

Dr hab. Zbigniew Walenta
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

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

Praca doktorska p. mgr Anny Myłyk poświęcona jest eksperymentalnym i teoretycznym badaniom zachowania się układu wielu cząstek poruszających się w lepkiej cieczy pod wpływem sił grawitacyjnych. Cząstki, o gęstości większej niż ciecz w której są zawieszone, zajmują w chwili początkowej obszar o kształcie bliskim sferycznemu. Układ cząstek (zwany przez Autorkę „kroplą”) przemieszcza się pod wpływem siły ciężkości nie tracąc początkowo sferycznego kształtu, z tym że zostaje za nim „ogon” z cząstek wolniej się poruszających. Po pewnym czasie kształt „kropli” ze sfery zmienia się w dysk, następnie w torus, wreszcie torus rozrywa się i rozpada na mniejsze części. Przedmiotem pracy było badanie czy i jak sąsiedztwo ścianki wpływa na opisany proces rozpadu układu cząstek. Zagadnienie tak sformułowane dotychczas badane jeszcze nie było. Jak stwierdza Autorka, zagadnienie to oprócz walorów poznawczych posiada duże znaczenie praktyczne: w medycynie (ruch krwinek, transport leków wdychanych przez drogi oddechowe), technologii produkcji żywności, filtracji i w szeregu innych dziedzin.

Praca składa się ze wstępu, pięciu części o tytułach:

- I. Część doświadczalna,
- II. Opis teoretyczny i najważniejsze wyniki,
- III. Porównanie teorii i eksperymentu,
- IV. Szczegółowa analiza ewolucji kropli zawiesiny,
- V. Wnioski końcowe,

oraz trzech dodatków i spisu literatury obejmującego w sumie 55 pozycji. Całkowita objętość pracy wynosi 111 stron.

Wstęp do pracy rozpoczyna się od określenia skal czasowych związanych, w szczególności, z makroskopowym ruchem płynu, bezwładnością cząstek zawieszonych w płynie, ściśliwością płynu, jego lepkością. Dalej zdefiniowano bezwymiarowe liczby podobieństwa: Macha, Reynoldsa, Pecleta. Podano zakresy wartości skal czasowych i liczb podobieństwa, dla których przeprowadzone zostały badania. Sformułowano równania Stokesa, będące podstawowym narzędziem do opisu badanych zjawisk. Bardzo skrótowo omówiono szereg wcześniejszych prac dotyczących ewolucji i rozpadu kropli zawiesiny w lepkiej cieczy. Wszystko to potraktowano bardzo lakonicznie, co mogło wynikać z chęci ograniczenia objętości pracy.

„Część doświadczalna” pracy zawiera opis dwóch eksperymentów przeprowadzonych przez Autorkę. Pierwszy z nich, wykonany w laboratorium Zakładu Mechaniki i Fizyki Płynów IPPT PAN miał udzielić odpowiedzi na pytanie: „czy pionowa ściana wpływa na destabilizację kropli zawiesiny opadającej grawitacyjnie w lepkiem płynie”. Polegał on na obserwacji zachowania się kropli zawiesiny spuszcanych znad powierzchni swobodnej cieczy (gliceryny o gęstości $\rho = 1.25 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$), wypełniającej zbiornik o wymiarach: 20 cm (długość) x 20 cm (szerokość) x 40 cm (wysokość). Zawiesina składała się z kulek szklanych o promieniach $a = 44 \div 68 \text{ }\mu\text{m}$ i gęstości $\rho_p = 2.50 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ w glicerynie,

takiej jak wypełniająca zbiornik. Zawiesinę przygotowywano w osobnym pojemniku, z którego przy pomocy igły pobierano niewielkie jej ilości i spuszczano do zbiornika z gliceryną uzyskując krople o średnicy $1 \div 2$ mm.

9 kropeł w odstępach co 2 cm spuszczano:

- 1 – w płaszczyźnie przechodzącej przez środek zbiornika,
- 2 – w płaszczyźnie odległej od jednej ze ścian o 1 cm,
- 3 – w płaszczyźnie umieszczonej w połowie odległości między ścianą i szklaną płytą odległą od niej o 2 cm. Obserwowano kiedy i w którym miejscu kropla rozrywa się.

Ze względu na losowy charakter zjawiska eksperyment powtarzano wielokrotnie. Stwierdzono, że wartości średnie długości destabilizacji (drogi, którą kropla przebywa do momentu rozerwania się) w istotny sposób zależą od odległości od ścianki – blisko ścianki długości destabilizacji są mniejsze, przy czym zauważone różnice znacznie przekraczają niepewność pomiarową.

Uzyskawszy pozytywny wynik pierwszego „pilotowego” eksperymentu Autorka wykonała drugi, mający na celu bardziej dokładne, ilościowe określenie zależności długości destabilizacji kropli od odległości od ścianki. Eksperyment przeprowadzono w laboratorium Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer, University of Technology, Graz. Układ pomiarowy był podobny do użytego w poprzednim eksperymencie, z tym że wprowadzono zmiany zwiększające dokładność wyników. W szczególności:

- zastosowano generator kropeł umożliwiający tworzenie kropeł o wymiarach powtarzalnych
- zastosowano kamerę, pozwalającą na rejestrację położenia, wielkości i kształtów kropeł w trakcie ich ruchu
- zwiększono wysokość zbiornika do 100 cm, co umożliwiło obserwację wszystkich kropeł aż do ich rozpadu
- pomiary wykonywano dla pojedynczych kropeł, w pobliżu jednej ścianki zbiornika, z dala od pozostałych, dzięki czemu uniknięto zaburzeń od tych ścianek i dodatkowych kropeł.

Wynikiem eksperymentu są wykresy zależności średniej długości destabilizacji (Rys. 2.10) i średniego czasu destabilizacji (Rys. 2.11) od odległości od ścianki, co będzie dalej porównywane z wynikami obliczeń numerycznych. W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę na pomyłkę w podpisie pod Rysunkiem 2.11: średni czas destabilizacji jest normowany przez jednostkę czasu $\tau = D/2v$ a nie przez początkową średnią średnicę kropeł.

W części drugiej pracy „Opis teoretyczny i najważniejsze wyniki” omówiono metodę rozwiązywania równania Stokesa dla układu wielu cząstek tworzących kroplę zawiesiny. Autorka korzysta ze sformułowania równania Stokesa podanego we Wstępie ((15) na str. 16). Przepisuje je na str. 51 (równ. (3.1)) pomijając zależność szukanych zmiennych od czasu. Sugeruje to, że rozpatrywany jest przypadek stacjonarny albo przynajmniej quasi-stacjonarny. W tekście brakuje jednak jakiegokolwiek wzmianki na ten temat, co uważam za istotną usterkę.

W pracy zastosowany został model „cząstek punktowych” – cząstki o skończonych wymiarach zastąpiono punktami, na które działają siły, równe siłom grawitacji działającym na cząstki rzeczywiste (powinno się sprecyzować, że chodzi tu o różnice sił ciężkości i wyporu). Model ten jest często stosowany przy rozwiązywaniu podobnych zagadnień.

Dla uwzględnienia sąsiedztwa ścianki zastosowano metodę obrazów. Cząstka w pobliżu ścianki ma swój obraz po jej drugiej stronie, dzięki czemu zagadnienie sprowadza się do

przypadku dwóch cząstek w obszarze nieskończonym. Warunek zerowania prędkości na ściance jest spełniony automatycznie dzięki przyjęciu, że na cząstki działają siły i odpowiednio dobrane multipole sił.

Dla sprawdzenia poprawności użycia modelu cząstek punktowych do rozpatrywanego zagadnienia porównano ze sobą obliczone prędkości pojedynczej cząstki o skończonych wymiarach i cząstki opisanej modelem punktowym w funkcji odległości od ścianki. Przy odległości środka cząstki od ścianki nie mniejszej niż zaledwie 0.66 średnicy cząstki różnica między prędkościami nie przekraczała 1% wartości. Pozwalało to mieć zaufanie do modelu.

Do symulacji zachowania się kropli zawiesiny w oparciu o równanie Stokesa, z wykorzystaniem modelu cząstek punktowych napisany został autorski program w środowisku MATLAB. Program ten został opisany w Dodatku C. Przy jego pomocy wykonano szereg symulacji przyjmując, że w chwili początkowej kropla ma kształt kulisty i wypełniona jest równomiernie cząstkami punktowymi rozrzuconymi losowo. Wyniki tych symulacji zostały szczegółowo omówione, oraz porównane z eksperymentem w części trzeciej i czwartej recenzowanej pracy.

Najważniejsze wnioski da się streścić następująco:

- Uzyskane wyniki numeryczne są jakościowo zgodne z wynikami wykonanych eksperymentów. Niezgodności ilościowe mogą wynikać z niedoskonałości użytego modelu cząstek punktowych
- Pokazane zostało, że jeżeli droga przebywana przez kroplę odniesiona jest do jej długości destabilizacji, to obraz procesu rozpadu kropli wygląda zawsze praktycznie tak samo, niezależnie od tego czy pochodzi z eksperymentu, czy z symulacji
- Długość destabilizacji kropli i czas destabilizacji maleją wraz ze zbliżaniem się do ścianki, z tym że istotne zmiany zachodzą przy odległościach poniżej 5 średnic kropli. Pokazana została liniowa zależność średniej długości destabilizacji od odwrotności odległości od ścianki dla odległości porównywalnych i większych od średnicy kropli.

Oprócz uwag krytycznych, które zamieściłem w tekście recenzji, chciałbym zwrócić uwagę na jeszcze jeden mankament niniejszej pracy: była ona przypuszczalnie pisana w pośpiechu, czego wynikiem jest spora liczba błędów typu redakcyjnego, które miejscami utrudniają czytanie. Informacje o nich przekażę Autorce bezpośrednio.

Sformułowane przeze mnie uwagi nie umniejszają wartości pracy. Traktuję je jako pomoc dla Autorki, mającą ułatwić ewentualne przygotowanie tekstu do druku. Pragnę natomiast podkreślić, że pracę oceniam wysoko, biorąc pod uwagę fakt że dotyczyła ona zagadnienia nowego, nie badanego jeszcze przez innych autorów, oraz to, że zagadnienie to zostało zbadane eksperymentalnie i teoretycznie.

Uważam, że praca w pełni odpowiada warunkom określonym w Art. 11 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Zbigniew Walenta