

Tomasz GOLEC

Bogusław BOGUCKI

Instytut Energetyki

Zakład Procesów Ciepłych

Zbigniew MODLIŃSKI

Politechnika Wrocławska

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów

MODELOWANIE PŁOMIENI PYŁOWYCH W PRAKTYCE INŻYNIERSKIEJ

Streszczenie. Przedstawiono problemy związane z modelowaniem płomieni pyłowych. Omówiono założenia stosowane przy konstrukcji modeli numerycznych. Przedstawiono metodykę obliczeń numerycznych umożliwiającą obliczenia praktyczne na komputerach typu PC/AT. Pokazano przykłady zastosowania modeli obliczeniowych w technice kotłowej.

1. WSTĘP

Węgiel, mający decydujące znaczenie w krajowym bilansie energetycznym, jest paliwem trudnym przy założeniu jego efektywnego i czystego spalania.

Powszechnie stosowane dotychczas metody projektowania palenisk kotłowych w zakresie aerodynamiki i reakcji chemicznych oparte są w znacznej mierze na wiedzy uproszczonej i empirycznej. Bardziej wyszukane bywają metody używane do opisu wymiany ciepła w komorze paleniskowej kotła.

Wzrastające wymagania kontroli emisji szkodliwych gazów powstających w procesie spalania węgla (głównie NO_x i SO_2) uświadamiają niedostateczną znajomość podstawowych procesów fizycznych i chemicznych zachodzących w komorze paleniskowej i tym samym stymulują rozwój modelowania płomieni pyłowych.

Nowe perspektywy w tej dziedzinie otwierają ostatnie osiągnięcia związane ze wzrostem możliwości obliczeniowych komputerów (również osobistych) i rozwojem metod numerycznych w modelowaniu turbulentnych przepływów zawirowanych, przepływów dwufazowych oraz przepływów z reakcjami chemicznymi. Pojawiają się coraz lepsze możliwości wiarygodnego modelowania procesów spalania węgla, zwłaszcza, że w tym samym czasie wzrosło światowe zainteresowanie węglem jako surowcem, a w konsekwencji i wiedza o przebiegu jego reagowania.

W referacie, w sposób skrótowy, przedstawiono problemy związane z modelowaniem płomieni pyłowych oraz niektóre ze stosowanych aktualnie sposobów ich rozwiązania. Pokazano również przykłady praktycznego zastosowania programów obliczeniowych.

2. PROBLEMY MODELOWANIA PŁOMIENI PYŁOWYCH

Palnik pyłowy, palnik wirowy, komora paleniskowa kotła, cyklonowa komora spalania, generator MHD to przykłady urządzeń, gdzie znajduje zastosowanie modelowanie płomieni pyłowych. W wyniku obliczeń uzyskiwane są informacje dotyczące prędkości gazu, przebiegu spalania, rozkładów temperatur i koncentracji reagujących składników, torów i wypalenia cząstek pyłu, tworzenia się szkodliwych związków chemicznych. Informacje te są istotne zarówno przy projektowaniu palników i komór spalania, jak i przy opracowywaniu instalacji doprowadzania addytywów (np. suche odsiarczanie).

Symulacja numeryczna spalania pyłu węglowego wymaga jednoczesnego uwzględnienia szeregu wzajemnie powiązanych zjawisk, co pokazano poglądowo na rys.1. Należą do nich:

- przewodzenie i przejmowanie ciepła,
- radiacyjna wymiana ciepła,
- turbulentny przepływ gazu,
- ruch cząstek pyłu,
- odgazowanie węgla,
- spalanie części lotnych,
- spalanie pozostałości koksowej,
- tworzenie się popiołu i żużlu,
- powstawanie substancji toksycznych.

To, które zjawiska kontrolują proces spalania, zależy od realizowanej technologii spalania. Opis zjawisk należy więc uzupełnić parametrami charakteryzującymi konkretne urządzenie techniczne, takimi jak:

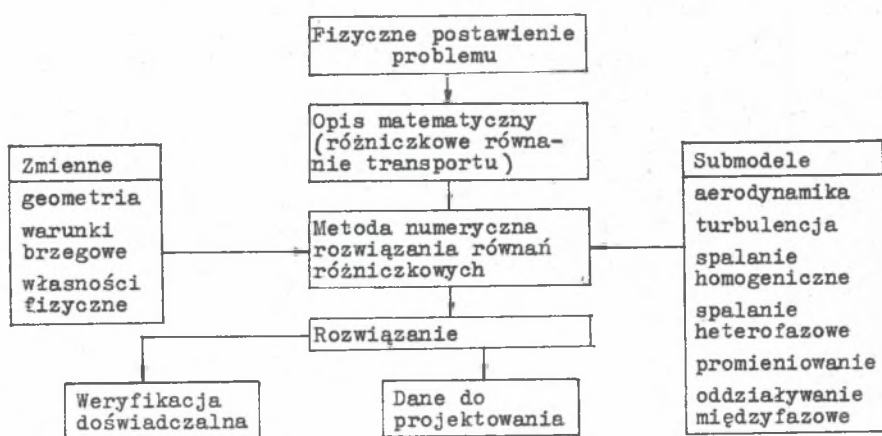
- wielkość i kształt komory spalania,
- materiał i temperatura ścian,
- rodzaj węgla - jego skład, przemiał, reakcyjność,
- rodzaje, ilość i konfiguracja palników,
- parametry czynników pierwotnego i wtórnego.

Pełna symulacja takiego układu jest zagadnieniem złożonym. W przeszłości kompleksowe modele spalania były limitowane zarówno możliwościami komputerów, jak i znajomością poszczególnych procesów. Ograniczono się wówczas do przybliżeń zero- i jednowymiarowych [1, 2]. W pierwszym przypadku palenisko rozważane jest jako reaktor z idealnym wymieszaniem, a w drugim rozpatrywany jest przepływ tłokowy. Modele te, będące do dziś podstawowym narzędziem dla projektantów kotłów, wykorzystywane są w analizie strefowej komór spalania [3,4]. Modele dwuwymiarowe, a potem trój-

wymiarowe pojawiły się w latach siedemdziesiątych. Jako przykłady można podać program GENMIX [5] dla przepływów parabolicznych, szczególnie przydatny do opisu zjawisk w przepływach swobodnych (palniki strumieniowe), czy programy CORA-2 [6] i PCGC2 [7], mające zastosowanie do przepływów eliptycznych z recyrkulacją (osiowosymetryczne komory spalania, palniki wirowe). Coraz bliższe powszechnego zastosowania są trójwymiarowe modele komór paleniskowych kotłów energetycznych [8,9,10].

3. MODELOWANIE PŁOMIENI PYŁOWYCH

Poniżej schematycznie pokazano zagadnienia uwzględniane przez wspomniane kody komputerowe.



Dalej zestawiono założenia przyjmowane zwykle dla poszczególnych modeli cząstkowych.

Faza gazowa

Faza gazowa traktowana jest jako ciągły, turbulentny, reagujący ośrodek. Ośrodek ten opisują lokalne równania bilansowe. Rozpatrywany jest przepływ ustalony w czasie. Własności gazu (gęstość, temperatura, koncentracje składników) fluktuacją przypadkowo zgodnie z pewną zadaną funkcją gęstości prawdopodobieństwa (PDF) charakteryzującą turbulencję. Turbulencja modelowana jest przy pomocy modelu $k-\epsilon$ [11] opisanego uśrednionymi (w sensie Favre'a) równaniami transportu kinetycznej energii turbulencji k i szybkości jej dysypacji ϵ . Wpływ obecności cząstek stałych na turbulencję fazy gazowej zadawany jest przy pomocy zależności empirycznych. Przyjmuje się, że reakcje chemiczne są szybkie w porównaniu z czasem mieszania

turbulentnego (nie dotyczy to reakcji powstawania tlenków azotu), a ich szybkość ograniczona jest mieszaniem składników. Własności gazu są wyznaczone przy założeniu lokalnej równowagi termodynamicznej.

Czastki pyłu węgla

Maksymalna koncentracja cząstek węgla w płomieniu pyłowym nie przekracza 1 kg/m^3 ; cząstki są rozproszone i faza stała nie jest traktowana jako kontinuum. Różne cząstki pyłu znajdujące się w tym samym położeniu mogą wykazywać zupełnie odmienne własności ze względu na różne tory i historię spalania. Cząstki rozpatrywane są w postaci serii trajektorii. Własności cząstek i ich wypalenie śledzone są wzdłuż trajektorii.

Reagowanie węgla

Reakcje cząstek węgla traktowane są jako wolne w porównaniu z czasem turbulentnego mieszania. Pozwala to na obliczenia spalania cząstek wzdłuż trajektorii w oparciu o uśrednione, niefluktujące parametry gazu. Cząstka węgla składa się z substancji węglowej (części lotne i pozostałość koksowa), popiołu i wilgoci. Popiół jest składnikiem inertnym. Wilgość dodawana jest do fazy gazowej; zakłada się wysuszenie węgla przed wprowadzeniem do paleniska. Węgiel odgazowuje i spala się w wyniku szeregu reakcji równoległych o różnych energiach aktywacji. Przyjmuje się, że części lotne wydzielone z węgla mają stały skład. Wnętrze cząstki ma taką samą temperaturę jak jej powierzchnia.

Promieniowanie

Płomień pyłowy jest złożonym układem wieloskładnikowym, niejednorodnym, anizotropowym, emitującym i absorbującym. Płomień może być otoczony emitującymi i absorbującymi ściankami. Ostatnie badania [12] podkreślają znaczenie dokładnego oszacowania własności optycznych mieszanin pyłowo-powietrznych w obliczeniach radiacji energii.

Rozwijane w oparciu o przedstawione założenia kody komputerowe mogą już być stosowane do obliczeń praktycznych. Pozwalają one na oddanie większości istotnych własności układów dwufazowych ze spalaniem.

Ze względu na znane trudności związane z wykorzystaniem współrzędnych Eulera do opisu obydwu faz - gazowej oraz dyspersyjnej - w modelu matematycznym wykorzystywane jest ujęcie Eulera dla fazy gazowej oraz ujęcie Lagrange'a dla cząstek pyłu. Podejście takie jest preferowane ze względu na uzyskiwanie prostszych algorytmów obliczeniowych. Jednocześnie podejście to umożliwia śledzenie czasowo-przestrzennej ewolucji cząstek pyłu wylatujących z palnika i diagnostykę procesu z punktu widzenia warunków zapłonu i spalania pyłu.

Oddziaływanie fazy gazowej na "historię" cząstek ujęte jest w równaniu ruchu cząstek w postaci siły oporu. Z drugiej strony oddziaływania fazy stałej na ruch gazu uwzględniane są przez odpowiednie źródła zawarte w równaniach dla fazy gazowej zgodnie z metodą PSIC [13, 14]. Rozpatrywane przepływy ze spalaniem są zwykle przepływami eliptycznymi, co oznacza m.in., że zaburzenie wprowadzone w dowolnym punkcie obszaru, wpływa na zmianę warunków w całym obszarze. Z tego względu konieczne jest uwzględnienie pełnych równań transportu pędu, masy i energii z członami konwekcyjnymi i dyfuzyjnymi we wszystkich trzech kierunkach przestrzennych. Mimo dużej komplikacji i różnorodności równań wyjściowych można je wszystkie sprowadzić do jednakowej postaci:

$$\text{konwekcja} + \text{dyfuzja} = \text{źródła.}$$

Dla dowolnej zmiennej uogólnionej ϕ transportowanej w obszarze obliczeniowym (może to być masa, pęd, entalpia, koncentracja składnika itp.) równanie bilansowe ma postać:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W \phi) - \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) +$$

$$- \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z}) = S_{\phi} + \dot{S}_{p\phi}$$

Pozwala to na stosowanie tego samego algorytmu numerycznego dla różnych zmiennych, które różnią się tylko współczynnikiem turbulentnego transportu Γ_{ϕ} i postacią członów źródłowych fazy gazowej S_{ϕ} i od cząstek $S_{p\phi}$. Podstawowe równania fazy gazowej zestawiono w tabl.1

Tablica 1 Podstawowe równania fazy gazowej

Równanie	ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}	$S_{p\phi}$
Ciągłości	1	0	0	$-\frac{dm_p}{dt}$
Składowe pędu w kierunku x_i	U_i	$\frac{M_{ef}}{G_{ef}}$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + S_{\tau}$	$-\frac{d}{dt}(m_p U_{pi})$
Kinetyczna energia turbulencji	k	$\frac{M_{ef}}{G_{ef}}$	$G_k - \rho \epsilon$	0
Szybkość dysypacji kinetycznej energii turbulencji	ϵ	$\frac{M_{ef}}{1,22 G_{ef}}$	$(1,44 G_k - 1,92 \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k}$	0
Entalpia	h	$\frac{M_{ef}}{G_{ef}}$	$-Q_R$	$-\frac{d}{dt}(m_p h_p)$
Składnik j. fazy gazowej	m_j	$\frac{M_{ef}}{G_{mj}}$	K_j	$K_j p$

W tabl. 1 przyjęto następujące oznaczenia: U_i - składowe prędkości, S_{τ} - człon lepkościowy, k - kinetyczna energia turbulencji, ϵ - szybkość dysypacji kinetycznej energii turbulencji, G_k - człon generacyjny turbu-

lencji, h - entalpia, m_j - koncentracja składnika j , K_j - szybkość produkcji składnika j w wyniku reakcji chemicznych, μ_{ef} - lepkość turbulentna, C - liczba podobieństwa dla transportu turbulentnego danej wielkości, Q_R - źródło promieniowania. Indeks p dotyczy cząstek.

Różnicową postać ogólnego równania transportu uzyskuje się przez całkowanie równania po objętości kontrolnej [5]. W celu dyskretyzacji równań transportu używana jest siatka różnicowa, w której węzłach określone są wartości zmiennych zależnych oraz parametry termodynamiczne mieszaniny. Węzły siatki są też centralnymi punktami objętości kontrolnej.

Uzyskany układ algebraicznych równań różnicowych jest układem silnie nieliniowym o współczynnikach zależnych od innych zmiennych ϕ . Przy rozwiązywaniu układu równań algebraicznych dla danej zmiennej stosowany jest zmodyfikowany algorytm TDMA [15], przy czym równania są linearyzowane przez założenie stałości współczynników, które są wyznaczone w oparciu o oszacowane lub obliczone wcześniej wartości pozostałych zmiennych ϕ .

Przy obliczeniach przepływu izotermicznego uwzględnione są jedynie równania 1-4 z tabl.1, które rozwiązywane są przy założeniu $\phi = \text{const}$.

W obliczeniach nieizotermicznych rozpatrywany układ równań rozszerzany jest o równanie entalpii i dwa równania dla promieniowania. W układach reagujących dodatkowo uwzględniane są równania bilansowe reagentów.

Do otrzymania rozwiązania zbieżnego dla wszystkich wielkości ϕ stosowany jest proces iteracyjny.

W modelu cząstki pyłu poruszają się w obszarze o zadanym polu prędkości i temperatur gazów. Tory cząstek obliczane są w wyniku całkowania równań ruchu. W czasie przelotu cząstek przez kolejne objętości kontrolne utworzone przez siatkę obliczeniową obliczana jest ich aktualna prędkość, masa i entalpia. Różnice masy, pędu i entalpii cząstek na wlocie i wylocie objętości kontrolnej stanowią odpowiednie źródła występujące w równaniach dla fazy gazowej. Pył dzielony jest na szereg frakcji o stałej średnicy cząstek, zaś powierzchnie dysz pyłowych zastępowane są przez szereg wlotów szczelinowych.

Zachowanie się cząstek określonej frakcji pyłu wylatujących z danego wlotu szczelinowego wyznaczone jest na podstawie śledzenia cząstki reprezentatywnej poruszającej się w uśrednionym polu prędkości gazów. Zakłada się tym samym, że tory wszystkich cząstek danej frakcji, wylatujących z jednego wlotu szczelinowego, pokrywają się.

W rzeczywistości, na skutek oddziaływania na cząstki pulsacji prędkości gazów, jakie mają miejsce w przepływie burzliwym, tory poszczególnych cząstek są różne. Gęsty i wąski przy wylocie z palnika strumień cząstek ulega rozproszeniu. Zjawisko to modelowane jest w przepływach dwufazowych dwojako.

Według pierwszego sposobu przyjmowany jest analogiczny do dyfuzji gazu model dyfuzji cząstek z obszaru o ich wyższej koncentracji do obszaru o koncentracji niższej, przy czym szybkość dyfuzji proporcjonalna jest

do gradientu koncentracji cząstek [16], a współczynnik proporcjonalności odpowiada współczynnikowi dyfuzji dla gazów i wyznaczany jest w oparciu o badania eksperymentalne. W metodzie tej do obliczenia prędkości cząstek potrzebna jest informacja o rozkładzie koncentracji cząstek w przepływie, niemożliwa do uzyskania podczas śledzenia torów cząstek w układzie Langrenga.

Drugim stosowanym podejściem jest uwzględnienie statystycznej dyspersji torów cząstek [17]. Cząstki na swej drodze w ośrodku gazowym przelatują przez kolejne wiry, w których składowe wektora prędkości u , v , w różnią się od wartości średniej \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} w danym punkcie przepływu o wielkość pulsacji u' , v' , w' :

$$u = \bar{u} + u'$$

$$v = \bar{v} + v'$$

$$w = \bar{w} + w'$$

Wielkość pulsacji zmienia się losowo w czasie. W modelu przyjmowany jest Gaussowski, izotropowy rozkład zmiennych losowych u' , v' , w' o wartości średniej i odchyleniu standardowym wynikającym z modelu turbulencji. Statystyczna dyspersja cząstek, stosunkowo łatwa do zamodelowania numerycznego, znacznie wydłuża czas obliczeń. Wynika to z faktu, że aby otrzymać pewien reprezentatywny dla danej frakcji i dla danego wlotu szczelinowego zbiór trajektorii, należy prześledzić losy kilkudziesięciu cząstek pyłu. Ponadto niezbędna jest znajomość rozkładu wartości k i ϵ w polu przepływu gazu (parametry te są obliczone w części aerodynamicznej modelu dwufazowego). Dla obliczeń wymiany ciepła w płomieniu pyłowym niezbędne jest poprawne uwzględnienie promieniowania.

Metody strefowa [18] i Monte Carlo [19] umożliwiają dokładną aproksymację zagadnienia radiacji w ośrodkach absorbująco-emitujących, jednak duży czas obliczeń ogranicza wykorzystanie tych metod w obliczeniach ciepłych komór paleniskowych kotłów energetycznych. Konieczność wykorzystania bardziej efektywnych metod obliczania radiacji pojawiła się zwłaszcza obecnie, kiedy obliczenia komory obejmują zjawiska przepływu, turbulencji, kinetyki reakcji węgla, konwekcji ciepła itd.

Metody strumieniowe [20], oparte na różniczkowych przybliżeniach radiacji, umożliwiły opracowanie sprawnych algorytmów obliczania wielu zagadnień przepływu ze spalaniem. Jednak dla przypadków, gdzie radiacyjny transport ciepła odgrywa rolę decydującą, metody te wnoszą duży błąd obliczeń spowodowany przyjmowanym w metodzie a priori rozkładem kątowym wektora intensywności promieniowania. Dokładniejsze rezultaty pozwala uzyskiwać metoda "dyskretna" [21], będąca odmianą metody Monte Carlo, wymagająca jednak dużych czasów obliczeń. W pełnym modelu przepływu dwufazowego wykonywane są kolejno obliczenia dla gazu, następnie dla cząstek w obliczonym wcześniej polu przepływu gazu i ponownie dla gazu z uwzględnieniem źródeł od cząstek pyłu. Dwie ostatnie sekwencje są powtarzane aż do uzyskania zbieżności rozwiązania. W ogólnym przypadku przy uwzględnieniu wie-

lu reakcji chemicznych należy rozwiązać jednocześnie nawet kilkadziesiąt równań dla fazy gazowej i wielokrotnie powtórzyć obliczenia dla kilku tysięcy cząstek pyłu. Można to uczynić w ramach jednego dużego, uniwersalnego programu obliczeniowego, jednak w naszych warunkach takie podejście nie jest optymalne. W Polsce najbardziej rozpowszechnione są stosunkowo wolne komputery osobiste typu PC/XT lub PC/AT o pamięci operacyjnej ograniczonej do 640 kB, co dla obliczeń układów trójwymiarowych jest niewystarczające. Ponadto nie wszystkie równania wymagają tej samej liczby iteracji do uzyskania zbieżnego rozwiązania dla całego układu.

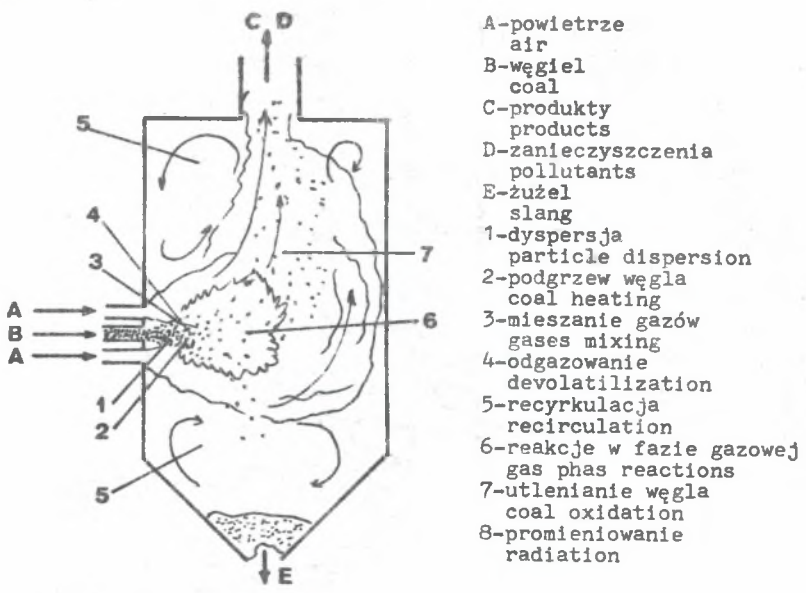
Schemat podejścia alternatywnego umożliwiającego wykonanie obliczeń na dostępnym sprzęcie komputerowym pokazano na rys.2. W miejsce jednego programu zastosowano system kilku mniejszych bloków programów komunikujących się między sobą poprzez dyskowe zbiory danych i pośrednich wyników obliczeń. Zaletą takiego systemu, obok możliwości użycia do obliczeń komputerów osobistych, jest możliwość niezależnego rozwijania poszczególnych bloków - np. zastosowanie innych modeli fizycznych zjawisk cząstkowych (radiacji, odgazowania węgla itp.). Można przy tym wykorzystać wszystkie bądź tylko niektóre bloki programów. Podstawowe dane do obliczeń wprowadzane są jednokrotnie. Program przygotowania danych zakłada zbiory robocze, wykorzystywane w dalszych obliczeniach przez poszczególne bloki programów. Najwięcej iteracji wymaga blok aerodynamiki. Nieizotermiczny charakter przepływu uwzględniany jest w obliczeniach aerodynamicznych poprzez gęstość czynnika wyznaczoną w bloku wymiany ciepła i reakcji chemicznych. Obliczenia dla cząstek prowadzone są tylko raz po każdorazowym uzyskaniu zbieżnego rozwiązania dla prędkości gazu. Obok śledzenia wypalenia cząstek w bloku tym obliczane są źródła masy i entalpii wykorzystywane w bloku wymiany ciepła, a także rozkład cząstek w przesłoniętej komory spalania niezbędny do obliczeń w bloku radiacji. Wprowadzone dane, a potem wyniki otrzymywane na każdym etapie obliczeń można oglądać na monitorze bądź wykreślić dzięki blokowi programów graficznych.

4. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

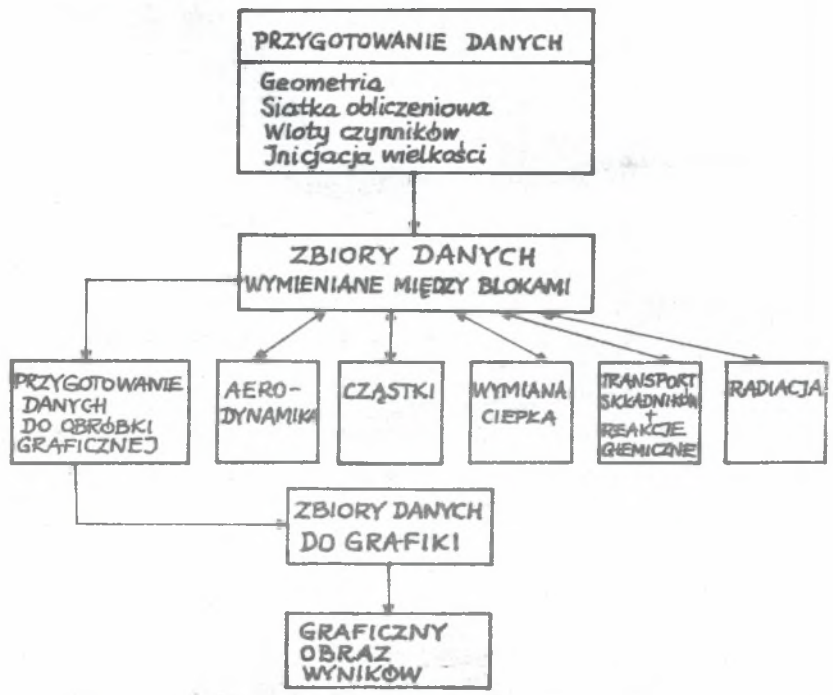
Poniżej przedstawiono przykłady praktycznego wykorzystania modelowania przepływów dwufazowych przy opracowywaniu modernizacji kotłów.

Palnik rozruchowy PRS-12/20 dla kotłów OP-230 i PK-10 w El.Skawina

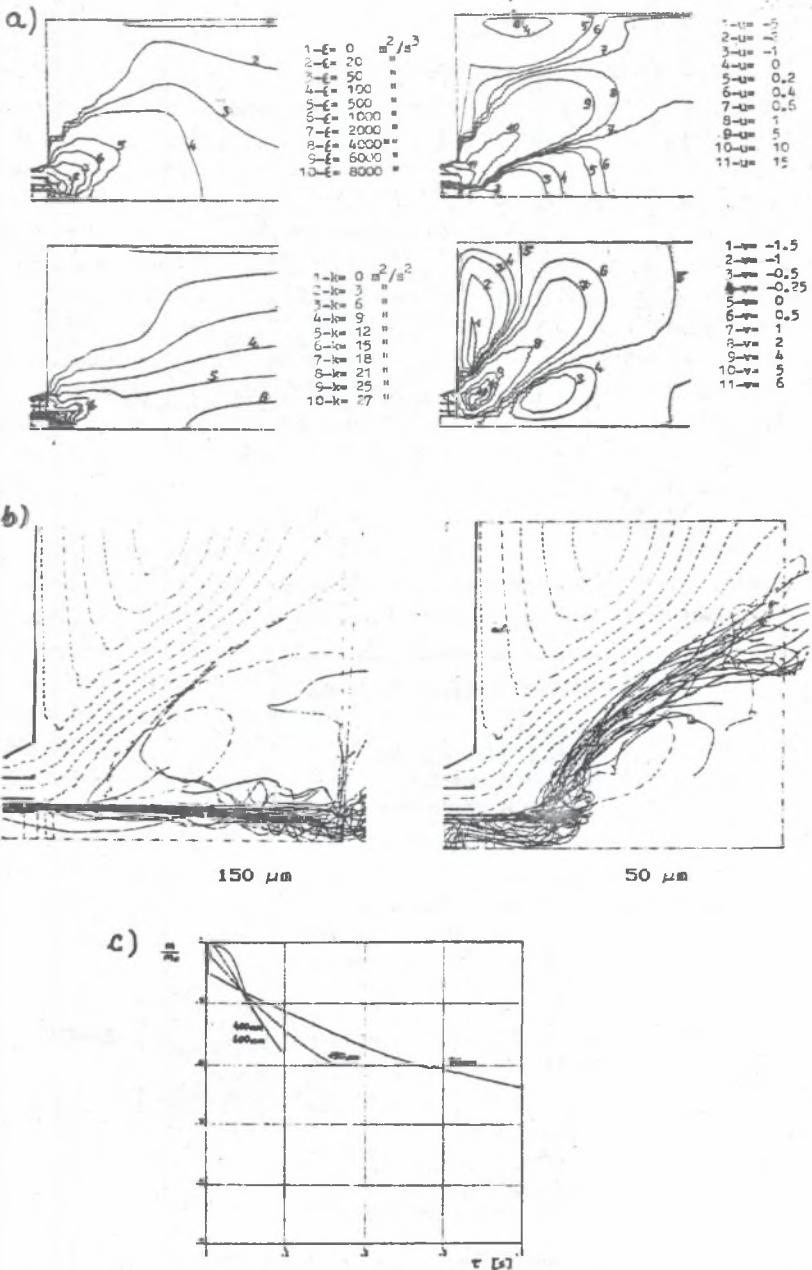
Obliczenia numeryczne wykorzystywane były do określenia aerodynamiki przepływu za palnikami wirowym i określenia torów oraz wypalenia poszczególnych frakcji pyłu. Wyniki posłużyły do optymalizacji konstrukcji palnika. Na rys. 3 pokazano niektóre rezultaty obliczeń. Rys.3a - izolinie składowych prędkości (osiowa i promieniowa) oraz parametrów turbulencji.



Rys.1. Zjawiska występujące w płomieniu pyłowym
 Fig.1. Processes occur in pulverized-coal flame



Rys.2. Schemat obliczeń płomieni pyłowych
 Fig.2. Calculation schema for pulverized - coal flame



Rys.3. Niektóre rezultaty obliczeń palnika wirowego PRS-12/20

Fig.3. Some results of calculations of the swirl burner PRS-12/20

Rys.3b - trajektorie cząstek 150 μm i 50 μm z uwzględnieniem dyspersji stochastycznej. Rys.3c - wypalenie cząstek poszczególnych frakcji.

Kocioł Pauker 130 t/h w El.Konin

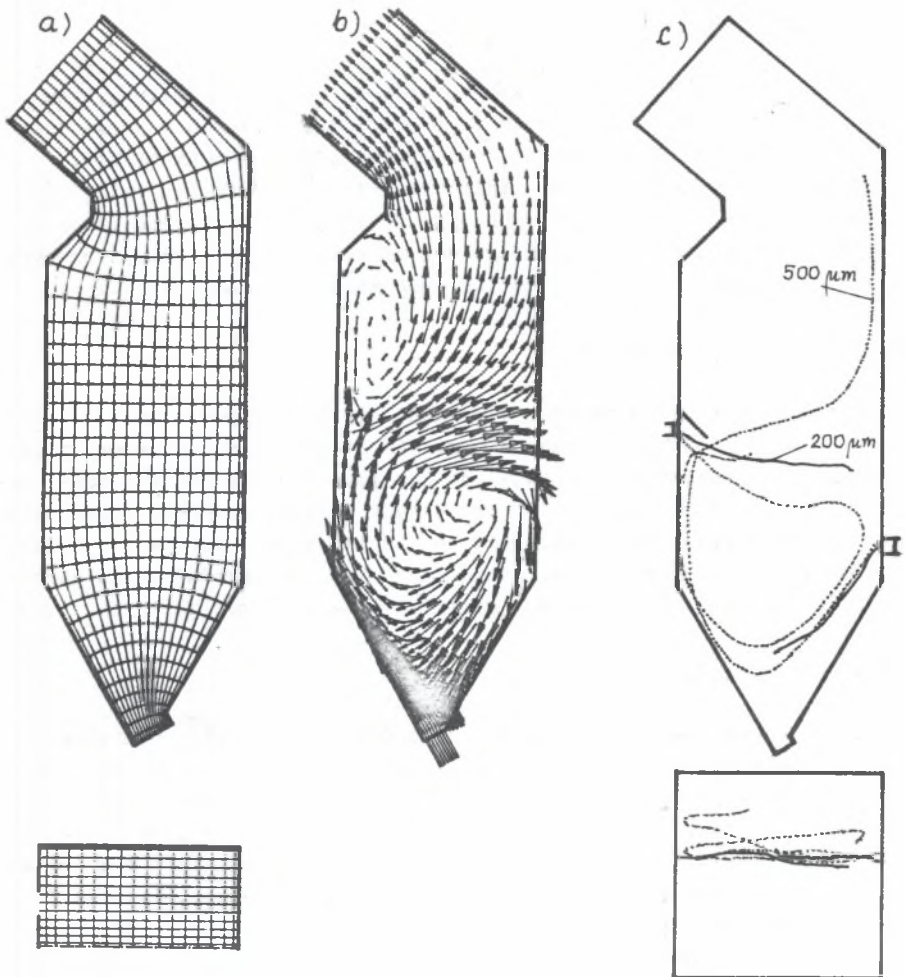
Obliczenia wykorzystano przy doborze sposobu zasilania kotła węglem i powietrzem dla propozycji zastosowania technologii spalania w wirze nisko-temperaturowym. Przykład obliczonej aerodynamiki pokazano na rys.4b. Ze względu na specyfikę problemu konieczne było przyjęcie krzywoliniowej siatki ortogonalnej - rys.4a. Technologia spalania w wirze przewiduje spalanie paliwa grubo mielonego, dlatego też rozważano torę i czasy przebywania w komorze cząstki paliwa aż do ich wypalenia - rys.4c.

Kocioł BB-1150 w El.Bełchatów

Analizowano rozkład temperatur i wymianę ciepła w komorze paleniskowej kotła. Rys.5a przedstawia rozkład strumienia ciepła do ścian komory paleniskowej kotła. Znajomość tego rozkładu znacznie ułatwia projektowanie parownika. W przypadku kotła BB-1150 projektant założył zawyżoną ilość ciepła przejmowanego przez parownik. Fakt ten, stwierdzony w czasie eksploatacji, potwierdzają również wyniki obliczeń. Na rys.5b przedstawiono porównanie średnich temperatur spalin z obliczeń i założeń projektowych.

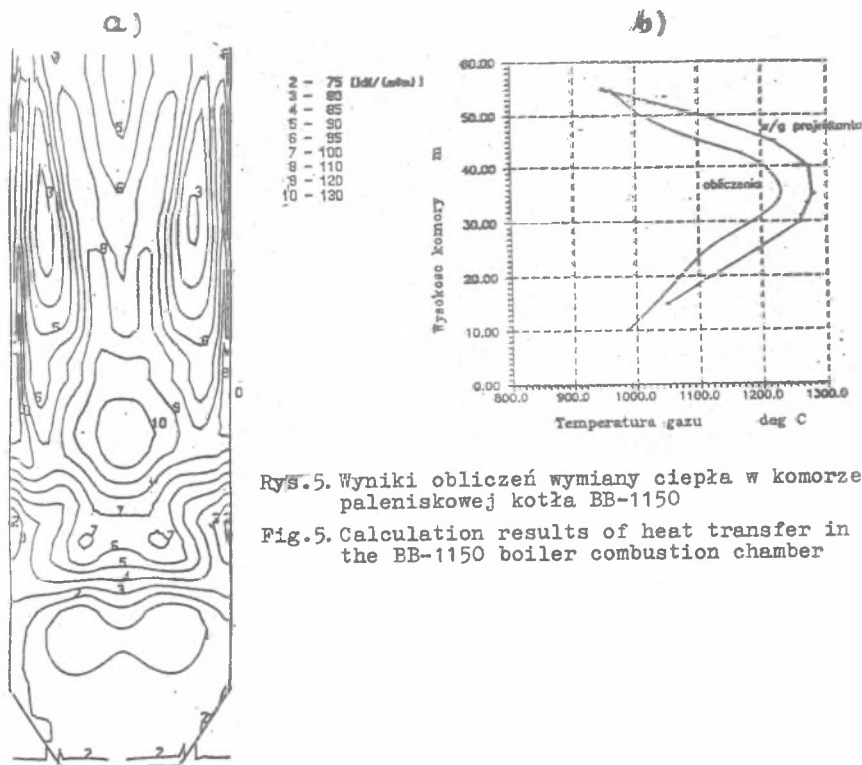
Kocioł OP-650 w El.Dolna Odra

Rozważano wpływ modernizacji palników pyłowych (palniki o obniżonej emisji NO_x) na warunki pracy komory paleniskowej. Obliczenia prowadzono dla różnych kątów pochylenia palników i ustawienia kierownic powietrza wtórnego. Analizowano aerodynamikę, wypalenie cząstek i wymianę ciepła w komorze paleniskowej. Na rys.6 pokazano wektory prędkości gazu przy ścianie (a) w środku komory (b) oraz w przekrojach poprzecznych. Rysunek 7 przedstawia trajektorie cząstek pyłu wylatujących z jednego naroża komory dla wielkości 50 μm (rys.7a) i 200 μm (rys.7b). Na rys.7c pokazano trajektorie cząstek 50 μm z uwzględnieniem dyspersji. Pozwala to uzyskać realne wypełnienie komory cząstkami pyłu, niezbędne w obliczeniach promieniowania.



Rys.4. Wyniki obliczeń dla spalania w wirze niskotemperaturowym

Fig.4. Calculation results for combustion in low-temperature vortex

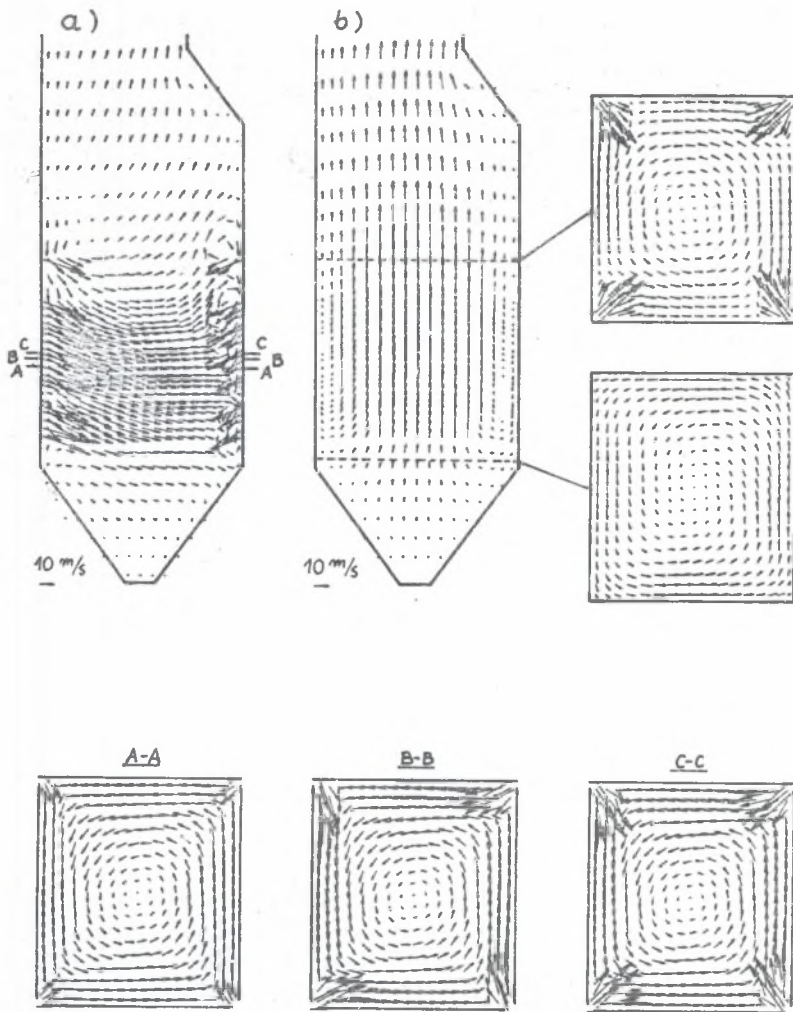


Rys. 5. Wyniki obliczeń wymiany ciepła w komorze paleniskowej kotła BB-1150

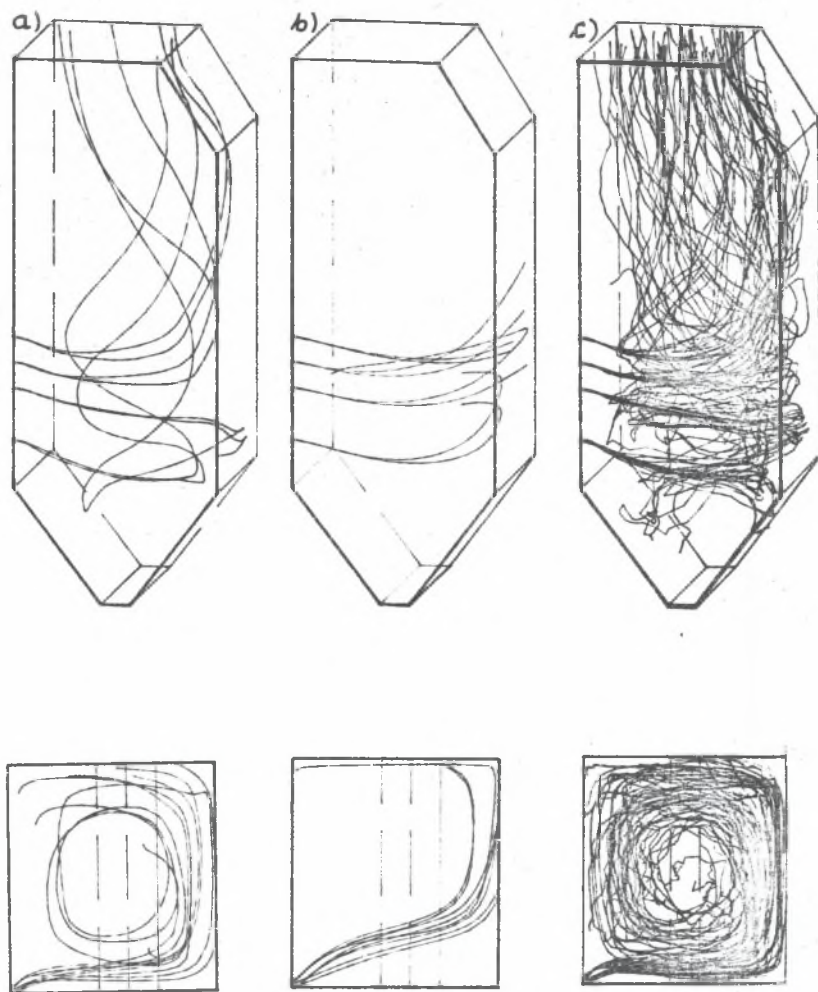
Fig. 5. Calculation results of heat transfer in the BB-1150 boiler combustion chamber

5. PODSUMOWANIE

Aktualny stan wiedzy i dostępny sprzęt komputerowy pozwala na wykonywanie obliczeń płomieni pyłowych lub ogólniej, przepływów dwufazowych ze spalaniem dla potrzeb praktyki inżynierskiej. Jakkolwiek konieczne i możliwe jest dalsze doskonalenie modelowania zjawisk towarzyszących spalaniu w celu uzyskania bardziej wiarygodnych wyników obliczeń, to obecnie dostępne środki umożliwiają już porównywanie wariantów konstrukcyjnych wielu urządzeń. Modelowanie procesów spalania jest, wśród różnych zastosowań przedstawionego systemu obliczeń, problemem najbardziej złożonym. System może być adaptowany i praktycznie wykorzystany do wszelkich zagadnień, w których występuje przepływ turbulentny gazu, transport cząstek pyłu, wymiana ciepła, transport masy itp. Możliwe zastosowania obejmują całe urządzenia, jak: komory spalania, piece przemysłowe, wymienniki ciepła lub ich elementy, tj.: kanały powietrza, spalin i innych gazów, czystych czy zapyłonych, separatory pyłu itp.



Rys.6. Obliczone wektory prędkości w palenisku
 Fig.6. Calculated velocity vectors



Rys.7. Trajektorie cząstek pyłu węglowego
Fig.7. Coal dust particles trajectories

LITERATURA

- [1] Csaba J., Legett A.D.: Prediction of Temperature Distribution Along a Pulverised-Coal Flame. J.Inst.Fuel, vol.37, 1964, str.440-448.
- [2] Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B., Hawksley P.G.W.: Combustion of Pulverised Fuel. The British Coal Association, Leatherhead, 1967.
- [3] Tiejłowoj Raschiot Kotielnych Agriegatow. Energia - Moskwa 1973.
- [4] Johnson T.R., Beer J.M.: The Zone Method Analysis of Radiant Heat Transfer: A Model for Luminous Radiation. Proceedings of Fourth Symposium on Flames and Industry: Predictive methods for industrial flames, London, 1972, str. 35.
- [5] Spalding D.B.: GENMIX: A General Computer Program for Two-Dimensional Parabolic Phenomena. Pergamon Press, 1977.
- [6] Moulton A., Srivatsa S.K.: CHAM Computer Code 201 CORA 2 A Computer Code for Axis-Symmetrical Combustion Chambers, December 1977, CHAM 201/1.
- [7] Smoot L.D., Smith P.J. - Coal combustion and gasification - Plenum Press, New York 1985
- [8] Fiveland, W.A. Wessel, R.A.: Furmo A Numerical Model for Predicting Performance of Three-Dimensional Pulverised Fuel Fired Furnaces. 1986 AIAA/ASME Heat Transfer Conference 1986 .
- [9] Lockwood, F.C., Shah N.G.: An Improved Radiation Solution Method for Incorporation in Combustion Prediction Procedures. 18th Symp. Int. on Combustion The Combustion Institute 1981
- [10] Richter W.: Fortschritte in der Modellierung der Wärmeübertragung und der rauchgasseitigen Ansatzbildung in Dampferzeugern. Energietechnik 6/1989.
- [11] Elsner J.W.: Turbulencja przepływów. PWN Warszawa 1987.
- [12] Wall T.F.Lowe A., et al.: Fly ash characteristics and radiative heat transfer in pulverised-coal-fired furnaces, Combust.Sci. Technol., 26, 1981
- [13] G.T.Crowe, M.P.Sharma, D.E.Stock.: The Particle-Source-In-Cell Psi-Cele Model for Gas-Droplet Flows. Journal of Fluids Engineering, Yune 1977, p.825
- [14] M.P.Sharma, D.K.Cornelius, I.G.Rici D.R.Dougan-Numerical Computation of Swirling Gas-Particle Flows. ASME Winter Annual Meeting, November 16-21, 1980
- [15] P.Kolniak, A.Przekwas, A.Wanik - Metoda modelowania przepływów recykulacyjnych. Prace Naukowe ITCiMP - Pol.Wrocławska. Serie: Monografie, Wrocław 1983
- [16] L.D.Smoot, P.O.Hedman, P.J.Smith - Pulverised - Coal Combustion Research at Brigham Young University - Progress in Energy and Combustion Science. Vol.10 No 4, 1984
- [17] J.S.Chuon, L.D.Chen, G.M.Faeth - Evaluation of a Stochastic Model of Particle Dispersion in a Turbulent Round Jet - AIChE Journal, Vol. 29, No 1, p.167
- [18] Hottel H.V., Sarafim A.F.: Radiative Transfer, McGraw-Hill, New York, 1967
- [19] Steward F.R., Guruz K.H.: Radiative heat transfer in absorbing, emitting and scattering media using the Monte Carlo method. Trans.Can.Soc.Mech.Eng. 3, 1975

- [20] Gosmann A.D., Lockwood F.C.: Incorporation of a flux method for radiation into a finite difference procedure for furnace calculations, Fourteenth Symposium Int. on Combustion, The Combustion Institute, 1973.
- [21] Lockwood F.C., Shah N.G.: A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures, Eighteenth Symposium Int. on Combustion, The Combustion Institute, 1981.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА НА ИНЖЕНЕРСКОЙ ПРАКТИКЕ

Р е з ю м е

Представлены проблемы связанные с моделированием пылеугольных факелов. Обсуждены предпосылки применяемые для конструкции математических моделей. Представлена методика численных расчетов делает их возможными на практике при использовании компьютеров типа PC/AT. Указаны примеры применения расчетных моделей в котельной технике.

COAL - DUST FLAME MODELLING IN ENGINEERING PRACTICE

S u m m a r y

Problems of coal-dust flame modelling have been presented. Assumptions applied in such numerical models have been described. Computational method which allows for practical calculation on PC/AT computer has been presented. Examples of application of computational models in boiler technic have been shown.