

Gdańsk, 12.10.2024

Dr hab. inż. Paweł Dymarski
Instytut Budowy Okrętów
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
pawdymar@pg.edu.pl

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Eleonory Spricigo

pt. „*Application of Smoothed Particle Hydrodynamics method to interfacial two-phase flows*”

promotor: prof. dr hab. inż. Jacek Pozorski

Podstawa przygotowania recenzji

Pismo Z-cy Dyrektora Instytutu Maszyn Przepływowych PAN ds. naukowych dra hab. inż. Grzegorza Żywica z dnia 5 lipca 2024 roku informujące o wybraniu mnie przez Radę Naukową Instytutu Maszyn Przepływowych, na posiedzeniu w dniu 4 lipca 2024, na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Eleonory Spricigo.

1. Uwagi ogólne

Opiniowana praca doktorska mgr inż. Eleonory Spricigo została wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Jacka Pozorskiego. Rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, a ściślej dotyczy zastosowania metody SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) do rozwiązywania zagadnień z dziedziny hydrodynamiki okrętu i obiektów oceanotechnicznych.

Na początku XXI wieku, a w szczególności w ostatnich latach, nastąpił szybki rozwój metod z dziedziny numerycznej mechaniki płynów (CFD) w zastosowaniu do rozwiązywania zagadnień przepływów ze swobodną powierzchnią, a w szczególności zagadnień związanych ze zjawiskiem powstawania i propagacji fal grawitacyjnych na powierzchni rozdziału faz oraz oddziaływania tych fal na obiekty pływające oraz infrastrukturę morską i brzegową.

Szczególnym przypadkiem oddziaływania swobodnej powierzchni cieczy na konstrukcję jest zjawisko *sloshingu* występujące w zbiornikach statków oraz na ścianach *studni* (po angielsku: *moon pool*) statków wiertniczych.

W swojej pracy doktorskiej pani mgr inż. Eleonora Spricigo zajmuje się wyżej opisaną tematyką, która jest ważna z punktu widzenia projektowania i eksploatacji statków do przewozu ładunków płynnych oraz jednostek wiertniczych posiadających *moon pool*.

2. Przegląd treści rozprawy

Recenzowana praca doktorska jest napisana w języku angielskim, zajmuje 134 strony i składa się z sześciu rozdziałów, wykazu literatury i 3 załączników: A, B i C. Bibliografia obejmuje 204 pozycje.

Pierwszy rozdział pracy to wprowadzenie, w którym Doktorantka opisuje przykłady zjawisk z występowaniem przepływów wielofazowych w naturze, jak również przykłady podobnych przepływów w technice.

Doktorantka wprowadza czytelnika w tematykę metod numerycznej mechaniki płynów CFD, które można zastosować do obliczeń przepływów wielofazowych, wymienia metody Eulera oraz Lagrange'a jako stosowane metody analizy przepływów.

Doktorantka podkreśla, że przepływy wielofazowe są zjawiskiem trudnym do modelowania numerycznego oraz stwierdza, że metoda SPH jest – ze względu na jej charakter - metodą właściwą do modelowania tego typu przepływów.

W podrozdziale 1.1 „numerical methods for multiphase flows” znajduje się przegląd literatury pod kątem metod numerycznych stosowanych do przepływów dwu- lub wielofazowych. Doktorantka utrzymuje podział metod na stosujące podejście Eulera, Lagrange'a oraz metody Arbitrary Lagrangian-Eulerian ALE.

W podrozdziale metody podzielone są na metody siatkowe (*mesh-based*) oraz metody oparte na cząstkach płynu (*particle-based*).

W metodach siatkowych wyróżnione zostały metody śledzenia powierzchni rozdziału (Front-Tracking method) oraz metody „przechwytywania” powierzchni rozdziału (Interface-Capturing methods).

Jako jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod do analiz przepływu z powierzchnią rozdziału faz doktorantka wymienia metodę Volume of Fluid (wykorzystywaną w programach opartych na metodach siatkowych). Szkoda, że w cytowanych źródłach nie znalazł się artykuł/rozdział S. Muzaferiji i M. Perića, w którym autorzy porównali schematy interpolacyjne stosowane w przepływach ze swobodną powierzchnią. Było tam porównanie metod śledzenia powierzchni rozdziału (*Interface Tracking*) oraz metody przechwytywania powierzchni rozdziału faz - *Interface Capturing Methods*. Dodatkowo uzyskane wyniki porównano z eksperymentem przerwanej tamy

Koshizukiego. W swoim artykule autorzy analizowali między innymi schemat HRIC (*High Resolution Interface Capturing*), który był stosowany w takich programach CFD jak *COMET*, czy *STAR CCM+* powszechnie używanych przy rozwiązywaniu zagadnień z dziedziny oceanotechniki. Programy te były/są używane między innymi w Centrum Techniki Okrętowej, na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa PG a nawet w IMP-PAN. Wspomniane oprogramowanie było używane zarówno do modelowania opływu i oporu okrętu, ruchu okrętu na fali jak i dynamiki obiektów offshore poddanych działaniu fali (doktoraty M. Kraskowskiego i E. Ciby).

Stwierdzenie doktorantki, że metoda VoF ma szerokie zastosowanie „nawet w kodach komercyjnych” nie do końca oddaje obecny stan rozwoju dziedziny. VoF jest stosowana w solverach RANSE-CFD opartych na metodzie objętości skończonej powszechnie.

Na konferencjach międzynarodowych takich jak Numerical Towing Tank Symposium, HYDRONAV czy MARINE można (od ponad 20 lat) wysłuchać referaty o modelowaniu zaawansowanych zagadnień z dziedziny oceanotechniki. Uzyskiwane wyniki wykazują wysoką zgodność z eksperymentem.

W podrozdziale 1.3 opisany został cel dysertacji.

Celem pracy jest pokazanie działania nowego wyrażenia na obliczanie siły lepkości w metodzie SPH. Działanie nowej metody obliczania siły lepkości przetestowane zostało początkowo na prostych przypadkach, jak: przepływ Poiseuille’a (przypadek przepływu jedno- i dwufazowego) oraz symulacja 2D unoszonego grawitacyjnie pęcherzyka.

W dalszej części pracy metoda SPH miała być przetestowana na bardziej złożonych przypadkach: *sloshingu* w zbiorniku oraz falowania w studni (moon pool) statku wiertniczego.

Zasadniczo można mieć wątpliwości, czy zjawisko *sloshingu* w zbiorniku, czy w studni statku wiertniczego jest w widoczny sposób zależne od sposobu modelowania sił lepkości.

W rozdziale 2 doktorantka wyjaśnia podstawy metody SPH: przedstawia stosowane funkcje jądra, sposoby obliczania pochodnych funkcji pola (gradientu, dywergencji i laplasjanu), przywołuje formuły na określenie błędu dyskretyzacji (błędu wygładzania). W dalszej części omówione zostały metody obliczania gęstości, równanie zachowania pędu oraz równanie zachowania energii. Dodatkowo opisany został problem określania gęstości w przypadku przepływów dwufazowych oraz metoda obliczania napięcia powierzchniowego. Omówione zostało też zagadnienie mieszania się cząstek płynów na granicy faz (zjawisko numeryczne). Dalej przedstawiony zostało równanie stanu (r. Taita) oraz stosowane sposoby modelowania ściśliwości płynu. Ostatnie sekcje rozdziału

poświęcone zostały określaniu kroku czasowego na potrzeby całkowania ruchu w dziedzinie czasu oraz sposobom modelowania warunków brzegowych, przy czym opisano tutaj metodę cząstek widmo (cząstek lustrzanych) oraz zastosowanie („zamrożonych”) cząstek ściany.

W rozdziale 3 Doktorantka przywołuje równanie na tensor naprężeń w płynie oraz opisuje stosowane metody wyznaczania siły lepkości. W rozdziale przywołane są, między innymi, formuła Monaghana na sztuczną lepkość, sposób określania siły lepkości wg Morisa oraz zaawansowana metoda określania lepkości w przepływach wielofazowych sformułowana przez Hu i Adamsa.

Jako najbardziej efektywną metodę aproksymacji członu lepkości w przepływach wielofazowych doktorantka przywołała metodę Violeau, Español i Revenga (VER). Doktorantka opracowała własną modyfikację tej metody, która polegała na zmianie sposobu uśredniania lepkości sąsiadujących cząstek. Oryginalnie, w równaniu VER, stosowana była średnia arytmetyczna. Doktorantka zaproponowała, aby zastąpić ten sposób obliczania średniej średnią harmoniczną. Opracowaną przez siebie modyfikację równania na siłę lepkości doktorantka nazwała skrótem „*mVER*”. W dalszej części rozdziału pokazane są wyniki analizy porównawczej. Analizowanym przypadkiem jest stacjonarny przepływ Poiseuille’a. W pracy pokazane są wyniki obliczeń przepływu z zastosowaniem metody analitycznej, równania Hu i Adamsa, równania Violeau oraz modyfikacji tego równania autorstwa mgr inż. Eleonory Spricigo „*mVER*”.

Metoda „*mVER*” dała wyniki bardzo bliskie wynikom analitycznym (podobnie jak zastosowanie metody Hu i Adamsa). Uzyskane przez Doktorantkę wyniki uległy znaczącej poprawie w stosunku do wyników z użyciem oryginalnej aproksymacji członu lepkiego wg Violeau.

Można więc stwierdzić, że zastosowana przez Doktorantkę modyfikacja dała pozytywny efekt w postaci poprawy dokładności uzyskanych wyników w stosunku do oryginalnego równia Violeau.

Kolejnym testem nowej metody wyznaczania członu lepkości było modelowanie unoszonego (grawitacyjnie) pęcherzyka gazu. Analiza dotyczyła dwóch przypadków różniących się gęstością oraz lepkością dynamiczną płynu pęcherzyka. W pierwszym przypadku spodziewano się kształtu spłaszczonej (od dołu) elipsy, w drugim kształtu przypominającego meduzę (pęcherzyk z tak zwanym płaszczem, „*skirt*”). Uzyskane, metodą SPH, wyniki porównano z wynikami uzyskanymi z sześciu różnych programów w tym komercyjnych. Niestety doktorantka nie podała jakie metody/schematy były wykorzystywane w tych programach. Wśród wyników nie było niestety rezultatów uzyskanych przy użyciu STAR CCM+ (oprogramowania wykorzystywanego do obliczeń dwufazowych zwłaszcza w oceanotechnice).

Każdy z sześciu rezultatów wyglądał inaczej, więc trudno jednoznacznie stwierdzić, czy wynik uzyskany przez doktorantkę był zadowalający. Jednak wynik uzyskany z oprogramowania „TP2D” wygląda bardzo podobnie do wyniku uzyskanego przez doktorantkę.

W rozdziale 4 zaprezentowano dwa przypadki obliczeniowe, które są wzorowane na zagadnieniach spotykanych w projektowaniu i eksploatacji obiektów rzeczywistych (zwłaszcza w oceanotechnice).

Pierwszy z przypadków to przypadek „chlupotania” cieczy w (poruszającym się) zbiorniku. Zjawisko *sloshingu* jest dość powszechnie analizowane w przypadku statków przewożących ładunki płynne.

Drugi przypadek to zagadnienie interakcji wody ze ścianami studni (*moon pool*) statku wiertniczego. W tym przypadku może wystąpić zarówno zjawisko *sloshingu* (na kierunku wzdłużnym i poprzecznym) oraz zjawisko ruchu pionowego wody (względem ścian), tak zwanego „ruchu tłoka”.

W przypadku testowym nr 1 szerokość zbiornika wynosiła 1m, wysokość 0.5 m a poziom cieczy wynosił 0,1 m. Analizowanymi płynami były woda i powietrze. Uzyskane wyniki były porównane z wynikami uzyskanymi z rozwiązania zagadnienia przepływu potencjalnego ze swobodną powierzchnią.

W pracy porównano przebieg (w czasie) wysokości swobodnej powierzchni na lewej ścianie oraz przebieg siły naporu na tę ścianę (Fig. 4.2). O ile przebieg wysokości fali uzyskany z symulacji SPH jest niemal tożsamy z rozwiązaniem analitycznym, o tyle amplitudy siły naporu na ścianę uzyskane z SPH są około 2 razy mniejsze niż uzyskane z teorii przepływu potencjalnego.

Doktorantka powyższą rozbieżność tłumaczy dość lakonicznie wpływem siły lepkości, jednak nie przeprowadziła analizy wpływu lepkości na wysokość amplitudy siły.

Z doświadczenia można stwierdzić, że w ruchu falowym lepkość ma marginalne znaczenie na uzyskiwane wyniki (bardzo często się ją pomija). Jeśli amplitudy fali mierzone na ścianie zbiornika były zgodne z rozwiązaniem analitycznym, to również amplituda siły naporu na ścianę będąca wynikiem działania ciśnienia dynamicznego powinna odznaczać się wysoką zgodnością.

Doktorantka powinna przeanalizować przebiegi ciśnienia dla punktów na ścianie lewej (lub niedaleko od tej ściany) o różnej odległości od dna zbiornika. Przebiegi ciśnienia powinny być porównane z rozwiązaniem analitycznym. Bez tych danych trudno stwierdzić czy problem jest po stronie wyznaczania ciśnienia, czy wyznaczania oddziaływania cząstek na ścianę zbiornika.

Po analizie rysunku Fig 4.3 b) można wnioskować, że ciśnienie hydrostatyczne jest obliczane prawidłowo.

Przy okazji opisu analizowanego przypadku doktorantka wspomniała, że liczba Reynoldsa wynosi około 10^5 . Oznacza to, że przepływ w zbiorniku jest przepływem turbulentnym.

Nasuwa się pytanie: na ile modelowany metodą SPH przepływ ma charakter przepływu turbulentnego? Czy zastosowana liczba cząstek oraz krok czasowy pozwolą na uzyskanie turbulentnej warstwy przyściennej?

Kwestią nie do końca jasną są też zadane warunki brzegowe: przy omawianiu tychże zostały pokazane warunki „ghost particles” oraz „dummy particles”. W przypadku testowym zastosowano „fixed ghost particles” i zasygnalizowano problem „przyklejania się” cząstek do ścian zbiornika. Dlaczego nie zastosowano warunku „ghost particles”? Warunek ten (wg opisów w rozdziale 3) został zaimplementowany w kodzie rozwijanym przez doktorantkę i jej zespół.

Według mojej oceny, ten przypadek testowy nie został prawidłowo (wyczerpująco) przeanalizowany. Prawdopodobnie niewielkim nakładem pracy można było uzyskać lepsze rezultaty (przebieg siły naporu).

Przypadek testowy nr 2 to *sloshing* oraz ruch pionowy wody w studni statku. Przy czym „prawa” ściana studni posiada wgłębienie.

Warunki brzegowe w omawianym przypadku zostały sformułowane w ten sposób, że właściwie ruch pionowy wody w studni był niemożliwy, gdyż dno akwenu było w niewielkiej odległości od dna statku (warunek brzegowy slip-wall) a po lewej i prawej stronie domeny zastosowano warunek periodyczny. Kadłub statku oscylował na kierunku lewo-prawo. Omawiane warunki brzegowe wymuszały stałą ilość wody pod kadłubem, co w przypadku braku nurzań kadłuba uniemożliwiało wpływanie lub wypływanie mas wody do/ze studni.

Analizie mógł podlegać jedynie *sloshing*.

Na ścianach statku zastosowano warunek „dummy particles”. Warunek ten mógł stwarzać problemy przyklejania się cząstek do opływającego obiektu. Jednak problemy te nie były raportowane.

Analizy przeprowadzono dla dwóch różnych ilości cząstek 18922 oraz 75606 (dla wody).

Wyniki obliczeń przedstawione zostały w postaci wykresu przebiegu wysokości fali na lewej ścianie, prawej ścianie oraz w przekroju pośrodku studni (Fig 4.9). Uzyskany obraz fali wyraźnie zależał od głębokości studni. Wysokość fali w dziedzinie czasu nie była porównywana z innymi rozwiązaniami, ani z eksperymentem.

Dodatkowo, na wykresie Fig. 4.10, przedstawiono rezultat analizy widmowej uzyskanego przebiegu i porównano go z widmami uzyskanymi eksperymentalnie oraz z analizy numerycznej przeprowadzonej przez Guo i innych.

Częstości pików widma uzyskanego na podstawie wyników Doktorantki pokrywają się niemal dokładnie z częstościami kolejnych harmonicznymi uzyskanych z eksperymentu. Wyjątkiem jest trzeci pik, którego już niemal nie widać w wynikach symulacji SPH. Stosunkowo duża rozbieżność

w wynikach objawia się przy analizie szerokości pasm widma. Z eksperymentu uzyskano dwa wyraźne, bardzo wąskie pasma oraz trzeci pik czterokrotnie niższy od drugiego. Czyli w wyniku badań doświadczalnych uzyskano dwie wyraźne fale sinusoidalne, z których „druga” była dwa razy krótsza od pierwszej. W wyniku obliczeń uzyskano raczej widmo szerokopasmowe z wyraźnie zarysowaną pierwszą harmoniczną i „rozmytą” drugą.

Wydaje się, że całkowita energia fali w studni, otrzymana obliczeniowo, była podobna do uzyskanej eksperymentalnie, jednak doktorantka nie policzyła pól pod wykresami, ani kolejnych ich momentów. Szkoda, pozwoliłoby to na przeprowadzenie porównania nie tylko jakościowego, ale i ilościowego.

Jako rezultat obliczeń, doktorantka pokazała również kształt swobodnej powierzchni oraz rozkład ciśnienia w obszarze obliczeniowym w poszczególnych krokach czasowych (Fig.4.11) .

Można tu sformułować następujące uwagi:

- prezentując kształt swobodnej powierzchni wystarczyło pokazać jedynie część dziedzinę pomiędzy ścianami studni o wysokości od minimalnej doliny do maksymalnego grzbietu. Dodatkowo można było nanieść siatkę z podziałką (np. w celu odczytania długości i wysokości fali).
- pokazując rozkład ciśnienia należało odjąć od uzyskanych wartości składnik ciśnienia hydrostatycznego, który jest tutaj dominujący. Wizualizacja jedynie ciśnienia dynamicznego pozwoliłoby na bardziej wnikliwą analizę uzyskanych wyników. W tej chwili poszczególne „klatki” właściwie się między sobą nie różnią.

W rozdziale 5 przedstawiono proces optymalizacji geometrii studni w celu minimalizacji maksymalnej wysokości fali w zależności od założonych warunków w postaci częstości wymuszeń. Doktorantka posłużyła się metodą Design of Experiments. W celu uzyskania optymalnych kształtów studni przeprowadziła kilkadziesiąt symulacji.

Jako wynik, na rysunku Fig. 5.13, pokazane zostały optymalne przekroje studni w zależności od zadanej częstości wymuszeń.

Wydaje się, że bardziej właściwym byłoby przeprowadzenie optymalizacji dla zadanego widma falowania oddziałującego na statek, które z kolei skutkuje określonym widmem odpowiedzi (widmem ruchu statku).

Niemniej uzyskane przez doktorantkę wyniki wydają się interesujące, sugerowane przeze mnie działanie można potraktować jako kolejny (przyszły) etap analiz.

W rozdziale 6 zatytułowanym „Wnioski” znalazło się raczej ogólne streszczenie poszczególnych rozdziałów niż szersze podsumowanie uzyskanych wyników.

Doktorantka stwierdza, że metody SPH wykazują znaczny potencjał do analizy przepływów wielofazowych, o czym ma świadczyć obiecująca wydajność symulacji obejmujących nową formułę na siłę lepkości. Z drugiej strony doktorantka przyznaje, że metoda nie jest jeszcze wystarczająco udoskonalona, aby poradzić sobie ze złożonością zagadnień występujących w przemyśle (okrętowym).

Na końcu znajdujemy optymistyczne stwierdzenie, że "tak czy inaczej, nadal istnieje nadzieja na przyszły postęp, dlatego ważne jest kontynuowanie badań".

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Praca robi wrażenie bardzo porządnie ułożonej w sensie prezentowanych treści jak i czytelnej formy (co dzisiaj nie jest powszechne).

Praca zaczyna się od wprowadzenia, w którym znajduje się przegląd literatury pod kątem modelowania zagadnień przepływu dwufazowego, który został zakończony sformułowaniem celu pracy.

Przegląd literatury z jednej strony był dość obszerny pod względem ilości cytowanych pozycji, z drugiej strony, niestety nie był on zbyt wnikliwy. Najczęściej przytaczane przez doktorantkę metody/schematy używane do modelowania przepływów ze swobodną powierzchnią (rozdziału faz) były wymieniane jedynie z nazwy, ciężko było się dowiedzieć na czym dana metoda konkretnie polega. Zapewne nie wszystkie metody są warte – z punktu widzenia celu pracy – poświęcenia im większej uwagi, należało natomiast wybrać kilka metod najbardziej obiecujących i omówić je dokładniej pokazując przykładowe wyniki.

Z punktu widzenia okrętowca, czy osoby zajmującej się dziedziną *offshore* zaskakujące jest dla mnie niewymienienie żadnej z pozycji Milovana Perića, który ponad 20 lat uczestniczy w rozwoju metod modelowania przepływów ze swobodną powierzchnią. M. Perić jest między innymi twórcą programu *COMET* jednego z pierwszych programów CFD (używanych w Centrum Techniki Okrętowej, HSVA, VOITH, itd), które dały prawidłowy wynik układu falowego generowanego przez statek. Program był również rozwijany na potrzeby modelowania kawitacji a także dynamiki obiektów pływających poddanych działaniu fali. W późniejszym czasie został wykupiony przez CD-Adapco, a jego funkcjonalności przejął program *STAR CCM+*. Tematykę przepływów ze swobodną powierzchnią podejmował też Michel Visonneau, który między innymi rozwijał program *NUMECA FINE/Marine*. Na uznanie zasługują też prace Jeroena Wackersa, który między innymi rozwijał algorytmy siatki adaptacyjnej (*remeshingu*) w zastosowaniu do przepływów ze swobodną powierzchnią w oceanotechnice.

Z drugiej strony doktorantka przywołuje literaturę [Rakhsha et al], w której znajduje się porównanie metod FEM i SPH. W praktyce metody FEM rzadko są stosowane w programach CFD, które zasadniczo opierają się na metodzie objętości skończonej FVM.

To czego zabrakło w rozdziale, to sporządzenie przeglądu metod CFD pod kątem uzyskania rozwiązania dla określonych problemów, nie tylko w sensie fizyki przepływu, ale także biorąc pod uwagę rozmiar analizowanych obiektów oraz czas trwania analizowanego zjawiska.

W przypadku obiektów oceanotechnicznych mamy do czynienia z rozmiarem obiektów rzędu 10 do 100m (lub więcej). Wymagany czas modelowania zjawiska to około 10000 sekund (3 godziny), gdyż modelowane jest oddziaływanie fali nieregularnej (o losowym przebiegu). Należy tutaj również podkreślić, że przepływ wokół nawet tak podstawowego obiektu *offshore* jak monopile jest zasadniczo trójwymiarowy.

Uważam więc, że przegląd literatury był mało obiektywny, nie zostały wystarczająco podkreślone różnice (w tym wady i zalety) pomiędzy omawianymi metodami.

Głównym wkładem Doktorantki w rozwój metody SPH była modyfikacja sposobu obliczania siły lepkości. Modyfikacja polegała na zmianie metody obliczania uśrednionej lepkości dla sąsiadujących ze sobą cząstek.

Pierwszym celem pracy było sprawdzenie dokładności obliczeń z zastosowaniem wprowadzonej modyfikacji obliczania lepkości na przykładzie stacjonarnego przepływu Poiseuille’a dla wariantów przepływu jedno- i dwufazowego oraz zastosowanie „nowej” metody do obliczeń unoszonego w cieczy pęcherzyka.

Drugim, bardziej ambitnym, celem było użycie rozwijanego przez doktorantkę kodu SPH do symulacji zjawiska *sloshingu* w oscylującym zbiorniku oraz symulacji dynamiki cieczy w studni (*moon pool*) statku wiertniczego.

W końcowej części pracy Doktorantka spróbowała zastosować metodę SPH do optymalizacji wymiarów studni (*moon pool*).

O ile sposób obliczania członu lepkości może być kluczowy w dwóch pierwszych przypadkach analizowanych przez Doktorantkę (przepływ Poiseuille’a, obliczenia unoszonego pęcherzyka), o tyle trudno wykazać, że lepkość ma istotny wpływ na dynamikę cieczy w zbiorniku (modelowanie *sloshingu*) czy ruch falowy cieczy w studni statku wiertniczego.

Nawet Doktorantka porównywała swoje wyniki symulacji przepływu w zbiorniku z rozwiązaniem opartym na modelu potencjalnym przepływu (czyli bez uwzględniania efektu lepkości).

Sposób modelowania lepkości prawdopodobnie nie jest też kluczowy w przypadku symulacji przepływu w studni. Tutaj prawdopodobnie metoda obliczania sił lepkości mogłaby mieć duże

znaczenie, gdyby statek wykonywał nurzania a na krawędziach otworu studni tworzyłby się zawirowania.

Należy zauważyć, że zastosowanie metod SPH do przepływów laminarnych (o niskich liczbach Reynoldsa) jest jak najbardziej uzasadnione i tutaj w pracy uzyskano obiecujące wyniki. Natomiast stosowanie metod SPH do modelowania przepływów burzliwych, dla których $Re > 10^7$ nie da nam prawidłowego rozkładu prędkości w warstwie przyściennej, prawdopodobnie grubość tej warstwy będzie mniejsza niż rozmiar pojedynczej „cząstki płynu”.

Nie twierdzą tutaj, że modelowanie przepływu w dużych zbiornikach z użyciem SPH nie ma sensu. Pozwolę sobie jednak stwierdzić, że efekty wynikające ze zjawiska lepkości będą modelowane niedokładnie. W wielu przypadkach prawidłowe modelowanie lepkości może jednak nie być aż tak istotne.

Uwagi do pracy:

1. Pytanie: Dlaczego przy modelowaniu *sloshingu* w zbiorniku zastosowano warunek brzegowy z użyciem cząstek „zamrożonych” (*fixed ghost particles*), zamiast warunku *ghost particles*, który prawdopodobnie nie powodowałby problemów przyklejania się cząstek wody do ściany.

2. Na Fig. 4.2 pokazano wyniki obliczeń *sloshingu* w zbiorniku. Wykres (a) przedstawiający przebieg wysokości fali w czasie, który zgadza się bardzo dobrze z wynikami uzyskanymi analitycznie. Na rysunku (b) przedstawiono siłę działającą na lewą ścianę zbiornika. Amplituda siły obliczonej metodą SPH jest około 2 razy mniejsza od amplitudy siły uzyskanej analitycznie. Doktorantka różnice w wynikach uzasadnia uwzględnieniem lepkości w „swoim” modelu.

2.a) **Pytanie:** Na jakiej podstawie doktorantka wysnuła tezę, że zjawisko lepkości wpływa na istotnie siłę reakcji. Czy zostały wykonane obliczenia ze zmniejszoną wartością lepkości, aby dowieść tej tezy.

2.b) **Pytanie:** Czy istnieje możliwość porównania przebiegu wartości ciśnienia odczytywanego w punkcie w lewym dolnym rogu zbiornika? Przyczyną „nieprawidłowej” wartości siły może być błędnie obliczana wartość ciśnienia.

3. W podrozdziale 4.2.4 przedstawiono szczegóły modelu SPH. Na brzegu lewym i prawym domeny zastosowano warunek periodyczny.

Pytanie: Czy nie lepiej byłoby zastosować warunek zadanego ciśnienia? Czy ten typ warunku jest „dostępny” w modelu używanym przez doktorantkę.

Zastosowanie warunku periodycznego na brzegach lewym i prawym oraz warunku ściany na dnie obszaru powodu, że łączy przepływ (strumień masy) płynu przez otwór w dnie (*moon pool*) będzie zerowy.

4. Na rysunkach Fig. 4.11-13 przedstawiona została wizualizacja wyników obliczeń przepływu w *moon pool*. Rysunki po lewej stronie przedstawiają kształt swobodnej powierzchni (fale) w studni. Należało pokazać jedynie wybrany fragment dziedziny.

Rysunki po prawej przedstawiają pole ciśnień. Analiza ciśnienia powinna być wykonana po odjęciu składnika ciśnienia hydrostatycznego (tak aby pokazać jedynie ciśnienie dynamiczne). W obecnej formie widzimy właściwie jedynie rozkład ciśnienia hydrostatycznego, poszczególne „klatki” nie różnią się właściwie od siebie. Skala kolorów mogła być dobrana lepiej.

5. Poprzez układ pracy, Doktorantka sugeruje, że poprawne (ulepszone) modelowanie lepkości pozwoli na (dokładniejsze?) modelowanie *sloshingu* w zbiorniku oraz modelowanie dynamiki wody w studni statku wiertniczego.

Pytanie: Do jakiej wartości liczby Reynoldsa doktorantka jest w stanie (w praktyce) prawidłowo modelować siły lepkości występujące w przepływie. Czy metoda SPH pozwala w prawidłowy sposób modelować przepływy turbulentne?

6. W pracy nie znajdziemy dyskusji na temat efektywności metody SPH. Nie wiemy jaki jest czas trwania obliczeń (np. w funkcji ilości cząstek), nie dowiemy się również, czy prowadzenie analiz wyłącznie w 2D było uzasadnione. Obliczenia były prowadzone z zastosowaniem techniki CUDA (*Compute Unified Device Architecture*), czyli z zastosowaniem procesora GPU.

Pytanie: Jaki był wpływ zastosowania techniki CUDA na czas wykonywania obliczeń w porównaniu z użyciem do obliczeń (wielordzeniowego) procesora CPU nowej generacji (dostępnego dla „zwykłych” PC)? Chodzi o porównania czasu obliczeń na GPU oraz CPU.

4. Ocena końcowa rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć doktorantki zaliczam:

- zaproponowanie „nowego” sposobu obliczania średniej wartości lepkości przy oddziaływaniu wzajemnym dwóch cząstek płynu oraz zweryfikowanie opracowanej metody na przypadkach przepływu Poiseuille’a oraz opływu unoszonego pęcherzyka.
- sprawdzenie możliwości zastosowania metody SPH do modelowania *sloshingu* w oscylującym zbiorniku. Pokazanie ograniczeń tej metody w prognozowaniu siły naporu na ścianę zbiornika oraz ograniczeń w kontekście liczby cząstek jaką można zastosować, aby możliwe było w określonym czasie uzyskać wyniki na obecnie dostępnych komputerach. W tym drugim przypadku brakuje jednak analizy ilościowej.
- pokazanie możliwości i ograniczeń metody SPH na przykładzie obliczeń dynamiki cieczy w studni statku wiertniczego.

Doktorantka wykazała się w pracy szeroką wiedzą na temat modelowania przepływów wielofazowych metodą SPH. Mimo wielu uwag krytycznych **oceniam recenzowaną pracę doktorską pozytywnie.**

5. Wniosek końcowy

Pragnę stwierdzić, że mgr inż. Eleonora Spricigo wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a recenzowana praca doktorska spełnia w stopniu dostatecznym warunki stawiane rozprawom doktorskim (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Dz.U.20.04.2023 r., poz. 742) i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Paweł Dymarski