



Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne kotłów energetycznych

Modern power boiler construction designs

dr inż. Sławomir GRĄDZIEL



W KILKU SŁOWACH

Pierwszy na świecie blok energetyczny na parametry nadkrytyczne o mocy 460 MWe z kotłem z cyrkulującym złożem fluidalnym uruchomiono w Elektrowni Łagisza, kolejne bloki z tak nowoczesnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi to Elektrownia Pątnów II, największy blok Bełchatów II, a w najbliższym czasie planuje się następne tego typu inwestycje w Opolu, Kozienicach i Rybniku. W artykule omówiono konstrukcję i zasadę działania kotłów walczakowych z obiegiem wody naturalnym, wspomaganym i wymuszonym oraz kotłów bezwalczakowych z wodooddzielaczem, a także przepływowych.



SUMMARY

The world's first supercritical 460 MWe power block with a circulating fluidised-bed boiler was installed at the Łagisza power plant. Subsequent units based on similarly advanced designs are the Pątnów II power plant and the Bełchatów II block, which is also the largest of its kind. New projects are scheduled to be completed shortly in Opole, Kozienice, and Rybnik. The article discusses the design and operation of steam drum-type boilers with a natural, assisted, and forced water circulations, as well as no-drum boilers with a water separator and once-through boilers.

Jednym z warunków bezpiecznej pracy kotła jest zapewnienie wystarczającego chłodzenia rur parownika, czyli zapewnienie odpowiedniego przepływu czynnika w jego rurach. Przepływ ten może być wywołany poprzez:

- wykorzystanie naturalnego obiegu czynnika w zamkniętym konturze cyrkulacyjnym, powstałym w wyniku różnicy gęstości wody i mieszaniny parowo-wodnej;
- wykorzystanie pracy dodatkowo zainstalowanych pomp obiegowych (cyrkulacyjnych),

przy czym jeżeli udział wyporu pomp jest mały w stosunku do wyporu naturalnego, mamy do czynienia z obiegiem wspomaganym, natomiast jeżeli udział wyporu pomp zdecydowanie przeważa, to jest to obieg wymuszony;

- wykorzystanie pracy głównych pomp wody zasilającej do przetwarzania czynnika przez podgrzewacze, parownik i przegrzewacze pary-obieg przepływowy.

Uwzględniając powyższe rodzaje obiegów wody kotły energetyczne możemy podzielić w następujący sposób:

1. Walczakowe:
 - a) z obiegiem naturalnym,
 - b) z obiegiem wspomaganym,
 - c) z obiegiem wymuszonym
2. Bezwalczakowe:
 - a) z wodooddzielaczem,
 - b) przepływowe.

Kotły z naturalnym obiegiem wody

Zjawisko naturalnego obiegu czynnika powstaje w zamkniętym konturze cyrkulacyjnym, który jest utworzony w ogólnym przypadku z układów rur opadowych i wznoszących, połączonych ze sobą na górze walczakiem i na dole komorami zbiorczymi. Gęstość wody w rurach opadowych (części nieogrzewanej) jest większa od gęstości mieszaniny parowo-wodnej w rurach wznoszących (części ogrzewanej). Ta różnica gęstości, wynikająca z faktu tworzenia się pary w rurach wznoszących pod wpływem ciepła doprowadzonego z komory paleniskowej, wywołuje siłę wyporu naturalnego wymuszającą ruch płynu. Ruchowi temu towarzyszą straty ciśnienia wskutek oporów tarcia w rurach oraz oporów miejscowych, spowodowanych zmia-

nami kierunku przepływu oraz zainstalowaną w konturze cyrkulacyjnym armaturą. Natężenie przepływu wody w konturze cyrkulacyjnym jest znacznie większe od ilości produkowanej w nim pary. Stosunek tych dwu wielkości nazywany jest krotnością cyrkulacji obiegu wody:

$$k = \frac{G_w}{D}$$

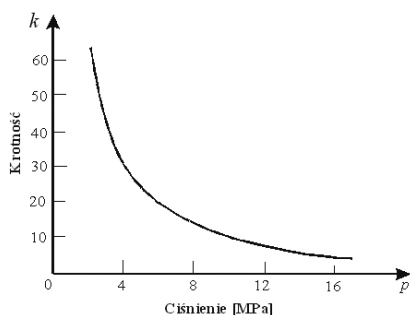
gdzie: G_w - strumień wody w konturze, kg/s; D - ilość produkowanej pary w konturze, kg/s.

Krotność obiegu określić można oddzielnie dla każdego konturu cyrkulacyjnego lub jako średnią dla całego kotła. Odwrotność krotności obiegu jest stopniem suchości pary opuszczającej kontur cyrkulacyjny:

$$x = \frac{1}{k}$$

Wzrost obciążenia cieplnego komory paleniskowej powoduje zwiększenie stopnia suchości pary x i tym samym wzrost prędkości. Ze wzrostem stopnia suchości x gęstość mieszaniny parowo-wodnej maleje i następuje pogorszenie warunków chłodzenia rur parownika. Zatem ze wzrostem obciążenia cieplnego może dojść do niebezpiecznego wrzenia błonowego. Dlatego dla kotłów z obiegiem naturalnym suchość pary x na wylocie z rur wznoszących nie może przekroczyć wartości 0.2. Zatem krotność cyrkulacji k nie może być mniejsza niż 5.

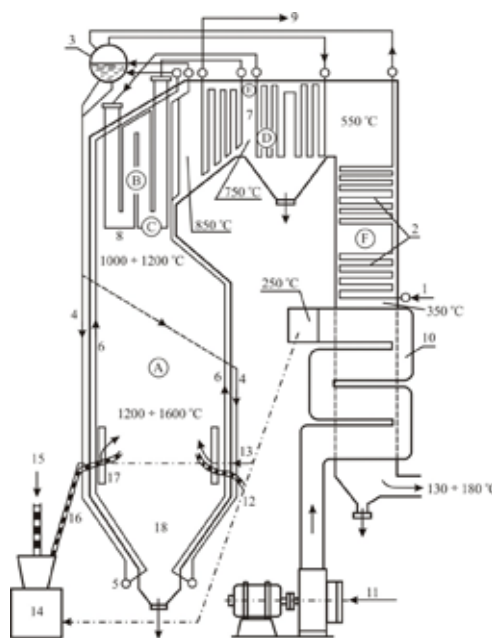
Na rysunku 1 jest przedstawiona zależność krotności cyrkulacji dla kotłów z obiegiem naturalnym w funkcji ciśnienia w parowniku [1-2].



Rys. 1. Krotność cyrkulacji k wody w kotle z obiegiem naturalnym w funkcji ciśnienia p .

Na rysunku 2 przedstawiono schemat opalanego pyłem węglowym kotła dwuciągowego z naturalnym obiegiem wody opalany pyłem węglowym [1]. Komora paleniskowa A, w której są umieszczone powierzchnie ogrzewalne (ekrany) przyjmujące ciepło na drodze promieniowania stanowi pierwszy ciąg kotła. Następ-

nie wyróżniamy komorę grodziową B, w której powierzchnie ogrzewalne przejmują ciepło również na drodze promieniowania. U góry komorę paleniskową zamyka najczęściej przewężenie, mające za zadanie wymieszanie spalin wychodzących z komory paleniskowej. W tym miejscu rury ekranu tylnego tworzą feston C. W przewale kotła D są umieszczone powierzchnie konwekcyjne. Górę kotła zamyka strop E. Drugi ciąg kotła tworzy kanał F, w której są zabudowane dalsze powierzchnie ogrzewalne: pozostałe przegrzewacze pary, podgrzewacze powietrza i wody.



Rys. 2. Schemat kotła dwuciągowego z naturalnym obiegiem wody [1]; A - komora paleniskowa, B - komora grodziowa, C - feston, D - przewal kotła, E - strop, F - drugi ciąg (kanał); 1-doprowadzenie wody zasilającej, 2-podgrzewacz wody, 3-walczak, 4-rury opadowe, 5-komory zbiorcze, 6-rury ekranowe, 8-przegrzewacz, 9-przegrzewacz, 10-doprowadzenie do turbiny, 11-podgrzewacz powietrza, 12-doprowadzenie powietrza do wentylatora, 13-powietrze pierwotne, 14-powietrze wtórne, 15-młyny, 16-doprowadzenie węgla, 17-doprowadzenie mieszanki pyłowo-powietrznej, 18-palniki, 19-lej żużlowy.

Pompa wody zasilającej tłoczy wodę 1 przez podgrzewacz wody 2 do walczaka 3. Następnie nieogrzewanymi rurami opadowymi 4 woda jest doprowadzana do komór zbiorczych 5. W komorach zbiorczych są umocowane rury ekranujące ściany komory paleniskowej. Górne końce rur ekranowych 6 są doprowadzone do komór zbiorczych górnych, które są przyłączone rurami przerzutowymi do walczaka 3. Woda napływająca od dołu z kolektora 5 do, ogrzewanych płomieniem i spalinami w komorze paleniskowej, rur ekranowych 6 przejmuje ciepło i powstają pierwsze pęcherzyki pary. W rurach tych mie-



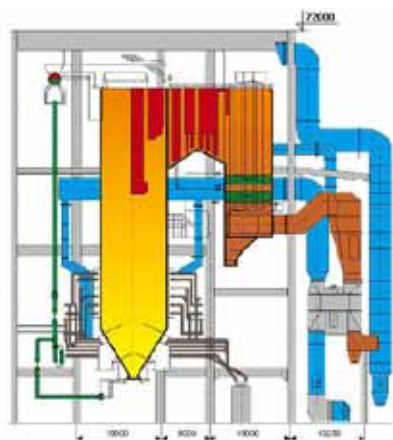


szanina parowo-wodna ma mniejszą gęstość niż woda w rurach opadowych bez pęcherzyków pary. Na wskutek różnicy gęstości między rurą opadową i rurami ekranowymi woda samoczynnie krąży. Rury wznoszące, opadowe, komory zbiorcze i walczak tworzą parownik, w którym powstaje para nasycona. Wytworzona para nasycona przepływa z walczaka do przegrzewaczy, składających się z komór i węzownic wykonanych z rur 7 i 8 i po przegrzaniu rurociągiem 9 jest odprowadzana do turbiny.

Za podgrzewaczem wody 2 jest umieszczony podgrzewacz powietrza 10, przez który wentylator powietrza tłoczy powietrze 11. Część powietrza 12 jest doprowadzana do młynów węglowych, jako powietrze pierwotne. Pozostała część powietrza jako powietrze wtórne 13 jest doprowadzana wraz z pyłem 16 do palników pyłu 17. Powstały ze spalania żużel i popiół opada do leja żużlowego 18 skąd jest odprowadzany na zewnątrz kotła.

Kotły z obiegiem wspomaganym

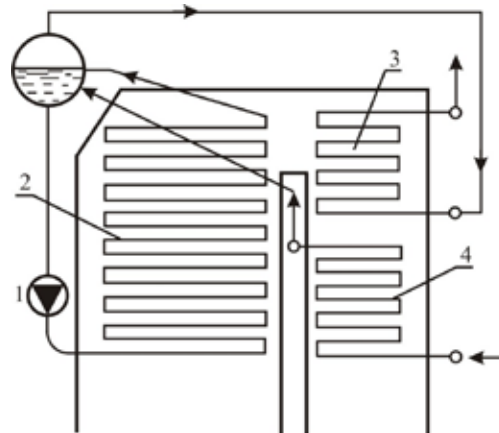
Kotły z naturalnym obiegiem wody mogą być budowane tylko do ciśnień w parowniku $p \leq 17$ MPa. Przy ciśnieniach wysokich, np. 20 MPa, aby przepływ mieszaniny parowo-wodnej mógł dostatecznie schładzać rury i żeby nie wystąpiło wrzenie błonowe, trzeba zastosować w parowniku obieg wspomagany poprzez włączenie pompy obiegowej. Przetłaczany przez pompę duży strumień masy zrywa błonę parową powstającą przy ścianie. Przykładem takiego kotła jest kocioł zainstalowany w Polsce (Enea Wytwarzanie SA - dawniej Elektrownia Kozienice) o wydajności 1650 Mg/h pary i mocy 500 MW (rys. 3).



Rys. 3. Schemat kotła z obiegiem wspomaganym AP-1650, o mocy 500 MWe, Enea Wytwarzanie SA (dawniej Elektrownia Kozienice). Parametry kotła: strumień pary świeżej – 1650 t/h, ciśnienie pary świeżej na wylocie – 17,2 MPa, temperatura pary – 540 °C. (materiały RAFAKO SA)

Kotły z obiegiem wymuszonym

Typowym przykładem kotła walczakowego z obiegiem wymuszonym wody jest kocioł La Monta (rys. 4) [1].



Rys. 4. Schemat kotła walczakowego z obiegiem wymuszonym La Monta; 1-pompa obiegowa, 2-parownik, 3-przegrzewacz pary, 4-podgrzewacz wody

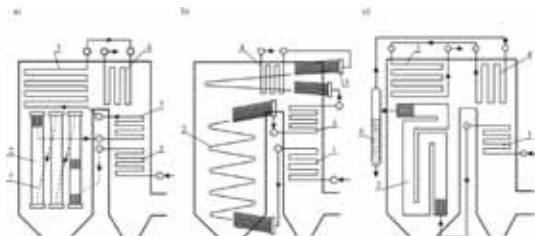
Pompa obiegowa 1 wymusza obieg wody w węzownicach parownika 2. Wymuszony obieg wody stwarza większą swobodę w ukształtowaniu powierzchni ogrzewalnej parownika, który w tego typu kotłach wykonana jest z reguły w postaci dużej liczby równoległych połączonych węzownic rozmieszczonych na ścianach komory paleniskowej. W zakresie ciśnień krytycznych, już dla niewielkich zmian ciśnienia, zmiany gęstości wody są tak duże, że warunki pracy pomp obiegowych są bardzo trudne i dlatego obieg z pompą cyrkulacyjną może być stosowany do ciśnień mniejszych niż 21 MPa.

Kotły bezwalczakowe

Przy wyższych parametrach ciśnienia w kotłach z obiegiem naturalnym przepływ czynnika jest niewystarczający aby zapewnić bezawaryjną pracę parownika. Można stosować pompę wspomagającą, która usuwa tę wadę, ale pozostaje element grubościenny, jakim jest walczak, który ogranicza szybkość rozruchu i zmian obciążenia bloku energetycznego na powstające w nim naprężenia cieplne. Te względy decydowały o rozwoju kotłów bezwalczakowych. Kotły te budowane są na ciśnieniu podkrytyczne i nadkrytyczne. W przypadku ciśnień nadkrytycznych w kotle nie ma parownika (ciepło parowania wynosi 0). Grupę kotłów bezwalczako-

wych obejmują czysto przepływowe kotły bez wodooddzielaczy systemu Bensona i Ramzina oraz kotły z wodooddzielaczami.

Kotły czysto przepływowe pracują na zasadzie jednokrotnego przepływu wody przez układ wodno-parowy kotła. Krotność obiegu dla tego typu kotłów wynosi $k=1$. Najbardziej rozpowszechnionymi konstrukcjami kotłów przepływowych możemy zaliczyć: Bensona, Sulzera, Ramzina (rys. 5) [1].



Rys. 5. Schematy kotłów przepływowych; a) Bensona, b) Sulzera, c) Ramzina; 1-podgrzewacz wody, 2-ekrany parownika, 3,4-przegrzewacz pary, 5-strefa przejściowa, 6-wodooddzielacz, 7-rury opadowe.

Kocioł Bensona był najbardziej rozpowszechnionym kotłem przepływowym. Cechą charakterystyczną jest pionowy układ opromieniowanych rur parownikach w postaci podzielonych na sekcje ekranów, przez które woda przepływa kolejno, zawsze od dolnej komory do komory górnej (rys. 5a). Doprowadzenie wody z komory górnej do komory dolnej następnej sekcji odbywa się rurami opadowymi 7. Z ostatniej sekcji rur para przechodzi do tak zwanej strefy przejściowej 5, umieszczonej w obszarze niższych temperatur spalin, gdzie następuje całkowite odparowanie i wydzielenie się soli.

Pionowe orurowanie komory paleniskowej prowadzi do prostego rozwiązania i przynosi korzyści konstrukcyjno-technologiczne. Do najważniejszych zalet układu z rurami pionowymi możemy zaliczyć [2]:

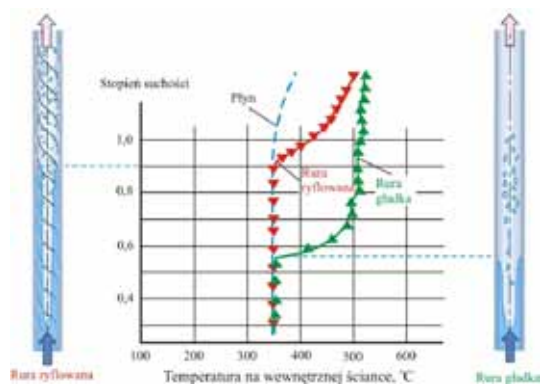
- niski koszt wykonania i montażu;
- możliwość pracy kotła z małym obciążeniem;
- zmniejszone zużycie i erozja ścian paleniska w wyniku wzdłużnego przepływu spalin w stosunku do rur;
- zmniejszony spadek ciśnienia w parowniku;
- możliwość zmniejszenia prędkości masowej koniecznej do zapewnienia bezpieczeństwa pracy ekranów z $(\rho w)=2000 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ do $(\rho w)=1000 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Rury pionowe rowkowane wewnątrz (ryflowane) stosuje się w celu zapobiegania kryzy-

sowi wrzenia, który prowadzi do przegrzania materiału rur i do awarii. Rury ryflowane umożliwiają pracę parownika przy mniejszych prędkościach masowych – ok. $(\rho w)=600 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ – niż rury gładkie, bez niebezpieczeństwa przegrzania materiału ścianki rur. Wymiana ciepła w czasie wrzenia w rurze ryflowanej jest dobra, gdyż dzięki siłom odśrodkowym występującym przy przepływie następuje odrzucanie kropelek wody do ścianki i intensywne jej chłodzenie. Porównując rury gładkie i rowkowane, rury rowkowane mają wiele zalet:

- odporność na wystąpienie kryzysu wrzenia, nawet przy wysokich wartościach parametrów pracy;
- dobra wymiana ciepła przy małej prędkości masowej;
- niewielki wzrost temperatury rur w przypadku wrzenia błonowego w pobliżu ciśnienia krytycznego.

Na rysunku 6 pokazano porównanie wewnętrznych temperatur rur dla rur gładkich i ryflowanych.



Rys. 6. Porównanie wewnętrznych temperatur rur w obszarze występowania kryzysu wrzenia dla rur gładkich i ryflowanych (ciśnienie 15 MPa, przepływ masowy $500 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, obciążenie cieplne $300 \text{ kW}/\text{m}^2$).

Kotły Ramzina charakteryzują się rurami prowadzonymi pod niewielkim kątem do poziomu i ułożonymi według linii śrubowej na obwodzie komory paleniskowej (rys. 5b). Końcowa faza odparowania odbywa się w strefie przejściowej 5.

Orurowanie spiralne umożliwia zmniejszenie liczby rur równoległe włączonych, tworzących gazoszczelne ściany komory paleniskowej, bez zwiększenia podziałki między rurami i może być stosowane we wszystkich kotłach przepływowych. W orurowaniu spiralnym rury tworzące ściany membranowe przechodzą przez cztery



ściany komory paleniskowej. Dzięki temu różnice długości poszczególnych rur zmniejszają się, a tym samym maleje zróżnicowanie strumienia ciepła przejmowanego przez poszczególne rury. W takim układzie otrzymujemy bardziej równomierny rozkład temperatury (rys. 7). Spiralny układ nie jest jednak samonośny i wymaga skomplikowanego zawieszenia. Ponadto rozmieszczenie spiralne rur nie nadaje się do kotłów fluidalnych, ponieważ pochyłe rury powodują zmiany kierunku opadających cząstek w obszarze przyściennej cyrkulacji wewnętrznej, a więc są przyczyną erozji.



Rys. 7. Temperatura czynnika na wylocie z rur spiralnych przy różnych obciążeniach kotła

Kocioł Sulzera charakteryzuje się przepływem bez komór pośrednich wstęgą równoległych rur w układzie meandrowym. W tego typu kotłach nie ma strefy przejściowej jest wodooddzielacz między parownikiem i przegrzewaczem (rys. 5c). Stopień suchości mieszaniny parowo-wodnej na wylocie z rur parownika $x=0,6-0,9$ (krotność cyrkulacji 1,7-1,1), więc objętość wodooddzielacza jest zdecydowanie mniejsza od objętości walczaka.

Kotły fluidalne

Proces fluidyzacji zachodzi, gdy przez materiał sypki o odpowiednim uziarnieniu znajdujący się w palenisku kotła przepływa pionowo do góry gaz z prędkością przekraczającą krytyczną prędkość fluidyzacji, powyżej której następuje unoszenie ziaren materiału sypkiego. Warunkiem koniecznym do wytworzenia stanu fluidyzacji jest, aby siły oporu podczas opływu cząstek przez gaz, równoważyły siłę ciężkości cząstki pomniejszoną o siłę wyporu. Spalanie węgla w paleniskach fluidalnych kotłów energetycznych zachodzi w warunkach intensywnego mieszania materiałów sypkich w strumieniu gazu fluidyzu-

jącego (powietrza). Zapewnia to bardzo dobre warunki wymiany ciepła, masy i pędu, co przyczynia się do wyrównania temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej oraz utrzymania jej na poziomie optymalnym dla procesu suchego odsiarczenia spalin ($840 \div 860$ °C). Niższa temperatura spalania limitowana temperaturą mięknięcia popiołu oraz stopniowanie powietrza skutecznie wpływają na ograniczenie emisji tlenków azotu NO_x [2].

Kotły fluidalne, ze względu na prędkość przepływającego czynnika oraz ciśnienie w komorze paleniskowej, możemy podzielić na:

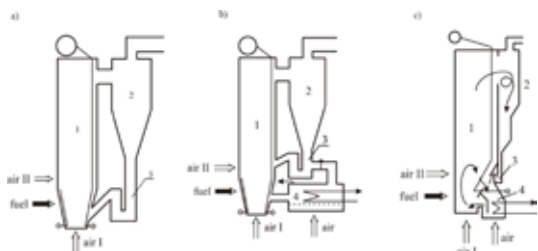
- kotły fluidalne z atmosferycznym złożem stacjonarnym (AFBC-Atmosferic Fluidized Bed Combustion),
- kotły fluidalne z ciśnieniowym złożem stacjonarnym (PFBC-Pressurized Fluidized Bed Combustion),
- kotły fluidalne ze złożem cyrkulującym (CFBC-Circulating Fluidized Bed Combustion),
- kotły fluidalne z ciśnieniowym złożem cyrkulującym (PCFBC- Pressurized Circulating Fluidized Bed Combustion).

W nowoczesnych elektrowniach buduje się bloki o wysokich sprawnościach w połączeniu z wymogami ochrony środowiska naturalnego w zakresie redukcji zużycia paliwa, jakości produkowanego popiołu i emitowanych zanieczyszczeń. Zastosowanie kotłów fluidalnych sprzyja ograniczeniu toksycznych składników emitowanych ze spalania węgla. Największe zastosowanie w energetyce spośród kotłów fluidalnych znalazły jak dotąd kotły z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym CFB. Kotły te od prawie trzydziestu lat stosowane są z powodzeniem w światowej energetyce. Technologia fluidalna stała się w produkcji energii elektrycznej wyzwaniem dla konwencjonalnych kotłów pyłowych, jak również dla kotłów pyłowych na nadkrytyczne parametry pary. Technologia fluidalnego spalania cały czas zmierza do zwiększania gabarytów jednostek kotłowych, czego przykładem jest oddany w Polsce do eksploatacji największy obecnie na świecie kocioł fluidalny CFB w Elektrowni Łagisza.

Kotły CFB różnią się między sobą głównie sposobem organizacji cyrkulacji - dotyczy to przede wszystkim budowy i usytuowania separatora, układu nawrotu popiołu oraz rozmiesz-



czenia powierzchni ogrzewalnych. Na rysunku 8 pokazano schematy kotłów CFB.



Rys. 8. Schematy kotłów CFB; a) Ahlstrom Power; b) Lurgi; c) Compact; 1 - komora paleniskowa, 2 - separator, 3 - zamknięcie syfonowe, 4 - wymiennik ciepła

W najprostszym rozwiązaniu Ahlstrom Pyropower (rys. 8a) materiał sypki jest odprowadzany z separatora (cyklonu gorącego bądź chłodzonego) rurą opadową poprzez syfon do komory paleniskowej. Powierzchnie wymiany ciepła są zintegrowane z komorą paleniskową i ciągiem konwekcyjnym.

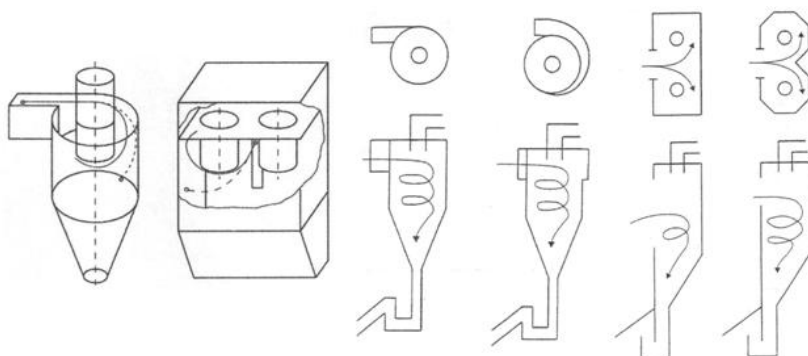
W układzie Lurgi (rys. 8b) część materiału złoża może przepływać przez dodatkowe powierzchnie zewnętrznego wymiennika ciepła (np. włączonego w układ przegrzewu), co ogranicza liczbę powierzchni ogrzewalnych umieszczonych w samym kotle i ułatwia regulację obciążenia.

Podobnie jest w przypadku kotła Compact (rys. 8c) z separatorem wewnętrznym, z tym że wymiennik ciepła jest bezpośrednio zintegrowany z komorą paleniskową, co jeszcze bardziej zwiększa możliwości regulacyjne kotła.

Jednym z najważniejszych urządzeń w kotłach fluidalnych jest separator. Odgrywa on dominującą rolę w kształtowaniu profilu temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej. Wyrównany profil temperatury może być ponadto w kotle fluidalnym efektywniejszym sposobem redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych, niż stopniowanie powietrza i paliwa. Im bardziej niejednorodny rozkład temperatury, tym wyższa emisja zanieczyszczeń.

W Polsce stosowane są głównie cyklony i separatory typu Compact. Zasadniczym elementem separatora jest nurnik w kształcie walca. Jego zadaniem jest generowanie wewnętrznego wiru i odprowadzenie odpylonego gazu na zewnątrz. Odchodzi się od stosowania gorących cyklonów z ciężkim obmurzem (np. w Elektrowni Siersza). Stosuje się przeważnie separatory o lżejszej konstrukcji chłodzone wodą lub parą,

co skraca czas rozruchu, daje możliwość szybszych zmian obciążenia z powodu cieńszej wymurówki i zapewnia mniejsze straty ciepła.



Rys. 9. Główne typy separatorów w kotłach CFB: a) i b) cyklony z wlotem stycznym i spiralnym, c) separator typu Compact (przekrój prostokątny), d) modyfikacja separatora Compact.

Kotły na parametry nadkrytyczne

Wzrost cen paliw oraz regulacje prawne mające na celu ochronę środowiska naturalnego, wymusiły na firmach produkujących energię elektryczną i dostawcach technologii dla elektrowni poprawę efektywności wykorzystania energii chemicznej paliw kopalnych. Rozwijane jest to na różne sposoby. Jednym z nich jest budowa wysokosprawnych bloków energetycznych, w których głównym elementem jest kocioł parowy przepływowy o nadkrytycznych lub ultranadkrytycznych parametrach pary [2-6]. Wzrost sprawności bloków energetycznych można osiągnąć stosując wysokie parametry pary, wysokosprawną turbinę, niskie ciśnienie w kondensatorze oraz podwójny lub potrójny międzystopniowy przegrzew pary. W dotychczasowych rozwiązaniach stosuje się temperaturę pary świeżej 560-610°C, a jej ciśnienie 26-30 MPa. W 1954 roku został uruchomiony pierwszy kocioł przepływowy o parametrach nadkrytycznych pary w technologii Bensona ($t=605^{\circ}\text{C}$, $p=30\text{ MPa}$). W chwili obecnej na świecie pracuje ponad dwieście bloków o nadkrytycznych parametrach pary. Największe z nich mają moce zainstalowane 1300 MW i parametry pary świeżej $t=600^{\circ}\text{C}$, $p=35\text{ MPa}$.

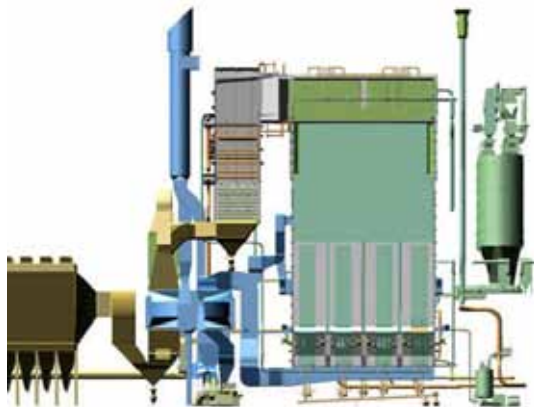
Kotły parowe o parametrach nadkrytycznych projektuje się jako kotły przepływowe typu Bensona. Kotły te mogą być budowane w układzie dwuciągowym lub w układzie jednociągowym (wieżowe). Ściany komory paleniskowej mogą być wykonane z rur w układzie pionowym lub





w układzie skośnym (spiralne). Dzięki spiralnemu położeniu rur na ścianach komory paleniskowej, każda rura przechodzi przez cztery ściany co znacznie zmniejsza różnice w długości poszczególnych rur i ilość przejmowanego ciepła. Układ taki zapewnia wyrównanie różnic temperatury czynnika na wyjściu ze ścian nawet przy dużych różnicach w ilości przejmowanego ciepła przez poszczególne ściany.

W Polsce w Elektrowni Łągisza został uruchomiony pierwszy na świecie blok na parametry nadkrytyczne o mocy 460 MW z kotłem z cyrkulującym złożem fluidalnym (CFB) (rys. 10). Główne parametry kotła są następujące: wydajność masowa pary 1345 Mg/h, ciśnienie pary świeżej $p=27.5$ MPa, temperatura pary świeżej 560 °C, ciśnienie pary wtórnie przegrzanej 5.48 MPa, temperatura pary wtórnie przegrzanej 580 °C.



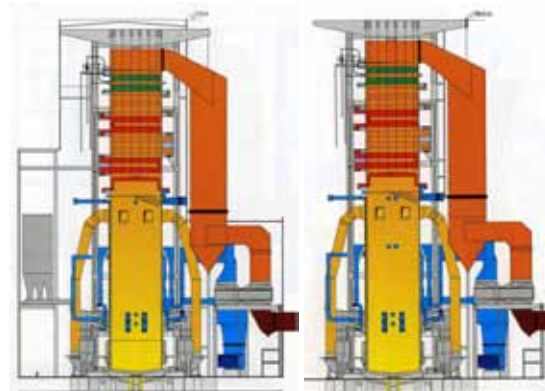
Rys. 10. Przekrój kotła na parametry nadkrytyczne pary o mocy 460 MWe w Elektrowni Łągisza [2]

W kotle CFB w Elektrowni Łągisza dobrano odpowiednią prędkość masową w pionowych gładkich rurach parownika, tak aby zapewnić wystarczające chłodzenie. W zależności od obciążenia cieplnego, przepływ masy wynosi (wp) = 550÷700 kg/m²s. Jedyne, w przypadku powierzchni flagowych (skrzydłowych, wing walls), odchodzących od rusztu w środkowej części paleniska, zastosowano rury wewnętrznie ryflowane, ponieważ w obszarze tym występują najwyższe temperatury złoża - ponad 900 °C i największe ryzyko zaniku chłodzenia.

W 2008 roku w Elektrowni Pątnów II oddano do użytku kocioł BB-1345 opalany węglem brunatnym na nadkrytyczne parametry pary o mocy 460 MWe (rys. 11a). Kocioł ma konstrukcję wieżową o wysokości 105 m. Parownik pracuje w systemie przepływowym Bensona i zastosowano w komorze paleniskowej uru-

wanie spiralne. Podstawowe parametry kotła: temperatura pary świeżej 544 °C, ciśnienie pary świeżej 26,6 MPa, temperatura pary wtórnej 568 °C, ciśnienie pary wtórnej 5,17 MPa, temperatura wody zasilającej 273 °C

Największym kotłem, który zasila największy w Polsce blok energetyczny o mocy 858 MWe jest kocioł BB-2400 w Elektrowni Bełchatów II (rys. 11b). Kocioł ten jest kotłem przepływowym na parametry nadkrytyczne pary opalany węglem brunatnym. Parametry kotła: temperatura pary świeżej 554 °C, ciśnienie pary świeżej 26,6 MPa, temperatura pary wtórnej 582 °C, ciśnienie pary wtórnej 5,4 MPa, temperatura wody zasilającej 276 °C.



Rys. 11. Schematy kotłów na parametry nadkrytyczne pary: a) kocioł BB-1345 Elektrownia Pątnów II; b) kocioł BB-2400 Elektrownia Bełchatów II (materiały RAFAKO SA)

Przy obecnych parametrach pary świeżej stosowanych w elektrowniach kondensacyjnych (ciśnienie 30 MPa i temperatura 630 °C) oraz przy wykorzystaniu stali najnowszej generacji, obiegi cieplne mogą uzyskać sprawność 47,5 %. Dalszy wzrost sprawności do 55 % wymaga pokonania trudnej bariery materiałowej. Podjęto pracę nad opracowaniem nowych stopów umożliwiających osiągnięcie parametrów pary: $p=35-37,5$ MPa i $t=700-720$ °C [2]. Te nowe materiały są kilkakrotnie droższe od aktualnie używanych w budowie powierzchni ogrzewalnych kotłów i z tego powodu termin ich wykorzystania będzie uzależniony od rachunku ekonomicznego.

W Polsce planowana jest budowa czterech bloków na parametry nadkrytyczne pary:

- Elektrownia Opole – dwa bloki (2×900 MWe)
- Enea Wytwarzanie SA (dawniej Elektrownia Kozienice) – jeden blok do 1000 MWe;
- Elektrownia Rybnik – jeden blok 900 MWe.

Literatura

- [1]Pawlik M., Strzelczyk F. (2009) Elektrownie. WNT Warszawa.
- [2]Taler J. red. (2011) Procesy cieplne i przepływowe w dużych kotłach energetycznych. Modelowanie i monitoring. PWN Warszawa.
- [3]Franke J., Kral R. (2001) Benson Boiler. Best Choice. Siemens Power Journal. pp. 1-4.
- [4]Franke J., Cossmann R., Huschauer H. (1993) Benson Steam Generator with Vertically-Tubed Furnace. Large-Scale Test under Operating Conditions Demonstrates Safe Design. VGB Kraftwerkstechnik 73 Vol.4, pp.353-359.
- [5]Franke J., Köhler W., Wittchow E. (1995) Evaporator Designs for Benson Boilers. State of the Art and Latest Development Trends. VGB Kraftwerkstechnik 73 No 4.
- [6]Sobota T. (2010) Kotły na parametry nadkrytyczne. Zagadnienia projektowania i eksploatacji kotłów i turbin do nadkrytycznych bloków węglowych. red. Kosman G., Rusin A., Taler J., Pawlik M. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.