

MAREK DZIUBIŃSKI

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

# Modelowanie przepływów wielofazowych w mikrokanalach

## Wprowadzenie

Jednym z najnowszych kierunków badań przepływów wielofazowych jest opis zjawisk zachodzących podczas takich przepływów w mini- i mikrokanalach. Wynika to z naturalnych potrzeb dynamicznie rozwijających się badań w zakresie nanotechnologii. Przepływy dwufazowe ciecz-gaz w mikrokanalach występują bowiem w niezmiernie efektywnych wymiennikach ciepła, chłodzeniu elementów mikroelektroniki, technice kosmicznej, zagadnieniach bioinżynierii i biotechnologii oraz procesach realizowanych w nanoreaktorach. Natomiast przepływ mieszanin ciecz-ciecz w mikrokanalach nabiera ostatnio dużego znaczenia w procesach przetwórstwa emulsji i dyspersji w różnych dziedzinach przemysłu.

Mianem mikrokanalów przyjmuje się nazywać przewody o średnicy/średnicy zastępczej zbliżonej lub mniejszej od stałej Laplace'a [1]. Dla mieszaniny woda-powietrze pod ciśnieniem atmosferycznym stała ta wynosi 2,73 mm. Inne kryteria określające rozmiary mikrokanalów przedstawiono w monografii [2]. Ze względu na bardzo złożony i nie w pełni zbadany mechanizm przepływu mieszanin dwufazowych w mini- i mikrokanalach wyżej wymienione kryteria należy traktować jako orientacyjne. W niektórych pracach np. [3] przyjmuje się, że mini i mikro kanały mają następujące rozmiary średnic (lub średnic zastępczych  $D_h$ ): minikanaly  $200 \mu\text{m} < D_h < 3 \text{ mm}$ , zaś mikrokanaly  $10 \mu\text{m} < D_h < 200 \mu\text{m}$ .

W mikrokanalach obserwowane są znaczące różnice w hydrodynamice przepływu mieszaniny dwufazowej (struktury przepływu, udziały faz, spadki ciśnienia) oraz procesach wymiany ciepła w stosunku do analogicznych procesów w przewodach o większych średnicach. W przepływach w mikrokanalach siły grawitacyjne i siły wyporu mają bowiem mniejsze znaczenie (wartości liczby  $Eötvösa$  są zazwyczaj bardzo małe  $Eö < 1$ ) od sił napięcia powierzchniowego i sił adhezji, które są dominujące, co czyni parametry takiego przepływu prawie niezależnymi od orientacji mikrokanalu (nachylenie kanału do poziomu). Ponadto w kanałach o średnicach rzędu 10–100  $\mu\text{m}$  obserwuje się przejścia od przepływu laminarnego do turbulentnego dla wartości liczby  $Reynoldsa$  mniejszej od wartości klasycznej i nieznacznie mniejsze wartości współczynnika oporów przepływu w zakresie przepływu laminarnego niż uzyskiwane w kanałach o większych średnicach.

W ostatnich latach opublikowano wiele prac dotyczących hydrodynamiki przepływu mieszanin dwufazowych w mini i mikrokanalach m.in. [4–18]. Większość badań wykonano w kanałach o rozmiarach od około jednego do kilku milimetrów. Bardzo nieliczne prace dotyczą kanałów o rozmiarach rzędu 100  $\mu\text{m}$  i mniejszych. Mediami doświadczalnymi w wykonanych badaniach były głównie mieszaniny dwufazowe woda-powietrze.

Celem pracy jest przedstawienie aktualnego stanu badań najważniejszych parametrów przepływu dwufazowego ciecz-gaz i ciecz-ciecz w mikrokanalach tzn. struktur przepływu, udziału faz oraz spadków ciśnienia.

## Struktury przepływu

W ostatnich latach ukazało się wiele prac dotyczących struktur przepływu dwufazowego ciecz-gaz w mikrokanalach o średnicach zastępczych rzędu 1 mm lub mniejszych m.in. [2, 4, 6, 9–11, 16]. W kanałach o tak małych rozmiarach – oprócz klasycznych struktur – występują w pewnych warunkach struktury przepływu, których nie obserwuje się w przewodach o większych rozmiarach. Obserwuje się tak nietypowe struktury jak: przepływ pęcherzykowo-rzutowy (*bubble-train slug*) lub (*cap-bubbly flow*), przepływ pierścieniowo-rzutowy, odmiana przepływu pęcherzykowego (*capillary bubble flow*) oraz przepływ rzutowo-kropelkowy (*slug-droplet flow*) i przepływ pierścieniowo-kropelkowy (*annular-droplet flow*), w którym w fazie gazowej przepływają małe kropelki cieczy.

W kilku pracach podejmowane były próby opracowania map przepływu mieszanin dwufazowych przepływających w mikrokanalach [6, 9, 10, 16]. Zgodność poszczególnych map z danymi doświadczalnymi autorów, którzy te mapy zaproponowali jest typowa dla przepływu dwufazowego. Natomiast porównanie różnych map przepływu wskazuje na spore rozbieżności między nimi. Jest więc rzeczą oczywistą, że zagadnienie eksperymentalnych map przepływu dwufazowego w mikrokanalach wymaga dalszych intensywnych prac badawczych, szczególnie dla mikrokanalów o rozmiarach mniejszych od 1 mm.

W nielicznych pracach podjęto próby porównania modeli teoretycznych *Taitela* i *Duklera* [8] oraz *Barnea*, *Luninski*, *Taitela* [5] przewidujących kształt i położenie linii granicznych map z danymi doświadczalnymi dla mikrokanalów. Wyżej wymienione modele opracowane dla przepływu dwufazowego w przewodach o większych średnicach całkowicie zawodzą przy ich zastosowaniu do mikrokanalów. Potwierdzają to między innymi prace *Tripletta* [9] i *Xu* [10].

Natomiast w przypadku przepływu mieszanin ciecz-ciecz w mikrokanalach do chwili obecnej opublikowano jedynie wstępne prace dotyczące struktur przepływu oraz dwie mapy przepływu opracowane dla wąskiego zakresu danych doświadczalnych [12, 13].

## Udziały faz

Specyficzna geometria mikrokanalów oraz dominujące znaczenie napięcia powierzchniowego powoduje powstawanie

w pewnych zakresach przepływu znaczących anomalii w wielkości udziału faz w przepływającej mieszaninie dwufazowej ciecz-gaz w porównaniu z kanałami o większej średnicy. Ogólnie można stwierdzić, że przy dużej ilości przepływającej cieczy udział fazy gazowej w przepływie dwufazowym – w porównaniu do przepływów dwufazowych w większych kanałach – jest zazwyczaj znacznie mniejszy. Przy czym różnice w obserwowanych wielkościach udziału faz wzrastają ze zmniejszeniem rozmiaru kanału. Są one szczególnie widoczne dla kanałów o rozmiarach mniejszych od 1 mm.

Udział gazu w przepływającej w mikrokanalach mieszaninie dwufazowej był przedmiotem niezbyt dużej liczby prac badawczych m.in. [2, 6, 7, 11, 14, 16, 17]. Dane doświadczalne opisywane są za pomocą równań korelacyjnych, modelu przepływu homogenicznego mieszaniny dwufazowej lub modelu poślizgowego. Przy czym model homogeniczny został potwierdzony przez dane doświadczalne jedynie dla mikrokanalów o wymiarach nieznacznie większych od 1 mm i to wyłącznie dla przepływu pęcherzykowego i rzutowego. Model ten całkowicie zawodzi w przypadku innych struktur przepływu. Natomiast dla mikrokanalów o rozmiarach znacznie mniejszych od 1 mm model homogeniczny daje w szerokim zakresie przepływu błędy dochodzące do kilkuset procent.

Należy podkreślić, że opublikowane badania zostały wykonane wyłącznie dla mieszanin woda-powietrze i woda-azot. Interesującym byłoby wykonanie pomiaru udziału faz w przepływie w mikrokanalach dla cieczy o znacznie różniących się lepkościach i napięciach powierzchniowych cieczy.

### Opory przepływu

Zagadnienie określania spadku ciśnienia przy przepływie mieszanin dwufazowych w mikrokanalach jest przedmiotem nielicznych prac badawczych m.in. [2, 4, 6, 14–18]. W pracach tych proponuje się różne sposoby korelacji danych doświadczalnych. Najczęściej są nimi stosowanie modelu homogenicznego [6, 14, 17] lub korelacji *Lockharta-Martinello* m.in. [16–18] połączonej z modyfikacją stałej występującej w tej korelacji.

Podjęto również próbę opisu danych doświadczalnych za pomocą korelacji *Friedela* [15] oraz zaproponowano jeden prosty model umożliwiający określanie gradientu ciśnienia w przepływie dwufazowym w mikrokanale o przekroju prostokątnym [14].

Zastosowanie klasycznej korelacji *Lockharta-Martinello* nie daje zadowalających wyników opisu danych doświadczalnych dotyczących przepływu mieszanin dwufazowych w mikrokanalach m.in. [2, 4, 6]. Autorzy wielu prac stwierdzają, że stała *C* korelacji *Lockharta-Martinello* jest zależna od rozmiarów szczeliny mikrokanalu i prędkości przepływu obu faz [2, 6, 16, 18], zaś *Mishima* [16] podkreśla, że stała *C* powinna być modyfikowana dla przewodów o średnicy  $D < 5$  mm.

### Wnioski i kierunki dalszych badań

Z przedstawionego powyżej skrótego przeglądu literatury dotyczącego stanu badań hydrodynamiki przepływu mie-

szanin dwufazowych ciecz-gaz i ciecz-ciecz w mikrokanalach wynika, że żadne z podstawowych zagadnień takich przepływów a więc: określanie warunków formowania się poszczególnych struktur przepływu, określanie udziału faz oraz spadku ciśnienia nie zostało do tej pory zadowalająco opracowane. Nie opracowano uniwersalnych map przepływu, zaś opublikowane równania umożliwiające określenie udziału faz i spadków ciśnienia są słuszne jedynie w wąskim zakresie przepływu dwufazowego. Szczególnie mało badań wykonano dla przepływu mieszanin ciecz-ciecz.

Większość badań została wykonana wyłącznie dla układu woda-powietrze. Konieczne jest więc zbadanie wpływu lepkości i napięcia powierzchniowego cieczy oraz geometrii kanału na mechanizm przepływu mieszanin dwufazowych w mikrokanalach. Szczególny brak danych doświadczalnych daje się odczuć dla kanałów o rozmiarach rzędu dziesiątek i setek  $\mu\text{m}$ . Do chwili obecnej nie opublikowano badań przepływu cieczy nienewtonowskich w mikrokanalach. Nie opracowano również uniwersalnych modeli przepływu dwufazowego szczególnie dla mikrokanalów o wymiarach mniejszych od 1 mm. Występujące bowiem w takich kanałach warunki przepływu oraz tworzące się struktury przepływu znacząco różnią się od przepływu dwufazowego w przewodach o większych średnicach. Konieczne jest również opracowanie metod modelowania hydrodynamiki przepływu dwufazowego w mikrokanalach z uwzględnieniem technik CFD.

### LITERATURA

1. X.E. Peng, B.X. Wang: Int. J. Heat Mass Transfer, 36, 3421 (1993).
2. M. Dziubiński: Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-gaz, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2005.
3. S.G. Kandlikar: Exp. Therm. Fluid Sci., 26, 389 (2002).
4. S. Saisorn, S. Wongwises: Renewable@Sustainable Energy Reviews, 12, 824 (2008).
5. D. Barnea, Y. Luninski, Y. Taitel: Can. J. Chem. Eng., 61, 617 (1983).
6. A. Kawahara, P.M.-Y. Chung, M. Kawaji: Int. J. Multiphase Flow, 28, 1411 (2002).
7. M. Ali, M. Sadatomi, M. Kawaji: Can. J. Chem. Eng., 71, 657 (1993).
8. Y. Taitel, A.E. Dukler: AIChE J., 22, 47 (1976).
9. K.A. Triplett, S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abel-Khalik, D.L. Sadowski: Int. J. Multiphase Flow, 25, 377 (1999).
10. J.L. Xu, P. Cheng, T.S. Zhao: Int. J. Multiphase Flow, 25, 411 (1999).
11. J. Sowiński, M. Dziubiński, H. Fidos: Arch. Mech., 61(1), 29 (2009).
12. M.N. Khasid, D.W. Agar: Chem. Eng. Journal, 131, 1 (2007).
13. P. Dreyfus, B. Tabeling, H. Willaime: Phys. Res. Lett., 90, 1445 (2003).
14. M. Fourar, S. Boris: Int. J. Multiphase Flow, 21, 621 (1995).
15. L. Friedel: European Two-Phase Flow Group Meeting, Paper E2, Ispra, Italy 1979.
16. K. Mishima, T. Hibiki: Int. J. Multiphase Flow, 22, 703 (1996).
17. K.A. Triplett, S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abel-Khalik, B.N. McCord: Int. J. Multiphase Flow, 25, 395 (1999).
18. M.W. Wambsganss, J.A. Jendrzejczyk, N.T. Obot: Exp. Therm. Fluid Sci., 5, 40 (1992).

**Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy nr N N208 2943 33.**