

Dr hab. Zbigniew Walenta
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Sławomira Błońskiego „Analiza przepływu turbulentnego w mikrokanale”.

Praca doktorska mgr. Sławomira Błońskiego, o objętości 130 stron, składa się z siedmiu rozdziałów, dziewięciu załączników oraz spisu literatury obejmującego 78 pozycji. Dołączono również listę najważniejszych oznaczeń.

Praca poświęcona jest, jak powiedziano w tytule, badaniom przepływów turbulentnych w mikrokanalach ze względu na ich zastosowania we współczesnej mikro- i nanotechnologii. Autor skoncentrował się na dwóch zagadnieniach: przepływu przez emulsyfikator, gdzie celem było zbadanie procesu rozdrabniania kropelek zawiesiny jednej cieczy w drugiej i znalezienie optymalnych warunków dla jego realizacji, oraz przepływu przez mikrokanal o ściankach pofalowanych, celem uzyskania dobrego, pasywnego turbulizatora przepływu o małych oporach hydraulicznych.

Wykonane badania obejmowały część eksperymentalną i numeryczną. W części eksperymentalnej wykorzystano nowoczesną metodę mikroanemometrii obrazowej („ μ PIV” – Micro Particle Image Velocimetry), opartą na analizie obrazów badanego obszaru przepływu z umieszczonymi w nim, widocznymi cząstkami znacznikowymi. Mając dwa zdjęcia tego samego obszaru, wykonane w niewielkim, znanym odstępnie czasu, na podstawie zmierzonych przesunięć cząstek znacznikowych można wyznaczyć, z dającą się ocenić dokładnością, chwilowe pola prędkości płynącej cieczy.

W tym miejscu podkreślić należy, że wykonanie eksperymentów wymagało uprzedniego zestawienia, przetestowania i kalibracji bardzo wyrafinowanego układu pomiarowego, oraz modyfikacji oprogramowania PIV-KOR, przygotowanego uprzednio w Zakładzie Mechaniki i Fizyki Płynów IPPT dla potrzeb klasycznej anemometrii obrazowej (PIV).

Ponieważ eksperymenty, z uwagi na skończoną rozdzielczość przestrzenną i czasową, jak również osiągalną dokładność pomiarów, nie mogły dać wymaganej, pełnej informacji na temat badanych przepływów, przeprowadzono symulacje numeryczne w odpowiednio dobranych warunkach. Przyjęto, że symulacje dostarczały pełną, wiarygodną informację o przepływie, jeżeli ich wyniki zgadzały się z wynikami eksperymentalnymi w obszarach, gdzie takowe istniały.

Do symulacji użyto dwóch metod: metody DNS, (Direct Numerical Simulation) opartej na pełnym, niestacjonarnym układzie równań Naviera – Stokesa dla cieczy nieściśliwej, oraz metody RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations), wykorzystującej dekompozycję Reynoldsa (t.j. rozkład na wartości średnie i fluktuacje) dla prędkości i ciśnień. W tym ostatnim przypadku skorzystano z półempirycznego modelu turbulencji $k - \epsilon$.

Rozdział pierwszy recenzowanej pracy, „Wstęp”, po krótkim omówieniu wagi zagadnień związanych z mikroprzepływami dla współczesnej technologii zawiera dwa podrozdziały. Pierwszy z nich, „Turbulencja”, podaje podstawowe pojęcia i definicje związane z przepływami turbulentnymi, poczynając od obserwacji Reynoldsa, zatrzymując się nieco dłużej nad teorią Kołmogorowa. Drugi, „Struktura przepływu i przejście laminarno-

turbulentne w układach mikroprzepływowych” omawia cechy charakterystyczne dla przepływów przez mikrokanaly, w szczególności kryterium przejścia od przepływu laminarnego do turbulentnego. W zakończeniu Autor stwierdza, że będzie się zajmował głównie przepływami przez mikrokanaly krótkie, o długościach porównywalnych z ich wymiarami poprzecznymi, ponieważ dla takich brak jest danych w literaturze.

Omawiany rozdział napisany jest bardzo zwięźle, bez wdawania się w szczegóły, co budzi u czytelnika pewien niedosyt wydaje się jednak zrozumiałe ze względu na i tak dużą objętość pracy.

W rozdziale drugim, „Metody analizy eksperymentalnej”, Autor podaje na wstępie opis klasycznej metody anemometrii obrazowej (PIV), po czym charakteryzuje szczegółowo anemometrię obrazową w skali mikro (μ PIV), z której korzysta w swoich eksperymentach. Jest to, jak podaje, jedno z pierwszych zastosowań tej metody do badań turbulencji w przepływach mikroskalowych. Podany opis metody jest jasny i wyczerpujący; widać że Autor dobrze nad nią panuje.

Rozdział trzeci, „Metody analizy numerycznej” zawiera krótki opis użytych metod obliczeniowych:

- metody DNS (Direct Numerical Simulation), sprowadzającej się do numerycznego rozwiązywania układu równań Naviera – Stokesa wraz z równaniem ciągłości dla płynu nieściśliwego
- metody RANS (Reynolds – Averaged Navier – Stokes equations) polegającym na rozłożeniu funkcji niewiadomych na wartości średnie oraz fluktuacje. Dla domknięcia układu równań skorzystano tu z pół-empirycznego modelu $k - \epsilon$.

W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę na pewną niezgodność terminologiczną: warunek brzegowy na ścianie $\mathbf{u} = 0$, gdzie \mathbf{u} jest wektorem, jest warunkiem nieprzenikalności ścianki i braku poślizgu, a nie tylko braku poślizgu. Do pomyślenia byłaby ścianka porowata, na której składowa styczna prędkości (poślizg) byłaby równa zero, natomiast składowa normalna byłaby niezerowa ze względu na porowatość ścianki.

Rozdział czwarty, „Analiza eksperymentalna przepływu przez mikrokanal”, jest, w moim przekonaniu, najistotniejszą częścią recenzowanej pracy. Rozpoczyna się od szczegółowego opisu modelu eksperymentalnego, po czym następuje opis stanowiska pomiarowego z jego elementami – częścią optyczną i układem wymuszającym przepływ oraz podane są parametry użytego płynu i cząstek znacznikowych. Dalej zrelacjonowany jest szczegółowo przebieg eksperymentów i wreszcie wyniki pomiarów. Rejestrowane były chwilowe pola prędkości w trzech częściach kanału: przed jego zwężeniem, w najwęższej części i za rozszerzeniem, w sumie w siedmiu przekrojach, dla pięciu liczb Reynoldsa. Pomiar w tym samym przekroju i dla tej samej liczby Reynoldsa powtarzano wielokrotnie, dzięki czemu można było określić średnie pole prędkości, oraz jej fluktuacje i na tej podstawie wyliczyć energię kinetyczną turbulencji. Ponieważ, niestety, możliwy był pomiar prędkości tylko w płaszczyźnie $X - Z$, nie dało się wyznaczyć pełnej energii kinetycznej turbulencji, a tylko jej część „zmodyfikowaną” do dwóch wymiarów.

Uzyskano tutaj wynik mówiący, że zarówno w części wlotowej emulsyfikatora, jak też w najwęższej części jego kanału przepływ można uważać za laminarny, nawet przy najwyższej uwzględnianej liczbie Reynoldsa. W szerszej części wylotowej natomiast tworzy się wąski, szybko płynący strumień cieczy graniczący z obszarem, gdzie prędkość jest znacznie niższa, lub nawet ma przeciwny zwrot. Mamy tu do czynienia z obszarem o dużych

gradientach prędkości, gdzie kropelki emulsji ulegają rozdrobnieniu i gdzie zaczyna się turbulizacja przepływu.

Powyższy wynik uważam za najważniejszy w całej pracy.

Rozdział piąty, „Analiza numeryczna przepływu przez mikrokanal”, zawiera wyniki symulacji numerycznych obydwoma omówionymi wyżej metodami, oraz porównanie ich między sobą i z eksperymentem.

Z powyższych porównań wynikają następujące wnioski:

- Zgodność wyników uzyskanych metodą DNS z eksperymentem jest dla wszystkich położań i wszystkich rozpatrywanych liczb Reynoldsa co najmniej zadowalająca.
- Metoda RANS w sztuczny sposób zawyża intensywność turbulencji (energię kinetyczną turbulencji) w obszarach gdzie przepływ jest laminarny lub bliski laminarnego.

Wniosek dotyczący metody RANS uważam za istotne osiągnięcie Autora.

Rozdział szósty, „Numeryczna i eksperymentalna analiza przepływu przez kanal o geometrii prowadzącej do znacznej redukcji krytycznej liczby Reynoldsa”, stanowi odrębną część pracy, nie powiązaną bezpośrednio z badaniem przepływu przez emulsyfikator. Jej celem była weryfikacja teoretycznego wyniku Szumbarskiego [J. Szumbarski, Instability of viscous incompressible flow in a channel with transversely corrugated walls. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 45(3), pp. 659-683, 2007], sugerującego możliwość turbulizacji mikroprzepływu dzięki odpowiedniemu pofalowaniu ścianek kanału. Wykonane symulacje i eksperymenty potwierdziły wynik Szumbarskiego stwarzając możliwość budowy efektywnych mikromieszalników pasywnych o niewielkich oporach przepływu.

Rozdział siódmy, „Podsumowanie i wnioski”, zawiera najważniejsze konkluzje wynikające z przeprowadzonych eksperymentów i symulacji.

Cała praca napisana jest jasno, dobrym językiem, z minimalną ilością błędów stylistycznych i literówek. Informacje o nich przekazałem Autorowi bezpośrednio.

Praca jest niewątpliwie pionierską jeśli chodzi o zastosowanie metody mikroanemometrii obrazowej do badania turbulencji w mikrokanalach. W miom przekonaniu stanowi ona istotny wkład w rozwój tej dziedziny wiedzy.

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