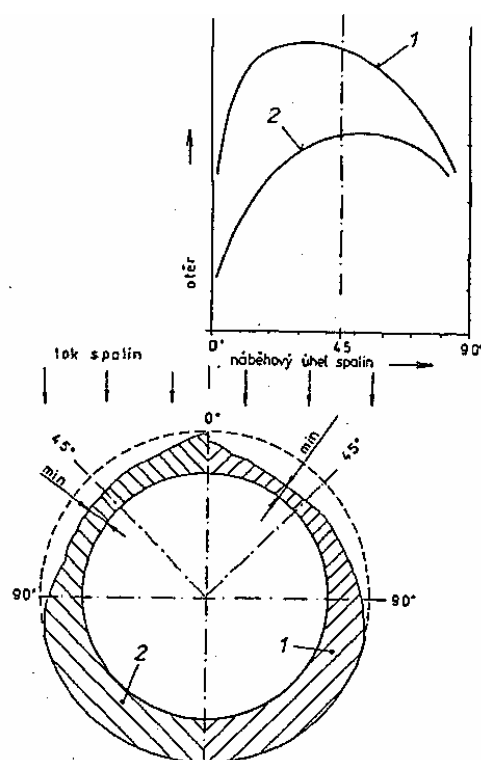
Představu o mechanickém ořezu materiálu trubky teplosměnné plochy dává obrázek. Největší úbytek materiálu je zpravidla v místech, kde popelové částice dopadají na trubku zhruba pod úhlem 45°. Přitom u měkké oceli (křivka 1 a pravá polovina trubky) je úbytek materiálu větší než u trubky z tvrdé oceli.

Působení eroze na trubku teplosměnné plochy

1 - měkká ocel

2 - tvrdá ocel

Pokud mechanický ořez působí na trubku v korozivním prostředí (což je za provozu kotle splněno), zvětšuje se ořez materiálu až na dvojnásobek či pětinašobek. Je to způsobeno tím, že agresivní prostředí vniká do mikroskopických trhlinek a vznikající oxidy mají mnohem horší mechanické vlastnosti než základní materiál a jsou z povrchu snadněji odbroušeny. Povrch zbavený oxidů znova podléhá korozivnímu vlivu spaliny a mechanismus se opakuje. Trvale se zvyšující obsah popela v palivu během posledních 40 let



a zvyšující se potíže s abrazi či erozí ploch kotle vedl k rozsáhlému výzkumu kvalitativních i kvantitativních závislostí různých faktorů majících vliv na vznik a rychlost eroze. Existuje celá řada vztahů, podle nichž lze předběžně stanovit životnost vybraných trubek teplosměnných ploch. Tyto vztahy se shodují na tom, že úbytek tloušťky stěny je úměrný času, kinetické energii částic, množství částic dopadajících na plochu za jednotku času a konstantě úměrnosti.

V praxi se nadměrným účinkům abraze bráníme, kromě jiného, volbou nižší rychlosti spalin, uspořádáním trubek ve svazku za sebou a většími roztečemi trubek ve svazku. To vše vede k většímu průřezu konvekčního tahu kotle a k větší hmotnosti teplosměnných ploch.

- **Uspořádání druhého tahu kotle** (Z hlediska snížení účinků abraze a eroze - spolu s mineralogickým složením popela). Nadměrná koncentrace popílku ve spalinách, jakož i nevhodné mineralogické složení popela, vede k velké abrazi teplosměnných ploch kotle a snížení jejich provozní spolehlivosti.
- **Tvorba popílkových nánosů** (uplatňuje se i vliv chemického složení popela)

Nánosy se tvoří na konvekčních teplosměnných plochách usazováním popílkových částic při nižších teplotách, přičemž částečným spečením částic a kondenzací prchavých složek popelovin (při nižších teplotách) může docházet i ke zpevnění usazené vrstvy.

Proud spalin v konvekčním tahu kotle lze pokládat za směs částic, jejichž velikost je od plynových molekul, přes aerosoly (řádově μm), až k prachovým částicím (do $10^3 \mu\text{m}$). Při tvorbě nánosů rozhoduje především transport hmoty difúzí, povrchová kondenzace a inerční náraz. Rychlost v konvekčním tahu je cca 5,0 m/s až 20 m/s, fluktuální rychlost je při tom v rozsahu asi 0,1 m/s až 1,0 m/s. Velikost částic, které ještě mohou sledovat pohyb spalin ve vírech, se dá odhadnout do 1 μm . Transport částic menších než 1 μm do blízkosti povrchu trubek se tedy děje turbulentní difúzí - dále pak rozhodují poměry v mezní vrstvě.

Transport nejmenších částic v mezní vrstvě je řízen molekulární a Brownovou difúzí. Intenzita tvoření nánosů nejmenších částic bude tedy vzrůstat s jejich koncentrací ve spalinách a se vzrůstem teploty. Pro zanášení je důležitý i tvar povrchu. Drsný povrch (koroze, eroze) vytváří příznivé podmínky pro zachycování jemných částic. Částice větší než 1 μm nejsou již schopny sledovat v proudu spalin proudnice, proto větší podíl částic projde plochami, aniž by se zachytil. Zachytí se jen ty částice, jejichž hlavním mechanismem pro zachycení je inerční náraz, tzn., že částice musí mít přiměřenou rychlost a její trajektorie musí s povrchem trubky svírat vhodný úhel. Náhylnost k tvorbě popílkových nánosů - viz též struskové nánosy.

Popílkový nános zhoršuje prostup tepla ze spalin do pracovního média, má vliv i na korozi teplosměnných ploch, (viz dále „nizkoteplotní koroze“) a při větším obsahu nespáleného uhlíku (např. u kotlů s fluidním ohništěm) v popelových částicích, ovlivňuje i obsah CO ve spalinách za kotlem.

K čištění konvekčních teplosměnných ploch kotle se používají obvykle parní ofukovače a to otočné (v nižších teplotách) nebo výsuvné (ve vyšších teplotách). Pro ofukování se používá buď vlastní, v kotli vyrobená, pára (redukce na potřebný tlak) nebo „cizí“ pára. Při návrhu uspořádání konvekčního tahu kotle se musí respektovat základní požadavky pro správnou funkci ofukovačů, např. minimální vzdálenost od teplosměnné plochy (nebezpečí eroze), dostatečný prostor vně tahu pro výsuvný ofukovač, přístup k ofukovačům (plošiny, ochozy). Používání parních ofukovačů se musí zohlednit i při dimenzování zařízení pro odlučování popílku ze spalin (při ofukování se zvyšuje vstupní koncentrace popílku ve spalinách).

- **Provedení tzv. partií za kotlem.** To v tomto případě znamená vliv na volbu typu a dimenzování zařízení pro čištění spalin od tuhých zbytků po spalování, případně i po přímém odsířování. Obvykle se pro čištění spalin za kotlem používá elektrostatický odlučovač nebo hadicový filtr, ojediněle pak mechanické odlučovače. Množství popela má vliv na počet odlučovacích sekcí (tedy rozměr odlučovače) a někteří výrobci podle vstupní koncentrace a granulometrie popílku předřazují před hlavní zařízení např. mechanický odlučovač. To vše má vliv na velikost zastavěné plochy, prostorové uspořádání jednotlivých zařízení a tím i investiční náklady. Obsahuje-li popílek nežádoucí stopové prvky (jsou vázány obvykle na nejmenší frakci popílku), pak je vhodnější použít hadicový odlučovač, neboť tento je schopen zachytit i takové velice jemné částice.

- **Sdílení tepla v ohništi kotle.** S množstvím popela souvisí stupeň černosti prostředí v ohništi, resp. stupeň černosti plamene, a tím i teplota spalin na konci ohniště, resp. velikost celkové teplosměnné plochy v ohništi kotle. S mineralogickými vlastnostmi popelovin s jejich chemickým složením, fyzikálními a chemickými vlastnostmi, jakož i s termoplastickými vlastnostmi popela souvisí zejména

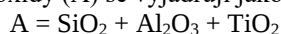
- *Volba typu ohniště pro spalování uhelného prášku.* Tzn. zda bude použito ohniště granulační nebo výtavné. U obou ohnišť se samozřejmě musí respektovat charakteristické teploty popela spalovaných druhů uhlí. Důležitým parametrem pro výtavné ohniště je viskozita tekuté strusky.
- *Tvorba struskových nánosů* Spaluje-li se palivo obsahující popel, dochází vždy ke tvorbě nánosů. Podle způsobu vzniku mohou být nánosy dvojího druhu:
 - popílkové - na konvekčních plochách
 - struskové - což jsou pevně lpící usazeniny na stěnách ohniště a teplosměnných plochách (některé přehříváky) vzniklé změknutím nebo částečným roztavením popelovin při vysokých teplotách.

Pokud vznik těchto nánosů není řízen (např. správným návrhem a provozováním ohniště) a velikost zanesení ploch

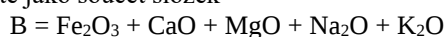
není za provozu kontrolována a udržována, mohou mít nánosy mimořádně těžké důsledky jak pro funkci ohniště, tak i pro funkci tlakového systému kotle. Podle struktury a způsobu vzniku rozlišujeme dva základní typy struskových nánosů

- Slinuté nánosy, které se tvoří
 - přímo - zachycováním prachových částic v kapalném nebo plastickém stavu a jejich slepováním povrchovou glazurou při nárazu na stěnu
 - nepřímo, z nánosu původně jen stmelého, jehož vnější vrstva se sline po zvýšení povrchové teploty nánosu nad teplotu měknutí, příp. tavení částic.
- Stmelené nánosy jsou typické zejména pro přehříváky a jsou to tvrdé nánosy s vrstevnatou strukturou, které vznikají složitým procesem chemických přeměn v tvořící se vrstvičce. Základním materiálem jsou částice struskového skla, které jsou vázány pojivem z komplexních síranů (K, Na, Fe, Al), silikátů nebo též komplexních fosfátů (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe), či chloridů. Tvorba nánosu má dvě etapy:
 1. Na čisté trubce se z proudu spalín zachytí nejdříve kapalně a tuhé aerosoly jako pojivo. Některé plynné složky mohou na straně trubky kondenzovat. Tato základní vrstva reaguje jednak s dalšími produkty přeměn popelovin, jednak s SO_2 a SO_3 . Tak se po určité době vytvoří na trubce tekutý film nebo měkká lepkavá vrstva směsi různých komplexních síranů, fosfátů a silikátů.
 2. Tyto sloučeniny dále působí jako pojivo, které stmeluje postupně se zachycující struskový prach a aerosol v kompaktní vrstvu. Během času se mění chemické složení a fyzikální vlastnosti nánosu (např. roste tvrdost). Důležitým činitelem je přitom difúze SO_2 a SO_3 ze spalín k povrchu trubky.

Všeobecně se uvádí, že na termoplastické vlastnosti popela má vliv poměr kyselých (A) a zásaditých (B) oxidů. Kyselé oxidy (A) se vyjadřují jako součet složek



a zásadité jako součet složek



v popelu, vyjádřených v hmotnostních [%]

Nejstarší, dosud používané kritérium pro hodnocení sklonu paliva k tvoření struskových nánosů je Teuneův index (K_T), který se používá ve tvaru

$$K_T = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}}$$

přičemž jednotlivé složky jsou vyjádřeny opět v hmotnostních [%].

Čím vyšší je hodnota K_T , tím vyšší jsou teploty, při nichž dochází k fázovým změnám. Pro hrubou orientaci lze popely (uhlí) rozlišit podle tabulky.

Charakteristika	K_T [-]	Teplota tečení t_C [°C]
lehce tavitelné	<2,4	< 1 150
středně tavitelné	2,4 až 4,5	1 150 až 1 400
těžce tavitelné	>4,5	> 1 400

Novější kritéria pro posuzování náchylnosti paliva k tvoření popelových nánosů jsou uváděna ve tvaru:

$$R_S = \frac{B}{A} \cdot S^d \text{ pro tvorbu struskových nánosů a}$$

$$R_P = \frac{B}{A} \cdot Na_2O \text{ pro tvorbu popílkových nánosů (konvekční tah) kde } \wedge \text{ je síra v sušině v hm. [\%]}$$

Náchylnost paliva k tvorbě nánosů se pak posuzuje podle tabulky.

Náchylnost popela k tvorbě nánosů	Struskových (v ohništi) R_S	Popílkových (konvekční tah) R_P
slabá	<0,6	<0,2
střední	0,6 až 2,0	0,2 až 0,5
velká	2,0 až 2,6	0,5 až 1,0
velmi velká	>2,6	>1,0

Užívání tohoto kritéria se značně rozšířilo a považuje se za dost spolehlivé. Někdy se uvádí pod názvem ukazatel Babcock Wilcock.

S přihlédnutím k náchylnosti paliva ke struskování se musí nejen dimenzovat ohniště (teplota na konci ohniště, velikost ohniště, hořáky atd.), ale toto se musí rovněž vybavit zařízením pro čištění stěn od struskových nánosů (nejčastěji se používají vodní ostřikovače). K čištění ohniště od nánosů strusky za plného provozu kotle se pak musí přihlížet i při dimenzování zařízení pro odvod strusky z ohniště. Pro obsluhu a kontrolu vodních ostřikovačů

musí být vně ohniště provedeny plošiny nebo ochozy.

- **Koroze teplosměnných ploch na straně spalin.** Primární příčinou koroze na straně spalin je palivo. Kromě jeho chemického složení se na vzniku i intenzitě koroze podílí přímo popeloviny paliva a uplatňuje se i chemické působení nánosů strusky nebo popílku. Působení popela je různorodé a bude popsáno dále při hodnocení vlivu obsahu S a Cl.

- **Stabilita hoření v ohništi práškového kotle.** Značné kolísání obsahu popela v palivu a především rázové zvýšení obsahu popela (je provázeno i změnou výhřevnosti) zhoršuje stabilitu hoření prášku ve spalovací komoře kotle. Za určitých okolností (např. při současném snížení výkonu kotle) může dojít i ke zhasnutí plamene v kotli. O stabilitě v ohništi kotle vypovídají i pulzace tlaku v ohništi.