

TOMASZ KILJAŃSKI
ADAM MICHAJŁOWSKI

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Kształty pęcherzy gazowych w substancjach plastycznolepkich podczas ruchu w polu sił odśrodkowych

Wprowadzenie

W wielu procesach przemysłowych pęcherze gazowe rozproszone w cieczy są niezbędne i w takim wypadku dąży się do jak największego ich rozdrobnienia w celu intensyfikacji zjawisk dyfuzyjnych. Często jednak dostają się one do cieczy, w której są niepotrzebne, a nawet szkodliwe. Jeśli ciecz ma wysoką lepkość, ich oddzielanie może stwarzać istotne problemy. Szczególnie trudne jest usunięcie pęcherzy z substancji plastycznolepkich, czyli ulegających przepływowi dopiero pod wpływem naprężeń większych od pewnej wartości granicznej, tzw. granicy płynięcia. Przy naprężeniach mniejszych zachowują się jak ciało stałe, ulegające tylko odkształceniu sprężystemu.

Na skutek działania napięcia powierzchniowego pęcherz, na który nie działają żadne zewnętrzne siły, przybiera kształt kuli. W płynach newtonowskich taki kształt utrzymuje się podczas ruchu pęcherza w dosyć szerokim zakresie liczby *Reynoldsa*. W płynach nienewtonowskich pęcherze mogą przyjmować kształty niekuliste już w zakresie ruchu pełzającego. Jest to spowodowane występowaniem różnych lepkości w otoczeniu poruszającego się pęcherza i pojawianiem się naprężeń normalnych, związanych ze sprężystolepkością płynu. W płynach rozrzedzanych ścinaniem zaobserwowano lekkie wydłużenie pęcherza w zakresie małych wartości liczby *Reynoldsa* [1], a w płynach wykazujących własności sprężystolepkie tylna część pęcherza wydłuża się i przyjmuje kształt szpiczastego „ogonka” [2].

Zagadnienie kształtu pęcherzy poruszających się w substancjach plastycznolepkich jest słabo poznane, dotyczy ono przypadków w których zastosowane media posiadały wystarczająco niską granicę płynięcia, a rozmiary pęcherzy są na tyle duże, że umożliwiają ich ruch pod wpływem siły ciężkości. W takich warunkach stwierdzono [3], że pęcherze przyjmują formę bryły obrotowej o kształcie odwróconej kropli. W przypadku niespełnienia powyższych warunków ruch grawitacyjny nie jest w ogóle możliwy, a nieruchome pęcherze mogą przyjmować kształty zupełnie nieregularne.

Aby spowodować ruch pęcherza i jego usunięcie, można posłużyć się wirówką, co jest o tyle korzystne, że można płynnie zmieniać jej szybkość obrotową, a więc i siłę masową działającą na medium. Podczas badań z użyciem wirówki autorzy [4] stwierdzili, że podczas stopniowego zwiększania szybkości obrotowej wirówki pęcherze mające w stanie bezruchu kształt nieregularny jeszcze przed rozpoczęciem ruchu całego pęcherza wydłużają się najpierw w przedniej części,

przybierają formę bryły obrotowej o kształcie odwróconej kropli i dopiero wtedy rozpoczyna się ich przepływ w kierunku osi wirówki. Po zakończeniu ruchu pęcherza, gdy siła odśrodkowa działająca na płyn zmalała wskutek przesunięcia pęcherza bliżej osi obrotów, stwierdzono kształt bardzo zbliżony do elipsoidy obrotowej z nieznaczną tylko różnicą kształtu przodu i tyłu pęcherza [5]. Zbadanie kształtów pęcherzy w trakcie ich ruchu przez substancję plastycznolepką jest celem tej pracy.

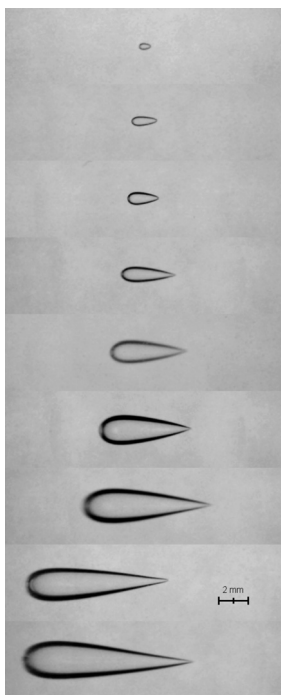
Użycie wirówki do badań kształtów przepływających pęcherzy powoduje istotne problemy z rejestracją obrazu. Już przy szybkości obrotowej 1000 obr/min obiekt odległy o 0,1 m od osi wirówki porusza się z prędkością ponad 10 m/s. Przy pęcherzu o średnicy 2 mm, chcąc uzyskać obraz o dostatecznej ostrości, należałoby stosować czas ekspozycji nie dłuższy niż $5 \cdot 10^{-6}$ sekundy. Zastosowanie w tym przypadku tak szybkiej kamery jest bardzo kłopotliwe, a wręcz niemożliwe ze względu na ograniczenia technologiczne współczesnych kamer. Można jednak ominąć ten problem umieszczając kamerę na rotorze wirówki.

Część eksperymentalna

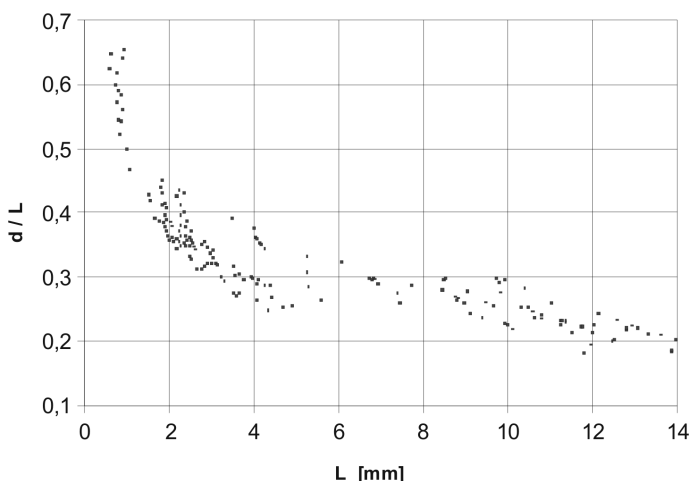
W celu rejestracji obrazu wewnątrz szybko obracającej się wirówki, zainstalowano na rotorze wirówki bezpośrednio nad kuwetą z płynem miniaturową kamerę z sensorem CMOS o rozdzielczości VGA (640×460) i szybkości 30 kl./s. Sygnał do komputera przesyłany był poprzez komutator i szczotki. Prędkość wirówki w czasie pracy można było płynnie regulować za pomocą falownika. Jako medium doświadczalne zastosowano posiadający plastycznolepkie własności wodny roztwór *Carbopolu* o granicy płynięcia $\tau_y = 74$ Pa. Długość obserwowanych pęcherzy zawarte były w granicach od 0,3 do 14 mm, a prędkość ich ruchu sięgała 90 mm/s. Na precyzyjną rejestrację pęcherzy poruszających się z większą prędkością nie pozwalał zbyt długi czas ekspozycji zastosowanej kamery. Powodował on rozmazanie obrazu i niemożność dokładnego zwymiarowania pęcherza.

Analiza zarejestrowanych obrazów

Na załączonej serii zdjęć (Rys. 1) przedstawiono przykładowe, zarejestrowane w czasie odwirowywania, obrazy kształtów pęcherzy o różnych rozmiarach, uformowanych już do postaci brył obrotowych, poruszających się w substancji plastycznolepkiej. Widać na nich, że płynące pęcherze przyjmują kształt „leżki”, a w miarę wzrostu objętości stosunek ich śred-



Rys. 1. Kształt pęcherza w roztworze *Carbopolu* w zależności od jego długości



Rys. 2. Kształt pęcherza w roztworze *Carbopolu* wyrażony stosunkiem jego średnicy do długości w zależności od jego długości

nicy do długości maleje. Zależność ta została przedstawiona na wykresie (Rys. 2). Dokładniejsza analiza kształtów wykazuje również, że wraz ze wzrostem objętości tylna część pęcherza ma wyraźną tendencję do zaostrzania się, co jest charakterystyczne również dla płynów sprężystolepkich.

Wpływ na zjawisko zaostrzania się końcówki pęcherza ma również prędkość jego ruchu – im większa prędkość tym tył pęcherza jest bardziej szpiczasty. Również w sytuacji wzrostu prędkości obrotowej wirówki podczas ruchu pęcherza i związanego z tym wzrostu prędkości jego ruchu, końcówka pęcherza przyjmuje chwilowo kształt bardziej zaostrzony, po czym znów ulega skróceniu. Bardzo wydłużone kształty stwierdzono wcześniej również po zatrzymaniu pęcherza w wirówce, gdy przesunął się on tak blisko do osi obrotów, że siła odśrodkowa spadła poniżej minimum potrzebnego do utrzymania go w ruchu [4]. W takich nieruchomych pęcherzach kształt przodu i tyłu był jednak bardzo podobny, bez ostrego zwężenia tylnej części, występującego tylko w czasie ruchu. Kształt pęcherzy z wyraźnie zaostrzonym tyłem, jest bardzo podobny do kształtu pęcherza tworzącego się ze strumienia gazu wpływającego przez otwór w dnie naczynia do substancji plastycznolepkiej, zanim pęcherz oderwał się od otworu [6].

Stwierdzony bardzo wydłużony kształt pęcherza podczas przepływu wywołany jest najprawdopodobniej własnościami plastycznolepkimi, gdyż w płynach bez granicy płynięcia tak znaczne wydłużenie nie następuje. Podczas ruchu w takiej substancji pęcherz nie porusza się w nieograniczonej cieczy, jak w przypadku cieczy bez granicy płynięcia, lecz w strefie upłynnionej o wymiarach porównywalnych z pęcherzem. Ta strefa podczas ruchu pęcherza rozciąga się wzdłuż jego toru, tworząc swego rodzaju przesuwający się cylindryczny kanał. Jego istnienie ogranicza rozmiar poprzeczny pęcherza podobnie, jak ścianki rury wypełnionej cieczą powodują zwężenie i wydłużenie przesuwającego się w niej dużego pęcherza.

LITERATURA

1. R. Fararoui, R.C. Kintner: *Trans. Soc. Rheol.*, 369 (1961).
2. D. Rodrigue, D. De Kee: *Rheol. Acta*, 38, 177 (1999).
3. N. Dubash, I.A. Frigaard: *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 142 (2007).
4. T. Kiljański, A. Michajłowski: *Inż. Ap. Chem.*, 47, nr 6, 36 (2008).
5. T. Kiljański: „Ruch pęcherzy gazowych w płynach o wysokiej lepkości w polu sił odśrodkowych”, *Politechnika Łódzka, Rozprawy naukowe*, z. 345 (2006).
6. K. Terasaka, H. Tsuge: *Chem. Eng. Sci.* 56, 3237 (2001).