Dr hab. inż. Ryszard Staroszczyk
Instytut Budownictwa Wodnego PAN
ul. Kościerska 7
80-328 Gdańsk

Gdańsk, 15 listopada 2018.

Recenzja pracy doktorskiej mgra Mikołaja Karpińskiego pt. *"Modelowanie pola prędkości wody nad formami dennymi w korytach rzecznych metodą siatkową Boltzmanna"*

Niniejsza recenzja została wykonana na wniosek Rady Naukowej Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, w odpowiedzi na pismo NS-420-04/18 z dnia 26 września 2018 r. podpisane przez dr hab. inż. Beatę Orlecką-Sikorę, Dyrektor IGF PAN.

1. Krótki opis pracy

Przedmiotem przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej mgra Mikołaja Karpińskiego jest modelowanie numeryczne pola prędkości wody w korytach rzecznych, ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w turbulentnej warstwie przyściennej w bezpośrednim sąsiedztwie dna pokrytego zmarszczkami. Zasadniczym celem pracy było przedstawienie i analiza podstaw teoretycznych metody siatkowej Boltzmanna, jej implementacja na komputerze i przeprowadzenie symulacji numerycznych przepływów dwuwymiarowych dla wybranych geometrii form dennych i założonych warunków hydrodynamicznych w kanale otwartym. Wyniki symulacji pozwoliły na przeprowadzenie analizy ilościowej prędkości średnich i ich fluktuacji w przekrojach poprzecznych koryta rzecznego, a także umożliwiły analizę jakościową rozwoju struktur wirowych w wodzie.

Całość pracy podzielono na sześć rozdziałów. Pierwszy ma charakter krótkiego wstępu, w którym przedstawiono motywację do podjęcia opisanego powyżej zagadnienia oraz omówiono cel i zakres badań podjętych w ramach pracy doktorskiej. W rozdziale drugim omówiono podstawowe równania hydrodynamiki, opisujące zachowanie płynów w skali mikro-, mezo- i makroskopowej. W szczególności, opisano podstawowe koncepcje, równania i wyniki teorii kinetycznej gazów, na bazie których powstała metoda siatkowa Boltzmanna, oraz przedyskutowano zależności pomiędzy równaniami Boltzmanna i Naviera-Stokesa. Rozdział trzeci jest poświęcony szczegółowemu omówieniu modelu siatkowego Boltzmanna. Naszkicowano w nim algorytm obliczeniowy metody, metody implementacji warunków początkowych i brzegowych oraz przedstawiono wyniki testów numerycznych modelu. W rozdziale czwartym rozprawy omówiono podstawowe zjawiska fizyczne występujące w przepływach w korytach otwartych nad dnem pokrytym zmarszczkami oraz dokonano przeglądu literatury poświęconej badaniom eksperymentalnym i modelowaniu

RS

numerycznemu tych zjawisk. Rozdział piąty zawiera wyniki symulacji numerycznych przepływu wody w wyidealizowanym korycie rzecznym w zależności od geometrii form dennych i zadanej średniej prędkości przepływu. W ostatnim, szóstym rozdziale, podsumowano najważniejsze wyniki uzyskane w pracy oraz wnioski z nich płynące. Łącznie, praca liczy 105 stron i zawiera 51 rysunków oraz 5 tabel, a wykaz cytowanej literatury obejmuje 85 pozycji.

2. Uwagi ogólne

Praca napisana jest w sposób zwięzły i dość suchy, co z pewnością wynika z tego, że głównym "narzędziem przekazu" Doktoranta jest formalizm matematyki i mechaniki statystycznej. Niestety, Autor rzadko numerował równania i odwoływał się do wcześniejszych wzorów w toku swoich rozważań teoretycznych, co miejscami utrudniało śledzenie kolejnych kroków analizy. Znalazłem w pracy szereg usterek językowych (część z nich wymieniłem w punkcie 3) i tzw. błędów literowych, jednak na ogół nie utrudniały one lektury rozprawy. Nie mam zastrzeżeń co do organizacji całości pracy, choć wydaje mi się, że może lepiej byłoby umieścić – zaraz po rozdziale wstępnym – rozdział 4 rozprawy, omawiający zjawiska fizyczne będące przedmiotem rozprawy oraz metody ich analizy (w oparciu o zamieszczony w tym rozdziale przegląd literatury), zanim przystąpi się do szczegółowego omówienia metody numerycznej zaproponowanej przez Autora w celu rozwiązania zadania postawionego na wstępie pracy.

Centralnymi częściami przedłożonej rozprawy doktorskiej są rozdziały 3 i 5. Pierwszy z nich jest poświęcony opisowi modelu obliczeniowego opartego na metodzie siatkowej Boltzmanna, a drugi dyskusji wyników uzyskanych przez zastosowanie tego modelu do symulacji przepływu wody w korycie rzecznym pokrytym formami dennymi o wyidealizowanej geometrii.

Metoda siatkowa Boltzmanna, wywodząca się z klasycznej teorii kinetycznej gazów, jest stosunkowo nową metodą numeryczną, rozwijaną od około dwudziestu lat (choć jej początków można się dopatrywać w kilku pracach opublikowanych w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku). Metoda ta ma szereg zalet w porównaniu z tradycyjnymi metodami obliczeniowymi stosowanymi w hydrodynamice w przypadkach, gdy mamy do czynienia ze złożonymi, szybkozmiennymi zjawiskami mającymi charakter lokalny (np. zachodzącymi na granicach ośrodków o różnych właściwościach fizycznych). W ostatnich kilkunastu latach metoda ta była pomyślnie wykorzystywana do rozwiązywania zagadnień, które w skali makroskopowej opisywane są równaniami Naviera-Stokesa. Jednak zastosowanie tej metody przez Autora ocenianej rozprawy do analizy numerycznej zagadnień przepływów w kanałach otwartych, a w szczególności do modelowania struktur wirowych powstających w pobliżu nieregularnego dna koryta rzecznego, ma charakter nowatorski i niewątpliwie zasługuje na uznanie. Autor dobrze poradził sobie z formalizmem metody siatkowej Boltzmanna i – o czym świadczą wyniki obliczeń zaprezentowane w rozdziale 5 pracy – z

RS

powodzeniem zaimplementował ją w swoim programie obliczeniowym.

Rozdział 3, prezentujący metodę siatkową Boltzmanna, zawiera informacje dotyczące dwóch aspektów metody: teoretycznego (równania matematyczne) i numerycznego (algorytm metody i sposób implementacji równań w programie komputerowym). W moim odczuciu, fragmenty rozdziału dotyczące aspektu teoretycznego metody są zbyt obszerne i miejscami zawierają informacje, które są niepotrzebne w kontekście rozprawy, natomiast aspekt numeryczny jest potraktowany zbyt skrótowo, aby pomóc czytelnikowi zrozumieć podstawowe idee i techniki numeryczne metody, która nie jest jeszcze szerzej znana. Przykładowo, nie jestem przekonany, czy wszystkie rozważania teoretyczne przedstawione w podrozdziale 3.3 (9 stron tekstu) są niezbędne i nie można byłoby ich skrócić, prezentując tylko najważniejsze wyniki analityczne (zakładam w tym miejscu, że całość przedstawionych rozważań pochodzi z literatury, tzn. nie są one oryginalnym wkładem Doktoranta w teorię metody siatkowej Boltzmanna). Dalej, w podrozdziale 3.5, opisane są techniki implementacji warunków brzegowych w metodzie Boltzmanna. W odniesieniu do warunków Dirichleta omówiono trzy różne podejścia do ich modelowania, ale w istocie Autor zastosował w swoim programie tylko jedno z nich (schemat POP_θ), więc można było raczej pominąć wzory na str. 43 i 44. Z drugiej strony, nie jest jasne, w jaki sposób był modelowany warunek brzegowy typu Neumanna?

Jeśli chodzi o aspekty numeryczne zastosowanej metody, to omówiono je niezwykle oszczędnie w podrozdziałach 3.1, 3.8, 3.9 i 3.10. Pierwszy z nich liczy tylko pół strony i zdecydowanie przydałby się w nim jakiś szkic ilustrujący podstawowe koncepcje i idee. Dwa rodzaje możliwych siatek (D2Q9 i D3Q19) pokazano dopiero kilka stron dalej, tj. na rys. 3 na str. 28. Na kolejnej stronie, w tab. 1, przedstawiono charakterystyki czterech wybranych siatek: obok siatek D2Q9 i D3Q19 także D2Q7 i D3Q39. Szkoda, że nie naszkicowano tych dwóch ostatnich siatek, zwłaszcza siatki sześciokątnej D2Q7 - bez tych szkiców dane przedstawione w tablicy są raczej mało przydatne. W podrozdziale 3.8, na jednej stronie, przedstawiono lakoniczny opis programu komputerowego opracowanego przez Doktoranta – myślę, że ilustracja algorytmu numerycznego w postaci klasycznego schematu blokowego byłaby pomocna czytelnikowi pracy. Dla lepszego zrozumienia, przydałyby się również odwołania do numerów równań, które były rozwiązywane w kroku 5 algorytmu. Końcowe podrozdziały 3.9 i 3.10 zostały poświęcone prezentacji wyników dwóch testów numerycznych, które Autor przeprowadził przy zastosowaniu swojego programu. W tym celu rozwiązano numerycznie klasyczne zagadnienie przepływu cieczy lepkiej pomiędzy dwiema nieruchomymi ściankami (przepływ Poiseuille'a). Wyniki symulacji komputerowych porównano z rozwiązaniem analitycznym i wykazano poprawne działanie autorskiego programu obliczeniowego. Szkoda, że nie przeanalizowano zależności wyników (ich dokładności) od wymiarów oczek siatki dyskretnej. Zaintrygowało mnie, z czego wynika dość wyraźna różnica dokładności wyników uzyskanych dla maksymalnych prędkości przepływu cieczy w obu testach: w pierwszym teście (podrozdział 3.9) błąd względny pomiędzy rozwiązaniem numerycznym i analitycznym wynosi około 3.2% (w osi

RS

symetrii przepływu), natomiast w drugim teście (podrozdział 3.10) błąd ten wynosi około 1.0% (przy ścianie "górnej"). Czy ta różnica w dokładności wyników jest spowodowana różną rozdzielczością siatek? Raczej spodziewałbym się większych błędów w drugim teście, z powodu błędów wynikających z implementacji warunku Neumanna na brzegu obszaru przepływu.

Rozdział 5 rozprawy jest w całości poświęcony prezentacji i dyskusji wyników symulacji numerycznych uzyskanych przy zastosowaniu zaproponowanego modelu numerycznego. W tym celu, Autor przeprowadził obliczenia dla pięciu przypadków wyidealizowanych kształtów form dennych (rys. 13). Dla dwóch z tych przypadków (które Doktorant oznaczył jako geometrie LW i LYN) zostały przeprowadzone porównania ilościowe wyników z symulacji numerycznych z dostępnymi w literaturze wynikami pomiarów laboratoryjnych. Pozostałe trzy przypadki geometrii form dennych zostały zaproponowane przez Autora pracy i wyniki uzyskane dla tych konfiguracji mają głównie charakter poznawczy. Jak wykazały porównania profili poprzecznych średnich prędkości poziomych przepływu wody pokazane na rys. 18 i 32, uzyskane wyniki obliczeń zgadzają się dobrze z wynikami eksperymentalnymi. Jest to godne podkreślenia, gdyż w modelu obliczeniowym Autora górna powierzchnia wody nie jest traktowana jako swobodna (jak miało to miejsce w badaniach laboratoryjnych), lecz jest ograniczona poziomą sztywną ścianą, na której zadano warunek brzegowy całkowitego poślizgu cieczy (ang. *free-slip*). Dodatkowo należy pamiętać, że model numeryczny jest dwuwymiarowy, podczas gdy struktury wirowe są w naturze trójwymiarowe. Różnice ilościowe wynikające z przyjęcia innego rodzaju warunków fizycznych na górnej powierzchni wody oraz z założenia o dwuwymiarowości przepływu są za to bardzo wyraźnie widoczne na rys. 20, przedstawiającym fluktuacje prędkości poziomej wody uzyskane z obliczeń oraz z pomiarów. Interesujące są wyniki przedstawione na rys. 21 i 22, ilustrujące w sposób bardzo realistyczny ewolucję obliczonego pola wirowości dla geometrii LW (niestety nie podano w tekście, jakim czasom fizycznym odpowiadają kolejne wykresy). Z kolei porównania profilu powierzchni swobodnej zmierzonej w laboratorium z elewacją hipotetycznej powierzchni swobodnej wyznaczonej na podstawie wartości ciśnień obliczonych na poziomej ścianie (rys. 23) wydają mi się nieco sztuczne – i stąd może wynikają tak znaczne różnice pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów? Na kilku rysunkach (m.in. 15 i 30) pokazano obliczone rozkłady linii prądu w korycie rzecznym, na podstawie których oszacowano wymiary wirów generujących się tuż za formami dennymi. Wymiary te w sposób zadowalający zgadzają się z wymiarami wirów obserwowanych eksperymentalnie.

3. Uwagi szczegółowe

Poniżej przestawiam listę usterek i niedociągnięć, które zauważyłem w trakcie studiowania rozprawy. Nie wpływają one na ocenę merytoryczną całości pracy, choć miejscami utrudniają one śledzenie wywodów Autora.

RS

a) Zasadnicza część pracy poprzedzona jest spisem symboli stosowanych w tekście. Umieszczenie takiego spisu jest jak najbardziej wskazane z uwagi na obszerną część teoretyczną pracy, z dużą liczbą równań i symboli matematycznych stosowanych na kolejnych etapach rozważań. Niestety, spis symboli zamieszczony w pracy (najlepiej, żeby był on na początku albo na końcu pracy, a nie pomiędzy rozdziałami 1 i 2) nie spełnia swojej roli. Przede wszystkim jest on dalece niekompletny (przykładowo, brak w nim takich symboli jak $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{I}$, $\boldsymbol{V}$, H, J, Δ (laplasjan), δ (na str. 27), ϵ, θ w znaczeniu użytym na str. 45, ψ, ω, itd.). Ponadto, symbole w spisie nie są uporządkowane alfabetycznie, a te oznaczone literami łacińskimi i greckimi są przemieszane, co utrudnia ich odszukiwanie w spisie w trakcie studiowania rozprawy. Zdarza się również, wbrew temu co Autor zastrzegł na str. 3 rozprawy, że niektóre wielkości wektorowe są oznaczane w tekście czcionką zwykłą (np. wektor $\boldsymbol{V}$ zamiast czcionką pogrubioną jest oznaczany czcionką zwykłą jako V w punkcie 2.2.2 i następnych, a na przykład indeks j na stronach 42 i 43 jest pisany czcionką pogrubioną jako $\boldsymbol{j}$. Wydaje mi się także, że warto było uzupełnić spis symboli listą akronimów używanych w tekście (np. LBM, BGK, TRT, MRT, LES, SGS, etc.).

b) W kilku miejscach tekstu Autor używa pewnych wyrażeń i skrótów myślowych, które językowo brzmią niezbyt fortunnie. Przykładowo: "sprężyste, sztywne kule" (str. 10) – kule są albo sprężyste (czyli odkształcalne), albo sztywne; "zderzenia sprężyste elastycznych kul" (również str. 10) – może Autorowi chodziło o "odkształcalne kule"? (ale dwie linie wyżej jest mowa o sztywnych kulach); "ciągła mechanika płynów" (str. 17) – mechanika jako dyscyplina naukowa nie jest ani ciągła, ani nieciągła; "ściśliwe/nieściśliwe równania Eulera/Naviera-Stokesa" (str. 23, 25) – równania matematyczne nie są ani ściśliwe, ani nieściśliwe (w odróżnieniu np. od ośrodków fizycznych). Razi mnie też nieco termin "deformacja powierzchni swobodnej". Na ogół, w odniesieniu do przepływów z powierzchnią swobodną, używa się terminów "elewacja/wyniesienie/profil powierzchni swobodnej" (czyli przemieszczenie pionowe punktów materialnych położonych na tej powierzchni, mierzone w jednostkach długości, a nie deformacja (czyli odkształcenie), która w mechanice ośrodków ciągłych jest wielkością bezwymiarową).

c) Jakobian przekształcenia J w przypadku ośrodka nieściśliwego jest równy jedności, a nie zeru (str.19).

d) Nie jest jasne, dlaczego iloczyn diadyczny (tensorowy) dwóch wektorów (str. 6 i 31) jest definiowany jako $(\boldsymbol{a} \otimes \boldsymbol{b})_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(a_\alpha b_\beta + a_\beta b_\alpha)$ (co opisuje tensor symetryczny dla wektorów $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{b}$ o tej samej liczbie elementów), zamiast standardowej (czyli niesymetrycznej) formy $(\boldsymbol{a} \otimes \boldsymbol{b})_{\alpha\beta} = a_\alpha b_\beta$?

e) W rozdziale 3, na str. 40, przedstawiono postać macierzy M oraz wzory dla momentów m_i, $i = 0, \ldots 8$ dla siatki D2Q9. W celu jednoznaczności tych definicji,

RS

należałoby przedstawić sposób numeracji dziewięciu węzłów siatki, np. na rys. 3a na str. 28.

f) W rozdziale 5, na jego początku, nie zdefiniowano w sposób jasny (np. na rys. 13 i 14 lub w tekście) jaki jest kierunek przepływu wody w kanale. Co więcej, na str. 67 napisano: "na wlocie i wylocie, czyli po prawej i lewej stronie domeny", co wprowadza w błąd, gdyż w rzeczywistości wszystkie ilustracje wyników symulacji numerycznych przedstawiają sytuacje, w których woda płynie ze strony lewej na prawą.

4. Ocena pracy

Pomimo uwag krytycznych wyszczególnionych w p. 2 i 3 niniejszej recenzji moja ocena całościowa rozprawy jest pozytywna. Uważam, że przedstawiona praca doktorska prezentuje dobry poziom naukowy i stanowi istotny i oryginalny wkład w dziedzinę metod numerycznych stosowanych w hydraulice rzek. Autor osiągnął cel postawiony na początku pracy, umiejętnie korzystając ze złożonego aparatu matematycznego niezbędnego do skonstruowania modelu obliczeniowego opartego na metodzie siatkowej Boltzmanna. Na podkreślenie zasługują wyniki symulacji numerycznych przedstawione w pracy, pokazujące dobrą zgodność z wynikami pomiarów laboratoryjnych. Doktorant wykazał się znajomością literatury przedmiotu oraz umiejętnością dyskusji uzyskanych rezultatów badań. Wszystkie wnioski przedstawione w podsumowaniu rozprawy zostały sformułowane w sposób jasny i zrozumiały i mają uzasadnienie w wynikach zaprezentowanych w pracy.

5. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z przedłożoną rozprawą doktorską i w nawiązaniu do jej oceny przedstawionej powyżej uważam, że spełnia ona wymagania stawiane przez obowiązującą *Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym* z dnia 14 marca 2003 (*Dz. U.* z r. 2014, poz. 1852). Stwierdzam, że recenzowana praca stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i dowodzi, że Doktorant posiadł niezbędną wiedzę i wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgra Mikołaja Karpińskiego do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Ryszard Szczerbicki