

Małgorzata PŁACZEK, Stanisław WITCZAK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Ocena metod obliczania udziałów objętościowych faz we wznoszącym przepływie trójfazowym

Wprowadzenie

Udział objętościowy faz w przepływającej strudze trójfazowej gaz – ciecz – ciecz należy obok struktur przepływu i strat ciśnienia do trzech podstawowych wielkości charakteryzujących przepływ tego typu mieszanin w kanałach. Znajomość udziału faz jest niezbędna przy wyznaczaniu gęstości czy lepkości mieszaniny trójfazowej, ciśnienia hydrostatycznego, strat ciśnienia, czy też określania warunków wymiany ciepła i masy w przepływie takiej mieszaniny.

Podejmowane próby opisu zmian wartości udziałów objętościowych faz w przepływie trójfazowym sprowadzały się głównie do adaptacji modeli opracowanych dla przepływu dwufazowego gaz – ciecz, w których składniki ciekłe mieszaniny trójfazowej tj. wodę i olej traktuje się jak pojedynczą fazę ciekłą (mieszaninę homogeniczną) a tym samym pomija występujący pomiędzy olejem i wodą poziom międzyfazowy. Często opracowane w ten sposób zależności do opisu przepływu trójfazowego gaz – ciecz – ciecz mają ograniczony zakres stosowności i dają w efekcie niezbyt zadowalające rezultaty.

Badania eksperymentalne

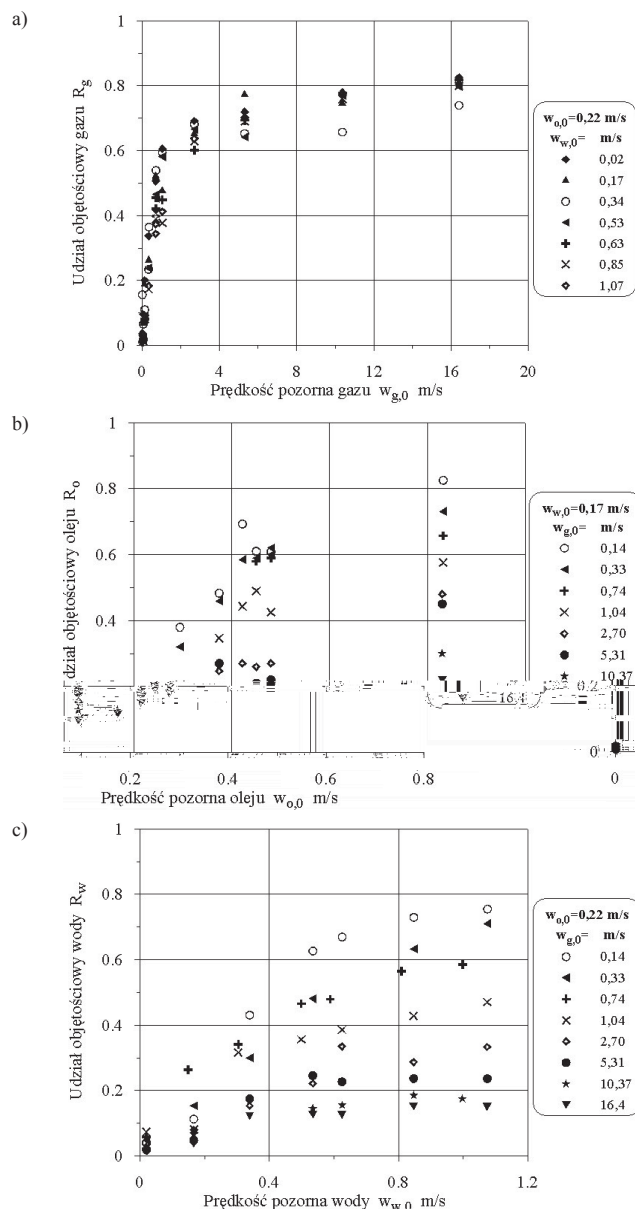
Badania przepływu mieszaniny składającej się z powietrza, wody i oleju maszynowego o gęstości 865 kg/m^3 i lepkości $29,1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (w temperaturze 20°C) obejmujące obok pomiaru udziałów objętościowych również pomiar spadków ciśnienia czy identyfikację struktur przepływu realizowano w kanałach o średnicy 30 i 40 mm i długości 7,5 m. Parametry przepływowe poszczególnych składników mieszaniny trójfazowej zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Warunki prowadzenia badań

Czynnik	Prędkość pozorna $w_{i,0}$	Liczba <i>Reynoldsa</i> Re_i	Gęstość strumienia masy $g_{i,0}$	Udział objętościowy faz ϵ_i	Koncentracja faz ciekłych ϵ_i
	m/s	–	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	–	–
powietrze	0,01-16,40	31-53052	0,01-18,73	0,013-0,99	–
woda	0,02-1,07	404-28736	5,3-1047,7	0,001-0,98	0,083-0,999
olej LAN15	0,001-0,63	0,4-353	0,77-538,65	0,0001-0,92	0,001-0,917

Wyniki badań i analiz

Przeprowadzona analiza zmian wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz w strudze trójfazowej pozwoliła stwierdzić, że udział objętościowy gazu R_g niezależnie od tego, która z faz ciekłych dominuje w przepływie (woda czy olej) zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu, przy czym wartość ta ulega zmniejszeniu w przypadku wzrostu prędkości pozornych którejkolwiek z cieczy (Rys. 1a). Stwierdzono ponadto, że wartości udziału objętościowego powietrza R_g są mniejsze od odpowiadających im wartości wlotowego udziału objętościowego ϵ_g wynikającego z relacji strumieni zasilających kanał pomiarowy. W przypadku udziałów objętościowych oleju R_o (Rys. 1b) oraz wody R_w (Rys. 1c) stwierdzono, że wartości te zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości pozornych odpowiednio oleju i wody, przy czym wzrost prędkości pozornej fazy gazowej przyczynia się do zmniejszenia się wartości udziału objętościowego każdej z faz ciekłych. Z analizy zmian R_o oraz R_w wynika, że przyjmują one wartości większe od wartości wynikających z zadanych na wlocie do kanału strumieni



Rys. 1. Zmierzony udział objętościowy R_i dla: a) gazu (R_g) $w_{o,0} = 0,22 \text{ m/s}$; b) oleju (R_o) $w_{w,0} = 0,17 \text{ m/s}$; c) wody (R_w) $w_{o,0} = 0,22 \text{ m/s}$

objętościowych (ϵ_o , ϵ_w), co świadczy o akumulacji odpowiednio każdej z tych faz w kanałach. Przyczyną tej akumulacji może być wyhamowanie fazy ciekłej na skutek jej kontaktu ze ścianką kanału, ale także może być to efekt często obserwowanego np. w przepływie korkowym zjawiska wstecznego przepływu części cieczy i to niezależnie od dominującej fazy ciekłej w przepływie.

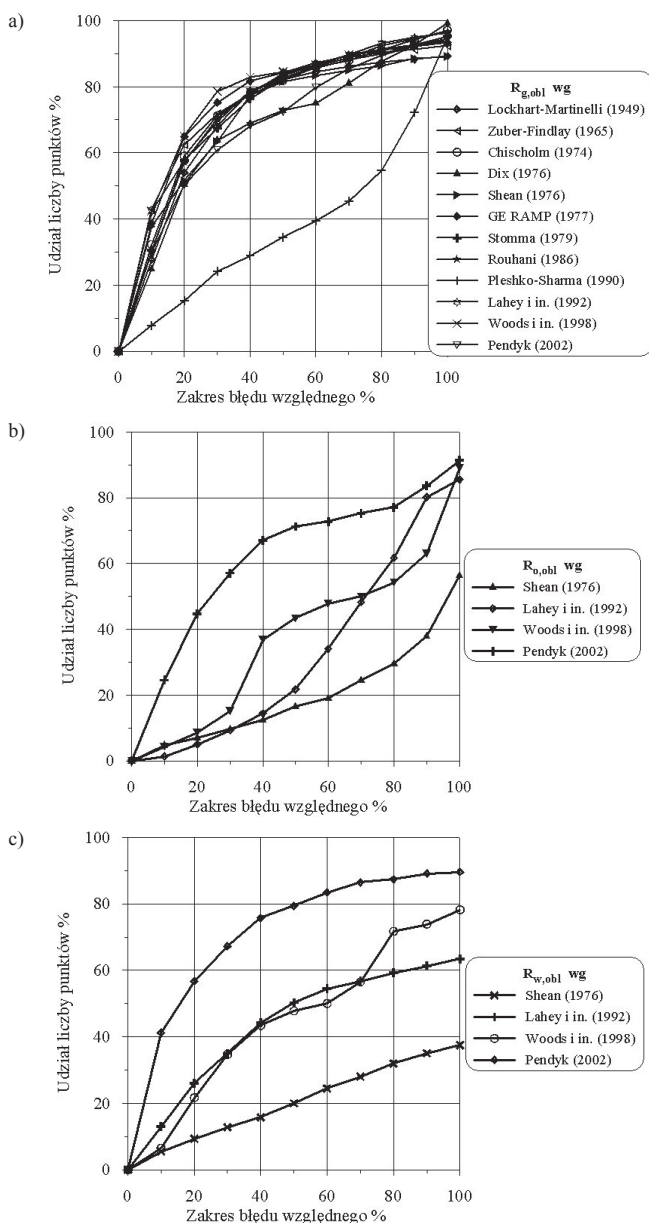
W pracy poddano weryfikacji i ocenie statystycznej metody obliczania udziału objętościowego gazu oraz cieczy opracowane zarówno dla układów dwu- jak i trójfazowych. Dane doświadczalne R_g porównano z obliczonymi $R_{g,obl}$ (Rys. 2a) zgodnie z modelem *Lockharta-Martinellego* [1], *Chischolma* [2], *Stommy* [3] *Pleshko-Sharmy* [4] oraz mo-

delami *dryft-flux* opracowanymi przez *Zubera-Findlaya* [5], *Dixa* [6], *Rouhani* [7] oraz modelem GE RAMP [8]. Z kolei eksperymentalne wartości R_o oraz R_w , porównano odpowiednio z $R_{o,obl}$ (Rys. 2b) i $R_{w,obl}$ (Rys. 2c) wyznaczonymi według metody *Sheana* [9], *Laheya i in.* [10], *Woodsa i in.* [11] oraz *Pendyk* [12]. Algorytmy wykorzystane do wyznaczenia udziału objętościowego faz w przepływie trójfazowym zostały szczegółowo opisane w pracy [13].

Z wykresu na rys. 2a wynika, że najlepszą spośród wszystkich analizowanych metod obliczania R_g jest metoda *Woodsa i in.* [11] dla której ok. 80% punktów mieści się w zakresie $\pm 30\%$ błędu względnego. Bardzo zbliżone wartości dokładności obliczania R_g uzyskano dla metody GE RAMP [8] oraz *Zubera-Findlaya* [5].

W przypadku faz ciekłych, tj. wody (Rys. 2c) i oleju (Rys. 2b) najlepszą spośród weryfikowanych metod obliczeniowych okazała się metoda opracowana przez *Pendyk* [12]. Z przebiegu krzywej na wykresie (Rys. 2c) wynika, że ok. 70% punktów obliczonych według tej metody dla fazy wodnej i ok. 60% dla fazy olejowej (Rys. 2b) leży w zakresie $\pm 30\%$ błędu względnego.

Przeprowadzona analiza i ocena dokładności szeregu zależności do obliczania wartości udziałów objętościowych faz w przepływie trójfazowym pozwoliła stwierdzić, że najkorzystniejszym modelem pozwalającym na opracowanie nowej dokładniejszej metody ich wyznaczania jest



Rys. 2. Porównanie dokładności obliczeń R_i w przepływie trójfazowym gaz – ciecz – ciecz według analizowanych metod dla: a) gazu ($R_{g,obl}$), b) oleju ($R_{o,obl}$), c) wody ($R_{w,obl}$)

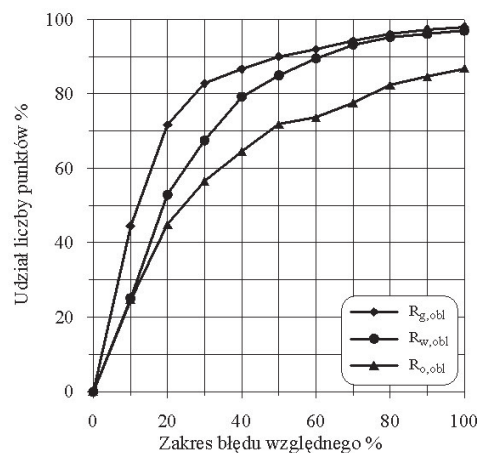
model typu *drift-flux*. W oparciu o tą metodę opracowano zależności do obliczania wartości udziałów objętościowych gazu (1) oraz wody (2), natomiast udział objętościowy oleju w proponowanym modelu przyjęto obliczać jako uzupełnienie do jedności zgodnie z zależnością (3).

$$R_g = \frac{w_{g,o}}{[1 + 0,481(1 - \varepsilon_w)^{0,172}]w_{3F} + w_{g-3F}}, \quad (1)$$

$$R_w = \frac{w_{w,o}(1 - R_g)}{[1 + 0,175(1 - \varepsilon_w)^{0,151}]w_{c,o} - w_{w-c,o}}, \quad (2)$$

$$R_o = 1 - R_g - R_w. \quad (3)$$

Opracowana zależność (1) pozwala wyznaczyć R_g , natomiast zależność (2) – R_w ze średnią wartością błędów względnego wynoszącą odpowiednio $\pm 18,6\%$ i $\pm 28,4\%$. Porównania dokładności obliczeń udziałów objętościowych wszystkich faz w przepływie trójfazowym dokonano na rys. 3, na którym zilustrowano wyniki obliczeń statystycznych określających udział liczby punktów doświadczalnych mieszczących się w określonych granicach bezwzględnej wartości błędów względnych.



Rys. 3. Rozkład dokładności obliczeń udziałów objętościowych faz w przepływie trójfazowym powietrze – woda – olej

Porównując przedstawione na rys. 3 wyniki z danymi zawartymi na rys. 2a-c należy stwierdzić, że opracowana nowa metoda obliczania udziałów objętościowych faz zapewnia najwyższą dokładność obliczeń i może być polecona do wyznaczania tych wielkości we wznoszącym przepływie trójfazowym gaz – ciecz – ciecz.

Wnioski

Opracowana w oparciu o model *drift-flux* metoda obliczania udziałów objętościowych faz we wznoszącym przepływie trójfazowym, może być wykorzystana do wyznaczania tych wielkości niezależnie od dominującej fazy ciekłej w przepływie. Zapewnia ona najwyższą dokładność obliczeń R_i spośród kilkunastu analizowanych modeli obliczeniowych.

LITERATURA

- [1] R.C. Lockhart et al.: Chem. Eng. Progr. **45** (1949).
- [2] D. Chischolm: Int. J. Heat. Transfer, **10** (1974).
- [3] Z. Stomma: Report INR/18187/IXD/R/A, Institute of Nuclear Research Swierk/Warszawa 1979.
- [4] A. Shean: ASME Proc. Conf. Advances in Gas-Liquid Flows, 97, Dallas Texas 1990.
- [5] N. Zuber, J.A. Findlay: Trans ASME, J. of Heat Transfer, **85** (1965).
- [6] G.E. Dix: Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley 1971.
- [7] Z. Rouhani: AB Atomenergie, Studsvik, Sweden 1986.
- [8] W.C. Panches: Report GERAMP no 23517, 1977.
- [9] A. Shean: Master Thesis, 1976.
- [10] R.T. Lahey et al.: AIChE J. **38**, s. 1049-1058 (1992).
- [11] G.S. Woods et al.: Trans. IChemE, **76**, Part A, 571 (1998).
- [12] S. Witeczak, B. Pendyk: Inż. Chem. Proc. **25**, 75 (2004).
- [13] M. Nowak: Praca doktorska, Opole 2007.