

Małgorzata PŁACZEK, Roman DYGA

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Ocena metod wyznaczania udziałów objętościowych faz w odniesieniu do przepływu gaz-ciecz w kanałach wypełnionych pianami metalowymi

Wstęp

W literaturze brak jest zależności do obliczania udziałów objętościowych faz w przepływie powietrze-olej w kanałach poziomych wypełnionych pianami metalowymi. Stąd też w pracy przeprowadzono analizę własnych danych doświadczalnych w oparciu o dostępne w literaturze zależności matematyczne opracowane dla układów dwufazowych gaz-ciecz przepływających przez kanały lub kolumny wypełnione materiałem porowatym. Ponadto bazując na wynikach wcześniejszych analiz [Płaczek i in., 2012] oraz biorąc pod uwagę podobieństwo identyfikowanych w badaniach własnych struktur przepływu (przepływ rozwarstwiony, korkowy, rzutowy) do klasycznych struktur obserwowanych przy przepływie mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz przez kanał poziomy, dane eksperymentalne wykorzystano również do ewaluacji ważności modeli opracowanych dla układów gaz-ciecz przepływających przez kanały niewypełnione.

Badania doświadczalne

Materiały. Badano przepływ układu 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 pianą aluminiową o różnej gęstości upakowania porów, tj. 20, 30 oraz 40 PPI (por per inch). Różniły się one porowatością ϕ i wielkością komórek d_c (Tab. 1). Zdjęcia przykładowej piany wykorzystanej w badaniach własnych przedstawiono na rys. 1.

Tab. 1. Charakterystyka pian aluminiowych wykorzystanych w badaniach

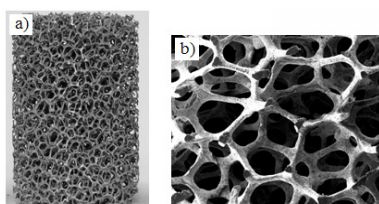
| Piana (stop) | 20 PPI (AlSi7Mg) | 30 PPI (AlSi7Mg) | 40 PPI (Al 6101) |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Porowatość ϕ , [%] | 93,4 | 94,3 | 92,9 |
| Średnica komórki d_c , [mm] | 3,452 | 2,255 | 2,386 |

Metodyka. Badania doświadczalne obok pomiaru udziałów objętościowych faz obejmowały także pomiar spadków ciśnienia oraz identyfikację struktur przepływu. Pomiar udziału objętościowego realizowano metodą objętościową, która polegała na zatrzymaniu mieszaniny powietrze-olej w odcinku pomiarowym o znanej objętości. Pomiar objętości oleju zatrzymanego w rurze przy znajomości całkowitej objętości odcinka pomiarowego, jednocześnie umożliwia wyznaczenie udziału objętościowego powietrza (ϵ_g).

Zakres badań podano w tab. 2. W obliczeniach zastosowano poniższe zależności:

– prędkość pozorną gazu (u_{sg}) i oleju (u_{so})

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



Rys. 1. Piana *Duocell* 20 PPI: a) wypełnienie kanału, b) szkielet komórkowy

Tab. 2. Zakres badań doświadczalnych

| Płyn (f) | Prędkość pozorną $u_{s,f}$, [m/s] | Wlotowy udział objętościowy ξ_f , [-] |
|---------------|------------------------------------|---|
| Powietrze (g) | 0,028±2,39 | 0,313±0,998 |
| Olej (o) | 0,006±0,061 | 0,002±0,988 |

– wlotowy udział objętościowy gazu (oleju)

$$\xi_{g(o)} = Q_{g(o)} / (Q_g + Q_o) = [u_{sg(o)} / (u_{sg} + u_{so})] \quad (2)$$

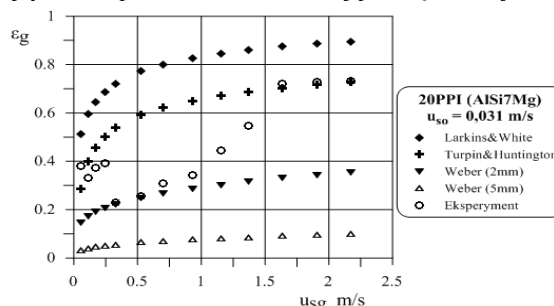
gdzie:

- $G_{g(o)}$ – strumień masowy gazu (oleju), [kg/s],
- A – pole przekroju porzecznego kanału, [m²],
- $Q_{g(o)}$ – strumień objętościowy gazu (oleju), [m³/s].

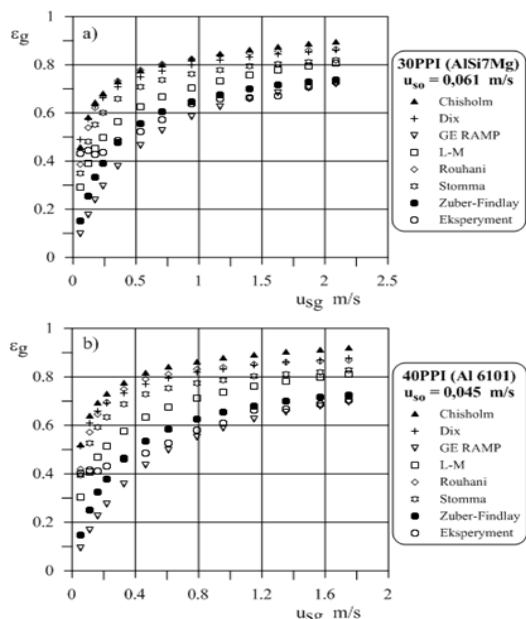
Wyniki i ich analiza

Do opisu udziałów objętościowych faz w przepływie powietrze-olej przez kanały wypełnione pianami metalowymi wykorzystano w pracy trzy modele opracowane dla ośrodków porowatych, tj. model *Larkinsa* i *White'a* [1961], *Turpina* i *Huntingtona* [1967] oraz *Webera* [1961]. Dokonano również ewaluacji ważności 7 modeli obliczania udziałów objętościowych faz opracowanych dla układów gaz-ciecz przepływających przez kanały niewypełnione, tj. modelu *Lockharta-Martinello* [1949], *Zubera-Findlaya* [1965], *Dixa* [1971], *Chisholma* [1974], modelu *GE RAMP* [Punches, 1977], *Stommy* [1979] oraz *Rouhani'ego* [1986].

Analiza danych na przedstawionych na rys. 2 wskazuje, że żadna z metod opracowanych dla ośrodków porowatych nie oddaje dobrze charakteru zmian oraz wartości zmierzonego udziału objętościowego gazu ϵ_g , a wartości są znacznie zawyżone bądź zaniżone. Wynika to z faktu, że oryginalnie metody te opisują przepływ gaz-ciecz realizowany w aparatach kolumnowych o orientacji pionowej, a więc odmiennej od rozpatrywanej w badaniach własnych. Ponadto diametralnie różna struktura geometryczna złoża usypanego i piany, powoduje duże problemy z ustaleniem wymiarów charakterystycznych w zależnościach obliczeniowych, np. średnicy hydraulicznej. W ośrodkach ziarnistych jest to zwykle wielkość odniesiona do średnicy cząstki, która w pianach fizycznie nie istnieje. Możliwość bezpośredniego wykorzystania modeli słusznych dla przepływu w ośrodkach porowatych do opisu udziałów objętościowych faz w przepływie gaz-ciecz przez piany jest ograniczona ze względu na występowanie wyraźnie innych struktur przepływu w pianach metalowych niż w ośrodkach porowatych. Większa różnorodność struktur przepływu w pianach metalowych sprawia, że zjawiska towarzyszące przepływowi w przestrzeni komórkowej pian są bardziej złożone.

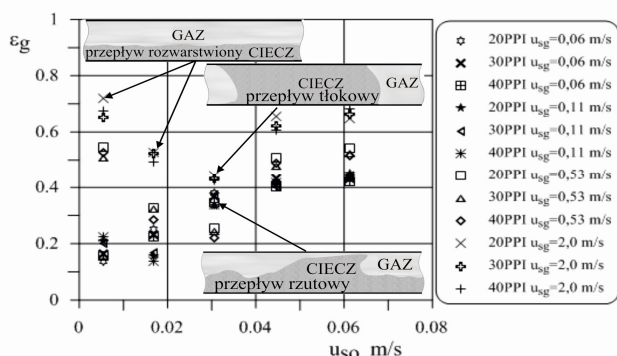


Rys.2. Udział objętościowy gazu w przepływie powietrze-olej obliczony wg metod opracowanych dla ośrodków porowatych ($u_{so} = 0,031 \text{ m/s}$)



Rys. 3. Udział objętościowy gazu w przepływie powietrze-olej obliczony wg metod opracowanych dla kanałów niewypełnionych: a) 30 PPI, b) 40 PPI

Z rys. 3 wynika, że udział objętościowy gazu zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu. W odniesieniu do wyników własnych badań eksperymentalnych wybrane metody obliczeniowe opracowane dla kanałów niewypełnionych w większości przypadków dają znacznie zawyżone wyniki obliczeń. Można to tłumaczyć tym, że metody te odnoszą się do przepływu przez rury pozbawione wypełnienia, w których poślizg międzyfazowy jest znacznie mniejszy od tego występującego w kanałach wypełnionych, w których może dochodzić do akumulacji cieczy na wypełnieniu. Wpływ poślizgu międzyfazowego jest szczególnie widoczny w przypadku przepływu rozwarstwowanego, kiedy gaz przepływa w górnej części kanału pomiarowego ze znacznie większą prędkością niż faza olejowa. W efekcie tego udział objętościowy powietrza ϵ_g w mieszaninie z olejem może być ponad 4-krotnie mniejszy od wlotowego udziału objętościowego gazu ζ_g , czyli wynikającego z relacji strumieni objętościowych faz na wlocie do kanału. W badaniach stwierdzono duży wpływ struktur przepływu na wartość udziałów objętościowych faz, co pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Udział objętościowy gazu w funkcji prędkości pozornej oleju

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej metod obliczania udziałów objętościowych faz w przepływie powietrze-olej przez kanały wypełnione pianą metalową przedstawiono w tab. 3. Z przeprowadzonej oceny wynika, że większość z analizowanych metod nie pozwala obliczyć wartości udziałów objętościowych faz z należytą dokładnością. Wysoce niezadowolające wyniki uzyskano dla modeli obliczania udziałów objętościowych faz opracowanych dla przepływu przez ziarniste ośrodki porowate, dla których wartość średniego odchylenia standardowego (RMS) przekracza znacznie

70%, a wartość błędu względnego $\delta(\epsilon)$ – 49%. Najlepsze przybliżenie do danych eksperymentalnych zapewniają metody *GE RAMP* [Punches, 1977] oraz *Zubera-Findlaya* [1965] opracowane dla przepływów przez kanały niewypełnione. Metody te w przypadku przepływu przez badane piany pozwalają wyznaczyć ϵ_g z dokładnością (RMS) odpowiednio 36% i 45% oraz z błędem względnym $\delta(\epsilon)$ na poziomie 13% oraz 19%.

Tab. 3. Ocena statystyczna wyników obliczeń

| Autor modelu | Oznaczenie piany (stop) | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| | 20 PPI (AlSi7Mg) | | 30 PPI (AlSi7Mg) | | 40 PPI (Al 6101) | |
| | RMS | $\delta(\epsilon)$ | RMS | $\delta(\epsilon)$ | RMS | $\delta(\epsilon)$ |
| [Lockhart i Martinelli., 1949] | 1,01 | 1,01 | 0,96 | 0,92 | 1,11 | 1,24 |
| [Zuber i Findlay, 1965] | 0,46 | 0,20 | 0,45 | 0,19 | 0,55 | 0,30 |
| [Dix, 1971] | 1,29 | 1,67 | 1,24 | 1,53 | 1,42 | 2,04 |
| [Chisholm, 1974] | 1,36 | 1,86 | 1,30 | 1,71 | 1,50 | 2,27 |
| <i>GE RAMP</i> [Punches, 1977] | 0,36 | 0,13 | 0,36 | 0,13 | 0,42 | 0,17 |
| [Stomma, 1979] | 1,20 | 1,44 | 1,14 | 1,30 | 1,32 | 1,74 |
| [Rouhani., 1986] | 1,21 | 1,47 | 1,16 | 1,35 | 1,35 | 1,84 |
| [Larkins i White, 1961] | 1,17 | 1,37 | 1,10 | 1,22 | 1,26 | 1,60 |
| [Turpin i Huntington, 1967] | 0,77 | 0,60 | 0,70 | 0,49 | 0,84 | 0,69 |
| [Weber, 1961] (2 mm) | 0,85 | 0,72 | 0,85 | 0,72 | 0,84 | 0,71 |
| [Weber, 1961] (5 mm) | 0,86 | 0,73 | 0,86 | 0,73 | 0,85 | 0,72 |

Wnioski

Przeprowadzona ocena statystyczna metod obliczania udziałów objętościowych faz w przepływie powietrze-olej pozwala stwierdzić, że większość z nich nie pozwala obliczyć wartości udziałów objętościowych faz z należytą dokładnością. Niezadowolające wyniki uzyskano dla metod obliczania udziałów objętościowych faz opracowanych dla przepływu przez ziarniste ośrodki porowate.

Najlepsze przybliżenie do danych eksperymentalnych zapewniają metody *GE RAMP* [Punches, 1977] oraz *Zubera-Findlay'a* [1965] opracowane dla przepływów przez kanały niewypełnione.

Biorąc pod uwagę, wyniki powyższej analizy model opisujący udziały objętościowe faz w przepływie przez kanały wypełnione pianami metalowymi musi uwzględniać (w większym stopniu niż modele dostępne w literaturze) specyfikę warunków przepływu, tj. właściwości fizyczne płynów, charakter przepływu oraz struktury przepływu.

LITERATURA

Chisholm D., 1974. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 10, 1767–1778. DOI: 10.1016/0017-9310(67)90047-6

Dix G.E., 1971. *Vapor void fraction for forced convection with subcooled boiling at low flow rates*, Ph. D. Thesis, Uni. of California, Berkeley

Larkins RP, White RR., 1961. Two-phase concurrent flow in packed beds. *AIChE J.*, 7, 231-239. DOI: 10.1002/aic.690070213

Lockhart R.C., Martinelli R.W., 1949. Proposed correlation of data for isothermal two-phase flow, two-component flow in the pipes. *Chem. Eng. Prog.*, 45, 1, 39-48

Placzek M., Dyga R., Witczak S., 2012. Experimental investigation of void fraction in gas-liquid flow through FeCrAlY foam. *Proc. Eng.*, 42, 755-768. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.462

Punches W.C., 1977. MAYOUND-4A method evaluate transient thermal-hydraulic condition in rod bundles. Report GE RAMP no 23517.

Rouhani Z., 1986. *Steady state void fraction and pressure drop in water cooled reactors*. AB Atomenergie, Studsvik, Sweden

Stomma Z., 1979. *Two-phase flows – void fraction values determination*. Institute of Nuclear Research, Świerk/Warszawa, Report INR/18187/IXD/R/A

Turpin JL, Huntington RL., 1967. Prediction of pressure drop for two-phase two-component concurrent flow in packed beds. *AIChE J.*, 13, 1196-1202. DOI: 10.1002/aic.690130630

Weber H.H., 1961. *Untersuchungen über die Verweilzeitverteilung in Aufstromkolonnen*. PhD Dissertation, TH Darmstadt, Deutschland

Zuber N., Findlay J.A., 1965. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. *J. Heat Trans., Trans. ASME* 87, 453-468. DOI: 10.1115/1.3689137