

Warszawa, dnia 1 sierpnia 2016

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

**Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr Marty Gruca pt.**

**„Motion of regular systems of many particles  
interacting hydrodynamically under gravity”**

Rozprawa doktorska pani mgr Marty Gruca, napisana pod opieką prof. Marii Ekiel-Jeżewskiej dotyczy grawitacyjnego opadania osiowo symetrycznych układów cząstek w lepkim płynie, w ramach przybliżenia dynamiki stokesowskiej, czyli dla układów o bardzo małej liczbie Reynoldsa, przy zaniedbaniu ruchów Browna cząstek zawiesiny. Problem sedymentacji cząstek zawiesiny pod wpływem grawitacji, w szczególności określenie tempa sedymentacji, tak jak zaznacza to doktorantka we wstępie do rozprawy, ma zastosowania w medycynie, w szczególności dla sedymentacji erytrocytów, w przemyśle przy opadaniu zanieczyszczeń, a także w biologii przy grawitacyjnym opadaniu grup mikroorganizmów. Doktorantka skupiła się przede wszystkim na odniesieniu dynamiki studiowanych układów do problemu sedymentacji kropli zawiesiny, rozlegle studiowanego w literaturze naukowej. Problem podjęty przez doktorantkę ma zatem istotne znaczenie poznawcze i jego rozwiązanie jest krokiem na drodze do zrozumienia wyżej wymienionych procesów fizyczno-biologicznych.

Pracę doktorską pani Marty Gruca oceniam bardzo wysoko pod względem naukowym. Wrażenie robi szczegółowość i dokładność przeprowadzonej analizy, która niewątpliwie była skomplikowana. Doktorantka z dużą wnikliwością przebadła liczne aspekty dynamiki opadania osiowo symetrycznych układów cząstek (o czym później) i w sposób zrozumiały opisała otrzymane wyniki. Jako najważniejsze wyniki pracy można wymienić wykazanie obecności orbit periodycznych w układach składających się z 4-ech pierścieni cząstek, przy użyciu opracowanego przez doktorantkę numerycznego algorytmu oraz nowego kryterium rozpadu klastrów cząstek, które to kryterium wyraźnie lepiej opisuje czas życia klastrów niż kryteria stosowane do tej pory w literaturze. Ponadto zbadany został wpływ zmian parametrów początkowych układu oraz przepuszczalności ośrodka na otrzymane rozwiązania periodyczne.

Pewne zastrzeżenia może budzić nie zawsze w pełni precyzyjny sposób opisu i prezentacji wyników. Postaram się wymienić wszystkie niedociągnięcia w poniższej liście:

1. Po pierwsze w pracy znajduje się pewna liczba prostych, technicznych błędów redakcyjnych (np. błędne odniesienia do rozdziałów itp.) oraz językowych. W szczególności doktorantka używała konstrukcji, jak w zacytowanym fragmencie ze streszczenia: „(...) identification and analysis of periodic motions of larger numbers of particles, *what* is a subject of this dissertation.”, gdzie zamiast słowa „*what*” powinno być użyte słowo „*which*”. Inne drobne potknięcia językowe też wystąpiły, należy jednak zaznaczyć, że nie nazbyt liczne.
2. Zdarzają się miejsca w pracy, gdzie ewidentnie braknie powołań na literaturę, które uzasadniałyby podawane przez autorkę wzory. Prawdopodobnie wynika to z tego, iż doktorantka uznała pewne wzory za oczywiste, jednak nie powinny być podane bez żadnego uzasadnienia ani nawet zacytowania prac, gdzie były one wyprowadzone. Przykładem mogą być tensory Greena zarówno dla układów o nieskończonej jak i skończonej przenikalności.
3. Oznaczenie  $\phi = \text{const}(t)$  użyte na stronie 13-ej, mające na celu zaznaczyć brak zależności zmiennej  $\phi$  od czasu jest niewątpliwie mylące.
4. Rysunek 3.5A – niewątpliwie zaznaczanie na osi ujemnych wartości zmiennej radialnej z układu współrzędnych cylindrycznych nie jest właściwą formą prezentacji. Należało raczej na osi poziomej zaznaczyć kąt azymutalny.
5. Choć nieliczne i czysto techniczne (tzn. ewidentnie tylko drukarskie) pojawiają się błędy w podanych wzorach. Np. we wzorze 4.2 promień cząstki powinien być w mianowniku, zaś we wzorze (4.8) brakuje wersora  $\hat{z}$  z lewej strony tensora Greena.
6. Rysunek 5.2 – nie została podana liczba cząstek.
7. Przez dłuższy czas od początku opisu dynamiki czterech pierścieni opcja rozpadu polegająca na rozejściu się wszystkich czterech pierścieni w ogóle nie jest nawet wspomniana. Choć potem okazuje się być bardzo rzadko występującą, przy objaśnianiu dynamiki lepiej byłoby wspomnieć o tej opcji od razu tam, gdzie rozważane są pozostałe.
8. Opracowane przez doktorantkę nowe kryterium separacji klastrów cząstek, chociaż wydaje się lepiej działać od standardowo stosowanych kryteriów w literaturze, również może zakwalifikować wciąż silnie oddziałujący hydrodynamicznie klaster jako taki, który uległ już rozpadowi. W szczególności z rysunku 6.4 nie wynika, że powyżej granicznego czasu  $t$  około 2700 klaster już nie istnieje, gdyż dla czasów większych od 5000 pierścienie mogłyby się zejść ponownie. Szkoda, że nie zostało w pracy powiedziane, jak ewolucja tego konkretnego układu wygląda dla  $t > 5000$ .
9. Strony 56 i 57 – nie rozumiem jak czas  $\tau + 1000$  może przekroczyć czas symulacji, a mimo to kryterium rozpadu klastra wciąż pozostać adekwatne. Jeśli dobrze zrozumiałem kryterium 6.5, to można je stosować tylko jeśli czas  $\tau + 1000$  jest osiągalny, inaczej nie ma ono zastosowania.
10. Rysunek 6.9 – nie jest jasne które fragmenty dużego rysunku zostały powiększone.
11. Kryterium rozpadu klastrów bazuje na poszukiwaniu oscylacyjnych ruchów pierścieni względem siebie, poprzez poszukiwanie miejsc zerowych funkcji odległości pierścieni. Tymczasem na stronie 60 napisane jest, że w przypadku czterech pierścieni możliwy jest brak oscylacji, przy jednoczesnym pozostawianiu pierścieni blisko siebie (stała odległość pierścieni). Jeśli tak, to daje to kolejną możliwość błędnej oceny momentu rozpadu klastra. Należy wprawdzie zaznaczyć w tym miejscu, iż możliwość ta jest raczej czysto teoretyczna i mało prawdopodobna jednak odniesienie się do niej byłoby mile widziane.

12. Ogólny opis metody DTW na stronach 64-65 jest niejasny. Pojawiające się słowo „matches” nie jest wyjaśnione. Jednak późniejszy opis metody porównania trajektorii stosowany przez doktorantkę jest już zrozumiały.
13. Strona 87 – „ (...) effective radii are similar to the radii of ‘drop’ of the fluid around clusters (...)”. Nie jest jasne skąd można wziąć promienie kropli wokół klastrów – można je tylko oszacować z rysunków, ale nie zostało to czytelnikowi wyjaśnione.
14. Appendix A2, rysunki 2 i 3 – domyślam się, że w czwartym rzędzie powinno być  $t=3T/16$ , a nie  $t=3T/8$ .
15. Appendix B – szkoda, że dla podanego, bardzo ciekawego rozwiązania okresowego z rysunku 10D nie zostały podane wartości  $R_2$  i  $R_4$ , ani nie została zbadana stabilność tego rozwiązania (czyli dynamika niesymetryczna).
16. Appendix C – nie zrozumiałem dlaczego w przypadku 2 pierścieni obserwacja ruchów periodycznych musi być prowadzona przez połowę okresu, a w przypadku 4-ech pierścieni wystarczy ćwiartka lub trzecia część okresu. Nie jest to wyjaśnione.

Stwierdziwszy powyższe, należy podkreślić, iż wszystkie wymienione uwagi mają charakter techniczny i w mojej ocenie stanowią drobne niedociągnięcia. Jedyna moja uwaga merytoryczna dotyczy samej metody cząstek punktowych, bardzo silnie redukującej oddziaływania hydrodynamiczne między cząstkami. Pytanie, które wydaje mi się zasadne, to czy znalezione rozwiązania periodyczne przetrwałyby (może z drobnymi modyfikacjami – jakimi?), gdyby uwzględnić pełne oddziaływania hydrodynamiczne? W pracy brakowało mi analizy do tego problemu, choćby na przykładzie jednego z podanych rozwiązań. Należy jednak stwierdzić, iż doktorantka nie pominęła zagadnienia pełnych oddziaływań hydrodynamicznych całościowo i rozdziały 2.3 i 2.4 poświęciła na uzasadnienie użycia metody cząstek punktowych i jej porównanie z pełną metodą multipolową. Uzasadnienie doktorantki w tej materii uważam za dobre i w dużej mierze satysfakcjonujące, ponadto artykuł pani promotor pracy doktorskiej, profesor Marii Ekiel-Jezewskiej (Phys. Rev. E **90**, 043007, 2014) cytowana przez doktorantkę w rozprawie przedstawia dalszą analizę porównawczą metody cząstek punktowych i dokładnej metody multipolowej w kontekście sedimentacji regularnych układów cząstek. Podane przez doktorantkę uzasadnienie pozwala zatem w pełni zrozumieć decyzję o użyciu bardzo szybkiej i efektywnej metody cząstek punktowych, choć oczywiście pozostawia pewien niedosyt.

Całą pracę oceniam jednak bardzo wysoko. Duża dociekliwość doktorantki pozwoliła na przebadanie bardzo wielu aspektów dynamiki sedimentacji układów osiowo symetrycznych. Doktorantka z dużą szczegółowością zbadała zależność ewolucji klastrów cząstek od początkowej geometrii układu i wykonała ogromną ilość symulacji numerycznych pozwalających na stworzenie bardzo ciekawych map dynamiki w zależności od warunków początkowych – rysunki 6.8 i 6.9. Mapy te zawierają wiele cennych informacji o charakterze ewolucji układu, w szczególności wyraźnie zaznaczają się na nich obszary dynamiki chaotycznej. Szczegółowa analiza ewolucji klastrów dotyczyła nie tylko promieni pierścieni cząstek, ale również ich wzajemnej odległości oraz całkowitej ilości cząstek w klastrze. Ponadto pani mgr Marta Gruca szczegółowo przeanalizowała wpływ przepuszczalności osrodka, w

którym zachodzi sedimentacja na czas życia klastrów oraz analizę stabilności otrzymanych rozwiązań zarówno w ośrodkach o nieskończonej jak i skończonej przepuszczalności. Opracowana metodyka porównywania trajektorii cząstek, której celem była jak najdokładniejsza identyfikacja rozwiązań periodycznych oraz opracowane, efektywne kryterium czasu życia klastrów istotnie podwyższają jakość naukową pracy.

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 pani mgr Marty Gruca do dalszego postępowania kwalifikacyjnego. Ponadto stawiam wniosek do Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pani mgr Marty Gruca.

Krzysztof Mizerski

