

Jarosław SOWIŃSKI, Henryk FIDOS

e-mail: sowiński@wipos.p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

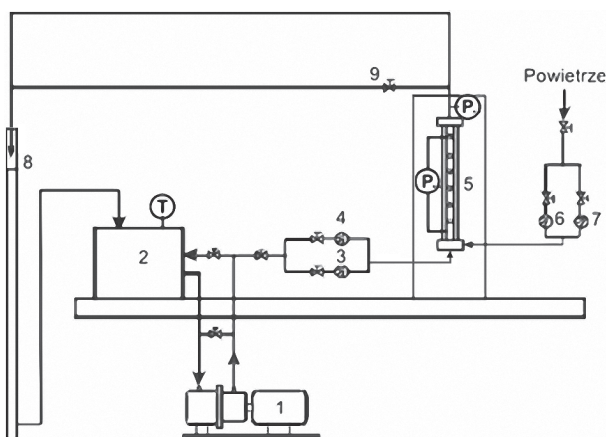
Wpływ ciśnienia na hydrodynamikę przepływu mieszaniny dwufazowej ciecz – gaz w minikanale

Wstęp

W ostatnich latach powstało wiele publikacji poświęconych tematyce przepływów dwufazowych ciecz – gaz w mikro- i minikanalach. W pracach tych podejmowano próby opisu takich wielkości jak udział faz, spadek ciśnienia oraz powstające struktury podczas przepływu mieszaniny dwufazowej. Skala prowadzonych badań i związane z tym ograniczenia konstrukcyjne nie pozwalały (w wielu wypadkach) na zbadanie parametrów hydrodynamicznych przepływającej mieszaniny ciecz-gaz w kanałach dłuższych niż kilkaset milimetrów. Dlatego w dostępnej literaturze bardzo rzadko spotykane są badania prowadzone dla kanałów długości rzędu jednego metra [1, 2], natomiast dominują prace, w których badane kanały były znacznie krótsze [3–6]. Dlatego porównanie prezentowanych tych pracach wyników jak i ich interpretacja wymaga znajomości wpływu ciśnienia na prędkości i udziały faz. Trudności powoduje także brak jednoznaczności w opisie wyznaczanych wielkości. Na przykład w przypadku pozornych prędkości fazy gazowej przyjmowanie różnego ciśnienia odniesienia może być przyczyną znacznych rozbieżności w otrzymywanych wynikach. Dotyczy to szczególnie badań, w których nie były mierzone spadki ciśnienia [7], w takim przypadku nie jest możliwe określenie ciśnienia panującego w kanale w obszarze rejestrowanego obrazu. Tak więc w celu poprawnego wyznaczenia pozornej prędkości fazy gazowej i granic występowania struktur konieczna jest znajomość panującego ciśnienia w minikanale.

Stanowisko doświadczalne

W Katedrze Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej zbudowano stanowisko badawcze służące do badania przepływów dwufazowych ciecz – gaz w wąskich minikanalach. Na rys. 1 przedstawiono schemat zbudowanej instalacji. Zastosowana konstrukcja oraz podłączona aparatura kontrolno-pomiarowa umożliwiały rejestrowanie i wyznaczanie następujących parametrów: spadki ciśnienia, prędkości pozorne cieczy i gazu, prędkość fazy gazowej, udziały faz.



Rys. 1. Schemat aparatury pomiarowej: 1 – pompa typu MONO, 2 – termostat, 3, 4 – elektromagnetyczne przepływomierze cieczy, 5 – minikanal, 6, 7 – mierniki i regulatory przepływu gazu, 8 – kolumna odpowietrzająca, 9 – zawór, P i T – pomiar ciśnienia i temperatury

Zasadniczym elementem zbudowanego stanowiska badawczego był kanał – 5 o prostokątnym przekroju poprzecznym. Kanał zbudowany był z dwóch poliwęglanowych płyt oddzielonych od siebie cienkimi

listwami dystansowymi. Takie rozwiązanie umożliwiało rejestrowanie obrazu i obserwowanie struktur przepływu dwufazowego ciecz – gaz. Do badań użyto kanału o długości 400 mm, szerokości 15 mm i grubości szczeliny 0,8 mm,

Ciecz z termostatu – 2 podawana była pompą – 1 do dolnej części kanału badawczego – 5. Równocześnie poprzez dystrybutor do przepływającej cieczy wprowadzono powietrze. Dystrybutor gazu zbudowany był z pięciu kapilar ustawionych liniowo. Ciecz oraz gaz doprowadzane były do minikanalu – 5 w jego dolnej części, gdzie następowało ich zmieszanie. Mieszanina dwufazowa po przepłynięciu przez kanał – 5 ulegała rozdzielaniu: powietrze odprowadzane było do atmosfery natomiast ciecz – po wcześniejszym pełnym odpowietrzeniu w rurze odpowietrzającej – 8 – zwracana była do termostatu – 2.

Strumień objętościowy gazu był mierzony za pomocą termicznych mierników i regulatorów przepływu gazu – 6, 7. Ciśnienie na wylocie z kanału – 5 mierzono za pomocą czujnika ciśnienia. Strumień objętościowy cieczy mierzony był przez przepływomierze elektromagnetyczne – 3 i 4. Do kanału podłączony był różnicowy miernik ciśnienia gazu mierzący różnicę ciśnień podczas przepływu mieszaniny dwufazowej w minikanale na dystansie 320 mm. Wzrost ciśnienia w kanale uzyskiwano poprzez zwiększenie o około 1 m wysokość słupa naporowego cieczy. W tym celu zamykano zawór – 9 i kierowano opuszczającą kanał mieszaninę dwufazową na wyższą wysokość. W badaniach jako fazę ciągłą stosowano wodę i wodne roztwory środka zmniejszającego napięcie powierzchniowe o nazwie handlowej rokafenol.

Wartości pozornych prędkości cieczy i gazu zmieniały się odpowiednio od 0,03 do 1,38 m/s i od 0,03 do 0,8 m/s. W połowie wysokości minikanalu filmowano przepływającą mieszaninę dwufazową szybką kamerą MV-D752 – 160 firmy *Photonfocus*, a obraz rejestrowano na dysku twardym komputera. Następnie na podstawie zarejestrowanego obrazu za pomocą opracowanej procedury w środowisku pakietu *Labview* [8], wyznaczano udziały i prędkości faz w przepływającej mieszaninie dwufazowej.

Omówienie wyników

Przeprowadzone badania miały na celu zbadanie wpływu ciśnienia panującego w minikanale na rejestrowane wartości udziału fazy gazowej. Zamknięcie zaworu – 9 powodowało wzrost średniego ciśnienia w badanym kanale o ok. 10^4 Pa. Porównując tę wartość do uzyskiwanych wartości spadków ciśnienia w kanale można stwierdzić, że przepływ pod zwiększonym ciśnieniem odpowiadał w przybliżeniu przepływowi w kanale o długości 1 m. Wywołana zmiana ciśnienia w kanale wpływała na gęstość przepływającego powietrza.

Zmianę gęstość przepływającego powietrza w mieszaninie dwufazowej wyznaczano za pomocą równania stanu. Dla powietrza wykładnik adiabaty przyjęto równy 1,41. Po przekształceniu równania dla gazów rzeczywistych, uwzględniając stałość temperatury przepływających mediów w trakcie pomiarów otrzymano zależność:

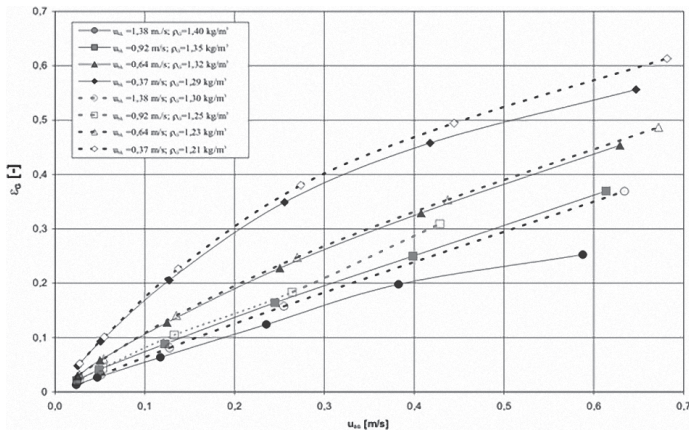
$$\rho_2 = \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{1/\kappa} \rho_0 \quad (1)$$

gdzie:

- κ – wykładnik adiabaty dla powietrza,
- P_2 – ciśnienie w danym przekroju minikanalu, ciśnienie w warunkach normalnych,
- P_0 – ciśnienie w warunkach normalnych,
- ρ_0 – gęstość w warunkach normalnych.

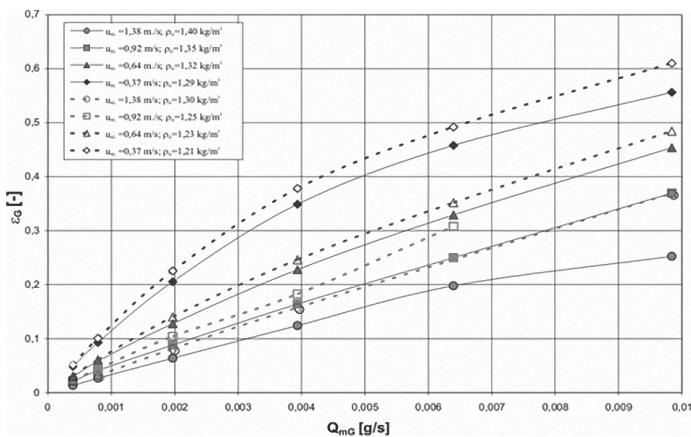
Ciśnienie w badanym przekroju wyznaczono na podstawie wskazań ciśnieniomierza umieszczonego na wylocie z minikanalu i rejestrowanych spadków ciśnienia w minikanale. Wyznaczona za pomocą równania (1) gęstość powietrza pozwala na wyznaczenie pozornych prędkości fazy gazowej w badanym przekroju minikanalu.

Następnie wyznaczone zgodnie z opracowaną procedurą [8] wartości udziału fazy gazowej przedstawiono na wykresach w funkcji pozornej prędkości fazy gazowej w badanym przekroju minikanalu. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe dane dla przepływu mieszaniny dwufazowej powietrze – woda w minikanale. Jak łatwo zauważyć zwiększenie ciśnienia w kolumnie (linie ciągłe na wykresie) nie powoduje wyraźnego wpływu na rejestrowane wartości udziału fazy gazowej szczególnie dla przepływów z niższymi prędkościami fazy gazowej. Podobne tendencje otrzymano dla pozostałych badanych mediów doświadczalnych.



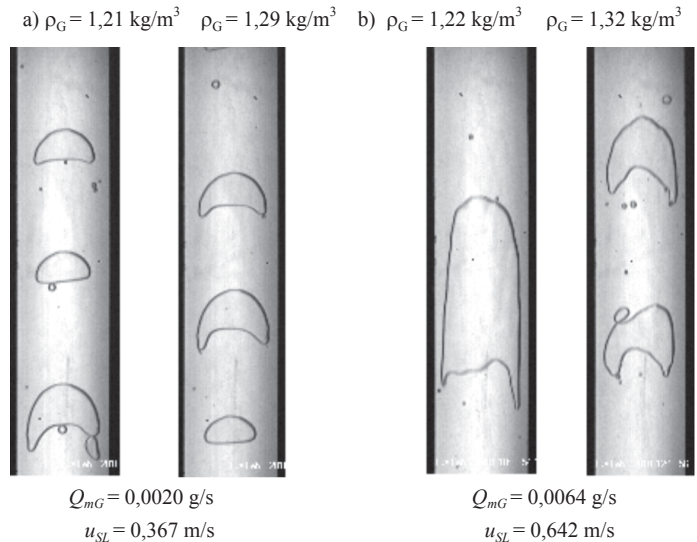
Rys. 2. Zależność udziału fazy gazowej w przepływie dwufazowym woda – powietrze od pozornej prędkości przepływu powietrza

Natomiast w przypadku, gdy porównujemy wartości udziału fazy gazowej podczas przepływu mieszaniny dwufazowej ciecz – gaz (Rys. 3) w funkcji strumienia masowego gazu dla przepływu gazu pod różnym ciśnieniem. Obserwujemy, co oczywiste, bardzo wyraźny wpływ tej zmiany. Rejestrujemy zdecydowanie niższe wartości udziału faz dla przepływu powietrza pod wyższym ciśnieniem, czyli gdy gęstość powietrza była wyższa.



Rys. 3. Zależność udziału fazy gazowej w przepływie dwufazowym woda – powietrze od strumienia masy przepływającego powietrza

Na rys. 4 przedstawiono zarejestrowane kamerą cyfrową obrazy przepływającej mieszaniny dwufazowej w badanym minikanale. Na rys. 4a (zarejestrowanym dla niższych wartości pozornych prędkości fazy gazowej i ciekłej) nie obserwujemy zmiany struktury przepływających pęcherzyków gazowych. Natomiast na rys. 4b (zarejestrowanym dla wyższych wartości pozornych prędkości fazy gazowej i ciekłej) wpływ zmiany ciśnienia przepływającej mieszaniny jest wyraźny. Na skutek



Rys. 4. Zarejestrowane obrazy struktur przepływu dwufazowego woda – powietrze

zwiększenia ciśnienia nadal obserwujemy przepływ struktury rzutowej, ale wielkości przepływających korków gazowych są znacznie mniejsze. Ta obserwacja potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia, że wpływ zmiany ciśnienia jest większy na przepływ mieszaniny dwufazowej w zakresie wyższych prędkości pozornych faz. W przeprowadzonych badaniach zwiększono ciśnienie o około 10^4 Pa. Taka zmiana ciśnienia powodowała znaczne różnice w rejestrowanych wynikach udziału faz (o kilkanaście procent). W przypadku badań przepływu dwufazowego w minikanalach z udziałem cieczy o wyższych lepkościach [3], gdy rejestrowane spadki ciśnienia przekraczały 10^5 Pa/m. Wpływ lokalizacji miejsca rejestracji obrazu i związku z tym przyjętego poziomu odniesienia ciśnienia przepływających faz będzie jeszcze bardziej widoczny.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz przeglądu literatury przedmiotu można sformułować następujące wnioski:

- Jedyne pomiary, w których mierzone jest ciśnienie pozwalają na wyznaczenie weryfikowalnych wartości prędkości, udziałów faz oraz granic występowania struktur występujących podczas przepływów dwufazowych.
- Wybór miejsca rejestrowania obrazu może mieć istotny wpływ na wartości rejestrowanych prędkości i udziałów faz.
- W przypadku przepływu mieszanin dwufazowych z udziałem cieczy o lepkości przekraczającej kilkakrotnie lepkość wody wpływ lokalizacji miejsca rejestracji obrazu przepływu mieszaniny dwufazowej będzie bardzo istotny. Nawet niewielkie przesunięcie miejsca rejestracji będzie skutkowało znaczną zmianą ciśnienia, co z kolei spowoduje znaczną zmianę mierzonych wartości prędkości i udziałów faz.

LITERATURA

- [1] P. Satitacharoen, S. Wongwises: Int. J. Multiphase Flow, **30**, 225 (2004).
- [2] M. Dziubiński: Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-gaz, Politechnika Łódzka, Monografie – Łódź 2005.
- [3] J. Sowiński: Inż. Chem. Proc. **28**, 1137 (2007).
- [4] K. Dutkowski: Int. J. Heat Mass Trans. **52**, 5185 (2009).
- [5] H. Ide, T. Fukano: Experimental Thermal Science, **29**, 833 (2005).
- [6] Z.C. Yang, Q.C. Bi, B. Liu, K.X. Huang: Int. J. Multiphase Flow, **36**, 60 (2010).
- [7] J. Xu.: Int. J. Heat and Fluid Flow, **20**, 422 (1999).
- [8] Ł. Tomczak, J. Sowiński: Inż. Chem. Proc., **28**, 1137 (2007).