

Tadeusz WALA, Marek MIRSKI, Ryszard MATUSZKIEWICZ
Fabryka Kotłów RAFAKO S.A., Racibórz

WPLYW SPALANIA NISKOEMISYJNEGO NA OSIĄGI TECHNICZNE KOTŁA NA PODSTAWIE KOMPUTEROWEJ ANALIZY Z UŻYCIEM PROGRAMU COMSTAR

Streszczenie. Program COMSTAR jest wynikiem wieloletnich badań nad zagadnieniami matematycznego modelowania ze spalaniem. W pracy przedstawiono możliwości obliczeń programem. Do pracy dołączono analizy trzech obiektów. Wyniki obliczeń symulacyjnych programem COMSTAR zostały porównane z pomiarami na rzeczywistych obiektach. Porównanie dało dobrą zgodność, co pozwala stwierdzić, iż algorytm wykorzystany w programie jest poprawny.

LOW – NO_x EMISSION COMBUSTION EFFECT ON BOILER'S TECHNICAL PERFORMANCE BASED ON COMSTAR COMPUTER ANALYSING PROGRAM

Summary. Comstar program is a result of long term experiences concerning mathematical simulations of combustion processes. Herein are included analyses of three units. Simulating calculation results of COMSTAR have been compared with the results of real measurements of existing units. The comparison has showed a satisfactory compatibility between the computer results and a reality, what is provided by use of a proper algorithm in the program.

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЭМИССИОННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОТЛОАГРЕГАТА НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ПРОВЕДЕННОГО НА ЭВМ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ COMSTAR

Резюме. Программа COMSTAR предназначена для трехмерного расчета аэродинамики сгорания и теплообмена в топочном пространстве энергетического котла с пылеугольными горелками. Расчетное геометрическое пространство охватывает топочную камеру до ширмового пароперегревателя. Программа COMSTAR определяет трехмерные поля

скоростей, давлений, параметров турбулентного движения, концентрации летучих, температуры дымовых газов и т.п. Полученные векторные поля можно представить графически с помощью стрелок или траекторий движения частиц с нулевой массой. Скалярные поля можно представить графически с помощью изолиний или трехмерных графиков. Кроме этого на печать выводится числовая информация, как например: средние физические величины на выходе из топочной камеры, полный тепловой поток, воспринятый испарителем или радиационным пароперегревателем и т.п.

WSTĘP

Rozwój technik komputerowych, teorii podobieństwa oraz analizy wymiarowej wykorzystany został do badań modelowych w wielu dziedzinach nauki i techniki. Badania modelowe rozwijane były głównie w dwu kierunkach:

- badania doświadczalne w zmienionej skali (z wykorzystaniem zasady podobieństwa geometrycznego). Badania te określa się mianem modelowania fizycznego,
- teoretyczne prace mające na celu opracowanie analityczne opisu zjawisk.

Dzięki szybkiemu rozwojowi technik komputerowych wraz z postępującym rozwojem maszyn cyfrowych, w tym komputerów klasy PC, została umożliwiona stosunkowo szybka analiza zjawisk zachodzących w takich zagadnieniach, jak:

- mechanika płynów,
- wymiana ciepła i masy,
- przepływ ze spalaniem.

W każdym ze zjawisk teoria modelowania zmierza do tego, aby wybrać i uwzględnić w badaniach tylko te zjawiska, które są istotne. Umiejętny wybór najważniejszych zjawisk do modelu złożonego procesu ze spalaniem stanowi podstawową trudność modelowania. Model matematyczny przepływu ze spalaniem wiąże w sobie szereg zagadnień, do których należą:

- aerodynamika przepływu w komorze z uwzględnieniem zjawiska turbulencji,
- konwekcyjny oraz dyfuzyjny transport masy,
- konwekcyjny oraz dyfuzyjny transport energii,
- zagadnienia kinetyki chemicznej i promieniowania cieplnego.

Ujęcie ich w jedną całość w modelu matematycznym jest niezbędne, wymaga jednak przyjęcia pewnych założeń w opisie i tak skomplikowanych poszczególnych zagadnień procesu.

Istota modeli matematycznych przepływu ze spalaniem polega na rozwiązaniu równań bilansu pędu, masy i energii w obszarze przepływu, znajdując w ten sposób rozkłady pól prędkości, temperatur, koncentracji składników oraz strumieni cieplnych. Poszczególne modele matematyczne różnią się więc w zasadzie przyjętymi założeniami i uproszczeniami oraz metodyką realizacji

obliczeń. Ze względu na niski koszt obliczeń modeli matematycznych, szybkość ich realizacji, a także dużą swobodę formułowania warunków procesu, modele matematyczne zastępują niekiedy całkowicie żmudne badania doświadczalne, które są praktycznie niemożliwe do realizacji.

Na tej kanwie powstał zaawansowany program obliczeniowy COMSTAR (COMputation of Power STation Combustors), którego stosunkowo łatwa obsługa oraz użycie najnowszych metod obliczeniowych pozwala na szybkie i w miarę dokładne analizowanie zjawisk zachodzących w komorze paleniskowej.

O PROGRAMIE COMSTAR

Program COMSTAR jest wynikiem kilkuletnich wspólnych badań Politechniki Wrocławskiej oraz Raciborskiej Fabryki Kotłów nad zagadnieniem matematycznego modelowania przepływów ze spalaniem. W Rafako program COMSTAR zainstalowany jest na komputerze klasy PC 486, 66 MHz, 16 Mb RAM z lokalnym dyskiem HD 350 Mb oraz dwoma dyskami sieciowymi 250 Mb. Tak duża pojemność dysków HD związana jest z potrzebą przechowywania wyników symulacji poszczególnych obiektów.

Zastosowanie :

1. Analiza problemów eksploatacyjnych

- niewłaściwa praca kotła
- niedogrzenie pary wylotowej
- niska temperatura wylotowa spalin
- wysoki niedopał węgla
- nierównomierne obciążenie cieplne ścian
- przegrzewanie elementów palników

2. Projektowanie

- sprawdzanie gabarytów komory paleniskowej
- sprawdzanie obciążenia cieplnego ścian i temperatury spalin
- analiza temperatury i składu spalin oraz możliwości szlakowania

3. Optymalizacja

- optymalizacja ustawienia palników
- optymalizacja powietrza OFA
- optymalizacja rozdzielców czynnika na poszczególne dysze
- dobór optymalnego paliwa
- minimalizacja niedopału

Program COMSTAR oblicza:

- trójwymiarowe pola przepływów
- trójwymiarowe pola temperatur spalin oraz wartości średnie
- skład spalin
- wymianę ciepła w komorze paleniskowej

- ilość niespalanego węgla
- inne

Do wyznaczenia ww. trójwymiarowych pól konieczna jest znajomość:

- charakterystyki spalanego węgla
- założeń konstrukcyjnych takich, jak:
 - geometria komory paleniskowej i palników
 - usytuowanie palników na ścianach komory paleniskowej
 - ilości czynników (węgla i powietrza) oraz prędkości

Przeprowadzone analizy:

W niniejszym opracowaniu przedstawiono analizy trzech obiektów:

- EC Wrocław – kocioł WP-120
- El. Dolna Odra – kocioł OP-650
- EC Siekierki – kocioł OP-430

Analizy przeprowadzono dla węgla spalanych w ww. kotłach oraz rozdzielów czynnika i ustawień dysz takich, jakie są w rzeczywistych obiektach. Przeprowadzone analizy potwierdziły dobrą zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów przeprowadzonych na obiektach.

EC WROCŁAW

Kocioł ten był pierwszym kotłem wodnym, na którym zastosowano niskoemisyjne palniki strumieniowe. Jednocześnie na kotle została zabudowana instalacja do odsiarczania spalin z dozowaniem wapna do komory paleniskowej. W początkowym okresie eksploatacji kotła, bezpośrednio po modernizacji, wystąpiły znaczne problemy polegające na podwyższeniu temperatury spalin (w całym ciągu konwekcyjnym i w komorze paleniskowej) oraz szlakowanie komory paleniskowej. Podejrzewano, że przyczyną tego stanu mogło być zarówno wprowadzenie palników niskoemisyjnych, jak również dozowanie wapna do komory paleniskowej (co mogło wpłynąć na obniżenie punktu mięknięcia popiołu). Celem analizy modelowej była ocena wpływu zastosowania palników niskoemisyjnych na wymianę ciepła w komorze paleniskowej i na temperaturę spalin wylotowych. Ponadto założono przeprowadzenie optymalizacji kątów ustawienia dysz palników, dysz OFA, prędkości wylotowych czynników i rozdziału powietrza w aspekcie ograniczenia szlakowania oraz poprawienia stopnia wypalenia węgla (obniżenie zawartości części palnych w popiele).

Efekt obniżenia emisji NO_x został uzyskany ze znacznym zapasem (zawartość NO_x w spalinach została obniżona do poziomu $350 + 470 \text{ mg/m}_n^3$), przy czym czynnikiem ograniczającym utrzymanie pożądanego ze względu na NO_x rozdziału powietrza była zbyt wysoka temperatura spalin przy pełnej wydajności kotła.

Przeprowadzona analiza pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Zastosowanie dwustopniowego spalania (z dyszami OFA) powoduje obniżenie temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej poprzez bardziej efektywne obciążenie cieplne ścian komory paleniskowej. Średnie obciążenie cieplne ścian komory paleniskowej jest wyższe niż dla spalania jedno-stopniowego (bez dysz OFA), przy tym obniżeniu ulegają maksymalne wartości jednostkowego obciążenia ścian w rejonie palników, zaś pozostała część komory paleniskowej jest wykorzystana w sposób bardziej efektywny. Wniosek ten sformułowano przy założeniu, że stopień czystości ścian komory paleniskowej jest taki sam dla obydwu rodzajów spalania. W przypadku większego zabrudzenia ścian (na przykład w wyniku szlakowania spowodowanego obniżeniem temperatury mięknięcia popiołu) temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej może być wyższa.
 - Optymalne ustawienie dysz OFA, przy którym temperatura spalin jest najniższa, określone jest kątem nachylenia w pionie 0° i ustawieniem w poziomie stycznie do koła wiru o promieniu 1 m. Przy takim ustawieniu temperatura spalin jest o około 50°C niższa w stosunku do sytuacji bez dysz OFA
 - Przeciwny wpływ na temperaturę spalin ma obniżenie ogólnego współczynnika nadmiaru powietrza (co wynika z ogólnego bilansu komory paleniskowej), np. zmiana współczynnika nadmiaru powietrza z 1,25 na 1,15 powoduje wzrost temperatury wylotowej o około 20°C .
 - Zastosowanie dysz OFA powoduje zwiększenie zawartości części palnych w popiele. Stopień zwiększenia zależy od ustawienia dysz OFA i dysz palnikowych, jak również od ogólnego nadmiaru powietrza i rozdziału powietrza na palnik i dyszę OFA. Przy założonym nadmiarze powietrza, optymalnym ze względu na emisję NO_x (według danych z pomiarów), najniższą zawartość części lotnych w popiele uzyskuje się przy ustawieniu dysz OFA takim samym jak przy najniższej temperaturze spalin (to jest 0° w pionie i koło wiru 1m). Przy bardzo dużym poziomym odchyleniu dysz OFA w stronę ścian daje się zauważyć powstanie w centralnej części ciągu spalin martwej strefy bardzo ubogiej w tlen i zawierającej dużo niespalonego węgla. Świadczy to o niewłaściwym mieszaniu się z powietrzem. Również zbyt duże odchylenie dysz powietrza wtórnego w stronę ścian komory powoduje podobny efekt, który ponadto wiąże się ze wzrostem temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej.
- Bardzo duży wpływ na zawartość części palnych w popiele ma również przemiał węgla, a szczególnie zawartość grubych frakcji. Przy zmianie pozostałości R_{200} z 2% na 5% niedopał wzrasta z $\sim 3\%$ na $\sim 9\%$.
- Koncentracja CO i O_2 w strefie przyściennej, mająca wpływ na ewentualną korozję temperaturową rur parownika oraz na ewentualne szlakowanie,

jest zależna od nadmiaru powietrza w palniku i kąta nachylenia dysz powietrza wtórnego. Poprzez odchylenie dysz powietrza wtórnego w stronę ścian komory można uzyskać koncentrację O_2 w strefie przyściennej powyżej 3%, co według EVT skutecznie zapobiega korozji wysokotemperaturowej. Również wpływ atmosfery redukcyjnej (bogatej w CO) na szlakowanie nie jest większy niż w tradycyjnym palenisku, jeżeli dysze powietrza wtórnego są odchylone od strumienia mieszanki w stronę ściany o kąt około $2,5^\circ$. Przeprowadzona analiza wskazuje, że zastosowanie palników niskoemisyjnych nie może być powodem zwiększonego szlakowania kotła. Aby ocenić ewentualny wpływ dozowania wapnia na możliwość szlakowania, przeprowadzono analizę składu żużla i popiołu lotnego (wykorzystując wyniki pomiarów przeprowadzonych przez zespół Politechniki Wrocławskiej). Pomiarów wskazuje, że zarówno w popiele, jak i żużlu występuje zwiększona zawartość związków wapnia. Świadczy to, że część dozowanej mączki wapiennej przechodzi przez komorę paleniskową do leja nie wchodząc w reakcję z tlenkiem siarki i może powodować obniżenie temperatury mięknięcia popiołu w strefie przyściennej, co przyczynia się do zwiększenia zabrudzenia komory paleniskowej i w konsekwencji do wyraźnego zwiększenia temperatury spalin. Proces odsiarczania wymaga dawkowania związków wapnia w ilości nadstechiometrycznej. Konieczne jest więc, aby przy optymalizacji pracy instalacji odsiarczania uwzględnić wpływ dawkania związków wapnia na ewentualne szlakowanie.

Obecnie, po przeprowadzeniu optymalizacji obydwu instalacji (odsiarczania i palników), nie obserwuje się większych problemów z przekroczeniem temperatury spalin i można przyjąć, że pod tym względem kocioł pracuje poprawnie.

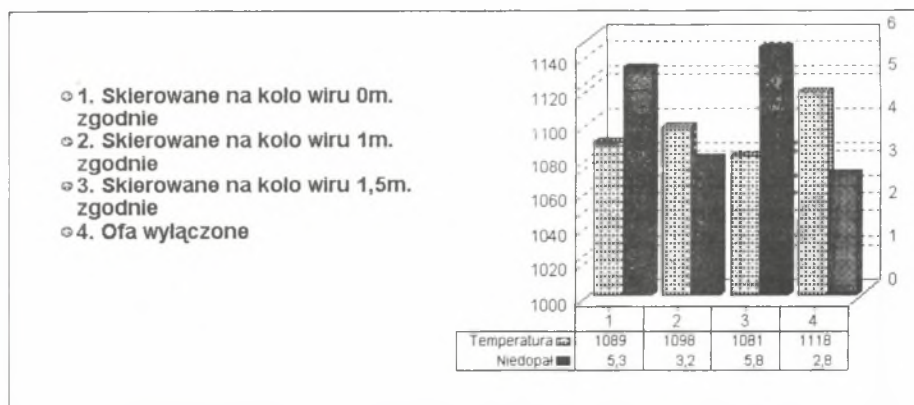
Problemem wymagającym dalszych działań jest obniżenie zawartości części palnych w popiele i w żużlu. W początkowym okresie eksploatacji kotła po modernizacji zawartość części palnych w popiele wynosiła do 9%, a w żużlu do 20%, w zależności od warunków ruchowych. Średnie wartości z rocznego okresu eksploatacji wynoszą odpowiednio $\sim 7\%$ i $\sim 17\%$. Dla sprawności kotła większy wpływ ma zawartość części palnych w popiele (ilość żużla jest niska i części palne w żużlu mają wpływ około pięciokrotnie niższy). Drogą do obniżenia części palnych w popiele jest poprawa jakości popiołu. Jest to możliwe poprzez modernizację separatorów młynów oraz optymalizację wentylacji. Wydaje się, iż wystarczająco skuteczną byłaby wymiana separatorów żaluzjowych na odśrodkowe (typ Raymonda).

Nieco mniejszy wpływ na stopień wypalenia cząstek węgla ma również skład mieszanki pyłowej oraz kształt dyszy pyłowej palnika. W analizowanym kotle suszenie węgla odbywa się za pomocą spalin zassanych przez młyny z komory paleniskowej, z małym dodatkiem powietrza. Zawartość tlenu w tej mieszance gazów po wysuszeniu węgla wynosi $\sim 7\%$ (przy pracy

dwóch młynów). Zwiększenie zawartości tlenu o rząd kilku procent podniosłoby temperaturę w strefie intensywnego spalania, przyspieszyło zapłon i spowodowało lepsze wypalenie. Przyspieszenie zapłonu węgla można również uzyskać poprzez takie ukształtowanie dyszy mieszanki pyłowej, aby wokół strumienia mieszanki powstał wir zasysający gorące spaliny z komory paleniskowej do strefy zapłonu. Rozwiązania takie są stosowane przez niektóre firmy kotłowe. Ilościowe określenie wpływu powyższych czynników na stopień wypalenia jest na obecnym etapie niemożliwe za pomocą programu COMSTAR (ze względu na ograniczenia sprzętowe). Dlatego też konieczne jest wykonanie badań na modelu fizycznym względnie wykonanie odpowiednich prób na obiekcie drogą kolejnych modyfikacji kształtu dysz pyłowych.

Analizowano cztery warianty ustawienia dysz OFA w pionie (0° , -5° , -10° , -15°) oraz ustawienia na różne koło wiru 0 m, 1,5 m, 4,4 m). W kotle WP-120 dysze powietrza wtórnego są podzielone na dwie części. Połówka dyszy położona od strony dyszy pyłowej jest skierowana na większe koło wiru. Dysze OFA są zabudowane około trzy metry nad palnikami głównymi na ścianach bocznych. Przez dysze OFA podaje się około 20% powietrza stechiometrycznego potrzebnego do spalania. Dysze przewidziano jako uchylne w dwóch kierunkach: pionowym i poziomym.

Na rys. 1 przedstawiono analizę temperatury oraz niespalonych części węgla przy ustawieniu dysz OFA w kącie pionowym -15° , oraz na różne koło wiru (0 m, 1 m, 1,5 m). Pokazano także porównanie wyników przy wyłączonych dyszach OFA. Z analizy dla ww. ustawień wynika, iż dysze OFA obniżają

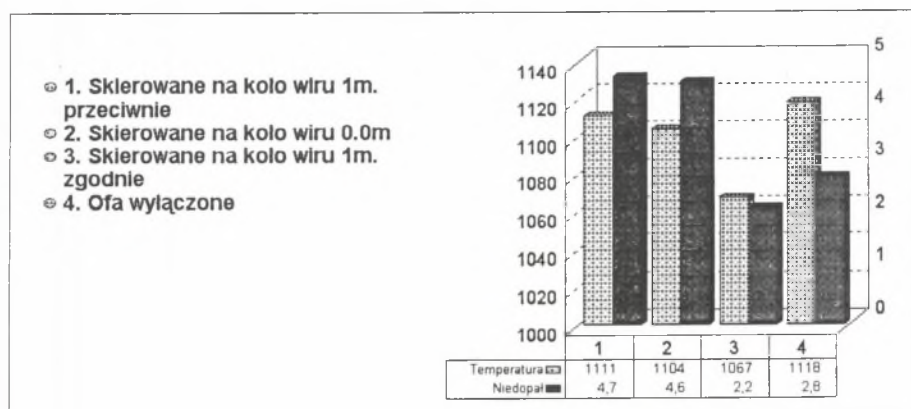


Rys. 1. Niedopał i temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej – dysze OFA ustawione w kącie pionowym -15°

Fig. 1. Unburned carbon and outlet temperature – OFA nozzleless at vertical tilt -15°

temperaturę wylotową spalin, podwyższając procentową zawartość niespalonych części węgla.

Na rys. 2 przedstawiono analizę temperatury oraz niespalonych części węgla przy ustawieniu dysz OFA w kącie pionowym 0° oraz na różne koło wiru (0 m, 1 m z godnie z kierunkiem ruchu obrotowego wiru oraz 1 m przeciwie do kierunku wiru). Tak jak na rysunku 1 przedstawiono porównanie wyników przy wyłączonych dyszach OFA. Z ww. analizy wynika, iż najniższa procentowa zawartość niespalonych części węgla występuje przy ustawieniu dysz OFA na koło wiru o promieniu 1 m, zgodnie z kierunkiem ruchu obrotowego wiru. Jednakże dla takiego ustawienia dysz OFA uzyskujemy najniższą temperaturę wylotową spalin z kotła.

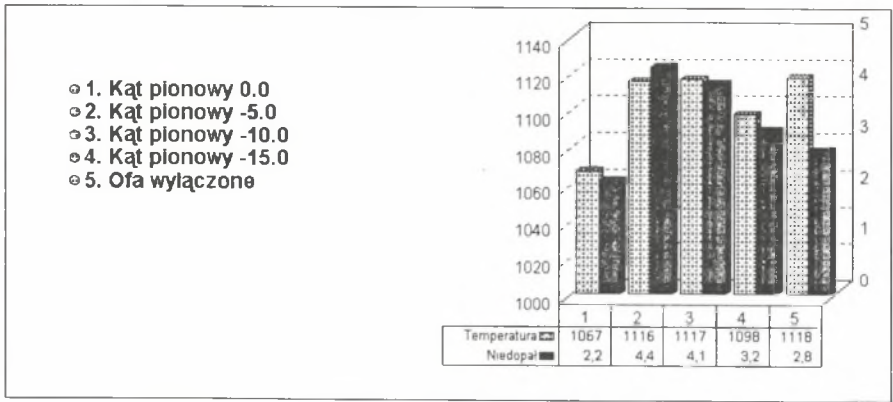


Rys. 2. Niedopał i temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej – dysze OFA ustawione w kącie pionowym 0°

Fig. 2. Unburned carbon and outlet temperature – OFA nozzleless at vertical tilt 0°

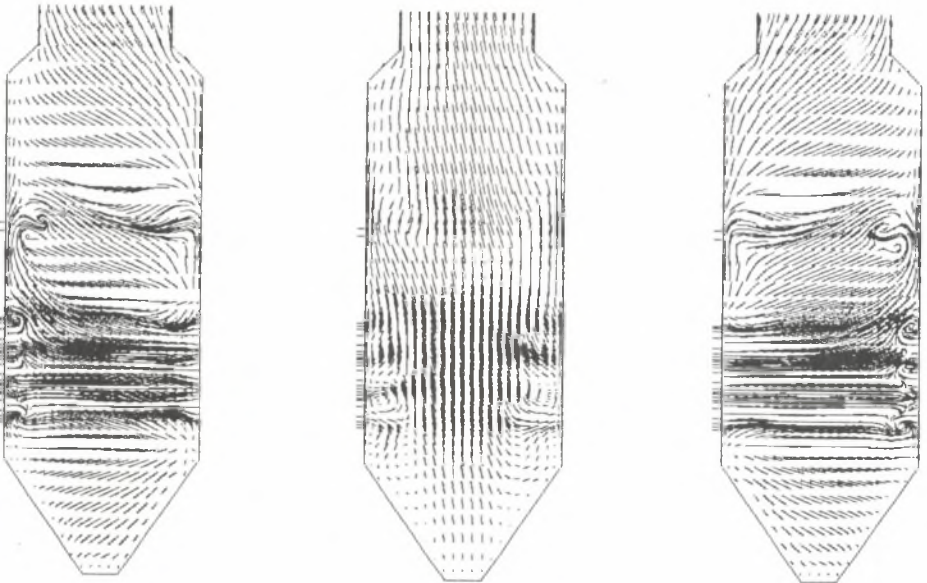
Na rys. 3 przedstawiono porównanie wpływu różnych ustawień dysz OFA w pionie na temperaturę wylotową spalin z kotła i na części palne. Z ww. analizy wnioskujemy, iż najniższą procentową zawartość niespalonych części węgla uzyskujemy dla ustawienia dysz OFA w uchylenie pionowym 0° . Jednocześnie dla tego ustawienia osiągnięta jest najniższa temperatura spalin wylotowych z komory paleniskowej. Temperatura ta jest niższa o około 50°C od temperatury uzyskanej bez OFA.

Pola przepływów w wybranych przekrojach komory pokazano na rys. 4. Na rysunku widoczne są zawirowania w obrębie pasa palnikowego, a także w obrębie dysz OFA. Widoczne zawirowania strumienia OFA od wirowego ruchu w komorze sprzyjają dobremu wymieszaniu w tym rejonie.



Rys. 3. Niedopał i temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej – dysze OFA skierowane na koło wiru 1 m zgodnie

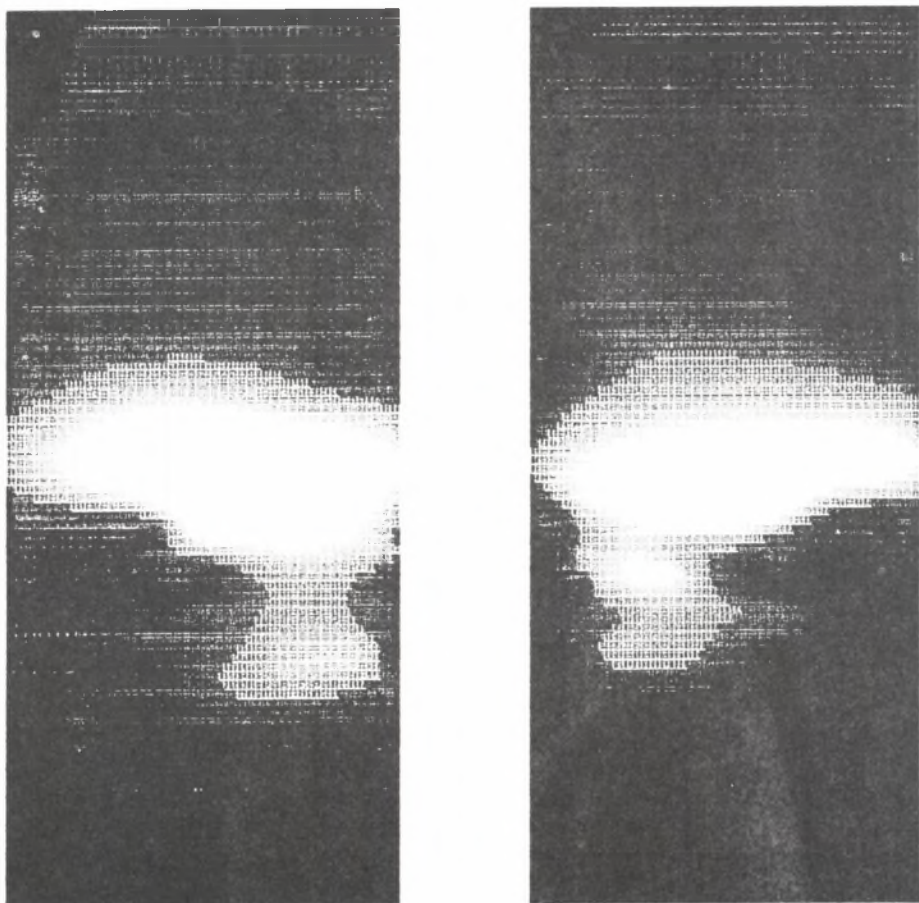
Fig. 3. Unburned carbon and outlet temperature – OFA nozzleless directed a 1 m diameter circle



Rys. 4. Kocioł WP-120 pola przepływów w wybranych przekrojach komory

Fig. 4. Flow areas in chosen furnace intersection–boiler WP-120

Rysunek 5 ukazuje obciążenie cieplne ścian (kW/m^2). Na rysunku można zauważyć równomierne obciążenie ścian w okolicy pasa palnikowego.



Rys. 5. Kocioł WP-120 obciążenie cieplne ścian (kW/m^2)

Fig. 5. Thermal fluxes to furnace walls (kW/m^2) boiler WP-120

EI. DOLNA ODRA

Po przeprowadzeniu modernizacji kotła nr 4, która spowodowała obniżenie emisji NO_x o około 40%, zaobserwowano bardzo nierównomierny rozkład

temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej i wiążący się z tym nierównomierny przepływ pary na lewej i prawej stronie kotła. Ponadto wystąpił brak przegrzewu pary, szczególnie głęboki w początkowym okresie pracy po modernizacji, kiedy komora paleniskowa nie była jeszcze przybrudzona.

Po około miesięcznym okresie pracy wystąpiły uszkodzenia dysz powietrza wtórnego i dysz OFA spowodowane przegrzaniem materiału.

Powyższe usterki w znacznym stopniu obniżyły pozytywny efekt przeprowadzonej modernizacji. Dla projektanta zaskakujący był duży niedogrzew pary związany z obniżeniem temperatury pary na wylocie z komory paleniskowej, podczas gdy w kotle WP-120 w EC WROCLAW obserwowano odwrotne skutki modernizacji.

Celem analizy było:

- określenie przyczyny nierównomiernego rozkładu temperatury spalin i znalezienie metod jej wyrównania,
- określenie wpływu spalania niskoemisyjnego na uzyskiwany przepływ pary,
- określenie wpływu zmiany kąta nachylenia dysz palnika na uzyskiwany przepływ pary oraz na ilość niespalonego węgla,
- określenie rozkładu temperatur spalin w komorze paleniskowej.

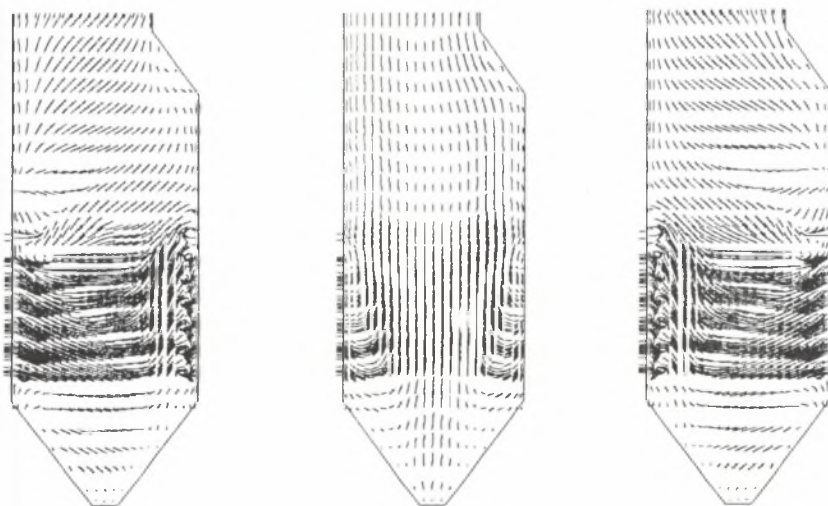
Wykonano kilkanaście obliczeń symulujących pracę komory paleniskowej w warunkach przed modernizacją oraz po modernizacji, przy różnych ilościach powietrza w palniku i w dyszach OFA i różnych kątach ustawienia dysz. Wnioski z przeprowadzonej analizy są następujące:

- Temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej jest niższa o rzęd $\sim 140^{\circ}\text{C}$ w stosunku do temperatury przed modernizacją. Efekt ten jest wywołany w równym stopniu przez zmianę kąta nachylenia dysz palników (po modernizacji dysze skierowane są w dół pod kątem -15°C), jak i przez zabudowę dysz OFA. Przy zwiększonym zabrudzeniu komory paleniskowej, jakie ma miejsce po kilkumiesięcznej eksploatacji kotła, różnica temperatur spalin obniża się do około 100°C . Rezygnacja z pochylenia dysz palnikowych zmniejszyłaby spadek temperatury spalin o połowę. Jednakże odbiłoby się to niekorzystnie na redukcji emisji NO_x .
- Nierównomierny rozkład temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej ma swoje źródło w geometrii samej komory. Garb usytuowany na wylocie z komory powoduje przesunięcie koła wiru w stronę naroża komory paleniskowej. Powoduje to jednocześnie przesunięcie pola temperatur, a także niesymetrię w rozkładzie obciążenia cieplnego komory paleniskowej. Nierównomierność ta utrzymuje się bez względu na usytuowanie dysz powietrza i nie likwiduje jej nawet skierowanie dysz OFA przeciwnie do wiru palników. W tym ostatnim przypadku zwiększa się ilość niespalonego węgla. Pewną poprawę rozkładu temperatur można uzyskać przez zróżnicowanie obciążenia palników pracujących na poszczególne naroża. Ma to

jednak niekorzystny wpływ na niedopał i jest przedsięwzięciem dość ryzykownym z uwagi na konieczność wprowadzenia stałych zmian konstrukcyjnych w przewodach mieszanki pyłowej, które mogą wywołać niekorzystne objawy przy częściowym obciążeniu młynów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano wnioski dla modernizacji kolejnych kotłów (nr 5 i 6). Obejmują one:

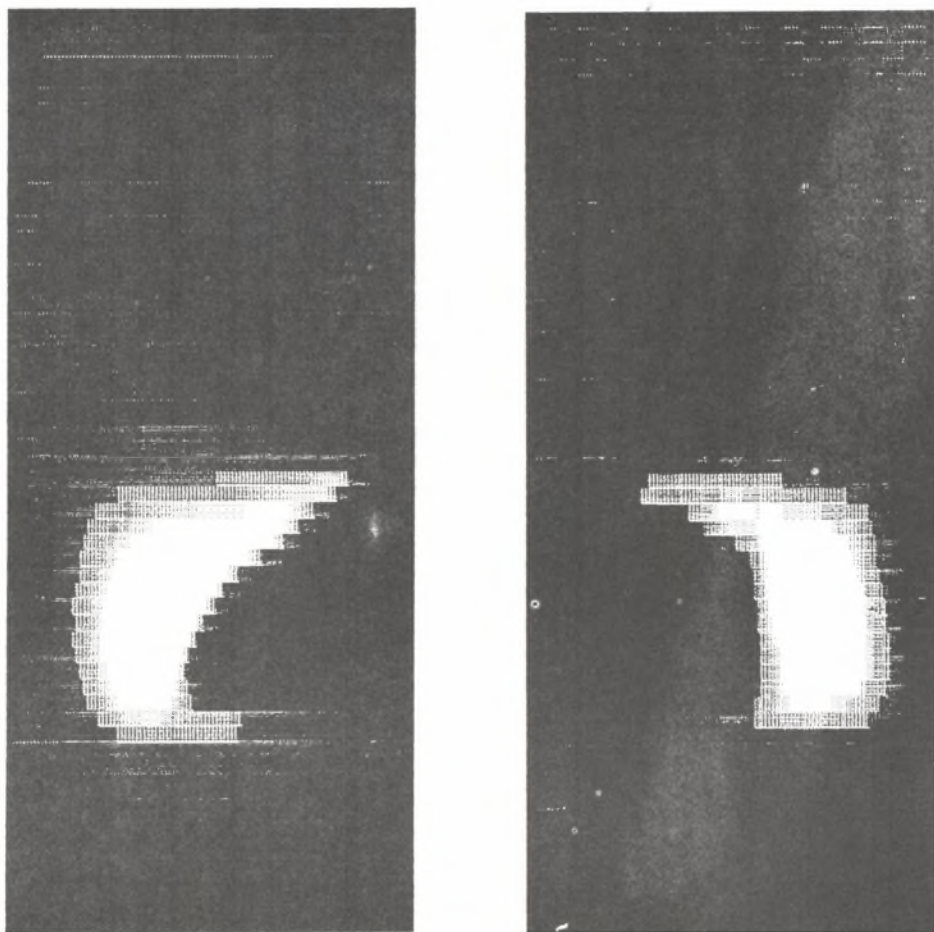
- korektę powierzchni podgrzewaczy dla uzyskania pełnego przegrzewu pary,
 - zmiany konstrukcyjne dysz OFA i dysz palnikowych, polegające na zmianie gatunku materiału i zapewnieniu lepszego chłodzenia dysz.
- Zmiany te zostały wprowadzone w czasie modernizacji kotłów nr 5 i 6. Nie zlikwidowały one całkowicie niesymetrii obciążenia pomiędzy lewą i prawą stroną kotła, ale pozwoliły na uzyskanie pełnego przegrzewu. Jednocześnie poprzez odpowiednią optymalizację pracy palników, którą przeprowadzono pod nadzorem RAFAKO, uzyskano doskonały wynik w realizacji emisji NO_x . Uzyskano emisję na poziomie $350 \div 450 \text{ mg/m}_n^3$ (co odpowiada $120 \div 160 \text{ g/GJ}$), przy niewielkim wzroście zawartości części palnych w popiele do 1,1%. Przeprowadzona analiza komputerowa pozwoliła uniknąć wielu kosztownych prób i badań na obiekcie, które nie dałyby zadowalającego wyniku, a umożliwiła skoncentrowanie się na tych zagadnieniach, które dały pozytywny rezultat.



Rys. 6. Kocioł OP-650 – pola przepływów w wybranych przekrojach komory

Fig. 6. Flow areas in chosen furnace intersections boiler OP-650

Rysunek 6 ukazuje pola przepływów w wybranych przekrojach komory paleniskowej. Niesymetryczność komory (jednostronne jej przewężenie), jak wykazała symulacja, wpływa na przesunięcie koła wiru, które to przesunięcie może mieć wpływ na nierównomierne obciążenie cieplne ścian komory paleniskowej. Warstwa przyścienna w okolicach przewężenia wpływa hamująco na wir powodując jego przeciąganie. Zjawisko to jest nader niekorzystne.

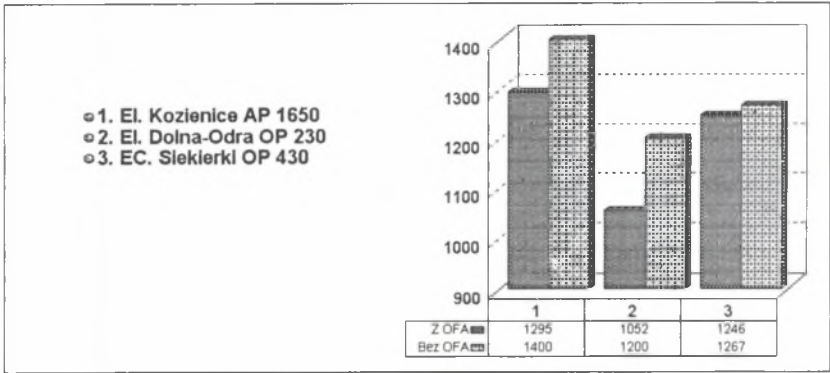


Rys. 7. Kocioł OP-650 – obciążenie cieplne ścian (kW/m^2)

Fig. 7. Thermal fluxes to furnace walls (kW/m^2) – boiler OP-650

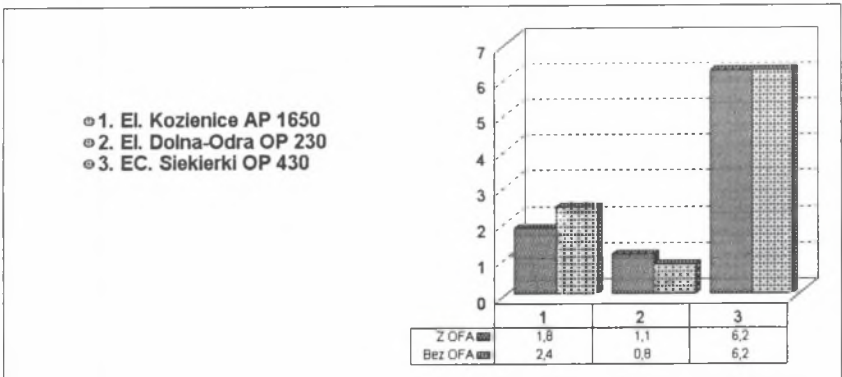
Rysunek 7 ilustruje obciążenie cieplne ścian komory paleniskowej kotła OP-650 (dla tego typu kotła stwierdzono nierównomierne obciążenie cieplne ścian komory paleniskowej). Nierównomierne obciążenie cieplne uwydatnia się w okolicach sąsiadujących palników. Wzrost temperatury w okolicach sąsiadujących palników może mieć wpływ na ich przegrzewanie się.

Rysunki 8 i 9 (poz. 2) przedstawiają wpływ zabudowy dysz OFA na temperaturę spalin na wylocie z komory paleniskowej oraz na niedopał.



Rys. 8. Porównanie temperatur wylotowych spalin

Fig. 8. Outlet temperature



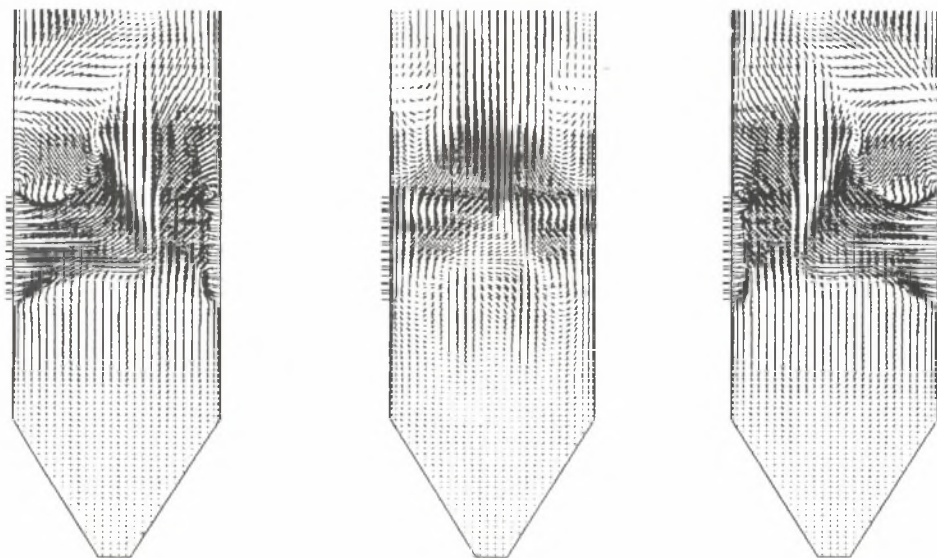
Rys. 9. Porównanie części niespalonych węgla

Fig. 9. Unburned carbon

EC SIEKIERKI

Kocioł nr 14 w EC Siekierki był zmodernizowany w roku 1992. Był to jeden z pierwszych kotłów modernizowanych przez Rafako. Zakres modernizacji był ograniczony ze względu na wymagany niski koszt prac i obejmował zabudowę dysz OFA wraz z regulacją ilości powietrza, bez wymiany palników. Redukcja emisji NO_x wyniosła około 30% i nie była zadowalająca. Dlatego też, przy opracowywaniu oferty na modernizację kolejnych kotłów OP-430, wykonano szeroką analizę możliwości poprawienia redukcji emisji NO_x , przy możliwie najmniej niekorzystnym wpływie na przegrzew pary i zawartość części palnych w popiele. Optymalnym wariantem okazało się zastosowanie dwóch poziomów dysz OFA („dolne”, położone bezpośrednio nad palnikami i „górne” położone w odległości ~ 4 m od palników). W takim układzie obniżenie temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej wynosi tylko około 20°C , zaś ilość niespalonego węgla nie zwiększa się. Rozwiązanie takie nie było dotąd stosowane w takim zakresie do modernizacji kotłów, aczkolwiek pewne elementy były już sprawdzone z pozytywnym wynikiem w kotłach OP-120 w El. Skawina.

W celu umożliwienia korekty przegrzewu pary zachowano w modernizowanym palniku możliwość zmiany kąta nachylenia dysz. Przewiduje się



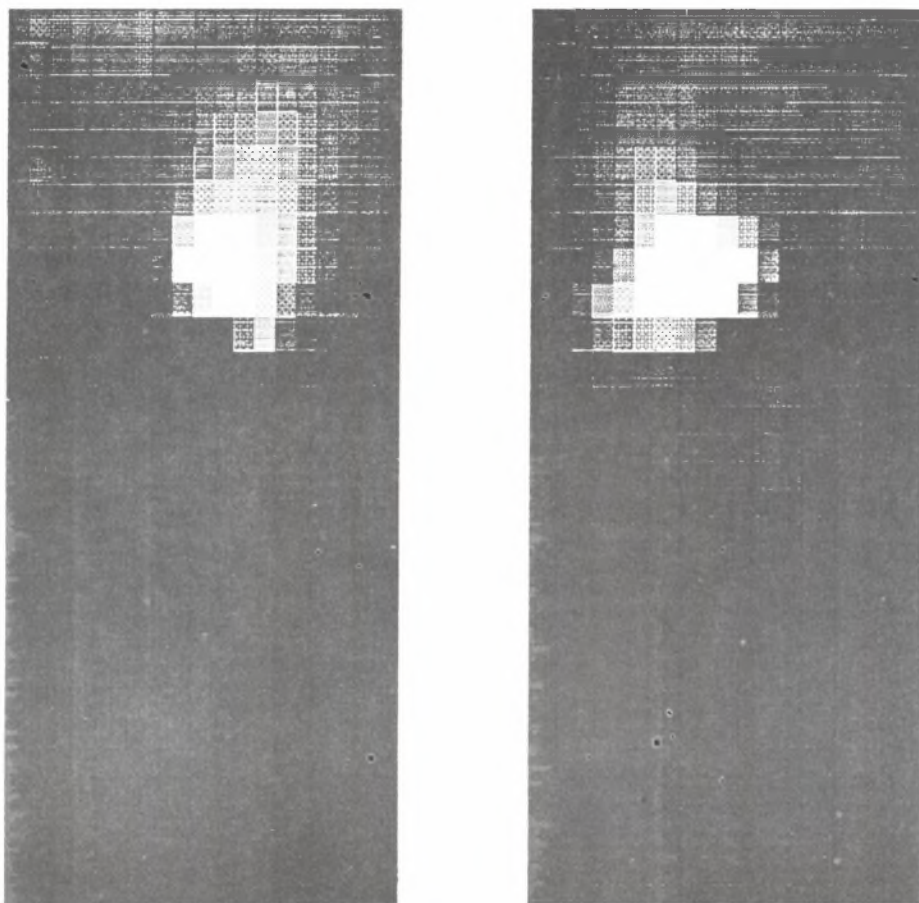
Rys. 10. Kocioł OP-430 – pola przepływów w wybranych przekrojach komory

Fig. 10. Flow areas in chosen furnace intersections – boiler OP-430

potrzebę takiej korekty w początkowym okresie eksploatacji kotła, do czasu uzyskania normalnego stopnia zabrudzenia ścian komory paleniskowej. Jednocześnie przewiduje się korektę powierzchni przegrzewacza pary, która będzie przeprowadzona po uzyskaniu rezultatów modernizacji paleniska.

Rysunki 8 i 9 (poz. 3) przedstawiają wpływ zabudowy dysz OFA na temperaturę spalin na wylocie z komory paleniskowej oraz na niedopał.

Rysunek 10 przedstawia pola przepływów w wybranych przekrojach komory paleniskowej dla wariantu o zwiększonej liczbie podziałów siatki różnic-



Rys. 11. Kocioł OP-430 – obciążenie cieplne ścian (kW/m^2)

Fig. 11. Thermal fluxes to furnace walls (kW/m^2) – boiler OP-430

wej. Zadano tutaj 140000 węzłów siatki różnicowej, co uwidacznia się w wydłużonym czasie obliczeń.

Na rys. 11 pokazano obciążenie cieplne ścian z punktowym ich obciążeniem. Widoczny jest rejon minimalnego strumienia związany z chłodzeniem ściany przez „zimny” strumień z palnika i rejon związany z obecnością jądra płomienia.

WNIOSKI

Kompleksowe, trójwymiarowe obliczenia komory paleniskowej mogą ułatwić rozwiązanie wielu problemów związanych z bieżącą eksploatacją komory paleniskowej lub planowaną modernizacją np. układu palnikowego lub zabudową dysz OFA. Można szczegółowo przeanalizować, jak planowane zmiany układu zasilania, rodzaju węgla lub przemiału wpływają na: wymianę ciepła, pola temperatur, niedopał, zagrożenie erozji powierzchni komory itp.

Zagadnienia te można analizować dla różnych obciążeń kotła. Takie przedsięwzięcia, jak spalanie z niedomiarem tlenu czy recyrkulacja spalin, należące do najtańszych sposobów ograniczenia emisji NO_x , wymagają szczegółowej analizy wymiany ciepła w komorze. Ich nierozważne stosowanie może wywołać niedopał, żużlowanie oraz niekorzystną charakterystykę cieplną kotła. Z przeprowadzonych analiz wynika, że zastosowanie dysz OFA powoduje zmianę rozkładu temperatur w komorze paleniskowej oraz strumieni ciepła przejmowanego przez ściany. Powoduje to najczęściej obniżenie temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej oraz zwiększenie ilości niespalonego węgla. Z przeprowadzonej analizy obiektów wynika, iż obniżenie niedopału jest możliwe w wyniku odpowiedniego ustawienia dysz OFA (analiza WP-120 EC Wrocław). Różnica temperatur zależy od gabarytów komory, ilości podawanego powietrza oraz miejsca zabudowy dysz OFA (OP-430 EC Siekierki). Efekt ten ma bardzo istotne znaczenie dla wymiany ciepła w przegrzewaczu. W skrajnych przypadkach może powodować problemy z uzyskaniem pełnego przegrzewu pary w szerokim zakresie obciążeń.

Program COMSTAR jest ciągle rozwijany. Przewiduje się uzupełnienie go o możliwości obliczenia emisji tlenków azotu i tlenków węgla. Możliwe będzie również przeprowadzenie obliczeń dla paliw ciekłych i gazowych. Zakup nowego, bardziej wydajnego sprzętu umożliwi prowadzenie obliczeń z większą dokładnością oraz bardziej wszechstronne modelowanie kształtu komory paleniskowej (np. paleniska cyklonowe, paleniska typu „U” itp.).

Program COMSTAR jest uniwersalnym narzędziem, niezwykle przydatnym w procesie projektowania kotłów.

Recenzent: Dr hab. inż. Marek PRONOBIS

Wpłynęło do Redakcji 9.08.1994 r.

Abstract

Presented computation program is the result of many years of research of Boiler Engineering Company RAFAKO and Wrocław Technical University on problems of mathematical modelling of flows with combustion.

COMSTAR program computes three-dimensional flow, combustion and heat exchange in the combustion chamber of a power boiler supplied by pulverized fuel burners. The geometric area of computation can comprise the furnace up to the area of platen superheaters.

COMSTAR calculates three-dimensional areas of: velocity, pressure, turbulence parameters, concentration of volatile parts, gas temperature, thermal fluxes inclusive of convective radiation fluxes to the furnace.

Output values of flow area can be shown in the form of graphical vector field (by means of arrows or traces of motion of zero mass particles). Areas of scalar quantities can be shown in graphical form by means of isolines or three-dimensional drawings. Numerical values like mean outlet values, total flux taken over by evaporator or wall superheater, maximum fluxes, etc. are also derived.

Such undertaking like combustion with oxygen depletion or gas recycling belong to the cheapest ways of limiting NO_x emission and require detailed analysis of heat exchange in the furnace. Their thoughtless application can cause formation of unburned carbon, slagging and unfavourable thermal characteristic of the whole boiler. In turn in dry flue gas desulfurization methods and non-catalytic methods of NO_x reduction only good knowledge of temperature areas and aerodynamics of the chamber can enable optimum location of injection of reagents to the chamber.

Complex, three-dimensional computation of the furnace can facilitate solution of many problems related to current operation of the furnace of scheduled retrofit: for instance burner system or installing of OFA nozzles.

One can analyse in detail how planned changes of supply system, coal type and milling influence the heat exchange temperature areas, unburned carbon and erosion of furnace surfaces, expected level of NO_x emission, etc.

These problems can be analysed for various boiler loads.