

Rzeszów, 8 września 2011

Dr hab. Anna Kucaba-Pietal, prof. PRz
Zakład Mechaniki Płynów i Aerodynamiki
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Marcina Kędzierskiego
„Zastosowanie metody multipolowej do analizy oddziaływań
hydrodynamicznych w cylindrycznym mikrokanale”

Recenzja opracowana została na podstawie pisma z dnia 10 czerwca 2011 Pana Prof. dr hab. Kazimierza Piechóra, Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, w związku z przewodem doktorskim Pana mgr inż. Marcina Kędzierskiego.

1. Przedmiot recenzji

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kędzierskiego zatytułowana „*Zastosowanie metody multipolowej do analizy oddziaływań hydrodynamicznych w cylindrycznym mikrokanale*” liczy 119 stron. Treść podzielono na sześć rozdziałów i załącznik . Spis cytowanej literatury obejmuje 79 pozycji.

2. Tematyka, cel i zakres pracy

Układy koloidalne lub krótko - koloidy, są to układy dyspersyjne, najczęściej dwuskładnikowe, o wyglądzie układów fizycznie jednorodnych, chociaż w rzeczywistości oba składniki nie są ze sobą zmieszane cząsteczkowo. W zasadzie we wszystkich dziedzinach działalności człowieka mają one zastosowanie. Ostatnio wraz z rozwojem nanotechnologii pojawiły się możliwości ich wykorzystania w mikro i nanourządzeniach.

Znajomość wielkości hydrodynamicznych układów koloidalnych ma zarówno znaczenie poznawcze jak i użytkowe. Umożliwia bowiem zarówno zrozumienie podstawowych procesów mechanicznych zachodzących w tych układach jak również umożliwia inżynierskie projektowanie urządzeń, w których medium stanowią roztwory koloidalne. Ze względu na to że przepływy w takich urządzeniach mają miejsce w kanałach lub mikrokanalach, rozwijane są metody mające na celu wyznaczenie wielkości hydrodynamicznych poruszających się cząstek, tworzących fazę rozproszoną w ośrodku dyspersyjnym. Im dokładniejsza metoda wyznaczenia wielkości hydrodynamicznych tym lepiej można zaprojektować urządzenia inżynierskie (np. do iniekcji), co przekłada się na ich wyższą sprawność.

Ze względu na zastosowania jednym z podstawowych problemów występujących tym nurcie jest wyznaczenie oddziaływań hydrodynamicznych zawiesiny koloidalnej w cylindrycznym kanale. Problem jest złożony ponieważ wymaga w uwzględnienia oddziaływania cząstki z zawiesziną, innymi cząstkami zawiesziny oraz oddziaływania ze ścianką.

Celem badań podjętych w ramach pracy doktorskiej było opracowanie, implementacja i walidacja algorytmu obliczania oddziaływań hydrodynamicznych między cząstkami koloidalnymi w cylindrycznym kanale.

Doktorant zdecydował na rozwiązanie tego zagadnienia metodą opartą na rozwinięciu multipolowym aby otrzymać w efekcie końcowym macierze tarcia i mobilności.

Zakres pracy obejmuje między innymi:

- opracowanie metody rozwiązania,
- zaprojektowanie algorytmu oraz zbudowanie narzędzia programowego umożliwiającego wykonanie obliczeń numerycznych,
- walidacja rozwiązania.

Uważam, że tematyka podjęta w recenzowanej pracy doktorskiej ma duże znaczenie teoretyczne i praktyczne. Cel został trafnie sformułowany zarówno z naukowego jak i użytecznego punktu widzenia, zaś zakres rozprawy jest w pełni uzasadniony.

3. Merytoryczny opis i ocena rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kędzińskiego składa się z sześciu rozdziałów, powiązanych ze sobą merytorycznie oraz logicznie, tworzących spójną zwartą całość. Pierwsze dwa mają charakter wprowadzający, w pozostałych zawarto badania własne i otrzymane wyniki Doktoranta. W załączniku znajdują się informacje dotyczące funkcji specjalnych wykorzystywanych w pracy.

W części wprowadzającej został sformułowany cel i zakres pracy. Dokonano też przeglądu literaturowego oraz podane zostały motywy, które skłoniły Autora do zainteresowania się tą tematyką jak również korzyści jakie niesie zaproponowana nowatorska metoda. W kolejnych rozdziałach przedstawione zostały szczegółowo etapy konstrukcji rozwiązania zagadnienia oraz wyniki obliczeń numerycznych.

Doktorant koncentruje się na wyznaczeniu wielocząstkowych oddziaływań hydrodynamicznych między cząstkami sferycznymi zawieszonymi w cylindrycznym mikrokanale. Rozpatruje cząstki twarde, недеformowalne.

Fizycznie problem dotyczy zawiesin niebrownowskich i sytuacji gdy siły lepkości dominują nad siłami bezwładnościowymi podczas ruchu cząstek oraz ośrodek dyspersyjny jest nieściśliwy. Zapisując to za pomocą bezwymiarowych liczb kryterialnych otrzymujemy: $Re \ll 1$, $Pe \gg 1$, $Ma \ll 1$.

W konsekwencję takich założeń przepływ opisany jest liniowymi równaniami Stokesa, gęstość ośrodka dyspersyjnego jest stała oraz reakcje są natychmiastowe.

W rozważanej skali czasowej oddziaływania hydrodynamiczne między cząstkami są wielociałowe (nie spełniają zasady superpozycji) i opisywane są przez macierz tarcia, która jest funkcją wyłącznie położenia cząstek. Celem jest wyznaczenie macierzy tarcia dla układu wielocząstkowego w obszarze ograniczonym ściankami cylindra, gdy przepływ opisany jest równaniami Stokesa.

Doktorant zdecydował na rozwiązanie tego zadania metodą opartą na rozwinięciu multipolowym wykorzystując w tym celu istniejące rozwiązania fundamentalne równań Stokesa we współrzędnych sferycznych oraz walcowych.

Oddziaływanie płynu z cząstkami opisano w bazie sferycznej, natomiast pole odbite od ścianek cylindra wyrażone zostało poprzez bazę cylindryczną. Rdzeniem metody są relacje transformujące obie bazy.

Punktem wyjścia metody jest równanie całkowe na gęstości sił indukowanych opisane wzorem (35) w którym przepływ na powierzchni i-tej cząstki układu koloidalnego został zapisany w postaci sumy trzech niezależnych operatorów całkowych **Zi**, **To** i **Tb** opisujących odpowiednio warunki brzegowe na powierzchni pozostałych cząstek układu oraz warunek brzegowy na krańcach obszaru ograniczającego zawiesinę. Wcześniej pokazano równoważność podejścia polegającego na rozwiązywaniu równań Stokesa dla rozpatrywanego zadania z rozwiązywaniem równania całkowego (35) dla gęstości sił indukowanych na powierzchni cząstek.

Następnie skonstruowano bazę cylindryczną do wyznaczenia przepływu odbitego od ścianek cylindrycznego kanału.

W kolejnym kroku wprowadzono relacje transformujące bazę sferyczną na cylindryczną i wyznaczono elementy macierzowe operatora **Tb**, wzory (98, 99); Doktorant podał ich interpretację fizyczną, która schematycznie została zilustrowana na Rys.2.

Dalej wykonano faktoryzację pola odbitego na pięć operatorów i zapisano je w jawnej postaci dla przypadku gdy obszar zajmowany przez układ koloidalny jest ograniczony cylindrycznym mikrokanalem.

Następnie równanie (35) zostało zrzutowane na bazę utworzoną z rozwiązań fundamentalnych równań Stokesa w zmiennych sferycznych. W wyniku tej operacji otrzymano nieskończony układ równań algebraicznych będący podstawą numerycznego obliczania macierzy tarcia i mobilności.

W dalszej części rozprawy, przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych otrzymanych wielkości hydrodynamicznych.

Rezultaty przedstawiono na wykresach; dotyczą one oddziaływań hydrodynamicznych w funkcji promienia sfery lub odległości wzdłużnej. Rozpatrywano problem jednej cząstki, dwóch cząstek, oraz łańcuchy N cząstek w przepływie parabolicznym

Zaobserwowano negatywne sprzężenie dla dostatecznie dużych odległości między dwoma cząstkami, wyrażającego się poprzez negatywne współczynniki mobilności wzajemnej. Obliczono wartości siły działającej na łańcuchy polimerowe umieszczone w przepływie parabolicznym i porównane z przypadkiem nieograniczonej przestrzeni, celem walidacji metody.

Wysoko oceniam przyjętą przez doktoranta strategię badawczą.

Moim zdaniem opracowana metoda jest elegancka; pozwala z łatwością zmieniać warunki brzegowe oraz promień cząstek, zmiana warunków brzegowych na powierzchni cylindra powoduje zmianę jawnej postaci jedynie dla operatora odbicia T_b , pozostawiając pozostałe operatory niezmiennione. Wyznaczenie tego operatora przez Doktoranta jest jednym z najważniejszych walorów tej pracy.

Metoda umożliwia otrzymywanie rozwiązań dla różnego rodzaju cząstek koloidalnych: np. elastycznych oraz cylindrów o różnych ściankach (również elastycznych) co zwiększa jej zakres aplikacyjny

4. Uwagi polemiczne

Analiza treści pracy skłania do stwierdzenia, że pewne poruszone w niej kwestie powinny zostać przedyskutowane bądź sprecyzowane:

- Warto było w przeglądzie literatury wspomnieć metodę kolokacji; w szczególności chodzi o prace autorów: Pfeffer, Weinbaum, Ganatos, którzy wykorzystywali również fundamentalne rozwiązania równań Stokesa we współrzędnych cylindrycznych i sferycznych do wyznaczania pola prędkości w przepływach sfery ograniczonej ściankami.
- Stwierdzenie Autora (str.96) że „jednym ze szczegółowych rezultatów pracy jest dowód twierdzenia o przesuwaniu dla bazy cylindrycznej” wymaga doprecyzowania, ponieważ w tekście Rozprawy nie znalazłam tezy ani założeń wspomnianego twierdzenia.
- Metoda rozwiązania została otrzymana przy założeniu $Re \ll 1$. Na Rys.4 przedstawiono wartości aksjalnego współczynnika tarcia w funkcji promienia sfery otrzymane w wyniku rozwiązania teoretycznego i metodą Doktoranta. Czy jeśli promień sfery $a > 1$ (dąży do promienia walca) to nadal można stosować metodę?
- Czy wyniki numeryczne były porównywane z wynikami z experimentalnymi lub numerycznymi innych autorów choćby w granicznych geometrycznych przypadkach? Jeśli promień sfery jest mały w stosunku do promienia cylindra, to wydaje się że wyniki można porównać z istniejącymi w literaturze (S. Weinbaum) dotyczącymi ruchu jednej sfery w obecności płaskiej ścianki.

- W pracy bardzo dokładnie opisywane są poszczególne etapy konstrukcji metody, co jest niewątpliwie dużą zaletą tej pracy. Niemniej odczuwam pewien niedosyt na temat szczegółów obliczeń numerycznych, w szczególności:
 - jakim programem zostały wykonane?
 - jak obliczono funkcje specjalne.

Powyższe uwagi mają charakter polemiczny i porządkujący i nie wpływają na wysoką ocenę rozprawy.

5. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kędzierskiego prezentuje rozwiązanie złożonego problemu z zakresu wyznaczania oddziaływań hydrodynamicznych w układach koloidalnych. Autor wykazując się dużą pomysłowością i pracowitością, sięgał po wiedzę z różnych obszarów nauki, w szczególności wglębiał się w teorie, przekształcenia i własności funkcji specjalnych, co należy wysoko ocenić i wykazał się zdolnością do samodzielnej pracy naukowej. Autor skonstruował efektywną metodę, przez co osiągnął zamierzony cel i wykazał dojrzałość badawczą przy jego realizacji.

6. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z przedstawioną rozprawą mgr mgr inż. Marcina Kędzierskiego zatytułowaną „Zastosowanie metody multipolowej do analizy oddziaływań hydrodynamicznych w cylindrycznym mikrokanale” **stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie trudnego problemu naukowego i spełnia wymagania określone Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 (Dz.U. Nr 65 poz 595)** Wnoszę zatem o dopuszczenie jej o publicznej obrony.