

PRZEWIDYWANIE STRUKTURY PRZEPIŹYWÓW WIELOFAZOWYCH W CYRKULACYJNYM PALENISKU FLUIDALNYM

PIOTR MOCEK

*Katedra Energetyki Procesowej, Politechnika Śląska
e-mail: piotr.a.mocek@polsl.pl*

Streszczenie. W artykule zaprezentowano metodę CFD modelowania struktury łoża w palenisku fluidalnym. Badania numeryczne sporządzone zostały dla rzeczywistych rozkładów ziarnowych dla kotła BCF100 Elektrociepłowni Katowice. Zastosowano własny model pozwalający przewidywać segregacje rozmiarów ziaren i ich kształtów pięciu przedziałów dyskretnego rozkładu dla paliwa, sorbentu i recyrkulantu wprowadzanego do paleniska.

1. WSTĘP

Modelowanie przepływów ciepła i masy w paleniskach przemysłowych jest istotnym elementem projektowania nowych urządzeń i modernizacji istniejących. Opiera się na założeniach mechaniki przepływów wielofazowych. Analiza zjawisk w tego typu przepływach nie jest do tej pory tak dalece rozwinięta, jak ma to miejsce w urządzeniach przepływowych z homogeniczną mieszaniną gazu. Pierwszą metodą stosowaną do opisu tego rodzaju złożonych przepływów jest silnie uproszczone podejście Haffa [1]. Podstawowych danych na temat wielkości przepływowych dostarcza również model pierścieniowo-rdzeniowy wraz z jego licznymi modyfikacjami [2-6]. Model pierścieniowo-rdzeniowy zakłada stan ustalony przepływów, w którym różnica pomiędzy strumieniem ziaren na danej wysokości łoża niesionym rdzeniem a strumieniem na tej samej wysokości opadającym jest dla całej kolumny niezmienna i równa strumieniowi ziaren unoszonych do cyklonu (lub innego rodzaju separatora). Model ten nie jest idealną metodą modelowania reżimów przepływowych, gdyż rzeczywista kompozycja łoża jest strukturą dynamiczną oscylująca wokół stanu ustalonego [7,8], natomiast pojawiające się w trakcie procesu struktury przepływowe są silnie zróżnicowane (aczkolwiek wszystkie są stanem fluidalnym). W palenisku cyrkulacyjnym występują regiony o parametrach charakterystycznych dla fluidyzacji pęcherzykowej, fluidyzacji turbulenta, profil pierścieniowo rdzeniowy i, w obszarach o niskiej koncentracji fazy stałej i wysokich prędkościach gazu – transport pneumatyczny. Ze względu na założenie symetrii przepływów w łożu wartości parametrów charakteryzujących cyrkulację wyznaczone z pomocą modeli opartych na symetrii pierścieniowo-rdzeniowej są wielkościami znacznie odbiegającymi od rzeczywistości.

W latach osiemdziesiątych wraz z rozwojem numerycznej mechaniki płynów (CFD) nastąpił intensywny rozwój metod obliczeniowych opartych na zasadach zachowania, równaniach

konstytutywnych i hipotezach zamykających sformułowanych dla fazy stałej i gazowej. Metody CFD pozwalają określić pola parametrów przepływowych w przestrzeni łoża fluidalnego i umożliwiają obliczanie warunków przepływowych w rejonach o złożonym kształcie. Istotne trudności występują przy formułowaniu opisu dla przepływu substancji ziarnowej odpowiadającego rzeczywistym parametrom ziarnowym łoża. Ziarna przebywające w obszarze spalania kotła opisać można rozkładem Rosina-Rammlera dla każdego składnika. W trakcie obliczeń ważne jest również osiągnięcie stanu pseudoustalonego zarówno pól przepływowych jak i znajdującej się wewnątrz kotła mieszaniny ziarnowej.

Spośród dostępnych metod najczęściej wykorzystywane, jako względnie stabilne numerycznie i dające prawidłowe rezultaty, jest podejście eulerowskie. Na chwilę obecną ta metoda modelowania spośród metod CFD może być uznana za względnie najefektywniejszą. Zarówno przepływ gazu, jak i ziaren opisany jest przez oddzielne równania. Dokładny opis podejścia eulerowskiego zawierają prace Gidaszowa [9] oraz Enwalda i innych [10]. W dostępnej literaturze widoczny jest brak danych na temat wpływu kształtu ziaren i parametrów fizykochemicznych na hydrodynamikę warstwy.

W prezentowanej pracy wykorzystano wyniki analiz frakcji ziarnowych materiału stałego dla ziaren popiołów pobranych ze strefy dennej paleniska fluidalnego. Wykorzystane zostały rezultaty badań Tomeczka i Mocka, w których określono opory przepływu ziaren, kształt i prędkość krytyczną fluidyzacji ziaren popiołów węgla polskich [11]. Przeprowadzono kompleksowe badania kształtów frakcji ziarnowych i szybkości wzajemnego ścierania. Rezultaty tych analiz zostały wprowadzone do modeli przepływów wielofazowych i uzupełnione o procedury dodatkowe. W efekcie zasymlowana została cyrkulacja wielofazowej mieszaniny w urządzeniu przemysłowym. Wybrane rezultaty symulacji wykonanej przy możliwych założeniach i przybliżenie metody przedstawiono w niniejszej pracy.

2. ZAŁOŻENIA MODELU NUMERYCZNEGO

Ze względu na występujące przykłady wielofazowe do opisu hydrodynamiki wykorzystano model eulerowsko-eulerowski. W modelu tym każda z klas ziarnowych jest opisana przy pomocy kinetycznego modelu ziarnowego Gidaszowa [9]. Wszystkie klasy ziarnowe oraz gaz opisane zostały modelem turbulencji $k-\varepsilon$, ze zdefiniowanymi standardowymi parametrami modelu.

Wiele procesów jednostkowych warunkujących bilans materiałowy paleniska fluidalnego jak dotąd nie zostało w wystarczającym stopniu poznanych. W wyniku analizy numerycznej stabilności i czasochłonności obliczeń przeprowadzono przegląd możliwości wykonania symulacji. W trakcie syntezy wpływu ścierania na cyrkulację ziaren w długookresowym przedziale czasu przyjęto następujące założenia:

- zawartość masowa pierwiastka węgla w całej masie ziaren wypełniających kolumnę fluidalną nie przekracza 5 %,
- wskaźnik restytucji zderzeń wzajemnych ziaren przyjęto na niezmiennym poziomie $e_r=0.9$,
- model nie uwzględnia wpływu oderwania drobnych fragmentów ziarna na utratę „porcji” energii kinetycznej, gdyż uzależnienie go od rozmiaru ziaren powoduje wykładniczy wzrost liczby klas ziarnowych wzrost czasu iteracji, z kolei dla koncentracji objętościowej ziaren mniejszej niż $c_z < 5\%$ efekty oddziaływań wzajemnych są pomijalne,
- przyjęto niezmienną gęstość ziaren i właściwości chemiczne,

- wewnątrz kolumny reaktora występuje przepływ izotermiczny przy średniej temperaturze odpowiadającej temperaturze fluidyzacji danego typu reaktora, dla paleniska przyjęto średnią jej wartość na poziomie 1073 K,
- wartości strumieni wejściowych i rozkładów ziarnowych wprowadzanych do kotła wynikają z bilansu zewnętrznego sporządzonego z wykorzystaniem własnego, zewnętrznego kodu numerycznego, co znacznie przyspiesza obliczenia z uwzględnieniem ścierania ziaren.

W procesie modelowania numerycznego kotła fluidalnego zastosowany został dyskretny rozkład ziaren z przybliżeniem strumieni węgla, sorbentu, recyrkulanta oraz początkowego rozkładu ziaren we wnętrzu komory paleniskowej. Podział na sześć grup ziarnowych wymaga również „dyskretnego” traktowania zagadnienia, co miało przełożenie w liczbie rozwiązywanych równań bilansowych i konstytutywnych i znacznie wydłużało czas obliczeń.

3. RÓWNANIA KONSTYTUTYWNE I DOMYKAJĄCE

W modelu eulerowskim dla przepływów wielofazowych podstawowy układ równań zachowania dla płynu jest uzupełniony o dodatkowe równania charakteryzujące każdą z pozostałych faz układu. Równanie ciągłości dla *i*-tej fazy przyjmuje postać ogólną

$$\frac{Dc_i}{Dt} + \left(\vec{\nabla} \cdot \left(c_i \vec{w}_i \right) \right) = \frac{1}{\rho_i} \left(\sum_{j=1}^n \dot{m}_{V,ji} \right), \quad (1)$$

w którym: $Dc_i / Dt = \partial c_i / \partial t + c_i (\partial w_{ix} / \partial x + \partial w_{iy} / \partial y)$ oznacza pochodną substancjalną, w_i jest prędkością fazy *i*-tej, ρ_i jej gęstością natomiast $\dot{m}_{V,ji}$ charakteryzuje transport masy z fazy *j*-tej do *i*-tej odniesiony do jednostki objętości.

W kolumnie wypełnionej ziarnami unoszonymi lub zawieszonymi w warstwie gazu możliwe są oddziaływania pomiędzy gazem a ziarnami. Bilans pędów dla fazy gazowej przyjmuje w przepływach wielofazowych postać równania [12,13]

$$\frac{d}{dt} (c_g \rho_g \vec{w}_g) + c_i \left(\vec{\nabla} p - \rho \vec{g} \right) - \vec{\nabla} : \tau_g = \sum_{i=1}^n (R_{ig} + \dot{m}_{V,ig} \vec{w}_{ig}), \quad (2)$$

gdzie indeks „ig” oznacza przepływ z *i*-tej grupy ziarnowej do gazu. Dla *i*-tego składnika mieszaniny ziarnowej równanie opisujące transport pędu przyjmuje postać

$$\frac{d}{dt} (c_i \rho_i \vec{w}_i) + \vec{\nabla} \times (c_i \rho_i \vec{w}_i \vec{w}_i) = -c_i \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} p_i + \vec{\nabla} : \tau_i + c_i \rho_i \vec{g} + \sum_{j=1}^n (\vec{R}_{ji} + \dot{m}_{vi} \vec{w}_{ji}), \quad (3)$$

w którym wyrażenie R_{ji} opisuje oddziaływania pomiędzy fazami, p jest ciśnieniem jednolitym zarówno dla fazy gazowej i dla każdej fazy stałej, p_z jest ciśnieniem granularnym zdefiniowanym przez Gidaspowa [14]. Prędkość międzyfazowa przenoszenia w_{ji} przyjmuje określoną wartość wówczas gdy pomiędzy składnikami mieszaniny wielofazowej występują przepływy masowe. W równaniach (2) oraz (3) τ_i i τ_g są tensorami naprężeń fazy gazowej i *i*-tej fazy stałej, zdefiniowanym równaniem [13]. Dodatkowe równania w postaci związków konstytutywnych opisujących zjawiska takie jak tarcie, ciśnienie poszczególnych składników, kohezja, erozja i wiele innych zawarte są w członie R_{ji} , który odpowiada członowi transportowemu w bilansie substancji. W solverze programu Fluent zawarto jego prosty opis w postaci następującego związku

$$\sum_{j=1}^n \bar{R}_{ji} = \sum_{j=1}^n K_{ji} (\bar{w}_j - \bar{w}_i). \quad (4)$$

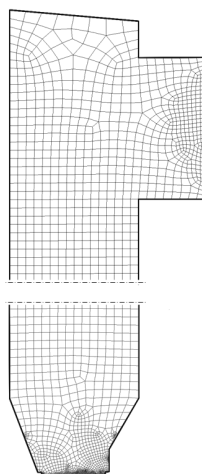
Międzyfazowe przekazywanie pędu reprezentowane w równaniu (4) przez współczynnik K_{ji} w paleniskach fluidalnych zachodzić może pomiędzy gazem a ciałem stałym oraz pomiędzy ziarnami różnych frakcji. Współczynnik ten dla interakcji gaz-ziarna (ziarno-gaz) oznaczany jako K_{gi} został zdefiniowany w postaci zależności

$$K_{gi} = 18 f c_i \eta_g d_i^{-2}. \quad (5)$$

Wartość członu f w równaniu (5) związana jest z przyjętym modelem przekazywania pędu. Wszystkie metody obliczeniowe uzależniają tę wartość od liczby Reynoldsa. W zależności od typu zagadnienia można stosować wyrażenia podane przez Syamlala i O'Briena [15], które stosowane jest w reżimach fluidyzacji szybkiej, Wena i Yu [16] dającego najlepsze efekty w symulacji przepływów ziaren o niskich koncentracjach lub modelu Gidaspowa [17] (a właściwie modelu Wena i Yu [16] z wprowadzonym równaniem Erguna [18]) opisującego z największą dokładnością reżimy fluidyzacji pęcherzykowej i dolnej strefy łoża cyrkulacyjnego i pozwalającego stosować rezultaty analiz kształtów ziaren [11]. W trakcie obliczeń stosowano model Syamlala-O'Briena [15], w którym opory przepływu ziaren wyznaczono, stosując równanie Dalla Valle [19], natomiast prędkość graniczna unoszenia ziaren wyznaczana była ze związku podanego w pracy [20]. Cyrkulacja ziaren wyznaczana jest na podstawie definicji stopnia cyrkulacji wewnętrznej podaną przez Rhodesa [21].

4. SIATKI NUMERYCZNE

W prowadzonych badaniach obliczeniowych sporządzona została siatka numeryczna z wykorzystaniem dwuwymiarowej geometrii. Przestrzeń kotła BCF100 podzielona została na jednostki o kształcie czworokątów. W modelowaniu pominięto intrex.



Rys. 1. Siatka kotła BCF100 stosowana w trakcie symulacji

Liczbę elementów siatki optymalizowano w celu uzyskania odpowiedniej dokładności rozwiązania i zminimalizowania czasu obliczeń. Zoptymalizowana siatka zawierała około 3000 elementów podziału numerycznego. Fragment siatki przedstawiono na rys. 1.

5. PARAMETRY PROWADZONEJ SYMULACJI

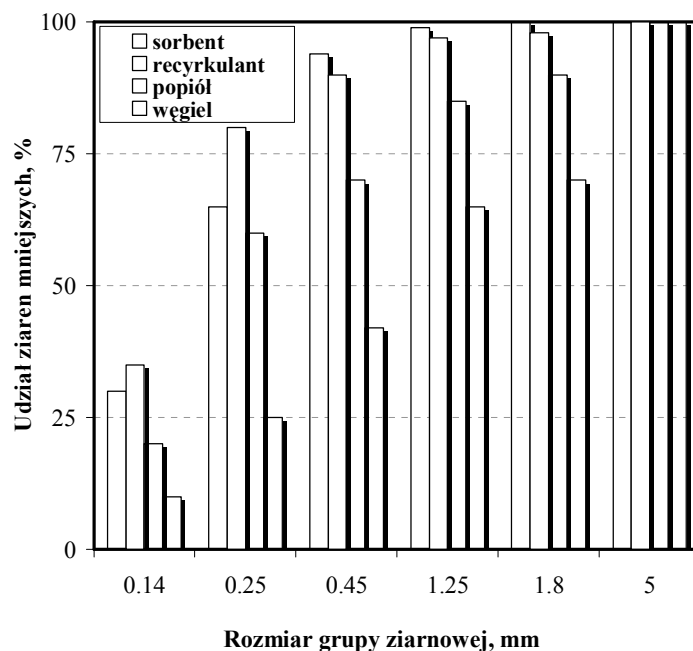
W tabelicy 1 przedstawiono dane analizowanych palenisk, w obliczeniach wykorzystano informacje własne dotyczące paleniska elektrociepłowni Katowice. Zamieszczono również najważniejsze informacje istotne z punktu widzenia prowadzonych obliczeń. Jak już wcześniej zaznaczono, Intrex-u w programie Fluent nie modelowano, zastępując go sływem grawitacyjnym.

Obliczenia prowadzone były z małymi krokami czasowymi, stąd możliwa do obliczenia skala czasu nie była zbyt wielka i wynosiła, z zastosowaniem zbudowanego na potrzeby modelowania klastra komputerowego, minutę obliczoną w trakcie 24 godzin symulacji. Obliczenia prowadzone z użyciem zamieszczonych w tabelicy 2. parametrów prowadzone były z maksymalnym krokiem czasowym $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ s. Tak mała wartość wynika z wymogów stabilności rozwiązania równań opisujących fazę ziarnową. Ta wartość determinowała sensowny zakres modelowanego czasu pracy na wartości rzędu godzin działania urządzenia.

Tabela 1. Podstawowe wymiary geometryczne i wybrane parametry symulacji

parametr	wartość
Średnia wysokość kolumny, m	42
Liczba cyklonów	2
Wysokość kanału wylotowego kolumna-cyklon, m	7
Średnica wlotu cyrkulanta do kolumny paleniskowej, m	0.5
Wymiary kolumny górnej części reaktora, m	14x7
Wysokość leju paleniska, m	6
Wysokość wlotu powietrza wtórnego, m	1
Liczba dysz powietrza pierwotnego	14000
Liczba faz	7
Model turbulencji	Wielofazowy, o standardzie $k-\varepsilon$, rozwiązywany dla każdej z faz
Maksymalna koncentracja fazy stałej	0.45
Średnia gęstość gazu kgm^{-3}	0.36
Średnia gęstość ziaren, kgm^{-3}	2460
Wielkości frakcji ziaren, mm	0.14;0.25;0.45;1.25;1.8;5
Kształt ziaren	wg korelacji podanej w [11]
Warunek brzegowy dla wlotu powietrza pierwotnego, ms^{-1}	24
Warunek brzegowy dla wlotu powietrza wtórnego, ms^{-1}	20
Średni krok czasowy, s	0.0002
Strumień ziaren	Uzgodniony z bilansu substancji paleniska
Rozkłady ziarnowe	Zgodnie z rysunkiem 2

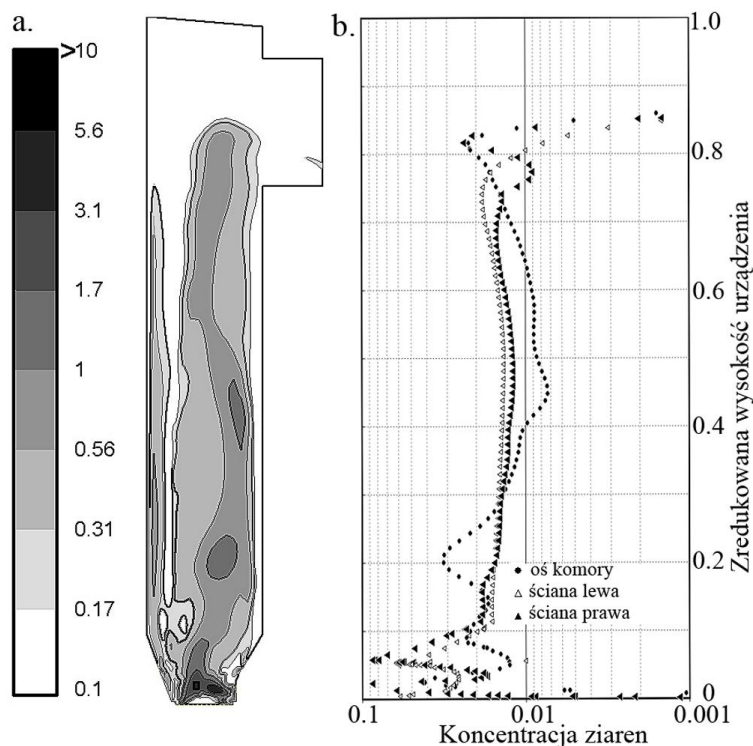
Na rys. 2 zamieszczono rozkłady ziarnowe zasymulowane podczas obliczeń. Odpowiadają one rzeczywistym rozkładom ziaren w palenisku.



Rys. 2. Dyskretne korelacje ziarnowych rozkładów dla strumieni substancji wprowadzanych do paleniska

6. WYNIKI OBLICZEŃ

W rezultacie obliczeń uzyskano dane dotyczące gazodynamiki i przepływu ziaren w cyrkulacyjnym palenisku fluidalnym. Znaczna niejednorodność struktury przepływów wewnątrz paleniska BCF100 w praktyce eksploatacyjnej uwidacznia się różnicą temperatur na przeciwległych ściankach kolumny i nierównomiernym ich zużyciem erozyjnym. Ta asymetria przepływów wynikać może z różnic w budowie przeciwległych ścian części dolnej łoża. Zgodnie z przedstawionymi rezultatami symulacji CFD kocioł BCF100 charakteryzuje się znacznymi wartościami stopnia cyrkulacji w strefie górnej łoża. W takich warunkach występuje zjawisko podniesienia części frakcji, które w trakcie normalnej eksploatacji powinny cyrkulować wewnątrz leja paleniskowego. Na rys. 3a przedstawione zostały kontury cyrkulacji wewnętrznej wyznaczone dla komórek bilansowych, rys. 3b przedstawia rozkład obliczonych koncentracji ziaren w kolumnie fluidalnej. Na rys. 4 przedstawiono rozkłady wektorów prędkości frakcji ziaren o rozmiarze 0.25 mm. Wyraźnie widoczny jest uformowany przepływ o charakterze pierścieniowo-rdzeniowym z centralnie unoszonymi ziarnami oraz strumieniem fazy stałej opadającym przy ściankach urządzenia. W leju paleniska widoczny jest spływ ziaren po ścianie oraz intensywne mieszanie fazy stałej. Modelowanie spływu fazy stałej w obszarze przyściennym jest istotne w praktycznym przewidywaniu stref zużycia erozyjnego elementów powierzchni wewnętrznej kolumny fluidalnej.



Rys. 3. Cyrkulacja wewnętrzna wewnątrz kotła BCF100. a.) kontur cyrkulacyjny w urządzeniu; b.) rozkłady koncentracji ziaren w przekroju urządzenia.

7. PODSUMOWANIE

Modelowanie numeryczne pozwala oszacować charakter przepływów we wnętrzu łóża. Jest to możliwe nawet przy założeniu izotermiczności zjawisk, gdyż znaczna większość ziaren stanowi substancja inercyjna. Zwiększanie liczby faz prowadzi do podniesienia dokładności modelowania, jednakże zachodzi to kosztem wydłużenia czasu obliczeń.

LITERATURA

1. Haff P., Jenkins J.: Grain flow as a fluid mechanical phenomenon. "Journal of Fluid Mech." 1983, 134, 401.
2. Kunii D., Levenspiel O.: Fluidization Engineering 2. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.
3. Nakamura K., Capes C.: Vertical pneumatic conveying-theoretical study of uniform and annular flow models. "Can. J. Chem. Eng." 1973, 51, 39.
4. Horio M., Morishita K., Tachibana O., Murata N.: Solid dispersion and movement in circulating fluidized beds. CFB Technology II, eds. P.Basu, J.F.Large. Oxford: Pergamon Press, 1988.
5. Berruti F., Kalogerakis N.: Modelling the internal flow structure of circulating fluidized beds. "Can. J. Chem. Eng." 1989, 67, 1010.
6. Kunii D., Levenspiel O.: Effect of exit geometry on the vertical distribution of solids in CFB. "Powder Technology" 1995, 84, 83.

7. De Wilde J., Heynderickx J., Vierendeels E., Dick, G.: An extension of the predicted advection upstream splitting method for 3D two phase flow calculations in circulating fluidized beds. "Comp. And. Chem. Eng." 2002, 26, 1677.
8. Bis Z., Gajewski W.: Spalanie paliw stałych w kotłach fluidyzacyjnych. „Archiwum Spalania” 2001, 1, 48.
9. Gidaspow D.: Multiphase flow and fluidization. continuum and kinetic theory descriptions. Boston: Boston Academic Press, 1994.
10. Enwald H., Peirano E. Almstedt A.E.: Eulerian two-phase flow theory applied to fluidization. "Int. J. Multiphase Flow" 1996, 22, 21.
11. Tomeczek J., Mocek P.: Attrition of coal ash particles in a fluidized-bed reactor. "AIChE Journal" 2007, 4, 1159-1163.
12. Syamlal M., Rogers W., O'Brien T. J.: MFIX documentation: Volume 1: theory guide. Springfield: National Technical Information Service, 1993.
13. Fluent user guide. Fluent INC, January 2003.
14. Gidaspow D.: Multiphase flow and fluidization – continuum and kinetic theory descriptions. New York: Academic Press, 1994.
15. Syamlal M., O'Brien T. J.: Computer simulation of bubbles in a fluidized bed. AIChE Symp. Series 1989, 85, 22.
16. Wen C.Y., Yu Y. H.: Mechanics of fluidization. "Chem. Eng. Prog". Symp. Series 1966, 62, 100.
17. Gidaspow D., Bezburuah R., Ding J.: Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach. In: Fluidization VII, 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization 1992.
18. Ergun S.: Fluid flow through packed columns. "Chem. Eng. Prog" 1952, 48, 89.
19. Dalla Valle J. M.: Micromeritics. London: Pitman, 1948.
20. Garside J., Al-Dibouni M. R.: Velocity-voidage relationships for fluidization and sedimentation. I & EC Process Des. Dev. 1977, 16, 206.
21. Rhodes M.J.: Modelling flow structure of upward flowing gas-solid suspensions. "Powder Technology" 1990, 60, 27.

PREDICTIONS OF MULTIPHASE FLOWS INSIDE A CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER

Summary. The gas dynamics and flow structure inside the industrial BCF100 circulating fluidized bed boiler is studied. The simulations were performed by commercial Fluent 6.2 software. The own model for grain shape and critical velocity were applied in user define functions. Polydisperse mixture were computed. Own model describe segregation and circulation for all groups of particles interacting inside beds. The hydrodynamics of a CFB boilers is strongly influence by distribution of coal char, lime and other particles and it's size, density and shape. The Eulerian-Eulerian computational procedure is implemented to predict flow fields.