

Konrad ŚWIRSKI
Politechnika Warszawska
Tomasz GOLEC
Instytut Energetyki, Warszawa

MODELOWANIE WPLYWU TECHNOLOGII SPALANIA NA WARUNKI WYMIANY CIEPŁA W POWIERZCHNIACH OGRZEWALNYCH KOTŁA

Streszczenie. Instalacja palników niskoemisyjnych zwykle powoduje istotne zmiany obciążeń cieplnych poszczególnych powierzchni ogrzewalnych kotła. Modelowanie matematyczne pozwala na wyznaczenie nowego stanu pracy kotła, a następnie określenie optymalnych zmian konstrukcyjnych. Przedstawiono obliczenia kotła OP-650, a otrzymane rezultaty porównano z wynikami pomiarów przed i pomodernizacyjnych.

MODELLING OF COMBUSTION TECHNIQUE INFLUENCE ON BOILER HEAT EXCHANGERS HEAT TRANSFER CONDITIONS

Summary. Reconstruction of pulverized coal fired boilers mainly concerns introduction of low NO_x burners and OFA ports. The paper presents mathematical model of boiler which allows to calculate optimum design of heating surfaces modification. The calculations of OP-650 boiler are presented as a test case.

MATHEMATISCHE MODELLIERUNG DES EINFLUSSES DER VERBRENNUNGSBEDINGUNGEN AUF DIE WÄRMEÜBERTRAGUNG IN KESSELHEIZFLÄCHEN

Zusammenfassung. Installation der NO_x -armen Brenner kann bedeutende Veränderungen der Belastung der Heizflächen im Kessel verursachen. Benutzung der mathematischen Modellierung ermöglicht neue Betriebszustände des Kessels und Blockes festzustellen, infolgedessen entsteht eine Möglichkeit, die Anlage optimal umzukonstruieren. Im Beitrag wurden die Berechnungen des Kessels OP-650 vorgestellt. Deren Resultat wurde mit den Meßergebnissen vor und nach der Modernisierung verglichen.

1. WPROWADZENIE

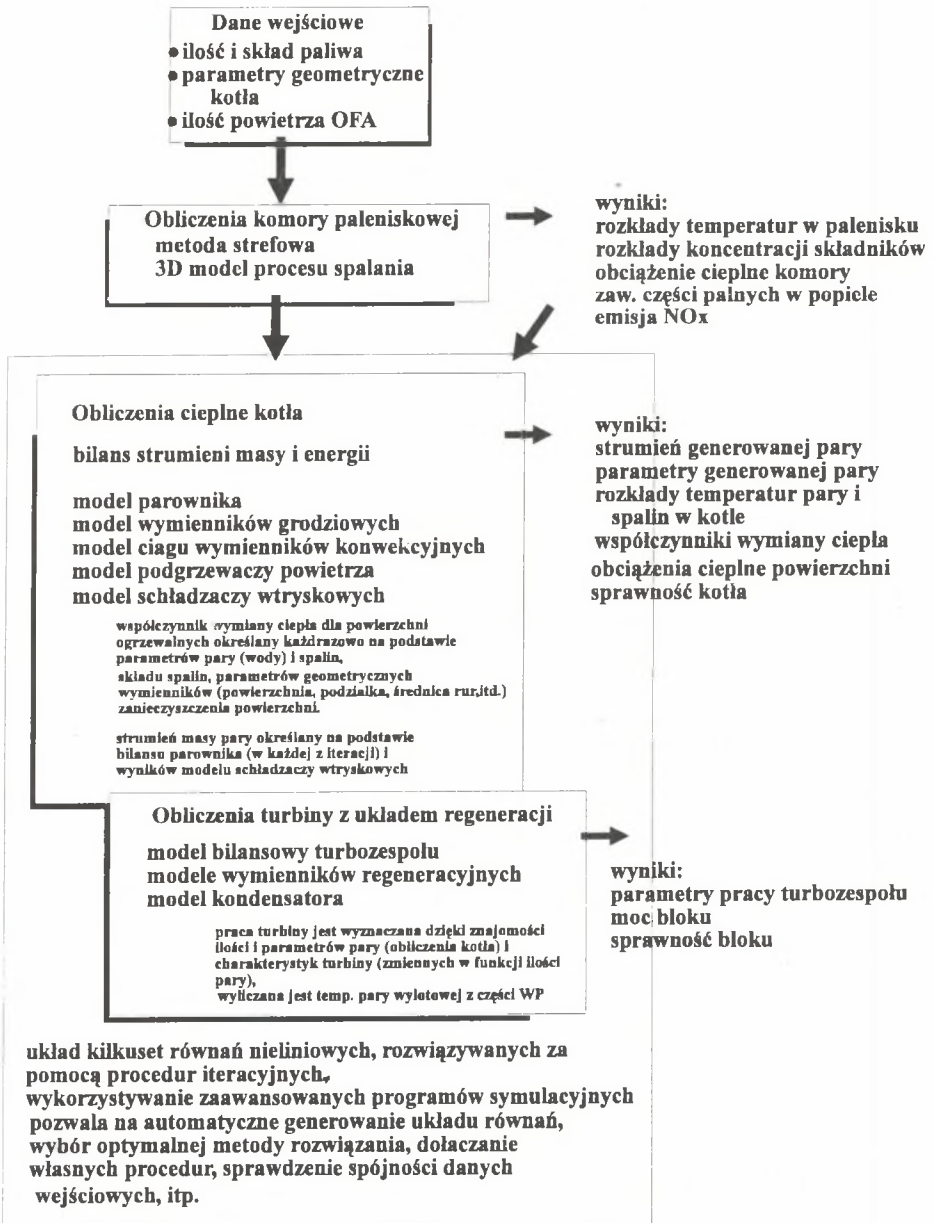
Wraz z wprowadzeniem nowych norm emisji jednym z powodów modernizacji układu paleniskowego kotłów jest coraz powszechniejsze wprowadzanie niskoemisyjnych technologii spalania, w których obok palników niskoemisyjnych stosowane są także dysze powietrza górnego OFA. Zmiany konstrukcyjne palników i komory paleniskowej kotła pyłowego, a także zmiany jakości spalanego paliwa, istotnie wpływają na obciążenia cieplne poszczególnych powierzchni ogrzewalnych. W skrajnym przypadku może to powodować znaczące niedotrzymanie parametrów produkowanej pary lub obniżenie wydajności kotła. Zastosowanie modelowania matematycznego i obliczeń numerycznych pozwala na kompleksową ocenę skuteczności planowanej modernizacji i jej wpływu na pracę kotła oraz całego bloku energetycznego.

2. METODYKA OBLICZEŃ

Proponowany model matematyczny obejmuje cały blok energetyczny. Przyjęta metodyka zakłada wykorzystanie trzech podstawowych bloków programów:

- obliczeń spalania węgla i wymiany ciepła w komorze paleniskowej kotła,
- obliczeń cieplnych,
- obliczeń turbiny i układu regeneracji.

Celem pierwszego etapu obliczeń jest wyznaczenie rozkładu temperatury w komorze paleniskowej (w tym temperatury wylotowej spalin z komory paleniskowej), obciążeń cieplnych powierzchni opromieniowanych oraz stopnia wypalenia węgla w komorze paleniskowej kotła. Wielkości te wykorzystywane są w bloku obliczeń cieplnych kotła, których celem jest uzyskanie pełnych wyników rozkładu temperatur spalin i pary, parametrów generowanej pary, wydajności i sprawności kotła. Blok obliczeń cieplnych kotła sprzęgnięty jest z blokiem obliczeń turbozespołu, co pozwala na pełne obliczenia bilansowe bloku energetycznego. Schemat modelu obliczeniowego przedstawiono na rys. 1. **Danymi wejściowymi do obliczeń są jedynie ilość i skład doprowadzanego paliwa, parametry geometryczne powierzchni ogrzewalnych kotła oraz informacje identyfikujące technologię spalania** (dla spalania niskoemisyjnego – układ palników, ilość powietrza OFA, itp.). Obliczenia komory spalania, obok danych do kolejnych obliczeń, pozwalają na uzyskanie pełnego opisu procesu spalania i mogą służyć do jego optymalizacji. W zależności od założonej dokładności opisu, może zostać wykorzystana jednowymiarowa metoda strefowa lub pełny trójwymiarowy model z wykorzystaniem komercyjnego kodu obliczeniowego FLUENT. Model obciążeń cieplnych kotła stanowią bilansowe równania zachowania masy i energii dla każdego z wymienników. Do obliczeń turbiny i układu regeneracji wykorzystywane są dane o ilości i parametrach produkowanej pary świeżej i wtórnej, uzyskane



Rys. 1. Schemat modelu obliczeniowego

Fig. 1. Model scheme

w wyniku obliczeń cieplnych kotła. Do symulacji układów kotła i turbiny wykorzystywano program bilansowy ASPEN PLUS.

3. OBLICZENIA

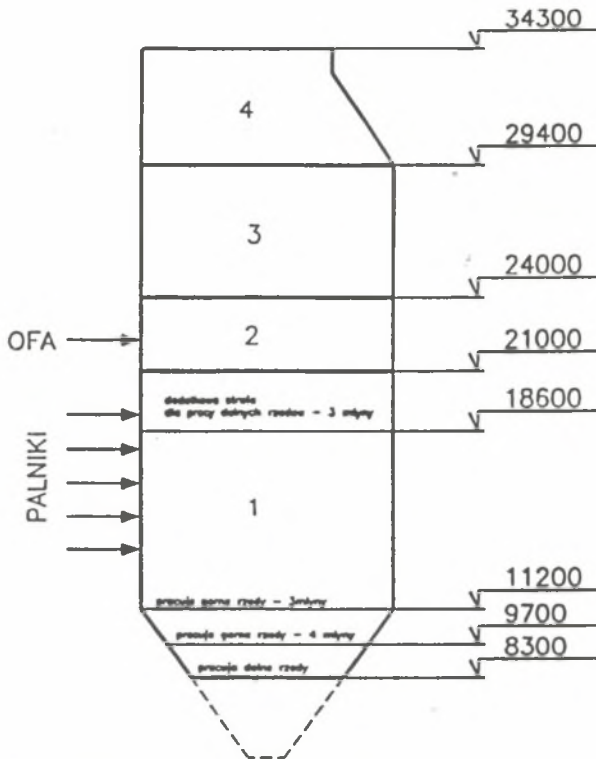
Przeprowadzono obliczenia testowe dla kotła OP-650 w El. Dolna Odra. W latach 1986–90 w związku z pogorszeniem jakości spalanego paliwa przeprowadzono redukcje powierzchni ogrzewalnych przegrzewaczy pary. Wraz z poprawą jakości spalanego paliwa, a szczególnie po wprowadzeniu palników niskoemisyjnych i odbudowie powierzchni przegrzewaczy pary wtórnej pojawiły się problemy eksploatacyjne związane z niedogrzewem pary pierwotnej (w konsekwencji także wtórnej), wobec czego podjęto decyzję o modernizacji powierzchni ogrzewalnych (rozbudowa II stopnia przegrzewacza pary pierwotnej). Dla zaproponowanego modelu matematycznego przeprowadzono obliczenia w trzech wariantach:

- stan projektowy kotła,
- stan po zainstalowaniu palników niskoemisyjnych,
- zainstalowane palniki niskoemisyjne i zmodernizowane powierzchnie ogrzewalne.

Obliczenia przeprowadzono przed planowaną ostateczną modernizacją kotła i porównano z rezultatami pomiarów przed- i pomodernizacyjnych [3], [4], [5].

3.1. Obliczenia komory paleniskowej kotła

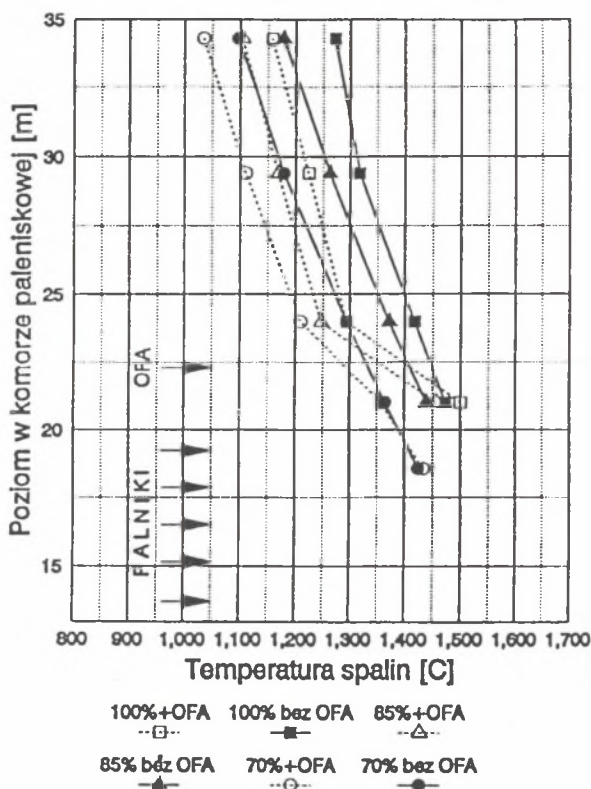
Obliczenia komory paleniskowej kotła wykonano metodą strefową [2], która umożliwia określenie stopnia wypalenia paliwa i wymiany ciepła wzdłuż komory paleniskowej kotła. Wielkościami wejściowymi do obliczeń były wyniki bilansu paliwo–powietrze dla określonego rodzaju węgla i założonego rozdziału powietrza pomiędzy powietrze pierwotne dostarczone do młynów i powietrze wtórne. Istotny jest przy tym podział powietrza wtórnego pomiędzy palniki pracujące, palniki niepracujące (powietrze chłodzące) i dysze powietrza górnego OFA. Zwłaszcza udział powietrza OFA ma decydujący wpływ na poziom temperatury spalin wylotowych z komory kotła i w konsekwencji na parametry produkowanej pary. Rysunek 2 przedstawia przyjęty podział komory paleniskowej na strefy dla poszczególnych konfiguracji pracujących młynów. Na rys. 3. przedstawiono obliczone rozkłady temperatur wzdłuż komory paleniskowej dla trzech strumieni masy paliwa doprowadzanego i zamkniętych (linia ciągła) lub otwartych (linia przerywana) dyszach OFA. Zastosowanie dysz OFA powoduje zmniejszenie nadmiaru powietrza w obrębie pasa palnikowego i spalanie węgla w warunkach stechiometrycznych. Pociąga to za sobą zwiększenie obciążeń cieplnych i tym samym ilości pary generowanej przez parownik. Wynikiem zastosowania dysz OFA jest obniżenie temperatury spalin rzędu 50–90 K na poziomie przewężenia komory



Rys. 2. Kocioł OP-650; podział komory paleniskowej na strefy

Fig. 2. Model zones in the OP-650 boiler furnace chamber

spalania. Należy podkreślić istotny wpływ zanieczyszczenia powierzchni ekranów kotła na rozkład temperatury spalin w kotle i temperaturę spalin wylotowych z komory spalania, co w przyjętej metodzie rzutuje na całość wyników obliczeń cieplnych kotła. Obliczenia (rys. 4) wykonano dla współczynnika zanieczyszczenia odpowiadającego czystym ekranom. Dla ekranów zanieczyszczonych i pracy kotła z zainstalowanymi palnikami niskoemisyjnymi i zredukowanymi powierzchniami ogrzewalnymi otrzymano wyższe temperatury pary świeżej (o ok. 12 K dla wysokich obciążeń i nawet do 20–25 w zakresie niższych mocy) i zmiany temperatury pary wtórnej (ok. –5 K dla wysokich obciążeń i +15–20 dla niskich mocy).



Rys. 3. Rozkład temperatur w komorze paleniskowej; kocioł z zainstalowanymi palnikami niskoemisyjnymi

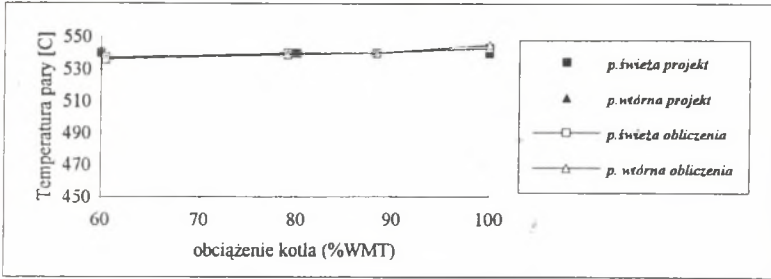
Fig. 3. Temperature distribution in furnace chamber; boiler with low NO_x burners OFA nozzles open (solid line), OFA nozzles closed (dashed)

3.2. Obliczenia wymiany ciepła dla powierzchni ogrzewalnych kotła

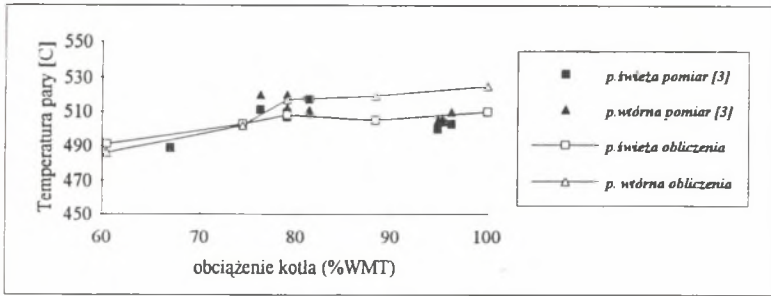
Model obliczeń cieplnych kotła obejmuje modele poszczególnych wymienników: parownika, czterech stopni przegrzewaczy pary świeżej, trzech stopni przegrzewaczy pary wtórnej, podgrzewacza wody i powietrza oraz modele schładzaczy wtryskowych pary. Dla każdej powierzchni ogrzewalnej zgodnie z [1] wyznaczony jest współczynnik przenikania ciepła, który w przypadku ogólnym jest zależny od:

- parametrów geometrycznych wymiennika: średnic rur, grubości ścianek, wielkości podziałek, ilości rur, sumarycznej powierzchni,
- parametrów spalin: strumienia masy, prędkości przepływu, parametrów termodynamicznych – temperatury, liczby Prandtla, lepkości kinematycz-

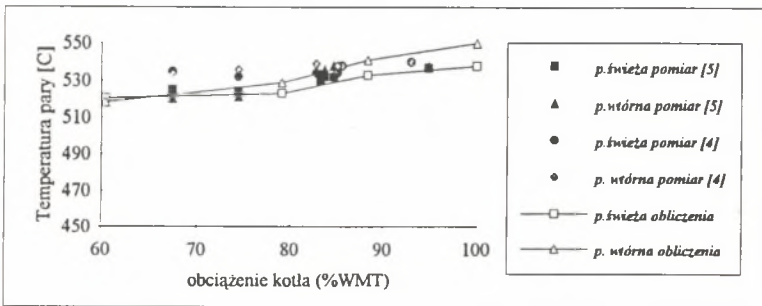
a) stan wg projektu technicznego



b) po instalacji palników niskoemisyjnych



c) po modernizacji powierzchni ogrzewalnych



Rys. 4. Wyniki obliczeń i rezultaty pomiarów kotła OP-650

Fig. 4. Calculation results and measurements of OP-650 boiler: a) design status, b) low NO_x burners c) redesigned heating surfaces

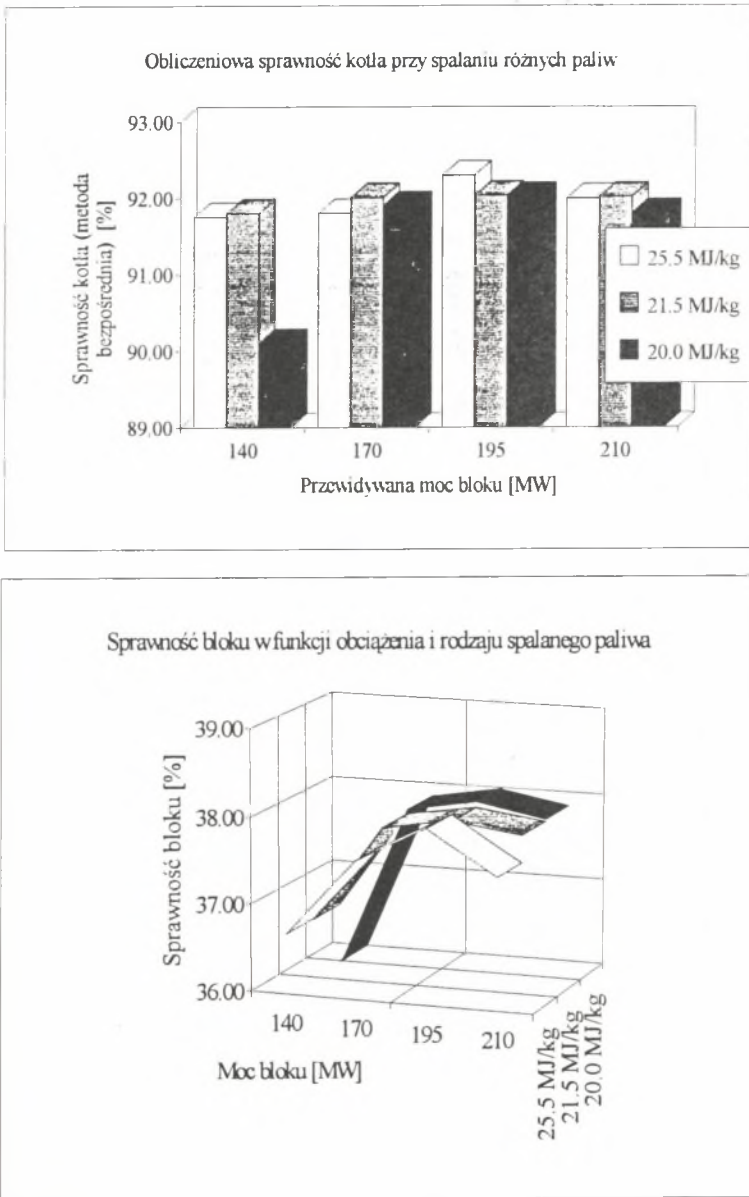
- nej, przewodności cieplnej, składu spalin: zawartości gazów dwuatomowych, wody i części lotnych, itp.,
- parametrów czynnika ogrzewanego: strumienia masy pary, prędkości przepływu, parametrów termodynamicznych: gęstości, temperatury, liczby Prandtla, lepkości kinematycznej, przewodności cieplnej, itp.,
 - współczynnika zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych, który może zostać określony na podstawie wzorów projektowych.

Wielkościami wejściowymi do modelu określającego ilość ciepła przejętego w każdej z powierzchni ogrzewalnych są jedynie parametry strumieni wlotowych. Dla pełnego modelu kotła tworzy to złożony (szczególnie w przypadku zmiennego – zależnego od parametrów czynników przed i za wymiennikiem współczynnika przejmowania ciepła) nieliniowy układ równań, rozwiązywany za pomocą metod iteracyjnych. W każdej z iteracji każdorazowo wyznaczany jest strumień generowanej pary (bilans parownika) i współczynniki wymiany ciepła dla każdej powierzchni ogrzewalnej. Na rys. 4 przedstawiono wyniki symulacji dla trzech obliczeniowych wariantów wraz z rezultatami pomiarów [3], [4], [5].

Obliczenia stanu pracy kotła wg założeń projektowych (rys. 4a) przeprowadzono dla wstępnej weryfikacji przyjętej metodyki. Zbieżność rezultatów pozwala na założenie, że model odzwierciedla pracę kotła w warunkach rzeczywistych, a także może zostać wykorzystany do obliczeń stanów odbiegających od warunków projektowych. Wyniki obliczeń stanu pracy kotła po instalacji palników niskoemisyjnych wskazują na istotną zmianę w strukturze obciążeń cieplnych. Zwiększona ilość ciepła przyjętego w parowniku (o ok. 4% w stosunku do całkowitej ilości ciepła produkowanego w kotle), powiększająca strumień generowanej pary, uniemożliwia jej podgrzanie do wartości projektowych, w konsekwencji prowadząc do niedogrzenia pary świeżej i niedotrzymania parametrów pary wtórnej. Obliczenia przeprowadzono dla współczynnika nadmiaru powietrza 1,2 i czystych powierzchni ekranowych. Wyniki wskazują, że te dwa parametry w czasie eksploatacji kotła mogą w istotny sposób przeciwdziałać niekorzystnym zmianom struktury przejmowania ciepła. Obliczenia stanu pracy kotła w związku z planowaną modernizacją powierzchni ogrzewalnych (rys. 4c) wskazują na poprawę parametrów pracy kotła. Wyniki pomiarów pomodernizacyjnych potwierdziły, że przy użyciu przyjętej metodyki obliczeń można z dużą dokładnością przewidzieć parametry generowanej pary (rys. 4c).

4. WNIOSKI

Proponowana metodyka umożliwia kompleksową analizę wpływu zmian technologii spalania na pracę kotła pyłowego, a także całego bloku energetycznego. Rezultaty pomiarów potwierdzają możliwość jej zastosowania do projek-



Rys. 5. Obliczenia sprawności kotła i bloku dla różnych gatunków spalanego paliwa (kocioł po instalacji palników niskoemisyjnych)

Fig. 5. Boiler and unit efficiency as a function of fuel quality (boiler with low NO_x burners implemented)

tów modernizacji. Zastosowanie modelowania matematycznego pozwala na przeprowadzenie wielu wariantów obliczeń, w tym także na dokonywanie optymalizacji projektowej korekcji powierzchni ogrzewalnych. Dodatkowo możliwe jest prognozowanie zmian stanu pracy kotła w czasie długotrwałej eksploatacji. Kompleksowe obliczenia bloku energetycznego pozwalają także na wszechstronną analizę jego pracy np. dla określenia wpływu jakości spalnego paliwa – przykładowe wyniki takich obliczeń dla testowego przykładu kotła OP-650 z zainstalowanymi palnikami niskoemisyjnymi przedstawiono na rys. 5.

LITERATURA

- [1] Orłowski P., Dobrzański W., Szwarc E.: Kotły parowe; konstrukcja i obliczenia. WNT, Warszawa 1979.
- [2] Tieplowoj raszcziet kotelnyh agriegatow. Moskwa 1973.
- [3] Florkiewicz R.: Ocena warunków pracy kotła OP-650 nr 4 w El. Dolna Odra po zabudowie palników niskoemisyjnych, opracowanie IEN 1992.
- [4] Florkiewicz R.: Ocena warunków pracy kotła OP-650 nr 7 w El. Dolna Odra po modernizacji, opracowanie IEN 1994.
- [5] Florkiewicz R.: Ocena warunków pracy kotła OP-650 nr 8 w El. Dolna Odra po modernizacji, opracowanie IEN 1994.

Recenzent: Dr hab. inż. Marek PRONOBIS

Wpłynęło do Redakcji 28.08.1994 r.

Abstract

Current modernization of pulverized coal boiler mainly concerns installation of low Nox burners and over fire air ports. New combustion technique modifies temperature distribution in furnace and usually has significant influence on heat transfer conditions in boiler, changing design heat duty of particular exchanger. The paper presents mathematical model of boiler which allows calculation of altered boiler operation and may be used for optimum design of heating surfaces modification. The zone method of furnace calculation were used to determine furnace gas exit temperature. The model of boiler consists of set of nonlinear equations describing heat duty of each exchanger with variable heat transfer coefficient. Only geometrical data of

boiler heat exchangers, fuel analyse and mass flow were used as input data. The ASPEN PLUS commercial software was used to create the model. The OP-650 type boiler was chosen as a test case. Three variants of calculations were provided: design status of boiler, boiler with low NO_x burners implemented and finally boiler with redesigned heating surfaces. Fig. 4 shows results of the calculations compared with measurements data. Presented method seems to be very attractive way of analyses influence of new combustion techniques on boiler operation, reducing risk of necessary boiler modernization. The model of whole unit may be also used for global investigation for example to determine optimum quality of fuel used.