

Warszawa, dnia 14 marca 2018

dr hab. Krzysztof Mizerski, prof. PAN
Instytut Geofizyki PAN
ul. Księcia Janusza 64
01-384 Warszawa

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI
WPŁYNĘŁO

2018 -03- 19

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Karola Wędołowskiego pt.

„Kształt i ewolucja czasowa powierzchni rozdziału faz

w obecności zewnętrznego zaburzenia”

Rozprawa doktorska pana mgr Karola Wędołowskiego, napisana pod opieką prof. Marka Napiórkowskiego dotyczy opisu kształtu powierzchni rozdziału faz oraz dynamiki swobodnej powierzchni płynu w obecności zewnętrznego potencjału bądź pola ciśnień oddziałującego na tę powierzchnię. Problem ten jest bardzo istotny z punktu widzenia wszelkich zastosowań, gdzie powierzchniowy opór falowy gra istotną rolę i zwiększa wydatki energetyczne potrzebne do przemieszczania obiektów po powierzchni lub w bezpośredniej bliskości płynów. W szczególności analizowane problemy mają ważne zastosowanie do badań przy użyciu mikroskopów sił atomowych, ze względu na znacznie dokładniejszy niż uzyskiwany dotychczas opis dynamiki oscylacji ciała będącego modelem igły mikroskopu i sprzężonego z nią płynu. Problem podjęty przez doktoranta ma zatem istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne i jego rozwiązanie jest ważnym krokiem na drodze do zrozumienia istotnych aspektów dynamiki powierzchni swobodnej cieczy w obecności zewnętrznych zaburzeń.

Doktorant jest pierwszym autorem dwóch publikacji naukowych w czasopismach Soft Matter z roku 2015 (Impact Factor: 3.889) oraz Physical Review E z roku 2013 (Impact Factor: 2.366), których współautorem jest promotor rozprawy, prof. Marek Napiórkowski. Wyniki swoich badań opublikowane w tych pracach zostały zawarte w rozprawie doktorskiej, jednak rozprawa zawiera również nowe wyniki, jeszcze nieopublikowane, głównie dotyczące przybliżenia Stokes'a. Ponadto doktorant jest autorem publikacji naukowej w Archives of Mechanics z 2012 roku (Impact Factor: 1.157) dotyczącej spalania biomasy (bez udziału promotora rozprawy), co uważam, bardzo pozytywnie świadczy o otwartości doktoranta na różne problemy naukowe.

Jako najważniejsze wyniki ocenianej rozprawy doktorskiej wymienić należy:

1. Wyznaczenie ogólnego związku dyspersyjnego dla fal powierzchniowych (tzn. rozchodzących się na powierzchni swobodnej cieczy) dla płynów rzeczywistych o dowolnej głębokości. W ten sposób doktorant uogólnił dotychczasowe podejście polegające albo na przybliżeniu płynu idealnego, bądź też na przybliżeniach płytkiej lub głębokiej wody.
2. Zastosowanie powyższego związku do opisu ewolucji deformacji powierzchni swobodnej płynu w sytuacji nagłego pojawienia się zaburzenia, a także w dla układów z dynamicznym

zaburzeniem – oscylującym w czasie, bądź przemieszczającym się nad powierzchnią cieczy. W szczególności dokładnie został zbadany i opisany opór falowy wywierany na oddziałujące z płynem przemieszczające się ciało, w tym efekty emisji fal kapilarno-grawitacyjnych – efektu jakościowo podobnego do niestabilności Czerenkowa wywołanej przez ruch chmury elektronowej w plazmie.

3. Jakościowa i częściowo ilościowa charakterystyka dynamiki niestabilności powierzchni swobodnej cieczy prowadząca do powstawania mostka kapilarnego pomiędzy cieczą a oddziałującym ciałem,
4. Wyprowadzenie Hamiltonianu efektywnego dla układu podłoże-ciecz-gaz-kulka i zastosowanie go do opisu spektrum deformacji oraz skal czasowych deformacji powierzchni swobodnej pod wpływem zaburzenia.

Pracę doktorską pana Karola Wędołowskiego oceniam bardzo wysoko pod względem naukowym. Wrażenie robi szczegółowość i dokładność przeprowadzonej analizy, która niewątpliwie była skomplikowana. Doktorant z dużą wnikliwością przebadał liczne aspekty dynamiki powierzchni swobodnej cieczy podlegającej zewnętrznemu zaburzeniu (o czym później) i w sposób bardzo przejrzysty i zrozumiały opisał otrzymane wyniki. Na szczególne podkreślenie zasługuje właśnie bardzo klarowny styl doktoranta – pracę czytało się bardzo dobrze. Bardzo imponująca jest biegłość jaką doktorant osiągnął w łącznym stosowaniu metod analitycznych, w tym asymptotycznych takich jak np. metoda zszywanych rozwinięć asymptotycznych (*method of matched asymptotic expansions*) z numerycznymi, oraz termodynamiki równowagowej z hydrodynamiką. Jasny opis fizyki omawianych zjawisk, poparty bardzo szczegółową analizą wielu granic asymptotycznych prowadzącą do wyników analitycznych bądź numerycznych zrobiły na mnie duże wrażenie.

Trzeba podkreślić, iż usterek w pracy jest naprawdę niedużo a te, które znalazłem mają znikome znaczenie. Postaram się wymienić wszystkie niedociągnięcia w poniższej liście:

1. Strony 10-11: w równaniach takich jak pierwsza część (1.1), czy (1.4) brakuje jednoznacznego stwierdzenia, że objętość układu V jest duża. W opisie równania (1.2) napisałbym raczej, iż zawiera ono *wkład* od ścianek naczynia, gdyż słowo „przedstawia” sugeruje, że jest to wkład jedyny.
2. Równania (3.3) oraz (3.4) budzą pewne wątpliwości, ze względu na nie do końca spójne asymptotycznie rozwinięcia. Założone jest, że deformacja ζ jest mała w stosunku do odległości zaburzenia od niezaburzonej powierzchni cieczy ε oraz głębokości cieczy H , jednak pierwsze rozwinięcie zrobione jest z dokładnością do członów rzędu $(\zeta/H)^2$ zaś drugie z dokładnością do członu liniowego (ζ/ε) , co skutkuje obecnością w dalszych wyrażeniach członów typu (ζ/H) , przy jednoczesnym zaniedbaniu członów typu (ζ/ε) . Narzucającą się granicą asymptotyczną dla zaprezentowanych w tym miejscu rozważań jest zatem $H \ll \varepsilon$, którego to stwierdzenia w pracy zabrakło.
3. Rysunek 3.5: Nie widać na nim wykładnika $1/3$ dla badanej zależności. Można było np. użyć skali logarytmicznej na osi pionowej i narysować prostą o współczynniku nachylenia $1/3$, którą można by porównać z otrzymanym wykresem.

4. Używanie tych samych oznaczeń na różne wielkości w jednej pracy jest mylące, dlatego w równaniu (4.34) można było użyć np. oznaczenia ϵ na stosunek głębokości cieczy H do szerokości układu L .
5. Równanie (5.6) – literówka – niepotrzebny czynnik ρ w nawiasie kwadratowym.
6. Opis rysunku 5.2 w tekście – warto by było podać wartości liczb k_H i k_λ dla omawianych przypadków, skoro autor odnosi się do nich w kontekście zmiany charakteru ewolucji układu w obszarze tych granicznych wartości.
7. Rysunek 5.18 nie ma podpisu.
8. Słowo „reżim” powinno moim zdaniem zostać wszędzie zastąpione słowem „granica”, gdyż w języku polskim, w odróżnieniu od angielskiego, nie używa się słowa reżim w znaczeniu fizycznego stanu układu. Jak zwykle w przypadku dużych prac znalazła się tu pewna ilość literówek, jest ona jednak nieduża.

Stwierdziwszy powyższe, należy podkreślić, iż wszystkie wymienione uwagi mają charakter techniczny i w mojej ocenie stanowią bardzo drobne niedociągnięcia.

Całą pracę oceniam jednak bardzo wysoko. Duża dociekliwość doktoranta pozwoliła na przebadanie bardzo wielu aspektów dynamiki powierzchni rozdziału faz w obecności stacjonarnych oraz dynamicznych zaburzeń. Uważam, że przedstawiona analiza badanego zagadnienia jest naukowo bardzo dojrzała i w wielu aspektach kompletna. Doktorant uzupełnił istotną lukę w dotychczasowej literaturze naukowej poświęconej zagadnieniom deformacji powierzchni swobodnej cieczy poprzez wyprowadzenie i zastosowanie do opisu tego zagadnienia ogólnego związku dyspersyjnego dla fal powierzchniowych. W szczególności dyskusję owego wniosku, zawartą w rozdziale 4.8 uważam za bardzo ciekawą. Opisane tam zostało m.in. kiedy oscylacyjna część zaburzeń powierzchni zanika i deformacja jest wówczas tylko tłumiona przez lepkość; obszar granicznych liczb falowych dla których znikają oscylacje wiąże się, jak się wydaje, z nieanalitycznością związku dyspersyjnego w tym obszarze w ramach przyjętego modelu. Ponadto niezwykle ciekawy wydaje się szczegółowy opis geometrii śladu pozostawianego na powierzchni płynu przez poruszające się bezpośrednio nad nim ciało, zawarty w rozdziale 6 wraz z wyznaczeniem oporu falowego wywieranego na ciało. Doktorant przeanalizował przypadek rezonansowej emisji fal kapilarno-grawitacyjnych z obszaru zaburzenia i zbadał szereg przypadków szczególnych. Ciekawą obserwacją było wykazanie, że profile deformacji powierzchni rozdziału faz na kierunku prostopadłym do kierunku ruchu zaburzenia w ramach przybliżenia cienkiej warstwy płynu pokrywają się profilami z przypadku statycznego.

Trzecim ważnym elementem pracy była analiza dynamiki powierzchni swobodnej poddanej wpływowi poruszającego się ponad nią ruchem oscylacyjnym na kierunku pionowym ciała. Identyfikacja skal czasowych i przestrzennych w tym zagadnieniu oraz omówienie ich roli przy uwzględnieniu niezerowej lepkości płynu i jego dowolnej głębokości jest znaczącym osiągnięciem doktoranta.

Podsumowując należy podkreślić, że wyniki doktoranta wyraźnie pokazują, iż stosowane dotychczas w omawianym problemie badawczym przybliżenia, w wielu wypadkach mających odniesienie do sytuacji rzeczywistych tracą swoją stosowalność, gdyż prowadzą do dużych rozbieżności z

rozwiązaniami modeli cieczy rzeczywistych o kończonej głębokości. Praca pana Karola Wędołowskiego stanowi zatem istotny przyczynek do rozwoju tej gałęzi nauki i ma duże implikacje praktyczne, np. dla mikroskopii atomowej. Uważam, iż w związku z tym praca ta zasługuje na wyróżnienie.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa doktorska nie pozostawia żadnych wątpliwości, iż spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa, w tym Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję o dopuszczenie pana Karola Wędołowskiego do dalszego postępowania kwalifikacyjnego. Ponadto stawiam wniosek do Rady Naukowej Wydziału Fizyki UW, o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pana mgr Karola Wędołowskiego.


Krzysztof Mizerski