

Małgorzata PŁACZEK, Roman DYGA

e-mail: m.placzek@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Udział objętościowy powietrza w przepływie dwufazowym gaz-ciecz przez kanał wypełniony pianą aluminiową

Wstęp

Materiały komórkowe o strukturze otwartej, tzw. stałe piany, coraz szerzej stosowane w aparaturze procesowej, mogą być wytwarzane m.in. z polimerów, materiałów mineralnych oraz metali [Vafai, 2005; Stemmet i in., 2005]. Technologia wytwarzania pian metalowych umożliwia spienianie różnego rodzaju stopów metalowych, co pozwala na uzyskanie pian o zróżnicowanych właściwościach termicznych, mechanicznych, elektrycznych i akustycznych [Banhart, 2005].

Wysoka porowatość (97%) oraz relatywnie duża powierzchnia właściwa, w połączeniu z wysoką przepuszczalnością, zapewniają znaczną poprawę warunków ciepło-przepływowych dla realizowanych z ich użyciem procesów. Przykładowo w reaktorach katalitycznych, ze względu na dobrą wytrzymałość mechaniczną oraz niewielkie opory towarzyszące przepływowi płynów, piany takie znalazły zastosowanie jako nośnik katalizatora, a umieszczone na powierzchniach grzejnych znacznie poprawiają efektywność wrzenia [Groppi i Tronconi, 2000]. W grupie najczęściej wymienianych zastosowań praktycznych pian znajdują się też kompaktowe wymienniki ciepła, m.in. do chłodzenia elektroniki użytkowej, elementy konstrukcyjne skrzydeł samolotów, a także super lekkie aparaty jako część wyposażenia pokładowego samolotów [Bhattacharya i Mahajan, 2002; Li i Leong, 2011].

Niezależnie od praktycznych możliwości wykorzystania pian metalowych w różnego rodzaju aparatach, niezbędna jest ocena takich parametrów procesowych, jak opory przepływu oraz współczynniki wymiany ciepła i masy, zarówno w odniesieniu do płynu jedno-, jak i wielofazowego. W przypadku przepływu wielofazowego istotnym kryterium tej oceny jest udział objętościowy faz, szczególnie fazy gazowej w przepływie dwufazowym gaz-ciecz, przykładowo ciecz-para tej cieczy.

Wobec braku prac opisujących hydrodynamikę przepływu gazu i cieczy w kanałach wypełnionych pianami metalowymi, za cel pracy przyjęto wyznaczenie wartości udziału objętościowego gazu w mieszaninie dwufazowej powietrze-woda. Dla pełniejszego opisu zjawisk towarzyszących przepływowi mieszaniny gaz-ciecz badania obejmowały także identyfikację struktur przepływu.

Opis badań eksperymentalnych

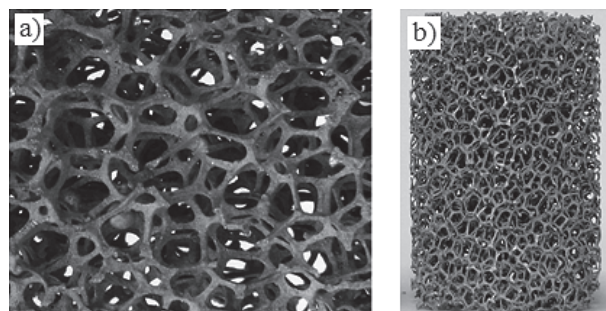
Badania prowadzono w poziomo usytuowanym kanale o średnicy wewnętrznej 20 mm i długości 2,61 m. Kanał pomiarowy wypełniono pianą ze stopu aluminium o gęstości upakowania porów 20, 30 i 40 PPI. W badaniach wykorzystano piany o podobnym geometrycznie szkieletcie komórkowym, zbliżonej porowatości i różnym rozmiarze komórek (Rys. 1). Pomiar udziału objętościowego faz (ε_g) opisanego równaniem (1) realizowano metodą pułapkową, która polega na zatrzymaniu przepływu określonej objętości mieszaniny w rurze poprzez równoczesne zamknięcie wlotu i wylotu kanału za pomocą szybkozamykających się zaworów. Pomiar objętości wody zatrzymanej w rurze, przy znajomości całkowitej objętości kanału, umożliwił wyznaczenie udziału objętościowego czynnika gazowego:

$$\varepsilon_g = \frac{(1 - V_c)}{V_k} \quad (1)$$

gdzie: V_c – objętość cieczy [m^3],
 V_k – objętość kanału [m^3].

Charakterystyka pian stosowanych w badaniach jest przedstawiona w tab. 1. Parametr φ (tab. 1) oznacza porowatość i opisany jest równaniem

$$\varphi = \frac{V_f}{V_{mf}} = \frac{V_f}{(V_s + V_f)} \quad (2)$$



Rys. 1. Piana 20 PPI (AlSi7Mg): a) struktura komórkowa, b) element wypełnienia kanału

gdzie: V_f – objętość wolnej przestrzeni piany [m^3],
 V_s – objętość szkieletu piany [m^3].

Tab. 1. Charakterystyka pian wykorzystanych w badaniach własnych

Oznaczenie (stop)	Porowatość φ	Średnica komórki $d_c \cdot 10^{-3}$ [m]
20 PPI (AlSi7Mg)	0,9336	3,452
30 PPI (AlSi7Mg)	0,9435	2,255
40 PPI (Al 6101)	0,9292	2,386

Zakres zmienności parametrów przepływowych mieszaniny powietrze-woda podano w tab. 2.

Tab. 2. Zakres zmienności parametrów przepływowych

Płyn (f)	u_{sf} [m/s]	ξ_f
Powietrze (g)	0,061±2,45	0,493±0,998
Woda (l)	0,006±0,062	0,002±0,5

Wielkości występujące w tab. 2 obliczono zgodnie z poniższymi zależnościami:

– prędkość pozorną gazu (u_{sg}) albo cieczy (u_{sl})

$$u_{sg(l)} = \frac{G_{g(l)}}{\rho_{g(l)} A} \quad (3)$$

gdzie: $G_{g(l)}$ – strumień masowy gazu (cieczy) [kg/s],
 A – pole przekroju porzecznego kanału [m^2].

– wlotowy udział objętościowy gazu (cieczy)

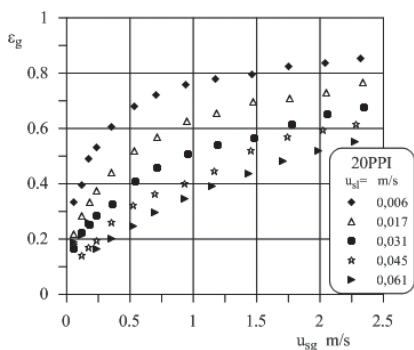
$$\xi_{g(l)} = \frac{Q_{g(l)}}{Q_g + Q_l} = \frac{u_{sg(l)}}{u_{sg} + u_{sl}} \quad (4)$$

gdzie: $Q_{g(l)}$ – strumień objętościowy gazu (cieczy) [m^3/s].

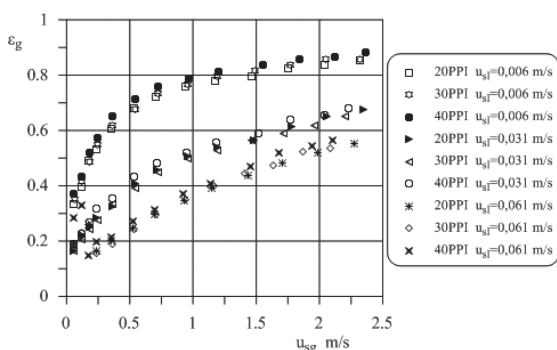
Wyniki badań i ich analiza

Z rys. 2 i 3 wynika, że udział objętościowy gazu (ε_g) zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu (u_{sg}). Z kolei wzrost prędkości pozornej fazy ciekłej przyczynia się do redukcji udziału objętościowego gazu. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem strumienia, a co za tym idzie prędkości pozornej cieczy (u_{sl}), redukuje się ilość wolnej przestrzeni dostępnej dla fazy gazowej. W takich warunkach, pęcherzyki gazu znacznie szybciej przepływają przez pory wypełnienia, co skutkuje zmniejszeniem ich rozmiarów, a tym samym zmniejszeniem udziału objętościowego gazu.

Analiza danych (Rys. 3) pozwala jednocześnie stwierdzić, że gęstość upakowania porów badanych pian (PPI) nie wpływa na wartość udziału objętościowego gazu. Dla niewielkich prędkości pozornych powietrza (mniejszych od 0,25 m/s) oraz wyższych prędkości przepływu cieczy

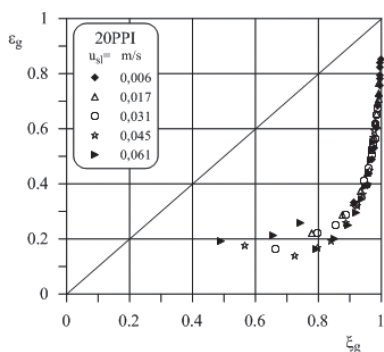


Rys. 2. Zmierzony udział objętościowy gazu w funkcji prędkości pozornej gazu dla piany 20PPI

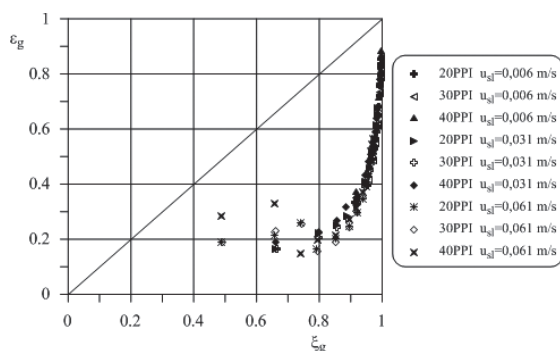


Rys. 3. Zmierzony udział objętościowy gazu w funkcji prędkości pozornej gazu

($u_{sl} = 0,061$ m/s) obserwowano nieregularną zmianę (okresowy wzrost i spadek) wartości udziałów objętościowych gazu. Zjawisko to ma ścisły związek ze zmianą struktury przepływu z korkowej na rozwarstwowaną (wartość udziału objętościowego gazu (ϵ_g) zależy istotnie od rodzaju struktury przepływu dwufazowego, określonego przez wzajemne relacje strumieni faz ciekłej i gazowej). W badaniach dla większości punktów doświadczalnych obserwowano strukturę rozwarstwowaną, a nieliczne punkty odbiegające od linii trendu, widoczne nie tylko na rys. 3, ale także na rys. 4 i 5, odpowiadają strukturze pęcherzykowej.



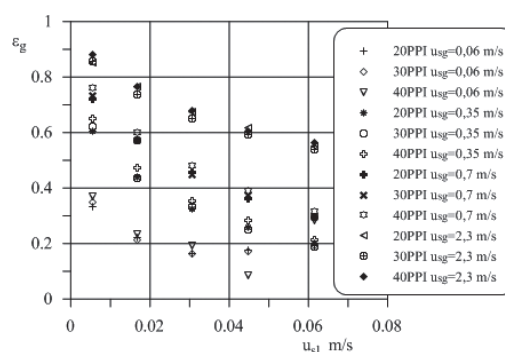
Rys. 4. Porównanie wartości zmierzonego i wlotowego udziału objętościowego gazu dla piany 20PPI



Rys. 5. Porównanie wartości zmierzonego i wlotowego udziału objętościowego gazu

W badaniach własnych relacje te opisano za pomocą wlotowego udziału objętościowego gazu (ζ_g). Wartości wlotowego udziału objętościowego gazu (ζ_g) wynikającego z relacji strumieni zasilaających kanał pomiarowy są większe od odpowiadających im wartości ϵ_g (Rys. 4, 5). Rozbieżności te należy tłumaczyć zjawiskiem poślizgu międzyfazowego. Jest to szczególnie widoczne w przypadku przepływu rozwarstwowanego, kiedy gaz przepływa w górnej części kanału pomiarowego ze znacznie większą prędkością niż zalegająca w dolnej jego części faza ciekła. Efekt ten jest obserwowany w przypadku wszystkich badanych pian (Rys. 5).

Zmiana udziału objętościowego gazu może być bardzo duża, co bezpośrednio związane jest ze strumieniem cieczy. Z rys. 6 wynika, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej fazy ciekłej zmniejsza się udział objętościowy fazy gazowej, przy czym im wyższa prędkość fazy gazowej tym wyższy zmierzony udział objętościowy tej fazy. Z drugiej strony, wyniki badań wskazują (Rys. 6), że dla wszystkich badanych pian nie stwierdzono wpływu struktury komórek piany metalowej na wartość udziału objętościowego gazu.



Rys. 6. Zmierzony udział objętościowy gazu w funkcji prędkości pozornej cieczy

Wnioski

Stwierdzono, że w przepływie dwufazowym gaz-ciecz w kanale wypełnionym pianami metalowymi udział objętościowy gazu zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu. Jednocześnie wzrost prędkości fazy ciekłej przyczynia się do redukcji udziału objętościowego gazu.

Stwierdzono występowanie dużych różnic pomiędzy wartościami zmierzonego (tj. wynikającego z objętości faz) i wlotowego udziału objętościowego gazu. Przyczyną występowania tych różnic jest poślizg międzyfazowy.

Wyniki badań wskazują na brak wpływu parametrów strukturalnych piany metalowej na wartość udziału objętościowego faz.

LITERATURA

- Banhart J., 2001. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Prog. Mater. Sci.* **46**, nr 6, 559-563. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- Bhattacharya A., Mahajan R.L., 2002. Finned metal foam heatsinks for electronics cooling in forced convection. *ASME J. Electr. Packag.* **124**, nr 3, 155-163. DOI: 10.1115/1.2188461
- Groppi G., Tronconi E., 2000. Design of novel monolith catalyst supports for gas/solid reactions with heat exchange. *Chem. Eng. Sci.* **55**, nr 12, 2161-2171. DOI: 10.1016/0009-2509(86)87132-9
- Li H.Y., Leong K.C., 2011. Experimental and numerical study on single and two-phase flow and heat transfer in aluminum foams. *Int. J. Heat Mass Transfer* **54**, 4904-4912. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.002
- Stemmet C.P., Jongmans J.N, Schaaf J., Kuster B.M.F., Schouten J.C., 2005. Hydrodynamics of gas-liquid counter-current flow in solid foam packings. *Chem. Eng. Sci.* **60**, 6422-6429. DOI: 10.1016/j.ces.2005.03.027
- Vafai K., 2005. *Handbook of Porous Media II* ed., Taylor Francis, New York

Praca była finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy nr 3145/B/T02/2010/38.