Wybrane przepływy ze swobodną powierzchnią - strugi i krople

Tomasz A. Kowalewski

IPPT PAN

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Wybrane przepływy ze swobodną powierzchnią - strugi i krople

Tomasz A. Kowalewski

Praca habilitacyjna
Ośrodek Mechaniki
IPPT PAN
Warszawa, 20 grudnia 1997

Tomasz A. Kowalewski
Ośrodek Mechaniki

Wybrane przepływy ze swobodną powierzchnią - strugi i krople

Streszczenie

Podstawowym celem badań opisanych w niniejszej pracy jest stworzenie bezdotykowej metody diagnostyki parametrów fizycznych swobodnej powierzchni cieczy przy wykorzystaniu analizy drgań kropli. W szczególności chodzi o pomiar temperatury parującej powierzchni. Realizacja tego celu doprowadziła do powstania nowych technik eksperymentalnych pozwalających na rejestrację szybkich procesów przy zastosowaniu techniki video i cyfrowego zapisu obrazów.
Badania eksperymentalne procesu tworzenia się kropli w wyniku kontrolowanego rozpadu strugi wskazały na istnienie dodatkowej fazy tego procesu, polegającej na tworzeniu się mikro-strugi i mikro-satelitów o wymiarach rzędu mikrometrów. Porównanie rezultatów pomiarów z asymptotycznym modelem Eggersa [23] potwierdziło podstawowe założenie modelu o lokalności ostatniej fazy rozpadu strugi, wskazując jednocześnie na istnienie szeregu rozbieżności świadczących o ograniczeniach tego przybliżenia.
W dalszej części pracy przedstawiono rezultaty obserwacji niestabilności strug cieczy, spowodowanych jej parowaniem. W podjętej próbie analizy mechanizmów inicjujących zaburzenia parującej powierzchni wyodrębniono gradienty napięcia powierzchniowego jako istotny czynnik destabilizacji strug o małej średnicy. Wskazano też na występowanie szeregu nowych zjawisk w procesie destabilizacji strugi jak: odrywanie się fragmentów powierzchni, ich stabilizację strumieniem pary i quasi-stabilną zmianę toru strugi.
Opracowano również eksperymentalną metodę pozwalającą na rejestrację i precyzyjny opis deformacji kropel. Przeprowadzone pomiary oscylacji małych kropel znajdujących się w powietrzu doprowadziły do powstania pełnego, nieliniowego modelu drgań lepkiej kropli oraz umożliwiły weryfikację modeli uproszczonych. Przedstawiono przykłady demonstrujące możliwości wykorzystania metody oscylującej kropli do badań własności fizycznych cieczy oraz wyznaczania temperatury i składu powierzchni parujących kropel.

Selected free surface flow problems - liquid jets and droplets

Abstract

The study is motivated by the desire to develop a non-intrusive method of diagnostic of liquid surface parameters. Particularly, the possibility of measuring temperature of an evaporating surface is of interest. An idea of the method is based on the measurement of instantaneous values of surface tension from an analysis of droplet oscillations.
Several novel experimental techniques, making use of special features of the CCD video camera, have been developed to apply for high-speed recording of liquid jets and droplets. Experimental investigations of the jet breakup have been performed. They gave evidence of creation of a thin, about one micrometer in diameter, liquid neck between the main jet and the droplet. This micro-jet finally breaks up into several micro-satellites and the droplet is separated from the jet. The observations have been compared with the similarity solution given recently by Eggers [23]. The experiment justified the model assumptions about the local character of the last stage of the jet breakup. However, several differences which appeared, indicated also the limitations of this approximation.
In the second part, the instabilities of a small diameter evaporating jet have been experimentally studied. The results pointed out to several new forms of instabilities: evaporation induced waveness of the surface, film-like quasi-stable structures which peel off from the jet, and bending of the jet. Analysis of the possible agents initiating the instabilities indicated the gradient of the surface tension as the main factor.
An experimental method has been developed for recording and accurate description of droplet deformations. The experiments on droplet oscillations allowed to develop and validate a new theoretical model, which takes into account the full nonlinear behaviour of the viscous drop. Both the experimental and numerical results indicate that the nonlinear effects are always present in the dynamics of the droplet. In classifying the different regimes of oscillations in terms of the Reynolds number these nonlinearites were followed in the full range of parameters from underdamped droplet oscillations to an aperiodic decay of its initial deformation. The experimental and numerical parametric study validated the development of simple "practical" models of droplet dynamics, which at higher range of the Reynolds numbers offer adequate description of the experimental data. Examples are given to demonstrate applicability of the oscillating droplet method to measure physical parameters of the liquid surface, and temperature or composition of the surface of an evaporating droplet.

Wprowadzenie

Praca przedstawia rezultaty cyklu badań eksperymentalnych dotyczących przepływów ze swobodną powierzchnią. Badania te prowadzono w związku z opracowywaniem bezdotykowej metody diagnostyki powierzchni parującej cieczy. Rozwiązanie tego problemu wymaga opracowania i weryfikacji eksperymentalnej modeli teoretycznych, opisujących zachowanie się swobodnej powierzchni cieczy. Trudności opisu teoretycznego przepływu w obecności swobodnej powierzchni spowodowane są koniecznością rozwiązania zagadnienia, w którym obok pola przepływu, niewiadomą jest również granica obszaru, na której zdefiniowane są warunki brzegowe. Matematycznie oznacza to problem z warunkiem początkowym i ruchomą granicą. Jego rozwiązywanie jest interesujące samo w sobie i doprowadziło do utworzenia szeregu grup roboczych i towarzystw naukowych specjalizujących się w problematyce swobodnej powierzchni[1].

Złożoność problemu znalezienia rozwiązania dla pola przepływu ze swobodną powierzchnią związana jest między innymi z powstaniem, obok wystarczająco już komplikujących sprawę nieliniowości równań Naviera-Stokesa, dodatkowych sprzężeń ruchomych warunków brzegowych z poszukiwanym polem przepływu. Powoduje to, że poza trywialnymi przypadkami, układ równań opisujących ruch zachowuje nadal swój nieliniowy charakter w granicy dużych lepkości ($Re \to 0$).

Trudności, zarówno matematyczne jak i numeryczne, modelowania problemu powodują, że poszukuje się na ogół rozwiązań dla zagadnień uproszczonych lub dla przypadków asymptotycznych. Rzadko jednak jest to procedura pozwalająca wyjść poza jakościowy opis zjawiska fizycznego. Jednym z często stosowanych uproszczeń jest na przykład założenie, że amplituda ruchu powierzchni jest mała i może być zaniedbana przy definiowaniu warunków brzegowych. Tego typu ograniczenia, jak też często spotykane zaniedbywanie lepkości ośrodka, pozwalają wprawdzie uprościć równania ruchu i zredukować liczbę warunków brzegowych, ale problem przestaje opisywać rzeczywisty ruch cieczy. Ocena błędu rozwiązania popełnianego w wyniku przyjęcia takich założeń nie jest sprawą prostą.

Zagadnienia przepływów ze swobodną powierzchnią obejmują bardzo szeroką tematykę. Klasycznym przykładem jest szeroka gama problemów związana z przepływami dwufazowymi, w których występuje granica rozdziału faz typu ciecz-ciecz lub ciecz-gaz. Szczególny przypadek takiego przepływu to mechanika pojedynczej kropli - skończonej objętości płynu ograniczonej całkowicie powierzchnią swobodną. Przy braku oddziaływania dynamicznego powierzchni granicznej z zewnętrznym ośrodkiem (np. kropla w próżni lub gazie) powstaje całkowicie wyizolowany układ, dla którego na ogół bez

[1] Jedna z takich grup wydaje periodyk Free Boundary Problems.

uciekania się do dodatkowych założeń potrafimy dobrze zdefiniować układ równań ruchu oraz warunki brzegowe. Jest to interesujące wyzwanie dla mechaniki przepływów, tym bardziej, że problem ten przez analogię znajduje zastosowanie w wielu całkiem odległych zagadnieniach jak astrofizyka czy fizyka jądrowa (kroplowy model jądra atomowego).
Obok klasycznych już problemów przepływów z granicą ciecz-gaz i ciecz-ciecz w ostatnich latach szczególnego znaczenia nabiera tematyka przepływów o swobodnej granicy związanej ze zmianą stanu ciekłego na stały, poprzez powstanie frontu solidyfikacji lub krystalizacji na granicy przepływu.
W niniejszej pracy ograniczymy się jednak do jednej tylko klasy przepływów ze swobodną powierzchnią, obejmującej problematykę granicy ciecz-gaz. Są to zagadnienia dotyczące zachowania się strug i kropel w ośrodku gazowym, którymi autor zajmował się w ciągu ostatnich lat, podczas swojego pobytu w Instytucie Max-Plancka w Getyndze. Problematyka którą omówimy, została podzielona na trzy grupy, a mianowicie: tworzenie się kropli w wyniku niestabilności kapilarnej strugi, niestabilność strugi wywołana jej parowaniem oraz drgania kropli cieczy w powietrzu. Te pozornie nie powiązane zagadnienia łączy jednak podstawowa idea, którą kierowano się od początku realizacji badań - wykorzystanie oscylacji kropli dla stworzenia metody umożliwiającej niezakłócającą kontrolę warunków, panujących na powierzchni parującej cieczy. W szczególności chodzi o tak istotny dla wszystkich modeli parowania parametr, jakim jest temperatura powierzchni - wielkość praktycznie niemierzalna klasycznymi metodami.

Pracę rozpoczyna krótki opis opracowanych przez autora nowych metod pomiarowych. Ograniczenie się w badaniach do obserwacji mikroskopowych oraz konieczność aktywnego sterowania eksperymentem wymagały rezygnacji z tradycyjnej fotografii na rzecz techniki cyfrowej rejestracji obrazów. Wobec konieczności rejestracji szybkich procesów opracowano trzy nowe techniki oparte na wykorzystaniu procesora obrazów i kamery video typu CCD [3, 36, 37].

Tworzeniu się kropli w wyniku rozpadu strugi poświęcona jest pierwsza z merytorycznych części pracy. Zagadnienie to, związane z utratą stabilności cylindrycznej strugi, było przedmiotem licznych badań od przeszło stulecia. Problem do którego ograniczymy się w tej pracy związany jest z próbą wyjaśnienia mechanizmu końcowej fazy odrywania się kropli od spójnej struktury strugi. Zjawisko to jest jednym z ostatnich ogniw procesu tworzenia się kropli, które nie doczekały się jeszcze pełnego opisu matematycznego. Osobliwości pojawiające się w rezultacie znikającego wymiaru poprzecznego strugi stanowią istotny problem dla opisu teoretycznego. Modele analityczne pozwalają jedynie przybliżyć opis zjawiska przez analizę asymptotyki rozwiązań. Istniejące rozwiązania numeryczne pozwalają prześledzić proces rozpadu strugi do pewnej krytycznej średnicy, poniżej której niestabilność rozwiązań interpretowana jest jako moment oderwania się kropli.
Dla fizyka interesującym jest jednak znalezienie odpowiedzi na pytanie: co dzieje się ze strugą w takim momencie? Czy średnica strugi osiąga teoretyczne minimum czyli wymiar molekularny? Opisane w tej pracy badania eksperymentalne wskazują na istnienie dodatkowej fazy rozpadu, polegającej na tworzeniu się mikro-strugi o średnicy około 1 mikrometra. Interesujące wydaję się stwierdzenie, że ta ostatnia faza tworzenia się kropli nie zależy od większości makroskopowych parametrów strugi, takich jak geometria czy

prędkość, a jedynie od własności fizycznych cieczy (lepkość, gęstość i napięcie powierzchniowe). Z jednej strony stwarza to wygodny do teoretycznego modelowania obiekt, z drugiej stanowi podstawę do stworzenia w przyszłości narzędzia umożliwiającego badania mikro-hydrodynamicznych cech cieczy.
Odkrycie tej dodatkowej fazy rozpadu związanej z tworzeniem się mikro-strugi i jej rozpadu na mikro-satelity może mieć również istotne znaczenie w wielu zastosowaniach praktycznych jak: drukarki atramentowe, mikrodozowniki cieczy czy układy dyspersji cieczy w komorach spalania.

Niestabilność powierzchni cylindrycznej, jaką tworzy struga cieczy ulega dalszej modyfikacji, jeśli ciecz znajduje się w stanie nierównowagi termodynamicznej. Ma to na przykład miejsce podczas parowania powierzchni. Zaburzenia wywołane towarzyszącym parowaniu efektom dynamicznym i termicznym mogą w krótkim czasie osiągać amplitudy znacznie przekraczające naturalne efekty kapilarne, zmieniając całkowicie geometrię strugi. Problematyka ta odgrywa istotną rolę w szeregu zagadnień praktycznych. Wymienić tu można takie procesy technologiczne jak: rozpylanie paliw, tworzenie powłok pokrywających światłowody czy też stabilizacja filmów cieczy chłodzących (reaktory, spawanie plazmowe), w których istotne znaczenie odgrywają zaburzenia powierzchni cieczy wywołane gradientami temperatury.
Na istnienie szeregu charakterystycznych zaburzeń wywołujących „marszczenia się" czy tworzenia kraterów na powolnie parującej płaskiej powierzchni cieczy wskazał w swoich pionierskich obserwacjach Hickman [32]. Zainicjowane tym eksperymentem próby modelowania powstawania zaburzeń na parującej powierzchni ograniczają się na ogół do systematyzacji możliwych mechanizmów i tworzenia przybliżeń liniowych. Wielorakość możliwych czynników destabilizujących parującą powierzchnię, ich wzajemne sprzężenia i dodatkowa obecność dużych gradientów temperatury powoduje, że postawienie problemu w sposób zamknięty staje się trudnym zadaniem, a jego rozwiązanie czeka nadal na realizację.
W praktyce problem stabilności parującej powierzchni spotykany jest często dla strug cieczy wtryskiwanych do ośrodka gazowego. Niewielka liczba podstawowych badań eksperymentalnych nad stabilnością parującej strugi jest prawdopodobnie przyczyną powolnego postępu teoretycznej interpretacji tego trudnego problemu. Dlatego też w obecnej pracy położono główny nacisk na znalezienie podstawowych charakterystyk parujących strug. W badaniach ograniczono się do strug o małych wymiarach (średnica rzędu ułamków milimetra). Pozwala to na minimalizację wpływu ubocznych efektów grawitacji i aerodynamiki, potęgując zarazem, wskutek wzrostu krzywizny powierzchni, rolę napięcia powierzchniowego. Obserwowane w szerokim zakresie wartości parametrów termodynamicznych zmiany powierzchni strug scharakteryzowano jakościowo, stwierdzając istnienie szeregu nowych postaci deformacji. Okazuje się, że silnie parująca powierzchnia może ulec rozwarstwieniu tworząc quasi-stabilne filmy cieczy otaczającej rdzeń strugi. Parowanie może też powodować quasi-stabilne zachowanie się powierzchni cylindrycznej przez tłumiący zaburzenia wpływ silnie schłodzonej, lepkiej warstwy powierzchniowej. Interesującym efektem jest również zaobserwowana zmiana kierunku cylindrycznej strugi, spowodowana asymetrią gradientów temperatury powierzchni. Analizę teoretyczną obserwowanych zjawisk ogranicza w

poważnym stopniu brak tak istotnej informacji jak rozkład temperatury parującej powierzchni strugi. Koniecznym więc staje się modelowanie numeryczne warunków panujących na powierzchni. W pracy przedstawiono próbę interpretacji obserwowanych efektów, korzystając z uproszczonych modeli parującej strugi. Pozwoliło to na jakościową ocenę występujących mechanizmów destabilizacji powierzchni wskazując, że istotnym czynnikiem są gradienty napięcia powierzchniowego, spowodowane gradientami temperatury. Uzyskane rezultaty świadczą, że analizowany problem daleki jest do zamknięcia i kontynuacja badań nad stabilnością parujących powierzchni konieczna jest dla pełnego zrozumienia mechanizmów destabilizacji.

Jak wspomniano na wstępie, podstawową ideą przeprowadzonych badań było stworzenie metody eksperymentalnej, pozwalającej na wykorzystanie oscylacji kropli jako wskaźnika temperatury parującej powierzchni. Parametr ten odgrywa decydującą rolę w weryfikacji istniejących modeli parowania. Rozbieżności obserwowane między przewidywaniami teoretycznymi a obserwowanymi globalnymi parametrami parowania (ubytek cieczy, temperatura wewnętrzna) doprowadziły do wprowadzenia szeregu empirycznych współczynników (jak stała akomodacji dla modelu kinetycznego, czy różne wersje liczby Nusselta dla modeli dyfuzyjnych). Pomiar temperatury parującej powierzchni pozwoliłby zweryfikować ich wartości i stworzyć w pełni wiarygodny model. Brak takiego modelu utrudnia m.in. przeprowadzenie prawidłowej analizy niestabilności pojawiających się na parującej powierzchni.
Idea pomiaru temperatury powierzchni cieczy opiera się na przyjęciu, że możliwy jest dokładny pomiar napięcia powierzchniowego na podstawie analizy drgań kropli. Ponieważ napięcie powierzchniowe jest funkcją temperatury, pozwoliłoby to określić warunki panujące w molekularnie cienkiej warstwie parującej powierzchni cieczy. Warto nadmienić, że z uwagi na swój bezdotykowy charakter i krótki czas pomiaru, metoda oscylującej kropli umożliwia szereg innych badań, trudnych lub niemożliwych do wykonania klasycznymi metodami. Na przykład dla parującej mieszaniny dwóch cieczy jest to możliwość zbadania zmiany koncentracji składników na powierzchni, dla roztworów substancji powierzchniowo aktywnych pomiar dynamicznego napięcia powierzchniowego, a przy jego pomocy własności fizyko-chemicznych powierzchni. Oscylująca kropla znajduje również coraz szersze zastosowanie w badaniach takich „egzotycznych“ cieczy jak: ciekłe metale, ciekły krzem czy też ciekłe gazy. Brak kontaktu narzędzia pomiarowego z badaną powierzchnią ma tutaj decydujące znaczenie.
Poznanie mechaniki drgań kropli przez ich precyzyjny pomiar, wsparty zweryfikowanymi modelami teoretycznymi jest istotnym punktem badań. Opracowane techniki pomiarowe po raz pierwszy pozwoliły przedstawić obserwowane oscylacje kropli jako sumę amplitud pojedynczych modów drgań. Stało się to możliwe dzięki przedstawieniu powierzchni zdeformowanej kropli jako osiowo-symetrycznego rozwinięcia funkcji sferycznych. Umożliwia to nie tylko dokładny opis deformacji ale również jednoznaczne porównanie eksperymentu z rezultatami obliczeń i weryfikację zbudowanych modeli teoretycznych. Przeprowadzona analiza wyników pomiarów umożliwiła odkrycie istnienia efektów nieliniowych wyższych modów drgań, paradoksalnie nie znikających dla małych amplitud. Wskazało to na niedopuszczalność zaniedbania efektów nieliniowych w opisie drgań kropli.

Badania teoretyczne drgań kropli, mimo swej przeszło stuletniej historii, dopiero na przestrzeni ostatnich kilku latach doprowadziły do stworzenia modelu opisującego fizyczną kroplę. Stało się to możliwe dzięki zrozumieniu faktu, że powszechnie dotychczas akceptowana linearyzacja równań ruchu i warunków brzegowych stoi w sprzeczności z praktycznym ograniczeniem, jakim jest brak możliwości dokładnego pomiaru deformacji, której amplituda jest bliska zeru.
W niniejszej pracy przedstawiono podstawowe założenia pełnego modelu [2, 4], powstałego w oparciu o prowadzone eksperymenty, a opisującego nieliniową dynamikę lepkiej kropli. Należy podkreślić, że opublikowany w 1994 roku rezultat badań [4] jest jak dotąd pierwszym cytowanym w literaturze modelem nieliniowych drgań kropli zweryfikowanym eksperymentalnie. Było to ułatwione dzięki zastosowaniu zarówno w eksperymencie jak i w teorii tej samej metody parametryzacji zdeformowanej powierzchni. Przedstawienie pól prędkości i wirowości w postaci szeregów skończonych, pozwoliło sprowadzić problem do poszukiwania rozwiązania układu równań różniczkowych zwyczajnych dla niewiadomych będących parametrami rozwinięć. Główna idea modelu opiera się na zastosowaniu zasady wariacyjnej Gaussa dla minimalizacji całki równań Naviera-Stokesa po objętości kropli przy dodatkowych więzach w postaci warunków brzegowych.
Eksperymentalna weryfikacja modelu przeprowadzona przez autora w szerokim zakresie parametrów pozwoliła na zbudowanie uproszczonego modelu nieliniowego, w którym efekty lepkie ograniczono do cienkiej warstwy brzegowej (tzw. przybliżenie bezwirowe). Przybliżenie to jest związane z faktem, że generacja wirowości w warunkach powierzchni swobodnej ma miejsce jedynie na tej powierzchni. W warunkach skończonego czasu obserwacji drgań, zanikających wskutek tłumienia, możliwa jest sytuacja, gdy proces dyfuzji wirowości w głąb kropli może być zaniedbany i wpływ lepkości ogranicza się tylko do warstwy granicznej. Dalsze uproszczenie, polegające na opisie drgań kropli prostym równaniem oscylatora mechanicznego o nieliniowych współczynnikach, uzyskanych drogą graficznej analizy rezultatów obserwacji, pozwoliło na stworzenie metody szybkiej analizy pomiarów. Umożliwia to stosowanie procedur optymalizacyjnych dla wyznaczania parametrów fizycznych badanych cieczy, zbliżając nas do nakreślonego na wstępie celu. Na zakończenie przedstawiono kilka przykładów ilustrujących aplikacyjne możliwości metody.

Część badań opisanych w rozdziałach 3 i 4 była już przedmiotem wcześniejszych publikacji autora ([3, 4, 5], [34]-[43], [49]-[53],[82]). W niniejszym opracowaniu starano się więc przedstawić te fragmenty raczej skrótowo, uwypuklając jedynie najistotniejsze elementy uzyskanych rezultatów oraz uzupełniając je nowymi, nieopublikowanymi jeszcze informacjami.