

Janusz BADUR
Jacek TOPOLSKI

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk

OPTYMALNA KROTNOŚĆ RECYRKULACJI W PALENISKU Z ATMOSFERYCZNYM ZŁOŻEM FLUIDALNYM

Streszczenie. Zaletą kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną jest elastyczność paliwowa oraz mała uciążliwość dla środowiska. Ta ostatnia jest ściśle związana z warunkami w jakich odbywa się spalanie i wymaga rygorystycznego przestrzegania gradientu temperatur i wartości temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej. Optymalna wartość temperatury wynosi 850°C. Regulacja tej temperatury odbywa się przede wszystkim poprzez zmiany strumienia masy materiału sypkiego recykulowanego do dolnej części komory paleniskowej.

W pracy proponuje się model matematyczny przystosowany do obliczeń kotłów fluidalnych z atmosferycznym złożem cyrkulacyjnym zaimplementowany do własnego kodu COM-GAS. Wykorzystując przygotowany program przeprowadzono obliczenia kotła CFB670 produkcji Foster Wheeler. Otrzymane wyniki porównano z danymi producenta. Przeprowadzono dodatkowe obliczenia komory paleniskowej pozwalające na określenie krotności recykulacji dla trzech paliw o różnej wartości opałowej.

OPTIMAL RECIRCULATION RATIO IN FLUIDIZED BED BOILER FURNACE

Summary. In the paper the mathematical model for calculations of boilers with atmospheric circulating fluidized bed is proposed. With the use of COM-GAS code developed by the authors the calculations of Foster Wheeler CFB670 boiler were carried out. Obtained results were compared to those published by boiler manufacturer. Additional calculations concerning recirculation ratio for firing of fuels with three different heating values were performed.

Dr hab. inż. Janusz BADUR jest kierownikiem Zakładu Przepływów z Reakcjami Chemicznymi, a dr inż. Jacek TOPOLSKI jest st. asystentem w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk, ul. Fiszer 14.

OPTIMALE FESTSTOFFUMLAUFAZHL IN DER ZWS- FEUERUNG

Zusammenfassung. Vorteil der ZWS- Dampferzeuger ist die Möglichkeit verschiedenartige Brennstoffe bei geringer Umweltbelastung zu verfeuern. Diese ist eng mit den Verbrennungsbedingungen und besonders mit der Sicherung richtiger Temperaturverteilung in der Brennkammer verbunden. Optimaler Wert der Wirbelschichttemperatur beträgt 850°C und ist vor allem durch Änderungen des, in den unteren Teil der Feuerung rezirkulierten, Feststoffmassenstroms erhalten. Die Arbeit schlägt vor ein angepasstes zu den Berechnungen von ZWS- Kessel mathematisches Modell. Das Programm wurde für die Berechnungen des Kessels CFB 670 von Foster Wheeler benutzt. Die Berechnungsergebnisse wurden mit den Herstellerdaten verglichen. Zusätzliche Feuerungsberechnungen wurden durchgeführt um die Feststoffumlaufzahl für drei Brennstoffe mit verschiedenem Heizwert zu bestimmen.

1. Budowa kotła i warunki pracy

Coraz większy nacisk na ochronę środowiska w Polsce zaowocował wdrożeniem technik spalania fluidalnego do polskiej energetyki. Pracuje coraz więcej jednostek tego typu, a większość podpisywanych kontraktów przewiduje budowę właśnie tego typu kotłów [1÷8].

Przyczyną takiego stanu rzeczy są korzyści płynące z zastosowania kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną. Oferują one [9]:

- możliwość spalania różnorodnych pod względem składu i jakości paliw, które w większości nie mogą być spalane w tradycyjnych kotłach pyłowych i rusztowych,
- możliwość dokonywania szybkich zmian obciążenia kotła w szerokich granicach.

Specyfika fluidyzacji cyrkulacyjnej zapewnia doskonałe warunki mieszania poprawiając jednocześnie wymianę ciepła i zmniejszając gradient temperatur wewnątrz komory paleniskowej. Ten sposób spalania pozwala na utrzymywanie temperatury wewnątrz komory paleniskowej na stałym poziomie 850°C. Utrzymywanie tej właśnie temperatury pozwala na minimalizację ilości produkowanych związków azotu, siarki i tlenku węgla.

Głównym parametrem decydującym o utrzymaniu w komorze paleniskowej wyrównanego profilu temperatury wzdłuż wysokości komory jest zapewnienie odpowiedniego strumienia materiału inertnego cyrkulującego w układzie: komora paleniskowa, cyklon, układ nawrotu, komora paleniskowa.

Wielkością określającą strumień masy materiału inertnego jest krotność recyrkulacji KR definiowana w następujący sposób [3, 4]:

$$KR = \frac{\dot{m}_{\text{iner}}}{\dot{m}_{\text{pal}}} \quad (1)$$

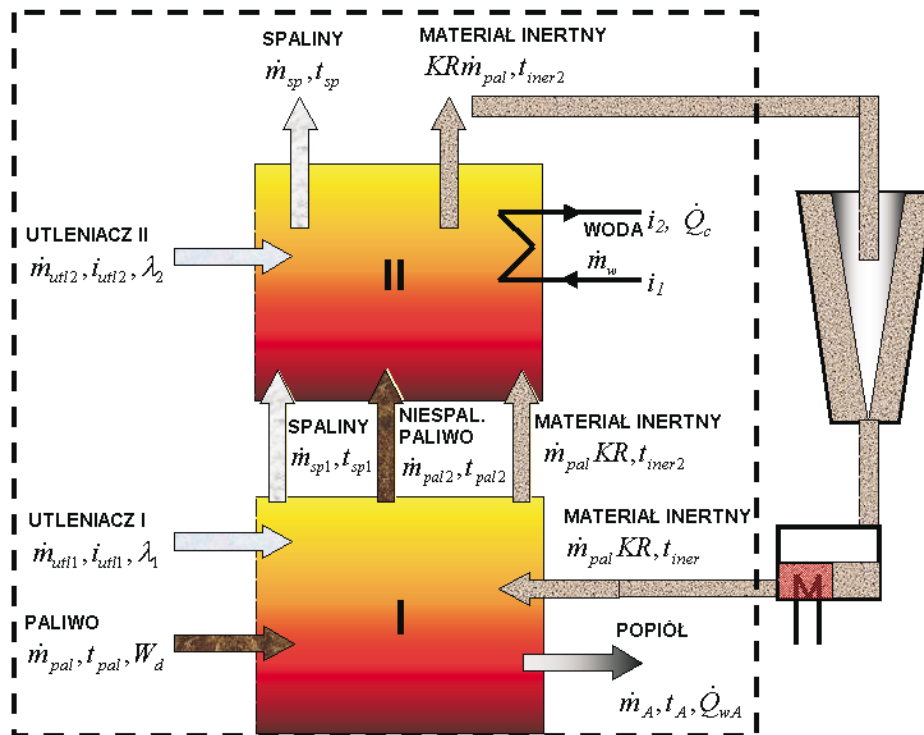
gdzie:

- $\dot{m}_{\text{iner}}$ – strumień masy recyrkulowanego materiału sypkiego,
- $\dot{m}_{\text{pal}}$ – strumień masy paliwa doprowadzanego do komory spalania.

Parametrem oceniającym profil temperatur wewnątrz komory paleniskowej może być stosunek temperatur panujących za dolną częścią komory i na wylocie z komory. Wynikiem idealnym jest stosunek $\varepsilon = \frac{t_{\text{sp2}}}{t_{\text{sp1}}} = 1$, ponieważ

wtedy temperatury te są równe sobie i osiągają założone 850°C. Zmiany temperatur w funkcji krotności są niewielkie, dlatego często stosunek temperatur zastępuje się stosunkiem entalpii materiału inertnego [10]:

$$\varepsilon = \frac{i_{\text{iner2}}(t_{\text{sp2}})}{i_{\text{iner1}}(t_{\text{sp1}})} = 1 \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat bilansowy paleniska fluidalnego

gdzie:

- $i_{\text{iner}2}(t_{\text{sp}2})$ – entalpia materiału sypkiego na wylocie z komory paleniskowej,
- $i_{\text{iner}1}(t_{\text{sp}1})$ – entalpia materiału sypkiego na wylocie z dolnej części komory paleniskowej.

Nie można tutaj stosować entalpii spalin, ponieważ składy spalin za dolną częścią komory paleniskowej i na wylocie z komory paleniskowej są różne.

Do określenia odpowiednich wielkości strumieni masy materiału sypkiego niezbędnych przy spalaniu węgla o różnych wartościach opałowych posłużono się programem COM-GAS [13,11], wykorzystując algorytm oparty na schemacie przedstawionym na rys. 1.

Z ogólnego schematu podstawowego kotła wydzielono dwa elementy oznaczone jako I i II.

Przedstawiają one odpowiednio:

- I wyizolowaną dolną część komory paleniskowej z dystrybutorem powietrza pierwotnego $\dot{m}_{\text{ut}/1}$ oraz doprowadzeniem paliwa $\dot{m}_{\text{pal}}$ i materiału recyrkulowanego (inertnego) $KR\dot{m}_{\text{pal}}$ oraz odprowadzeniem popiołu $\dot{m}_A$,
- II górną część komory paleniskowej z rozmieszczonymi elementami powierzchni ogrzewalnej parownika i dystrybutorem powietrza wtórnego $\dot{m}_{\text{ut}/2}$.

Analizę poprawości powyższego algorytmu obliczeniowego zawiera praca [13].

2. Atmosferyczny kocioł fluidalny ze złożem cyrkulacyjnym CFB-670 Foster Wheeler

Kocioł tego typu jest zbudowany z trzech głównych bloków funkcjonalnych:

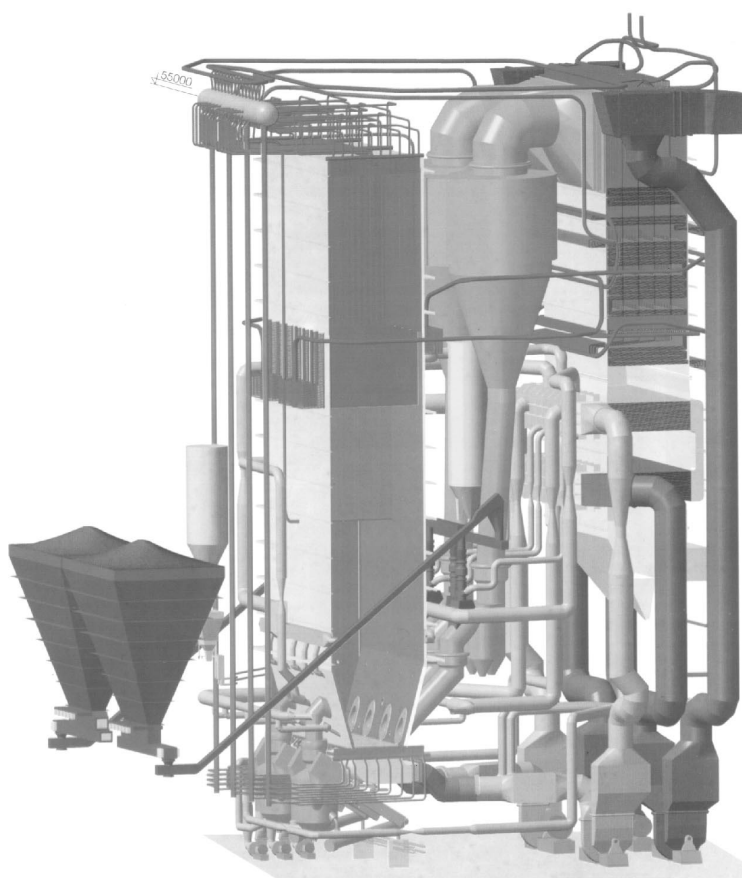
- komory paleniskowej wykonanej ze ścian membranowych w obiegu parownika z lejem zamkniętym od dołu dnem dyszowym, przez które doprowadzane jest powietrze fluidyzacyjne (pierwotne),
- kanału nawrotnego wraz z cyklonami,
- ciągu konwekcyjnego wykonanego ze ścian membranowych w układzie przegrzewacza pary, w którym rozmieszczono pęczki konwekcyjne przegrzewaczy pary, podgrzewacza wody oraz podgrzewacz powietrza.

Kocioł CFB-670 pracuje w Elektrowni Turów od roku 1998.

Główne dane techniczne kotła CFB – 670 [12]

Wydajność maksymalna trwała	670 t/h
Ciśnienie pary pierwotnej za kotłem	131,7 bar
Temperatura pary pierwotnej za kotłem	540°C
Temperatura nasycenia	343°C

Temperatura wody zasilającej przy maksymalnej trwałej wydajności kotła	243°C
Ilość pary międzystopniowej przy maksymalnej trwałej wydajności kotła	580 t/h
Ciśnienie pary międzystopniowej na wlocie do przegrzewacza	27,66 bar
Ciśnienie pary międzystopniowej na wylocie z przegrzewacza	24,5 bar
Temperatura pary międzystopniowej:	
– na wlocie do przegrzewacza	313°C
– na wylocie z przegrzewacza	540°C
Sposób regulacji temperatury pary przegrzanej:	regulacja wtryskowa
Temperatura spalin za kotłem	140°C
Sprawność kotła gwarantowana	>90 %
Sylwetkę kotła tego typu przedstawiono na rys. 2.	



Rys. 2. Sylwetka kotła fluidalnego ze złożem cyrkulacyjnym

3. Założenia przyjęte do obliczeń

Przygotowując model ułożenia powierzchni ogrzewalnych do obliczeń poczyniono następujące uproszczenia:

- założono, że cały strumień wody zasilającej ulega przemianie fazowej w komorze paleniskowej;
- założono, że para nie wymaga regulacji parametrów za pomocą wtrysków wody schładzającej.

Uproszczenia te wprowadzono ze względu na czasochłonność wprowadzenia tych elementów na obecnym etapie prac^{*)}.

Wszystkie powierzchnie ogrzewalne w programie przedstawia się w jednym ciągu. Nie ma to znaczenia dla obliczeń, ponieważ są to obliczenia zero-wymiarowe. Oczywiście można by pokusić się o taką manipulację graficzną elementami, aby mogły one tworzyć układy wielociągowe, jednak na tym etapie poprawiłoby to jedynie efekt wizualny.

Do obliczeń całości wykorzystano schemat przygotowany wcześniej dla kotłów utylizacyjnych [13], natomiast zmieniła się rola parownika. W tym przypadku parownik nie jest już jedynie elementem odbierającym ciepło od gorących spalin, ale został zintegrowany z komorą paleniskową, w której zachodzą wszystkie procesy związane z uwalnianiem energii chemicznej wnoszonej ze strumieniem węgla oraz z wymianą ciepła związaną z recyrkulacją materiału inertnego. Dodatkowo wprowadzono model cyklonu separującego materiał inertny od spalin, oraz zmodernizowano modele pozostałych powierzchni ogrzewalnych oraz elementów rozdzielczych i łączących spaliny umożliwiając im odbiór ciepła od mieszaniny spalin i materiału inertnego.

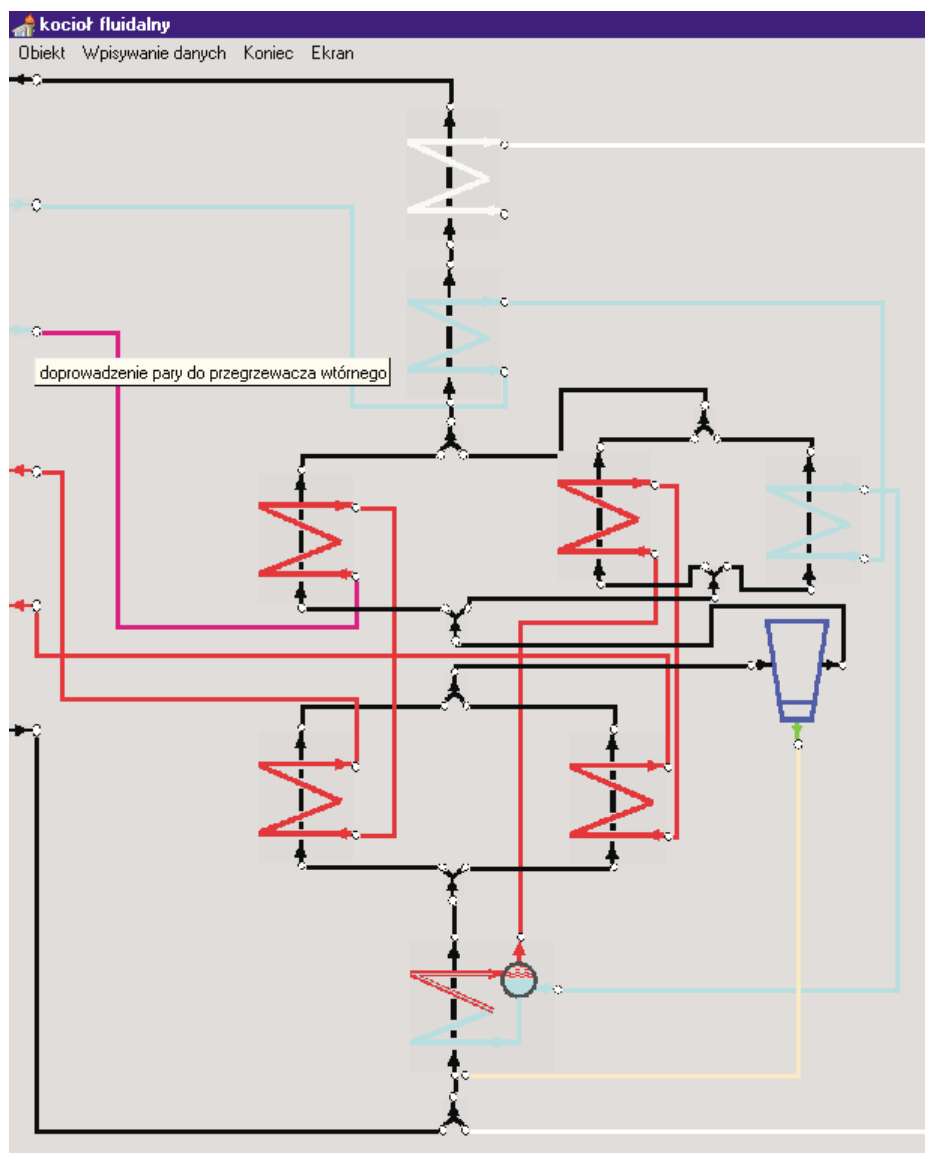
Dokładny algorytm obliczeń związanych ze spalaniem węgla o dowolnym składzie w złożu zaprezentowano w pracy [13].

Zamodelowane w programie COM-GAS wnętrze kotła CFB-670 przedstawiono na rys. 3. Rozłożenie powierzchni ogrzewalnych wewnątrz kotła jest hipotetyczne, ponieważ nie udało się uzyskać informacji o zabudowanych powierzchniach ogrzewalnych oraz o przepływie czynnika przez te powierzchnie.

Cyklon jest tutaj aparatem oddzielającym komorę spalania od drugiego ciągu kotła, przez który przepływają już tylko spaliny z pozostałościami materiału sypkiego. Ilość pozostającego materiału sypkiego zależy od sprawności separacyjnej cyklonu.

^{*)} Model obliczeniowy wtrysku wody w celach regulacyjnych został już wprowadzony do programu i użyty przy modelowaniu układu kombinowanego pracującego w Elektrociepłowni Nowa Sarzyna [14], jednak nie został wprowadzony do wnętrza kotła.

Jako dane przyjęte do obliczeń zadano parametry zgodne z danymi technicznymi kotła zaprezentowanymi w punkcie 2 za wyjątkiem temperatury spalin na wylocie z kotła, która jest wielkością wynikową. Jako paliwo zadano węgiel brunatny o następującym składzie masowym [12]: C – 23,92%, H₂ – 1,94%, H₂O – 44%, S – 0,6%, popiół – 22,5%, O₂ – 7,04%.



Rys. 3. Wnętrze kotła fluidalnego zamodelowane w programie COM-GAS

Ciepło właściwe materiału sypkiego wyznaczano z wzoru:

$$c_{\text{iner}} = 0,0767 \log_{10}(t_{\text{iner}}) + 0,4329 \quad (3)$$

określonego na podstawie własności krzemu.

4. Omówienie wyników

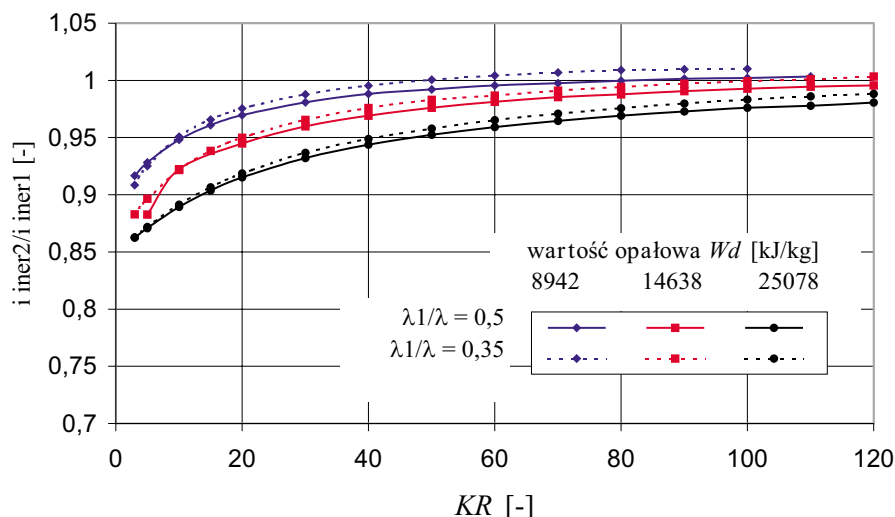
Otrzymane wyniki obliczeń kotła fluidalnego postanowiono przedstawić w tablicy 1 porównując je bezpośrednio z parametrami prezentowanymi w literaturze [12].

Tablica 1

Prezentacja i porównanie wyników obliczeń z parametrami pracy prezentowanymi w literaturze.

Parametr	Jednostka	Wg literatury [12]	Wg własnego programu COM-GAS
PALIWO			
Wartość opałowa	MJ/kg	7,83	8,369
Zużycie paliwa	kg/s	71,81	68,24
KOMORA PALENISKOWA			
Temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej	°C	–	850
Współczynnik nadmiaru powietrza	–	–	1,19
Krotność recyrkulacji	–	–	54
Zużycie addytywu	kg/s	3,9	–
Popiół denny	kg/s	6,9	4,62
Popiół lotny	kg/s	11,31	10,74
SPALINY			
Temperatura spalin na wylocie z kotła	°C	140	170
Zawartość tlenu w spalinach	%	4	2,7
Sprawność separacyjna cyklonu	%	–	95
Wydajność cieplna kotła	MW	530	530
Sprawność kotła	%	94,3	92,8

Przeprowadzenie serii obliczeń tego kotła w różnych warunkach pracy pozwoliły na wygenerowanie rys. 4 przedstawiającego zależność ilorazu entalpii materiału inertnego w górnej i dolnej części komory paleniskowej od krotności recyrkulacji KR.



Rys. 4. Zależność ilorazu entalpii materiału inertnego w górnej i dolnej części komory paleniskowej od krotności recyrkulacji. Obliczenia wykonano dla dwóch stosunków nadmiaru powietrza $\lambda_1/\lambda = 0,5$ i $0,35$ oraz dla trzech rodzajów paliwa

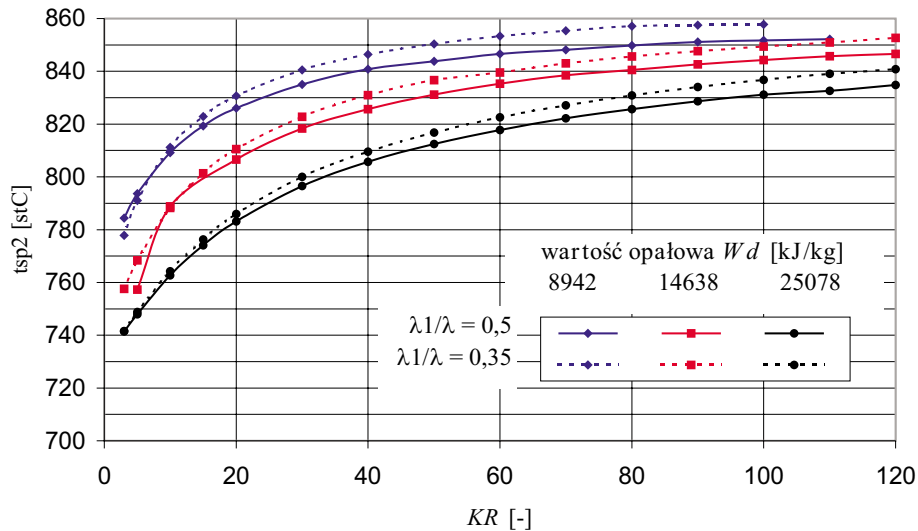
Osiągnięcie wartości „1” oznacza, że temperatura materiału sypkiego jest taka sama na wylocie z górnej części komory paleniskowej jak na wylocie z dolnej części. Wykonując obliczenia założono, że temperatura na wylocie z dolnej części komory paleniskowej będzie zawsze wynosić 850°C , ilość doprowadzanego powietrza oraz strumień energii oddawanej w górnej części komory paleniskowej także były stałe.

Przebieg zależności przedstawiony na rys. 4 wskazuje, że ze wzrostem wartości opałowej paliwa zwiększa się stopień nierównomierności rozkładu temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej. Na podstawie powyższego rysunku można stwierdzić, że niezbędna krotność recyrkulacji KR jest zależna od jakości paliwa i dla najczęściej spotykanych paliw w energetyce powinna mieścić się w zakresie $KR = 40(\text{węgiel brunatny}) \div 80(\text{węgiel kamienny})$.

Stosunek λ_1/λ mówi nam o podziale strumienia powietrza na ten doprowadzany do dolnej części komory paleniskowej i resztę doprowadzaną wyżej. Ma to ścisły związek z ilością paliwa jaką można spalić w dolnej części komory, a więc także z ilością energii jaką możemy dostarczyć materiałowi sypkiemu. Obniżenie tego stosunku z $\lambda_1/\lambda = 0,5$ do $\lambda_1/\lambda = 0,35$ powoduje konieczność do-

przewodzenia większej ilości paliwa do całej komory paleniskowej aby materiał sypki mógł osiągnąć temperaturę 850°C. Dzięki takiemu zabiegowi rośnie także strumień energii doprowadzany do górnej części komory paleniskowej, co pozwala na uzyskanie wyższej temperatury na wylocie z komory.

Na rys. 5 przedstawiono zależność temperatury na wylocie z komory paleniskowej od krotności.



Rys. 5. Zależność temperatury na wylocie z komory paleniskowej od krotności recyrkulacji

Literatura

- [1] Badyda K.: Badanie własności dynamicznych układu parowo–gazowego z ciśnieniowym kotłem fluidalnym, Rozpr. Doktorska, Pol. Warszawska, 1991.
- [2] Badyda K., Lewandowski J., Miller A., Szczap J.: Model matematyczny dynamiki układu parowo–gazowego z ciśnieniowym kotłem fluidalnym, Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej, s. Mechanika, z. 99, 1990.
- [3] Bis Z.: Aktualne problemy analizy i modelowania układów z binarną cyrkulacyjną warstwą fluidalną, Materiały Jubileuszowej Konferencji Kotłowej '99 Z okazji 50–lecia Fabryki Kotłów RAFAKO w Raciborzu. Przemysł Kotłowy u Progu XXI wieku, str. 43–73
- [4] Gajewski W., Bis Z., Zajdej J.: Problemy bilansowania cieplnego kotłów fluidyzacyjnych. Materiały Jubileuszowej Konferencji Kotłowej '99

- z okazji 50-lecia Fabryki Kotłów RAFAKO w Raciborzu. Przemysł Kotłowy u Progu XXI wieku, 1999.
- [5] Grunwald B., Lewandowski J., Miller A.: Analiza układu parowo-gazowego z atmosferycznym kotłem fluidalnym i turbiną powietrzną, Biuletyn Informacyjny ITC, nr 65/84, 1984.
 - [6] Kuraś J.F.: Nowa generacja kotłów dla energetyki zawodowej. Konferencja Naukowo-Techniczna Niskoemisyjne Techniki Spalania' 97, Ustroń – Zawodzie 20–22 marca 1997.
 - [7] Miller A., Lewandowski J., Badyda K.: Analiza parametrów układu parowo-gazowego z kotłem fluidalnym, Archiwum Energetyki, 2, 1985.
 - [8] Nowak W.: Elektrownie gazowo-parowe z kotłami fluidalnymi ciśnieniowymi, Materiały Seminarium Naukowego pt. Nowe technologie wytwarzania energii elektrycznej z paliw konwencjonalnych, Poznań, 1997.
 - [9] Bis Z.: Hydromechanika i wymiana ciepła w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, Materiały Jubileuszowej Konferencji Kotłowej '99 Z okazji 50-lecia Fabryki Kotłów RAFAKO w Raciborzu. Przemysł Kotłowy u Progu XXI wieku, str. 1–14, 1999.
 - [10] Bis Z.: Wpływ jakości paliwa, uziarnienia warstwy i zdolności separacyjnej cyklonów na osiągi kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, Materiały Jubileuszowej Konferencji Kotłowej '99 Z okazji 50-lecia Fabryki Kotłów RAFAKO w Raciborzu. Przemysł Kotłowy u Progu XXI wieku, str. 15–26, 1999.
 - [11] Topolski J., Badur J., Karcz M.: Kombinowane obiegi cieplne – program COM-GAS, Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej Warszawa 1–3.12.1999, praca przedstawiona i opublikowana w Pracach Naukowych Politechniki Warszawskiej, zeszyt nr 7 Konferencje str. 222–229, Warszawa, 1999,
 - [12] Rakowski J., Badyda K., Charzyński W., Chmielnik A., Chmielnik T., Chodkiewicz R., Florkiewicz R., Golec T., Jaschik M., Kotlarski Cz., Kotowicz J., Lewandowski J., Miller A., Mrozowski J., Porochnicki J., Pyka I., Rataj Z., Skowroński P., Smółka W., Szymczyk J., Ściążko M., Świrski J., Wasilewski A., Wasilewski W., Wróblewska V.: Proekologiczne technologie dla rekonstrukcji i modernizacji elektrowni oraz elektrociepłowni., IGEOŚ, W-wa, tom 1–2, 2000.
 - [13] Topolski J.: Diagnozowanie spalania w układach gazowo-parowych, Rozpr. Doktorska, IMP PAN, Gdańsk 2002.
 - [14] Topolski J., Badur J.: Analiza pracy układu kombinowanego elektrociepłowni Nowa Sarzyna przy pomocy programu COM-GAS, Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, W-wa, grudzień 2001.

Recenzent: Dr hab. inż. Marek PRONOBIS, prof. nzw. Pol. Śl.

Wpłynęło do Redakcji: 30.09.2002 r.

Abstract

The advantages of the boilers with circulating fluidized bed are fuel elasticity and environmental friendliness. The features mentioned above are tightly connected with conditions of combustion and they require rigorous obedience to the gradient and value of temperature along the height of the combustion chamber. The optimal value of this parameter is 850°C. The regulation of this temperature is mainly provided by changing the mass flow of the loose material recirculated to lower part of the combustion chamber.

In this work the mathematical model is proposed, which is adapted for calculations of boilers with atmospheric circulating fluidized bed. It is also implemented in the COM-GAS application written by the authors of this statement. With the use of this program calculations for CFB670 (of Foster Wheeler) boiler were performed. The results obtained were compared with manufacturer data. The additional calculations of the combustion chamber which allowed the determination of a proper multiplicity of recirculation for three fuels of different calorific value were carried out.