

Marcin PIETRZAK, Stanisław WITCZAK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Hydrodynamika poziomego przepływu dwufazowego ciecz – ciecz w kanałach zakrzywionych

### Wstęp

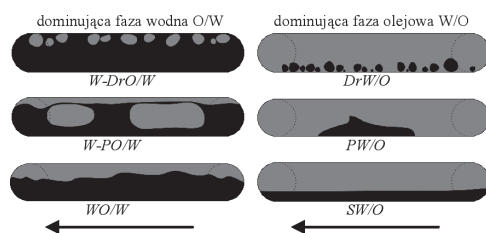
Prowadzone dotychczas prace badawcze nad przepływem wielofazowym w łukach rurowych, w większości dotyczyły przepływu mieszanin dwufazowych typu gaz-ciecz. Znacznie rzadziej badano przepływ ciecz – ciecz w łukach rurowych. Ostatnio tym tematem zajmowali się [Sharma i in., 2011]. Ponieważ łuki rurowe stanowią wyposażenie szeregu instalacji przemysłowych, jak również występują w wielu urządzeniach energetycznych, jak choćby w wymiennikach ciepła, zasadnym jest prowadzenie badań nad przepływem dwufazowym typu ciecz – ciecz w tego typu elementach. Zjawiska, które zachodzą podczas przepływu dwu niemieszających się cieczy w łukach rurowych, mają bowiem znaczący wpływ na działanie i eksploatację urządzeń, w których są one stosowane.

Badania doświadczalne prowadzono w trzech łukach rurowych o wewnętrznych 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: 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  $t_o = (15 \div 30)^\circ\text{C}$ , gęstość i lepkość odpowiednio zawarte były w przedziałach:  $\rho_o = (859 \div 890)\text{kg/m}^3$ ,  $\eta_o = (0,02 \div 0,528)$  Pa·s.

### Struktury i mapa przepływu

Na rys. 1 przedstawiono, dla przykładu, kilka zaobserwowanych struktur przepływu dwufazowego woda – olej w poziomym łuku rurowym. Z uwagi na pewne ograniczenia w całkowitym ujęciu danej fotografii struktury woda – olej, w postaci usytuowania łuku, rysunki obrazują część łuku rurowego. Zaobserwowane struktury przepływu pogrupowano biorąc pod uwagę rodzaj dominującej fazy ciągłej w przepływie. W związku z tym wyróżniono struktury z dominującą fazą wodną O/W i struktury z dominującą fazą olejową W/O. Dla przepływu z dominującą fazą wodną wyróżniono następujące grupy struktur przepływu: strukturę korkowo-kroplową oleju w wodzie PDrO/W, strukturę rozwarstwoną oleju w wodzie SO/W, strukturę falową oleju w wodzie WO/W, strukturę pierścieniowo-dyspersyjną oleju w wodzie ADO/W. W przypadku przepływu z dominującą fazą olejową wyróżniono z kolei: strukturę korkowo-kroplową wody w oleju PDrW/O, strukturę rozwarstwoną wody w oleju SW/O, strukturę falową wody w oleju WW/O, strukturę pierścieniowo-dyspersyjną wody w oleju ADW/O.

Wobec stwierdzonych osobliwości w zakresie tworzenia się różnorodnych struktur przepływu mieszaniny dwufazowej woda – olej w stosunku do rodzajów struktur przepływu wielofazowego w rurach prostoosiowych, zdecydowano się na opracowanie nowej własnej mapy

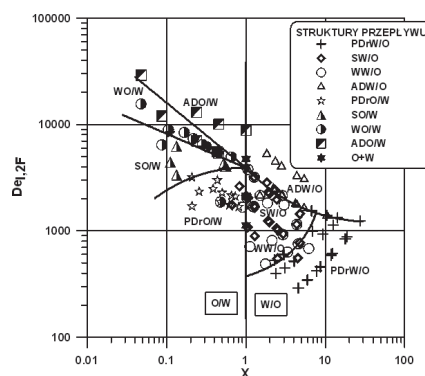


Rys. 1. Struktury przepływu dwufazowego woda-olej obserwowane w poziomym łuku rurowym: a) z dominującą fazą wodną: W-DrO/W – struktura falowo-kropłowa, W-PO/W – struktura falowo-korkowa, WO/W – struktura falowa; b) z dominującą fazą olejową: DrW/O – struktura kropłowa, PW/O – struktura korkowa, SW/O – struktura rozwarstwoniona

przepływu (Rys. 2), słusznej dla takiej geometrii kanału. Mapa ta została stworzona w oparciu o układ współrzędnych odpowiadający parametrowi  $X$ , który zaczerpnięto z pracy [Troniewski i Ulbrich, 1984] oraz liczbie Deana dla fazy ciekłej  $De_{i,2F}$ . Wielkości  $X$  i  $De_{i,2F}$  uwzględniały prędkości pozorne faz, ich gęstości i lepkości oraz średnicę rury a także promień wygięcia łuku rurowego, a definiowane były następująco:

$$X = \frac{w_{o,0}}{w_{w,0}} \sqrt{\frac{\rho_o \rho_{H_2O}}{\rho_{ol} \rho_w}} \quad (1)$$

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



Rys. 2. Mapa przepływu dwufazowego ciecz – ciecz w łukach rurowych

Występujące w równ. (1) gęstości oleju  $\rho_{ol}$  i wody  $\rho_{H_2O}$  należy określać dla temperatury otoczenie równej  $20^\circ\text{C}$  przy ciśnieniu  $P = 0,1$  MP

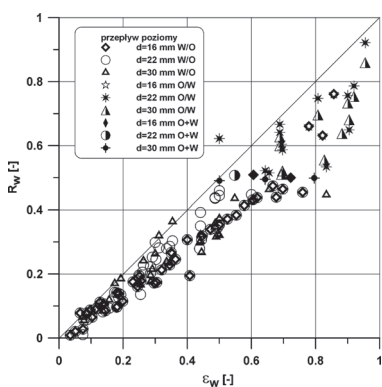
Mapa przepływu ciecz – ciecz została opracowana dla 140 punktów pomiarowych. Na mapie tej wyodrębniono struktury z dominującą fazą wodną (O/W) oraz struktury z dominującą fazą olejową (W/O). Zgodnie z zaproponowaną mapą przepływu woda – olej, dla  $X < 1$  w układzie dominuje woda (struktury typu O/W), dla  $X > 1$  w układzie dominuje olej (struktury typu W/O) natomiast dla  $X = 1$  w układzie następuje wyrównanie się udziałów objętościowych faz (struktury typu O+W). Linia pionową na mapie przepływu oznaczono granicę przejścia pomiędzy strukturami z dominującą fazą wodną a strukturami z dominującą fazą olejową (tzw. inwersja faz), co odpowiada strukturą typu O+W. Na prezentowanej mapie przepływu liniami granicznymi wyodrębniono obszary struktur przepływu w zależności od dominującej fazy ciekłej. Dla przepływu z dominującą fazą wodną wyróżniono: obszar przepływu kropłowo-korkowego oleju w wodzie (PDrO/W), obszar przepływu rozwarstwonionego oleju w wodzie (SO/W), obszar przepływu falowego oleju w wodzie (WO/W) oraz obszar przepływu pierścieniowo-dyspersyjnego oleju w wodzie (ADO/W). Dla przepływu z dominującą fazą olejową wyróżniono: obszar przepływu kropłowo-korkowego wody w oleju (PDrW/O), obszar przepływu rozwarstwonionego wody w oleju (SW/O) i falowego wody w oleju (WW/O) oraz obszar przepływu pierścieniowo-dyspersyjnego wody w oleju (ADW/O).

### Udziały objętościowe faz

Poślizg międzyfazowy jest przyczyną występowania różnic pomiędzy wartościami średniego rzeczywistego udziału objętościowego  $R_i$ , a wartościami wlotowego objętościowego udziału poszczególnych składników mieszaniny  $\varepsilon_i$ , które wynikają z zadanych na wlocie do kanału strumieni objętościowych faz. Różnice między tymi wielkościami wynikają m.in. z faktu, że ciecz, w kontakcie ze ścianką rury ma tendencję do akumulacji w kanale. W przepływie dwufazowym ciecz – ciecz

poślizg międzyfazowy zachodzi pomiędzy dwoma fazami – wodą i olejem. Na rys. 3 przedstawiono porównanie rzeczywistych i wlotowych wartości udziałów objętościowych wody przy przepływie dwufazowym woda – olej w łuku rurowym. Z wykresu tego można wywnioskować, że wartości poślizgu międzyfazowego są większe, gdy w przepływie woda – olej dominuje faza wodna w porównaniu z wartościami poślizgu międzyfazowego przy dominującym oleju.

Z uwagi na brak metod do wyznaczania wartości udziałów objętościowych faz przy przepływie ciecz – ciecz w łukach rurowych, w celu wytypowania metod do obliczania udziałów objętościowych faz przy przepływie woda – olej w łukach rurowych, dokonano przeglądu literaturowego dotyczącego przepływów gaz – ciecz w rurach prostosiośowych. Metody te, adoptowane dla przepływu ciecz – ciecz, zostały zestawione w pracy [Pietrzak, 2010], a o ich wyborze zdecydowało ich częste cytowanie w literaturze.



Rys. 3. Porównanie wartości średniego zmierzonego udziału objętościowego wody z wartościami jej wlotowego udziału objętościowego przy przepływie woda – olej w łuku rurowym

Przeprowadzona względem cytowanych metod analiza obliczania udziałów objętościowych faz w łuku rurowym wykazała, że ich przydatność dla rozpatrywanych warunków przepływu dwufazowego ciecz-ciecz jest w wielu przypadkach bardzo ograniczona.

Zestawienie wyników obliczeń porównawczych zawiera tab. 1. Z danych zawartych w tabeli wynika, że najdogodniej do wyznaczania wartości udziałów objętościowych faz podczas przepływu dwufazowego woda – olej w łuku rurowym stosować metody [Chisholm, 1967; Stomma, 1979; Hapanowicz, 2001]. Warto przy tym podkreślić, że wśród wytypowanych metod najbardziej uniwersalną, sprawdzoną w literaturze dla dużych banków danych doświadczalnych, jest metoda Stommy.

Tab. 1. Wyniki analizy statystycznej dokładności wyznaczania udziałów objętościowych faz przy przepływie dwufazowym ciecz-ciecz w łukach rurowych

Lp.	Autor metody	$\bar{\delta}_R$ [%]	$ \bar{\delta}_R $ [%]
1.	[Lockhart i Martinelli, 1949]	-33	-33
2.	[Chisholm, 1967]	+19	+19
3.	[Stomma, 1979]	+21	+21
4.	[Dix, 1971]	+42	+42
5.	[Punches, 1977]	-147	-147
6.	[Rouhani, 1986]	+47	+47
7.	[Zuber i Findlay, 1965]	+43	+43
8.	[Hapanowicz, 2001]	+23	+23

Z uwagi na fakt, iż wyżej wymienione metody obliczania wartości udziałów objętościowych faz zostały opracowane dla przepływów w rurach prostosiośowych postanowiono opracować własną metodę do wyznaczania wartości udziałów objętościowych faz przy przepływie dwufazowym woda – olej w łuku rurowym. Według opracowanej metody udział objętościowy wody przy przepływie woda – olej w łuku rurowym należy obliczać z zależności

$$R_w = (\epsilon_w)^{0,8} \quad (3)$$

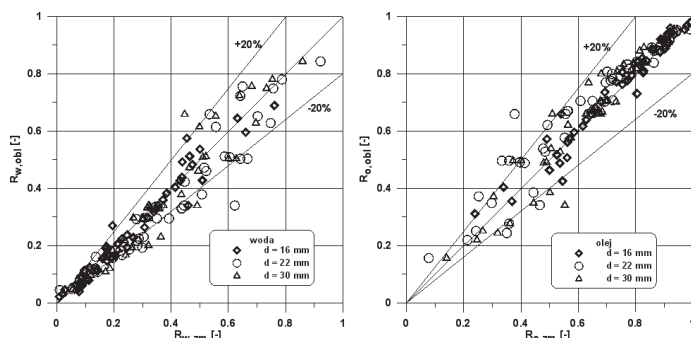
gdzie 
$$\epsilon_w = \frac{W_{w,0}}{W_{w,0} + W_{o,0}} \quad (4)$$

Udział objętościowy oleju z kolei określa się równaniem:

$$R_o = (\epsilon_o)^{0,6} \quad (5)$$

gdzie 
$$\epsilon_o = \frac{W_{o,0}}{W_{o,0} + W_{w,0}} \quad (6)$$

Dokładność obliczeń poszczególnych udziałów objętościowych przedstawiono na rys. 4, na którym dokonano porównania ich wartości zmierzonych  $R_{i,zm}$  z wartościami obliczeniowymi  $R_{i,obl}$  na podstawie nowo opracowanej metody. Z rozkładu punktów na przedstawionych wykresach wynika, że uzyskana dokładność nowo opracowanej metody jest znacznie wyższa od znanych w literaturze tematu. Stąd też poleca się ich stosowanie w obliczeniach procesowych.



Rys. 4. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości udziałów objętościowych składników mieszaniny dwufazowej woda – olej

### Wnioski

W zakresie identyfikacji struktur przepływu stwierdzono występowanie osiem struktur przepływu dwufazowego woda – olej (Rys. 1). Generalnie struktury przepływu dwufazowego w łukach rurowych różnią się od siebie kształtem form tworzonych przez fazy ciekłe oraz mogą być klasyfikowane w taki sam sposób, jak w przypadku struktur analogicznego przepływu w rurach prostosiośowych.

Opracowano mapę przepływu dwufazowego woda – olej (Rys. 2). Zaproponowana mapa przepływu dwufazowego została stworzona dla szerokiego spektrum zmian warunków hydrodynamicznych. Układ tej mapy, z uwagi na bezwymiarowość zastosowanych współrzędnych, zwłaszcza liczby Deana, może być wykorzystany dla innych niż badane łuków rurowych.

Opracowana nowa metoda obliczania udziałów objętościowych faz przy przepływie dwufazowym woda – olej, zapewnia wysoką dokładność obliczeń, jak na warunki przepływu dwufazowego ciecz – ciecz i może być wykorzystana do wyznaczania tej wielkości podczas przepływów ciecz-ciecz w łukach rurowych o innej geometrii.

### LITERATURA

Chisholm D.A., 1967. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Tran.*, **10**, nr 12, 1767-1778. DOI: 10.1016/0017-9310(67)90047-6

Dix G.E., 1971. *Vapor void fraction for forced convection with subcooled boiling at low flow rates*. PhD. Thesis, University of California, Berkeley

Hapanowicz J., 2001. Przepływ dwufazowy powietrze – woda w łukach rurowych. *Inż. Chem. Proc.*, **22**, 219-237

Lockhart R.W., Martinelli R.C., 1949. Proposed correlation data for isothermal two-phase two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Progr.*, **45**, 39-45

Pietrzak M., 2010. *Hydrodynamika przepływu wielofazowego w łukach rurowych*. Praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole

Punches W.C., 1977. *MAYOUND-4A method evaluate transient thermal-hydraulic condition in rod bundles*. Report GERAMP no. 23517

Rouhani Z., 1986. *Steady state void fraction and pressure drop in water cooled reactors*. AB Atmoenergie, Studsvik, Sweden

Sharma M., Ravi P., Ghosh S., Das G., Das P.K., 2011. Hydrodynamics of lube oil-water flow through 180° return bends. *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 20, 4468-4476. DOI:10.1016/j.ces.2011.04.031

Stomma Z., 1979. *Two-phase flows-void fraction values determination*. Institute of nuclear Research, Świerk/Warszawa, Report NR/19187/IXD/R/A

Troniewski L., Ulbrich R., 1984. The analysis of flow regime maps of two-phase gas-liquid flow in pipes. *Chem. Eng. Sci.*, **39**, 1213. DOI: 10.1016/0009-2509(84)85082-4

Zuber N., Findlay J.A., 1965. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. *J. Heat Trans.*, **87**, nr 4, 453-468. DOI: 10.1115/1.3689137