

JAROSŁAW SOWIŃSKI
MAREK DZIUBIŃSKI

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Straty ciśnienia podczas przepływu mieszaniny dwufazowej ciecz nienewtonowska – gaz w minikanalach

Wprowadzenie

Zagadnienia określenia oporów przepływu mieszanin dwufazowych ciecz – gaz w minikanalach nie zostało do chwili obecnej zadowalająco rozwiązane. Trudności w opisie danych doświadczalnych wynikają z kilku powodów, z których najważniejszy to problemy określenia struktury przepływu oraz udziału faz w przepływającej mieszaninie dwufazowej. Poślizg między przepływającymi w przewodzie fazami ciekłą i gazową może również stanowić problem przy określeniu oporów przepływu, ponieważ lokalne udziały faz w przewodzie są inne niż na wlocie do kanału. Najczęściej stosowanym sposobem opisu strat ciśnienia podczas przepływów dwufazowych w przewodach jest zastosowanie modelu rozdzielonego przepływu faz *Lockharta–Martinello* [1–4].

Prace nad zastosowaniem modelu rozdzielonego przepływu faz do opisu strat ciśnienia podczas przepływu dwufazowego ciecz – gaz w minikanalach prowadzili *Mishima* i inni [2, 3]. Badali oni przepływy dwufazowe woda – powietrze w poziomych i pionowych kanałach o przekroju prostokątnym i kołowym. Zaproponowana przez nich modyfikacja modelu *Lockharta–Martinello* dotyczyła określenia wartości parametru C występującego w klasycznej zależności zaproponowanej przez *Chisholma* [5].

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (1)$$

Mishima i inni [3] zaproponowali, aby parametr C uzależnić od średnicy przewodu. Stwierdzili, że może on przyjmować wartości od 0 do 21 w zależności od wielkości średnicy zastępczej przewodu D_z . Zaproponowana przez nich zależność do opisu wartości współczynnika C ma postać:

$$C = 21(1 - e^{-0,319D_z}) \quad (2)$$

Jak wiadomo, *Chisholm* [5] zaproponował, aby współczynnik C w zależności (1) uzależnić od charakteru przepływu obu faz.

W trakcie przeprowadzonych badań wyznaczono wpływ wymiarów kanału oraz prędkości pozornych cieczy i gazu na straty ciśnienia w przepływie dwufazowym ciecz nienewtonowska – gaz w wąskich minikanalach. Podjęto także próbę opisu danych doświadczalnych za pomocą dostępnych w literaturze przedmiotu zależności [2–5].

Aparatura i stanowisko badawcze

W celu zbadania struktur przepływu mieszaniny dwufazowej ciecz – gaz w pionowych minikanalach zbudowano stanowisko badawcze. Zasadniczym jego elementem był pionowy kanał o prostokątnym przekroju poprzecznym. W badaniach stosowano dwa kanały o różnych rozmiarach przekroju poprzecznego:

- kanał I o wymiarach $b = 15$ mm i $\delta = 1,23$ mm o średnicy zastępczej $D_z = 2,27 \cdot 10^{-3}$ m
- kanał II o wymiarach $b = 15$ mm i $\delta = 2,41$ mm o średnicy zastępczej $D_z = 4,15 \cdot 10^{-3}$ m

Wysokość kanału w obu przypadkach wynosiła 400 mm. Minikanal ten wykonany był z poliwęglanu, co umożliwiło swobodne obserwowanie struktur przepływu dwufazowego ciecz–gaz. Szczegółowy opis stanowiska badawczego oraz przyjętej procedury badawczej przedstawiono w pracy [6].

W przeprowadzonych badaniach wartości pozornych prędkości przepływu cieczy i gazu zmieniały się odpowiednio od 0,0085 do 1,43 m/s i od 0,005 do 3,5 m/s. Jako fazę ciekłą stosowano wodny roztwór soli sodowej karboksymetylocelulozy, właściwości reologiczne stosowanego roztworu opisano następującymi parametrami reologicznymi modelu potęgowego: $k = 0,143$ Pa·s^{0,95} oraz $n = 0,95$. Fazą gazową było powietrze.

Omówienie wyników

Do opisu wyznaczonych doświadczalnie wartości spadków ciśnienia podczas przepływu dwufazowego ciecz–gaz w wąskich pionowych minikanalach zastosowano model rozdzielonego przepływu faz *Lockharta–Martinello* [5]. W tym celu wyznaczono parametry modelu X i Φ_L . Parametr X był opisywany następującą zależnością:

$$X^2 = \frac{\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{SL}}{\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{SG}} \quad (3)$$

Do obliczeń współczynnika oporu podczas przepływu jednofazowego w kanale o przekroju prostokątnym przyjęto zależność zaproponowaną przez *Hrnjaka* [7]. W badaniach stosowano ciecz nienewtonowską, dlatego do wyznaczenia charakteru przepływu fazy ciągłej zastosowano liczbę *Reynoldsa Metznera–Reeda* [1].

Mnożnik $(\Phi_L)_{eksp.}$ wyznaczono z zależności:

$$(\Phi_L)_{\text{exp}}^2 = \frac{\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{TP}}{\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{SL}} \quad (4)$$

Wartość gradientu ciśnienia powodowanego stratami ciśnienia podczas przepływu dwufazowego wyznaczono z zależności:

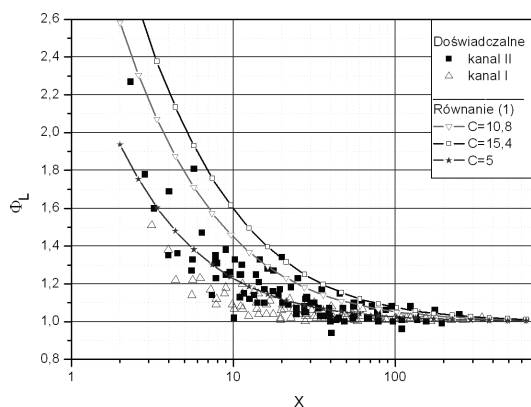
$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{TP} = \frac{\Delta p_t - \Delta p_h}{L} \quad (5)$$

Jako Δp_t oznaczono doświadczalną wartość spadku ciśnienia podczas przepływu dwufazowego w minikanale. Wartość ciśnienia hydrostatycznego wywieranego przez słup mieszaniny dwufazowej cieczy i gazu w kanale między punktami pomiarowymi ciśnienia obliczano z zależności:

$$\Delta p_h = \rho_L g L (1 - \varepsilon_G) \quad (6)$$

Udział fazy gazowej ε_G wyznaczono na podstawie analizy zarejestrowanego w trakcie badań obrazu przepływu dwufazowego według procedury zamieszczonej w pracy [8].

Wartość mnożnika $(\Phi_L)_{\text{exp}}$, opisanego równaniem (4), wyznaczano na podstawie własnych badań doświadczalnych i porównano z wyznaczoną z zależności (1) wartością $(\Phi_L)_{\text{ob}}$. Wartość parametru C w równaniu (1), zgodnie z propozycją *Chisholma* [5] po uwzględnieniu realizowanego zakresu badawczego (przepływ laminarny cieczy i gazu), przyjęto $C = 5$. Współczynnik C wyznaczono także z zależności (2) zaproponowanej przez *Mishimę*, dla kanału I wartość tego współczynnika wynosiła $C = 10,8$, natomiast dla kanału II współczynnik przybrał następującą wartość $C = 15,8$. Wynik porównania przedstawiono na rys. 1. Jak łatwo zauważyć opis spadku ciś-



Rys. 1. Porównanie wyznaczonej doświadczalnie wartości Φ_L z wartością tego mnożnika wyznaczoną zależnością (1)

nienia podczas przepływu dwufazowego roztwór karboksymetylo celulozy – powietrze w minikanalach za pomocą modelu *Lockhart–Martinello* jest zdecydowanie lepszy przy zastosowaniu zaproponowanej przez *Chisholma* [5] metody wyznaczania wartości współczynnika C . Zaproponowana przez *Mishimę* zależność (2) została wyznaczona jedynie dla przepływu dwufazowego woda–powietrze, dlatego podczas przepływu dwufazowego z udziałem cieczy o bardziej złożonych właściwościach reologicznych nie daje dobrej dokładności opisu strat ciśnienia. Na rys. 1 widać także, że wyznaczone doświadczalnie wartości mnożnika Φ_L dla kanału I i II nie pokrywają się, są przesunięte względem siebie zgodnie z kierunkiem obserwowanym przy opisie zaproponowanym przez *Mishimę* [3]. Sugeruje to, że równanie (2) opisujące współczynnik C należy tylko uzupełnić o parametry uwzględniające właściwości fizykochemiczne przepływającej w mieszaninie dwufazowej cieczy.

Oznaczenia

- C – współczynnik w równaniu (1),
- D – średnica, [m],
- Δp – różnica ciśnień, [Pa],
- δ – grubość szczeliny, [m],
- ε – udział objętościowy jednej z faz w mieszaninie,
- Φ – mnożnik *Lockharta–Martinello*, zdefiniowany równaniem (4),
- L – długość odcinka pomiarowego kanału, [m],
- X – parametr *Lockharta–Martinello*, zdefiniowany równaniem (3).

Indeksy

- G – gaz,
- L – ciecz,
- LG – dwufazowy,
- SG – płynnie tylko gaz,
- SL – płynnie tylko ciecz,
- z – wartość zastępcza.

LITERATURA

1. *M. Dziubiński*: Hydrodynamika przepływów mieszanin dwufazowych ciecz–gaz, Łódź, Politechnika Łódzka, 2005.
2. *K. Mishima, T. Hibiki, H. Nishihara*: Int. J. Multiphase Flow **19**, 115 (1992).
3. *K. Mishima, T. Hibiki*: Int. J. Multiphase Flow **22**, 703 (1996).
4. *H. Ide, T. Fukano*: Experimental Thermal Science, 29, 833 (2005).
5. *D. Chisholm*: Gas-liquid flow in pipelines system, Encyclopedia of fluid mechanics, New York (1986).
6. *J. Sowiński*: Proc. Chem. Ing. **28**, 1137 (2007).
7. *P. Hrnjak, X. Tu*: Int. J. Heat Fluid Flow, **28**, 2 (2007).
8. *Ł. Tomczak, J. Sowiński*: Proc. Chem. Ing. **28** s. 1147 (2007).