

Krystian CZERNEK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Weryfikacja metod obliczania udziału objętościowego gazu przy wznoszącym i opadającym przepływie dwufazowym z udziałem cieczy bardzo lepkiej**Wstęp**

Przepływy dwufazowe spotyka się zarówno w przyrodzie jak i w technice. W przyrodzie występuje np. ruch powietrza połączony z ruchem fazy stałej (zanieczyszczenia z dymu, pył, śnieg), fazy ciekłej (mgła, deszcz); ruch wód w przyrodzie związany z ruchem fazy stałej (cząstki organiczne i nieorganiczne); fazy ciekłej (ścieki chemiczne i biologiczne) oraz fazy gazowej (powietrze, zanieczyszczenia gazowe). Szczególnym przypadkiem są np. burza piaskowa, czy rozprzestrzenianie się pyłów wulkanicznych. Przepływ dwufazowy w technice [Czernek, 2013] występuje w takich dziedzinach jak: ochrona środowiska, przemysł chemiczny (kolumny barbotażowe, wieże destylacyjne, wieże absorpcyjne itp.), energetyka (paleniska kotłowe, odgazowanie i zgazowanie węgla itp.), metalurgia (wypot stali itp.), przemysł spożywczy (suszenie zbóż, zamrażanie fluidyzacyjne itp.).

W ochronie środowiska przepływ dwufazowy związany jest głównie z zapobieganiem zanieczyszczeniu powietrza, wody i gleby. Usuwanie zanieczyszczeń z powietrza polega na odpylaniu mokrym lub suchym przy zastosowaniu odpowiednich aparatów i urządzeń (m.in. cyklonów, płuczek wieżowych, skruberów). Ochrona wody obejmuje oczyszczanie ścieków oraz procesy uzdatniania wody do picia. Oczyszczanie ścieków może być realizowane za pomocą metod mechanicznych, chemicznych i biologicznych. Stosuje się procesy związane z mechaniką przepływów dwufazowych, np. sedymentację, fluidyzację czy filtrację. Ochrona gleby związana jest z procesami powodującymi zapobieganie opadania substancji toksycznych.

Od kilkunastu lat wzrasta zainteresowanie i rozwój badań dotyczących przepływów dwufazowych, które mają znaczenie przy opisie procesów wymiany pędu, masy i ciepła w reaktorach i bioreaktorach, aparatach warstewkowych, wysokopiędnościowych kolumnach rektyfikacyjnych i destylacyjnych, kolumnach barbotażowych np. typu *air-lift*. Jest to zagadnienie związane z transportem pneumatycznym i hydraulicznym w przewodach na znaczne odległości.

Udział objętościowy gazu w mieszaninie dwufazowej

W przepływie dwufazowym można wyróżnić trzy zasadnicze formy (Rys. 1). W przypadku występowania układu gaz-ciecz udział objętościowy może zmieniać się od 0 do 100%, natomiast, w przypadku układów gaz-faza stała i ciecz-faza stała przepływ dwufazowy jest możliwy do około 50% udziału objętościowego fazy stałej, czyli do zetknięcia się ze sobą fazy stałej.

Udział objętościowy jest jedną z trzech podstawowych wielkości (obok struktury i oporów przepływu) charakteryzujących przepływ mieszaniny dwufazowej. Określenie udziału objętościowego jest trudne i bardzo ważne, ponieważ gęstość płynącej mieszaniny uzależniona jest od jego wartości:

$$\rho_{2F} = R_G \rho_G + R_L \rho_L \quad (1)$$

Znajomość udziału objętościowego R_G gazu w mieszaninie dwufazowej lub związanej z nim udziału objętościowego cieczy

określonego jako $1 - R_G$ jest zatem istotna przy projektowaniu wyparak przepływowych, pieców rurowych itp.

Trudność wyznaczenia udziału objętościowego związana jest z występowaniem zjawiska poślizgu faz. Wyznaczając wartość R_G należy pamiętać, że obie fazy płyną z różnymi prędkościami. Ważne jest to szczególnie przy odparowaniu, gdyż występuje ciągła zmiana udziału pary i ciągła zmiana lokalnej wartości R_G . Z tego powodu w literaturze jest wiele różnych modeli obliczeniowych, które ogólnie można podzielić na modele bezpośrednio, w których przyjmuje się $w_G/w_L=1$ oraz modele poślizgowe, dokładniej oddające rzeczywiste warunki przepływu, dla których $w_G/w_L \neq 1$ [Hibiki i in., 2003; Fidos i in., 2003; Dziubiński i in., 2003; Czernek i in., 2006]. Czasami wyniki badań udziału objętościowego faz są zapisane w postaci funkcji poszczególnych parametrów:

$$R_G = f(g_{2F}, x, D, \rho_G, \eta_G, \sigma, k), \quad (2)$$

przy czym nie wszystkie wymienione wielkości są jednocześnie brane pod uwagę.

Opracowano wiele sposobów obliczania udziału objętościowego gazu. Metody określające udział R_G różnią się znacznie między sobą i prowadzą często do uzyskania różnych wyników. Wynikać to może z różnic w definiowaniu poślizgu faz oraz z trudności przy doświadczalnym określeniu udziału objętościowego w mieszaninie dwufazowej.

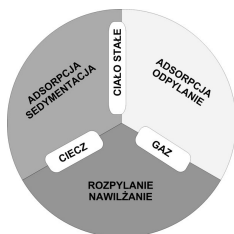
Metody obliczania udziału objętościowego faz można podzielić na: bazujące na modelu *Lockharta-Martinelliego*, charakteryzujące poślizg międzyfazowy oraz inne – głównie empiryczne, słuszne dla wąskiego zakresu.

Przegląd badań i ich analiza

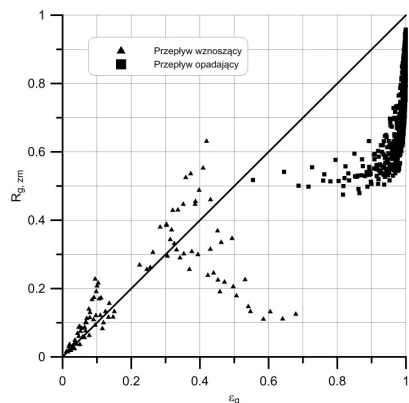
W oparciu o przegląd obszernego materiału literaturowego stwierdzono, iż zagadnienia dotyczące przepływu z udziałem cieczy o wysokiej lepkości nie zostały dotychczas dostatecznie zbadane i opisane. Niemniej jednak ze względu na powszechność wykorzystywania cieczy o dużej lepkości w wielu procesach technologicznych realizowanych we współczesnym przemyśle, skupiono się w niniejszej pracy na analizie wpływu lepkości cieczy na wartości udziału objętościowego gazu w płynącej mieszaninie dwufazowej.

Nieliczne prace dotyczące wpływu lepkości cieczy na hydraulikę przepływu dwufazowego opierają się na badaniach z udziałem płynów o lepkości co najwyżej kilkadziesiąt razy większej od lepkości wody. Cennym wyjątkiem są prace własne *Katedry Inżynierii Procesowej Politechniki Opolskiej* [Czernek i in., 2006; Czernek 2013], w których badania przeprowadzono z udziałem cieczy o lepkości do 5 Pa·s. W pracach tych badania prowadzono w rurach pionowych o średnicy 12,5, 16, 20, 22 i 25 mm przy współprądowym przepływie wznoszącym i opadającym w zakresie prędkości pozornych powietrza (0,0017÷8,9) m/s oraz oleju (0,0007÷0,26) m/s. Lepkość badanego oleju zmieniana była w przedziale (0,07÷4,83) Pa·s, natomiast gęstość odpowiednio (867÷900) kg/m³.

Wstępna analiza danych doświadczalnych, której wyniki przedstawiono na rys. 2, pozwoliła zauważyć, że dla przepływu pionowego pierścieniowego opadającego wlotowy udział objętościowy gazu ε_G jest wyższy od zmierzonego udziału objętościowego gazu $R_{G,z}$. Dla przepływu pionowego wznoszącego w granicach 0÷0,2 zmierzonego udziału objętościowego gazu, wlotowy udział objętościowy gazu przyjmuje podobne wartości, natomiast dla $R_{G,z} > 0,2$ $R_{G,z} \neq \varepsilon_G$. Wyniki przeprowadzonej analizy globalnej, nieuwzględniającej kierunku przepływu, przedstawione zostały w tab. 1.



Rys. 1. Trzy zasadnicze formy przepływów dwufazowych



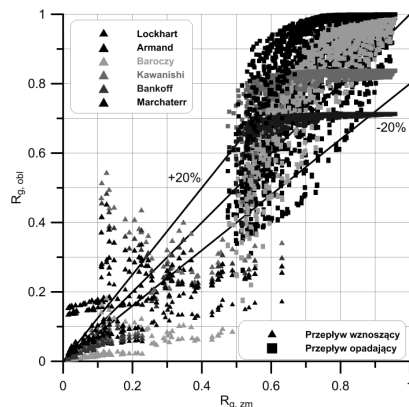
Rys. 2. Porównanie zmierzonego udziału objętościowego gazu do wlotowego udziału objętościowego gazu

Do wyznaczenia udziału objętościowego gazu proponuje się stosować metody, których błąd średni bezwzględny wynosi $\pm 20\%$.

Tab. 1. Ocena statystyczna obliczania udziału objętościowego gazu.

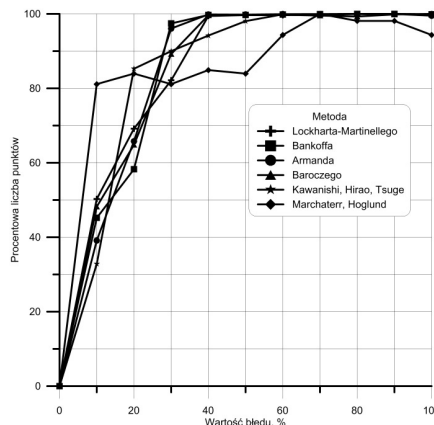
| Autor metody | Wartości wielkości statystycznych δR_G , [%] | | |
|-------------------------|--|-----------|-----------|
| | ogólnie | wznoszący | opadający |
| Lockhart- Martinelli | 15,86 | 47,46 | 15,36 |
| Bankoff | 13,72 | 47,66 | 13,18 |
| Armand | 14,17 | 99,93 | 12,44 |
| Marchaterr, Hoglund | 25,14 | 42,71 | 24,86 |
| Baroczy | 15,57 | 72,12 | 14,86 |
| Kawanishi, Hirao, Tsuge | 13,82 | 48,39 | 13,27 |

Interpretacje graficzne porównania metod proponowanych do obliczania udziału objętościowego gazu przy nieuwzględnianiu kierunku przepływu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Porównanie zmierzonego i obliczonego udziału objętościowego gazu

Uwzględniając kierunek przepływu, lepkość oleju i średnicę przewodu zauważono istotny ich wpływ na wartość obliczonego udziału objętościowego gazu różnymi metodami. Rys. 4 przedstawia interpretację graficzną porównania metod proponowanych do obliczania udziału objętościowego gazu. W wyniku przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że najlepszą zgodność z danymi doświadczalnymi zapewnia metoda *Bankoffa*, uwzględniająca poślizg międzyfazowy oraz gęstość i lepkość cieczy, dla której ponad 98% punktów mieści się w przedziale 30% średniego błędu bezwzględnego. Stąd też zaleca się ją do obliczania udziału objętościowego gazu przy nieuwzględnianiu kierunku przepływu. Do obliczania udziału objętościowego gazu dla przepływu pionowego wznoszącego zaleca się metodę *Lockharta-Martinelliego*, która uwzględnia poślizg międzyfazowy. Dla tej metody ponad 95% punktów mieści się w przedziale 30% średniego błędu bezwzględnego. Z kolei przy przepływie opadającym zaleca się metodę *Armanda*, uwzględniającą gęstość i lepkość cieczy oraz inne wielkości mające istotny wpływ na udział objętościowy gazu. Dla niej ponad 98% punktów mieści się w przedziale 30% średniego błędu bezwzględnego.



Rys. 4. Porównanie dokładności obliczeń wg proponowanych metod

Zależności służące do obliczania udziału objętościowego zaproponowane przez autorów metod zebrano w tab. 2.

Tab. 2. Zależności do obliczania udziału objętościowego gazu

| Autor metody | Udział objętościowy gazu |
|----------------------|--|
| Bankoff | $R_G = \varepsilon_G \left(0,71 + 2,35 \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)$ |
| Lockhart- Martinelli | $R_G = 1 + 0,28 \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,64} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,36} \left(\frac{\eta_L}{\eta_G} \right)^{0,07}$ |
| Armand | $R_G = 1 - \frac{4 + \frac{8}{7} m}{5 + m \left(\frac{\varepsilon_G}{1 - \varepsilon_G} + \frac{8}{7} \right)}$ |

Podsumowanie

Ze względu na brak uniwersalnej metody do obliczania udziału objętościowego gazu dla przepływu gaz-ciecz bardzo lepka poddano analizie metody dla przepływu gaz-ciecz (jednoskładnikowa i dwuskładnikowa) oraz gaz-ciecz nienewtonowska.

W pracy przeanalizowano ponad 50 metod obliczania udziału objętościowego gazu i cieczy, dla których szczegółowe równania zamieszczono w pracy [Czernek, 2013]. Autorzy przedstawionych metod uzależnili udział objętościowy gazu i cieczy od różnych parametrów oraz podali zakresy, w jakich metoda powinna być stosowana. Na wartość udziału objętościowego gazu istotny wpływ mają takie czynniki jak: kierunek przepływu, lepkość cieczy oraz średnica przewodu.

Prawidłowe wyznaczenie udziału objętościowego gazu, a na jego podstawie obliczenie wybranych parametrów gwarantuje prawidłowe zaprojektowanie, a w konsekwencji poprawne działanie urządzeń i aparatury wykorzystującej ten rodzaj przepływu.

LITERATURA

- Czernek K. (2013). *Hydrodynamiczne aspekty projektowania aparatów cienkowarstwowych dla cieczy bardzo lepkich*, Studia i monografie, z.347, Wyd. Pol. Opolskiej, Opole
- Czernek K., Filipczak G., Witczak S. (2006). Udział objętościowy gazu przy przepływie dwufazowym gaz-ciecz bardzo lepka. *Inż. Ap. Chem*, 45(6s), 46-47
- Dziubiński M., Fidos H. (2003). Uogólnienie korelacji Lockharta-Martinelliego dla określania udziału faz w przepływającej mieszaninie ciecz nienewtonowska-gaz. *Inż. Ap. Chem*, 42(5s), 51-52
- Fidos H., Dziubiński M. (2003). Metodyka badań przepływów mieszanin wielofazowych. *Inż. Ap. Chem.*, 42(6), 6-10
- Hibiki T., Ishii M. (2003). One-dimensional drift-flux model for two-phase flow in a large diameter pipe. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 1773-1790. DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00473-8