

Krzystian Czernek, Patryk Okoń

e-mail: k.czernek@po.edu.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Weryfikacja metod obliczania udziału objętościowego gazu

Wstęp

Przepływy wielofazowe są obiektem wielu badań oraz analiz z powodu stałego zainteresowania ze strony przemysłu. Przepływ dwufazowy gaz-ciecz jest szeroko stosowany w wielu gałęziach przemysłu, takich jak: energetyka, przemysł spożywczy, przemysł chemiczny czy ochrona środowiska. Ze względu na ciągły rozwój procesów wymiany pędu, ciepła i masy ważne jest rozpoznanie hydrodynamiki przepływu dwufazowego stosowanego m.in. w aparatach warstewkowych, kolumnach barbotażowych, destylacyjnych i rektyfikacyjnych, w reaktorach i bioreaktorach, jak również w procesach sedymentacji, fluidyzacji, filtracji czy transportu pneumatycznego i hydraulicznego.

Udział objętościowy gazu

Przepływ dwufazowy charakteryzują trzy podstawowe parametry: opory przepływu, struktury przepływu oraz udział objętościowy faz. Wyznaczenie udziału objętościowego gazu jest bardzo ważne podczas projektowania aparatury przemysłowej, jednak dokładne jego określenie jest niezmiernie trudne ze względu na złożoność opisujących go parametrów. Ogólna zależność przedstawiająca udział objętościowy gazu w przepływie dwufazowym gaz-ciecz przedstawia się następująco:

$$R_g = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g}{\rho_c} \frac{w_g}{w_c}} \quad (1)$$

gdzie: w_c – prędkość cieczy, [m/s]; w_g – prędkość gazu, [m/s]; ρ_c – gęstość cieczy, [kg/m³]; ρ_g – gęstość gazu, [kg/m³]

O wartości udziału objętościowego decyduje m.in. relacja rzeczywistych prędkości poszczególnych faz w_g/w_c . W literaturze [Czernek, 2013; Palińska, 2006] występują różne modele obliczeniowe tej wielkości, które można podzielić na modele bezpoślizgowe, w których wartość stosunku $w_g/w_c = 1$ oraz modele poślizgowe gdzie $w_g/w_c > 1$. Przedstawiane przez autorów modele obliczeniowe średniej wartości R_g różnią się między sobą postacią równania jak i zakresem stosowania dla różnych układów dwufazowych. Często prowadzą one również do różnych wyników w podobnych zakresach obliczeniowych.

Dane pomiarowe

W oparciu o przegląd literaturowy dotyczący metod obliczeniowych udziału gazu w przepływie dwufazowym stwierdzono, że wiele metod ma szczególne zakresy stosowania oraz różne postacie równań, które uniemożliwiają wprost porównanie ich przydatności. Podjęto zatem próbę oceny stosowności wybranych metod obliczeniowych dla typowych układów dwufazowych: woda-powietrze, alkohol etylowy-powietrze, gliceryna-powietrze. W celu przeprowadzenia analizy wykorzystano zbiór danych doświadczalnych Katedry Inżynierii Procesowej Politechniki Opolskiej [Przepływy dwufazowe, 2004].

Badania dotyczące wyznaczania wartości udziału objętościowych faz przeprowadzono w rurach pionowych o średnicy 50, 44, 25 i 24 mm przy współprądowym przepływie opadającym w zakresie prędkości pozornych gazu $w_g = 0,01 \div 75$ m/s i cieczy $w_c = 0,01 \div 2$ m/s oraz wzajemnej relacji gęstości $\rho_c/\rho_g = 683 \div 1060$ i lepkości η_c/η_g obu faz.

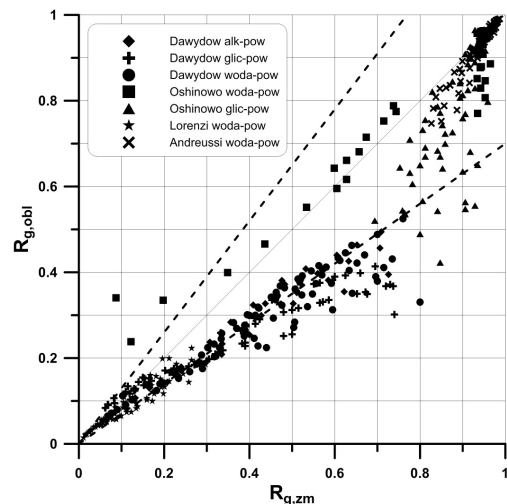
Metodyka i wyniki obliczeń

Wstępna analiza danych pozwoliła na wytypowanie metod, które w analizowanym zakresie pozwalały na uzyskiwanie najlepszych wyników. Metody te przedstawiono w tab. 1. Dokonano oceny wpływu wybranych parametrów na kształtowanie się wyników obliczeń (rozkładu punktów) w układzie $R_{g,obl} - R_{g,zm}$.

Tab. 1. Metody obliczania udziału objętościowego gazu

Autor	Zależność
Armand	$R_g = 1 - \frac{4 + \frac{8}{7}m}{5 + m \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} + \frac{8}{7} \right)}$ $m = 4 \operatorname{Re}_{c,0}^{\frac{1}{8}} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,5} \left[0,69 + (1 - \varepsilon) (4 + 21,9 \sqrt{Fr_{c,0}}) \right]$
Bankoff	$R_g = \varepsilon \left(0,71 + 2,35 \frac{\rho_c}{\rho_g} \right)$
Baroczy	$R_g = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,74} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,65} \left(\frac{\eta_c}{\eta_g} \right)^{0,13}}$
Harrison	$R_g = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,8} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,515}}$
Lockhart - Martinelli	$R_g = \frac{1}{1 + 0,28 \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,64} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,36} \left(\frac{\eta_c}{\eta_g} \right)^{0,07}}$
Thom	$R_g = \frac{\gamma x}{1 + x(\gamma - 1)} \quad \gamma = W^{1,6}$ $W = \left(\frac{\rho_c}{\rho_g} \right)^{0,555} \left(\frac{\eta_g}{\eta_c} \right)^{0,111}$

Interpretacje graficzne wybranych metod obliczeniowych udziału objętościowego gazu dla różnych mieszanin przedstawiono na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości udziału objętościowego gazu metodą Armanda

Wobec stwierdzonych niejednoznaczności (dotyczących wpływu parametrów przepływowych na wartość udziału objętościowego w przepływie dwufazowym gaz-ciecz) dokonano oceny statystycznej analizowanych metod obliczeniowych Polegała ona na wyznaczeniu średniej wartości błędu względnego:

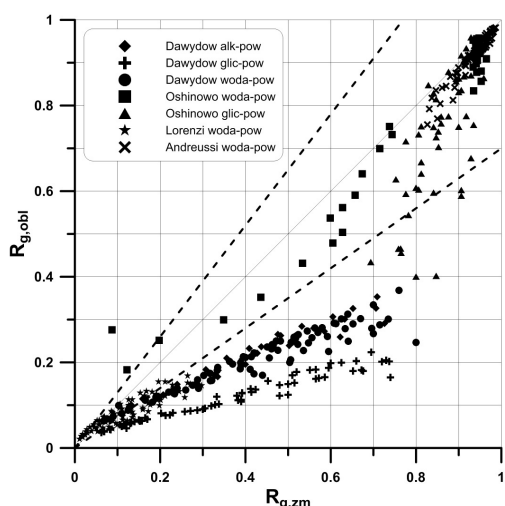
$$\partial R_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \partial R_{gi} \quad (2)$$

oraz

$$|\partial R_g| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\partial R_{gi}| \quad (3)$$

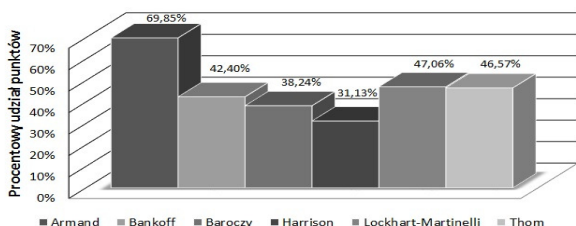
gdzie: $\partial R_g = \frac{R_{g,obl.} - R_{g,zm.}}{R_{g,zm.}}$

Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono w tab. 2.



Rys. 2. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości udziału objętościowego gazu metodą Lockharta - Martinelli'ego

Uzyskane wyniki obliczeń statystycznych dla poszczególnych metod obliczeniowych pozwoliły na wytypowanie tych, które zapewniają wysoką dokładność obliczeń udziału objętościowego gazu (największy procentowy udział punktów w zakresie błędu $\pm 30\%$). Największą średnią dokładnością obliczeń cechowała się metoda Armanda (Rys. 3), która najlepiej oddaje wpływ zmian lepkości cieczy na ocenianą wartość udziału objętościowego fazy gazowej.



Rys. 3. Porównanie metod obliczeniowych udziału objętościowego gazu

Ponieważ ta metoda (należąca do grupy metod, w których o wartości rzeczywistego udziału objętościowego decyduje m.in. relacja rzeczywistych prędkości poszczególnych faz, a więc poślizg międzyfazowy) okazała się wystarczająco dokładna, poleca się ją do obliczania udziału objętościowego gazu przy dwufazowym przepływie.

Podsumowanie i wnioski

Wyznaczenie udziału objętościowego gazu jest niezbędne do wyznaczenia m.in. gęstości mieszaniny gazu i cieczy w przepływie dwufazowym oraz innych parametrów pozwalających na prawidłowe zaprojektowanie i eksploatację aparatury przemysłowej wykorzystującej ten rodzaj przepływu. Problem obliczania udziału objętościowego gazu podejmowany był przez bardzo wielu badaczy.

Tab. 2. Ocena statystyczna obliczonego udziału objętościowego gazu

Źródło danych pomiarowych: Autor/układ	Autor metody obliczeniowej	Wartości wielkości statystycznych	
		δR_g [%]	$ \delta R_g $ [%]
Dawydow, alkohol etylowy - powietrze	Armand	28,92	28,92
	Bankoff	42,65	42,65
	Baroczy	59,68	59,68
	Harrison	79,41	79,41
	Lockhart - Martinelli	45,92	45,92
	Thom	74,20	74,20
Dawydow, gliceryna - powietrze	Armand	23,68	29,28
	Bankoff	42,58	42,58
	Baroczy	80,99	80,99
	Harrison	81,50	81,50
	Lockhart - Martinelli	64,44	64,44
	Thom	92,85	92,85
Dawydow, woda - powietrze	Armand	30,06	30,28
	Bankoff	44,36	44,36
	Baroczy	60,23	60,23
	Harrison	-81,06	81,06
	Lockhart - Martinelli	47,89	47,89
	Thom	75,24	75,24
Oshinowo, woda - powietrze	Armand	-12,78	19,09
	Bankoff	2,95	27,68
	Baroczy	0,42	12,48
	Harrison	19,24	21,70
	Lockhart - Martinelli	-3,15	15,10
	Thom	1,78	13,13
Oshinowo, gliceryna - powietrze	Armand	16,16	16,40
	Bankoff	22,46	22,46
	Baroczy	14,09	15,06
	Harrison	24,29	24,49
	Lockhart - Martinelli	14,34	14,69
	Thom	8,78	13,32
Lorenzi, woda - powietrze	Armand	14,09	19,04
	Bankoff	42,67	42,67
	Baroczy	47,19	47,19
	Harrison	78,84	78,84
	Lockhart - Martinelli	15,18	30,71
	Thom	22,51	23,95
Andreussi, woda - powietrze	Armand	1,66	2,03
	Bankoff	24,22	24,22
	Baroczy	0,21	1,07
	Harrison	4,26	4,31
	Lockhart - Martinelli	1,97	2,01
	Thom	-3,74	3,74

Autorzy poszczególnych metod uzależnili ich dokładność oraz zakres stosowalności od różnych parametrów hydrodynamicznych. Uwzględniając wyniki analizy przeprowadzonej w szerokim zakresie zmian parametrów przepływowych i właściwości fizykochemicznych składników tworzących mieszaninę dwufazową do obliczeń udziału objętościowego gazu można zalecić metodę Armanda.

Z punktu widzenia projektowania aparatów warstewkowych i doboru warunków hydrodynamicznych ich pracy skorzystanie z metody Armanda do obliczania udziału objętościowego przy przepływie dwufazowym pozwala na ujęcie zmian właściwości fizykochemicznych na wartość rzeczywistego udziału objętościowego faz.

LITERATURA

Czernek K., (2013). *Hydrodynamiczne aspekty projektowania aparatów cienkowarstewkowych dla cieczy bardzo lepkich*. Wyd. Politechniki Opolskiej, Opole

Przeptywe dwufazowe gaz-ciecz. Bank danych doświadczalnych, (2004). Katedra Inżynierii Procesowej Politechniki Opolskiej, Opole

Palińska K., (2006). *Udział objętościowy w przepływie dwufazowym gaz-ciecz bardzo lepka*. Praca magisterska, Politechnika Opolska, Opole