

dr hab. inż. Michał Szydłowski, prof. nadzw. PG
Katedra Hydrotechniki
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr Barbary Stachurskiej

pt. Modelowanie ruchu cząstek osadu w wodzie wywołanego falowaniem powierzchniowym

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska jest z zakresu dynamiki przepływów generowanych falowaniem powierzchniowym. Praca poświęcona jest zagadnieniu, ruchu saltacyjnego ziaren piasku w przepływie, dla którego charakterystyczną cechą jest występowanie oscylacyjnego pola prędkości cieczy. Pomimo intensywnych badań, jak do tej pory nie udało się opracować uniwersalnych zasad symulacji ruchu cząstek osadu dla różnych reżimów falowania. Stało się to dla Doktorantki motywacją do podjęcia prac nad analizą teoretycznego modelu hydrodynamiki w ruchu oscylacyjnym napędzanym propagacją fal powierzchniowych, a następnie stworzenia modelu numerycznego ruchu saltacyjnego ziaren piasku nad dnem niespoistym. Dominującą częścią badań były eksperymenty laboratoryjne wykonane w kanale falowym, w trakcie których dokonywano pomiarów prędkości ziaren piasku, stosując technikę PIV (Particle Image Velocimetry). Wyniki z badań laboratoryjnych posłużyły Doktorantce do weryfikacji modelu obliczeniowego, który został następnie zastosowany do przeprowadzenia symulacji numerycznych ruchu osadu przy dnie dla różnych reżimów falowania powierzchniowego.

Jak opisano, swoje badania Doktorantka prowadziła wykonując zarówno analizy teoretyczne, jak również realizując eksperymenty laboratoryjne na zaplanowanym przez siebie stanowisku eksperymentalnym w kanale falowym. **Stąd rozprawę doktorską można określić jako pracę teoretyczno-empiryczną, co nadaje jej duże walory naukowe.**

Należy zauważyć, że **Autorka na początku swojej pracy doktorskiej nie sformułowała w sposób jawny hipotezy badawczej. Jednak nie jest to niezbędne w rozprawie doktorskiej, gdy cel pracy jednoznacznie wskazuje na problem badawczy.** I z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia w tej pracy. Otóż w świetle opisanego przez Doktorantkę stanu wiedzy na temat modelowania saltacyjnego ruchu ziaren piasku w oscylacyjnym polu prędkości generowanym falowaniem powierzchniowym, widoczne są braki w zakresie metod modelowania tego zjawiska. Stąd Doktorantka sformułowała następujący cel pracy – Skonstruowanie modelu lagranżowskiego opisującego ruch cząstek osadu w wodzie wywołany falowaniem powierzchniowym i weryfikacja tego modelu na podstawie wyników własnych badań laboratoryjnych w kanale falowym.

Realizując postawiony w pracy cel Doktorantka wykonała szereg zadań, które opisała na łącznie 107 stronach maszynopisu, dzieląc rozprawę na 6 rozdziałów głównych i uzupełniając ją streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisami symboli, tabel, rysunków oraz bibliografią. Bibliografia zawiera 99 pozycji, obejmujących polską i zagraniczną literaturę naukową, która posłużyła do zobrazowania stanu wiedzy o podjętym przez Autorkę problemie. Wybrane przez Autorkę piśmiennictwo jest aktualne i zostało dobrane właściwie. Praca napisana jest dobrym językiem polskim, zarówno jeżeli chodzi o styl i jasność wypowiedzi, jak również użytą terminologię naukową i techniczną.

118

2. Zawartość rozprawy

W ogólności, w ramach badań teoretycznych podjętych przez Doktorantkę w pracy sformułowano dwuwymiarowy model matematyczny opisujący ruch saltacyjny sferycznej cząstki osadu, w którym uwzględniono siły hydrodynamiczne wywołane ruchem wody oraz mechanizm zderzeń cząstki z dnem. Do opisu ruchu wody zastosowano teorie fal nieliniowych Stokesa drugiego rzędu. Pole prędkości wody w warstwie leżącej bezpośrednio nad dnem opisano przy pomocy teorii oscylacyjnej turbulentnej warstwy brzegowej.

Z kolei wyniki badań laboratoryjnych posłużyły Doktorantce do weryfikacji stworzonego modelu numerycznego. Ponadto, z analizy obrazów PIV, Autorka wyznaczała grubość warstwy ruchu saltacyjnego ziaren piasku, którą następnie porównywała z wynikami swoich obliczeń. Po zweryfikowaniu modelu, przeprowadzono szereg symulacji, w wyniku których wyznaczono trajektorie ziaren piasku nad dnem, wyznaczono pionowe profile koncentracji osadu oraz obliczono prędkość transportu osadu wzdłuż dna dla wszystkich przypadków fal badanych w eksperymentach.

Pracę rozpoczyna (**rozdział 1**) część o charakterze wprowadzenia, w którym Doktorantka dokonała przedstawienia podjętego w pracy problemu badawczego, zapoznając jednocześnie czytelnika z podstawowymi zagadnieniami związanymi z hydrodynamiką i saltacyjnym ruchem ziaren piasku w strefie nad dnem akwenów z występującym falowaniem powierzchniowym. Ponadto w tym rozdziale Doktorantka dokonała przeglądu literatury i sformułowała cel i zakres pracy.

W odczuciu recenzenta, wykonany przez Doktorantkę przegląd literatury i ocena bieżącego stanu wiedzy i techniki pomiarowej w dziedzinie podjętych badań są bogate i przedstawiają aktualną wiedzę w tym zakresie. W studiach literaturowych przedstawione zostały zarówno historyczne i klasyczne osiągnięcia badaczy ruchu rumowiska, jak również wyniki najnowszych badań prowadzonych w laboratoriach polskich i zagranicznych.

Recenzent zgadza się, że temat badawczy podjęty przez Doktorantkę nie znalazł do tej pory rozwiązania i stanowi otwarte wyzwanie badawcze, a co za tym idzie, że jest aktualny. Ponadto recenzent stwierdza, iż sformułowany cel i zakres pracy są prawidłowe i jasno zdefiniowane.

Rozdział 2 rozprawy jest poświęcony przedstawieniu modelu teoretycznego opisującego zachowanie cząstki ciała stałego umieszczonego w oscylacyjnym polu prędkości. W pierwszej części tego rozdziału Doktorantka omówiła dynamikę pojedynczego ziarna piasku rozpatrywanego jako cząstka sferyczna. Scharakteryzowała najważniejsze parametry fizyczne oraz siły działające na cząstkę, a następnie, stosując podejście lagranżowskie, sformułowała równania ruchu i trajektorii cząstki w zadanym polu prędkości. Następnie Autorka opisała mechanizm zderzenia cząstki sferycznej z dnem. Druga część rozdziału została poświęcona analizie pola prędkości wywoływanego propagacją fal powierzchniowych. Doktorantka przedstawiła w niej równania ruchu wody wynikające z teorii nieliniowych fal Stokesa drugiego rzędu i omówiła równania opisujące pole prędkości wody w turbulentnej warstwie brzegowej w bezpośrednim sąsiedztwie dna. Na końcu rozdziału, Autorka pokazała wyniki symulacji numerycznych, które stanowić miały wstępną weryfikację stworzonego modelu numerycznego.

Recenzent zgadza się z wybranym przez Doktorantkę do odwzorowania badanego procesu modelem teoretycznym. Wszystkie modele składowe wybrane i opisane przez Doktorantkę mają oparcie w podstawowych prawach fizyki i są silnie zakorzenione w hydrodynamice. Przyjęte przez Autorkę założenia upraszczające również nie budzą sprzeciwu. Można stwierdzić, że ta część rozprawy ma charakter monograficzny, a jednocześnie daje obraz dużej wiedzy Doktorantki o zasadach dynamiki ruchu falowego i ruchu rumowiska w strefie przydennej. Pewien niedosyt budzi zaś zamykająca rozdział część dotycząca weryfikacji rozwiązania równań ruchu i trajektorii cząstki metodą numeryczną o czym recenzent pisze w uwagach.

W rozdziale 3 Doktorantka przedstawiła badania laboratoryjne przeprowadzone w kanale falowym. Ich zasadniczym celem było wykonanie pomiarów prędkości ziaren piasku nad dnem pokrytym zmarszczkami. Stosując technikę PIV, Doktorantka wyznaczała rozkłady przestrzenne prędkości osadu wzdłuż profili pionowych i poziomych nad dnem, analizując zmiany tych rozkładów w zależności od parametrów fal powierzchniowych i głębokości wody. Na wstępie rozdziału Autorka opisała stanowisko pomiarowe i zastosowaną aparaturę badawczą oraz omówiła metodykę badań, a następnie przedstawiła i szczegółowo przedyskutowała wyniki pomiarów prędkości cząstek poruszających się w obszarze nad dnem, wykonanych dla siedmiu wybranych przypadków fal.

Według opinii recenzenta laboratoryjne metody badawcze wykorzystane przez Doktorantkę są prawidłowe. Zastosowana i opisana technika pomiarowa jest właściwa. Duże wrażenie robi wykorzystanie techniki PIV, która chociaż znana, to wciąż pozostaje dość rzadko wykorzystywana w polskich laboratoriach hydraulicznych. Duże uznanie dla Doktorantki budzi ilość czasu i pracy laboratoryjnej, którą musiała włożyć w badania. Wybór wariantów eksperymentu, również w oczach recenzenta jest reprezentatywny.

W rozdziale 4 Doktorantka porównała wyniki eksperymentalne z kanału falowego z wynikami obliczeń numerycznych będących rozwiązaniem teoretycznego modelu ruchu cząstek osadu, sformułowanego w rozdziale 2 rozprawy. Umożliwiło to zweryfikowanie poprawności i ocenę dokładności skonstruowanego modelu obliczeniowego.

Według opinii recenzenta uzyskane wyniki pomiarów i obliczeń są wiarygodne, a przeprowadzona przez Doktorantkę ocena jakości wyników badań potwierdza ich przydatność w analizie ruchu rumowiska w przydennej strefie wody podlegającej ruchowi oscylacyjnemu.

Rozdział 5 został przez Autorkę poświęcony omówieniu wyników symulacji ruchu osadu przeprowadzonych przy zastosowaniu autorskiego modelu numerycznego. W pierwszej kolejności Doktorantka porównała prędkości cząstek osadu z prędkościami wody. Następnie Doktorantka obliczyła i narysowała trajektorie cząstek osadu nad dnem dla kilku przypadków fal. W dalszej kolejności przedstawiła wyznaczone z obliczeń profile pionowe koncentracji cząstek osadu. Na końcu rozdział Autorka pokazała obliczone prędkości transportu osadu wzdłuż dna.

Według opinii recenzenta rozdział ten we właściwy sposób przedstawia możliwości symulacyjne opracowanego przez Doktorantkę modelu obliczeniowego. Niedosyt pozostawia fakt, że wykonane i przeanalizowane scenariusze nie wyszły poza zestaw testów przeprowadzonych w

kanale. Istotna byłaby próba aplikacji stworzonego narzędzia obliczeniowego dla sytuacji wykraczających poza warunki laboratoryjne.

W **rozdziale 6** (ostatnim), Doktorantka podsumowała całość rozprawy i sformułowała wnioski wynikające z przeprowadzonych badań teoretycznych, laboratoryjnych i symulacji numerycznych.

Recenzent zgadza się z przedstawionymi wnioskami i oceną wyników przedstawionymi przez Doktorantkę.

3. Ocena pracy i uwagi krytyczne

Ocena przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej jest **pozytywna**. Moim zdaniem praca ma duże walory naukowe i charakteryzuje się wysokim poziomem naukowym oraz ma cechy utylitarne, zarówno w zakresie budownictwa morskiego, inżynierii lądowej i wodnej, jak i w inżynierii środowiska. Nie odkryłem w pracy błędów merytorycznych. Nieliczne, wyszczególnione poniżej uwagi dotyczące niewielkich moim zadaniem braków w pracy doktorskiej, nie wpływają na pozytywną opinię o całości pracy i mają znaczenie drugorzędne, gdyż w głównej mierze są formalnego charakteru i wynikają z naturalnej dociekliwości recenzenta. Pozostałe, drobne uwagi natury edycyjnej, zaznaczyłem w tekście rozprawy. Ich ewentualna poprawa byłaby potrzebna w przypadku przygotowania tekstu, bądź jego fragmentów do publikacji. Uwagi przedstawiam poniżej w kolejności zgodnej z zawartością rozprawy.

1. *Model matematyczny ruchu cząstki osadu w wodzie.* Doktorantka bardzo zgrabnie przedstawiła podstawy wyprowadzenia równania ruchu cząstki materialnej w konwencji Lagranżowskiej. Przedstawiła poszczególne siły działające na cząstkę poruszającą się w zadanym polu prędkości cieczy. Wskazała również na możliwość pominięcia pewnych sił (Basseta, Magnusa) w opisie ruchu, które wprowadziła w swojej pracy. Bardzo proszę Doktorantkę o wyjaśnienie, czy mimo uprawnionego zaniedbania wspomnianych sił, można je było jednak pozostawić w modelu? Jeśli tak, to na ile skomplikowałoby to rozwiązanie równań modelu? Druga uwaga dotycząca modelu wiąże się z zaniedbaniem mechanizmu zderzania się cząstek unoszących się w strefie przydennej. Według wiedzy Doktorantki (np. literaturowej), jakie byłby zyski (np. w jakości odwzorowania zjawiska) i straty (np. w kosztach obliczeń) związane z wprowadzeniem takiego mechanizmu do modelu zaproponowanego w rozprawie? Proszę o odniesienie się do powyższych uwag w trakcie obrony doktoratu.
2. *Numeryczne rozwiązywanie równań modelu.* Mimo, że model matematyczny ruchu cząstki tworzy układ równań różniczkowych zwyczajnych (nie cząstkowych), to moim zdaniem kwestia jego numerycznego rozwiązania i zweryfikowania została przez Doktorantkę potraktowana zbyt pobieżnie. Najważniejsze mankamenty to: (a) nie przedstawiono kwestii postawienia zagadnienia brzegowego dla równania różniczkowego zwyczajnego pierwszego rzędu (równanie i warunek brzegowy), (b) nie przedstawiono idei numerycznego całkowania równania różniczkowego (definicja obszaru rozwiązania, dyskretyzacja obszaru rozwiązania), (c) nie omówiono ogólnego schematu numerycznego całkowania wewnątrz jednego kroku całkowania, (d) wybrana metoda numeryczna (schemat Rungego-Kutty IV rzędu) nie znalazła swojej interpretacji graficznej, (e) nie wskazano na wady i zalety wybranej metody (w stosunku do innych schematów numerycznych). Ponadto, w związku z

MS

tym, że samodzielne rozwiązanie równań modelu jest jednym z głównych elementów pracy doktorskiej, należałoby poświęcić więcej uwagi weryfikacji opracowanego rozwiązania numerycznego (przybliżonego). Uważam, że pojedynczy test obliczeniowy (opadanie cząstki w polu grawitacyjnym) nie rozstrzyga, czy opracowane rozwiązanie (zapewne w postaci własnego kodu obliczeniowego) jest prawidłowe. Można było przecież rozwiązać równania ruchu i trajektorii cząstki w zadanym arbitralnie dwuwymiarowym polu prędkości, a następnie porównać wyniki ze znanym rozwiązaniem (np. analitycznym). Wydaje mi się, że tego typu sprawdzenie (weryfikacja) rozwiązania równań modelu powinna zostać przedstawiona w trakcie obrony doktoratu. Wyniki powinno się również zaprezentować na wykresach zmienności składowych prędkości i położenia w czasie.

3. *Badania laboratoryjne w kanale falowym.* O ile cały rozdział poświęcony opisowi stanowiska badawczego, metodyki prowadzenia eksperymentów i techniki pomiarów napisany jest bardzo dobrze, to niechybnie zabrakło w nim informacji o dokładności samego pomiaru prędkości techniką PIV.
4. *Porównanie wyników doświadczalnych i numerycznych.* Ponownie wydaje się, że zbyt mało uwagi Doktorantka poświęciła kwestii statystycznej oceny wyników obliczeń i pomiarów. O ile w rozprawie znajdują się wykresy przedstawiające zakresy błędów względnych (rozbieżności między wartościami zmierzonymi i obliczonymi), to brakuje zestawień liczbowych określających wielkości tych błędów, a także analizy innych miar statystycznych.
5. *Uwaga edycyjna.* Proszę unikać w pracach naukowych żargonu – np. „obróbka danych, czy wyników”. Pozostawmy „obróbkę (skrawaniem)” wraz z „toczeniem” i „frezowaniem” tam gdzie ich miejsce, czyli w warsztacie ślusarskim.

Analizując wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 wraz ze zmianami), aby stwierdzić, czy są one spełnione należy odpowiedzieć na trzy podstawowe pytania:

1. *Czy w rozprawie jasno sformułowane jest zagadnienie naukowe, które Kandydat postanowił rozwiązać oraz jaka jest zasadnicza teza pracy?*

W przedstawionej mi do oceny pracy doktorskiej widoczne jest jednoznaczne sformułowanie problemu badawczego. Ponadto, przez klarownie przedstawiony cel pracy zagadnienie naukowe można uznać za jasno sformułowane.

2. *Czy rozprawa wykazuje dostateczny stopień teoretycznej wiedzy ogólnej Doktoranta?*

Recenzent uznaje, że ogólny stopień wiedzy teoretycznej Kandydatki jest w pracy ukazany w wystarczającym stopniu.

3. *Czy można uznać, że Autor rozwiązał postawione zagadnienie naukowe i czy zrobił to samodzielnie, odpowiednio do stanu wiedzy naukowej i technicznej, z zastosowaniem właściwej metody?*

Samodzielność zaproponowanego przez Doktorantkę rozwiązania problemu naukowego nie budzi wątpliwości Recenzenta. Do swoich badań wykorzystwała ona właściwe metody naukowe (analizę teoretyczną zagadnienia i modelowanie fizyczne), a proces badawczy przeprowadziła poprawnie. Zdaniem Recenzenta drobne ułomności pracy nie zmniejszają wartości merytorycznej rozprawy, którą można uznać za rozwiązanie postawionego zagadnienia naukowego.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana praca jest ciekawą i wartościową pozycją w zakresie hydrodynamiki akwenów podlegających falowaniu powierzchniowemu. Stanowi bowiem postęp zarówno w samej metodyce badań procesu transportu rumowiska w strefie przydennej, jak też odznacza się walorami praktycznymi, sprowadzającymi się do możliwości wykonywania numerycznych symulacji ruchu cząstek w strefie o oscylacyjnym charakterze ruchu wody, wywoływanym falowaniem powierzchniowym. Autorka rozprawy wykazała się bardzo dobrą znajomością badanych zagadnień i literatury przedmiotu, a sama rozprawa stanowi znaczący wkład do problematyki hydrodynamiki strefy przybrzeżnej i badania procesu transportu rumowiska.

W świetle powyższych uwag stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr Barbary Stachurskiej jest pracą oryginalną, zawierającą nowe rozwiązania, wartościową w sensie poznawczym i spełnia tym samym wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 wraz ze zmianami). Wnioskuje więc o dopuszczenie Autorki rozprawy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

KATEDRA HYDROTECHNIKI
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechniki Gdańskiej

Gdańsk, lipiec 2019 r.

2/7/2019
M. hydrotek