

Adam GWIAZDA, Anna KAPTUR, Marek DZIUBIŃSKI

e-mail: adam0775@o2.pl

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

Udział faz w przepływie ciecz-ciecz w mikrokanale

Wstęp

Mechanika płynów od wielu lat zajmuje się badaniem przepływów dwufazowych. Najlepiej zbadanym i opisanym w literaturze rodzajem przepływu dwufazowego jest przepływ mieszanin ciecz-gaz, natomiast parametry przepływu mieszanin ciecz-ciecz są znacznie słabiej poznane. Wynika to ze skomplikowanej i trudnej do zbadania struktury takiego przepływu oraz mniejszego zakresu, jego praktycznych zastosowań.

W niniejszej pracy podjęto próbę opisu hydrodynamiki przepływu dwufazowego ciecz-ciecz w mikrokanalach. Na podstawie wykonanych badań doświadczalnych, przeanalizowano zjawisko poślizgu faz w przepływie mieszaniny ciecz-ciecz, oraz określono udział fazy rozproszonej i porównano go z udziałem wlotowym. Dane doświadczalne zostały porównane z równaniami korelacyjnymi, opublikowanymi w literaturze przedmiotu.

Przegląd równań korelacyjnych

W literaturze przedmiotu zaproponowano kilka równań opisujących udział faz w przepływającej mieszaninie dwufazowej ciecz-ciecz, w kanałach o średnicach od kilku milimetrów do kilkunastu centymetrów. Do określenia udziału fazy rozproszonej w przepływającej mieszaninie dwufazowej ciecz-ciecz [Hapanowicz, 2007] zaproponował równanie:

$$\alpha = \frac{u_{poz}}{1,095U_{c-c}} \quad (1)$$

gdzie:

α – rzeczywisty udział objętościowy fazy rozproszonej, [-]
 u_{poz} – prędkość pozorna fazy rozproszonej, [m/s]
 U_{c-c} – prędkość pozorna mieszaniny dwufazowej, [m/s]

Fuji i in. w swojej pracy [1991] również założyli, że udział fazy rozproszonej jest funkcją prędkości pozornej mieszaniny, a także prędkości pozornej fazy rozproszonej, proponując następujące równanie korelacyjne:

$$\alpha = \frac{u_{poz}}{0,92U_{c-c}} \quad (2)$$

Serizawa i in. [2002], a także Zhao i Bi [2001] podczas swych badań nad przepływami dwufazowymi w mikrokanalach udział fazy rozproszonej wyznaczają wychodząc z klasycznego równania Armandy. W założeniu tego modelu udział fazy rozproszonej jest funkcją udziału wlotowego tej fazy:

$$\alpha = C\xi \quad (3)$$

gdzie:

ξ – udział wlotowy fazy rozproszonej, odniesiony do strumieni objętościowych faz, [-]
 C – stała, [-] zmieniająca swą wartość w zależności od współczynników wyznaczanych doświadczalnie, zależnych od średnicy mikrokanalów

Zhao i Bi [2001] określają udział fazy rozproszonej równaniem:

$$\alpha = 0,838\xi \quad (4)$$

Serizawa i in. [2002] również powołują się na klasyczny model Armandy (3) z tą różnicą, że współczynnik C określany jest w zależności od charakteru przepływu (pęcherzykowy, rozdzielony, pierścieniowy).

Kawahara i in. [2009] w swojej pracy proponują równanie:

$$\alpha = \frac{0,03\sqrt{\xi}}{1 - 0,97\sqrt{\xi}} \quad (5)$$

Zastosowali to równanie do opisu danych doświadczalnych dotyczących przepływu mieszaniny ciecz-gaz (woda-azot) w mikrokanalach o średnicy 0,1 mm i prostokątnym przekroju poprzecznym.

Model Zuber-Findlaya [Dziubiński i Prywer, 2010] zastosowany dla przepływu ciecz-ciecz ma postać:

$$\frac{u_{poz}}{\alpha} = C U_{c-c} + v_{dr} \quad (6)$$

gdzie:

v_{dr} – prędkość dryftu, [m/s]

Sowiński i in. [2008] badając hydrodynamikę przepływu mieszaniny dwufazowej ciecz-gaz w mikrokanalach o przekrojach prostokątnych zaproponowali równanie korelacyjne o postaci:

$$\alpha_{st} = 0,83 \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_{ol}} \right)^{0,32} \left(\frac{\mu_w}{\mu_{ol}} \right)^{0,16} \xi_{st} \quad (7)$$

gdzie:

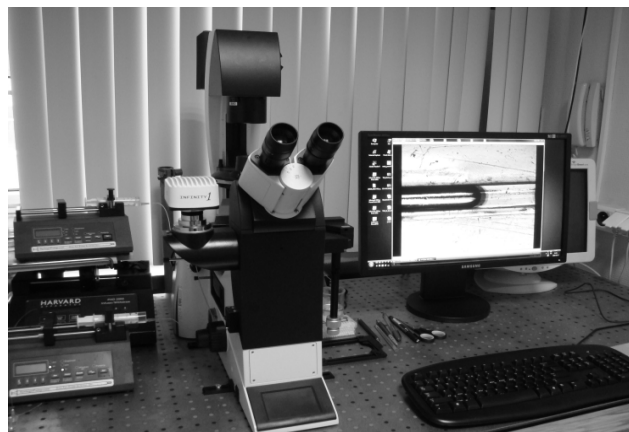
σ_{ob} , σ_w – napięcie powierzchniowe odpowiednio: oleju i wody, [N/m]
 μ_{ob} , μ_w – lepkość dynamiczna odpowiednio: oleju i wody, [Pa·s]

Badania doświadczalne

Aparatura

Badania przepływu mieszanin ciecz-ciecz w mikrokanalach, zostały przeprowadzone w Katedrze Inżynierii Chemicznej na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Stanowisko doświadczalne składało się z mikroskopu Leica DMI 3000 B z olejoimersyjnym fentarowym obiektywem Leica 100x/1,4, kamery Lumenera Infinity 1,3 MPix, 1/2" CMOS, mikropompy strzykawkowej PHD (Harvard Apparatus), mikrokanalu i komputera PC (Rys. 1).

W badaniach stosowano mikrokanaly szklane, w kształcie litery T i Y, co zapewniało różną konfigurację doprowadzania mediów do mikrokanalu. Mikrokanaly miały średnicę 0,5 i 1 mm oraz długość około 0,3 m. Rejestrowanie obrazu przepływu dwufazowego miało miejsce około 0,15÷0,2m od wlotu mediów do mikrokanalu, celem zapewnienia warunków uformowanego przepływu mieszaniny dwufazowej ciecz-ciecz.



Rys. 1. Stanowisko doświadczalne

Materiały

W pomiarach wykorzystano następujące media:

- olej silikonowy *Wacker AK-100*, produkcji *Brenntag Polska*,
- olej wrzecionowy *Spinway XA-5*, prod. *Statoil Fuel & Retail*,
- woda demineralizowana.

Olej stanowił fazę rozproszoną, natomiast woda fazę ciągłą. Parametry fizyko-chemiczne mediów zostały przedstawione w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości fizykochemiczne cieczy użytych w badaniu przepływu mieszaniny ciecz-ciecz w temperaturze 20°C

Rodzaj cieczy	Gęstość [kg/m ³]	Lepkość [mPa*s]	Napięcie powierzchniowe [mN/m]
Olej wrzecionowy	821	2,5	27,2
Olej silikonowy	960	95,5	20,85
Woda zdemineralizowana	998	1	72,67

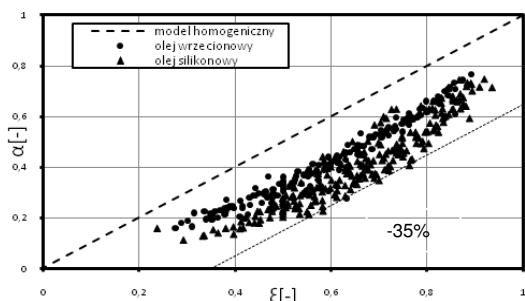
Metodyka

Filmy wideo rejestrujące obraz analizowanych przepływów dwufazowych ciecz-ciecz, zostały zapisane na dysku komputera PC. Uzyskane w ten sposób pliki poddano obróbce komputerowej, polegającej na podzieleniu filmu na zdjęcia. Do wyznaczenia udziału objętościowego fazy rozproszonej, a także fazy ciągłej użyto programu komputerowego, do analizy obrazu.

W celu ustalenia udziału objętościowego obu faz, przybliżono przednią i tylną część kropli fazy rozproszonej kształtem części czaszy kulistej, zaś ich środkową część kształtem cylindrycznym.

Wyniki badań i dyskusja

Na rys. 2 przedstawiono wszystkie dane doświadczalne (ok. 400 punktów pomiarowych) dotyczące przepływu mieszaniny dwufazowej ciecz-ciecz w mikrokanalach.



Rys. 2. Zależność rzeczywistego udziału fazy rozproszonej od udziału wlotowego tej fazy dla uzyskanych danych doświadczalnych

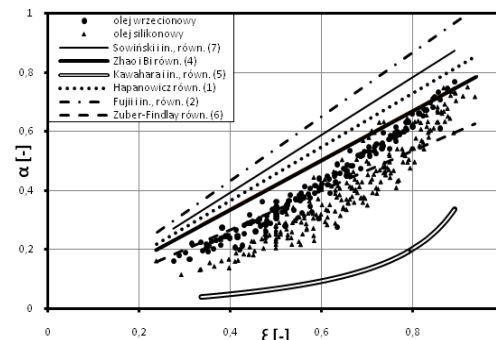
Z rozkładu punktów doświadczalnych wynika, że w doświadczeniu wystąpiło zjawisko poślizgu faz, podczas przepływu dwufazowego ciecz-ciecz w mikrokanale. W niemal wszystkich punktach widocznych na tym wykresie, widać niedobór fazy olejowej mierzonej lokalnie, w porównaniu z jej udziałem na wlocie do mikrokanale. Na powyższym rysunku została naniesiona linia pokazująca maksymalne odchylenie danych doświadczalnych, od modelu homogenicznego, które wynosiło -35%. W większości przypadków przepływu olej silikonowy-woda występował większy poślizg fazy rozproszonej, niż w przypadku przepływu mieszaniny olej wrzecionowy-woda.

Wyniki badań własnych porównano z przedstawionymi powyżej równaniami korelacyjnymi (1, 2, 4-7) dotyczącymi udziału faz w przepływającej mieszaninie dwufazowej ciecz-ciecz i ciecz-gaz (Rys. 3).

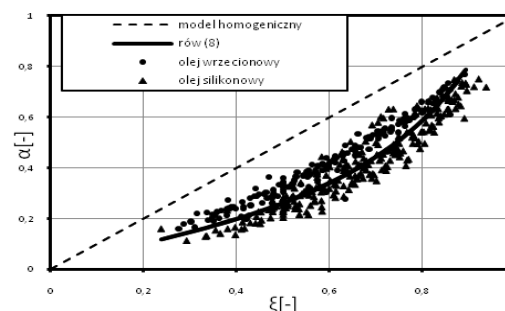
Autorzy niniejszej pracy do opisu własnych danych doświadczalnych zaproponowali zmodyfikowane równanie *Kawahary* o postaci:

$$\alpha = \frac{0,14\sqrt{\xi}}{1 - 0,88\sqrt{\xi}} \quad (8)$$

Korelację własnych danych doświadczalnych za pomocą równania (8) przedstawiono na rys. 4. Dokładność opisu wynosi od + 30% do -25 %.



Rys. 3. Porównanie własnych danych doświadczalnych z wartościami z równań korelacyjnych (1, 2, 4-7)



Rys.4. Porównanie własnych danych doświadczalnych z wartościami z równ. (8)

Wnioski

Dla wszystkich wykonanych badań, niezależnie od średnicy mikrokanale, geometrii doprowadzania mediów do mikrokanale oraz rodzaju oleju stanowiącego fazę rozproszoną, w mieszaninie ciecz-ciecz przepływającej w mikrokanale zaobserwowano zjawisko poślizgu faz.

Dane doświadczalne odbiegają od modelu homogenicznego o około -35%. Udział fazy rozproszonej na wlocie do mikrokanale, był większy od wartości lokalnych w dalszej części mikrokanale.

Podjęto próbę opisu danych doświadczalnych dotyczących udziału faz w przepływie dwufazowym ciecz-ciecz w mikrokanale za pomocą równań opublikowanych w literaturze przedmiotu, a następnie zaproponowane równanie korelacyjne (8), które najlepiej opisuje uzyskane dane doświadczalne.

LITERATURA

Dziubiński M., Prywer J., 2010. *Mechanika płynów dwufazowych*. WNT, Warszawa

Fujii T., Ohta J., Takenaka N., Morimoto O., Nakazawa T., 1991. *The flow characteristics of horizontal immiscible equal-density liquid-liquid two-phase flow* [in:] Proc. of the Int. Conf. on Multiphase Flows '91-Tsukuba, Japan. 195-198

Hapanowicz J., 2007. *Przepływ ciekłych układów dyspersyjnych*. Wyd. Pol. Opolskiej, Opole

Kawahara A., Sadatomi M., Okayama K., Nei K., Matsuo H., 2009. Experimental study on bubble velocity, void fraction and pressure drop for gas-liquid two-phase flow in a circular micro channel *International J. Heat Fluid Flow*, **30**, 831-841. DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.02.017

Serizawa A., Feng Z., Kawara Z., 2002. Two-phase flow in microchannels. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 26, 703-714. DOI: 10.1016/S0894-1777(02)00175-9

Sowiński J., Dziubiński M., Fidos H., 2008. *Velocity and gas-void fraction in two-phase liquid-gas flow in narrow mini-channels*. Konferencja Przepływów Nano i Mikromechaniki, 8-10 lipca, Krasiczyn

Zhao T.S., Bi Q.C., 2001. Pressure drop characteristics of gas-liquid two-phase flow in vertical miniature triangular channel. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **44**, 2523-2534. DOI: 10.1016/S0017-9310(00)00282-9

Praca została wykonana w ramach badań własnych przeprowadzonych w Katedrze Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej