

Stanisław WITCZAK, Marcin PIETRZAK

e-mail: s.witczak@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Charakterystyka przepływu dwufazowego mieszaniny gazowo-cieczowej w U-rurach

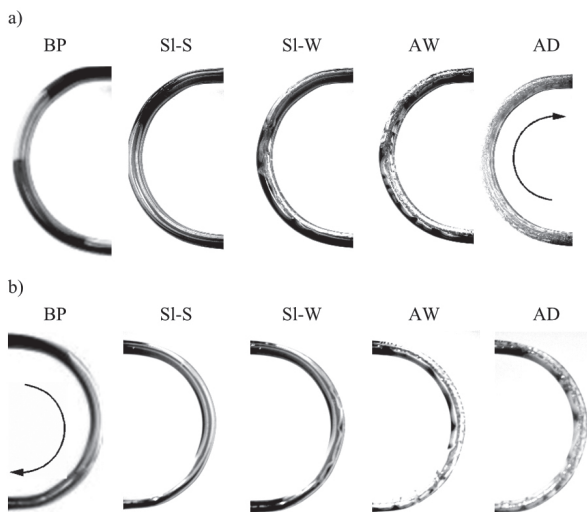
Wstęp

Prowadzone dotychczas prace badawcze nad przepływem typu gaz-ciecz, w większości dotyczyły przepływu mieszanin dwufazowych przez rury prostoosiowe. Znacznie rzadziej badano przepływ tego rodzaju mieszanin w U-rurach. Ponieważ łuki rurowe (U-rury) stanowią wyposażenie szeregu instalacji przemysłowych, jak również występują w wielu urządzeniach energetycznych, jak choćby w wymiennikach ciepła, zasadnym jest prowadzenie badań nad przepływem dwufazowym typu gaz – ciecz w tego typu elementach. Zjawiska, które zachodzą podczas przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej w U-rurach mają bowiem znaczący wpływ na działanie i eksploatację urządzeń, w których są one stosowane.

Badania doświadczalne prowadzono w trzech łukach rurowych o średnicach rur 16, 22 i 30 mm z zachowaniem stałego stosunku promienia gięcia do średnicy rury, przy następujących zakresach zmian prędkości pozornych użytych czynników roboczych: powietrza $w_{p,0} = (0,038 \div 5,4)$ m/s, wody $w_{w,0} = (0,018 \div 0,92)$ m/s i oleju $w_{o,0} = (0,014 \div 0,92)$ m/s. W badaniach użyto oleje L-AN 15 i ITERM-12, dla których, w zależności od stosowanych w badaniach temperatur $t_o = (15-30)^\circ\text{C}$, gęstość i lepkość wynosiły odpowiednio: $\rho_o = (859 \div 890)$ kg/m³, $\eta_o = (0,02 \div 0,528)$ Pa·s.

Struktury przepływu

W wyniku identyfikacji struktur przepływu dwufazowego w łuku rurowym, na rys. 1 przedstawiono, tytułem przykładu, zdjęcia sklasyfikowanych w badaniach struktur przy poziomym oraz wznoszącym i opadającym przepływie dwufazowym powietrze – olej w U-rurze. Dla przepływu dwufazowego gaz – ciecz wyróżniono następujące struktury (formy) przepływu: korkowo-pęcherzykową (BP), rzutowo-rozwartwioną (SI-S), rzutowo-falową (SI-W), pierścieniowo-falową (AW) i pierścieniowo-dyspersyjną (AD).



Rys. 1. Struktury przepływu powietrze-olej w łuku rurowym: a) przepływ wznoszący, b) przepływ opadający

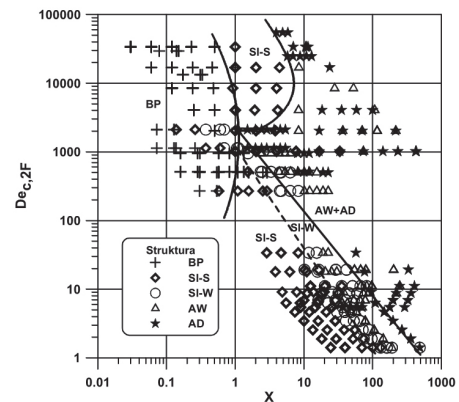
Obserwowane struktury przepływu dwufazowego gaz – ciecz w U-rurze, różniły się kształtem form tworzonych przez fazę gazową i cieczą, co świadczyło o ich zaburzeniu w samym łuku rurowym oraz w strefach przyłączeniowych za i przed łukiem. Największe zaburzenia

struktury przepływu występowały w łuku wznoszącym i związane były z występowaniem w nim nawrotów cieczy. Nawrotów cieczy nie obserwowano z kolei w łuku opadającym, stąd też struktury przepływu były w nim zbliżone do przepływu w łuku poziomym.

Wobec stwierdzonych osobliwości w zakresie tworzenia się różnorodnych struktur przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej w łuku rurowym, w stosunku do rodzajów struktur przepływu dwufazowego w rurach prostoosiowych, zdecydowano się na opracowanie nowej własnej mapy przepływu, słusznej dla takiej geometrii kanału. Zaproponowaną mapę przepływu przedstawiono na rys. 2. Mapa ta została opracowana dla układu typu powietrze – woda i powietrze – olej, przy przepływie zarówno w łuku poziomym, jak i pionowym, dla warunków przepływu wznoszącego i opadającego. Sporządzono ją w oparciu o układ współrzędnych odpowiadający parametrowi X oraz liczbie $De_{c,2F}$ dla fazy ciekłej $De_{c,2F}$. Wielkości X i $De_{c,2F}$ uwzględniają prędkości pozornych, ich gęstości i lepkości oraz średnicę rury i promień wygięcia łuku rurowego w formie zależności:

$$X = \frac{w_{g,0}}{w_{c,0}} \sqrt{\frac{\rho_g \rho_{wody}}{\rho_{pow} \rho_c}} \quad (1)$$

$$De_{c,2F} = Re_{c,2F} \left(\frac{2R}{d} \right)^{0,5} \quad (2)$$



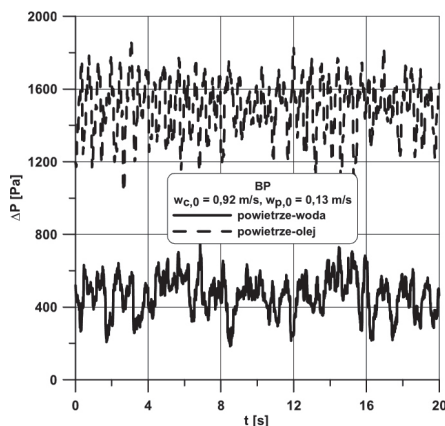
Rys. 2. Mapa przepływu dwufazowego gaz – ciecz w łuku rurowym

Na przedstawionej mapie wyróżniono pięć obszarów występowania określonego typu struktury przepływu rozdzielonych pasmami granicznymi, a mianowicie zakresy występowania przepływu: pęcherzykowo-korkowego (BP), rzutowo-rozwartwionego (SI-S), rzutowo-falowego (SI-W), pierścieniowo-falowego (AW) oraz pierścieniowo-dyspersyjnego (AD). Warto w tym miejscu dodać, że na stworzonej mapie wyróżniono dwa obszary występowania przepływu rzutowo-rozwartwionego. Powodem występowania podwójnych obszarów są różnice w gęstości i lepkości faz ciekłych (a więc zmiana liczby Re_c), co prowadzi do występowania zakresów tworzenia się odpowiednich struktur zarówno dla obszaru przepływu laminarnego, jak i burzliwego, strugi dwufazowej. Na zaproponowanej mapie przepływu dwufazowego gaz-ciecz dolny obszar przepływu SI-S dotyczy układu powietrze – olej, natomiast górny odpowiada układowi powietrze – woda.

Straty ciśnienia

Analizując wyniki pomiarów oporów przepływu układów dwufazowych, stwierdzono, że charakter zmian ich wartości jest bardzo złożo-

ny. Zmiany te wynikały z przebiegu zjawisk zachodzących w płynącej łukiem rurowym mieszaninie i związane były nie tylko z efektami wzajemnego oddziaływania dwóch faz, ale także samego usytuowania łuku rurowego. Stwierdzono przy tym, że o wartości oporów przepływu decydują różnorodność struktur przepływu dwufazowego, udziały objętościowe faz oraz wartości poślizgu międzyfazowego. Na rys. 3 przedstawiono rzeczywiste przebiegi zmian wartości strat ciśnienia dla struktury pęcherzykowo-korkowej podczas przepływu dwufazowego gaz – ciecz w łuku rurowym o średnicy 22 mm. Jak wynika z przebiegu linii, rzeczywiste wartości strat ciśnienia zmieniają się oscylacyjnie, co świadczy o dynamice zmian ich wartości. Większe wartości strat ciśnienia występują w tym przypadku dla przepływu dwufazowego powietrze – olej.



Rys. 3. Zmiany wartości strat ciśnienia dla struktury pęcherzykowo-korkowej podczas przepływu dwufazowego gaz – ciecz w łuku rurowym o średnicy $d = 22$ mm

Poszukując odpowiednio dokładnych zależności opisujących wartości oporów przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej w łuku rurowym, dokonano próby wykorzystania w tym celu niektórych równań literaturowych [1–4]. Jak wynika z analizy dokładności wybranych modeli obliczania spadków ciśnienia przy przepływie gaz – ciecz (Tab. 1) stosowność ich dla analizowanych warunków przepływu dwufazowego gaz – ciecz cechuje się stosunkowo dużym błędem.

Tab. 1. Wyniki obliczeń statystycznych dokładności wyznaczania spadków ciśnienia przy przepływie gaz – ciecz w łukach rurowych

Lp.	Autor metody	$\bar{\delta}_{\Delta P}$ [%]	$ \bar{\delta}_{\Delta P} $ [%]
1.	Chischolm [1]	-133	+201
2.	Yu [2]	-84	+175
3.	Azzi [3]	-109	+173
4.	Ulbrich, Witczak [4]	+14	+52

Stwierdzona ograniczona dokładność wytypowanych metod obliczeniowych była podstawą do poszukiwania nowego rozwiązania poprzez określenie zależności do obliczania współczynnika oporów miejscowych ξ_{2F} w równaniu ogólnym

$$\Delta P_{2F} = \xi_{2F} \frac{w_{2F}^2}{2} \rho_{2F} \quad (3)$$

Na podstawie własnych danych doświadczalnych dla łuków rurowych o średnicach $d = 16, 22, 30$ mm i stosunku $R/d = 7$, opracowano zależność (4) opisującą zmiany wartości tego współczynnika lokalnego dla przepływu powietrze – olej oraz powietrze – woda w poziomym łuku

$$\xi_{2F} = 7,6 \cdot 10^4 \left(\frac{d}{D}\right)^{0,5} Re_g^{-1,42} Re_c^{0,95} Mo^{0,36} \quad (4)$$

gdzie

$$Re_{g/c} = \frac{w_{g/c,0} d \rho_{g/c}}{\eta_{g/c}} \quad (5)$$

$$Mo = \frac{\tilde{\eta}_c^4}{\rho_c \sigma_c^3} \quad (6)$$

Występujące w równaniu (3) gęstość ρ_{2F} i prędkość w_{2F} mieszaniny dwufazowej – wyznaczano z zależności:

$$\rho_{2F} = R_{g,L} \rho_g + (1 - R_{g,L}) \rho_c \quad (7)$$

$$w_{2F} = w_{g,0} + w_{c,0} \quad (8)$$

Udział objętościowy powietrza $R_{g,L}$ przy przepływie mieszaniny dwufazowej powietrze – woda i powietrze – olej w łuku rurowym – obliczano na podstawie opracowanej własnej zależności

$$\frac{R_{g,L}}{R_{g,S}} = 1,071 \varepsilon_g^{-0,317} Fr_{c,L}^{0,035} \quad (9)$$

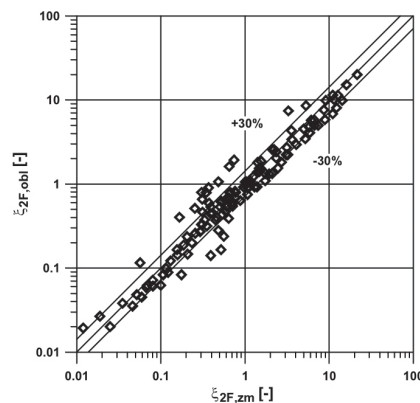
uwzględniającej wpływ jego geometrii na zmianę rzeczywistych wartości udziału objętościowego gazu w stosunku do wartości występującej w rurach prostoosioowych. Występujące w związku (9) wielkości wyznacza się z równań:

$$R_{g,S} = 1 - \frac{\varepsilon^2 - x^2}{2 \left[\ln \left(\frac{1-x}{1-\varepsilon} \right) - (\varepsilon - x) \right]} \quad (10)$$

$$\varepsilon_g = \frac{w_{g,0}}{w_{g,0} + w_{c,0}} \quad (11)$$

$$Fr_{c,L} = \frac{w_{c,0}^2}{gR} \quad (12)$$

Na rys. 4 zobrazowano porównanie zmierzonych wartości współczynnika ξ_{2F} z wartościami obliczonymi na podstawie opracowanego równania (4). Wyniki obliczeń statystycznych wykazały, że 82% punktów pomiarowych mieści się w przedziale $\pm 30\%$ błędu względnego, co jest wysoką dokładnością dla dwufazowego przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej.



Rys. 4. Porównanie wartości zmierzonych ξ_{2F} z wartościami obliczonymi na podstawie zaproponowanej metody (4)

Wnioski

Na podstawie wyników dotychczasowych prac badawczych można stwierdzić, że struktury przepływu dwufazowego gaz – ciecz występujące w łukach rurowych można klasyfikować w taki sam sposób, jak w przypadku rur poziomych. W celu określenia rodzaju struktury przepływu mieszaniny gaz – ciecz można wykorzystać zaproponowaną nową mapę takiego przepływu dla różnych geometrii łuków rurowych. Godna polecenia do obliczeń procesowych jest także opracowana własna metoda obliczania wartości strat ciśnienia podczas przepływu dwufazowej mieszaniny gazowo-cieczowej w łukach rurowych o różnej geometrii.

LITERATURA

- [1] D. Chischolm: Int. J. Multiphase Flow, 6, (1979).
- [2] Q. G. Yu: European Two-Phase Flow Group Meeting, Paris 1989.
- [3] A. Azzi: Forschung im Ingenieurwesen 69, (2005).
- [4] R. Ulbrich, S. Witczak: Mult. Trans. Part. Phen. 2, (1990).

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy Nr N N513 419834.