

Monika WENGEL, Barbara MIŁASZEWICZ, Roman ULBRICH

e-mail: monika.wengel@gmail.com

Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Wpływ średnicy minikanалу na hydrodynamikę przepływu dwufazowego gaz – ciecz

Wstęp

Ze względu na bardzo powszechne wykorzystywanie minikanalów między innymi w kompaktowych wymiennikach ciepła eksploatowanych w procesach przetwarzania materiałów, chłodzeniu elementów elektroniki, w technice kosmicznej, czy zagadnieniach bioinżynierii i biotechnologii, znajomość hydrodynamiki przepływu dwufazowego gaz – ciecz w minikanalach ma fundamentalne znaczenie. Do kluczowych parametrów opisujących hydrodynamikę przepływu dwufazowego należy udział faz w przepływającej mieszaninie. Jego wielkość pozwala na wyznaczenie gęstości mieszaniny, spadków ciśnienia, których znajomość z kolei jest niezbędna już na etapie projektowania urządzeń, w których przepływ dwufazowy jest realizowany.

Złożoność procesów przepływów dwufazowych oraz ich stochastyczny charakter powoduje, że pomiar udziału objętościowego faz nie jest zadaniem łatwym, czego wyrazem jest wiele badań teoretycznych jak i eksperymentalnych, nad modelami przewidywania wielkości tychże udziałów. Literatura przedmiotu dotycząca metod korelacyjnych służących wyznaczeniu udziałów objętościowych skupia się wokół rozwinięcia modelu poślizgu faz według *Zubera-Findlay'a*. Ze względu jednak na to, że bezpośrednia adaptacja procedur obliczeniowych udziału objętościowego w kanałach konwencjonalnych do minikanalów jest ryzykowna, przeprowadzono analizę korelacji danych własnych i literaturowych. Jedną z form tej weryfikacji jest obliczenie zależności opisujących stałe modelu *Zubera-Findlay'a*.

Badania eksperymentalne

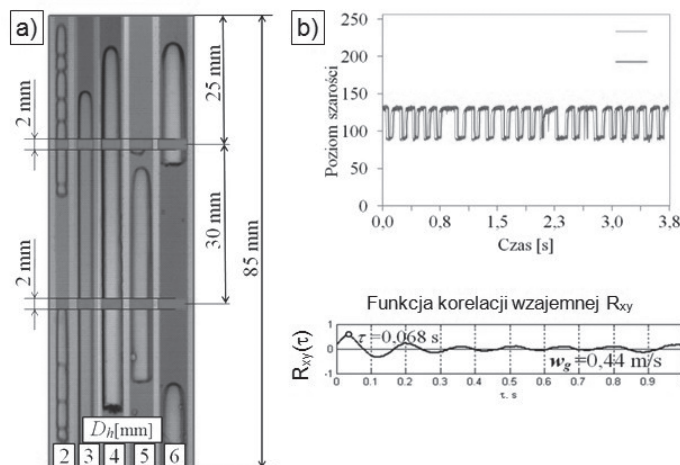
Badania przeprowadzono przy zastosowaniu nieinwazyjnej metody wizualnej opartej na cyfrowym przetwarzaniu obrazu wytworzonej mieszaniny dwufazowej, która jest skutecznym i zaawansowanym narzędziem, mogącym znaleźć szerokie zastosowanie przy ocenie hydrodynamiki przepływu mieszaniny dwufazowej w aparatach o skomplikowanej geometrii. Wyniki przedstawionych w pracy badań dotyczą przepływu współprądowego, wznoszącego, adiabatyicznego, przeprowadzonych z udziałem mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz w pięciu minikanalach pojedynczych, o średnicy hydraulicznej z zakresu od 2 do 6 mm.

Pomiar prędkości rzeczywistej struktur gazowych

Jak wspomniano powyżej metodyka badań pozwalała na dokonanie pomiaru prędkości fazy gazowej bez ingerencji w przepływ. Dla warunków występowania struktury rzutowej zastosowano metodę określenia prędkości przemieszczania się tych struktur za pomocą funkcji korelacji wzajemnej $R_{xy}(\tau)$. Funkcja ta, to iloczyn skalarny dwóch sygnałów w funkcji przesunięcia jednego z nich [Zieliński, 2005]:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt' \quad (1)$$

Funkcja korelacji wzajemnej ma wiele zastosowań, jednym z nich jest pomiar czasu opóźnienia. Polega on na określeniu czasu potrzebnego do przejścia sygnału przez dany układ. Czas ten można wyznaczyć bezpośrednio z wartości przesunięcia odpowiadającej obserwowanemu maksimum na wykresie, który przedstawia zależność pomiędzy sygnałem na wejściu (x), a sygnałem na wyjściu (y), (Rys. 1). W przypadku zastosowania tej funkcji, *wytłumienia listków* bocznych dokonano przy wykorzystaniu okna *Hamminga*. Przy implementacji funkcji korelacji wzajemnej do wyznaczenia prędkości przemieszczania się struktur gazowych jej argumentami były uśrednione czasowe przebiegi poziomów



Rys. 1. a) Rozmieszczenie obszarów badawczych w celu wyznaczenia prędkości fazy gazowej, b) Ewolucja prędkości gazu w obszarach badawczych rozmieszczonych zgodnie z rys. 1a) dla minikanalu o $D_h = 6$ mm [Wengel, 2011]

szarości w tzw. obszarach badawczych kolejnych scen sekwencji map bitowych. Wyznaczony czas opóźnienia τ pozwolił na bezpośrednie określenie wartości prędkości przemieszczania się struktury gazowej w_g zgodnie ze wzorem:

$$w_g = \frac{l}{\tau} \quad (2)$$

gdzie: l – odległość między obszarami pomiarowymi, [m].

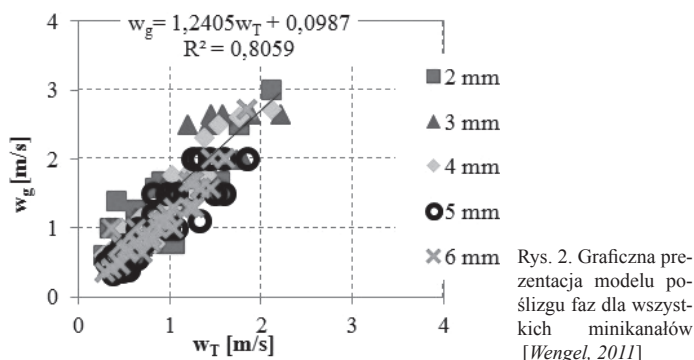
Wyznaczenie parametrów modelu poślizgu

Dzięki w ten sposób wyznaczonej prędkości struktur gazowych można było wykorzystać linową zależność w_g od pozornej prędkości przepływu mieszaniny dwufazowej w_T , które jest ogólną zależnością umożliwiającą określenie udziału fazy gazowej w przepływającej mieszaninie dwufazowej, co wykorzystano w celu eksperymentalnego wyznaczenia parametrów modelu poślizgu: współczynnika rozkładu C_0 i prędkości względnej (dryfu) w_{dr} .

Wartości tych parametrów zależą od rodzaju struktury przepływającej mieszaniny dwufazowej, właściwości fizycznych cieczy i gazu, kierunku przepływu oraz wymiaru kanałów. Biorąc pod uwagę to, że właściwości fizyczne są niezmiennymi w przeprowadzonych badaniach, głównym czynnikiem decydującym o wartości parametrów C_0 i w_{dr} jest średnica hydrauliczna kanału D_h , w której odbywa się przepływ.

Wykorzystując graficzną prezentację modelu poślizgu dla przepływu w badanych przewodach, gdzie prędkość w_g została zmierzona za pomocą funkcji korelacji wzajemnej zauważono, że prędkość dryfu zmienia się w poszczególnych minikanalach od 0,29 do 0,0094 m/s, przy czym największa jej wartość występuje w minikanale o $D_h = 3$ mm, a najmniejsza w minikanale o $D_h = 6$ mm. Wartość współczynnika regresji dla korelacji odwzorowującej model poślizgu faz jest wysoka i mieści się w zakresie od 0,85 do 0,95. W celu poszukiwania związku pomiędzy parametrem rozkładu i prędkością dryfu w minikanalach przedstawiono zależność prędkości zmierzonej od prędkości pozornej mieszaniny dwufazowej dla wszystkich badanych minikanalów. Parametr C_0 wynosi w tym przypadku 1,24, a prędkość dryfu $w_{dr} = 0,0987$ m/s, przy współczynniku regresji równym 0,91 (Rys. 2).

Wraz ze zmniejszeniem rozmiaru kanału następuje zmiana relacji sił panujących podczas przepływu gaz – ciecz, co powoduje wspomniane



Rys. 2. Graficzna prezentacja modelu poślizgu faz dla wszystkich minikanalów [Wengel, 2011]

wcześniej problem niepewności bezpośredniej aplikacji procedur obliczeniowych dostępnych dla kanałów konwencjonalnych do minikanalów.

W przepływie dwufazowym w minikanalach siły grawitacji i siły wyporu mają mniejsze znaczenie od sił napięcia powierzchniowego i sił adhezji, które stają się w nich dominujące.

W celu adaptacji modelu Zuber-Findlay'a do przepływu w minikanalach postanowiono zaproponować własny model w oparciu o analizę korelacji danych własnych i literaturowych. Przedstawione poszukiwania oparte na korelacji z dwoma parametrami (C_0 i w_{dr}) nie wykazują wyraźnej tendencji. Postanowiono zatem, wykorzystując równania korelacyjne prędkości poślizgu w_{dr} , wyniki badań własnych aproksymować, jak dla modelu Zuber-Findlay'a, zakładając jako parametr poszukiwany jedynie współczynnik rozkładu C_0 , przyjmując, że prędkość unoszenia struktury rzutowej była obliczana według równ. (3–6).

Wykorzystano następujące równania korelacyjne do obliczania prędkości poślizgu:

– Model GE RAMP [Ulbrich, 1996]:

$$w_{dr} = 2,9 \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{0,25} \quad \text{dla } a_g \leq 0,65 \quad (3)$$

– [Mishima i Hibiki, 2001]:

$$w_{dr} = \left(0,23 + 0,13 \frac{b}{a} \right) \sqrt{\frac{\Delta\rho g a}{\rho_l}} \quad (4)$$

– [Nicklin i in., 1962]:

$$w_{dr} = 0,35 \sqrt{g D_h} \quad (5)$$

– [Mishima i Hibiki, 1996]:

$$w_{dr} = 0 \quad (6)$$

Zatem dzięki propozycjom wyznaczonych prędkości dryfu w_{dr} , zależność, która opisuje rzeczywistą prędkość struktur gazowych wg modelu Zuber-Findlaya można sprowadzić do poszukiwania tylko jednego parametru. W wyniku regresji liniowej warunkowej, wielkości prędkości rzeczywistych struktur gazowych z narzuconą prędkością dryfu wg ww. równań, hipotezę z prędkością dryfu równą zero uznano za najbardziej odpowiednią.

Otrzymując wartości współczynnika rozkładu dla narzuconej $w_{dr} = 0$ m/s, a także dla $w_{dr} = 0,1$ m/s czyli prędkości otrzymanej z liniowej zależności prędkości rzeczywistych struktur gazowych we wszystkich badanych minikanalach od prędkości pozornej mieszaniny dwufazowej została przeprowadzona próba wyznaczenia C_0 przy założeniu, że stała C_0 w modelu Zuber-Findlay'a dla przepływu dwufazowego w minikanalach zależy od jego średnicy.

Zgodnie wynikami pracy [Kuchczyńska, 2010] przyjęto wartość współczynnika rozkładu dla kanałów konwencjonalnych $C_0 = 1,06$. Zatem od wartości tej odjęto wartości zmierzonych współczynników rozkładu uzyskując w ten sposób nadwyżkę C_0 . Postępując w ten sposób otrzymano ogólną zależność:

$$C_0 = C_{Kon} + A e^{\left(\frac{B D_h}{D_r}\right)} \quad (7)$$

gdzie: C_{Kon} – wartość parametru rozkładu dla kanałów konwencjonalnych [Kuchczyńska, 2010], A , B – wartości wyznaczone w toku badań własnych, D_r – średnica reprezentatywna dla kanałów konwencjonalnych (0,02 m)

Otrzymano dwie propozycje do obliczania parametru rozkładu dla minikanalów:

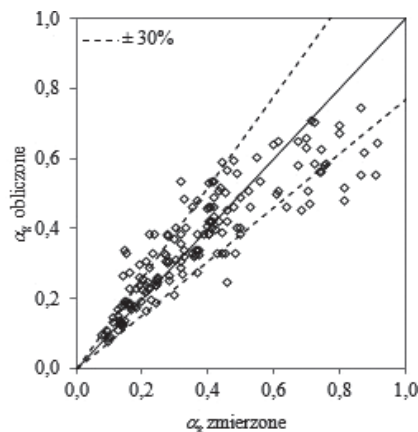
$$\text{dla } w_{dr} = 0 \text{ m/s} \quad C_0 = 1,06 + 0,8639 A e^{\left(-6,642 \frac{D_h}{D_r}\right)} \quad (8)$$

$$\text{dla } w_{dr} = 0,1 \text{ m/s:} \quad C_0 = 1,06 + 0,4569 A e^{\left(-6,104 \frac{D_h}{D_r}\right)} \quad (9)$$

Wyniki i wnioski

Uwzględniając rezultaty analiz oraz stwierdzenia zawarte pracach [Fukano i Kariyasaki, 1993; Mishima i Hibiki, 1996; Ide i in., 2007] w których prędkość dryfu w minikanalach wynosi zero, a także lepszy stopień dopasowania funkcji w przypadku określenia nadwyżki współczynnika rozkładu gdy $w_{dr} = 0$ m/s, ostatecznie zaproponowano równ. (8) jako odpowiednie do obliczania współczynnika rozkładu dla wznoszącego przepływu dwufazowego w minikanalach dla obszaru występowania struktury rzutowej.

Przy wykorzystaniu modelu poślizgu, z prostej zależności wyznaczono udział fazy gazowej α_g , który następnie porównano z udziałem objętościowym fazy gazowej obliczonym według wyżej wymienionego modelu przy wykorzystaniu własnej zależności (równanie 8), opisującej parametr rozkładu C_0 . 80% punktów mieści się w zakresie błędów względnego $\pm 30\%$, co uważa się za zadowalający wynik (Rys. 3).



Rys. 3. Porównanie udziału objętościowego obliczonego ze zmierzonym dla przepływu dwufazowego gaz – ciecz we wszystkich badanych minikanalach

Zaproponowano zależność do obliczania rzeczywistej prędkości gazu (równanie 8) dla której przy założeniu braku poślizgu $w_{dr} = 0$ m/s, istnieje wpływ średnicy minikanalu na parametr rozkładu C_0 .

Wyznaczone drogą eksperymentalną wartości prędkości struktur rzutowych mogą być dobrą podstawą do obliczenia bardzo ważnego parametru dla opisu hydrodynamiki przepływu dwufazowego – udziału objętościowego faz.

LITERATURA

- Fukano T., Kariyasaki A., 1993. Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary. *Nucl. Eng. Des.* 141, 59–68. DOI: 10.1016/0029-5493(93)90092-N
- Ide H., Kariyasaki A., Fukano T., 2007. Fundamental data on the gas-liquid two-phase flow in minichannels. *Int. J. Therm. Sci.* 46, 519–530. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.07.012
- Kuchczyńska A., 2010. *Warunki pracy aparatu ze wznoszącym i opadającym przepływem dwufazowym gaz-ciecz*. Praca doktorska. Pol. Opolska, Opole
- Mishima K., Hibiki T., 1996. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. *International Journal of Multiphase Flow* 22, 703–712. DOI: 10.1016/0301-9322(96)00010-9
- Mishima K., Hibiki T., 2001. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical narrow rectangular channel. *Nuclear Engineering and Design* 203, 117–131. DOI: 10.1016/S0029-5493(00)00306-X
- Nicklin D.J., Wilke J.O., Davidson J.F., 1962. Two-phase flow in vertical tubes. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 40, nr 1, 61–68
- Ulbrich R., 1996. *Spadek ciśnienia przy przepływie mieszaniny gaz – ciecz w przestrzeni międzyrurowej*. Studia i Monografie, z. 89. Pol. Opolska, Opole
- Wengel M., 2011. *Wpływ średnicy mini kanału na hydrodynamikę przepływu gaz – ciecz w minikanalach*. Praca doktorska. Pol. Opolska, Opole
- Zieliński T., 2005. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – od teorii do zastosowań*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa