

**Piotr DOERFFER, Prof. dr hab. inż.,**  
ZAKŁAD PRZEPLYWÓW TRANSONICZNYCH  
I METOD NUMERYCZNYCH  
ul. Fiszera 14  
80-952 Gdańsk  
tel.: (+48) 58 6995 202  
fax: (+48) 58 341-61-44  
e-mail: [doerffer@imp.gda.pl](mailto:doerffer@imp.gda.pl)

Gdańsk, 14.08.2009

Opinia na temat pracy doktorskiej mgr Sławomira Błońskiego pt.

**“Analiza przepływu turbulentnego w mikrokanale”.**

### **1) Ogólne wrażenie po przeczytaniu pracy**

Praca doktorska dotyczy bardzo ważnej tematyki, rozwijanej intensywnie na świecie i należy wyrazić uznanie, że w IPPT jest ona przedmiotem badań naukowych na tak wysokim poziomie. Daje to szerokie możliwości współpracy naukowej jak i zdobywania środków na tą tematykę.

Szczególnie duże wrażenie wywarło na mnie wdrożenie metody  $\mu$ PIV. Uruchomienie tej metody stwarza nowe zakresy prac badawczych w zespole prof. Kowalewskiego, które będą prowadzone jeszcze przez wiele lat. Już sam ten fakt daje podstawy do dobrego doktoratu. Należy podkreślić, że jest to jedyny ośrodek w kraju mogący wykonywać tego typu pomiary.

W pracy przedstawiono badania eksperymentalne i numeryczne dwóch zupełnie odrębnych zagadnień, których jedyną wspólną cechą jest zastosowanie tych samych metod badawczych. Przepływ przez mikro-kanal jest przeanalizowany bardzo szczegółowo w rozdziale 5 i 6 natomiast przepływ przez kanal o zmiennej grubości omówiony jest tylko w rozdziale 7 i to znacznie mniej dokładnie. Ta różnica podejścia nie jest do końca wyjaśniona, choć oba zagadnienia są bardzo ciekawe.

Należy podkreślić, w pracy nie tylko przedstawiono nowoczesny eksperyment ale również przeprowadzono wiele symulacji numerycznych. Połączenie tych obu metod badawczych ma zawsze wielką zaletę bo pozwala na wzajemne weryfikowanie wyników. Łączenie tych dwóch podejść badawczych pozwala na lepsze poznanie badanych zjawisk.

### **2) Rozprawa doktorska**

Rozprawa doktorska zawarta została na 104 stronach tekstu oraz uzupełniona dziewięcioma dodatkami na kolejnych 20 stronach. Posiada logiczną strukturę, składając się z siedmiu rozdziałów. Zaopatrzone ją w listę ważniejszych oznaczeń oraz bibliografię zawierającą 78 pozycji literatury.

Napisana została w sposób jasny, szata graficzna nie budzi zastrzeżeń. Prace wyposażono w płytę DVD, na której zapisane są wyniki eksperymentalne i numeryczne. Najciekawsze dla czytelnika są filmy ilustrujące wyniki niestacjonarnych symulacji numerycznych.

### 3) Szczegółowa charakterystyka pracy oraz uwagi krytyczne

Praca dotyczy dyskutowanego od niemal dziesięciu lat w literaturze mikro-przepływowej wpływu wymiaru kanału na granice przejścia laminarno-turbulentnego. Ogólny wniosek jaki pojawia się w zamieszczonym przeglądzie literatury, to stwierdzenie, że wcześniejsze hipotezy o istotnej zmianie granicy takiego przejścia nie znajdują potwierdzenia w badaniach eksperymentalnych dla kanałów o wymiarach rzędu kilkudziesięciu mikrometrów. W swojej pracy Doktorant stwierdza jednak, że w bardzo krótkich mikro-kanałach takie przejście laminarno-turbulentne może być istotnie opóźnione. Ten fakt zauważony przez Doktoranta w eksperymencie został również potwierdzony w przeprowadzonych symulacjach numerycznych.

Drugie analizowane w pracy zagadnienie dotyczy odwrotnego problemu, jak obniżyć krytyczną liczbę Reynoldsa i wzbudzić perturbacje przepływu w mikro-kanałach. Okazuje się, że odpowiednie pofalowanie ścianek kanału doprowadza do powstania niestacjonarności przepływu dla liczb Reynoldsa rzędu 100, czyli znacznie poniżej liczby krytycznej dla kanału płaskiego. Wynik ten otrzymany przez Doktoranta w wyniku symulacji numerycznych i wstępnie potwierdzony eksperymentalnie może w przyszłości stanowić ważny element optymalizacji procesów wymiany ciepła czy mieszania w płaskich kanałach.

W moim odczuciu tytuł pracy oraz jej główne cele nie całkiem odpowiadają jej zawartości. Praca nie zawiera analizy przepływu turbulentnego w mikro-kanałach, jak głosi tytuł rozprawy, ponieważ wyniki eksperymentu pokazały, że przepływ jest laminarny. Jest to raczej „Anliaza przejścia laminarno-turbulentnego w mikrokanalach”. W definicji celów zostało napisane: "podany zostanie pełny opis przepływu turbulentnego oraz określona zostanie granica przejścia laminarno-turbulentnego w układzie mikro-przepływowym". To również nie znajduje uzasadnienia w treści pracy, bo jak już powiedziano przepływ w mikro-kanałach (szczelinie) okazał się być laminarnym nawet dla maksymalnej uzyskiwanej w przepływie liczby Reynoldsa ( $Re=6800$ ). Natomiast druga część pracy w pewnym sensie opisuje poszukiwania granicy przejścia laminarno-turbulentnego dla kanału o pofalowanych ściankach.

**Rozdział 2** zawiera bardzo ważną część rozprawy doktorskiej, którą jest opis metody  $\mu$ PIV, która została zastosowana w badanych mikro-kanałach. Przedstawiony opis jest zwięzły, dokładny i zrozumiały. Istotną wartością pracy leżącą w uruchomieniu tej metody jest słabo uwypuklona w rozprawie. Należy podkreślić, że zestawienie aparatury PIV do zastosowań mikro- jest bardzo trudne technicznie. Uzyskanie dobrych obrazów, które mogą być użyte w przetwarzaniu danych pomiarowych wymaga wielu dni i tygodni doskonalenia techniki pomiarowej. Zastosowanie cząstek wzbudzanych światłem wymaga też wielu prób i doświadczenia.

**Rozdział 3** przedstawia metody numeryczne w bardzo skrótowej formie, co jest zaletą. Zastosowano dwa podejścia. Jedno to niestacjonarne obliczanie przepływu laminarnego nazwane DNS. A drugie to RANS z modelem turbulencji  $k-\epsilon$ . Wydaje się jednak, że różnica pomiędzy schematami do liczenia przepływów laminarnych i zagadnień typu DNS powinna być tu dokładniej wyjaśniona, bo inaczej może czytelnika wprowadzić w błąd.

**Rozdział 4** demonstruje wielkie możliwości zastosowanego  $\mu$ PIV. Przeanalizowano strukturę przepływu w kanale dolotowym, w mikro-kanałach i w kanale wylotowym emulsyfikatora. Analiza funkcji struktury pozwoliła na wyznaczenie obszarów typowych dla skal dysypatywnych oraz dla skal inercyjnych. Dzięki temu można było wyznaczyć obszar gdzie przepływ jest turbulentny. Występuje on tylko na wylocie z emulsyfikatora przy

zastosowaniu największej liczby Reynoldsa  $Re=6770$ . Należy podkreślić bardzo skrupulatne podejście doktoranta do przeprowadzonych pomiarów. Ponieważ metoda jest nowa to szczególną uwagę poświęcono dokładności wykonywanych pomiarów, której poświęcono jeden z załączników.

**Rozdział 5** przedstawia wyniki CFD dotyczące podejścia DNS oraz RANS. Dyskretyzacja przestrzenna oraz czasowa w symulacjach DNS została dobrana zgodnie ze skalami Kolmogorowa, tak aby rozwiązywać najmniejsze struktury turbulencji. Siatka obliczeniowa dla zagadnień DNS jest zazwyczaj jednorodna tak, aby najmniejsze struktury nie zniknęły ze względu na wymiar siatki. Siatka stosowana przez doktoranta odpowiada raczej typowym symulacjom przepływów z warstwami przyściennymi.

W moim pojęciu nazwa DNS jest zarezerwowana nie tylko dla symulacji o bardzo dużej gęstości siatki i małym kroku czasowym, ale przede wszystkim łączy się z zastosowaniem mało dysypatywnych schematów numerycznych, które pozwolą na powstawanie pierwszych włókien wirowych o najmniejszej skali i coraz to większych elementów struktury turbulencyjnej. Stąd obliczenia DNS są dużo bardziej czasochłonne niż metody LES nie mówiąc już o metodach RANS.

W prowadzonych obliczeniach stosowano schemat upwind drugiego rzędu, który jest silnie dysypatywny ale powoduje szybsze zbieganie się rozwiązania niż w mało dysypatywnych schematach stosowanych do LES czy faktycznego DNS. Obliczenia laminarne ze stałym krokiem czasowym można w zasadzie nazywać DNS, ale zastosowany tutaj schemat numeryczny (upwind drugiego rzędu) moim zdaniem nie pozwoli na uzyskanie wszystkich skal wirów pomimo zapewnienia odpowiedniej rozdzielczości przestrzennej i czasowej. W moim zrozumieniu w pracy przedstawiono niestacjonarne symulacje laminarne a nie DNS. Dlatego taka wielka rozdzielczość siatki w przepływie jest tu być może przesadzona.

Ogólne wątpliwości budzi podejście do symulacji turbulentnych. Przy niskich liczbach Reynoldsa traktowanie całego przepływu jako turbulentnego nie bardzo ma sens, co zauważa sam Doktorant. Rozumiem jednak, że jest to próba porównania wyników z metodą często jeszcze stosowaną w literaturze do mikro-przepływów. Zastosowana przez doktoranta siatka jest tak samo gęsta jak dla DNS. Jeżeli stosujemy model turbulencji i jeszcze do tego dyskretyzacja pozwala na rozwiązywanie wirów należących do turbulencji to wynikowa energia kinetyczna turbulencji będzie po prostu zbyt duża. Siatka odpowiednia do DNS jest na pewno zbyt gęsta dla obliczeń typu RANS, natomiast doktorant dodatkowo zastosował dynamiczne zagęszczanie siatki w obszarach dużego gradientu prędkości. Typowe schematy numeryczne stosowane w kodzie FLUENT są wystarczające dla symulacji przepływów z typowymi modelami turbulencji, dla których pierwszy punkt siatki przy ścianie leży co najwyżej na  $y^+=1$ . Uzyskane w RANS duże zawyżenie wartości energii kinetycznej turbulencji może być właśnie związane ze zbyt gęstą siatką obliczeniową

Stosując podejście turbulencjne, należy przemyśleć gdzie może nastąpić przejście laminarno-turbulentne na ścianie. Wyniki przedstawionej pracy doktorskiej pokazują, że następuje ono za mikro-kanalem. Tak więc liczenie turbulencyjnej warstwy przyściennej od samego wlotu musi prowadzić również do przeszacowania energii kinetycznej turbulencji.

Przyrost energii kinetycznej turbulencji (Rys.5.8.b) dla dwóch środkowych liczb  $Re$  w symulacjach DNS nie powinien być tak łatwo lekceważony. Może jest jakiś powód, który w symulacjach numerycznych mógłby być wyjaśniony. Tym bardziej, że na Rys.5.30 i 31 widać, że przy małych i dużych  $Re$  energia kinetyczna turbulencji jest dokładnie równa zero na całej wysokości kanału. Dlaczego więc dla pośrednich  $Re$  przyjmuje wartości inne niż zero i wykazuje rozkład po wysokości kanału.

Omawiając wyniki symulacji RANS dla małej liczby  $Re$  (Rys 5.18) Doktorant traktuje je tak jakby były zgodne z wynikami DNS (Rys.5.3). Jednakże symulacje RANS dla małych liczb Reynoldsa nie są zgodne z wynikami DNS. Szybka dyssypacja w RANS powoduje szybki zanik strugi z mikro-kanalu i zasadniczą różnicę w obrazie przepływu uzyskanego w RANS. W symulacjach DNS struga ta utrzymuje się aż do wylotu.

W symulacjach RANS dla dużej liczby Reynoldsa w zasadzie stwierdzono podobieństwo wyników do DNS jedynie w obszarze wylotowym kanału (Rys.5.37a). Brak takiej zgodności dla obszaru mikro-kanalu stanowi główny wniosek pracy i potwierdza wcześniejsze rezultaty eksperymentalne.

**Rozdział 6** zajmuje się bardzo ciekawym zagadnieniem powstawania niestabilnych struktur w kanale o zmiennym przekroju przy bardzo małych liczbach  $Re$ , poniżej 100. Te bardzo ciekawe wyniki pokazują, że można uzyskać nawet redukcję oporów przepływu w stosunku do przepływu Poiseuille'a. Bardzo pozytywnie należy tu ocenić współpracę z prof. Szumbarskim, którego badania stały się motywacją do podjęcia tak ciekawego tematu.

Rozdział ten zawiera zarówno badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne stosowaną w pracy metodą DNS. Jeszcze raz należy podkreślić, że badania eksperymentalne i wykonane pomiary są dużym sukcesem. W tych badaniach Doktorant rejestrował ruch cząstek w mikro-kanale. Pojawienie się złożonych struktur niestacjonarnych przepływu może być zaobserwowane poprzez wystąpienie torów wzbudzanych cząstek odbiegających od prostoliniowej formy.

Szczegółowa analiza numeryczna, choć prowadzona w uproszczonej geometrii, potwierdziła całkowicie obserwacje eksperymentalne pojawiania się destabilizacji przepływu przy liczbach  $Re$  około 100. Szkoda, że mając symulacje numeryczne nie wygenerowano linii toru elementu płynu w sposób podobny do eksperymentu. Łatwo byłoby sprawdzić, czy tory elementów płynu w pewnych obszarach miałyby podobny charakter.

Na zakończenie chciałbym jeszcze nawiązać do jednego tematu. Niezupełnie jasno jest wyjaśnione otwieranie i zamykanie jednego z mikro-kanalów. Na stronie 37 i w dodatku H zostało powiedziane, że czasami blokowano dolny mikro-kanal aby zwiększyć maksymalną prędkość w górnym, badanym mikro-kanale. Było to konieczne dla uzyskania podwyższenia prędkości przepływu, a tym samym osiągnięcia liczby Reynoldsa 3337 przy zastosowaniu maksymalnego wydatku otrzymywanego z mikropompy. Takie działanie należy rozumieć, że zamykano jeden mikro-kanal nie zmieniając masowego wydatku przez urządzenie. Tylko w ten sposób można uzyskać większą prędkość w jednym mikro-kanale. W załączniku H pokazano wyniki symulacji numerycznych dla przepływu z obu kanałami otwartymi oraz z jednym zamkniętym. Okazuje się, że rozkład prędkości w kanale, który jest zawsze otwarty, jest w zasadzie niezależny od tego czy drugi kanał jest zamknięty czy nie. Stąd wynika, że symulacje numeryczne były prowadzone dla dwóch różnych wydatków w zależności od ilości otwartych kanałów. Ta różnica podejścia pomiędzy eksperymentem a symulacjami numerycznymi nie była jasno wyjaśniona w tekście. Chodziło oczywiście o stwierdzenie jaka byłaby różnica w przepływie przez badany mikro-kanal gdyby ten drugi mógłby być otwarty.

## 5) Konkluzja

W ramach przedstawionej pracy doktorskiej mgr inż. Sławomir Błoński:

- o opanował technikę epi-fluorescencji i obrazowania mikro-przepływów z wykorzystaniem mikroskopu i oświetlających systemów laserowych

- wykonał eksperymenty mające na celu zbadanie procesu wytwarzania emulsji w przepływie turbulentnym w mikrokanale jak również destabilizacji przepływu wskutek pofalowania ścianek kanału
- opanował techniki numeryczne mechaniki płynów i wykonał symulacje przepływów w badanych geometriach

W pracy doktorskiej mgr. Błoński wykazał eksperymentalnie i potwierdził metodami numerycznymi, że intensywność turbulizacji przepływu w mikro-kanale utworzonym w szczelinie emulsyfikatora jest silnie stłumiona i nie jest czynnikiem odpowiedzialnym za generację kropeł emulsji. Przeprowadzone badania pokazały, że często w obliczeniach numerycznych praktyka przyjmowania *a priori* (np. w oparciu o liczbę Reynoldsa) modelu przepływu turbulentnego typu RANS może być niezgodne z fizyką przepływu, a tym samym może prowadzić do błędnych rezultatów. Typowym przykładem może być analizowany przepływ w szczelinie emulsyfikatora.

W drugiej części pracy mgr. Błoński wykazał eksperymentalnie i numerycznie, że przewidywana teoretycznie destabilizacja przepływu przez odpowiednio pofalowane ścianki kanału ma faktycznie miejsce już dla liczb Reynoldsa rzędu 100. Ten temat w szczególności wymaga jeszcze dalszych badań.

**Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim w myśl ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. nr 65 poz. 595). W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy pana mgr inż. Sławomira Błońskiego jako pracę doktorską i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**