

Dr hab. inż. Joanna Wilk, prof. PRz  
Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska  
al. Powstańców Warszawy 12  
35 – 959 Rzeszów

Rzeszów, 16.II.2015r.

## **RECENZJA rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Małgorzaty Kmiotek pt. *Wpływ geometrii przeszkody na przepływ w mikrokanalach urządzeń technicznych***

sporządzona na zlecenie Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechniki Rzeszowskiej  
z dnia 14 stycznia 2015 roku

### **I. Ogólna charakterystyka pracy**

W pracy analizowano wpływ warunków geometrycznych związanych z umieszczonymi w mikrokanale przeszkodami na cechy hydrodynamiczne przepływu płynu w rozpatrywanym mikrokanale. Zasygnalizowano również wpływ geometrii przeszkód na zachodzącą podczas przepływu wymianę ciepła. Cechy hydrodynamiczne przepływu obrazują otrzymane numerycznie rozkłady pól prędkości wokół przeszkód oraz linie prądu z wyznaczonymi strefami wirowości. Wymianę ciepła reprezentują bezwymiarowe współczynniki przejmowania ciepła – liczby Nusselta.

Konwekcyjna wymiana ciepła podczas przepływu przez mikrokanaly występuje w wielu zagadnieniach technicznych, szczególne znaczenie ma przy projektowaniu wszelkiego rodzaju kompaktowych wymienników ciepła budowanych w mikroskali. Podejmowanie prac związanych z określeniem charakterystyk ciepło-przepływowych w takiego rodzaju urządzeniach jest obecnie bardzo przydatne. Mikrokanaly dyskutowane w realizowanej pracy mogą stanowić elementy mikrowymienników, tak więc, podjęta tematyka jest uzasadniona.

Rozprawa liczy 98 stron łącznie ze spisem treści, wykazem oznaczeń, bibliografią oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. Praca składa się z 6 rozdziałów zasadniczych oraz pięciu rozdziałów stanowiących dodatki. Układ pracy jest dość poprawny z tym, że treści zamieszczone w dodatkach powinny znaleźć się w rozdziałach zasadniczych. Ułatwiłoby to czytelnikowi analizę rozpatrywanych zagadnień, zważywszy, że informacje zawarte w dodatkach, szczególnie te związane z wymianą ciepła, stanowią ważny element problematyki podejmowanej w pracy. Również zagadnienia dotyczące metodyki badań eksperymentalnych należałoby umieścić w głównej części pracy.

W rozdziale 1 składającym się z pięciu podrozdziałów Autorka wprowadza w tematykę pracy, dokonuje przeglądu literatury problemu, podaje uzasadnienie przedmiotu pracy, formułuje cel oraz przedstawia zawartość rozprawy.

Rozdział 2 stanowi krótki opis zagadnienia badawczego w postaci prezentacji geometrii rozpatrywanego kanału z przeszkodami oraz równań opisujących konwekcyjny przepływ płynu.

W rozdziale 3 Autorka scharakteryzowała przyjętą do obliczeń metodę numeryczną, podała parametry geometryczne mikrokanalu z pojedynczą przeszkodą oraz z sekwencją przeszkód, a także niektóre parametry termofizyczne niezbędne do obliczeń.

Rozdział 4 dotyczy określenia charakterystyk przepływowych dla kanału z pojedynczą przeszkodą. W rozdziale tym przeanalizowano wpływ parametrów geometrycznych przeszkody na profile prędkości, wyznaczono pola prędkości w różnych przypadkach, wielkości stref wirowości oraz występujące straty ciśnienia. Oddzielnie rozpatrzono zagadnienie przepływu przez mikrokanal z przeszkodą elastyczną. Rozdział 4 zawiera również wyniki eksperymentalnej weryfikacji wykonywanych obliczeń numerycznych. Badania eksperymentalne przeprowadzone metodą cyfrowej anemometrii obrazowej dały w efekcie pola prędkości przy przepływie przez minikanal z przeszkodą sztywną przy zachowaniu podobieństwa geometrycznego i hydraulicznego. Opis eksperymentu wraz z wynikami badań mogłyby stanowić oddzielny rozdział, do którego należałoby również dołączyć informacje zawarte w dodatku, o czym wspomniano wcześniej. W ten sposób, zagadnienia badań doświadczalnych, jako bardzo istotne w prezentowanej pracy, zostałyby odpowiednio zaakcentowane.

W rozdziale 5 Autorka rozpatrzyła hydrodynamikę przepływu w przypadku mikrokanalu z sekwencją przeszkód. Analizowano wpływ różnych parametrów geometrycznych dotyczących kilku przeszkód na pola prędkości oraz wyznaczono straty ciśnienia. W rozdziale tym omówiono również zagadnienia wymiany ciepła w rozpatrywanym kanale z sekwencją przeszkód. Wyznaczono numerycznie rozkłady liczb Nusselta oraz określono współczynniki efektywności cieplnej. Podobnie jak w przypadku metody eksperymentalnej, zagadnienia dotyczące wymiany ciepła powinny stanowić odrębny rozdział zawierający również treści odpowiednich dodatków zamieszczonych na końcu pracy.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie pracy, w którym sformułowano wnioski końcowe, uwypuklono elementy nowości oraz zaproponowano kierunki dalszych badań.

Znajdująca się na końcu rozprawy bibliografia zawiera 109 pozycji literaturowych, w rzeczywistości jest ich 107, ponieważ pozycja 32 została powtórzona dwukrotnie jako 33 i 34. Wszystkie zamieszczone w wykazie pozycje zacytowano w tekście pracy. Osiem z nich jest autorstwa bądź współautorstwa Autorki rozprawy.

## II. Uwagi merytoryczne

### Uwaga ogólna

W pracy badano „wpływ geometrii przeszkody na przepływ w mikrokanalich urządzeń technicznych” co stanowi tytuł rozprawy. Z analizy przedstawionego przeglądu literatury problemu oraz podanej motywacji pracy wynika, że zawarty w tytule „przepływ” dotyczy zarówno hydrodynamiki płynu, jak i wymiany ciepła. Zagadnienie występowania intensyfikacji wymiany ciepła w kanałach z przeszkodami zostało bardzo mocno zaakcentowane w pierwszym rozdziale pracy, gdzie Autorka powołuje się na szereg pozycji literaturowych, w których wykazano wzrost liczb Nusselta w takich kanałach w skali „makro” w stosunku do kanałów gładkich. Również główny cel pracy sformułowany jako „określenie wpływu geometrii smukłej przeszkody umieszczonej na ścianie mikrokanalu na przepływ płynu i ciepła w aspekcie chłodzenia” stanowi o uwzględnieniu zagadnień wymiany ciepła w rozpatrywanym mikrokanale oraz ewentualnych możliwościach zastosowań uzyskanych wyników w, jak podaje Autorka, „układach chłodzących urządzeń technicznych”. W pracy,

poświęcono jednak tematyce wymiany ciepła niewiele miejsca (około 15 % objętości pracy) co zubaża efekt końcowy, na który składają się wartościowe wyniki badań hydrodynamicznych, o istotne aspekty przepływu ciepła. Brakuje wykresów przedstawiających rozkłady temperatur, analizy zagadnienia przy warunku brzegowym Neumanna (stała gęstość strumienia ciepła na ściance kanału), który to warunek znacznie częściej występuje w zagadnieniach technicznych, a także opracowania wzorów kryterialnych umożliwiających odniesienie do podobnych zjawisk zachodzących w kanałach konwencjonalnych.

#### Uwagi szczegółowe

1. W podanych na stronie 19 i 20, 21 uproszczeniach, warunek o nieprzenikalności ścianek jest błędny.
2. Równanie (2.3) przedstawiające bilans energii podczas konwekcyjnego przepływu płynu jest niekompletne. Brakuje w nim członu reprezentującego funkcję dyssypacji energii. Dla płynów o niedużych lepkościach i prędkościach znacznie mniejszych od prędkości dźwięku wielkość ta może być pominięta, jednak w równaniu (2.3) opisującym zagadnienie ogólne powinna się znaleźć. Również, występujący w tym równaniu symbol „ $q$ ”, ma niejednoznaczny opis, jaki jest jego wymiar? Podobny symbol występuje w uproszczonym równaniu energii (2.7) przyjętym w obliczeniach numerycznych. Nie jest jasne jaka wartość  $q$  została przyjęta w obliczeniach.
3. W założeniach upraszczających, na podstawie których zredukowano układ równań konstytutywnych (2.1)-(2.3) do układu (2.4)-(2.7) przyjętego do obliczeń, brakuje założenia co do pominięcia sił masowych oraz wspomnianej wyżej funkcji dyssypacji energii. Z podanej formy omawianych równań wynika, że zakłada się niezależność właściwości termofizycznych płynu (ciepło właściwe, lepkość, współczynnik przewodzenia ciepła) od temperatury, co również powinno znaleźć się w założeniach upraszczających.
4. Nie jest jasne w jaki sposób równanie (2.11) opisujące przemieszczenie przeszkody elastycznej zostało wykorzystane w rozwiązaniu problemu wpływu elastyczności przeszkody na przepływ w mikrokanale. Do równania tego wkradł się również błąd – zły zapis drugiej pochodnej po czasie, nie ma też wyjaśnienia symbolu „ $n$ ” w opisie warunków interakcji płynu z przeszkodą (wyrażenie (2.13)).
5. W opisie parametrów materiałowych przeszkody (str.26) podano, że „gęstość płynu” jest równa  $8750 \text{ kg/m}^3$ . Chyba chodziło o gęstość ciała stałego. Ten sam błąd powtórzono na stronie 43. Podany moduł Younga dla materiału przeszkody ma wartość 20 kPa. Wielkość ta wydaje się bardzo mała; np. w stosunku do stali, dla której moduł Younga jest rzędu 200 GPa - podana gęstość materiału przeszkody jest zbliżona do gęstości stali. O jaki materiał chodzi?
6. Na stronie 27 odniesiono się do rozbiegu hydraulicznego i termicznego występującego podczas konwekcyjnego przepływu przez kanały. Ze sformułowania problemu, nie bardzo wiadomo czy rozbieg ten ma być uwzględniony czy też nie (zdanie bezpośrednio pod tabelą 3.2). Zależność (3.4) na długość rozbiegu hydraulicznego nie jest prawidłowa. W równaniu tym wartość współczynnika występującego przed liczbą Reynoldsa powinna być o rząd wielkości większa. Jest to wzór, z którego można wyznaczyć długość rozbiegu hydraulicznego, a nie, jak podaje Autorka, również długość rozbiegu termicznego. W tym drugim przypadku należy uwzględnić dodatkowo wartość liczby Prandtla. Należałoby

- wyjaśnić tę sytuację w odniesieniu do założeń podawanych przez Autorkę. Nie wiadomo dla jakich wartości liczb  $Re$  określono, podane w tabeli 3.3, długości rozbiegów.
7. Nie jest jasne sformułowanie podane na początku rozdziału 4.1.2 (str. 35) „wykreślono profile prędkości  $V$  dla przepływu wzdłuż szerokości mikrokanalu w następujących odległościach (rys.4.4):  $d_1 = 0,0044$  m odpowiadającej wysokości kanału za przeszkodą oraz  $d_2 = 0,0048$  m, równej podwojonej wysokości kanału za przeszkodą”. O jakie odległości tu chodzi? Z rysunku 4.4 nic nie wynika. Z kolei na str. 37 podano, że „wpływ szerokości przeszkody na przepływ...analizowano w odległości  $d_2$  równej dwukrotnej wysokości mikrokanalu (rys.4.4)”. Również na str. 35 podano wartości stosunku  $w/h$  co jak wynika z oznaczeń jest stosunkiem szerokości przeszkody do wysokości przeszkody. Z podanych wartości szerokości przeszkód oraz stosunków  $w/h$  wynika, że wysokość przeszkody równałaby się wysokości kanału. Gdzie tutaj wkradło się niedopatrzenie?
  8. Z opisu problemu rozwiązania zagadnień hydraulicznych w rozpatrywanym mikrokanale z przeszkodami wynika, że zadawano stałą prędkość  $V$  na wlocie do kanału, jednakową w całym przekroju wlotowym. Jej wartość zależała od założonych liczb Reynoldsa. Należałoby tu podkreślić, że są to liczby  $Re$  na wlocie do kanału. Jaka zatem prędkość (oznaczona również symbolem  $V$ ) została przyjęta w obliczeniach współczynnika strat miejscowych (wzór (4.1))? W dodatku B na str. 77 wspomniano, że współczynnik strat odniesiony jest „najczęściej do średniej prędkości za przeszkodą” co nie daje jednoznacznej odpowiedzi na postawione wyżej pytanie.
  9. W analizie zagadnień wymiany ciepła w rozpatrywanym mikrokanale z przeszkodami powołano się na zależności podane w dodatku D. Wzór (D.2) przedstawia zależność na gęstość miejscowego strumienia ciepła przekazywanego pomiędzy ścianką kanału a płynem (w odległości  $x$  od wlotu kanału). W związku z tym temperatura płynu reprezentuje średnią wartość w przekroju  $x$ . Powinno to być uwzględnione w oznaczeniach i opisie. Wzory (D.3), (D4) i (D.5) zawierają błędy – niewłaściwe współrzędne, granice całkowania, różniczki.
  10. Przedstawiony na rys. 5.10 wykres zależności średniej liczby Nusselta od liczb Reynoldsa jest niekompletny. Nie ma na nim wartości  $Nu$  dla  $h/H=0.75$ . Z wykresu zbudowanego tylko dla dwóch wartości liczb  $Re$  nie można wnioskować o wzroście liczby Nusselta w kanale z przeszkodami wraz ze wzrostem liczb  $Re$ , jak podaje Autorka. Poza tym, w przypadku stosunku  $h/H=0.5$  wartość  $Nu$  wyraźnie spada.
  11. Jak należy rozumieć komentarz do wykresu na rys. 5.11 przedstawiającego wskaźnik efektywności cieplnej w funkcji odległości między przeszkodami, mówiący, że „przedstawione na rys.5.11 wyniki pokazują, że im wyższa wartość współczynnika efektywności cieplnej tym większa jest efektywność cieplna kanału”?
  12. Jak interpretować pojęcie „średniej lokalnej liczby  $Nu$ ” zawarte w opisie przedstawionego na rys.5.12 stopnia intensyfikacji wymiany ciepła?

### III. Uwagi redakcyjne

#### Uwagi ogólne:

1. W literaturze używane jest powszechnie sformułowanie „minikanaly”, a nie „milikanaly” jak stosuje Autorka.
2. W oznaczeniach różnych wielkości – w szczególności dotyczy to parametrów geometrycznych – używano raz czcionki prostej, raz kursywy. Powinno się to ujednoczyć.

3. W prezentowanych równaniach różniczkowych należałoby ujednolicić sposób zapisu pojęć matematycznych takich jak divergencja, gradient, laplasjan. Powinny to być albo oznaczenia słowne (div, grad), albo zapis symboliczny ( $\nabla$ ,  $\Delta$ ).
4. W pracy występują nieliczne błędy stylistyczne, interpunkcyjne i językowe.

Uwagi szczegółowe:

strona	wiersz, rys., wzór, tabela	jest	powinno być (uwagi)
5	5g	J/kg·K	J/(kg·K)
5, 85	6g, 10d	W/m <sup>2</sup> ·K	W/(m <sup>2</sup> ·K)
5, 85	9g, 9d	W/m·K	W/(m·K)
5, 65, 67, 73		Nuselta	Nusselta
5	7d	Re = V·H/μ	Re = ρ·V·H/μ
6	4d	Materiałami ..... są tworzywa sztuczne m.in. silikon, miedź, nikiel, mosiądz, stal, aluminium.	<i>miedź, nikiel,.. to metale!!</i>
7	5d	z przeszkodą	za przeszkodą
9	9d	...wysokość jest większa niż 6%	6% czego?
11	5g	..materiał, z którego wykonano..	co wykonano?
11	5g	kg/m	kg/m <sup>3</sup>
14	5g	ciepano-	cieplno-
14	12g	analizę wpływu elastyczności...	wplywu na co?
16	3d	pojedyncza	pojedynczą
18	Rys.2.1	<i>brak osi x</i>	
19	3g	anał	kanał
19,20,21	9d, 9d, 4d	ścianki przeszkody	ścianki przeszkody nieprzenikalne
23	15g	mikrokanatów	mikrokanalach
25	12d	szerokość przeszkody o kształcie trójkąta	który to wymiar?
26	5g	o szerokości s	o szerokości w
27	Tab.3.1–opis	wielkości w/h	wielkości h/H
27	Tab.3.2– opis	wielkości h/H geometrię	wielkości w/h charakteryzujące geometrię
28	Rys.3.3	<i>brak układu współrzędnych, o którym mowa w opisie rysunku</i>	
29	Wzór (3.5)	<i>brak wyjaśnienia parametru p</i>	
32	2d, 3d	szerokość s	szerokość w
32, 34	Rys.4.2 i 4.3 podpis	a,b) h/H=0,5, c,d) h/H=0,5, e,f) h/H=0,5	powinny być różne wartości h/H
35	4g	parametru h/H	parametru w/h
35	Rys.4.4	<i>brak na rysunku zaznaczonych d<sub>1</sub> i d<sub>2</sub></i>	
35	2d	szerokość przeszkody s	szerokość przeszkody w
35-36	Rys.4.5	<i>na wszystkich rys.: a), b), c), d), e), f) powinno być w/h, a nie s/h</i>	
37	2g	rys 4.7 – 4.8	rys. 4.5 – 4.6
37	4g	rys. 4.5 c, d	rys. 4.5 e, f

37-38	Rys.4.6	<i>na wszystkich rys.: a), b), c), d), e), f) powinno być w/h , a nie s/h</i>	
39	5g	rys.4.17	rys.4.7
39	5g, 6g	$s = 50\mu\text{m}$	$w = 50\mu\text{m}$
41, 43	5d, 6d	układ równań (2.3)-(2.7)	układ równań (2.4)-(2.7)
42	1g	pojedyncza	pojedynczą
42	2d	maksymalnie maksymalnie	maksymalnie
44, 46	1d, 5g	$d_1 = 0.0044 \dots d_2 = 0.0048$	$d_1 = 0.0044\text{m} \dots d_2 = 0.0048\text{m}$
45	5g	dobranych	dobrane
45	9d, 12d	$d_w$	$d_w$
48	3g	$V = 0.125 \text{ m/s}$	$V = 0.25 \text{ m/s}$
48	4d	przepływ	przepływu
52, 53	3d oraz Rys.4.18podpis	<i>nie ma zgodności w komentarzu i opisie rysunku; szerokość przeszkody była równa 200 czy 300<math>\mu\text{m}</math>?</i>	
53	3d	z zdjęć	ze zdjęć
54	3g	dokonano ubezwymiarzenia poszczególnych parametrów	wprowadzono wielkości bezwymiarowe charakteryzujące poszczególne parametry
56	1g	mikrokanal kanał	mikrokanal
56	2d	geometri	geometrii
58	4g	tab. 5.)	tab. 5.1
62	5g	..., że wzrostem	..., że ze wzrostem
60, 62	1d	$V = 0.125 \text{ m/s}$ ( $Re = 20$ )	<i>błędna jest albo prędkość, albo Re</i>
63	Rys.5.7	<i>Jak rozumieć zapis <math>\Delta P \times [\text{Pa}]</math> ?</i>	
64	14g	układ równań (2.4)-(2.8)	układ równań (2.4)-(2.7)
66	3d	dla różnych wysokościach	dla różnych wysokości
67	4g	porównano z przepływem mikrokanalu	porównano z przepływem w mikrokanale
68	8g	na wlocie go mikrokanalu	na wlocie do mikrokanalu
69	Rys.5.12	parametry wprzeszkód	parametry przeszkód
69	1d	konfiguracją	konfigurację
70	3d	konfiguracją geometrii z kanału	...konfiguracją geometrii kanału
71	11d, 10d	należało należało...takim aspekcie	należało.....w takim aspekcie
72	12g, 13g	60 C, 20 C	60 °C, 20 °C
73	7d	zasadne zasadne	zasadne
79	Rys.C.1	<i>opis na rysunku powinien być w języku polskim</i>	
80	7g	(B.1)	(C.1)
83	7g	pokazuje przedstawiono	przedstawiono
83	7d, 5d	w w, sprzężonym	w, sprzężonym
84	1d	<i>całkowity błąd pomiarów wynosi 5 czego?</i>	
97	9g	należało należało	należało
97	11g	$H$ – wysokość mikrokanalu	$w$ – szerokość przeszkody
98	13g	$H$ the height of a microchannel	$w$ – the width of the obstacle
98	1d	obstructs	disrupts

#### **IV. Ocena pracy**

Autorka podjęła w pracy oryginalny temat określenia wpływu szczególnych parametrów geometrycznych cechujących mikrokanal na zachodzące zjawiska przeplywowo-cieplne. Na geometrię rozpatrywanego mikrokanalu skladały się umiejscowione w nim przeszkody o różnych kształtach, wysokościach oraz różnym rozmieszczeniu. Dokonano również oceny wpływu elastyczności przeszkód na pola prędkości charakteryzujące przepływ w mikrokanale. Cel pracy został osiągnięty na drodze obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych oraz badań doświadczalnych, które stanowiła wizualizacja przepływu czynnika metodą anemometrii obrazowej. Autorka przeprowadziła szereg symulacji numerycznych, na bazie których dokonała analizy zjawisk przeplywowo-cieplnych zachodzących w mikrokanale z przeszkodami. Rezultaty obliczeń dostarczyły bogatego materiału, dzięki któremu wyznaczono pola prędkości, strefy wirowości, straty ciśnienia, bezwymiarowe współczynniki przejmowania ciepła oraz wskaźniki efektywności cieplnej. Wykonane badania eksperymentalne umożliwiły weryfikację wyników analiz numerycznych. Autorka bardzo dobrze opanowała techniki obliczeniowe jak również badawczą technikę anemometrii obrazowej. Wykazała się znajomością światowej literatury związanej z rozpatrywanymi zagadnieniami. Przedstawione w recenzji uwagi merytoryczne i redakcyjne nie przesłaniają istotnych wartości pracy i znaczenia dla zastosowań praktycznych.

#### **V. Wniosek końcowy**

Praca doktorska mgr inż. Małgorzaty Kmiotek spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim.

Przedstawione badania numeryczne i eksperymentalne oraz opracowana na ich podstawie identyfikacja procesów przeplywowych w mikrokanale z przeszkodami są oryginalne. Uzyskane wyniki mają również znaczenie praktyczne.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Małgorzaty Kmiotek do publicznej obrony swojej rozprawy doktorskiej.

*Joanna Wilk*