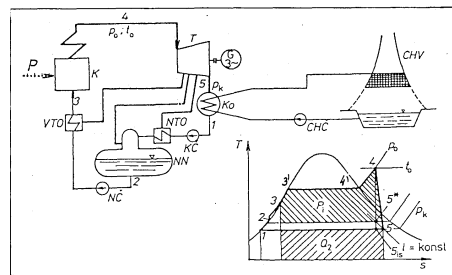


1 PARNÍ KOTEL, JEHO FUNKCE A ZAČLENĚNÍ V TEPELNÉM OBĚHU KONDENZAČNÍ ELEKTRÁRNY

Kondenzační elektrárna spalující uhlí se skládá z celé řady provozních souborů a jako celek představuje jak z hlediska investiční výstavby, tak i z pohledu technologického procesu značně složitě zařízení. Její technologické i tepelné schéma bylo prezentováno již při první přednášce.

Spálením paliva P v kotli K se uvolní teplo, které se využije k výrobě páry. Přehřátá pára o tlaku p_o a teplotě t_o se vede do parní turbíny T , kde expanduje na velmi nízký tlak p_k (obvykle 2,5 až 7,0 kPa). V kondenzátoru Ko pára působením chladicí vody ochlazené na chladicí věži CHV a cirkulující pomocí čerpadla CHC z kondenzuje a kondenzát 1 se kondensátním čerpadlem $KČ$ dopravuje přes nízkotlaké regenerační ohříváky NTO do napájecí nádrže NN . Odtud se napájecím čerpadlem NC dopravuje přes vysokotlaké regenerační ohříváky vody VTO napájecí voda 3 zpět do kotle. U kondenzační elektrárny pro zvýšení účinnosti oběhu používá tepelný oběh s přehříváním páry. Přehřátá pára z kotle expanduje nejdříve ve vysokotlakém dílu parní turbíny a znovu se zavede do kotle do samostatného přehříváku, kde se ohřeje opět na vysokou teplotu. Takto přehřátá pára expanduje v dalším dílu parní turbíny. U parního kotle s přehřívákem páry se tedy realizuje opět ta část oběhového diagramu, která je z energetického hlediska nejučinnější.



Za charakteristické pro parní kotel pracující v oběhu parní kondenzační elektrárny lze považovat především:

- vysoké parametry přehřáté páry = u moderních bloků velkých výkonů jsou to nadkritické parametry, např. 26 MPa a 580°C u přehřáté páry a 600°C u přehřáté páry,
- alespoň jedno přehřívání páry, u bloků velkých výkonů se provádí i dvojí přehřívání páry,
- velký jednotkový výkon kotle. V ČR jsou to dnes parní výkony 350 t/h (100 MWe), 650 t/h (200 MWe) či 1560 t/h (500 MWe). V provozu jsou kotle o výkonu cca 960 t/h či 1850 t/h pro bloky 300 a 600 MWe. Dnes se za dosažitelný jednotkový výkon považuje výkon cca 2900 t/h pro blok 950 MWe
- vysokou teplotu napájecí vody vyplývající z použití vysokotlakých regenerativních ohříváků napájecí vody,
- realizaci všech dostupných opatření k dosažení co nejvyšší účinnosti kotle,
- menší regulační rozsah s konstantní teplotou páry, pokud blok pracuje v základním zatížení,
- blokové uspořádání: kotel - turbína – chladicí věž,
- co největší roční využití při trvalém provozu, většinou se nepožaduje časté odstavení.

Pro dosažení velkého jednotkového výkonu se u nás používá uhlí, které se spaluje

- ve formě prášku
- ve fluidním loži

1.1 Kotle práškové

Spalují uhelný prášek rozemletý na velikost zrn pod 1 mm v letu v prostoru ohniště. Rozemletím kusového uhlí na prášek dochází ke zvětšení měrného povrchu 100 - 1000x oproti spalování na roštu. Rozemletý prášek se do ohniště přivádí pneumaticky nosným médiem, které nazýváme primární směs. Nosným médiem může být vzduch, spaliny nebo jejich směs. V prostoru ohniště se mísí s další částí vzduchu - sekundárním vzduchem. Doba spalování u práškových kotlů je 1 - 3 s, zatímco při spalování na roštu bývá v desítkách minut.

Práškové kotle se stavějí od cca 50 t/h. Rozeznáváme dva typy práškových hořáků:

- granulační se suchým odvodem tuhých zbytků z ohniště v podobě škváry. Spalování zde probíhá při relativně nízkých teplotách. Hodí se pro naše méněhodnotná hnědá uhlí,
- výtavné s tekutým odvodem tuhých zbytků z ohniště v podobě tekuté strusky tj. nad bodem tečení popela.

Jsou vhodné především pro uhlí s vyšší spalovací teplotou tj. pro kvalitní černá uhlí.

Směs nosného vzduchu a uhelného prášku a sekundární vzduch vstupuje do kotle práškovými hořáky. Různé varianty uspořádání hořáků jsou na obr. 1-1.

Zatímco granulační kotle mají na spodku ohniště zužující se výsypku, ze které je odváděna škvára, výtavné kotle mají rovné nebo pouze mírně skloněné dno s výtakovým otvorem.

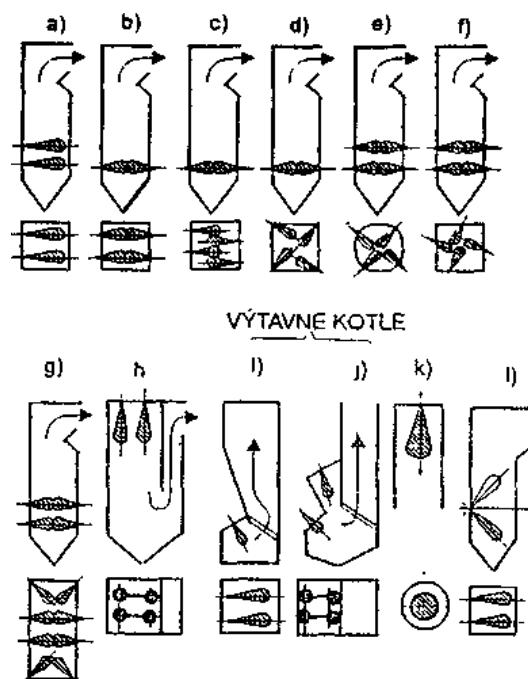
Srovnání výtavných a granulačních ohnišť

- Výtavná ohniště mají vyšší stupeň zachycení popela v ohništi (40 - 70%), což je výhodné, neboť struska odtéká z ohniště otvorem do vody, kde granuluje - tj. prudkým ochlazením a vnitřním tepelným pnutím se rozpadává na menší kusy. Takto v ohništi přímo zachycená struska se snadněji uskládňuje na složišti.
- Vyšší spalovací teploty u výtavných ohnišť, znamenající i vyšší uvolněné teplo, dovolují při konstruování těchto ohnišť vyšší měrné tepelné objemové zatížení ohniště, což má příznivý dopad na zmenšení velikosti ohniště i jeho obestavěný prostor.
- Vyšší spalovací teploty mají rovněž příznivý dopad na vznik SO_3 a následně nízkoteplotní koroze

dotatkových ploch kotle, neboť rosny bod je v průměru o 20°C nižší než u ohnišť granulacních. To umožňuje volit u kotlů s výtavným ohništěm nižší teplotu spalin za kotlem a tím i nižší komínovou ztrátu.

Za nevýhody výtavných ohnišť lze považovat:

- Nevhodnost těchto ohnišť zejména pro méněhodnotná hnědá uhlí s vysokým obsahem prchavého podílu. Ve výtavných ohništích lze ekonomicky spalovat pouze kvalitní uhlí s menším obsahem prchavého podílu - tj. především antracitu a černá uhlí.
- Uvedená paliva se obtížně vzněcují i hůře vyhořívají, takže je nutné je mlít na jemnější částice. To zvyšuje měrnou mlecí práci a tím i vlastní provozní náklady.
- Vzhledem k nebezpečí tuhnutí strusky v okolí výtakového otvoru mají výtavná ohniště nižší regulační rozsah (u granulacních cca 30 - 100 %, u výtavných cca 60 - 100 %).
- V důsledku velmi vysokých teplot spalování dochází k odpařování části popelovin, které pak kondenzují na dodatkových plochách kotle a způsobují těžko odstranitelné nánosy.



a - dvouřadé čelní, b - jednořadé protiběžné, c - jednořadé vystřídané, d - jednořadé rohové (tangenciální), e - dvouřadé rohové (tangenciální), f - dvouřadé rohové (tangenciální), g - dvouřadé kombinované, h, k - stropní, i, j - uspořádání v čelní stěně u výtavných ohnišť, l - naklápěcí

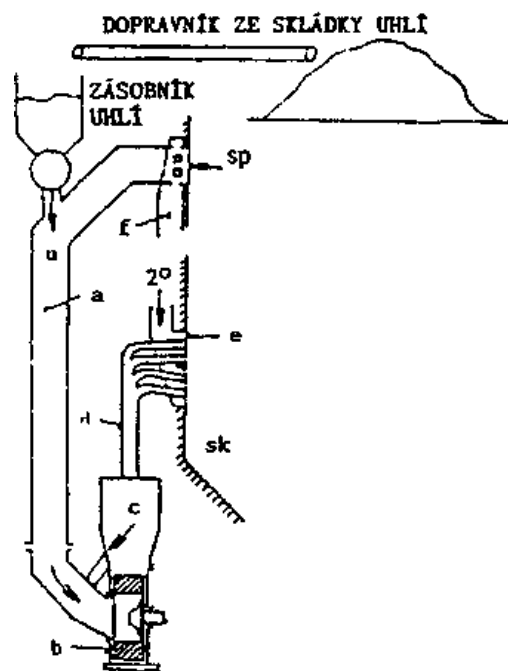
obr. 1-1 Varianty hořáků v ohništích kotlů

V našich práškových kotlích se téměř výhradně používá granulacních ohnišť, která jsou více vhodná pro spalování našich hnědých uhlí.

U těchto kotlů na hnědá uhlí převládají u nás koncepce přímého foukání s ventilátorovým mlýnem. Uhlí padá do spádové sušící šachty a po částečném vysušení vstupuje se sušícím médiem do ventilátorového mlýna. Z mlýna jde primární směs přes třídič do hubic primárního vzduchu. Koncová teplota za třídičem je limitována rosny bodem vodních par v sušícím médiu a bodem zápalnosti prášku v koncentraci se vzduchem. Charakteristický mlecí okruh na hnědé uhlí je na obr. 1-2.

obr. 1-2 Ohniště s ventilátorovým mlýnem

a-sušící šachta, b-ventilátorový mlýn, c-třídič, d-práškovod, e-hořák, f-vzduch pro chlazení nasávacího otvoru spalin a regulaci teploty sušícího plynu, sk-ohniště, sp-přívod spalin z ohniště, u-přívod uhlí od podavače



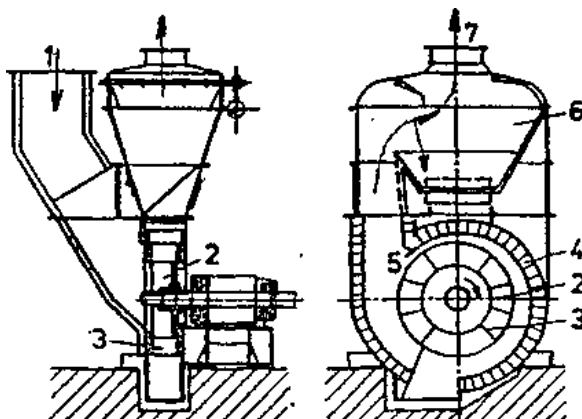
Ventilátorový mlýn je robustní radiální ventilátor. K sušení vlhkých uhlí a současně jako nosné medium využívá spalin 800 - 1000°C ze spalovací komory kotle. Hodí se pro velmi vlhká paliva. Schéma je na obr. 1-3. Ventilátorové mlýny mají mlecí i ventilační účinek. K rozemletí uhlí je využíváno dynamického účinku mlecích elementů (500-1000 ot/min).

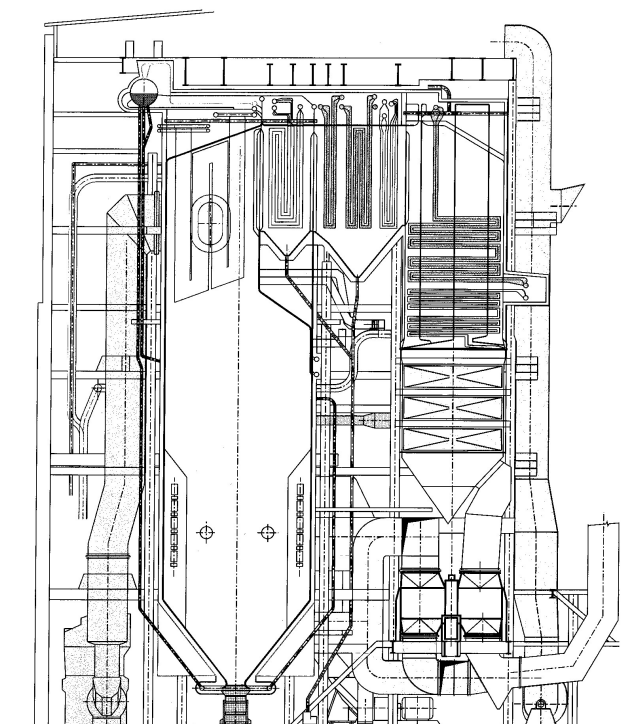
Kromě ventilátorových mlýnů se ještě používá mlýnů tlukadlových, trubnatých a kladkových.

Příklad dvoutahového a jednoranového (věžového) provedení práškových granulacních kotlů na hnědé uhlí je uveden na obr. 1-4 a obr. 1-5.

obr. 1-3 Ventilátorový mlýn

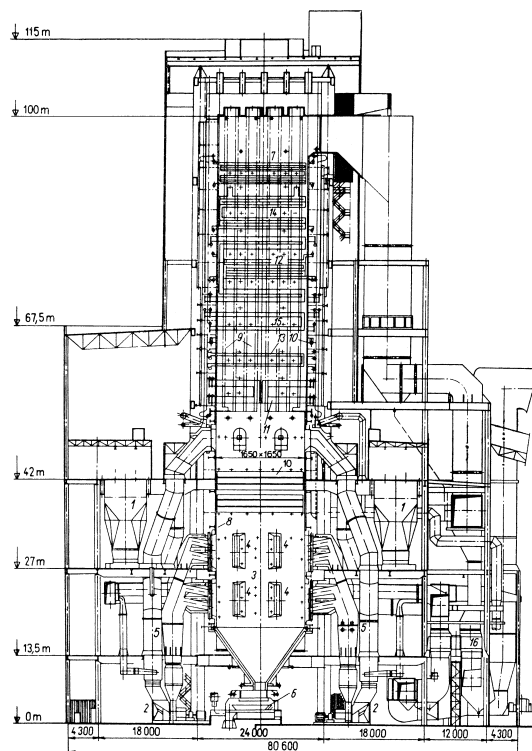
1- vstup kusového uhlí, 2-oběžné kolo, 3-mlecí elementy, 4-pancerovaná skříň mlýna, 5-pancerované výstupní hrdlo, 6-třídič, 7-výstup prášku





obr. 1-4 Vysokotlaký granulační parní kotel

$M_{pp} = 350 \text{ t/h}$, $p_{pp} = 13,6 \text{ MPa}$, $t_{pp} = 540^\circ\text{C}$,
 $t_{mp} = 530^\circ\text{C}$ $t_{nv} = 235^\circ\text{C}$, palivo : hnědé uhlí



obr. 1-5 Elektrárenský věžový granulační kotel průtočný

se superponovanou cirkulací, $M_{pp} = 1600 \text{ t/h}$, $p_{pp}/p_{mp} = 17,8/3,9 \text{ MPa}$, $t_{pp}/t_{mp} = 540/540^\circ\text{C}$, $t_{nv} = 254^\circ\text{C}$

1.2 Kotle fluidní

Fluidizace je obecně děj, v němž je soubor pevných látek udržován ve fluidní vrstvě ve vznosu proudem tekutiny. Fluidní vrstvu tvoří disperzní systém, který se vytváří průtokem plynu vrstvou částic nasypáných na pórovité dno - tzv. fluidní rošt.

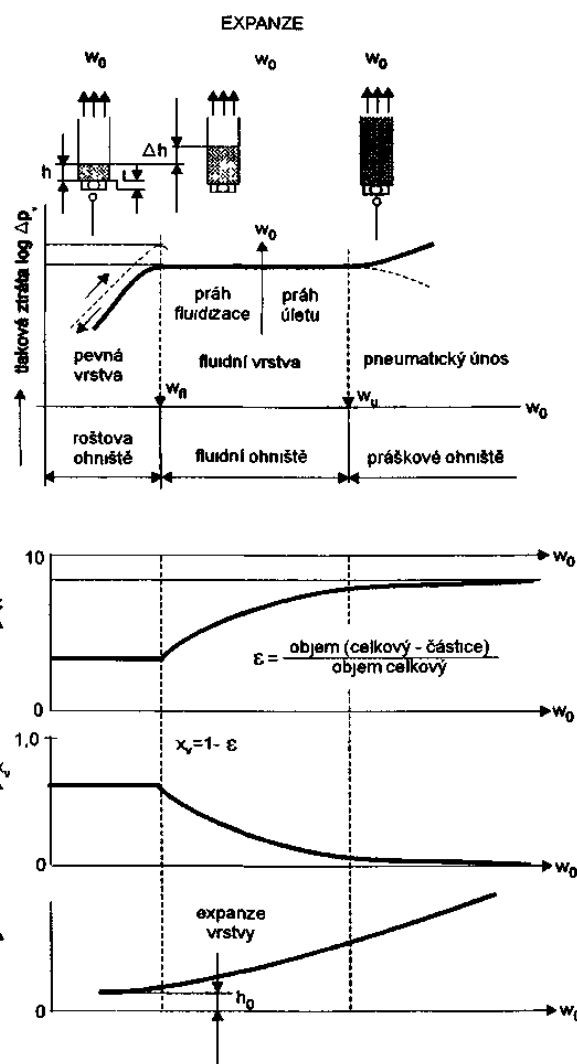
obr. 1-6 Charakteristické veličiny fluidní vrstvy

ε	(-)	- poměrná mezerovitost (objem mezer/objem fluidní vrstvy),
x_v	(-)	- objemová koncentrace částic ($x_v = 1 - \varepsilon$),
h	(m)	- výška fluidní vrstvy,
Δp	(Pa)	- tlaková ztráta fluidní vrstvy,
w_{fl}	(m/s)	- prahová rychlost fluidizace,
w_u	(m/s)	- prahová rychlost úletu,
w_o	(m/s)	- rychlost nad fluidním ložem

Vznik a základní vlastnosti fluidní vrstvy

Při ustáleném toku tekutiny svislou nádobou směrem vzhůru – viz. obr. 1-6, ve které jsou na vodorovné pórovité přepážce uloženy částice, jejichž měrná hmotnost je větší než měrná hmotnost tekutiny, je možno docílit několika stavů směsi. Tyto stavy jsou závislé na rychlosti toku tekutiny, složení částic pevné fáze, tvaru a měrné hmotnosti částic, tvaru a velikosti nádoby, velikosti a typu pórovité přepážky (fluidního roštu), fyzikálních vlastnostech tekutiny a dalších činitelích.

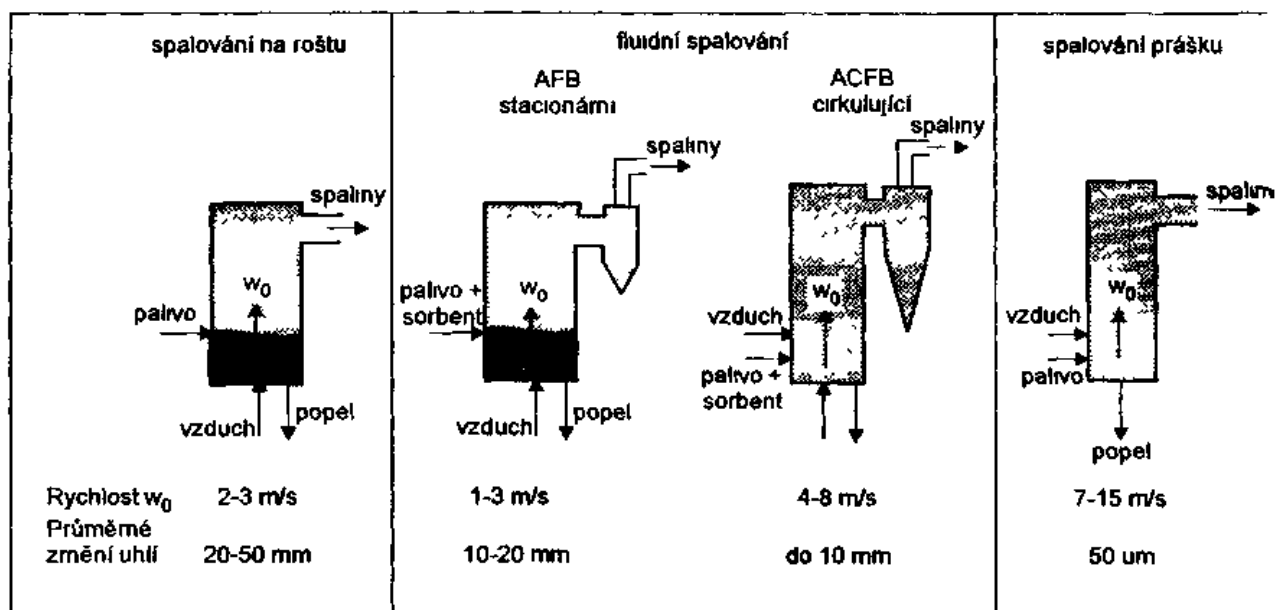
Při zvětšování rychlosti tekutiny roste i tlaková ztráta tekutiny ve vrstvě a při určité rychlosti tekutiny



vyrovnává sílu, kterou působí na vrstvu zemská přitažlivost. Tento stav se nazývá práh fluidizace a příslušná rychlost tekutiny ve volném průřezu nádoby bez částic prahová rychlost fluidizace. Částice tuhé fáze se vznášejí v tekutině a navzájem se promíchávají. Fluidizovaný materiál teče, udržuje víceméně zřetelnou hladinu a má hydrostatický tlak. Objem fluidní vrstvy při prahu fluidizace je větší než objem nehybné vrstvy, říkáme, že vrstva expandovala.

Pokud expanze pokračuje dále s rostoucí rychlostí, zvětšuje se výška fluidní vrstvy a zmenšuje se její objemová koncentrace. Při určité rychlosti, kterou nazýváme prahová rychlost úletu, začne fluidizační tekutina unášet částice z vrstvy. Situace je patrná z obr. 1-6. Fluidní vrstva leží tedy v intervalu rychlosti (w_{fl}, w_u) .

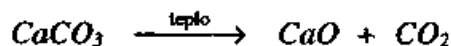
Fluidního jevu se využívá ve spalovací technice. Pro oblast elektrárnenství jsou vhodné atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou. Začlenění těchto kotlů v systémech spalování je v obr. 1-7.



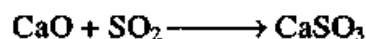
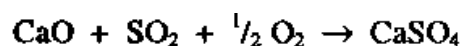
obr. 1-7 Srovnání různých typů spalovacích komor

Výhody fluidního spalování:

1. Dávkováním vápence do kotle lze docílit k částečnému odsíření spalin tj. redukcí SO_2 hlavně reakcí



Vzniklý CaO následně s SO_2 a kyslíkem sulfatizuje na $CaSO_4$ reakcí



Síran vápníku v podobě tuhých částic je potom zachycován v odlučovačích tuhých částic. Vzhledem k velmi jemné frakci tuhých částic je nutné k jejich zachycení použít textilních nebo elektrostatických odlučovačů. Zásadité prostředí v ohništi redukuje kromě SO_2 i další kyselá složky - HCl a HF.

Optimální teplota pro odsíření je 850 - 900 °C. Účinnost odsíření je závislá na obsahu síry v palivu, kvalitě vápence, homogenitě fluidní vrstvy, době pobytu ve fluidním reaktoru a dalších faktorech. Dávkování vápence se uskutečňuje na základě molového poměru Ca/S.

2. Účinnost odsíření je od 40 do 95% podle typu kotle a množství dávkovaného vápence.
3. Fluidní kotle tedy nevyžadují budování odsiřovacího zařízení za kotlem.
4. Nízké teploty ve fluidní vrstvě a odstupňovaný přívod vzduchu do ohniště mají příznivý dopad na redukcí NO_x ve spalinách.
5. Uvedeným způsobem lze spalovat i méněhodnotná paliva a různé odpady s velmi nízkou výhřevností, v jiných typech kotlů nespalitelné.
6. Spalování probíhá s vyšším zatížením roštové plochy oproti klasickým roštovým kotlům a rozměry roštu proto vycházejí nižší.
7. Mají nižší komínovou ztrátu, neboť odsířené spaliny na konci kotle mohou mít v důsledku nižšího rosného bodu nižší teplotu. Účinnost kotlů bývá při jmenovitých parametrech 92 - 94%.

Fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou (CFB)

Společným znakem těchto kotlů je přístup všech spalín z ohniště přes cyklony. V nich se odstředivou silou odloučí největší částice, které se potom znovu vrací do fluidního ohniště. Výhodou je delší pobyt částic ve spalovacím prostoru, který vede k lepšímu odsíření i vyhoření uhlíku (snížení ztráty mechanickým nedopalem). Tyto kotle se staví asi od výkonu 50 MW_t. Ve stavbě jsou kotle o maximálním výkonu 700 t/h.

U těchto kotlů neexistuje zřetelná hladina fluidní vrstvy, která expanduje do prostoru ohniště. V důsledku cirkulace přes sifony se většina pevných částic vrací zpět do ohniště. Uvádí se, že průměrně velká částice paliva cirkuluje 10-15x.

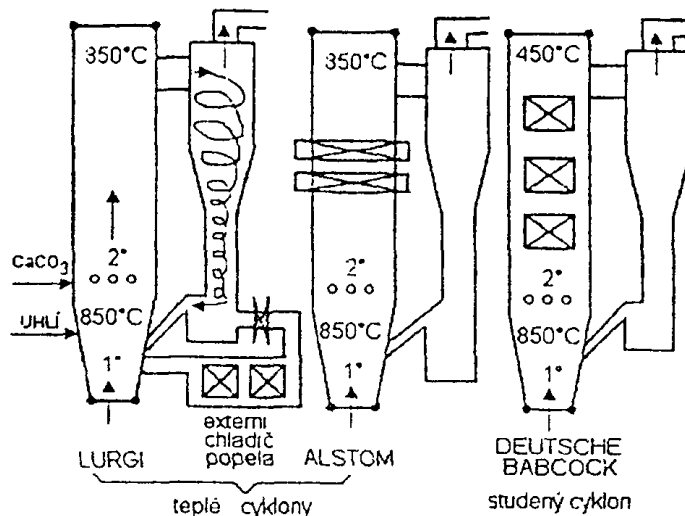
Schématu základních typů ACFB jsou v obr. 1-8.

obr. 1-8 Principiální typy kotlů s cirkulující fluidní vrstvou

Podle teploty spalín rozeznáváme kotle s teplým cyklonem (cca 850 °C) a studeným cyklonem (cca 450 °C). Kotle se v důsledku vychlazení spalín liší počtem výhřevných ploch v ohništi.

Kotle s teplým cyklonem mohou mít ještě externí chladič popela (typ Lurgi). Ten může propouštět část popela místo do ohniště do tohoto chladiče, v němž jsou umístěny plochy výparníku nebo přehříváku. Toto řešení umožňuje větší diversifikaci paliva (např. přechod z hnědého na černé uhlí je snadněji proveditelný při dodržení parametrů páry).

U fluidních kotlů se kromě běžných parametrů uvádí i stupeň odsíření. U kotlů s cirkulující fluidní vrstvou se poměr dávkovaného Ca ev. přepočteného na CaO nebo CaCO₃ ku obsahu síry v palivu



$$\left(\frac{Ca}{S'} \right)_{mol} = 1,5 - 2,2$$

Zvýšením dávkování CaCO₃ lze tedy zvýšit stupeň odsíření. Stupeň odsíření (účinnost odsíření) je definován vztahem

$$^{\circ}S = \frac{SO_{2(t)} - SO_{2(s)}}{SO_{2(t)}} = 90 - 95\%$$

kde SO_{2(t)} je teoretická koncentrace SO₂ vypočtená z obsahu spalitelné síry,

SO_{2(s)} je skutečně naměřená koncentrace SO₂ (mg/m³).

Praktické hodnoty °S u cirkulující fluidní vrstvy: 90 - 98%.