

Dr hab. inż. Paweł Flaszynski, prof. IMP PAN
Zakład Aerodynamiki
Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szwalskiego
Polskiej Akademii Nauk
Tel: 58 5225 268
E-mail:pflaszyn@imp.gda.pl

Gdańsk, 2022-10-17

Recenzja pracy doktorskiej

mgr Ewy Szymanek

pt.: „Modelowanie numeryczne i analiza przepływu ciepła i masy w materiałach o strukturze granularnej”

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej nr 34/2022 z dnia 30 czerwca 2022 roku oraz pisma, nr R-WIMil-510-9/19 z dnia 22.08.2022, przesłanego przez Panią prof. dr hab. inż. Małgorzatę Klimek, Dziekan Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki.

1. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

W swojej pracy Pani mgr Ewy Szymanek koncentruje się na analizie przepływu w ośrodkach będących złożem granularnym. Szczególną uwagę poświęca opracowaniu i weryfikacji metody obliczeniowej umożliwiającej przewidywanie transportu masy i ciepła w ośrodkach tego typu. Obecny rozwój technologii energetycznych i dążenie do poprawy sprawności procesów konwersji energii wiąże się z koniecznością rozwoju metod i urządzeń umożliwiających efektywną wymianę ciepła w układach energetycznych. Problem intensyfikacji wymiany ciepła w urządzeniach energetycznych i instalacjach chemicznych jest zagadnieniem badanym od wielu lat i wciąż aktualnym, niezależnie od metody wytwarzania energii lub jej konwersji. Obecnie dostępne metody numeryczne mogą być wykorzystywane do analizy wielu zagadnień przepływowo-ciepłnych w złożonych geometriach układu przepływowego, a ich odpowiednia walidacja umożliwia przewidywanie modelowanych zjawisk z dużą dokładnością. Jednak wciąż istnieje szereg problemów, które są wyzwaniem dla metod modelowania przepływu, a jednym z nich jest przepływ w warstwie granulatu. Złóża granulowane są elementem różnych układów energetycznych w procesach spalania, zgazowania, suszenia, czy filtracji. Zrozumienie procesów zachodzących w warstwach granulowanych i ich poprawne modelowanie prowadzi nie tylko do podniesienia sprawności procesu, czy danego układu, ale istotnie wpływa na emisję zanieczyszczeń do otaczającego środowiska. Ze względu na wymagania środowiskowe, ten aspekt ma coraz większe znaczenie w ostatnich latach i istotnie wpływa na koszty budowanych instalacji. Zatem, odpowiednie modelowanie procesów zachodzących w złożach granularnych może znacząco wpływać nie tylko na jakość i sprawność procesu konwersji energii, ale także na redukcję kosztów w trakcie funkcjonowania danego układu energetycznego.

Zasadnicza trudność modelowania przepływu w złożu granulowanym wynika z jego charakterystyk geometrycznych. Złoże może składać się z elementów

o zmiennej geometrii, a dodatkowo elementy są nierównomiernie ułożone w złożu, co prowadzi do silnej anizotropowości geometrii. Przykładem może być złożo węgla, biomasy, odpadów komunalnych, żwiru-kamieni w złożach filtracyjnych, ale także złoża granulatu przemysle spożywczym np. kawy, czy zboża. Nierównomierność rozkładu elementów w złożu i brak możliwości relatywnie łatwego zdefiniowania granic obszaru zajmowanego przez elementy oraz przestrzeni pomiędzy nimi wypełnionej przez płyn jest jednym z podstawowych problemów dla metod obliczeniowych wykorzystujących siatki obliczeniowe. Pomimo intensywnego rozwoju generatorów siatek obliczeniowych, jej przygotowanie dla geometrii złoża jest wciąż dużym wyzwaniem ze względu na silną nierównomierność obszaru przepływowego i zakres zmienności wymiarów wynikający z ułożenia i odległości elementów.

Sformułowanie tez oraz celów pracy zostało poprzedzone przeglądem literatury. Doktorantka wymienia metody numeryczne jakie były lub są stosowane do modelowania przepływu w złożach granulanych, a także wskazuje na trudności realizacji pomiarów w tego typu układach ze względu na ograniczone możliwości wprowadzenia sond, utrudniony lub brak dostępu optycznego, czy brak możliwości wprowadzenia posiewu. Analiza literatury wskazuje na fakt, że większość prac opiera się na metodzie sieciowej Lattice-Boltzman lub metodzie objętości skończonych, która wymaga generowania siatek wokół poszczególnych elementów złoża, co wpływa na wspomniane wcześniej poważne trudności. Należy także podkreślić, że nawet jeśli uda się wygenerować siatkę obliczeniową dla takiego układu, to jest to proces czasochłonny. Alternatywnym i skutecznym rozwiązaniem może być zastosowanie metody zanurzonego brzegu (Immersed Boundary – Volume Penalization), które jest wykorzystywane w przedstawionej pracy doktorskiej.

Z kolei, samo złożo granularne może być modelowane jako jedno-, dwu- lub trójfazowe. Natomiast wpływ parametrów warstw granulanych na czynnik gazowy/ciekły przepływający w przestrzeniach między granulatem oraz oddziaływanie tego czynnika na warstwę granularną wciąż pozostawia wiele wątpliwości i pytań bez odpowiedzi.

Ogólnie można stwierdzić, że celem pracy jest analiza i określenie wpływu rodzaju i wielkości granulatu oraz jego rozmieszczenia na pole przepływu w złożu i jego otoczeniu. Ponadto badany był wpływ elementów rozmieszczonych na powierzchni ściany na charakterystyki przepływu. Z kolei tezy pracy zostały sprecyzowane jak poniżej:

Teza 1: Metoda zanurzonego brzegu w połączeniu z metodą dyskretyzacji wysokiego rzędu pozwala na analizę zagadnień przepływowych z wymianą ciepła w skomplikowanych geometrycznie konfiguracjach z dużą dokładnością.

Teza 2: Konfiguracja przestrzenna i kształt granulatu w warstwie granulanej mają istotny wpływ na pole przepływu i zmienność temperatury.

Wobec powyższego można jednoznacznie stwierdzić, że wybrana tematyka pracy doktorskiej ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne oraz spełnia kryteria prac w ramach dyscypliny „Inżynieria mechaniczna”.

2. Uwagi szczegółowe

Praca doktorska Pani mgr Ewy Szymanek została zredagowana na 120 stronach, a diskutowany materiał ujęto w 9 rozdziałach. Pierwszy rozdział jest poprzedzony spisem rysunków oraz tabel. Spis literatury zawiera 113 pozycji.

Pierwsze rozdziały poświęcone są podsumowaniu aktualnego stanu badań i modelowania przepływu z wymianą ciepła w warstwach granularnych, a także zdefiniowaniu, wymienionych powyżej, tez i celów pracy.

Wykorzystany w pracy model matematyczny zaimplementowany w programie SAILOR (rozwijany na Politechnice Częstochowskiej) omówiony jest w rozdziale czwartym. Przedstawiono układ równań, scharakteryzowano wykorzystywaną metodę Large Eddy Simulations (LES) z modelem lepkościowym Vremana. Algorytm wykorzystany do rozwiązania układu równań transportu masy, pędu i energii jest sformułowany według metody projekcji dla sprzężenia ciśnienia i prędkości. Równania są całkowane w czasie za pomocą metody predyktor-korektor (Adams-Bashforth/Adams-Moulton), a dyskretyzacja przestrzenna przy wykorzystaniu metody kompaktowej 6-ego rzędu i schematów WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) 5-ego rzędu na siatkach częściowo przesuniętych (half-staggered).

Przedstawiona praca doktorska koncentruje się na analizach numerycznych, natomiast w rozdziale 5-tym zamieszczono wyniki prac eksperymentalnych. Wprowadzicie Doktorantka pisze, że „rozdział nie jest bezpośrednio powiązany z zadaniami realizowanymi w ramach pracy doktorskiej”, ale to stwierdzenie chyba jest zbyt asekuracyjne. Zaprezentowane wyniki są efektem badań w trakcie stażu na Uniwersytecie Nottingham, a zmierzona temperatura w różnych punktach złoża jest porównana z wynikami obliczeń programami Fluent i SAILOR, prezentowanymi w dalszej części pracy.

Weryfikacja metody zanurzonego brzegu (IB-VP) zaimplementowanej w kodzie SAILOR została przedstawiona w rozdziale 6-tym, gdzie zostały omówione wyniki analizy przepływu z wymianą ciepła dla wybranych przypadków testowych: (1) opływ jednego elementu: gorącej kuli, elipsoidy, sześcianu, pierścienia Raschiga, (2) przepływ wokół dwóch lub trzech elementów: rozgrzanych kul, sześcianów, pierścieni Raschiga oraz (3) przepływ izotermiczny w kanale wypełnionym sześcioma warstwami kul. Wyniki obliczeń zostały porównane z wynikami programu ANSYS Fluent. Istotną różnicą, oprócz algorytmu i stosowanych schematów numerycznych, były siatki obliczeniowe: kartezyjska w przypadku programu SAILOR, natomiast w ANSYS Fluent siatki były dopasowane do elementów złoża. W zależności od stopnia złożoności elementów były one blokowo-strukturalne lub niestructuralne. Obliczenia wykonano dla różnych prędkości przepływu odpowiadających liczbie Reynoldsa w zakresie wartości od 10 do 300 oraz różnych wartości temperatury przepływu i złoża granularnego. W przypadku przepływu w kanale wypełnionym sześcioma warstwami kul prędkości przepływu porównano z wynikami pomiarów dostępnymi w literaturze. Z kolei wyniki pomiarów temperatury uzyskanych na Uniwersytecie w Nottingham porównano z wynikami obliczeń przedstawionymi w rozdziale 6.4. Należy podkreślić, że w obu przypadkach uzyskano bardzo dobrą zgodność. Ponadto, w każdym przypadku porównywanym z programem Fluent wyniki obliczeń są bardzo zbliżone, a niektóre konfiguracje nie wykazują różnic w prezentowanych trawersach.

Bardzo interesujący materiał został zamieszczony w rozdziale 7-ym, gdzie przedstawiono wyniki obliczeń przepływu przez różne konfiguracje złoża materiałów granularnych. Praca została zrealizowana w szerokim zakresie począwszy od warstw złoża o określonej, uporządkowanej strukturze, a skończywszy na warstwach rzeczywistych złożonych z losowo rozmieszczonych elementów. W pierwszym przypadku, praca koncentruje się na weryfikacji metody obliczeniowej w programie SAILOR poprzez porównanie z obliczeniami w programie Fluent, a także na ocenie wpływu struktury warstwy złoża na pole przepływu i temperatury. Złoże składa się z równomiernie rozłożonych kul, gdzie ich układ w przekroju normalnym do kierunku

przepływu na wlocie jest 10×10 , 7×7 lub 5×5 , a kule różnią się średnicą w różnych konfiguracjach lub wzajemnym przesunięciem kolejnych warstw kul. Uzyskane wyniki wskazują na silny wpływ układu kul w złożu na rozkład temperatury i prędkości. Na niektórych rysunkach (np. 7.53 lub 7.56) widać wyraźnie asymetrię przepływu. Zabrakło informacji czy to jest obraz chwilowy, czy uśredniony w czasie, a asymetria jest efektem niskoczęstotliwościowych zmian wymagających długiego czasu obliczeń.

Obliczenia dla złoża z losowo rozmieszczonymi elementami kulistymi wykonano tylko programem SAILOR, ponieważ przygotowanie siatki obliczeniowej do programu Fluent byłoby bardzo czasochłonne. W tym miejscu należy wyraźnie podkreślić zaletę zastosowanej metody zanurzonego brzegu. Model obliczeniowy został przygotowany w oparciu o geometrię uzyskaną przy pomocy tomografii komputerowej, a wyniki obliczeń porównano z pomierzonym spadkiem ciśnienia na stanowisku Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego. Przedstawiony wykres ciśnienia wskazuje na bardzo dobrą zgodność.

W kolejnym kroku, przeprowadzono analizę dla złoża składającego się z losowo rozłożonych kul, cylindrów lub pierścieni Raschiga, a geometria układu była generowana przy wykorzystaniu metody generowania złoża granularnego, wcześniej rozwijanej na Politechnice Częstochowskiej. Warto zdecydowanie podkreślić, że geometria układu pokazana na rys. 7.66 i 7.67 wskazuje na bardzo duży stopień złożoności. Przedstawiono także interesujące wyniki obliczeń prezentujące wpływ złoża na rozkład prędkości i temperatury. Obliczenia wykonano dla liczb Reynoldsa 100 i 1000 definiowanej w oparciu o wymiar elementów złoża, co odpowiada prędkości przepływu ok. kilku m/s. Zastanawiające jest stwierdzenie na stronie 76 odnośnie wzrostu prędkości lokalnie do 100 m/s. Taka wartość wiąże się ze znacznym lokalnie spadkiem ciśnienia. Nasuwa się pytanie, czy zmiana rozdzielczości siatki w tym miejscu wpłynęłaby na zmianę (zmniejszenie tej prędkości).

Na wybranych wykresach pokazano zmianę prędkości, wirowości i wielkości UW będącej iloczynem składowych prędkości w płaszczyźnie prostopadłej do osi kanału wzdłuż, której realizowany jest przepływ. Nasuwa się pytanie: dlaczego iloczyn UW? Wprawdzie jest on jakąś miarą generowanego przepływu wtórnego, ale interesującą i łatwiejszą w interpretacji byłaby wartość prędkości wtórnej, czyli składowej w tej płaszczyźnie odniesionej do wartości wektora prędkości lub jej składowej w kierunku Y.

Potencjał metody zanurzonego brzegu został zaprezentowany także na przykładzie przepływu w kanale z elementami rozmieszczonymi na ścianie. Tytuł rozdziału wskazuje na przepływ wzdłuż powierzchni płaskich, pofalowanych i chropowatych. Brakuje jednak informacji dotyczących wymiarów pofalowania powierzchni. Nie wiadomo też który z przypadków można traktować jako chropowatość powierzchni, gdyż nie ma jakiejś wielkości charakterystycznej, np. Ra. Warto byłoby także podać jaki jest wymiar elementów na ścianie w odniesieniu do grubości warstwy przyściennej, a także warunki brzegowe sformułowane dla przypadków porównywanych z danymi eksperymentalnymi. Wybrane parametry można znaleźć w pracy [85], ale zebranie tych informacji w pracy ułatwiłoby interpretację wyników.

W ramach analizy wyników zamieszczono porównania wartości prędkości i jej fluktuacji oraz wizualizację struktur wirowych za pomocą parametru Q. Wszystkie przypadki obliczeniowe potwierdzają, że algorytm metody IB-VP może być skutecznie stosowany do analizy przepływów z wymianą ciepła w kanałach ograniczonych powierzchnią o stosunkowo skomplikowanej geometrii.

Wyniki przedstawione w pracy doktorskiej skłaniają do sformułowania poniższych pytań.

1. Na rys. 6.18b widać asymetrię przepływu za elipsoidą. Na str. 35 jest komentarz do tego rysunku: „w przypadku przepływu wokół elipsoidy 2 wyraźnie można zaobserwować utratę symetrii, pomimo iż przepływ jest laminarny”. Wobec tego stwierdzenia, w przypadku przepływu laminarnego należy zawsze spodziewać się symetrii przepływu. Czy rzeczywiście tak jest? Proszę o komentarz. Czy asymetria jest efektem niskoczęstotliwościowych oscylacji, które wymagałyby długiego czasu obliczeń, czy zaobserwowana asymetria jest stabilna i czas obliczeń nie ma wpływu?
Asymetrię można zauważyć także na rys. 7.53. Dotyczy to przepływu zarówno przed jak i za warstwą granulatu. Co jest przyczyną asymetrii w tym przypadku.
2. Wyniki obliczeń programami Fluent i SAILOR są bardzo zbliżone. Przygotowanie siatki obliczeniowej dla programu Fluent jest bardziej wymagające i czasochłonne. Proszę o komentarz i podanie przykładowego czasu obliczeń w obu przypadkach, np. dla konfiguracji z rozdziału 6.4.
3. W pracy prezentowane są wyniki obliczeń przepływu niestacjonarnego, ale zabrakło informacji dotyczących całkowania w czasie. Jaki był krok czasowy i czy był taki sam w przypadku obu programów dla porównywanych przypadków?
4. Na rys. 7.57 przedstawiono wirowość znormalizowaną względem wartości na wlocie. Czy przyczyną istnienia niezerowej wirowości na wlocie jest profil prędkości przy ścianie, czy też jakieś dodatkowe efekty?
5. Na rys. 7.63 przedstawiony jest rozkład temperatury i warstwa termiczna wokół kulki na rys. 7.63b. Czy można w tym przypadku pokazać siatkę obliczeniową na tle temperatury?
6. Wykresy na rys. 7.71 prezentują znormalizowane wartości wirowości i UW. Dlaczego na wlocie $y=0$ wartości są różne od „1”? Poza tym, z obserwacji wykresów można odnieść wrażenie, że wpływ liczby Re na prezentowane wyniki jest bardzo słaby. Proszę o komentarz.
7. Proszę o wyjaśnienie co wpływa na spadek temperatury za warstwą granulatu na rys. 7.72 i 7.73?
8. Prędkość na rys. 8.89a sugeruje obecność przepływu powrotnego (oderwania) za pofalowaną powierzchnią. Proszę o wyjaśnienie czy tak jest, czy następuje gwałtowna zmiana rozkładu prędkości w tej strefie?
9. Na rys. 8.96a przedstawiono profile prędkości dla wybranych konfiguracji. Komentarz w tekście brzmi: „Na uwagę zasługuje to, że gradient profilu średniej prędkości w sąsiedztwie ściany rośnie wraz ze średnicą kuli”. Niestety to nie jest wyraźnie widoczne i oczywiste. W tym przypadku wartościowym było pokazanie naprężeń stycznych na ścianie w tej strefie.

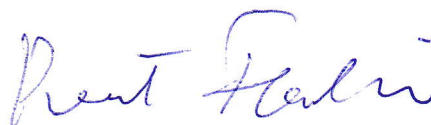
Ogólnie można stwierdzić, że praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny, a materiał graficzny jest opracowany starannie. Jednak można zauważyć kilka niedociągnięć, które wymagałyby korekty i mogłyby w przyszłości poprawić czytelność wybranych rysunków:

- brak legendy na Rys. 7.48 i 8.95,
- warto byłoby dodać oznaczenia konfiguracji na rys. 7.51 i stosować tą samą kolejność przypadków na kolejnych rysunkach,
- zmniejszenie zakresu wartości wirowości na Rys. 7.75 poprawiłoby czytelność prezentowanych wyników.

3. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pani mgr Ewa Szymanek przedstawiła bardzo interesujące i wartościowe wyniki, istotne dla rozwoju badań nad zagadnieniami przepływu i wymiany ciepła w warstwach granularnych. Przedstawione wyniki obliczeń wskazują na efektywność wykorzystanej metody zanurzonego brzegu, a analiza wyników umożliwia ocenę wpływu parametrów geometrycznych warstw granulatu na pole prędkości i temperatury w złożu oraz jego otoczeniu. Można zdecydowanie stwierdzić, że założone cele pracy zostały w pełni zrealizowane, a także są inspiracją do dalszych badań nad zagadnieniami nie tylko ośrodków granularnych, ale także wielu przypadków przepływu, gdzie złożoność geometrii jest ograniczeniem dla innych metod obliczeniowych. Wyniki prac realizowanych przez Doktorantkę zostały opublikowane w siedmiu artykułach oraz były prezentowane na pięciu międzynarodowych konferencjach, co świadczy o dojrzałości prezentowanej pracy.

Uważam, że praca doktorska Pani mgr Ewy Szymanek pt.: „Modelowanie numeryczne i analiza przepływu ciepła i masy w materiałach o strukturze granularnej” spełnia wymagania określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję do Rady Dyscypliny o dopuszczenie Doktorantki do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ryszard Fiala', is located in the lower right quadrant of the page.