



Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
Instytut Fizyki Teoretycznej



Hoża 69, 00-681 Warszawa, tel.: (0-22)6283396, fax: (0-22)6219475, e-mail: iftuw@fuw.edu.pl

Warszawa, 8 kwietnia 2012

dr hab. Piotr Szymczak
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki UW

Recenzja pracy doktorskiej mgr Anny Myłyk pt. „Dynamika układów wielocząstkowych opadających grawitacyjnie w lepkim płynie”

Przedmiotem pracy mgr Anny Myłyk jest analiza dynamiki kropli zawiesiny opadającej w cieczy oraz występującej w tym problemie niestabilności kształtu kropli, która – początkowo kulista – spłaszcza się, rozszerza, po czym przekształca się w torus. Warto podkreślić, że zrozumienie własności układów cząstek zawieszonych w płynie jest ważne nie tylko ze względów czysto poznawczych, ale również praktycznych: poczynając od pozornie prostego problemu oszacowania prędkości opadania cząstek zawiesiny, poprzez zrozumienie sposobu, w jaki poruszają się mikroorganizmy w cieczy czy też opracowanie metod segregowania mikrocząstek za pomocą przepływu.

Jak wspomina Autorka we Wstępie rozprawy, problem opadającej kropli ma długą historię – badali go już Thomson i Newall w roku 1885. Zauważyli oni, że kropla atramentu opadająca w czystej wodzie jest niestabilna – przekształca się w torus, który z kolei dzieli się na mniejsze krople. Choć w ostatnich latach – wraz z dynamicznym rozwojem technik eksperymentalnych, zwłaszcza ultraszybkiej fotografii cyfrowej – stała się możliwa dokładna analiza eksperymentalna ewoluującego kształtu i własności fizycznych opadających kropli, to jednak pełne zrozumienie dynamiki sedymentujących kropli zawiesiny wciąż nie zostało osiągnięte. Problem ten nie jest prosty, zwłaszcza ze względu na obecność długozasięgowych, wielociałowych oddziaływań hydrodynamicznych w układzie: każda z opadających cząstek wytwarza w naczyniu przepływ, który oddziałuje na wszystkie pozostałe cząstki. Co więcej, ze względu na długozasięgowość oddziaływań hydrodynamicznych nie możemy zaniedbać wpływu ścianek naczynia na dynamikę kropli. Bliższej analizie tego właśnie efektu poświęcona jest niniejsza Rozprawa.

Już na początku zapoznawania się z Rozprawą uderza rozpiętość zaplanowanych i przeprowadzonych przez Autorkę badań. Mamy tu zarówno raport z eksperymentów przeprowadzonych samodzielnie oraz we współpracy z grupą prof. Guentera Brenna z politechniki w Grazu, jak i wyniki drobiazgowych symulacji numerycznych za pomocą kodu w MATLAB-ie napisanego przez Autorkę. Tego typu eksperymentalno-teoretyczne prace są niestety coraz rzadsze, tym większą zatem satysfakcją dla recenzenta stanowiło zapoznanie się z niniejszą rozprawą. Warto też dodać, że połączenie metod eksperymentalnych z numerycznymi pozwoliło mgr

Myłk na głębokie zrozumienie analizowanego układu, niemożliwe do uzyskania, gdyby Autorka ograniczyła się do tylko jednej z tych metod.

Podział rozprawy na kolejne części wynika bezpośrednio z przyjętego przez Autorkę planu badawczego omówionego wyżej. Po krótkim Wstępie następuje część doświadczalna, w której mgr Myłk opisuje skonstruowany przez siebie układ eksperymentalny oraz przedstawia wyniki dotyczące zależności czasu destabilizacji opadającej kropli oraz tzw. długości destabilizacji (czyli odległości, którą kropla przebywa w tym czasie) od odległości kropli od ścianki naczynia. Uzyskanie dokładnych, ilościowych wyników dotyczących dynamiki procesu destabilizacji było możliwe dzięki użyciu wyrafinowanego układu eksperymentalnego, z kamerą umieszczoną na ruchomej platformie pozwalającej na śledzenie ruchu kropli, a także użyciu specjalnego generatora kropli, który pozwalał na precyzyjną kontrolę rozmiaru powstających kropli. Wyniki eksperymentalne przedstawione w Rozprawie pokazują jednoznacznie, iż ściana działa destabilizująco na kroplę – zarówno czas, jak i długość destabilizacji zmniejszają się w miarę zbliżania się do ścianki.

Po części doświadczalnej następuje część teoretyczna, gdzie Autorka przedstawia model cząstek punktowych, którego użyła do symulacji kropli. Mgr Myłk przypomina tu tensory Greena dla pola prędkości i ciśnienia płynu wygenerowanego przez siłę punktową zarówno dla nieskończonej przestrzeni (tensor Oseena), jak i w obecności sztywnej ściany (tensor Blake'a). Właśnie ten ostatni posłużył Autorce do konstrukcji programu numerycznego (pracującego w środowisku MATLAB), który pozwala na śledzenie ewolucji N cząstek punktowych tworzących kroplę w obecności ściany. Wyniki teoretyczne prowadzą do podobnych wniosków co eksperyment – kropla destabilizuje się tym szybciej, im bliżej ścianki się znajduje.

Dokładniejszemu porównaniu wyników numerycznych i eksperymentalnych poświęcona jest kolejna, trzecia część Rozprawy. Eksperymentalnie mierzone czasy destabilizacji (przeskalowane przez charakterystyczny czas, jaki zajmuje kropli przebycie odległości równej jej promieniowi) okazują się bardzo bliskie rezultatom numerycznym. Długości destabilizacji zgadzają się trochę gorzej, na co – jak komentuje Autorka – może mieć wpływ odmienne tempo „gubienia” cząstek przez krople rzeczywiste i modelowe (co skutkuje różnymi wartościami ich prędkości opadania). Ogólnie jednak – w opinii recenzenta – zgodność przewidywań numerycznych z wynikami eksperymentalnymi jest zadowalająca, szczególnie gdy weźmiemy pod uwagę prostotę użytego modelu.

Kolejna, czwarta część Rozprawy poświęcona jest bardziej szczegółowej niż przeprowadzona w części drugiej analizie zachowania kropli w modelu cząstek punktowych. W szczególności, zbadany jest wpływ liczby cząstek składających się na kroplę na jej dynamikę, przeanalizowana jest ewolucja prędkości kropli w czasie (związana z nieustannym „gubieniem” przez nią cząstek) oraz zasygnalizowane jest zjawisko oddalania się kropli od ściany.

Ostatnia część rozprawy jest poświęcona podsumowaniu i wnioskowi. Pracę zamykają trzy Dodatki oraz spis literatury liczący 55 pozycji. Dodatki zawierają szczegóły działania generatora kropli użytego w eksperymentach (Dodatek A), szczegóły dotyczące analizy statystycznej wyników pomiarów (Dodatek B) oraz opis struktury programu numerycznego (Dodatek C). Choć mają one charakter techniczny, są bardzo istotne dla każdego, kto chciałby wyniki uzyskane w Rozprawie powtórzyć.

Układ pracy jest logiczny i przejrzysty; pod względem językowym jest ona napisana starannie. Autorka szczegółowo i przekonująco dokumentuje swoje tezy, uzasadniając je danymi doświadczalnymi i numerycznymi, które opracowane są w bardzo dokładny, rzetelny sposób.

Generalnie opiniowana Rozprawa zyskuje zdecydowanie pozytywną ocenę recenzenta. Poniżej chciałbym jednak zwrócić uwagę Autorki na kilka punktów dyskusyjnych, które – w opinii recenzenta – wymagają przemyślenia:

– Operacja obliczania funkcji wykładniczej ze średniego logarytmu T używana przez Autorkę to nic innego jak obliczanie średniej geometrycznej, $\langle T \rangle_{geom} = \sqrt[N]{T_1 T_2 \dots T_N}$. Wydaje się jednak, że średnia geometryczna (podobnie jak arytmetyczna) nie jest dobrą miarą rozkładu czasów destabilizacji kropli, ze względu na to, że nie wszystkie krople ulegają destabilizacji w trakcie eksperymentu czy symulacji. Jeśli uwzględnimy przy liczeniu średniej tylko te krople, które uległy destabilizacji, to wartość $\langle T \rangle$ będzie zależała od całkowitego czasu eksperymentu (T_{eksp}). W takich przypadkach zwykle lepiej liczyć nie średnią, ale medianę rozkładu, uwzględniając w niej również trajektorie, które nie zakończyły się destabilizacją. Mediana ta – o ile czas eksperymentu jest na tyle długi, że więcej niż połowa kropli ulega rozpadowi – jest wielkością niezależną od T_{eksp} i jako taka lepiej charakteryzuje całkowity rozkład czasów destabilizacji.

- Zastanawia użyta przez Autorkę procedura „odcinania” ogona kropli – tj. nieuwzględniania przy całkowaniu równań ruchu cząstek, które znajdują się dalej niż pewna ustalona odległość od środka kropli. Wydaje się, że jest to procedura w dużej mierze arbitralna; co więcej – ze względu na długozasięgowy charakter oddziaływań hydrodynamicznych – odcinanie może wpłynąć na zmianę trajektorii kropli. Jedyną zaletą „odcinania” jest, jak się wydaje, możliwość zmniejszenia czasu obliczenia pojedynczego kroku dynamiki układu, ze względu jednak na ogólnie niską złożoność obliczeniową algorytmu dla cząstek punktowych, recenzentowi nie wydaje się to dostatecznie ważkim argumentem dla uzasadnienia tego postępowania.

– Jeśli to możliwe, warto byłoby przeprowadzić analizę zależności prędkości kropli od czasu w przypadku eksperymentalnym. Być może dokładność eksperymentalna nie pozwala na precyzyjne wyznaczenie $v(t)$, gdyby tak jednak nie było to – w opinii recenzenta – warto porównać pod tym względem wyniki doświadczalne i teoretyczne. Być może pozwoliłoby to na zrozumienie, skąd biorą się różnice w obserwowanych długościach destabilizacji oraz jak przebiega proces „gubienia” kropli w obu przypadkach.

– Wyraźne różnice pomiędzy rozkładem czasów destabilizacji dla cząstek punktowych a rozkładem doświadczalnym (Rys. 6.2) każą zadać sobie pytanie, jak rozkład taki wyglądałby dla cząstek o skończonych rozmiarach? Czy byłby on bliższy rozkładowi doświadczalnemu? Interesujące wydawałoby się też dokładniejsze zbadanie kształtu rozkładu czasów destabilizacji – czy jest on wykładniczy, czy też posiada potęgowy „ogon” związany być może ze specyficzną grupą warunków początkowych, które są w stanie długofalowo ustabilizować cząstkę?

– Zbyt mocne wydaje się stwierdzenie Autorki (na str. 93), że model cząstek punktowych był przedtem stosowany jedynie dla nieograniczonego płynu. Przykładów zastosowań modelu cząstek punktowych w obecności ścianki (z wykorzystaniem tensora Blake’a) jest w literaturze sporo, z prac które ukazały się w ostatnich latach wymienić można np. Zhang et al, J. Chem. Phys. 130, 234902 (2009); Sing et al PNAS 107 535-40 (2010) czy Gauger et al Eur. Phys. J. E 28, 231–242 (2009).

Wyżej przedstawione komentarze i uwagi nie mają wpływu na bardzo dobrą ocenę merytoryczną recenzowanej Rozprawy. Autorka przedstawiła szeroki i skrupulatnie opracowany materiał, łącząc wyniki eksperymentalne z numerycznymi i dobitnie pokazując, iż dobrze radzi sobie z tymi dwiema, tak przecież różnymi metodami pracy naukowej. Pozytywną ocenę Recenzenta wzmacnia dodatkowo fakt, że najważniejsze wyniki Rozprawy zostały opublikowane w dwóch artykułach w bardzo dobrych czasopismach naukowych.

Podsumowując, praca mgr Myłyk stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia w pełni wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie mgr Anny Myłyk do dalszych etapów przewodu doktorskiego.