

Marcin PIETRZAK, Stanisław WITCZAK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Przepływ mieszaniny trójfazowej ciecz-gaz w łukach rurowych

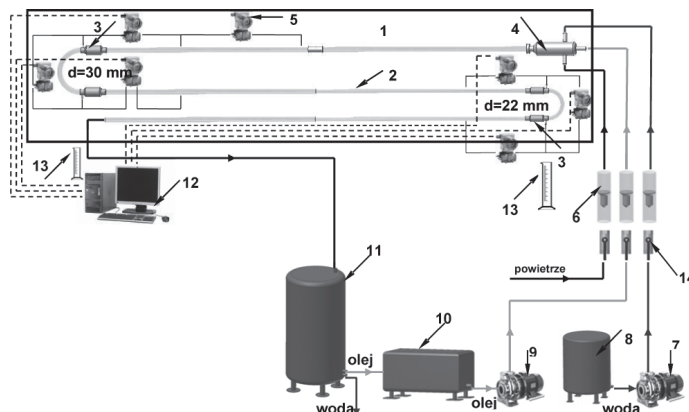
Wstęp

Równoczesny przepływ mieszaniny cieczy i gazu występuje w wielu aparatach przemysłu chemicznego i petrochemicznego, a także w instalacjach przemysłu spożywczego oraz tworzyw sztucznych. Przepływ taki ma miejsce m.in. w skraplaczach i parownikach urządzeń chłodniczych, kolumnach destylacyjnych i ekstrakcyjnych, przepływowych reaktorach rurowych, a także w przewodach transportowych łączących aparaty do przetwarzania surowców karbo- i petrochemicznych.

O ile przepływy dwufazowe typu gaz-ciecz zostały stosunkowo dobrze poznane i opisane w literaturze światowej, [Chen i in., 2002; 2004; Wang i in., 2008; Padilla i in., 2009; 2013], [Pietrzak, Witczak, 2010], to zaskakującym jest, pomimo tak istotnego znaczenia praktycznego, jak niewiele opracowań dotyczy rozpoznania hydrodynamiki przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz w różnie usytuowanych rurociągach oraz elementach armatury. Z przeprowadzonego przez autorów studium literatury, wynika ponadto, że brak jest ogólnych prac dotyczących natury przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej przez elementy destabilizujące płynącą mieszaninę, takie jak łuki rurowe. W związku z tym podjęto badania eksperymentalne przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz w tego typu elementach, celem określenia tworzących się struktur takiego przepływu, jak również wartości udziałów objętościowych faz.

Opis prowadzenia badań

Stanowiska do badań hydrodynamiki przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz w łukach rurowych, jednego z nich schemat przedstawiono na rys. 1, składały się głównie z pomp: olejowej – 9 i wodnej – 7, zbiornika oleju – 10, zbiornika wody – 8, mieszalnika – 4, kanału testowego – 2, separatora – 11 oraz baterii rotametrów – 6. Zasadniczym elementem stanowisk był kanał testowy wykonany z dwóch prostoosiowych rur z pleksiglasu – 2, o średnicach $d = 0,016; 0,022; 0,03$ m i odpowiednio długości $L = 1,5; 3,5; 3,5$ m, połączonych łukami. Kąt rozwarcia łuków φ wynosił natomiast 180° . Całość kanału pomiarowego umieszczona była na płycie nośnej – 1. W przypadku sekcji pomiarowej dotyczącej średnicy łuku $0,016$ m, istniała możliwość obrotu płyty nośnej – 1, dzięki czemu możliwe było prowadzenie badań zarówno dla przepływu poziomego, jak i wznoszącego i opadającego. Zbiornik cieczy olejowej wyposażony był w mieszadło i zestaw grzałek, które umożliwiały podgrzewanie oleju do żądanej temperatury, a tym samym na uzyskanie jego różnych gęstości i lepkości. W zależności od stosowanych w badaniach temperatur $t_o = 15 \div 30^\circ\text{C}$, gęstości i lepkości oleju wynosiły odpowiednio: $\rho_o = 875,5 \div 884,5 \text{ kg/m}^3$, $\eta_o = 20 \div 500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Objętościowe natężenia przepływu płynów regulowane były za pomocą zaworów kontrolnych – 14 i rotametrów zarówno pływakowych, jak i elektronicznych. Pompy tłoczyły płyny robocze ze zbiorników do mieszalnika, do którego również dopływało sprężone powietrze pobierane z sieci. W ten sposób wytworzona mieszanina wielofazowa przepływała przez kanał pomiarowy, a następnie była odprowadzana do separatora, gdzie następowało oddzielenie faz. Oddzielony olej był przesyłany do zbiornika i pozostawał w cyrkulacji, natomiast wodę odprowadzano do sieci kanalizacyjnej. W tab. 1 zaprezentowano warunki prowadzenia eksperymentu. Rejestracji obserwowanych struktur przepływu dokonywano za pomocą aparatu cyfrowego oraz cyfrowej kamery o rozdzielczości 1024×512 pikseli. Zapewniło to możliwość szczegółowej analizy tworzących się struktur przepływu. Pomiar udziałów objętościowych faz odbywał się przy wykorzystaniu metody szybkozamykających się zaworów zaciskowych. Po odcięciu przepływu, pomiędzy wlotem a wylotem z łuku rurowego, następował wymuszony spust zgromadzonej mieszaniny sprężonym powietrzem, poprzez zawory spustowe, do cylindra pomiarowego. W ten sposób bezpośrednio odczytywano objętość przepływającej cie-



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego hydrodynamiki przepływu trójfazowego w łukach rurowych o średnicach $d = 0,022; 0,03$ m: 1 – płyta nośna, 2 – permanentne poziome rury plexiglas połączone łukami, 3 – zawory membranowe, 4 – mieszalnik, 5 – przetwornik różnicy ciśnienia, 6 – bateria rotametrów, 7 – pompa wodna, 8 – zbiornik wody, 9 – pompa olejowa, 10 – zbiornik oleju, 11 – separator, 12 – komputerowy system akwizycji danych pomiarowych, 13 – cylinder miarowy, 14 – zawory regulacyjne

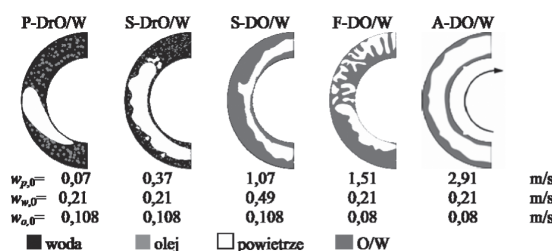
klej mieszaniny podczas trwania pomiaru. Znając objętość całego łuku rurowego i objętość cieczy wyznaczano rzeczywisty udział objętościowy fazy ciekłej. Udział objętościowy powietrza wyznaczano z kolei jako uzupełnienie sumy udziałów do jedności.

Tab. 1. Zakres badań

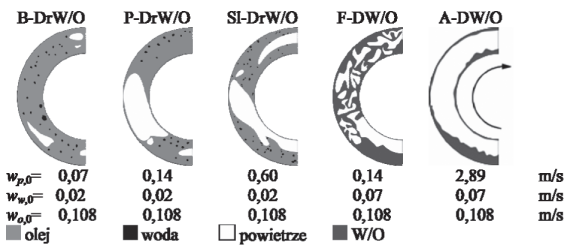
Czynnik i	Prędkość pozorna $w_{i,0}$ [m/s]	Liczba Reynoldsa Re_i [-]	Udział objętościowy ϵ_i [-]
powietrze	$0,038 \div 5,4$	$38 \div 7557$	$0,07 \div 0,96$
woda	$0,018 \div 0,92$	$289 \div 20219$	$0,07 \div 0,97$
olej	$0,014 \div 0,92$	$0,38 \div 670$	$0,011 \div 0,97$

Wyniki badań i obliczeń

Na rys. 2 i 3 przedstawiono, dla przykładu, struktury przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej zaobserwowane w pionowym łuku rurowym. Zaobserwowane struktury przepływu pogrupowano biorąc pod uwagę rodzaj dominującej fazy ciągłej w przepływie, jak w przypadku analogicznego przepływu w rurach prostych [Pietrzak, 2010]. W związku z tym wyróżniono struktury z dominującą fazą wodną – O/W i struktury z dominującą fazą olejową – W/O. Zastosowane w opisie struktur symbole określają odpowiednio: rodzaj przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej, formę przepływu ciekłych składników mieszaniny oraz rodzaj fazy dominującej w cieczy. Tytułem przykładu symbol B-DrW/O określa przepływ pęcherzyków gazu (B) w mieszaninie gazowo-cieczowej, w której w dominującej fazie olejowej (ciągłej fazie ciekłej) – O, przepływają w niej kropelki wody (Dr).



Rys. 2. Rodzaje struktur wznoszącego przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej (dominująca faza wodna) w łuku rurowym ($d = 0,016$ m)



Rys. 3. Rodzaje struktur wznoszącego przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej (dominująca faza olejowa) w łuku rurowym ($d = 0,016$ m)

Zaobserwowane struktury przepływu zostały naniesione na mapę przepływu trójfazowego (Rys. 4) opracowaną w układzie współrzędnych bezwymiarowych, odpowiadających liczbie *Deana*:

$$De_{c,2F} = Re_{c,2F} \left(\frac{2R}{d} \right)^{0,5} \quad (1)$$

oraz parametrowi *X*:

$$X = \frac{w_{p,0}}{w_{c,0}} \sqrt{\frac{\rho_p \rho_w(20^\circ C)}{\rho_p(20^\circ C) \rho_c}} \quad (2)$$

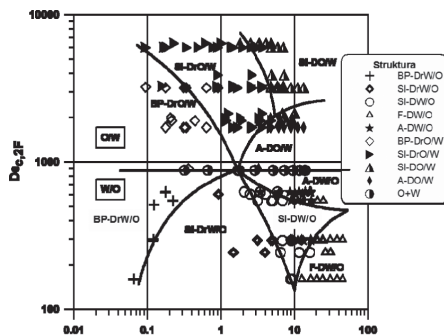
przy czym

$$Re_{c,2F} = \frac{w_{c,0} d \rho_c}{\eta_c} \quad (3)$$

gdzie:

- $Re_{c,2F}$ – liczba *Reynoldsa* dla cieczy w przepływie dwufazowym [-],
- R – promień wygięcia łuku [m],
- d – średnica rury [m],
- $w_{p,0}$ – prędkość pozorna powietrza [m/s],
- $w_{c,0}$ – prędkość pozorna cieczy (mieszanina O+W) [m/s].

Na mapie (Rys. 4) wyodrębniono obszary występowania struktur z dominującą fazą wodną (O/W) oraz struktur z dominującą fazą olejową (W/O). Obszary te są rozdzielone granicą przejścia międzyfazowego (linia pozioma na mapie). Dla przepływu trójfazowego z dominującą fazą wodną wyróżniono następujące obszary przepływu: przepływ korkowo-pęcherzykowy z kroplami oleju w wodzie (BP-DrO/W), przepływ rzutowy z kroplami oleju w wodzie (SI-DrO/W), przepływ rzutowy z dyspersją oleju w wodzie (SI-DO/W), przepływ pierścieniowy z dyspersją oleju w wodzie (A-DO/W). W przypadku, gdy w przepływie trójfazowym dominowała faza olejowa, obszary przepływu sklasyfikowano jako: przepływ korkowo-pęcherzykowy z kroplami wody w oleju (BP-DrW/O), przepływ rzutowy z kroplami wody w oleju (SI-DrW/O), przepływ rzutowy z dyspersją wody w oleju (SI-DW/O), przepływ pianowy z dyspersją wody w oleju (F-DW/O), przepływ pierścieniowy z dyspersją wody w oleju (A-DW/O).



Rys. 4. Mapa przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej w łukach rurowych

Na różnorodność struktur przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej w łukach rurowych niewątpliwie mają wpływ wartości udziałów objętościowych wszystkich obecnych faz w przepływie. W związku z tym postanowiono opracować nowe, własne zależności do wyznaczania wartości udziałów objętościowych faz podczas takiego przepływu. Metody obliczeniowe przyjęto odnosić do zależności sprawdzonych dla rur prostych z uwzględnieniem efektu łuku. Stąd też w odniesieniu do obliczania wartości udziału objętościowego powietrza w przepływie mieszaniny trójfazowej gaz-ciecz-ciecz w łukach rurowych $R_{p,\pm}$ przyjęto zależność

$$\frac{R_{p,\pm}}{R_{p,P}} = 1,151 \varepsilon_p^{-0,574} Fr_{c,\pm}^{0,065} \quad (4)$$

gdzie:

- ε_p – udział powietrza na wlocie [-],
- $Fr_{c,\pm}$ – zmodyfikowana liczba *Froude'a* dla cieczy [-], obliczona z zależności:

$$Fr_{c,\pm} = \frac{w_{c,0}^2}{gR} \quad (5)$$

gdzie:

- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],

W równ. (4), za metodę odniesienia przyjęto metodę $R_{p,P}$, opracowaną dla przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej w kanale prostosiowym [Pendyk, 2002]

$$R_{p,P} = \frac{\varepsilon_p^{0,79}}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1 \right)^{0,5}} \left(\frac{1 - \varepsilon_w}{1 + \varepsilon_o} \right)^{0,43} \quad (6)$$

gdzie:

- ε_w – udział wlotowy wody [-],
- ε_o – udział wlotowy oleju [-],

Udziały objętościowe wody $R_{w,L}$ i oleju $R_{o,L}$ należy obliczać odpowiednio z następujących zależności:

$$R_{w,\pm} = (\varepsilon_w^*)^{0,8} (1 - R_{p,\pm}) \quad (7)$$

$$R_{o,\pm} = (\varepsilon_o^*)^{0,6} (1 - R_{p,\pm}) \quad (8)$$

gdzie:

$$\varepsilon_w^* = \frac{w_{w,0}}{w_{w,0} + w_{w,0}} \quad \text{– koncentracja wody w oleju [-],}$$

$$\varepsilon_o^* = \frac{w_{o,0}}{w_{o,0} + w_{w,0}} \quad \text{– koncentracja oleju w wodzie [-].}$$

Wnioski

Struktury przepływu trójfazowego w łukach rurowych różnią się od analogicznych struktur w rurach prostosiowych kształtem form tworzonych przez fazę gazową i cieklą.

Zaproponowano mapę przepływu trójfazowego opracowaną 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.

Opracowano nową metodę obliczania wartości udziałów objętościowych wszystkich faz obecnych w przepływie mieszaniny gaz-ciecz-ciecz. Metoda ta może być wykorzystana do wyznaczania tych wielkości podczas przepływów wielofazowych w łukach rurowych o innej geometrii.

LITERATURA

Chen I.Y., Yang C., Wang C., 2002. Influence of horizontal return bend on the two-phase flow pat tern in a 6.9 mm diameter tube *Can. J. Chem. Eng.*, **80**, nr 3, 478-484. DOI: 10.1002/cjce.5450800317

Chen I.Y., Wang C., Lin S.Y., 2004. Measurements and correlations of frictional single-phase and two-phase pressure drops of R-410A in small U-type return bends. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **47**, 2241-2249. DOI: 10.1016/j.ijheatmass transfer.2003.11.016

Padilla M., Revellin R., Bonjour J., 2009. Prediction and simulation of two-phase pressure drop in return bends *Int. J. Refrig.*, **32**, 1776-1783. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.06.006

Padilla M., Revellin R., Wallet J., Bonjour J., 2013. Flow regime visualization and pressure drops of HFO-1234yf, R-134a and R-410A during downward two-phase flow in vertical return bends *Int. J. Heat Fluid Flow*, **40**, 116-134. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.01.005

Pietrzak M., Witczak S., 2010. Charakterystyka przepływu dwufazowego mieszaniny gazowo-cieczowej w U-rurach. *Inż. Ap. Chem.*, **49**, nr 4, 86-87

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

Pendyk B., 2002. *Udział objętościowy faz przy przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz w kanałach poziomych*. Praca doktorska. Pol. Opolska, Opole

Wang C., Chen I.Y., Chang Y., 2008. A visual observation of the air-water two-phase flow in small diameter tubes subject to the influence of vertical return bends *Chem. Eng. Res. Des.*, **86**, 1223-1235. DOI: 10.1016/j.cherd.2008.06.008