

Gliwice, 10.02.2015

Dr hab. inż. Antoni John, Prof. nzw. w Pol. Śl.  
Politechnika Śląska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej  
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18a

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty KMIOTEK pt.**

**„Wpływ geometrii przeszkody na przepływ w mikrokanalach urządzeń technicznych”**

### **1. Podstawa opracowania**

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Pana Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa z dnia 14.01.2015 roku. Wraz z pismem otrzymałem egzemplarz pracy doktorskiej oraz wykaz publikacji i wystąpień obejmujących badania w przedkładanej rozprawie doktorskiej.

### **2. Uwagi ogólne**

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy badania możliwości zastosowania metody elementów skończonych w klasycznym ujęciu w celu wyznaczenia wpływu geometrii przeszkody na przepływ w mikrokanalach urządzeń technicznych. Doktorantka przyjmuje, że w mikroprzepływach obowiązują klasyczne równania mechaniki płynów a potwierdzeniem poprawności przyjętych założeń mają być badania doświadczalne przeprowadzone metodą  $\mu$ PIV w Zakładzie Mechaniki i Fizyki Płynów Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie na specjalnie w tym celu zaprojektowanym i wykonanym urządzeniu.

Przepływ analizowany przez Doktorantkę uwzględnia również przewodnictwo ciepłe co powoduje możliwość zastosowania uzyskanych wyników w wielu działających i

projektowanych urządzeniach technicznych. Jako przykład można podać mikrowymienniki ciepła, mikropompy ciepła, systemy chłodzenia urządzeń elektronicznych (dla procesorów czy kart grafiki), mikrosystemy analizy biologicznej i chemicznej.

Doktorantka przedstawiła w pracy obszerny przegląd literatury dotyczący analizowanych zagadnień i stwierdziła, że brak jest prac dotyczących badania wpływu przeszkody smukłej lub sekwencji przeszkód w mikrokanalach na przepływ ciepła w powiązaniu z przepływem płynu. To stwierdzenie legło u podstaw sformułowania celu i zakresu pracy, które przedstawiają się następująco:

„Celem pracy jest określenie wpływu geometrii smukłej przeszkody umieszczonej na ścianie mikrokanalu na przepływ płynu i ciepła w aspekcie chłodzenia. .... Realizacja celu pracy obejmuje:

- analizę przepływu płynu w mikrokanalach z pojedynczą przeszkodą oraz określenie współczynnika strat miejscowych dla różnych geometrii przeszkody,
- analizę wpływu elastyczności przeszkody pojedynczej o różnej geometrii,
- weryfikację uzyskanych wyników numerycznych przepływowych dla pojedynczej przeszkody w mikrokanale poprzez ich porównanie z rezultatami eksperymentalnymi dla milikanalów,
- analizę przepływu płynu i ciepła dla sekwencji przeszkód.

Na podstawie uzyskanych wyników numerycznych wyznaczono:

- profile prędkości,
- rozkłady wektorów prędkości,
- linie prądu,
- straty ciśnienia,
- profile i rozkłady temperatury.

Badano wpływ geometrii przeszkody smukłej lub sekwencji przeszkód smukłych na obraz przepływu płynu i ciepła w mikrokanale. ....”

Trzeba stwierdzić, że przedstawiony przez Doktorantkę cel i zakres pracy dotyczą istotnych, z praktycznego i technicznego punktu widzenia, zagadnień mających szerokie zastosowanie w coraz bardziej miniaturyzowanych układach elektronicznych i mechatronicznych. Dlatego należy uznać, że przedstawiona praca mieści w dyscyplinie naukowej mechanika a podjęte zagadnienia mogą stanowić temat pracy doktorskiej.

### 3. Zawartość rozprawy

Praca składa się z sześciu rozdziałów, pięciu dodatków (od A do E), spisu literatury oraz streszczeń w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym przedstawiono cel i zakres rozprawy, przegląd literatury dotyczącej omawianych zagadnień, motywy podjęcia tego tematu oraz skrótowo zawartość rozprawy.

W rozdziale drugim sformułowano problem badawczy. Przedstawiono podstawowe równania i zależności dodatkowe dla przepływu w mikrokanałach z przeszkodą nieodkształcalną i podatną.

W rozdziale trzecim została przedstawiona metoda badawcza, tj. metoda elementów skończonych i jej zastosowanie do modelowania mikroprzepływów. Opisano geometrię zagadnienia, przedstawiono model obliczeniowy i podział na elementy skończone rozpatrywanego mikroprzepływu.

Rozdział czwarty zawiera analizę przepływu płynu przez mikrokanal z pojedynczą przeszkodą oraz analizę wyników numerycznych w postaci profili prędkości, linii prądu dla mikrokanalu z pojedynczą przeszkodą. Przedstawiono weryfikację eksperymentalną wykonaną metodą wizualizacji przepływów, tj. mikroanemometrią obrazową  $\mu$ PIV dla mikrokanalu z pojedynczą przeszkodą o różnej geometrii. Otrzymane wyniki eksperymentalne porównano z wynikami numerycznymi.

W rozdziale piątym przeprowadzono analizę przepływów płynu i ciepła dla sekwencji przeszkód. Jako wyniki przedstawiono profile prędkości, linie prądu, straty ciśnienia, rozkład lokalnej liczby Nusselta, rozkład współczynnika efektywności cieplnej w zależności od konfiguracji przeszkód w mikrokanałach.

Rozdział szósty zawiera wnioski końcowe. Podano w nim również kierunki dalszych badań oraz wskazano elementy nowości w rozprawie.

Dodatek A dotyczy wykonania testu zbieżności siatek z zastosowaniem analizy współczynnika zbieżności siatki GCI.

Dodatek B omawia problemy związane ze stratami ciśnienia i współczynnikami strat miejscowych.

Dodatek C omawia bardziej szczegółowo (niż w rozdziale 4.) metodę mikroanemometrii obrazowej zwanej w skrócie  $\mu$ PIV.

W Dodatku D przedstawiono sposób wyznaczania lokalnej liczby Nusselta oraz średniej liczby Nusselta wzdłuż kanału.

W Dodatku E podano wzór określający współczynnik efektywności cieplnej na podstawie danych literaturowych.

#### 4. Uwagi merytoryczne

Przedstawiona w pracy tematyka dobrze wpisuje się w nurt prac, których celem jest uzyskanie wyników mogących mieć nie tylko teoretyczne, ale przede wszystkim praktyczne zastosowanie. Badanie przepływów płynów w mikrokanałach z przeszkodami z równoczesnym uwzględnieniem przepływu ciepła jest zadaniem trudnym, wymagającym sporej wiedzy i sporego zaangażowania z czym Doktorantka doskonale sobie poradziła.

Praca dotyczy zagadnień aktualnych i istotnych z praktycznego punktu widzenia. Doktorantka zajęła się w pracy nie tylko numeryczną symulacją zjawiska przepływu płynów przez mikrokanal z przeszkodami, ale podjęła się również doświadczalnej weryfikacji rozpatrywanego zagadnienia. Uważam, że jest to ważny, bardzo istotny element pracy. Bez weryfikacji doświadczalnej praca nie byłaby kompletna i nie można by mówić o wynikach, że są dobre czy złe bo można by je odnieść jedynie do literatury, gdzie, jak na razie, jest mało informacji dotyczących tego samego zakresu badań.

Uważam, że badania doświadczalne są na tyle istotnym elementem pracy, że powinny stanowić osobny rozdział.

Rozdział pierwszy nie budzi zastrzeżeń. Oprócz paru literówek i niefortunnnych sformułowań jest napisany poprawnie.

Rozdział drugi, moim zdaniem, zbyt pobieżnie opisuje ośrodek, który jest przedmiotem badań. Według mnie, należało dokładnie opisać przejście od równań (2.1)-(2.3) do równań (2.4)-(2.7) i szczegółowo wyjaśnić przyjęte założenia i uproszczenia. W zasadzie brak jest opisu ciała stałego modelującego przeszkodę podatną. Równanie (2.11) podane jako „równanie opisujące przemieszczenie przeszkody” jest w istocie różniczkowym równaniem ruchu ośrodka do którego należy dodać zależności geometryczne i związki fizyczne. Całość należy uzupełnić warunkami brzegowymi, tak jak tutaj – równania (2.12)-(2.13).

Uwagi do rozdziału trzeciego są podobne jak do pierwszego z jedną dodatkową uwagą: Jak wytłumaczyć przyjęcie wartości współczynnika sprężystości podłużnej (modułu Younga) równej 20 kPa dla ośrodka opisującego podporę podatną o gęstości  $8750\text{kg/m}^3$  (stal)? Jaki to ma sens fizyczny? Jak to się ma do ośrodka rzeczywistego? Jakie znaczenie mają uzyskane wyniki?

Odnosnie rozdziału czwartego, to w moim przekonaniu, powinien zostać podzielony na dwa rozdziały. Podpunkt 4.4 powinien zostać rozbudowany (np. dodać Dodatek C, bardziej szczegółowo opisać badania i wyniki) i stanowić odrębny rozdział ze względu na znaczenie dla wyników pracy. Zbyt mało uwagi poświęcono porównaniu wyników numerycznych i doświadczalnych. Od strony matematycznej nie wyznaczano wartości średniej ani odchylenia standardowego, nie badano korelacji.

Istotne znaczenie dla pracy ma również rozdział piąty gdzie pokazano wyniki badań dla mikrokanałów z sekwencjami przeszkód. Analiza uzyskanych wyników może stanowić podstawę do projektowania mikrokanałów z przeszkodami w warunkach przemysłowych.

W podsumowaniu brak analizy czy omówienia dokładności wyników symulacji numerycznych w odniesieniu do badań doświadczalnych i doniesień literaturowych. Brak jest też szerszego uzasadnienia poprawności przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników. To wszystko jest pośrednio zawarte w pracy, jednak moim zdaniem nie zostało odpowiednio wyeksponowane.

## 5. Uwagi szczegółowe

Praca jest ogólnie poprawnie napisana jednak w trakcie czytania można natrafić na literówki, niefortunne (niewłaściwe) sformułowania i pewne błędy edytorskie. Oto niektóre z nich.

- Spis treści: tytuł rozdziału 5. „Przepływ przez mikrokanal kanał...”
- Strona 10, wiersz 2 od dołu „ wpływ *elastyczności* ścianki..” – w nazewnictwie polskim mówi się o *podatności* względnie *odkształcalności*. To samo dotyczy „elastyczności” przeszkód, od str. 11 do końca pracy.
- Strona 18, podpunkt 2.1, wiersz 1 i 2 „...płaskie, *twarde* ścianki.” – używać *nieodkształcalne* lub *szttywne*.
- Strona 22, we wzorze (2.13) brak objaśnienia co oznacza „n”.
- Strona 26, wiersz 6 pod rys. 3.2, jest „gęstość płynu” powinno być „gęstość ciała stałego (przeszkody)”.
- Strona 28, opis rys. 3.3 w tekście niezgodny z rysunkiem; zamiast tytułu podrozdziału „Osiatkowanie modelu” napisać „Podział na elementy skończone”; wiersz 2 pod rys. 3.3 – zamiast „czterowęzłowych kwadratowych” raczej „czterowęzłowych prostokątnych”.
- Strona 29, we wzorze (3.5) i dalej, współczynnik zbieżności siatki GCI zamiast „CGI”.

- Strona 32 i dalej, nie dzielić rysunków pomiędzy stronami, jeżeli jednak - to konieczny jest podpis na każdej stronie.
- Strony 40-41, rys.4.8 – w celu porównania warto przedstawić wyniki w tej samej skali, to samo dotyczy rys. 5.6.
- Strona 89, w spisie literatury pozycje 32, 33 i 34 to ta sama praca.

## 6. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wnosi duży wkład i nową jakość do modelowania numerycznego mikrokanałów z pojedynczą przeszkodą i sekwencją przeszkód i stanowi bardzo silne wsparcie badań doświadczalnych. Doktorantka przy wykonaniu tej pracy wykazała się wiedzą zarówno od strony analiz numerycznych, jak i planowania i przeprowadzania eksperymentu.

Recenzent w przedstawionej do oceny pracy znalazł pewne błędy, które jednak nie wpływają na całościową ocenę merytoryczną. Należy podkreślić, że Doktorantka wykonała pracę doktorską na wysokim poziomie z widocznym dużym nakładem pracy potwierdzonym licznymi analizami oraz z wykorzystaniem aktualnych dostępnych metod i technik badawczych.

Mając powyższe na uwadze stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku) i **stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Kmiotek.**

