

Zastosowanie metody hydrodynamiki cząstek wygładzonych (SPH) do przepływów z powierzchniami międzyfazowymi

Badanie przepływów wielofazowych ma istotne znaczenie dla lepszego zrozumienia zjawisk oraz doskonalenia rozwiązań technicznych stosowanych w różnych procesach przemysłowych i w życiu codziennym. We współczesnej fizyce i technice symulacje numeryczne odgrywają ważną rolę, pomagając pracownikom naukowym i inżynierom w tym przedsięwzięciu.

Metoda hydrodynamiki cząstek wygładzonych (ang. *Smoothed Particle Hydrodynamics*, SPH) wykorzystuje dyskretyzację opartą na koncepcji cząstek: każda cząstka reprezentuje właściwości płynu i porusza się w obszarze obliczeniowym, odzwierciedlając zachowanie płynu. Interakcje pomiędzy cząstkami modeluje się za pomocą gładkiej funkcji interpolującej zwanej jądrem. W obliczeniowej mechanice płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics*, CFD) istnieją różne metody wykorzystujące podejście Eulera umożliwiające wyznaczanie przepływów wielofazowych. Jako alternatywa korzystająca z podejścia Lagrange’a metoda SPH okazała się dogodną opcją dla wybranych klas przepływów wielofazowych, ponieważ nie wymaga specjalnych sposobów wyznaczania dynamiki powierzchni międzyfazowej (powierzchni rozdziału faz, interfejsu). Niemniej jednak należy zwrócić uwagę na sposób ujęcia zmian gęstości i lepkości płynu na granicy faz, zwłaszcza gdy zmiany te są znaczne.

Ponieważ prace na temat modelowania wielofazowych przepływów lepkich stanowią relatywnie niewielką część aktualnej literatury z zakresu metody SPH, naszym celem jest ocena modelu obliczeniowego oraz funkcjonalności kodu numerycznego wykorzystywanego i rozwijanego w kontekście tych złożonych symulacji. Jednym z celów jest zdefiniowanie prawidłowego wyrażenia siły lepkości w słabo ściśliwym podejściu SPH, określanym akronimem WCSPH (ang. *weakly compressible*, WC). W niniejszej rozprawie proponujemy zmodyfikowaną formułę Violeau, Español i Revenga (mVER), która jest zgodna z fizykalnym członem sił lepkości w obecności granicy faz poprzez zastosowanie odpowiedniego wygładzenia.

Nowa formuła została zweryfikowana w przypadku przepływu Poiseuille’a w stanie ustalonym w wariantach jedno- i dwufazowych, których rozwiązania analityczne są znane. Dodatkową zaletą przepływu Poiseuille’a jako problemu wzorcowego (ang. *benchmark*) jest fizykalna prostota, co pozwoliło skupić się na ocenie formuły mVER. Ponieważ przeszła ona pomyślnie pierwszy etap, rozważono inny często spotykany w literaturze problem wzorcowy dla przepływów z powierzchnią międzyfazową: wznoszenie się pęcherzyka gazu w cieczy. W tym zagadnieniu rozważa się dwa reżimy ruchu; różnią się one kształtem, jaki przyjmuje pęcherzyk pod wpływem siły wyporu i efektu sił ścinania, w tym na granicy rozdziału faz. W pierwszym reżimie dwie fazy płynne cechuje stosunkowo niewielka różnica w wartościach gęstości i lepkości, a ostateczny kształt pęcherzyka jest elipsoidalny. W drugim reżimie stosunki gęstości i lepkości są znacznie wyższe; w efekcie pęcherzyk ulega silnej deformacji i przyjmuje kształt podobny do dzwonu lub spódnicy (ang. *skirted regime*). Pierwszy przypadek (reżim elipsoidalny) okazał się mniej wymagający obliczeniowo, co pozwoliło uzyskać dobrą zgodność z danymi referencyjnymi dla prędkości wznoszenia się pęcherzyka i jego końcowego kształtu, określanego również za pomocą parametru kolistości. Stosując SPH w celu symulacji drugiego reżimu, napotkaliśmy na trudności w uzyskaniu oczekiwanego kształtu pęcherzyka. Pozytywnym rezultatem było to, że jego górna część uzyskała kształt porównywalny do znanego z literatury,

a końcowa prędkość wznoszenia pęcherzyka oraz parametr kolistości były zbliżone do referencyjnych. Obydwa przypadki wykazały jednak oscylacyjny przebieg prędkości wznoszenia; jest to skądinąd znany problem występujący w podejściach słabo-ściśliwych.

Sformułowanie mVER testowano także pod kątem bardziej złożonych zastosowań, w tym zjawiska ruchu cieczy w zbiorniku z powierzchnią swobodną (ang. *sloshing* – chlupotanie, rozkołys) oraz w specyficznej konfiguracji tak zwanego basenu księżycowego (ang. *moon pool*), występującego na statkach wiertniczych i platformach morskich. Jest to otwór w kadłubie statku ułatwiający prowadzenie prac podwodnych z pokładu. Ponieważ w naszym kodzie nie symulowano wcześniej zagadnienia chlupotania, przypadek wzorcowy ruchu cieczy w zbiorniku stanowił naturalny wstęp do symulacji SPH basenu księżycowego. Porównując uzyskane wyniki z formułami analitycznymi wynikającymi z teorii przepływu potencjalnego, uzyskaliśmy dobrą zgodność wysokości fali, natomiast zmienna w czasie siła oddziaływania na ściany zbiornika miała mniejszą amplitudę z uwagi na efekty sił lepkości.

Jako ostatni w rozprawie przypadek przepływu wielofazowego rozważono basen księżycowy. Jego obecność wpływa na stabilność ruchu statku, co wymaga dokładnych badań, szczególnie w przypadku jednostek takich jak statki wiertnicze często poddawanych trudnym warunkom na otwartym morzu. Pomimo znacznych postępów w zakresie eksperymentu, CFD okazuje się realną i stosunkowo dogodną alternatywą, w niektórych przypadkach eliminując potrzebę złożonych i kosztownych badań na basenie modelowym. Biorąc pod uwagę ten aspekt, wybraliśmy najnowsze dostępne z literaturze studium, zarówno eksperymentalne jak i obliczeniowe, i zaimplementowaliśmy ten sam przypadek w kodzie SPH. Niezależnie od niezbędnych uproszczeń, zarówno geometrii (np. nasz basen księżycowy jest dwuwymiarowy), jak i modelu fizycznego (np. przyjęcie okresowych, zamiast otwartych, warunków brzegowych), uzyskano dominującą częstotliwość fal powierzchniowych porównywalną z danymi referencyjnymi.

Ponadto dla przypadku basenu księżycowego podjęto analizę rozmiaru wnęki (ang. *recess*), która nadaje basenowi charakterystyczny kształt litery L poprzez wypływanie jego części. W ostatnim czasie takie rozwiązanie okazało się użyteczne w praktyce morskiej, szczególnie na statkach wiertniczych, do montażu urządzeń podwodnych. Dodatkowo wnęka wpływa na dynamikę fal powierzchniowych w tym basenie. Przeprowadziliśmy optymalizację geometrii wnęki, mając na celu znalezienie najlepszego rozwiązania lub zestawu rozwiązań, które minimalizują wysokość fali wewnątrz basenu księżycowego. Optymalizację wykonaliśmy sprzęgając kod SPH z oprogramowaniem modeFRONTIER dostarczonym przez ESTECO SpA i testując różne warunki przepływu. Wykorzystując badany wcześniej uproszczony basen księżycowy, przeprowadziliśmy najpierw szereg wstępnych symulacji, zmieniając wysokość i długość wnęki, a także częstotliwość fal powierzchniowych. Na tej podstawie, wykorzystując metodę powierzchni odpowiedzi, stworzyliśmy nowy predykcyjny model matematyczny. Zastosowaliśmy ten metamodel, aby porównać odpowiednią liczbę konfiguracji geometrycznych wnęki i znaleźć tę (lub te), która jest najlepsza w danych warunkach przepływu.

Zdaniem autorki, niektóre możliwe kierunki dalszych prac to: (i) zbadanie, w ramach podejścia WCSPH, związku pomiędzy jądrem interpolacji a obserwowanymi oscylacjami rozwiązania; (ii) dalsza weryfikacja formuły mVER w testach porównawczych, także z zastosowaniem innego oprogramowania SPH; (iii) badania w zakresie poprawnej fizykalnie i wydajnej obliczeniowo implementacji otwartych warunków brzegowych.