

Warszawa, dnia 11 kwietnia 2019

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

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Marka Bukowieckiego pt.

„Dynamics of settling pairs of elastic particles

at low Reynolds number regime”

Rozprawa doktorska pana mgr Marka Bukowieckiego, napisana pod opieką prof. Marii Ekiel-Jeżewskiej dotyczy sedymentacji podłużnych cząstek w cieczy w polu grawitacyjnym, w granicy małych liczb Reynolds'a. Ta ostatnia granica pozwala stosować opis Stokowski, a więc w pracy zakładana jest natychmiastowa reakcja prędkości cząstki w cieczy na przyłożoną do niej siłę zewnętrzną. Oddziaływania hydrodynamiczne pomiędzy sedymentującymi cząstkami są uwzględnione na najprostszym poziomie, przybliżenia cząstek punktowych (macierz mobilności wyrażona poprzez tensor Oseena) oraz tzw. przybliżenia Rotne-Pragera-Yamakawy (macierz mobilności uwzględnia jednokrotne odbicie od oddziałującej hydrodynamicznie cząstki). Wpływ własności elastycznych opadających cząstek na ich dynamikę i końcowy stan ewolucji jest w pracy dogłębnie przeanalizowany. Problem sedymentacji cząstek w lepkim płynie ma istotne znaczenie praktyczne (w zastosowaniach przemysłowych oraz w medycynie) i literatura naukowa poświęcona temu problemowi jest bardzo bogata, w tym w szczególności uproszczonemu modelowi dwóch opadających cząstek, który pozwala na szczegółowe zrozumienie różnych aspektów dynamiki sedymentacji. Problem podjęty przez doktoranta ma zatem istotne znaczenie poznawcze i praktyczne i jego rozwiązanie jest ważnym krokiem na drodze do zrozumienia istotnych aspektów dynamiki sedymentacji.

Doktorant jest pierwszym autorem trzech publikacji naukowych w czasopismach *Journal of Fluid Mechanics* (2015 r.; obecny Impact Factor: 2.893), *Soft Matter* (2018 r.; obecny Impact Factor: 3.709) oraz *Molecular Ecology Resources* (2016 r.; obecny Impact Factor: 7.059). Współautorem dwóch pierwszych wymienionych artykułów jest promotor rozprawy, prof. Maria Ekiel-Jeżewska, natomiast trzecia publikacja jest owocem ośmiomiesięcznego stażu zagranicznego w Institut für Populationsgenetik, Vetmeduni Vienna w Austrii. Ta ostatnia publikacja odbiega tematyką od tematyki doktoratu. Uważam to za duży plus, iż na tym etapie rozwoju doktorant z sukcesem potrafił zaangażować się w ciekawe badania poza głównym nurtem swojej pracy naukowej, gdyż pozytywnie to świadczy o jego otwartości na różne naukowe problemy. Ponadto doktorant jest współautorem (drugim i trzecim) dwóch dodatkowych publikacji w *Physical Review E* (2015 r.; IF: 2.284) oraz

European Physical Journal E (2018 r.; IF: 1.802), w których współautorem jest również prof. Jeżewska. Wyniki swoich badań opublikowane w wyżej wymienionych pracach (poza pracą w Molecular Ecology Resources) zostały zawarte w rozprawie doktorskiej.

Jako najważniejsze wyniki ocenianej rozprawy doktorskiej wymienić należy:

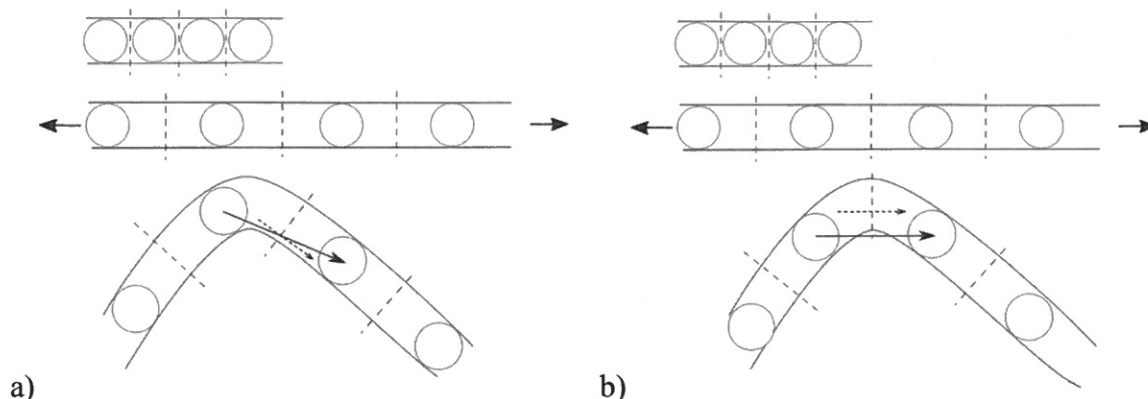
1. Wykazanie, iż elastyczność podłużnych cząstek powoduje, iż mogą przyjąć one kształt, który z kolei skutkuje w przybliżeniu eksponencjalnym tłumieniem oscylacji w ich ruchu poprzez oddziaływania hydrodynamiczne i w efekcie cząstki ustawiają się równolegle do płaszczyzny symetrii układu (równolegle do siebie). Pokazano, iż dla dość szerokiego zakresu wartości współczynnika elastyczności cząstek, końcowa równoległa konfiguracja jest stabilna nawet ze względu na stosunkowo silne zaburzenia. W innych zakresach wartości elastyczności dochodzi do odpychania bądź zderzeń.
2. Porównanie dynamiki długich i krótkich cząstek, w szczególności pokazanie, iż w większości interesujących fizycznie przypadków, najważniejsze jakościowe aspekty dynamiki mogą zostać uchwycone przez uproszczony i łatwiejszy w modelowaniu układ „tumbell” (model trzykoralikowy).
3. Porównanie różnych potencjałów zginania cząstek i rysująca się jednoznaczna konkluzja o wyższej użyteczności potencjałów harmonicznego oraz logarytmicznego. W pracy pokazano, iż wpływ wyboru konkretnej formy potencjału zginania na dynamikę, w skrajnych przypadkach może być bardzo istotny

Pracę doktorską pana Marka Bukowieckiego oceniam wysoko pod względem naukowym. Wrażenie robi dociekliwość w przeprowadzonej, niewątpliwie skomplikowanej analizie. Doktorant z dużą wnikliwością przebadał liczne aspekty dynamiki sedimentacji dwóch symetrycznych cząstek i określił wpływ różnego rodzaju zaburzeń symetrii. W moim odczuciu właśnie ta ostatnia analiza stabilności symetrycznej ewolucji układów oraz przebadanie wpływu formy potencjału zginania na charakter ewolucji zasługują na szczególne podkreślenie. Należy również wspomnieć, iż metoda obrazów pozwala bezpośrednio aplikować wyniki doktoranta do problemu sedimentacji pojedynczej cząstki w bliskości granicy gaz-ciecz (powierzchni swobodnej). Nie mam wątpliwości, iż doktorant wykazał się samodzielnością i rozwiązał ważne zagadnienie z dziedziny mikrohydrodynamiki.

Niewątpliwym niedosyt pozostawia brak uwzględnienia lubrykacji i prostota modelu oddziaływań hydrodynamicznych. Jest to jednak uzasadnione dużą ilością dość długich symulacji numerycznych wykonywanych przez doktoranta; tak dokładne przebadanie przestrzeni parametrów nie byłoby zapewne możliwe przy dokładniejszych modelach, które siłą rzeczy wydłużają czas symulacji. Ponadto należy docenić, iż doktorant w ostatnim rozdziale zarysował dalsze plany swoich badań, gdzie zazaczył, iż jego priorytetem jest właśnie dokładniejsze uwzględnienie oddziaływań hydrodynamicznych i pracę nad tym zagadnieniem już rozpoczął.

Mam jednak zastrzeżenia co do przejrzystości opisu w pracy, który niejednokrotnie pozostawał niejasny. Postaram się wymienić wszystkie niedociągnięcia w poniższej liście:

- Opis odpowiedniości pomiędzy modelem koralikowym a ciągłym w podrozdziale 5.1.2 jest dla mnie niezrozumiały. Jaką klasę konfiguracji wyklucza założony warunek (5.2)? Na pewno wyklucza konfigurację z poniższego rysunku a), gdzie najpierw rozciągamy filament, a następnie zginamy go, ale tak, by płaszczyzna podziału filamentu zaznaczona linią przerywaną nie była na osi zgięcia. Dla takich konfiguracji warunek (5.2) nie jest spełniony. Jest on nato-



miast spełniony dla konfiguracji b), gdzie jednak stopień początkowego rozciągnięcia, przy zachowaniu końcowej długości wektora t_i wpływa na krzywiznę zgięcia, a zatem na rzeczywistą energię zginania w ciągłym filamencie, która w modelu pozostaje niezmienna. Czy zatem można wyrazić jasno konsekwencje fizyczne warunku (5.2)? Ostatnie zdanie podrozdziału 5.1.2 stwierdza, że centra koralików nie leżą na osi filamentu. Zupełnie nie było to jasne wcześniej. Na czym ostatecznie ten model polega? Czy może modelując filament, w każdym kroku czasowym najpierw wyliczamy prędkość i przesunięcie w oparciu o macierz mobilności, a potem wypełniamy go pewną ilością koralików, w ogólności inną w każdym kroku czasowym?

- Nie rozumiem skąd pochodzi oszacowanie (5.7). Można sobie wyobrazić bardzo różne krzywe pomiędzy punktami $i-1$ oraz i , ale chętnie zobaczyłbym dowód, że stała krzywizna, i to akurat ta podana, pozwala tę energię wiązania oszacować z dołu.
- Strona 64: opis ciągłego filamentu. Dlaczego w chwili początkowej parametr wzdłuż krzywej s jest zdefiniowany jako bezwymiarowy, a dla $t > 0$ używa się parametru wymiarowego l ? Nie ma tu oczywiście błędu, ale nie rozumiem po co takie zróżnicowanie. Ponadto „strain” na końcu tego akapitu powinno chyba być zastąpione „deformation”, bo naprężenia są wprawdzie proporcjonalne do deformacji, ale potrzebny jest jeszcze współczynnik materiałowy. Dlaczego s , a nie l użyte jest w (5.3)? To ostatnie równanie chyba obowiązuje dla każdej chwili czasu?
- Strona 56: przy podanej definicji kąta ϕ_y odbicie względem płaszczyzny $x=0$ powoduje zamianę ϕ_y w $-\phi_y$ lub $2\pi-\phi_y$. Ponadto, na rysunku 4.9 na stronie 58 moim zdaniem ewolucja zaczyna się od $\phi_y=90$, a potem przechodzi przez cały zakres, tzn. maleje do zera i potem od 360 do 90 (lub od 0 do -270).
- Strona 59: „changes of θ_y are the smallest for $\phi(0)$ close to 0 and 180”. Przecież $\phi(0)$ było z założenia mniejsze od 90?
- Rysunek 4.8, lewy panel: Pochodne obu krzywych powinny być zero w otoczeniu $\phi(0)=90$, ze względu na symetrię $\phi-90 \rightarrow 90-\phi$ – parametr taki jak okres ruchu nie może zależeć od tego, czy cząstki początkowo są obrócone o kąt dodatni czy ujemny względem osi y (o ile ich środki pozostają w tej samej odległości od początku układu i cząstki są poziome). Szkoda, że

czerwony wykres nie został pociągnięty do wartości $\varphi=90$, tak, żeby pokazać zerowanie się pochodnej również i tam.

7. Strona 57: „For $\varphi(0)=90$ apart from settling the particles can only roll”. Co to znaczy?
8. Strona 82: Jaka była intencja dwóch ostatnich zdań drugiego akapitu zaczynających się od “The dynamics presented in this section...”? Ponadto w podpise do rys. 6.1 powiedziane jest, że dynamika pokazana jest do momentu kolizji. Rozumiem, że to się dotyczy tylko dwóch ostatnich rysunków, a pierwszego nie?
9. Strona 84: „Initially, similarly as filaments trumbbells approach each other”. A dla dużych B? Później, na str. 89 jest napisane, że „particles move away from each other without oscillation” i na 90 “for larger B’ particles move apart without oscillations”.
10. Rozdział 7.3. Nie jest dla mnie jasne jaka jest dokładnie intencja tego rozdziału. Nigdzie nie było zaznaczone w jaki sposób uznaje się, że podczas ewolucji doszło do równoległego ustawienia się cząstek. Czy intencją tego rozdziału jest badanie okresu dochodzenia do konfiguracji równoległej? Raczej nie, gdyż nie widziałbym wówczas uzasadnienia dla całkowicie równoległej i prostej konfiguracji początkowej. Jaki jest zatem cel tego rozdziału?
11. Pewne sformułowania są niejasne/niekompletne. Np. na str. 33 napisane jest, że pełen opis dynamiki modeli dwukoralikowych otrzymuje się poprzez podanie odległości między cząstkami oraz ich długości. A co z prędkościami opadania, prędkością na osi x oraz prędkością rotacji? Te prędkości są badane w pracy w sposób pośredni, poprzez zasięg trajektorii w określonym czasie.
12. Strona 61 (dół): rozważania o symetrii nie mogą mieć moim zdaniem statusu dowodu. Jest to sformalizowanie matematyczne opisu symetrycznej dynamiki, ale dowód wciąż opiera się na wynikach symulacji numerycznych.
13. Strona 63: moim zdaniem po raz pierwszy użyty został termin „aspect ratio”. Co on w tym wypadku oznacza?
14. W opisie konsekwentnie pomijana jest wartość promienia koralików ‘a’, a także czasem całkowita liczba koralików N wśród istotnych parametrów konfiguracji początkowej.
 - a. Podpis obrazka 3.9: „bead size reduced 3 times”. Nie wiemy w ogóle ile “bead size” wynosi.
 - b. Rysunki 4.3, 7.1 oraz 7.2: ile wynosi N?
15. Strona 40 (górze): stwierdzenie o proporcjonalności skali czasu do $1/k$ w oparciu o przedstawiony rysunek jest trudne do uzasadnienia. Skalowania udowadnia się raczej na skali logarytmicznej, dla co najmniej kilku, kilkunastu punktów.
16. Na stronie 41 jest napisane, że modele dwukoralikowe mogą rozbiegać się do nieskończoności, ale nie było to w pracy pokazane.
17. Nazewnictwo: wedle mojej wiedzy przybliżeniem Rotne-Pragera-Yamakawy nazywa się po prostu przybliżenie polegające na uwzględnieniu jednokrotnych odbić, natomiast można je również formułować dla kształtów cząstek innych niż sferyczne.
18. Równanie (2.7) definiuje związek pomiędzy współczynnikami k i A, używany w pracy. Nie jest jednak przypomniane w rozdziałach 3, 4, 5 ani 6, gdzie czytelnik mógł już zapomnieć o tej zależności.
19. Strona 8 (górze) i strona 14 (górze) – brakuje referencji w nawiasach.
20. W równaniu (1.1) brak grawitacji.

21. Podpis rysunku 3.6: „Snapshots taken at equal time intervals ...”. Przecież τ jest inne dla każdego koloru.

22. Literówki, drobne niedociągnięcia i sugestie:

- a. W pracy znajduje się pewna liczba literówek, jednak nie wykraczająca poza normy przyzwoitości.
- b. Streszczenie: „... jednocześnie przesuając się okresowo w kierunku równoległym do płaszczyzny symetrii.” Myślę, że należało podkreślić, iż chodzi o wewnętrzną płaszczyznę symetrii cząstek, w odróżnieniu od pionowej płaszczyzny symetrii całego układu. Na etapie początkowym takie stwierdzenie jest niezrozumiałe.
- c. Systematyczne pomijanie rodzajnika „a” w sformułowaniach typu „such a system”, „such a profile” itp.
- d. W języku angielskim określenie najlepiej odpowiadające polskiemu „przykładowy” to „selected”, a nie „exemplary”.
- e. Notorycznie używane są sformułowania typu: „what means, that” etc. W języku angielskim używa się tu słowa „which” zamiast „what”.
- f. Częste: „lay” zamiast „lie”.
- g. „gravitational force” można by zastąpić „net gravitational force”, by podkreślić udział siły wyporu.
- h. Pisanie współczynników i_j na górze przy macierzy mobilności jest odrobinę mylące, gdyż czytający spodziewa się indeksów kontrawariantnych (wówczas dolne byłyby kowariantne).
- i. Str. 56: „whose beads have positive ‘x’ coordinates”, zamiast “which”.

Stwierdziwszy powyższe, chcę podkreślić, iż choć uwag krytycznych jest sporo, żadna nie ma rangi fundamentalnej. Podczas obrony nie oczekuję odniesienia się do wszystkich moich uwag, które są w większości techniczne i traktuję je jako pewne sugestie dla doktoranta na przyszłość. Jednak zdecydowanie proszę o wyjaśnienie punktów 1, 2 oraz 10.

Całą pracę oceniam jednak wysoko. Doktorant przebadał różnorodne aspekty dynamiki sedymentacji podłużnych cząstek. Uważam, że przedstawiona analiza badanego zagadnienia jest naukowo dojrzała. Doktorant uzupełnił istotną lukę w dotychczasowej literaturze naukowej poświęconej badanym zagadnieniom, polegającą na zbadaniu ewolucji cząstek, które w początkowych konfiguracjach znajdują się w nie pokrywających się płaszczyznach ale przecinających się. Ponadto, doceniam fakt, iż w pracy udało się zidentyfikować parametr B' , który jest prostym przeskalowaniem standardowego parametru elastyczności B , jednak uwzględnia on rozmiar koralików, a przez to jest wyraźnie bardziej adekwatny do porównywania dynamiki różnych cząstek ze sobą. Na koniec należy jeszcze podkreślić, że wyniki doktoranta wyraźnie pokazują, iż często stosowany w zagadnieniach sedymentacji potencjał zginania zwany potencjałem Kratky-Porod posiada istotne mankamenty, gdyż może prowadzić do dużych rozbieżności z bardziej fizycznymi modelami.

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego i spełnia 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. Wnioskuje o dopuszczenie pana Marka Bukowieckiego do dalszego postępowania kwalifikacyjnego.



Krzysztof Mizerski