

Gdańsk, 20.11.2018 r.

prof. dr hab. inż. Jacek Pozorski
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk
Tel.: 58 5225145, Fax: 58 3416144
e-mail: jp@imp.gda.pl

Opinia o rozprawie doktorskiej mgra Mikołaja Karpińskiego

**pt. Modelowanie pola prędkości wody nad formami dennymi w korytach rzecznych
metodą siatkową Boltzmanna**

Podstawę opracowania recenzji stanowiło pismo Dyrektora Instytutu Geofizyki PAN w Warszawie, dr hab. inż. Beaty Orleckiej-Sikory, z dnia 26.09.2018 r. Praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem prof. dra hab. Pawła Rowińskiego oraz promotora pomocniczego, dra hab. Roberta Bialika. Rozprawa liczy ix+105 stron, składa się z 6 rozdziałów, spisu literatury liczącego około 90 pozycji oraz streszczeń w języku polskim i angielskim.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem zainteresowania Doktoranta jest metoda siatkowa Boltzmanna (ang. *Lattice Boltzmann Method*, LBM), z pogranicza mechaniki statystycznej, w zastosowaniu do zagadnienia z zakresu hydromechaniki koryt otwartych. Z punktu widzenia obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) opisywany problem to zagadnienie przepływu wewnętrznego w złożonej geometrii. Mimo spektakularnego rozwoju metod i możliwości CFD na przestrzeni ponad 50 lat, pełne rozwiązanie turbulentnych przepływów tego rodzaju pozostaje wyzwaniem, trudności przydaje także obecność powierzchni swobodnej cieczy.

Tematyka rozprawy jest interesująca od strony poznawczej. Doktorant włożył dużo wysiłku w przedstawienie złożonego formalizmu metody LBM. Jest ona jednym z alternatywnych podejść wobec powszechnie stosowanych w CFD metod dyskretyzacji makroskopowych równań dynamiki przepływu (np. metoda objętości skończonych). Autor wybrał ją jako potencjalnie skuteczne narzędzie obliczeniowe do zagadnień rozważanych w pracy, gdyż: (i) symulacje metodą LBM, zwłaszcza w wariacie zrównoleglonym (Autor zastosował Open MP) cechuje duża wydajność obliczeniowa; (ii) zaletą LBM jest łatwość przybliżonego odwzorowania na regularnej siatce/kracie (ang. *lattice*) geometrii form dennych rozważanych w pracy; ponadto, jak można przekonać się w trakcie lektury rozprawy, (iii) Autor daje wyraz pewnej swej fascynacji metodą LBM i chce sprawdzić ją w zastosowaniu do wybranego zagadnienia hydrologii. Doktorant stwierdza, że jako pierwszy podjął badania numeryczne przepływu nad formami dennymi z zastosowaniem LBM. W moim przekonaniu, analizowane zagadnienie jest interesujące z ogólniejszego punktu widzenia, jako przykład turbulentnego przepływu przyściennego. Zatem także z tego względu badania podjęte w pracy cechuje aktualność.

Od strony klasyfikacji formalnej rozprawę sytuować można w dziedzinie nauk fizycznych, tak z uwagi na obiekt zainteresowania Autora, którym jest zagadnienie z zakresu hydrologii, jak również ze względu na zastosowanie specyficznej metody obliczeniowej (LBM) mającej swe korzenie w fizyce statystycznej; metodzie tej poświęcono dużo miejsca w pracy. W mojej opinii temat rozprawy, jako że obejmuje dobrze określony problem CFD, mógłby

także pasować do dyscypliny mechanika. Zakres podjętych przez Autora badań oraz stopień ich trudności zasadniczo odpowiadają wymaganiom stawianym pracom doktorskim.

Struktura i zawartość pracy doktorskiej

Pierwsze cztery rozdziały pracy stanowią *de facto* wprowadzenie do tytułowego problemu analizowanego w rozdziale piątym. Zawierają one: krótki wstęp wraz ze specyfikacją celów pracy (Rozdział 1); przegląd modeli stosowanych na różnych poziomach opisu dynamiki przepływów (Rozdział 2); obszernie omówienie metody LBM, wyjściowego równania Boltzmanna z jednej strony oraz makroskopowych równań Naviera-Stokesa z drugiej, jak również aspekty implementacyjne metody LBM (Rozdział 3); wreszcie, przegląd wiedzy z zakresu opływu form dennych (Rozdział 4). Wyniki obliczeń własnych Autora dla pięciu rozważanych wariantów uproszczonej geometrii takich form zawarto w kluczowym dla rozprawy rozdziale 5. Podsumowanie rozprawy, wnioski Autora oraz sugerowane przezeń kierunki dalszych badań zamieszczono w rozdziale 6.

Szczegółowa ocena pracy oraz uwagi rzeczowe

Podczas lektury rozprawy wyraźnie odbiera się – wspomniany już – podział na dwie części: teoretyczną i obliczeniową. W części pierwszej (rozdziały 1-4) dominuje opis podstaw fizykalnych metody LBM, któremu Autor poświęca bardzo dużo miejsca, w połączeniu z dyskusją podejść mezo- i makroskopowych w dynamice płynów. Niewątpliwie przebijają z tej lektury talent i pasja dydaktyczna: narracja Autora oraz ścisły wywód matematyczny zdecydowanie przekonują o jego dobrym zrozumieniu omawianych zagadnień i nadają rozdziałom 1-4 pewien rys monograficzny. Niestety, to co mogłoby być siłą tej części pracy jest jednocześnie jej niedostatkami: w wielu miejscach brak dostatecznie wyraźnego odwołania do źródeł lub też jasnego zaznaczenia, że jest to oryginalny wkład Autora, jeśli takowy tam występuje. Co więcej, w pewnych miejscach tekstu pojawiają się niejasności i błędy rzeczowe.

Uwaga 1: Proszę o odpowiedź i wyjaśnienie następujących kwestii dotyczących teoretycznej części rozprawy. Bardzo ważne w mechanice płynów jest rozróżnienie pochodnej lokalnej ($\partial/\partial t$) i pochodnej materialnej. Autor używa notacji d/dt oraz D/Dt nie wyjaśniając, co one oznaczają. Ponadto, zapis równania zachowania masy (12) jest niepoprawny (dlaczego? Czym jest W ?). Podobnie niepoprawny moim zdaniem jest zapis twierdzenia o transporcie na str. 18 (dlaczego?). Sposób zapisu niektórych całek może budzić wątpliwości, np. str. 18, linia 10 (dx ?), zwłaszcza, jeśli dalej (ramka na str. 37) używa się symbolu dx , i to w dwojakim znaczeniu (!). Proszę wyjaśnić, czy istotnie w przepływie nieściśliwym jakobian $J=0$ (str. 19)? Dlaczego w zapisie iloczynu diadycznego wektorów (str. 31) stosuje się symetryzację? Warunek Neumana kładzie się na pochodną na brzegu, niekoniecznie jest to warunek jednorodny („w.N. czyli warunek całkowitego poślizgu”). Czy rzeczywiście „prędkość płynu na brzegu wynosi zero na skutek jego lepkości” (str. 42)? Pierwszym testem obliczeniowym jest symulacja LBM przepływu laminarnego: dla oceny jakości wyników (rys.6) przydatna byłaby analiza zależności występującego błędu rozwiązania od rozdzielczości siatki, a także możliwe do uzyskania niewielkim kosztem porównanie, dla wybranych chwil czasu, także stanu nieustalonego, gdy przepływ startuje ze stanu spoczynku. W przeglądzie literatury (str. 59) zacytowano szereg prac wykorzystujących podejście RANS. Kłopot w tym, że pochodzą one z lat 1990-tych, natomiast – przynajmniej w ogólniejszym zagaszeniu turbulencji przyściennej – w późniejszym okresie dokonał się znaczny postęp w tak w RANS, jak i LES; w rozdziale 4.3.1 krótko omówiono zaledwie 2 prace wykorzystujące LES do opływu form dennych, a obliczenia takie stanowią przecież istotę osiągnięcia Autora. NB: sformułowanie „LBM może dawać wyniki porównywalne z LES” (str. 63) jest mocno niefortunne (dlaczego?).

Podsumowując pierwszą część rozprawy: przeplatają się w niej wiadomości z podstaw mechaniki płynów, ciekawe przemyślenia Autora, dobrze znane z literatury informacje o przejściu od równania Boltzmanna znanego z mechaniki statystycznej do sformułowania LBM, dygresje historyczne o metodzie automatów komórkowych. Następnie, podano podstawowe informacje o przepływie wody nad formami dennymi w hydrodynamice koryt rzecznych, które składają częściowo obejmują istotne fakty o turbulencji przyściennej oraz oporach w przepływach wewnętrznych w klasycznej mechanice płynów, a także znane z literatury rozważania na temat dynamiki przyściennych struktur wirowych. Warto z uznaniem zauważyć, że lektura tej części (rozdział 4) jest w niektórych miejscach inspirująca, jako że problem wciąż pozostaje otwarty.

Rozdział 5 jest oryginalnym wkładem Autora. Z racji na koszt obliczeniowy, zdecydował się na co najmniej trzy istotne uproszczenia: rozwiązywanie jedynie turbulencji gruboskalowej (metoda dużych wirów, ang. LES), prowadzenie obliczeń jedynie 2D, oraz przyjęcie, że powierzchnia swobodna jest недеformowalna, dzięki czemu można łatwo zrealizować postawienie warunku braku naprężeń stycznych. Rozumiem, że celem Autora było uzyskanie pewnego przynajmniej wglądu w rzeczony przepływ nad formami dennymi, co w pewnym stopniu uzasadnia przyjęcie takich założeń. Należy jednak stwierdzić, że są to założenia bardzo silne, o czym zresztą sam Autor uczciwie pisze. Obliczenia metodą LES, za wyjątkiem bardzo specyficznych sytuacji przepływów niemal dwuwymiarowych, prowadzi się prawie zawsze jako 3D, gdyż taka jest istota przepływu turbulentnego i dynamiki jego struktur. Dobitnie pokazuje to na przykład rola tzw. członu rozciągania włókien wirowych w równaniu ewolucji wirowości. Podobnie, Autor dyskutuje poprawność założenia o braku zmian elewacji powierzchni swobodnej.

Uwaga 2: cennym uzupełnieniem rozważań o założeniach upraszczających byłoby przedstawienie informacji typowych dla analiz CFD przepływów przyściennych, takich jak: (i) rozmiar oczka siatki (zwłaszcza w pobliżu dna) w funkcji zmiennych w skalowaniu lepkiem (tzw. y^+); (ii) wykres profilu stosunku lepkości podsiatkowej do kinematycznej, $\nu_t/\nu = \nu_t/\nu(y)$, który daje pogląd o tym jak małe jest L w akronimie LES; (iii) wpływ rozdzielczości siatki (użyto dwóch różnych) na wyniki itd. Przypadek rozważany w pracy jest o tyle specyficzny, że generacja struktur wirowych jest zapewniona poprzez geometrię układu (oderwanie przepływu na ostrej krawędzi formy dennej). Należy także zauważyć, że model Smagorinskiego obciążony jest wadą, jeśli idzie o stosowalność do turbulencji przyściennej. Jako że w podwarstwie lepkiej naturalnie występuje duża wartość pochodnej $\partial U/\partial y$, powoduje to przeszacowanie lepkości podsiatkowej, co więcej, model przewiduje ją nawet w przepływie laminarnym. Z tego względu stosuje się tzw. czynnik tłumiący Van Driesta.

Uwaga 3: natomiast (przy założeniu, że Autor miałby na to czas), na część z pytań, które stawia w rozdziale 5, udałoby się zapewne uzyskać odpowiedź poprzez studium sytuacji prostszej, czyli kanału płaskiego z powierzchnią swobodną (*water flume*). Istnieje bardzo bogata literatura na temat modelowania turbulencji, także LES, w kanale płaskim oraz – co istotniejsze – dostępne są dane, także DNS, z symulacji w kanale z powierzchnią swobodną, w szczególności dające wgląd w zmienność składowych tensora naprężeń turbulentnych w pobliżu tej powierzchni. Przeprowadzenie podobnego studium z użyciem LBM w wariacie 3D wymagałoby prawdopodobnie uzupełnienia modelu o nietrywialny moduł generacji początkowego pola prędkości, które następnie destabilizowałyby się do przepływu turbulentnego. Proszę także o komentarz Autora co do zasadności i wykonalności takich obliczeń. Wracając do symulacji opływu form dennych, które przeprowadził Autor: zgadzam się, że wariant 3D metody LBM jest istotnie droższy obliczeniowo. Jednakże w swym obecnym kształcie uzyskane wyniki pozostawiają pewien niedosyt. Obliczenia 3D choćby tylko jednego

przypadku byłyby zapewne bardzo cennym uzupełnieniem zaprezentowanych w rozprawie analiz.

Istotnie, zastanawia mapa wirowości (rys. 21 i 22), gdzie wyraźnie widać duże jej wartości na powierzchni swobodnej. O ile się nie myle, warunek *free-slip* pociąga za sobą $\partial u/\partial y=0$ co w połączeniu z warunkiem $v=0$, a zatem także $\partial v/\partial x=0$, daje w efekcie zerową wirowość. Przy okazji: Autor pisze o produkcji wirowości w warstwie granicznej (przyściennej, str. 57). Jest to w moim przekonaniu sformułowanie niepoprawne, gdyż równanie dynamiki wirowości w 2D nie zawiera członu źródłowego. Proszę o wyjaśnienie (**Uwaga 4**) tej kwestii, jak również stwierdzenia, że przepływ staje się wirowy „przez wpływ powierzchni swobodnej” (str. 55).

Autor podkreśla znaczenie określenia oporów ruchu w hydrodynamice (hydraulic) koryt otwartych (zob. Streszczenie i Rozdział 6.1), a także dyskutuje podział tych oporów na część lepka i ciśnieniową. Czy można zatem dla badanych konfiguracji (rys. 13) podać informacje o obliczonych oporach ruchu i ewentualnie także wkładzie obu części (**Uwaga 5**)? Ponadto, wydaje się, że uzyskanie zgodności prędkości średniej w eksperymencie i symulacji (rozdz. 5.3.1) jest rzeczą podstawową. Czy nie dało się tego zrobić?

Ciekawe byłoby także zestawienie zmienności w czasie wyników symulacji prowadzonej w konfiguracji periodycznego obszaru obliczeniowego ze zmiennością przestrzenną wyników uzyskiwanych w eksperymencie. Sytuacja wydaje się być dalece nietrywialna i – moim zdaniem – nie w pełni porównywalna, gdyż w eksperymencie występuje pewien poziom drobnoskalowej turbulencji (istotnie 3D) w przekroju wlotowym, na który następnie nakłada się efekt oderwania przepływu na grzbietach kolejnych przeszkód, podczas gdy w symulacji to zaburzenie wlotowe (tu: początkowe) nie występuje i quasi-turbulencja 2D buduje się jedynie w efekcie oderwania. Zatem (**Uwaga 6**), jeśli Doktorant dysponuje takim wynikiem (albo mógłby go w krótkim czasie uzyskać w LBM), pewien wgląd w przebieg zjawiska mogłoby dać prześledzenie ewolucji w czasie informacji o statystykach prędkości, zwłaszcza intensywności fluktuacji (pytanie tylko, jak uzyskać owe statystyki?).

Dla tych przyczyn, choć wyniki LBM dla pola prędkości, wirowości oraz ciśnienia są ciekawe i inspirujące, należy traktować je z ostrożnością. Do rozważań z rozdziału 5 zdecydowanie warto by powrócić w konfiguracji przepływu 3D, po ustaleniu istotnych charakterystyk symulacji takich jak zależność od siatki, jakość rozwiązania w obszarze przyściennym, poprawność sposobu implementacji w LBM warunku braku naprężenia ścinającego na powierzchni swobodnej itd.

Podsumowując tę część pracy: nawet jeśli przyjęty model nie są doskonały, to uzyskane przez Autora oryginalne wyniki dają pewien przynajmniej jakościowy wgląd w analizowany przepływ, a przy tym ilustrują możliwości alternatywnego podejścia, jakim jest LBM.

Uwaga 7: do pełni szczęścia przydatne byłoby jeszcze zestawienie czasu obliczeniowego z danymi dla podobnych zagadnień (jeśli są dostępne) przy obliczeniach z użyciem innych, klasycznych metod CFD. Dobrze byłoby także dowiedzieć się, czy i jakie są możliwości LBM w zakresie symulacji przepływów (niekoniecznie nad formami dennymi) przy uwzględnieniu ruchu powierzchni swobodnej.

Proszę Doktoranta o odpowiedź pisemną na wypisane powyżej uwagi rzeczowe i pytania.

Drobne uwagi rzeczowe oraz uwagi redakcyjne

Od strony redakcyjnej opracowanie rozprawy jest bardzo staranne; podkreślić należy wysoką estetykę pracy oraz dbałość o jej formę, w tym – na marginesie głównego wywodu – dodatkowe objaśnienia typu „żółte ramki”, które urozmaicają lekturę. Zauważyłem stosunkowo niewiele niedostatków stylistycznych i błędów literowych (w razie potrzeby mogę przekazać do

wykorzystania egzemplarz rozprawy z wszystkimi zaznaczeniami tego typu). Dla porządku jednakże trzeba wskazać na kilka lapsusów: „najprostrzy”, „z resztą”, „podsiadkowy”, „tanges” oraz dość częste wstawianie przecinka przed orzeczeniem („Podejście, sprowadza się...”)

Z uznaniem chciałbym zauważyć, że rozprawa – napisana po polsku – przeciera szlak w zakresie tłumaczenia niektórych pojęć znanych dotąd jedynie w literaturze anglojęzycznej. Nie zawsze jednak fortunnie: na przykład zamiast „kolizje”, „operator kolizji” lepiej użyć utartego w mechanice klasycznej słowa „zderzenia”. Podobnie „pozycja cząstki” nie jest jednak tym samym co jej położenie. Słowa „izotropowość”, „symetryczność” zamiast standardowo używanych (izotropia, symetria) można przyjąć jako ekspresję *licentia poetica* (poetyczności?) tekstu Autora. W zakresie słownictwa ogólnego niektóre sformułowania mogą razić anglicyzmami: „w następnym paragrafie” (akapicie), „w referencjach” (w bibliografii, pozycjach literatury), „wierzchołek siatki” (węzeł), „eksperyment znacznikowy” (lepiej: wzorcowy, jeśli ma to być odpowiednik słowa *benchmark*). Co do słownictwa specjalistycznego z obszaru mechaniki płynów, warto trzymać się dobrze utrwalonych w języku polskim pojęć. Przykłady: „warstwa przyścienna” raczej niż „warstwa graniczna”, „punkt spiętrzenia” raczej niż „punkt zatrzymania”, „oderwanie przepływu” a nie „separacja”, równanie Naviera-Stokesa, itd.. Odnośnie turbulencji przepływów, literatura polska jest istotnie dość skromna, ale polecić należy monografię śp. prof. J.W. Elsnera (PWN 1987) pod takim właśnie tytułem. Przykład: raczej niż „wirowa dyfuzyjność” (ang. *eddy diffusivity*), używa się terminu „turbulentna” lub „podsiatkowa” (w LES). Odnośnie analizy kwadrantowej (str. 61) doceniam terminy „wrywanie” i „wymiatanie” proponowane przez Autora, ale warto jednak było dla jasności podać tam także oryginały angielskie (*ejections, sweeps*).

Inne drobne uwagi:

- a) str.7: w skali mikroskopowej termin „cząsteczka/cząstka płynu” jest niefortunny (dlaczego?); podobnie jak określenie „ciągła mechanika płynów” (tamże);
- b) wymiar przestrzenny oznaczono przez d , a także (rozumiem, że zamiennie?) przez D ;
- c) nie podano wprost czym jest ω w r-niu 4 i dalej;
- d) str.8: w zapisie r-nia Liouville’a jest błąd;
- e) str. 17: co znaczy stwierdzenie: „masa wypływająca z obszaru w chwili czasu t jest $\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ ”?
- f) czy w ostatnim wzorze na str. 33 i pierwszym na str. 34 nie ma błędu: jakimi obiektami są \mathbf{v}^2 oraz \mathbf{c}_i^2 ?
- g) str. 22: podane wartości średniej drogi swobodnej oraz czasu między zderzeniami są radykalnie małe. Czy naprawdę chodzi o gaz?
- h) sformułowanie LBM warunku brzegowego na ścianie (str. 42); opis ten jest niezbyt klarowny, podobnie jak rys. 5: wierzchołek (węzeł) brzegowy w istocie nie leży na brzegu obszaru obliczeniowego, który nie pokrywa się dokładnie z liniami siatki;
- i) na str. 47 w ramce podano algorytm zadawania warunku początkowego – jaki jest jego sens fizyczny?
- j) nie dostrzegłem w tekście pracy odwołania do rysunków 32-33;
- k) str. 57: „punkt oderwania przepływu od warstwy granicznej” – proszę o ilustrację (?).
- l) str. 63, linia 2: przekrojów czy profili?
- m) rozdział 5.1.1: „prędkość średnia w przekroju” – jakim?
- n) rozdział 5.1.3: „trójwymiarowe mechanizmy rozpraszania wirów” – czym fizycznie jest rozpraszanie?

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa rzetelnie dokumentuje przeprowadzone przez Doktoranta badania. Mają one zasadniczo charakter analiz numerycznych. Odnosnie obszernego i ciekawego opisu teoretycznych podstaw metody LBM nie jest jasne, czy występują tam elementy oryginalnego wkładu Autora. Praca dowodzi jego dużej wiedzy o współzależnościach między mezo- a makroskopowym poziomem opisu w mechanice płynów, dokumentuje samodzielne opracowanie oraz zastosowanie kodu obliczeniowego metody LBM w dwuwymiarowym wariacie modelu MRT z uwzględnieniem domknięcia dla naprężeń podsiatkowych oraz analizę uzyskanych wyników symulacji opływu form dennych w kilku wariantach geometrii. Doktorant wykazał się umiejętnością interpretacji wyników symulacji oraz ich aspektów numerycznych w powiązaniu z fizyką zjawiska.

Uważam, że opiniowana praca spełnia formalne wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym, wnioskuję zatem o dopuszczenie mgra Mikołaja Karpińskiego do publicznej obrony.

