

Marek DZIUBIŃSKI, Anna MORAWIAK

e-mail: dziubin@wipos.p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Struktury przepływu mieszanin dwufazowych ciecz – ciecz w mikrokanalach

Wstęp

W ostatnich latach jednym z bardzo dynamicznie rozwijających się dziedzin współczesnej nauki stały się technologie w mikro- i nanoskali. Zagadnienie hydrodynamiki przepływu mieszanin dwufazowych w skali mikro i nano znajduje się we wstępnym etapie badań.

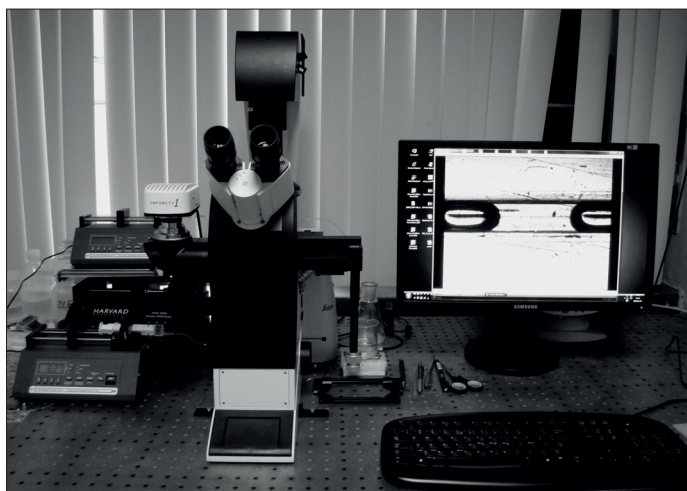
Jednym z istotnych zagadnień związanych z przepływem dwóch nie mieszających się cieczy, obok udziału faz oraz oporów przepływu mieszanin ciecz – ciecz, jest znajomość zakresów pojawienia się określonych struktur przepływu [1, 2]. Graficzny obraz zakresów występowania określonych struktur przedstawia tzw. mapa przepływu [3].

Liczba opracowań dotyczących struktur pojawiających się podczas przepływu dwufazowego ciecz – ciecz jest stosunkowo niewielka. Analiza danych literaturowych z tego zakresu potwierdza przekonanie, że nie ma zgodności co do liczby wyróżnionych struktur [4]. Porównanie takich wyników jest niezwykle trudne ze względu na stosowanie przez różnych autorów własnego nazewnictwa struktur. Kompleksowe badania struktur przepływu mieszanin ciecz – ciecz przeprowadzających w poziomym przewodzie o średnicach kilkudziesięciu milimetrów wykonali Hapanowicz [5], Nader i Mewes [6], Fujii [7]. Nie ma natomiast badań struktur takich przepływów w mikrokanalach.

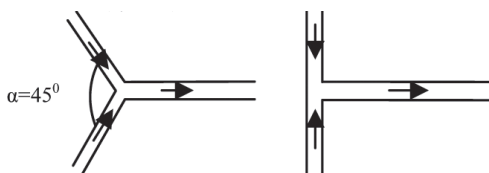
Badania doświadczalne

Schemat stanowiska doświadczalnego stosowanego do badań przedstawiono na rys. 1.

Pomiary przeprowadzono w mikrokanalach wykonanych z plexi oraz w szklanych kapilarach w kształcie litery T i Y o wymiarach 1 mm i 0,5 mm (Rys. 2).



Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne mikroprzepływów w Katedrze Inżynierii Chemicznej



Rys. 2. Schemat mikrokanalów użytych do badań

Mikroprzepływ wymuszony był za pomocą pomp strzykawkowych PHD 2000 (*Harvard Apparatus*) oraz NE300 (*New Era Pumps*) które wyposażono w jednorazowe strzykawki *B/Braun (Injekt Luer Solo*, Niemcy). Obraz z imersyjnego mikroskopu *Leica DMI 3000B* rejestrowany był za pomocą kamery *Lumenera Infinity 1* i przekazywany do pamięci komputera PC.

Jako mediów doświadczalnych użyto wody demineralizowanej (faza hydrofilowa) oraz olejów o zdecydowanie różniących się właściwościach fizykochemicznych – faza hydrofobowa. Zastosowanie olejów o dużym spektrum właściwości pozwoliło na uzyskanie szerokiego zakresu danych doświadczalnych. Zakres natężeń przepływu olejów Q_o wynosił 0,06–15,00 [ml/h], zaś wody $Q_w = 0,01$ –10,00 [ml/h].

W tabeli 1 przedstawiono relacje gęstości oraz lepkości stosowanych olejów względem wody w temperaturze pokojowej. Jak z niej wynika gęstość olejów była zbliżona do gęstości wody, natomiast wartości lepkości w stosunku do wody znacznie się różniły. Zatem tworzyły się zarówno układy o porównywalnej lepkości faz, jak i układy wysoko- i nisko- lepkie.

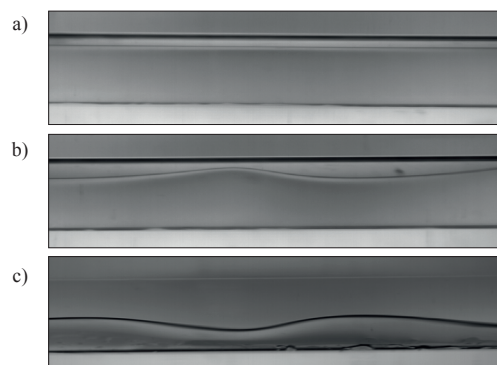
Tab. 1. Charakterystyka użytych mediów doświadczalnych

Układ	ρ_o/ρ_o –	η_o/η_o –
1	1,01	560
2	0,89	63
3	0,82	2,5
4	0,96	95,5

Do badań dobrano takie oleje, które charakteryzowały się dużą odpornością na emulsyfikację z wodą, co pozwoliło uniknąć tworzenia się układów emulsyjnych.

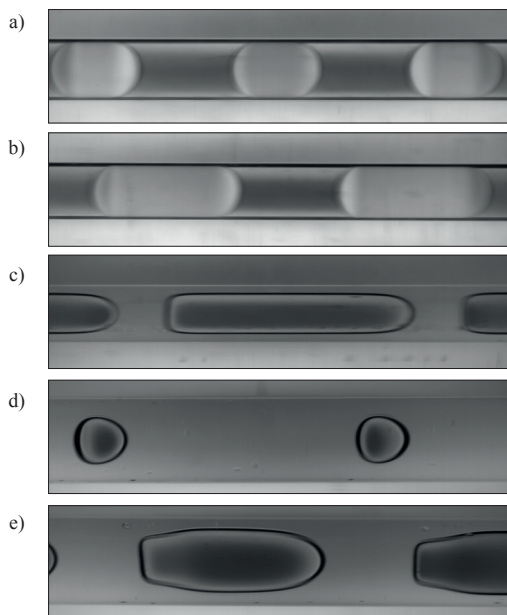
Konstrukcja stanowiska doświadczalnego pozwalała na obserwację tworzących się struktur bezpośrednio pod mikroskopem. Wyodrębniono następujące struktury:

1. Przepływ warstwowy – olej i woda przepływają w oddzielnych warstwach w dolnej lub górnej strefie mikrokanalu (Rys. 3). Grubość warstw zmieniała się w zależności od udziału obu faz. Struktura ta pojawiała się przy zdecydowanej przewadze fazy olejowej. Wyróżniono dwie fazy ciągle: w górnej części mikrokanalu fazę wodną, a w dolnej fazę olejową.

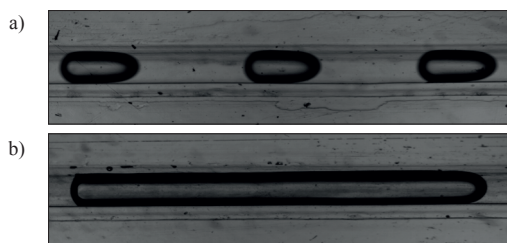


Rys. 3. Przepływy warstwowe zaobserwowane dla układu 1 w szklanym mikrokanale $d = 0,5$ mm w kształcie litery T: a) $Q_w = 1,27$ [ml/h], $Q_o = 3,64$ [ml/h], b) $Q_w = 0,85$ [ml/h], $Q_o = 2,20$ [ml/h], c) dla mikrokanalu $d = 1$ mm w kształcie litery T: $Q_w = 10,71$ [ml/h], $Q_o = 3,21$ [ml/h]

2. Przepływ kropłowy – olej występuje w postaci kulistej lub elipsoidalnej kropli o różnych rozmiarach zawieszonych w płynie tworzącym fazę zdyspergowaną (Rys. 4 i 5). Opisująca struktura występowała przy małym objętościowym natężeniu przepływu fazy wodnej. Charakterystyczny dla wszystkich ww. układów, w których fazą ciągłą stanowiła woda, zaś rozproszoną – olej.



Rys. 4. Przepływ kropłowy zaobserwowany dla układu 1 w szklanym mikrokanale $d = 0,5$ mm w kształcie litery T: a) $Q_w = 0,85$ [ml/h], $Q_o = 1,69$ [ml/h], b) $Q_w = 1,98$ [ml/h], $Q_o = 3,88$ [ml/h] c) w mikrokanale $d = 0,5$ mm w kształcie litery Y: $Q_w = 0,85$ [ml/h], $Q_o = 0,47$ [ml/h], d) w mikrokanale $d = 1$ mm w kształcie litery T: $Q_w = 0,13$ [ml/h], $Q_o = 3,21$ [ml/h], e) $Q_w = 1,29$ [ml/h], $Q_o = 3,21$ [ml/h]



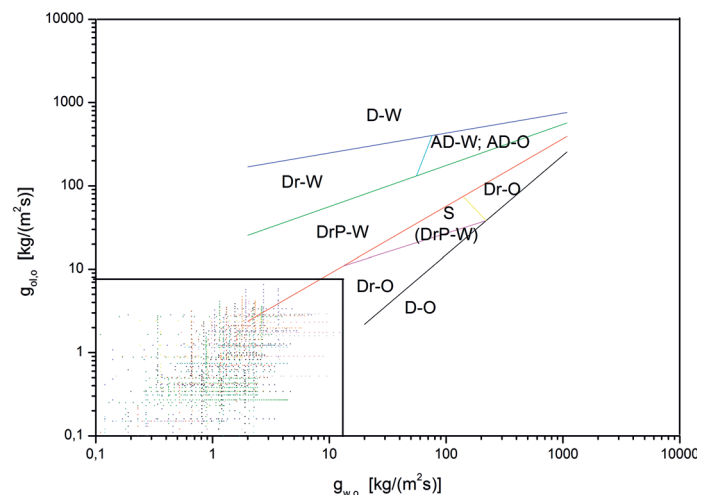
Rys. 5. Przepływ kropłowy zaobserwowany dla układu 2 w mikrokanale z pleksi $d = 0,5$ mm w kształcie litery Y: a) $Q_w = 0,50$ [ml/h], $Q_o = 2,26$ [ml/h], b) $Q_w = 0,25$ [ml/h], $Q_o = 0,18$ [ml/h]

3. Przepływ pierścieniowy – po ściankach mikrokanalu płynie woda, natomiast środek zajmował odpowiednio olej (Rys. 6). Przepływ ten pojawiał się przy porównywalnych objętościowych natężeniach przepływu obu faz płynących w mikrokanale.



Rys. 6. Przepływu pierścieniowego zaobserwowany dla układu 1 w szklanym mikrokanale $d = 0,5$ mm w kształcie litery T: $Q_w = 3,87$ [ml/h], $Q_o = 2,56$ [ml/h]

Na rys. 7 porównano uzyskane dane doświadczalne z mapą struktur przepływu uzyskana przez Hapanowicza dla mieszanin dwufazowych ciecz – ciecz w przewodach o średnich rzędu kilkudziesięciu milimetrów. Symbole struktur przedstawionych na rys. 3 są zgodne z oryginalną mapą Hapanowicza [3].



Rys. 7. Uogólniona mapa struktur przepływu wg [3]

Zarówno mapa Hapanowicza jak i inne mapy opublikowane w literaturze okazały się nieprzydatne dla określania warunków występowania struktur przepływu ciecz – ciecz w mikrokanalach.

Wnioski

Analizując wyniki badań doświadczalnych można sformułować następujące wnioski:

- dla zakresu wykonanych badań obserwowano następujące struktury przepływu mieszanin ciecz – ciecz w mikrokanalach: przepływ kropłowy, warstwowy oraz pierścieniowy, a więc struktury analogiczne do uzyskanych w przewodach o większych średnicach;
- dla tych samych struktur przepływu (kropłowy, warstwowy, pierścieniowy) obserwowano znacznie różniące się udziały poszczególnych faz w mieszaninie dwufazowej;
- uogólniona mapa przepływu Hapanowicza nie obejmuje swoim zakresem struktur dwufazowych ciecz – ciecz uzyskiwanych w mikrokanalach;
- konieczne jest opracowanie oryginalnych map przepływu mieszanin ciecz – ciecz przepływających w mikrokanalach.

LITERATURA

- [1] M.J.H.Simmons, B.J. Azzopardi: Int. J. of Multiphase Flow **27** (2001).
- [2] A. Wegmann, P. R. von Rohr: Int. J. of Multiphase Flow **32** (2006).
- [3] J. Hapanowicz: Przepływ ciekłych układów dyspersyjnych, Studia i monografie, Opole, z. 204 (2007).
- [4] X. – X. Xu: J. of Petroleum Science & Eng. **59** (2007).
- [5] J. Hapanowicz, L. Troniewski: Inż. Chem. i Proc. **18**, 4 (1997).
- [6] M. Nadler, D. Mewes: Int. J. Multiphase Flow **23**, 55 (1997)
- [7] T. Fujii: Int. Conf. Multiphase Flows 195, Tsukuba, Japan 1991.

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