

Gdańsk, 12 kwietnia 2019 r.

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

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Marka Bukowickiego
pt. *Dynamics of settling pairs of elastic particles at low Reynolds number regime*

Podstawę opracowania recenzji stanowiło pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, z dnia 4.02.2019 r. Praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. Marii Ekiel-Jeżewskiej.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem zainteresowania Doktoranta jest zagadnienie ruchu cząstek w płynie lepkiem; ściślej, analizy teoretyczno-obliczeniowe dotyczą opadania wybranych rodzajów cząstek w polu grawitacyjnym, w warunkach przepływu pełzającego (Stokesa) generowanego tymże opadaniem. W hydrodynamice przepływów w granicy zerowej liczby Reynoldsa siły bezwładności stają się nieistotne, co znacząco upraszcza opis i pozwala na wyznaczenie prędkości cząstek w funkcji działających na nie sił masowych oraz sił oddziaływania ze strony innych cząstek. Naturalnym obszarem zastosowań podejmowanej tematyki są mikroprzepływy, w kontekście lepszego opisu tak zwanych płynów złożonych, w tym dynamiki układów dwufazowych zawierających cząstki niesferyczne.

Tematyka rozprawy jest bardzo interesująca od strony poznawczej. Doktorant przedstawił systematyczne studium dynamiki, poczynając od ruchu układu dwóch połączonych cząstek (tzw. hantle) z jednym dodatkowym stopniem swobody (ściskanie/rozciąganie), układu 3 cząstek (tzw. tryplety) z kolejnym dodatkowym stopniem swobody (zginanie), i wreszcie układu skończonej liczby cząstek stanowiącego przybliżenie sprężystych albo sztywnych włókien. O ile badania ruchu pojedynczych cząstek, także modeli włókien, są znane w literaturze, o tyle analiza ruchu (opadania) par tychże cząstek i ich wzajemnego oddziaływania jest istotną nowością naukową rozprawy. Podejmowane zagadnienie ma interesujące implikacje praktyczne dla ruchu małych obiektów w płynie, w tym mikroorganizmów czy ogólniej tak zwanych cząstek aktywnych (ang. *self-propelling objects*, *swimmers*) a szerzej dla fizyki płynów złożonych. Zatem także z tego względu podjęte badania cechuje aktualność.

Od strony klasyfikacji formalnej rozprawa sytuuje się w dyscyplinie mechanika, jednakże znacznie bliżej zagadnień *stricto* podstawowych niż inżynierskich, gdyż prowadzone rozważania bardzo szczegółowo ujmują aspekty fizyki zjawisk. Zakres podjętych przez Doktoranta badań oraz stopień ich trudności z pewnością odpowiadają wymogom stawianym pracom doktorskim.

Struktura i zawartość pracy doktorskiej

Pierwsze dwa rozdziały rozprawy stanowią wprowadzenie do tytułowego problemu. Zawierają one krótkie przypomnienie podstawowych cech przepływów Stokesa, przegląd literatury oraz specyfikację celów pracy (rozdział 1), a także definicje analizowanych dalej modeli cząstek (hantli, trypletów i włókien), równania ruchu cząstek i dyskusję założenia symetrii (rozdział 2).

Kolejne rozdziały pracy dokumentują uzyskane wyniki dla opadania par hantli (rozdział 3) i par sztywnych włókien (rozdział 4). Rozdział 5 zawiera dyskusję różnych form przyjętego potencjału zginania włókien. Dalsze wyniki obliczeń własnych Autora dwu- i trójwymiarowego ruchu par włókien sprężystych z uwzględnieniem ich zginania opisano w rozdziałach 6 i 7. Zagadnienie dynamiki i stabilności ruchu przy założeniu zaburzenia początkowej symetrii układu przedstawiono w rozdziale 8. Podsumowanie rozprawy, wnioski Autora oraz sugerowane przezeń kierunki dalszych badań zamieszczono w rozdziale 9. Dodatkowo, załącznik A zawiera porównanie dwóch form oddziaływania hydrodynamicznego cząstek, a załącznik B – dyskusję stabilności opadania pojedynczego trypletu.

Szczegółowa ocena pracy oraz pytania i uwagi

Lektura rozprawy jest ciekawa, ale zarazem bardzo wymagająca, zwłaszcza w jej głównej części zawierającej analizę ruchu rozważanych układów (rozdziały 3-8), z uwagi na przeprowadzone przez Doktoranta systematyczne i szczegółowe badania wielu różnych konfiguracji cechujących się nietrywialną (a niekiedy nawet nieintuicyjną) dynamiką. Obszerny był przy tym zestaw parametrów kontrolnych wpływających na trajektorie cząstek. Parametry te obejmowały między innymi początkową konfigurację (odległość pary cząstek, kąty położenia), a także parametry sprężyste, potencjał zginania, liczbę cząstek, rodzaj oddziaływania hydrodynamicznego. Niewątpliwie przebija z tej lektury dociekliwość i duży wysiłek włożony przez Autora w swoją pracę, w badania bardzo wielu przypadków, próbę systematyzacji obserwowanych wyników, a także ich pogłębioną interpretację fizykalną.

W rozdziale 1, przy wprowadzeniu do przepływów Stokesa, Autor okazał bardzo dobre rozumienie dynamiki płynów; inspirująca była też dygresja na temat dynamiki Arystotelesa opisującej ten reżim przepływu oraz twierdzenie o przegrzebku. Jeśli idzie o definicję liczby Reynoldsa, to sposób jej wyprowadzenia jest ciekawy, choć niezbyt intuicyjny na gruncie mechaniki continuum, gdy mowa o ruchliwości elementu płynu. Ponadto, ponieważ mamy do czynienia z układem, w którym przepływ generowany jest opadaniem cząstek, bardziej naturalne wydaje się wprowadzenie prędkości terminalnej cząstek do r-nia (1.6). Tu pojawia się **pytanie 1** (jeśli jest pytaniem dobrze postawionym): czy sprawdzono, że rzeczywiście dla przyjętych w pracy parametrów kontrolnych (m.in. skali liniowej, stosunku gęstości faz i wartości przyspieszenia grawitacyjnego) spełnione są warunki przybliżenia Stokesa?

W rozdziale 2, w jasny i przekonujący sposób podano charakterystyki badanych rodzajów cząstek, jak również rządzące ich dynamiką wielkości fizyczne, wprowadzono także parametry bezwymiarowe. Na marginesie przybliżenia włókien przez układ cząstek (rozdział 2.1.3) zadać można **pytanie 2**: przy zadanej średnicy włókna, czy nie warto wprowadzić takiej wartości promienia cząstek, by objętość włókna była równa sumarycznej objętości tworzących je cząstek? Poprzez wzór na siłę oporu miałyby to zapewne implikacje dla zadawania macierzy mobilności. Ciekawe i logiczne jest uzasadnienie wprowadzenia symetrii do rozważanego układu (rozdział 2.6). Warto by jedynie dodać, na kanwie rysunku 2.2B, czy i kiedy możliwa byłaby fizyczna realizacja takiej sytuacji, że powierzchnia swobodna jest równoległa do wektora pola sił masowych (**pytanie 3**)? Ma to znaczenie w kontekście możliwości eksperymentalnego potwierdzenia uzyskanych w rozprawie wyników (zob. też pytanie 6). Przytoczony w rozdziale 2 układ równań różniczkowych zwyczajnych (2.12), rządzący ewolucją wszystkich rozważanych w pracy układów cząstek, jest podstawowym modelem matematycznym, dzięki któremu uzyskano wszystkie wyniki ilościowe. Doktorant stwierdza (str. 25, 1 linia), że równania te „są rozwiązywane” nie podając jednakże żadnych szczegółów. Przypuszczać należy, że zastosowano jedną z dostępnych procedur bibliotecznych w języku skryptowym Python (str. 123). Myślę jednak, że nie od rzeczy byłoby wspomnieć (**pytanie 4**),

jakiej metody całkowania numerycznego użyto, jak (czy automatycznie?) dobierano długość kroku całkowania, jaki był przyjęty poziom dokładności, czy napotkano na trudności w szczególnych przypadkach itd. Być może pytanie takie, naturalne w czasach, gdy recenzent pisał własną rozprawę doktorską, nie ma już racji bytu (?). Jak słusznie zauważa Doktorant, znacznie łatwiej opisuje się dynamikę opadających par cząstek w przybliżeniu Stokesa przy dodatkowych jeszcze uproszczeniach w zakresie oddziaływania hydrodynamicznego (cząstki punktowe; brak tzw. efektu smarowania, ang. *lubrication*) niż w sytuacji skończonej liczby Reynoldsa bez założeń upraszczających. Ciekawe – ale wykraczające to znacząco poza zakres pracy – byłoby porównanie, czy w pełnym modelu przepływu (ang. *particle-resolved DNS*) ocalałyby niektóre z zaobserwowanych w pracy intrygujących efektów, np. asymptotyczne wyrównanie (ang. *alignment*) opadających włókien albo udokumentowane w rozdziale 7.1 spektakularne zmiany reżimu („cztery mody dynamiki”, str.92)?

W rozdziale 3 i dalszych, wśród mnogości ciekawych wyników przedstawionych w formie graficznej, pojawiają się trajektorie cząstek w układzie laboratoryjnym oraz w układzie środka masy. Nie dostrzegłem natomiast w pracy (**pytanie 5**) wykresów dla prędkości opadania (dokładniej: prędkości środka masy) w funkcji czasu. Czy są to wielkości mało istotne (np. stałe w czasie, jak dla przypadku cząstki sferycznej)?

W rozdziale 4 ciekawy jest okresowy charakter ruchu par sztywnych włókien, a także hantli i trypletów. Wydaje się, że w tym właśnie przypadku stosunkowo najłatwiej byłoby o porównanie uzyskanych wyników z eksperymentem. W całej pracy nie ma takich porównań, i nie można z tego czynić zarzutu, tym bardziej, że w podsumowaniu rozprawy Doktorant pisze o planach tego rodzaju. Niemniej jednak odwołanie do eksperymentu – jeśli jest znany z literatury – choćby dla konfiguracji pojedynczych opadających cząstek (rozważanych w rozdziale 5.4) byłoby cenne. Proszę o komentarz Autora (**pytanie 6**) do tej ogólnej kwestii. Pytanie o potwierdzenie doświadczalne wydaje się tym bardziej zasadne, że w podsumowaniu rozprawy (rozdział 9.1) Doktorant dwukrotnie używa ważkiego słowa „odkrycie” (np. *discovery of periodic dynamics*) do opisu uzyskanych wyników. Absolutnie zgadzam się, że te wyniki są intrygujące. Lecz (tu pytanie retoryczne), czy wolno mówić o odkryciu przed jego empirycznym potwierdzeniem?

W rozdziale 5, Autor rozważa różne formy potencjału zginania (ang. *bending potential*) stosowane przy przybliżeniu giętkich włókien przez dyskretny układ połączonych ze sobą cząstek. Są to ciekawe rozważania, zwłaszcza w zakresie skończonych kątów zginania. Skądinąd znane jest zapewne rozwiązanie dla obciążonego włókna (pręta) w zakresie liniowej i nieliniowej sprężystości. Czy można zatem (**pytanie 7**), posiłkując się takim rozwiązaniem, przy założonych parametrach materiałowych, ocenić jakość przyjętego modelu dyskretnego i konkretnego potencjału zginania? Autor preferuje potencjał harmoniczny jako lepiej uzasadniony teoretycznie (str. 73). Jeszcze uwaga szczegółowa: w pracy używa się pojęcia cząstek (włókien) o umiarkowanej giętkości (ang. *moderately flexible*). Pewne wyjaśnienie tego terminu (być może oczywiste) dostrzegłem dopiero w rozdziale 7.5.

Bardzo ciekawe są uzyskane w rozdziałach 6 i 7 wyniki dla opadania par włókien sprężystych. Pokazano, że ten proces charakteryzuje się bogatą dynamiką. Jak wspomniałem wyżej, szczególnie intrygujące jest odkrycie asymptotycznego wyrównania (innymi słowy: dopasowania położenia) włókien, o ile są one dostatecznie giętkie, a także spektakularna mapa reżimów opadania w zależności od giętkości włókien i kąta początkowej konfiguracji (rys. 7.2). Wracając do wcześniejszego pytania o prędkość terminalną, ciekawe byłoby jeszcze porównanie, czy i jak prędkość opadania (koniec rozdziału 7.3) zależy od giętkości B i konfiguracji początkowej. Czy na przykład potwierdziłaby się intuicja, że nasilenie oscylacji włókien podczas opadania wiązałoby się ze spadkiem prędkości terminalnej? Uwaga

szczegółowa: wyniki opisujące zanik oscylacji na rys. 7.6 warto by, dla lepszej czytelności, uzupełnić o rysunek przebiegu czasowego ich amplitudy (tak jak to zrobiono na rys. 7.4A,B).

Przekonujące są badania ewolucji zaburzonej konfiguracji dwóch cząstek przedstawione w rozdziale 8. Jak rozumiem, jednym z argumentów Autora przy założeniu konfiguracji symetrycznej do analiz w głównej części pracy był zamiar ograniczenia nakładu pracy obliczeniowej przy całkowaniu układu równań (2.12). Czy tak (**pytanie 8**)? Badania przeprowadzone w tej części rozprawy dają, jak rozumiem, podstawę do wprowadzenia w przyszłości dodatkowych efektów, np. brownowskich, przy analizie opadania mikrocząstek. Ponadto, w ostatniej części pracy pojawia się dygresja na temat dynamiki chaotycznej (str.126). Jeśli Doktorant uzna to za celowe i interesujące (**pytanie 9**), to może warto więcej o tym powiedzieć. Jak rozumiem, w układach badanych w rozprawie nie stwierdzono takiego zachowania, chociaż w dyskusji wyników konfiguracji 3D sztywnych włókien (str. 118 u dołu) pojawia się sugestia na temat oscylacji aperiodycznych. Natomiast wyniki uzyskane dla zaburzonej losowo początkowej konfiguracji opadającego pojedynczego trypletu (rys. 5) należy interpretować jako wykładniczy zanik zaburzenia, a końcowe fragmenty tych wykresów są jedynie efektem skończonej precyzji reprezentacji maszynowej a nie fizycznym przejawem chaosu (nie podano komentarza) – czy tak?

Przytoczyłem wyżej tylko niektóre spośród oryginalnych, wartościowych wyników uzyskanych i opisanych w rozprawie, które uważam za najważniejsze. Szczegółowy opis pozostałych wymagałby znacznie dłuższej recenzji. Ograniczę się jedynie do potwierdzenia kompletności zestawienia wyników oraz oryginalnych elementów pracy, tak jak je przedstawił Doktorant w podrozdziałach 9.1 i 9.2.

Od strony redakcyjnej opracowanie rozprawy jest staranne; podkreślić należy wysoką estetykę pracy, w tym rysunków, logiczną strukturę rozdziałów i naturalny tok wyводу. Poziom języka angielskiego jest bardzo dobry; zauważyłem stosunkowo niewiele niedoskonałości, bez znaczenia dla czytelności tekstu. Z powtarzających się kilkakrotnie, wskazać można na użycie w zdaniach złożonych słowa *what* zamiast *which* (np. ostatnie zdanie rozdziału 1.2; str.9), a także *which* w miejsce *whose* (np. str.3; podpis rys. 8.4). Powszechnie w literaturze są frazy *numerical integration*, *numerical method* itd. raczej niż *numeric* (str.4).

Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa dowodzi dużej wiedzy Doktoranta o fizyce przepływów, rzetelnie dokumentuje przeprowadzone przez niego badania wraz z pogłębioną analizą uzyskanych wyników. Praca zawiera szereg elementów nowości naukowej. Należy podkreślić, że część przedstawionych w pracy wyników badań ukazała się w formie artykułów w *Journal of Fluid Mechanics* (2015) oraz *Soft Matter* (2018), co – w połączeniu z trzema innymi jeszcze publikacjami w czasopismach z listy JCR – składa się bardzo dobry dorobek publikacyjny Doktoranta.

Uważam, że opiniowana praca spełnia z naddatkiem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i **wnioskuje o dopuszczenie mgra Marka Bukowickiego do publicznej obrony**. Ponadto, zważywszy na duży stopień trudności analizowanych w rozprawie zagadnień, znaczący zakres badań, uzyskane oryginalne wyniki oraz ich staranne udokumentowanie w rozprawie, a także w prestiżowych czasopismach naukowych, stawiam wniosek o **wyróżnienie pracy doktorskiej**.

