

2018 -03- 16

prof. dr hab. Maria L. Ekiel-Jeżewska
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Pawińskiego 5b, 02-106 Warszawa

Warszawa, 15 marca 2018

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Karola Wędołowskiego pt.
*Kształt i ewolucja czasowa powierzchni rozdziału faz w
obecności zewnętrznego zaburzenia.***

Rozprawa doktorska pt. *Kształt i ewolucja czasowa powierzchni rozdziału faz w obecności zewnętrznego zaburzenia* została przygotowana przez mgr. Karola Wędołowskiego pod kierunkiem prof. dr hab. Marka Napiórkowskiego na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Praca powstała w ramach Międzynarodowych Projektów Doktoranckich koordynowanych przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej, w oparciu o współpracę naukową z Instytutem Systemów Inteligentnych im. Maxa Plancka w Stuttgarcie w Niemczech. Rozprawa liczy 180 stron, 6 rozdziałów, 3 dodatki i cytuje 101 prac.

W swojej pracy doktorskiej mgr Karol Wędołowski skoncentrował się na stworzeniu teoretycznego i numerycznego mezoskopowego opisu zmiany kształtu powierzchni rozdziału dwóch faz płynnych, cieczy i gazu, pod wpływem znajdującego się w pobliżu małego obiektu, który w ogólności może się poruszać. Opis ten oparty jest na teorii funkcjonału gęstości i (w ogólności nielokalnym) efektywnym hamiltonianie dla powierzchni rozdziału faz. Dodatkową trudność stanowi obecność poziomej ścianki (fazy stałej) ograniczającej fazę ciekłą, co powoduje, że wzajemne oddziaływanie cząsteczek fazy ciekłej i stałej siłami van der Waalsa należy uwzględnić w efektywnym hamiltonianie. Obiekt zaburzający kształt powierzchni cieczy modelowany jest jako kulka.

W pierwszej części rozprawy, w rozdziałach 1-3, mgr Karol Wędołowski przedstawił opis równowagowej deformacji powierzchni rozdziału faz: ciekłej i gazowej. Wprowadził znane z literatury pojęcia i metody, a następnie zastosował je do skonstruowania efektywnego hamiltonianu dla badanego układu: ścianka - warstwa cieczy - gaz. Podanie wyrażenia na efektywny hamiltonian jest oryginalnym wynikiem autora rozprawy. Następnie mgr Karol Wędołowski przeanalizował rozszerzone równanie Laplace'a zawierające potencjały efektywnego oddziaływania ze znalezionej wcześniej efektywnego hamiltonianu. Przypominał także znane z literatury wyniki dla równowagowej deformacji powierzchni rozdziału faz wywołanej obecnością kulki i omówił bezwymiarowe parametry charakterystyczne: liczby Bonda i Hamakera. Zdefiniował małe deformacje, podał rozwiązania równania zlinearyzowanego oraz spektrum deformacji. Przedstawił metodę relaksacyjną i metodę strzałów dla nieliniowego oddziaływania kulki z powierzchnią i zastosował tę pierwszą do wyznaczenia profili deformacji i przeanalizowania dokładności przybliżenia liniowego dla mikroskalowego układu ścianka - warstwa cieczy - gaz.

Druga część rozprawy poświęcona jest dynamice powierzchni rozdziału faz w układzie: gaz - ciecz - pozioma ścianka, w obecności pola grawitacyjnego. W rozdziale 4 wprowadzone zostały równania hydrodynamiki lepkiej cieczy nieściśliwej oraz warunki

brzegowe na powierzchni rozdziału faz (przyleganie na ścianie, powierzchnia swobodna na powierzchni styku z gazem). Przeanalizowany został przypadek płaskiej warstwy cieczy w nieobecności kulki - ogólnie i w przybliżeniu cienkiej warstwy smarowania. Wyprowadzone zostały związki dyspersyjne odpowiadające małemu zaburzeniu powierzchni i powstałym w jego skutek polom prędkości i ciśnienia zmodyfikowanego. Należy podkreślić istotny wkład autora, który rozwiązał ogólny problem dla warstw cieczy o dowolnej lepkości i głębokości, podczas gdy w literaturze znane są tylko wyniki dla cieczy doskonałej, a także wyniki dla przybliżenia cienkiej warstwy. W szczególności istotne są wnioski określające zakresy parametrów, dla których następuje i nie następuje propagacja fal powierzchniowych. W dalszej części rozdziału 4 mgr Karol Wędołowski zbadał dynamikę warstwy cieczy w obecności znajdującej się nad nią kulki, wprowadzającej dodatkowe zewnętrzne pole ciśnienia zależne od położenia i od czasu.

W rozdziale 5 autor skupił się na ruchu warstwy cieczy w zakresie na tyle małych liczb Reynoldsa, że bezwładność cieczy jest zaniedbywalna, co koresponduje z prędkościami cieczy i rozmiarami kulki w mikroskali. Wyzначzył relaksację powierzchni fazowej ciecz-gaz w obecności nieruchomej kulki, a także ewolucję deformacji tej powierzchni pod wpływem pionowego oscylacyjnego ruchu kulki. Przeanalizował przypadek liniowy i wprowadził efektywne metody numeryczne pozwalające na wyznaczenie deformacji w przypadku nieliniowym, gdy ciśnienie zależy od deformacji powierzchni rozdziału faz. Przebadał stabilność kształtu powierzchni blisko nieruchomej kulki i znalazł niestabilności prowadzące do kontaktu powierzchni z kulką i powstania mostka kapilarnego.

Rozdział 6 rozprawy poświęcony jest ewolucji kształtu powierzchni ciecz-gaz oraz oporu falowego wywołanych ruchem kulki ze stałą prędkością wzdłuż tej powierzchni. Mgr Karol Wędołowski pokazał, że w zakresie liczb Reynoldsa znacznie mniejszych od jedności deformacja powierzchni w istotny sposób zależy od grubości warstwy cieczy. Wykorzystując ogólny związek dyspersyjny (wyprowadzony przez niego wcześniej) przebadął również ewolucję kształtu powierzchni wody dla szerokiego zakresu liczb Reynoldsa i wyznaczył zakres grubości warstwy i zakres prędkości kulki, dla których na powierzchni wody występują fale kapilarno-grawitacyjne.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie pracy doktorskiej. Najważniejszy wynik rozprawy to wyprowadzenie ogólnego związku dyspersyjnego dla zaburzeń powierzchni rozdziału fazy ciekłej i fazy gazowej w obecności płaskiej, ścianki, w szerokich zakresach grubości warstwy cieczy i lepkości cieczy.

Zgodnie z *Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym*, celem recenzji jest stwierdzenie, czy praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej, a także umiejętność prowadzenia pracy naukowej.

Przedstawione powyżej argumenty wskazują na to, że rozprawa doktorska pana mgr. Karola Wędołowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego, jakim jest wyznaczenie zależnej od czasu deformacji powierzchni rozdziału między gazem a warstwą cieczy przylegającą do dna naczynia, wywołanej obecnością cząstki w jej pobliżu. Mgr Karol Wędołowski w swojej rozprawie doktorskiej zawarł obszerne, staranne i bardzo szczegółowe opracowanie tego zagadnienia. Istotną część tego opracowania stanowi znany z literatury opis teoretyczny mezoskopowych stanów równowagi termodynamicznej

i przepływów cieczy lepkiej, a także przegląd stosowanych dotąd metod analizy dynamiki warstwy płynu i dynamiki deformacji powierzchni międzyfazowej, wykorzystanych później przez autora do rozwiązania postawionego problemu badawczego w szerokim zakresie parametrów, w oparciu o zróżnicowane metody teoretyczne. Niewątpliwie zatem w ten sposób pan mgr Karol Wędołowski wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie fizyki i umiejętnościami jej stosowania.

Należy także podkreślić istotne wyniki numeryczne uzyskane przez mgr. Karola Wędołowskiego oparte na autorskich algorytmach i programach komputerowych. Na uwagę zasługuje znaczny wkład pracy autora w znalezienie i szczegółowe przedyskutowanie właściwości rozwiązań dla wielu konkretnych przypadków, przy jednoczesnym zwróceniu uwagi na ogólne prawidłowości i starannej analizie zakresu stosowalności przybliżeń.

Uzyskane wyniki naukowe zostały przedstawione w rozprawie w sposób rzetelny i spójny. Zwraca uwagę precyzyjny sposób prezentacji całej pracy i jej przejrzysty układ. Każdy rozdział poprzedzony jest przydatnym wprowadzeniem i przeglądem jego treści, a zakończony podsumowaniem. Jedyna uwaga krytyczna dotyczy tego, że autor nie zawsze jasno określa w tekście, które wyniki są literaturowe, a które własne.

Warto zwrócić uwagę na to, że część wyników rozprawy doktorskiej została już opublikowana w dwóch obszernych artykułach w renomowanych międzynarodowych czasopiśmie *Physical Review E* oraz *Soft Matter*.

Należy podkreślić, że deformacja powierzchni swobodnej cieczy wywołana ruchem obiektu w jej pobliżu jest niezwykle ważnym, choć dotąd często pomijanym w literaturze zjawiskiem, istotnie wpływającym na dynamikę płynów złożonych w skali mikro. Wyniki rozprawy mogą być zatem wykorzystywane między innymi w licznych zastosowaniach biologicznych, diagnostyce medycznej czy mikrofluidyce, a także przy opracowywaniu wyników pomiarów mikroskopem sił atomowych, dla których wpływ końcówki mikroskopu znajdującej się blisko powierzchni rozdziału fazy ciekłej i gazowej w pierwszym przybliżeniu jest analogiczny do wpływu kulki rozważanej w rozprawie.

Podsumowując, autor rozprawy niewątpliwie wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych, a recenzowana praca z nadmiarem spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez *Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym*, przy czym jej teoretyczne i numeryczne wyniki mają istotne znaczenie poznawcze.

Dlatego wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej pt. *Kształt i ewolucja czasowa powierzchni rozdziału faz w obecności zewnętrznego zaburzenia* oraz dopuszczenie mgr. Karola Wędołowskiego do jej publicznej obrony. Ponadto postuluję wyróżnienie autora tej rozprawy za skonstruowanie spójnego teoretycznego i numerycznego opisu deformacji powierzchni swobodnej warstwy cieczy ograniczonej płaską ścianką i gazem, wywołanej obecnością kulistej cząstki.

prof. dr hab. Maria L. Ekiel-Jezewska