

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Michała Remera:

Triple line dynamics for droplet impingement and capillary flows

Recenzja została opracowana na podstawie pisma z dnia 21.04.2022 roku nr RNDIM.521/20.2022 Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej (RNDIM) Pana prof. dr. hab. inż. Roberta Sitnika, zawierającego informację o Decyzji Rady Doskonałości Naukowej z dnia 6.04.2022 r. o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej. W dniu 10.05.2022 otrzymałam rozprawę wraz z dokumentacją.

1. Przedmiot recenzji

Rozprawa doktorska Pana **mgr. inż. Michała Remera**, zatytułowana „**Triple line dynamics for droplet impingement and capillary flows**” została napisana w języku angielskim, liczy 107 stron. Właściwy tekst pracy poprzedzony jest spisem treści.

Promotorem rozprawy jest Pan Prof. Jacek Szumbariski, promotorem pomocniczym Pan dr Tomasz Bobiński.

2. Tematyka, cel, zakres pracy

Miniaturyzacja urządzeń, rozwój mikrofluidyki oraz nowych materiałów spowodował, że zagadnienie wymuszania, kontroli i dynamiki przemieszczania kropli jest w centrum zainteresowania badaczy na świecie ze względu na szybki rozwój technologii opartych o techniki lab-on-a-chip oraz spreading i spraying.

Ciekawe zjawisko zachodzi na styku trzech faz – ciała stałego, cieczy tworzącej na nim kroplę oraz gazu otaczającego układ. W efekcie oddziaływań intermolekularnych zachodzących w układzie, molekuly cieczy na styku trzech faz są związane taką samą siłą adhezji

z ciałem stałym, jak molekuly przy powierzchni ciała stałego znajdujące się w głębi kropli. Siła ta jednak nie jest równoważona przez siły kohezji wewnątrz samej kropli, ponieważ grubość warstwy cieczy blisko krawędzi kropli jest bardzo mała. Powoduje to deficyt ilości otaczających ją molekuł i wpływa na zmianę kąta zwilżania powierzchni ciała stałego przez ciecz. Powstaje więc różnica wartości między rzeczywistym kątem a otrzymanym z wyliczeń na podstawie zmodyfikowanego równania Younga. Wartość różnicy zależy od napięcia liniowego, które jest parametrem opisującym specyficzne oddziaływania molekularne zachodzące w układzie, stąd od budowy molekularnej materii.

Sytuacja jeszcze bardziej się komplikuje gdy linia trójfazowa jest w ruchu (np. kropla pada na podłoże). Hydrodynamika takiego przepływu jest złożona i zależy zarówno od budowy molekularnej ośrodków, jak i parametrów fizycznych. Dokładny jej opis wydaje się być możliwy w oparciu o budowę molekularną materii, np. Dynamikę Molekularną. W ramach mechaniki ośrodków ciągłych poszukuje się więc modeli zapewniających dobry opis zjawiska, niestety kosztem uproszczeń rzeczywistości, jakimi jest pominięcie oddziaływań intermolekularnych, bardzo istotnych, zwłaszcza na granicy trzech faz. Do takich należą modele Kistlera i Szykhmurzajewa otrzymane pod koniec ubiegłego stulecia. Wzory z nich wynikające są jednymi z najczęściej stosowanych w obliczeniowej mechanice płynów w obliczeniach przemysłowych.

Gwałtowny rozwój zastosowań mikrofluidyki i nowych materiałów wymusza potrzebę rewizji zakresu stosowalności tych modeli oraz zaproponowanie nowych. W ten obszar wpisują się badania zaprezentowane w przedłożonej rozprawie doktorskiej, której tematyka jest ważna zarówno pod względem naukowym, jak i utylitarnym i dotyczy dynamiki linii styku trzech ośrodków: gazu, ciała stałego oraz cieczy.

Doktorant formułuje na s. 16 jako główny cel pracy: *Określenie warunków przepływu, dla których model Kistlera jest dokładny.*

Celem weryfikacji stosowalności, wykonano badania eksperymentalne zjawiska dla dwóch przypadków charakteryzowanych dużą prędkością ruchu linii styku trzech faz, w szczególności:

- uderzenia kropli o podłoże,
- dla przepływów kapilarnych w okrągłych rurkach.

Doktorant jako cel poboczny formułuje zadanie wyznaczenia rozdzielczości przestrzennych i czasowych na pomiar kąta zwilżania.

Zakres pracy obejmuje: wykonanie szeregu badań eksperymentalnych celem identyfikacji kluczowych czynników wpływających na przedmiotowe zjawisko na stanowisku

badawczym na Politechnice Warszawskiej umożliwiającym testy laboratoryjne oraz analizę danych w sytuacjach modelowych.

Autor zaznacza, że prezentowana praca dotyczy fizyki przepływu, a nie właściwości fizykochemicznych powierzchni. Oznacza to, że parametrem charakteryzującym będzie statyczny kąt zwilżania powierzchni.

Można stwierdzić, że cel pracy oraz objęty nią zakres badań odpowiada wymaganiom w odniesieniu do prac doktorskich.

3. Ocena merytoryczna pracy

Układ pracy jest logiczny. Właściwy tekst pracy poprzedzono spisem treści. Treść podzielono na cztery rozdziały zawierające podrozdziały. Spis cytowanej literatury obejmuje 97 pozycji. W pracy zamieszczono wymagane ustawowo streszczenia w języku angielskim oraz polskim. Dołączono też spis oznaczeń. Na stronie 17 jest napisane, że praca zawiera załącznik, jednak w książce ani w spisie treści nie jest zawarty.

W pracy można wyodrębnić dwie części. Część pierwsza, wprowadzająca, zawiera 16 stron i obejmuje dwa rozdziały. W rozdziale pierwszym przedstawiono motywację do przeprowadzonych badań, pokrótce omawiając braki istniejących modeli zwilżalności i kąta zwilżania powierzchni otrzymanych w ramach mechaniki ośrodka ciągłego. Sformułowano też cel pracy. W rozdziale 2. opisano podstawy teoretyczne oraz przedstawiono braki najpopularniejszych modeli stosowanych do opisu kątów zwilżania (statycznego i dynamicznego). Zaakcentowano, że modele te nie uwzględniają przepływów inercyjnych, a także przepływów niestacjonarnych (np. kropli poruszających się z dużą prędkością). W części tej dokonano szczegółowego przeglądu literatury, ale niestety nie najnowszej. Większość cytowanych prac jest co najmniej dziesięcioletnia. Cel pracy został jasno sformułowany, dostrzeżone niejasności w tej części pracy zawarłam w dalszej części recenzji – 4. Uwagi Krytyczne.

Część druga rozprawy (50 stron) zawiera dwa rozdziały dotyczące badań doświadczalnych i analizy wyników. Rozdział trzeci dotyczący wyników podzielony jest na trzy podrozdziały. W pierwszym omówiono stanowisko, na którym prowadzony był eksperyment. Drugi podrozdział dotyczy badań interakcji kropli z powierzchnią, w trzecim analizowany jest przepływ płynu przez kapilary. W obu podrozdziałach techniki pomiaru oraz obrazowania są przedstawione na początku każdego z nich. Następnie są omówione metodologie pomiaru. Końcowe fragmenty zawierają analizy wyników. Autor pokazuje w nich ograniczenia techni-

ki i omawia eksperymentalne aspekty stosowanej metody badawczej. Opis stanowiska i metodologii badawczej jest dokładny. Zastosowano współczesne metody rejestracji.

Badania własne oraz informacje dotyczące metodologii pomiarów przedstawiono szczegółowo i wnikliwie, ilustrując na wykresach prowadzone analizy porównawcze. Dużą uwagę skierowano na określenie efektu wpływu rozdzielczości przestrzennych i czasowych na pomiar kąta zwilżania. Opis metodologii pomiarów zajmuje 35 stron. Brakuje mi tabeli, gdzie zostałyby zestawione wartości wielkości fizycznych cieczy podane w układzie SI użyte do wyznaczania liczb Ca, We, Re. Wyniki ilustrujące prowadzone przez Doktoranta analizy zostały zaprezentowane na 28 rysunkach. Na ich podstawie między innymi stwierdzono, że wpływ sił inercji na zmiany kąta zwilżania w przypadku kropli uderzającej w płaską powierzchnię jest istotny, a także znaczące są różnice wartości kątów dynamicznych zmierzonych oraz wyznaczonych z istniejących wzorów. Badania dla kropli były wykonywane dla trzech różnych powierzchni.

Główne wyniki rozprawy podsumowano w rozdziale czwartym. Zaprezentowano tam również wnioski i możliwe kierunki przyszłych badań związanych z przedmiotowym zagadnieniem. Wnioski i stwierdzenia uważam za prawidłowe. Literatura cytowana w tekście obejmuje 96 pozycji, w tym z ostatnich pięciu lat jedynie sześć.

4. Uwagi krytyczne

Proszę Doktoranta o wyjaśnienie poniższych kwestii:

- 1) Proszę o wyjaśnienie, jak interpretować wzór (2.8) – s. 24, określający zależność prędkości U_{CL} od kąta.
- 2) Fizyczną jednostką prędkości w SI jest [m/s]. Na stronie 9 jednostką prędkości linii U_{CL} jest kąt.
- 3) Na stronie 27 zamieszczono rysunek (2.8), który jest niezgodny z fizyką. Błędnie ilustruje molekuly ciała stałego oraz cieczy i gazów w skali nanometrycznej. – proszę o ilustrację zgodną z fizyką.
- 4) Liczba Knudsena jest dokładnie zdefiniowana i dla cieczy i dla gazów. Wzór (2.12) nie odpowiada tym definicjom, choć Doktorant tak ja nazywa. Proszę o wyjaśnienie dla jakiego ośrodka Autor wyznacza wielkość oznaczoną Kn oraz jak definiuje λ (displacement length). Co się przemieszcza?
- 5) Jaką postać ma funkcja odwrotna do (2.24), wykorzystywana do wyliczenia wartości kąta w (2.23), które to wartości są przedstawiane na licznych rysunkach celem przeprowadzenia porównań, dla przykładu na rys. (3.13), (3.26) i (3.27).

- 6) Wyniki zostały podane dla przepływów wody i glicerolu w szklanej rurce, czy mogą zostać uogólnione na inne ciecze? Jeśli tak, to na jakiej podstawie?
- 7) Jaka była chropowatość, średnica oraz grubość szklanej rurki?
- 8) Jednostką długości w układzie SI są metry. Autor podaje (s. 74) długość rurki w pikselach (!). Proszę podać jej długość w jednostkach układu SI.
- 9) Jakie wartości wielkości fizycznych zostały użyte do wyznaczenia liczb Webera oraz Ca wykorzystanych na rysunkach (3.10) i (3.14).
- 10) Fizyczna interpretacja liczby Reynoldsa jest znana. Na rysunku w pracy występuje: $Re^{0,12}$, $Re^{0,08}$ oraz $Re^{0,24}$, jak to jest interpretowalne?
- 11) W jakiej temperaturze wykonywano pomiary?

5. Ocena końcowa

Praca ma charakter analityczno-eksperymentalny. Analizowana jest dynamika linii trójfazowej w przypadku kropli uderzającej w płaską powierzchnię oraz przepływów w kapilarze w oparciu o wykonane w ramach pracy badania eksperymentalne. Celem jest walidacja wzorów uzyskanych dla istniejących modeli, uzyskanych w ramach mechaniki ośrodka ciągłego, określających zależność kąta zwilżania w funkcji prędkości rozchodzenia interfejsu ciec-z-gaz-podłoże celem ich weryfikacji poprzez eksperyment.

W skali nanometrycznej zjawiska związane z oddziaływaniem materiałowym na granicy faz płyn/ciało stałe stają się tak istotne, że wpływają dla przykładu na hydrodynamikę przepływu w nanokanałach. Istnieje nurt badań zjawisk opisanych w pracy w oparciu o Dynamikę Molekularną, uwzględniający oddziaływania materiałowe na poziomie molekularnym, o czym Autor nie wspomina w rozprawie. Wprawdzie na stronie 16 pracy napisał, że nie koncentruje się na własnościach powierzchni tylko na fizyce przepływu, niemniej są one istotne i mogą tłumaczyć szereg obserwacji zawartych w rozprawie.

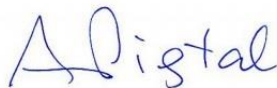
Badania doświadczalne przeprowadzone w ramach doktoratu wykazały, że wzory otrzymane z modeli uzyskanych w ramach mechaniki ośrodków ciągłych nie zawsze dobrze opisują rzeczywistość i w tym upatruję dużą wartość tej pracy. Autor wykazał się dobrą znajomością metod pomiarowych, zaprojektował stanowisko umożliwiające wykonanie badań. Rzetelnie zajął się jego kalibracją. Następnie otrzymał szereg wyników doświadczalnych, które porównał z obliczonymi na podstawie powszechnie stosowanych wzorów w obliczeniach przemysłowych.

W prowadzonych badaniach wykorzystał współczesne narzędzia badawcze. Otrzymane rezultaty są nowe i ciekawe, co dowodzi celowości badania. Przeprowadzone analizy w pracy są poprawne.

Moja ocena pracy jest pozytywna. Rozprawa przedstawiona przez mgr. inż. Michała Remera nosi znamiona oryginalności, wnosi wkład w wiedzę z zakresu mikrofluidyki – tym samym inżynierii mechanicznej.

6. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z przedstawioną rozprawą doktorską *Triple line dynamics for droplet impingement and capillary flows*, stwierdzam, że stanowi rozwiązanie problemu naukowego w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz spełnia wymagania określone obowiązującą Ustawą: Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. Wnoszę zatem o jej przyjęcie i dopuszczenie Pana mgr. inż. Michała Remera do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Anna Kucaba-Pietal