

Małgorzata PŁACZEK, Roman DYGA, Stanisław WITCZAK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Udział objętościowy faz w mieszaniu dwufazowej gaz-ciecz przepływającej przez kanał wypełniony pianą metalową

### Wstęp

Piany metalowe to wysokoporowate ( $\varphi > 90\%$ ) materiały komórkowe w postaci powiązanych ze sobą cienkich włókien tworzących przestrzenny szkielet komórkowy. Dobra przewodność cieplna, duża powierzchnia właściwa, odporność na korozję, odpowiednio wysoka przepuszczalność sprawiają że są one coraz szerzej stosowane jako wypełnienia strukturalne reaktorów chemicznych [Stemmet i in., 2006], przepływowych wymienników ciepła [Mahdi i in., 2006], aparatów kolumnowych [Pangarkar i in., 2010] czy też parowników urządzeń chłodniczych [Hu i in., 2014].

Przy określaniu rozmiaru wyposażenia aparatu oraz wymaganych parametrów eksploatacyjnych do realizacji wybranego procesu technologicznego niezbędna jest ocena takich parametrów procesowych jak opory przepływu czy współczynniki wymiany ciepła i masy, zarówno w odniesieniu do płynu jedno-, jak i wielofazowego. Poprawne obliczenie tych wielkości wymaga znajomości wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz w przepływie.

Wobec braku prac opisujących hydrodynamikę przepływu gazu i cieczy w kanałach wypełnionych pianami metalowymi (dostępne prace dotyczą przede wszystkim przepływów w kolumnach wypełnionych i reaktorach katalitycznych) przeprowadzono badania doświadczalne dotyczące udziału objętościowego faz w przepływie powietrze-woda oraz powietrze-olej przez poziomy kanał wypełniony pianą aluminiową o różnej porowatości. Badania te ukierunkowane były m.in. na określenie wpływu parametrów przepływowych składników mieszaniny, struktur przepływu oraz parametrów geometrycznych pian na wartość udziałów objętościowych faz.

### Badania doświadczalne

**Materiały.** Badano udziały objętościowe faz w przepływie powietrze-woda oraz powietrze-olej *Velol-9Q*. Właściwości oleju były następujące: gęstość  $\rho_{o(20^\circ C)} = 859,8 \text{ kg/m}^3$ ; lepkość  $\eta_{o(20^\circ C)} = 8,78 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

**Aparatura.** Pomiary prowadzono w poziomych kanałach o średnicy wewnętrznej 20 mm i długości 2610 mm wypełnionych trzema rodzajami pian aluminiowych o gęstości upakowania porów 20, 30 oraz 40 PPI (*Por Per Inch*) i charakterystyce podanej w tab. 1.

**Metodyka.** W każdym przypadku pomiaru udziału objętościowego fazy ciekłej  $\varepsilon_c$ , tj. oleju lub wody dokonywano metodą objętościową, która polega na zatrzymaniu przepływu określonej objętości mieszaniny w rurze poprzez jednoczesne zamknięcie wlotu i wylotu kanału za pomocą szybkozamykających się zaworów. Umożliwiało to też wyznaczenie udziału objętościowego fazy gazowej ( $\varepsilon_g$ ). Parametry przepływowe poszczególnych składników mieszaniny dwufazowej powietrze-woda i powietrze-olej zestawiono w tab. 2. Podane wartości obliczono z następujących zależności:

– prędkość pozorna danej fazy (gazu lub cieczy)

$$u_{sg(l)} = (G_{g(l)} / (\rho_{g(l)} A)) \quad (1)$$

Tab. 1. Charakterystyka pian aluminiowych wykorzystanych w badaniach

Piana (stop)	20 PPI (AlSi7Mg)	30 PPI (AlSi7Mg)	40 PPI (Al 6101)
Porowatość, $\varphi$ , [%]	93,4	94,3	92,9
Średnica komórki, $d_c$ , [mm]	3,452	2,255	2,386

Tab. 2. Zakres prowadzonych badań

Płyn ( <i>f</i> )	$u_{s,f}$ , [m/s]	$\xi_f$ , [-]
Powietrze (g)	0,028÷2,39	0,313÷0,998
Woda (w)	0,006÷0,061	0,002÷0,988
Olej (o)	0,006÷0,061	0,002÷0,988

– wlotowy udział objętościowy gazu (cieczy)

$$\xi_{g(l)} = Q_{g(l)} / (Q_g + Q_c) = u_{sg(l)} / (u_{sg} + u_{sl}), \quad (2)$$

gdzie:

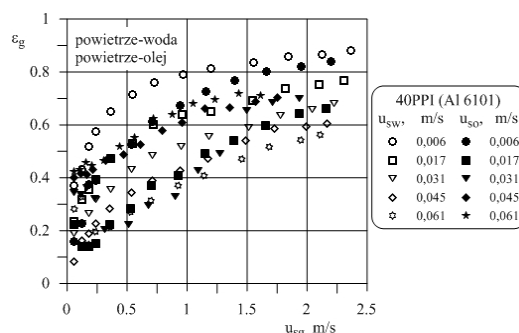
$G_{g(l)}$  – strumień masowy gazu (cieczy) [kg/s],  
 $A$  – pole przekroju porzecznego kanału [m<sup>2</sup>],  
 $Q_{g(l)}$  – strumień objętościowy gazu (cieczy) [m<sup>3</sup>/s].

### Wyniki i ich analiza

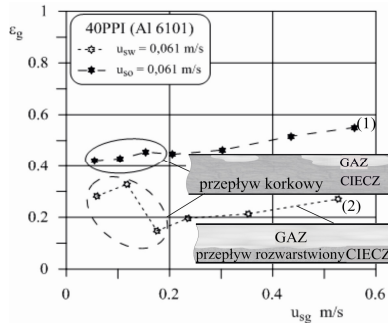
W trakcie badań zaobserwowano struktury typowe dla przepływu dwufazowego gaz-ciecz w kanałach niewypełnionych, tj. rozwarstwioną, korkową rzutową i tłokową. Przy przetłaczaniu mieszaniny powietrze-olej przez kanał wypełniony pianą obserwowano większą różnorodność struktur przepływu niż w przypadku przepływu powietrze-woda, dla którego obserwowano głównie przepływ rozwarstwiony. Z rys. 1 wynika, że w przepływie powietrze-woda udział objętościowy gazu ( $\varepsilon_g$ ) zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu ( $u_{sg}$ ), natomiast wzrost prędkości pozornej wody ( $u_{sw}$ ) przyczynia się do jego redukcji. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem strumienia wody zmniejsza się ilość wolnej przestrzeni dostępnej dla fazy gazowej. W takich warunkach gaz szybciej przepływa przez komórki piany i zmniejsza się jego udział objętościowy.

W przepływie powietrze-olej tego typu trend zmian udziałów ( $\varepsilon_g$ ) stwierdzono jedynie dla prędkości oleju  $u_{so} = 0,006 \text{ m/s}$  i  $0,017 \text{ m/s}$ . Dla większych prędkości oleju przebieg zmian udziałów jest bardziej różnicowany i nie tak oczywisty.

W przypadku dwóch serii pomiarowych (Rys. 2), przy maksymalnej prędkości pozornej cieczy zarówno oleju  $u_{so} = 0,061 \text{ m/s}$  (linia 1) jak i wody  $u_{sw} = 0,061 \text{ m/s}$  (linia 2) oraz prędkości gazu nie przekraczającej 0,2 m/s, obserwowano lokalną redukcję wartości udziału objętościowego powietrza związaną ze zmianą struktury korkowej na rozwarstwioną. W przepływie korkowym gaz płynie (z prędkością zbliżoną do prędkości cieczy) w postaci niewielkich wydłużonych korków, których rozmiar zwiększa się wraz ze wzrostem  $u_{sg}$ . Dalszy wzrost strumienia powietrza powoduje przejście w przepływ rozwarstwiony, w którym gaz płynie ze znacznie większą prędkością



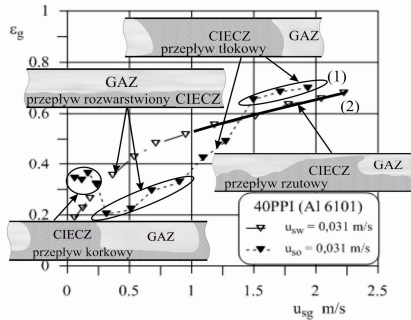
Rys. 1. Udział objętościowy gazu w funkcji prędkości pozornej gazu dla mieszaniny powietrze-woda oraz powietrze-olej (piana 40PPI)



Rys. 2. Udział objętościowy powietrza w przepływie gaz-ciecz (piana 40PPI)

w postaci ciągłej cienkiej warstwy górną częścią kanału. Silne przyspieszenie gazu powoduje spadek udziału objętościowego tej fazy pomimo wzrostu strumienia powietrza zasilającego kanał.

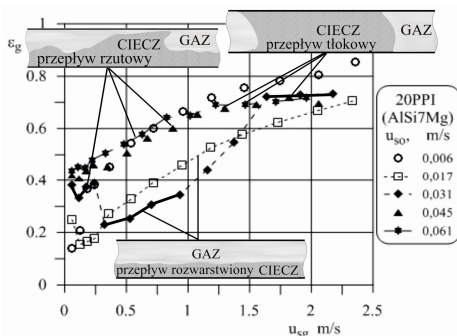
Wpływ struktur na wartość udziałów objętościowych jest szczególnie mocno widoczny dla przepływu z prędkością pozorną oleju  $u_{so} = 0,031$  m/s (rys. 3 - 4). W zakresie małych prędkości gazu  $u_{sg} < 0,25$  m/s w kanale kształtują się przepływy korkowy bądź rzutowy, którym odpowiadają duże wartości  $\epsilon_g$ . W przepływie rozwarstwowym udział powietrza jest znacznie mniejszy, przy czym wzrasta, gdy przepływ stopniowo zmienia się w tłokowy.



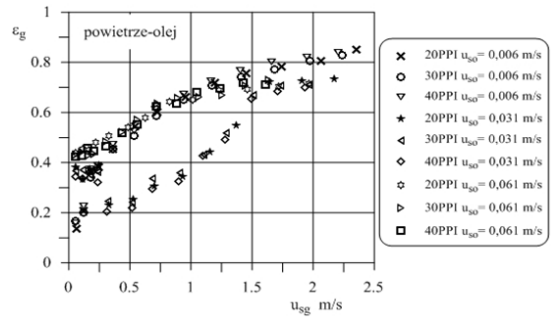
Rys. 3. Udział objętościowy gazu dla mieszaniny powietrze-woda i powietrze-olej

Zaobserwowano, że przy największym strumieniu oleju ( $u_{so} = 0,045$  i  $u_{so} = 0,061$  m/s) przepływ rzutowy oraz tłokowy występują w całym zakresie zmian prędkości powietrza (Rys. 4). Tym samym przebieg zmian udziału objętościowego powietrza ma charakter jednostajnie rosnący, przy czym generalnie udział powietrza jest większy niż w przypadku przepływu z mniejszymi strumieniami oleju, gdzie obserwowano przepływ rozwarstwiony, np. dla  $u_{so} = 0,006$  m/s i  $u_{sg} < 0,75$  m/s. W przypadku wszystkich trzech pian (w odpowiadających sobie warunkach przepływu oleju) zarejestrowano prawie takie same wartości udziałów objętościowych faz, co świadczy o braku wpływu parametrów geometrycznych piany na wartość udziału objętościowego faz (Rys. 5).

Powietrze ze względu na małą lepkość przepływa z dużą prędkością stosunkowo swobodnie przez kanał wypełniony pianą, natomiast ciecz o większej lepkości (zwłaszcza olej) w znacznym stopniu jest hamowana przez wypełnienie.

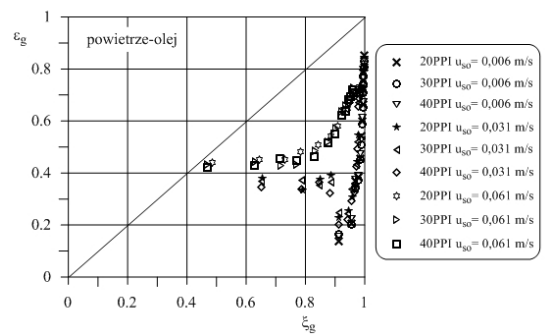


Rys. 4. Zmierzony udział objętościowy powietrza w mieszaninie z olejem (20PPI)



Rys. 5. Porównanie wartości udziału objętościowego powietrza w przepływie przez piany 20, 30 i 40PPI, przy różnej prędkości oleju

W efekcie tego udział objętościowy powietrza ( $\epsilon_g$ ) w mieszaninie z cieczą może być ponad czterokrotnie mniejszy od wlotowego udziału objętościowego gazu ( $\zeta_g$ ) czyli wynikającego z relacji strumienia objętościowych faz na wlocie do kanału (Rys. 6).



Rys. 6. Porównanie wartości zmierzonego i wlotowego udziału objętościowego gazu

## Wnioski

Stwierdzono, że w przepływie powietrze-woda w kanale wypełnionym pianami metalowymi udział objętościowy gazu zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu przy czym wzrost prędkości pozornej wody przyczynia się do jego redukcji.

Z kolei w przepływie powietrze-olej taki trend zmian udziału objętościowego gazu obserwowano jedynie dla najmniejszych prędkości pozornych oleju. Dla największych prędkości oleju (przepływ rzutowy, tłokowy) przebieg zmian udziału objętościowego powietrza ma charakter jednostajnie rosnący przy czym udział objętościowy gazu jest większy niż obserwowano to w przypadku przepływu rozwarstwowanego.

Dla obu układów stwierdzono duży wpływ struktur przepływu na wartość udziału objętościowego gazu. Obserwowano występowanie dużych różnic pomiędzy wartościami zmierzonego i wlotowego udziału objętościowego gazu, czego przyczyną jest niewątpliwie poślizg międzyfazowy. Nie stwierdzono natomiast istotnego wpływu parametrów geometrycznych pian na wartość udziałów objętościowych faz.

## LITERATURA

- Hu H., Zhu Y., Peng H., Ding G., Sun S., 2014. Effect of tube diameter on pressure drop characteristics of refrigerant-oil mixture flow boiling inside metal-foam filled tubes. *Appl. Therm. Eng.*, **62**, 433-443. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.051
- Mahdi H., Lopez P., Fuentes A., Jones R., 2006. Thermal Performance of Aluminium-foam CPU heat exchangers. *Int. J. Energy Res.* **30**, 851-860. DOI: 10.1002/er.1188
- Pangarkar K., Schildhauer T.J., J.R. van Ommen, Nijenhuis J., Moulijn J.A., Kapteijn F., 2010. Heat transport in structured packings with co-current downflow of gas and liquid. *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 420-426. DOI:10.1016/j.ces.2009.08.018
- Stemmet C.P., Schaaf J., Kuster B.M.F., Schouten J.C., 2006. Solid foam packings for multiphase reactors: modeling of liquid holdup and mass transfer. *Chem. Eng. Res. Des.*, **84** (12), 1134-1141. DOI:10.1205/cherd0503