

Prof. 1dr hab. inż. Henryk Kudela
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Katedra Inżynierii Konwersji Energii
Wybrzeże St. Wyspańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław, 23.10.2024

Recenzja

rozprawy doktorskiej **Eleonory Spricigo, MSc, Eng.** pt.
Application of Smoothed Particle Hydrodynamics method to interfacial two-phase
flows.

wykonana na polecenie Rady Naukowej Instytutu Maszyn PAN ,
80-231 Gdańsk, ul.Fiszera 14
(pismo RN-421_4/23 z dnia 02.08. 2024r,
podpisane przez dr hab. inż. Grzegorza Żywicę)

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska **Eleonory Spricigo** pt., „Application of Smoothed Particle Hydrodynamics method to interfacial two-phase flows” jest napisana w języku angielskim, zawiera 134 ponumerowanych stron podzielona jest na 5 rozdziałów i 3 dodatki nazwane literami A, B i C. Liczba cytowanych prac wynosi 204 pozycji

1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Głównym tematem pracy Pani. **Eleonory Spricigo** jest wykorzystanie metody *gładkich cząstek hydrodynamicznych* (Smoothed Particle Hydrodynamics method – (SPH)) do modelowania powierzchni z ostrą granicą rozdziału, dwóch różnych płynów. Ruch płynu z dwoma różnymi niemieszającymi się fazami pojawia wielu zagadnieniach technicznych i fizycznych. Metoda *gładkich cząstek hydrodynamicznych* jest metodą stosunkowo młodą, ale już znalazła zastosowania do modelowania na ogół złożonych zjawisk fizycznych z różnych dziedzin, począwszy od astrofizyki (eksplozja superNowej,

zapadanie i formowanie się galaktyk), magnetohydrodynamiki, ciała stałego (kruszenie ciał stałego, formowanie metalu, zderzenia niesprężyste ciał), mechaniki płynów (przepływy wielofazowe, eksplozje podwodne, wymiana ciepła).

Metoda jest ciągle rozwijana i poszerzane są jej zastosowania. Uważam, że wybór tematu pracy doktorskiej jest właściwy

2. Omówienie pracy wraz z uwagami krytycznymi

W pracy Pani Eleonory Spricigo "*Application of Smoothed Particle Hydrodynamics method to interfacial two-phase flow*" podjęła temat wykorzystania metody SPH do modelowania przepływów wielofazowych z ostrym rozdziałem faz.

W metodzie SPH Ośrodek materialny (płyn) zastępowany jest układem cząstek. Ich położenia są śledzone podczas ruchu. Cząstka niesie informację o własnościach fizycznych płynu (gęstość, ciśnienie prędkość). Obliczenia prowadzone są w zmiennych Lagrange'a, bez użycia siatki numerycznej. Aby cząstka dobrze reprezentowała płyn rzeczywisty dokonuje się wokół położenia cząstki uśrednienia, całkując funkcję opisującą własności przypisane do cząstki, pomnożoną przez symetryczną funkcję nazywanym jądrem. Nośnik jądra, jest zwarty (skończony) i zależy od odległości od punktu. Pozwala na ograniczenie liczby cząstek biorących w obliczeniach. Widać, że wybór jądra jest niezwykle ważny. Trajektorię cząstki opisuje równanie różniczkowe zwyczajne.

Swoją pracę doktorantka prowadziła w zespole badawczym, który specjalizuje się właśnie w metodzie SPH prawie od 20 lat. Zespół w swoim dorobku ma kilkanaście artykułów na światowym poziomie dotyczących tej tematyki. Zespół dopracował się własnego programu obliczeniowego o czym doktorantka wspomniała na stronie 1 w rozdziale 1.

Praca doktorantki podzielona jest na pięć rozdziałów.

W rozdziale 1 doktorantka dokonuje przeglądu historycznego rozwoju metod numerycznych do modelowania powierzchni rozdziału dwóch ośrodków płynnych. Są to metody z użyciem siatek numerycznych jak również z użyciem różnych cząstek obliczeniowych.

Rozwój metody *gładkich cząstek hydrodynamicznych* (SPH) jest przedstawiony w oddzielnym podrozdziale. Należy zwrócić uwagę, że metoda SPH jest metodą która, rozwija się bardzo intensywnie. Doczekała się już co najmniej kilku obszernych książek

i tysięcy artykułów. Co roku można natknąć się na kilka prac dokonujących przeglądu obecnego stanu wiedzy metody SPH.

Rozdział I napisany jest interesująco i przejrzysto. Doktorantka w sposób wyczerpujący cytuje opracowania książkowe i artykuły przeglądowe o metodzie SPH i jej zastosowań.

W rozdziale 2 zostały przedstawione podstawy matematyczne metody SPH dla płynu nielepkiego. Dotyczy to dyskretyzacji równania ciągłości jak również prawa zachowania pędu i równania stanu.

Dyskretyzacji dokonuje się zastępując całkę sumą wartości funkcji i jądra. Doktorantka podała własności które powinna spełniać funkcja reprezentująca jądro.

Typowymi przedstawicielami są: jądro typu gaussowskiego, typu cubic B spline, wielomianowa funkcja Wendlanda. W pracy wybrano wielomianowe jądro Wendlanda 5-ego stopnia ze względu na dobre własności wygładzające i stabilność obliczeniową metody SPH. Doktorantka wskazała, że opis ruchu cząstek można wyrazić w ujęciu mechaniki hamiltonowskiej co pokazuje, że cząstki można traktować jako cząstki materiale podlegające prawom fizyki klasycznej. Opisano działanie napięcia powierzchniowego i zaproponowaną w Zespole potrzebną korekcję pozwalającą zachować ostre przejście pomiędzy różnymi fazami. Omówiono kilka sposobów realizacji warunku brzegowego na ścianach sztywnych (metoda odbicia zwierciadlanego, fikcyjne cząstki poza brzegiem obszaru obliczeniowego). Przytoczono kilka warunków dla kroku czasowego dla numerycznego rozwiązywania równań ruchu cząstek aby zachować stabilność numeryczną. W programie opracowanym przez Zespół przyjęto model płynu słabo ściśliwego (liczba Macha < 0.1 , Weak Compressible SPH (WCSPH)). Przyjęcie modelu słabej ściśliwości pozwala uniknąć rozwiązywania równania Poissona aby wyznaczyć ciśnienie co znacząco skraca czas obliczeń. Rozdział drugi jest dobrym wprowadzeniem do metody SPH.

Uwaga 1. Wzór, (2.28) generyczną formą operatora różniczkowego rzędu drugiego ale jest operatorem rzędu drugiego ze współczynnikiem dyfuzji i (2.27). Myślę, że najpierw należało podać aproksymację laplasjanu, a następnie podać wzór laplasjanu z współczynnikiem dyfuzji. Po prawej stronie wzorów (2.26) i (2.27) występuje operator „kropka”. Czy to jest zwykły znak mnożenia? Operator „kropka” zwykle oznacza iloczyn skalarny. Należało zdefiniować jak należy rozumieć „kropkę”. Proszę o komentarz.

Uwaga 2. We wzorze (2.34) po lewej stronie równania brak jest symbolu uśredniania

Uwaga 3. Proszę wyjaśnić wzór 2.65. Wydaje się być błędnym.

Uwaga 4. Przedstawiany materiał jest przeglądem literatury na temat SPH. Jest relacją z przeczytanych artykułów i książek. Nie ma żadnego oryginalnego rysunku wykonanego przez doktorantkę. Poza kilkoma uwagami odnośnie wkładu Zespołu, w którym doktorantka prowadzi badania wszystkie zamieszczone wykresy są dokładnymi kopiami rysunków z artykułów innych autorów. Czy nie narusza się praw autorskich?

W rozdziale 3, doktorantka zajmowała się przepływem lepkim, wielofazowym, z ostrą powierzchnią rozdziału między fazami. Tutaj pojawiają się wzory, które biorą pod uwagę lepkość cieczy. Doktorantka dokonuje przeglądu literatury i wzorów odnoszących się do sposobów realizacji w metodzie SPH sił lepkości. Pokazuje na wykresach zaczerpniętych z literatury jak dana postać wzoru wpływa na wyniki (Figure 3.1) i z przedstawionych wyników numerycznych jednoznacznie wynika, że lepkość wypadkowa przy przejściu przez granice dwóch ośrodków powinna być obliczana jako średnia harmoniczna z lepkości graniczących ze sobą płynów. Szczególnie jeżeli różnica we współczynnikach lepkości jest duża wtedy wkład do średniej arytmetycznej decyduje duża wartość współczynnika.

Doktorantka dokonała modyfikacji wzoru z książki D. Violeau (cytowanie w pracy [192]) zastępując lepkość na granicy rozdziału dwóch faz, jako średnicą harmoniczną $\mu^{\text{harm}} = \mu_a \mu_b / (\mu_a + \mu_b)$ zamiast $\mu^{\text{arytm}} = (\mu_a + \mu_b) / 2$ i zmianę tą uznaje za swój istotny wkład do metody SPH.

Uwaga 5. Nie jest dla mnie jasne na czym polega wkład P.Espanol & M. Revenga (cytowanie [58]) do wzoru (3.11). Wydaje się, że jest to dokładna kopia wzoru z książki D. Violeau (w spisie literatury [192]), a doktorantka opatruje wykładnikiem swój wzór akronimem mVER (Violeau, Espanol, Revenga). Proszę komentarz dlaczego.

W rozdziale 3.2.1 („Single fluid Poiseuille flow”) doktorantka porównała wyniki otrzymane dla trzech różnych wzorów opisujących siłę lepkości: Hu&Adamsa (cytowanie w pracy [87]), D. Violeau [cytowanie w pracy [192]] oraz poprawką doktorantki (zmiana średniej arytmetycznej z lepkości na średnią harmoniczną wzoru D. Violeau). Wszystkie wybrane wzory dają podobne wyniki rozkładu prędkości przepływu Poiseuille’a. Porównanie wyników dla przepływu Poiseuille’a dwu fazowego (iloraz lepkości pomiędzy fazami wynosił 100) jest ciekawszy. Rozwiązania

ze średnią arytmetyczną μ^{arytm} znacząco odbiega od rozwiązania dokładnego. Z zaprezentowanych wyników wynika jednoznacznie, że należy brać do obliczeń średnią harmoniczną z wartości współczynników lepkości. (wykresy 3.2 i 3.3).

Uwaga 6. (dotyczy podrozdziału 3.2.1)-przepływ Poiseuille'a) Dla parametrów przyjętych w pracy ($\mu_0=1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\rho_0=1 \text{ kg/m}^3$, $v_0=1 \text{ m/s}$, $L=1 \text{ m}$) liczba Reynoldsa wynosi $Re=1$. Jakie znacznie praktyczne odgrywa przepływ z taką liczbą Reynoldsa?

Uwaga 6. Przykład związany z przepływem Poiseuille'a jest dość często powtarzanym w literaturze przykładem. Nawet w publikacjach obecnego Zespołu (Pozorski, Wawreńczuk, 2002) był ten przykład badany. Można było pomyśleć o innym, mniej opatrzonym, trudniejszym, przykładzie. Ponadto nie podano warunku początkowego dla rozkładu cząstek. Nie podano parametrów jądra interpolującego, liczbę cząstek, która brała udział w obliczeniach, czasu obliczeń. Nie podano również jak zrealizowano warunki brzegowe. Można przypuszczać, że jest to skutek pracy w Zespole.

Następnie (rozdział 3.3) doktorantka przedstawiła wyniki dla ruchu pęcherza w ośrodku dwu fazowym, dwuwymiarowym. Pęcherz wypełniony jest cieczą lżejszą i pod wpływem grawitacji unosi się do góry w nieograniczonej kolumnie ze ścianami bocznymi. Wykresy 3.8 i 3.10 przedstawiają ewolucję pęcherza w polu grawitacyjnym, pole ciśnienia i linii prądu z różnymi wartościami lepkości i gęstości. ($\mu_l=10 \text{ Ps}$, $\rho_l=1000 \text{ kg/m}^3$) oraz ($\mu_l=1 \text{ Ps}$, $\rho_l=100 \text{ kg/m}^3$). Wyniki numeryczne metody SPH doktorantka porównała z innymi metodami eulerowskimi (siatkowymi). W obecnej pracy doktoranta używała wersji SPH słabo ściśliwej (liczba Macha, $Ma<0.1$) Otrzymała dobrą zgodność wyników z danymi literaturowymi, mimo że metoda WCSPH powoduje niewielkie oscylacje wyników, które demonstrują się na wykresie prędkości unoszenia pęcherza. Oscylacje te są również widoczne w wynikach prezentowanych przez innych autorów korzystających z metody WCSPH. Na rysunku 3.10 (pierwsza kolumna) dla czasu 3.0s kształt pęcherza jakby zatrzymał (cofnął?) się w ewolucji. Spód pęcherza zrobił się płaski. Czym to należy tłumaczyć?

Uwaga 6. Budzi zaniepokojenie fakt, że przedstawiany materiał jest przedstawiony biernie. Zamieszczone wykresy są często dokładną kopią wykresów z literatury. Rysunki 3.4a i 3.4b są kopiami rysunków z książek (różnych). Trudno rozstrzygnąć, które wykresy są wykonane przez doktorantkę samodzielnie. Czy rysunek 3.5 jest kopią rysunków z pracy [91], czy też doktorantka wykonała te rysunki samodzielnie, na

podstawie swoich wyników obliczeniowych? Podobne pytanie rodzi się w związku z rysunkiem 3.7. Podpis pod rysunkiem jest niejasny. Brak jest położenia początkowego cząstek dla czasu $t=0$. Brak jest informacji o kroku czasowym, schemacie numerycznym całkowania i czasie obliczeń.

Doktorantka nie wykazuje się żadnej inwencji w badaniu zjawiska jakim jest ruch pęcherza w polu grawitacyjnym. Z rysunku 3.4b) można (z trudem) odczytać różne kształty pęcherza przy zmianie parametrów środowiska. Nie podjęto prób wyznaczenia ruchu pęcherza dla niewielkiej różnicy gęstości, (μ_{const}, ρ) np. $\rho_1/\rho_2 \approx 1.1$. Czy umieszczanie wykresów z książek i artykułów nie wymaga pozwolenia autorów?. Czy nie narusza się praw autorskich?

W rozdziale 4 doktorantka rozszerzyła swoje badania o zjawisko drgań powierzchni swobodnej wody w zbiorniku, (ang. sloshing) a następnie oddziaływania pionowego otworu w kadłubie statku, który z jednej strony (dolnej) jest otwarty dla wody morskiej, a od góry jest otwarty na ciśnienie atmosferyczne (moon pool). Taką konstrukcję dalej będę nazywał dla wygody *moonpool*.

Na wstępie doktorantka zrobiła przegląd literatury odnośnie sloshing'u.

Drgania powierzchni swobodnej mogą być wywoływane w różny sposób: drgania całego zbiornika, pobudzenie powierzchni swobodnej przy pomocy tłoka, uderzenia w powierzchnię swobodną, ruch przyspieszony zbiornika itp.. Zjawisko drgań swobodnych powierzchni swobodnej ma duże znaczenie praktyczne i jest w obszarze zainteresowań inżynierów. Fale powstające w zbiorniku, zwłaszcza gdy spotykają się fale biegnące i odbite, mogą generować znaczne przyrosty ciśnienia. Zjawisko jest nieliniowe. Rozwiązania analityczne odnoszą się do rozwiązań potencjalnego i regularnego przekroju np. zbiornika prostokątnego, okrągłego itp. Doktorantka wzięła z literatury wzór liniowej teorii (potencjalnej) opisujący wahania powierzchni swobodnej, i przytacza rozwiązanie numeryczne metodą SPH. Porównanie sił wypada mało przekonująco w porównaniu do wyników przedstawionych doktoracie Green, M. D. *'Sloshing simulations with the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method'*. PhD thesis. Imperial College London, 2017(s. 84), z której dane geometryczne i fizyczne są takie same jakie używała doktorantka. Wzór (4.4) w obecnej pracy, który wydaje się, został błędnie przepisany i być może stanowi przyczynę znacznych różnic pomiędzy obliczonymi w wartości siły pomiędzy obliczonymi przez doktorantkę i danymi z doktoratu M.D. Greena.

Uwaga: Brak jest głębszej analizy zjawiska drgań, np. uważam, że byłoby pożyteczne postawienie zagadnienia potencjalnego i wyprowadzenie np. wzoru na częstotliwość podstawową. Ciągłe zasłanianie się pracami innych autorów jest deprymujące.

Zjawisko sloshingu (drżania powierzchni swobodnej) również ma zastosowanie w przypadku zagadnienia *moonpool* przez który otrzymujemy dostęp do dna morskiego. Jest to trwały element pływającej platformy wiertniczej. Ze względu na wygodę prowadzonych prac wydobywczych, pionowy otwór (*moonpool*), posiada wnęki (*recss*), które wykorzystuje się np. do przechowywania sprzętu. Ruch powierzchni swobodnej wody w takim otworze może znacząco zmieniać dynamikę platformy wydobywczej, wyphywać na bezpieczeństwo załogi. Przy dużym falowaniu woda może przelać się przez pokład.

Do badań numerycznych doktorantka zaczerpnęła dane zamieszczone w pracy Guo, X. et al. [79]. Wymiary geometryczne otworu i wnęk we wnętrzu otworu zostały przez doktorantkę zmienione. W programie, którym dysponowała doktorantka nie było możliwości użycia warunków otwartych to przyjęła warunki okresowe. Mimo różnic w geometrii i warunkach brzegowych otrzymano metodą SPH dużą zgodność dla częstotliwości dominujących w drżaniach powierzchni swobodnej. Doktorantka wykazała, korzystając z analizy Fouriera przebiegów czasowych drgań powierzchni swobodnej, istnienie tych częstotliwości dominujących. W spektrum częstotliwości pojawiają się piki odpowiadające charakterystycznym częstotliwościom, które mają bardzo podobne do wyników otrzymanych przez innych badaczy.

Wykresy rozkładu ciśnienia i cząstek użytych w obliczeniach (rys.4.11 do 4.13) są niedopracowane i przedstawione w sposób mało przekonujący. Należało poświęcić więcej czasu na pracę z programem graficznym aby pokazać interesujące zjawisko. Z tej tematyki doktorantka opublikowała jedną pracę w materiałach konferencyjnych (E.Spricigo and J. Pozorski, In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2022)

Należy podkreślić, że doktorantka jako pierwsza zastosowała metodę SPH do zagadnienia *moonpool*.

W rozdziale 5 doktorantka zajęła się optymalizacją kształtu kanału *moonpool* korzystając z programu modeFRONTIER, co możliwe było w ramach współpracy doktorantki z firmą ESTECO. Optymalizacja miała na celu minimalizację wysokości fali wewnątrz *moonpool* na podstawie trzech, charakterystycznych wymiarów geometrycznych wnęki. Przedrostek nazwy programu modeFRONTIER, "mode", tłumaczy się jako się jako "Multi-Objective Design Exploration (MODE)". Ogólnie można powiedzieć, że program umożliwia utworzenie przestrzeni projektowej dla pozyskiwania informacji i wizualizacji, która będzie ułatwiała podjęcie decyzji o wyborze, ze zbioru rozwiązań, najkorzystniejszego (najmniej konfliktowego) dla zagadnienia, dla którego sformułowano wiele celów.

Na program składa się wiele procedur wyszukiwania minimum (maksimum) funkcji wielu zmiennych, w których wykorzystywane są różne algorytmy: metoda najmniejszych kwadratów również SVD, algorytm minMax, algorytmy genetyczne itp.. Istnieje możliwość analizy statystycznej wyników, badania wrażliwości wyników na zakłócenia itp.. Do programu istnieje możliwość podłączenia i utworzenia

obliczeniowej pętli iteracyjnej z programami CFD, MATALAB'em, CATIA itp. Są do wyboru narzędzia dla planowania eksperymentu (DOE - Design of Experiments) i analizy wyników (np. RSM, -metodologia powierzchni odpowiedzi). Doktorantka dokonała przeglądu metod służących do analizy danych, przepisując z zapałem instrukcje do programu modeFRONTIER. Podejmuje również próbę wykonania obliczeń. Połączyła modeFRONTIER ze swoim programem SPH. Nie jestem w stanie ocenić wartości naukowej wyników. Wybór wymiarów geometrycznych jako decydujących o amplitudzie fali R_H i R_L jest dokonany przez doktorantkę arbitralnie bez analizy fizycznej. Jednak podjęcie próby optymalizacji, tak aby generowana w *moonpool* była minimalna jest zagadnieniem nowatorskim, odważnym i rokuje dobrze na przyszłość

PODSUMOWANIE

Przedstawione uwagi krytyczne, są różnej wagi. Niektóre są dyskusyjne, niektóre wynikają z przyjętej przez autorkę filozofii uprawiania nauki tzn. cytowania autorów i ilustrowania swoich tez ich wynikami. Dokonała kompetentnego przeglądu literatury dotyczącej metody SPH, z dużym wyczuciem materii. Doceniam trud jaki autorka poniosła w zgromadzenie, rozpoznanie i zastosowanie odpowiednich wzorów zaczerpniętych z literatury. Brak podstawowych informacji o procesie numerycznym, najprawdopodobniej wynika z faktu, że te informacje są używane powszechnie. Przy pracy w Zespole doktorantka skupiona była bardziej na wynikach niż na informacji uzupełniającej towarzyszącej obliczeniom.

Potknięcia natury redakcyjnej są chwilowe i wierzę, że w dalszych pracach zostaną wzięte pod uwagę. Niektóre uwagi krytyczne wysunięte przeze mnie są dyskusyjne. Należy podkreślić, że doktorantka zmuszona była opanować duży warsztat pracy, poczynawszy od badań teoretycznych jak i praktycznego programowania. Założone przez autorkę tezę odnośnie przydatności metody SPH dla modelowania przepływów wielofazowych należy uznać za wykazaną. Uważam, że praca spełnia wymogi ustawy o stopniach i tytułach naukowych i wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych Gdańsku Wrocławskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wrocław, 23.10.2024

Henryk Kudela

