

Agata BRANDT, Stanisław WITCZAK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Udziały objętościowe faz w warunkach spływu w rurze pionowej cieczy dwufazowej woda-olej

Wstęp

Przemysłowe wykorzystanie przepływów wielofazowych, w tym także z udziałem cieczy wzajemnie niemieszających, wymaga znajomości metod przewidywania ich zachowania się w konkretnych urządzeniach i aparatach. Można w tej grupie wymienić wyparki cienkowarstwowe, czy też rurowe reaktory heterogeniczne. Równoczesny spływ w rurach pionowych dwóch cieczy wzajemnie niemieszających się powoduje, że tworzą się różne struktury przepływu związane z wzajemnym rozmieszczeniem poszczególnych składników mieszaniny dwufazowej. Efekt omywania ścianki rury przez różne ciecze ma niewątpliwie istotne znaczenie na efektywność procesów wymiany ciepła oraz masy, które są ściśle związane z hydrodynamiką spływu cieczy, na co zwracają uwagę m.in. [Broniarz-Press, 2004; Filipczak, 2007; Czernek, 2012; Brandt, 2015].

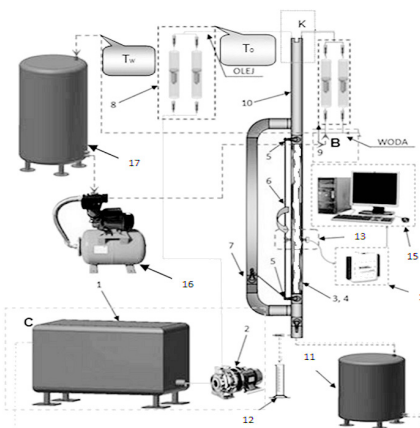
Celem określenia oraz opisu części zagadnień związanych z hydrodynamiką tego typu przepływu, w pracy przedstawiono wyniki badań związanych z określeniem rodzajów struktur spływających cieczy dwufazowej typu woda-olej oraz odpowiadających im wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz. W tym zakresie przedstawiono w pracy oryginalną mapę przepływu oraz podano zależność do obliczania udziałów objętościowych ciekłych składników ciekłej mieszaniny dwufazowej.

Badania doświadczalne

Aparatura. Badania doświadczalne prowadzono na instalacji doświadczalnej, której schemat przedstawiono na rys.1. Podstawowymi elementami instalacji był pionowy kanał pomiarowy – 3 wykonany z pleksiglasu o średnicy wewnętrznej 12,5 mm, układ zasilania wodą i olejem, odpowiednie układy pomiarowe strumienia przepływu oleju i wody, komora wytwarzania mieszaniny dwufazowej oraz separator. Czynniki robocze, doprowadzane z odpowiednich układów zasilania, kierowane były do układu regulacji i pomiaru strumienia przepływu – 8, 9 i dalej do układu zasilania kanału pomiarowego, w którym następowało wytworzenie strugi cieczy dwufazowej. Wytworzona w komorze mieszania wodno-olejowa przepływała początkowo przez nieprzezroczysty odcinek kanału pomiarowego – 10, w którym następowała stabilizacja parametrów przepływu i kształtowanie się określonej struktury przepływu dwufazowego. Dalej mieszanina przepływała do odcinka obserwacyjnego – 3,4, wyposażonego na jego początku i końcu w sprzężone ze sobą zawory kulowe – 5 tworzące tzw. pułapkę służącą do pomiaru rzeczywistych wartości udziałów objętościowych faz.

W tej, przezroczystej części kanału pomiarowego – 3 dokonywano także obserwacji i identyfikacji tworzących się struktur przepływu oraz określania dominacji poszczególnych faz ciekłych w przepływie – 13. Po opuszczeniu kanału pomiarowego mieszanina cieczy przepływała do separatora – 11, w którym następowało grawitacyjne rozdzielanie jej składników na olej i wodę.

Dla potrzeb określania rodzajów struktur przepływu mieszaniny wodno-olejowej spływającej po wewnętrznej powierzchni rury, wykorzystano zarówno techniki fotograficzne - cyfrowy aparat fotograficzny i kamera video jak i specjalnie dla tego celu zaprojektowany układ pomiarowy – 13, 14, 15. Badania wykonano za pomocą karty pomiarowej firmy *National Instruments* – 14 współpracującej z oprogramowaniem *DIAdem Evaluation Version* – 15. Badania przeprowadzono z udziałem trzech olejów o różnej gęstości



Rys. 1. Schemat instalacji eksperymentalnej:

1 – zbiornik oleju, 2 – pompa zębatą, 3 i 4 – przezroczysty odcinek kanału pomiarowego i obserwacja struktur, 5 – zawory odcinające, 6 – mechanizm odcinający, 7 – zawór kulowy, 8 – bateria rotametrów oleju, 9 – bateria rotametrów wody, 10 – nieprzezroczysty kanał pomiarowy, 11 – separator, 12 – cylinder miarowy, 13 – sondy pomiarowe, 14 – karta pomiarowa, 15 – komputerowy system akwizycji danych pomiarowych, 16 – hydrofor, 17 – zbiornik wody, układ zasilania: C – olejem, B – wodą, K – komora wytwarzania mieszaniny dwufazowej

i lepkości: *Iterm 6Mb*, *Iterm 12* i *L-AN 15*. W tab. 1 przedstawiono charakterystykę wybranych właściwości fizycznych użytych w badaniach olejów oraz wartości prędkości pozornych poszczególnych cieczy, liczonych na pełny przekrój kanału.

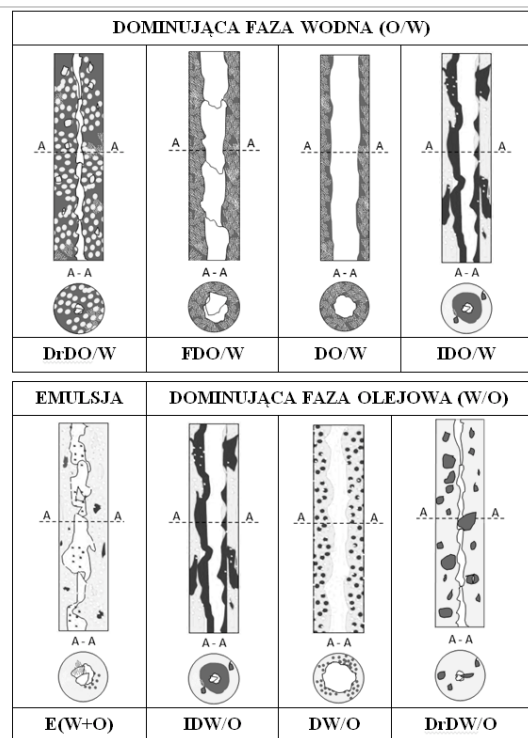
Tab. 1. Charakterystyka właściwości fizycznych olejów i zakres zmian parametrów przepływowych

Składnik mieszaniny	Gęstość kg/m ³	Lepkość Pa·s	Prędkość pozorna faz, m/s
Olej L-AN 15	859,81	0,029	0,012÷0,37
Olej Iterm 6 Mb	860,73	0,083	0,0073÷0,75
Olej Iterm 12	881,55	0,37	0,002÷0,39
Woda	998,20	0,001	0,016÷1,23

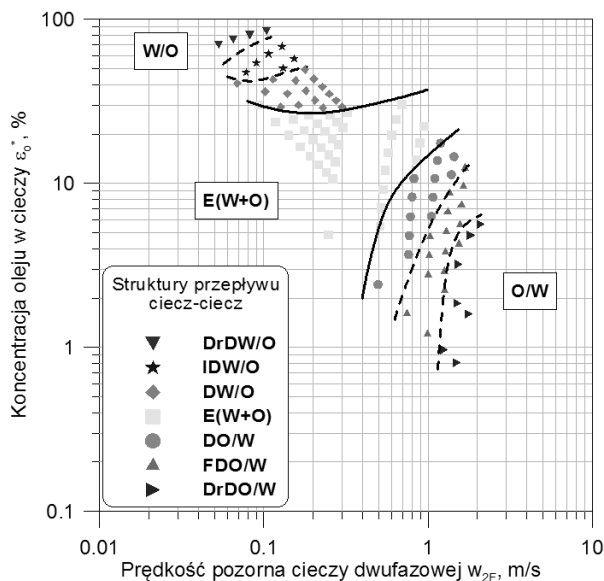
Wyniki i ich analiza

Na rys. 2 przedstawiono schematy zidentyfikowanych struktur przepływu dwufazowego ciecz-ciecz, na których to odcieniem ciemnym oznaczono wodę, a jasnym olej. Jak można zauważyć, przy zróżnicowanych wartościach przepływu, fazą dominującą może stanowić olej lub woda. Ogółem zidentyfikowano siedem podstawowych struktur przepływu: po trzy struktury z dominującą fazą wodną (DrDO/W – kroplowo dyspersyjna oleju w wodzie, FDO/W – pianowo – dyspersyjna oleju w wodzie, DO/W – dyspersyjna oleju w wodzie) i olejową (DrDW/O – kroplowo – dyspersyjna wody w oleju, IDW/O – przerywano – dyspersyjna wody w oleju, DW/O – dyspersyjna wody w oleju) oraz jedną strukturę pośrednią, której emulsyjny charakter przepływu sprawiał, że zaliczono ją do struktury pośredniej typu (W+O).

Wykonana ocena struktur przepływu, zarówno o obserwacje wizualne, jak i z wykorzystaniem metody konduktancji faz ciekłych oraz przedstawiona na tej podstawie klasyfikacja struktur umożliwiła opracowanie mapy przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz, którą przedstawiono na rys. 3. Na mapie tej, na osi rzędnych umiejscowiono koncentrację oleju w cieczy, a na osi odciętych sumę prędkości pozornych obu faz ciekłych występujących w przepływie, czyli



Rys. 2. Schematy obserwowanych struktur dwufazowych woda-olej uzyskanych w warunkach spływu mieszaniny tych składników w rurze pionowej o średnicy 12,5 mm.



Rys. 3. Mapa opadającego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz z zakresami występowania określonych struktur przepływu cieczy dwufazowej woda-olej

prędkość pozorną wody i oleju. Z przedstawionej mapy wynika, że określone struktury tworzyły obszary (skupiska) punktów, które były charakterystyczne dla występowania (przy określonych warunkach pomiarowych) danej formy przepływu.

W obszarze dominacji fazy olejowej przepływie znalazły się takie struktury przepływu jak: kropłowo-dyspersyjna wody w oleju, przerywano-dyspersyjna wody w oleju i dyspersyjna wody w oleju. Natomiast w obszarze dominacji fazy wodnej w przepływie umiejscowiły się następujące struktury przepływu: dyspersyjna oleju w wodzie, pianowo - dyspersyjna oleju w wodzie oraz kropłowo-dyspersyjna oleju w wodzie. Pomiędzy tymi dwoma zasadniczymi obszarami znajdował się obszar emulsji, czyli stan przejściowy, w którym powstająca struktura przepływu posiadała takie cechy,

które w sposób jednoznaczny nie pozwalały na jej zakwalifikowanie do któregośkolwiek obszaru dominacji jednej faz biorących udział w tego rodzaju przepływie.

Bezpośredni wpływ na tworzenie się różnych struktur dwufazowych miały rzeczywiste wartości udziałów objętościowych wody R_w i oleju R_o , które w większości były inne niż to mogłoby wynikać z wartości ich udziałów ϵ_i określonych z relacji strumieni obu faz doprowadzanych do kanału.

W ogólnym przypadku, dla celów obliczeniowych, wartość udziału objętościowego oleju przy przepływie dwufazowym wodno-olej, poprzez analogię do przepływu dwufazowego gaz-ciecz, przyjęto opisać za pomocą równania

$$R_o = \frac{1}{1 + \frac{w_o}{w_w} \frac{1-x_o}{x_o} \frac{\rho_o}{\rho_w}} = \frac{1}{1 + s^* \frac{1-x_o}{x_o} \frac{\rho_o}{\rho_w}}, \quad (1)$$

w którym wartość udziału objętościowego oleju zależy m.in. od wartości poślizgu międzyfazowego s^* będącego stosunkiem rzeczywistych prędkości oleju i wody w płynącej mieszaninie.

W oparciu o wyniki badań własnych prowadzonych z wykorzystaniem różnych jakościowo olejów stwierdzono, że wartość poślizgu międzyfazowego zawierała się w stosunkowo dużym zakresie zmienności $s^* = 0,03 \div 1,6$. Dla wartości $s^* < 1$ występowała relacja $R_o > \epsilon_o$, natomiast dla $s^* > 1$ odpowiednio relacja $R_o < \epsilon_o$. W przypadku $s^* = 1$ przepływ mieszaniny woda-olej miał charakter beżoślizgowy a wartość rzeczywistego udziału objętościowego była równa wartości udziału wlotowego wynikającego z relacji prędkości strumieni obu faz, czyli $R_o = \epsilon_o$

$$\epsilon_o = \frac{V_o}{V_o + V_w} = \frac{w_{o,0}}{w_{o,0} + w_{w,0}} = \frac{w_{o,0}}{w_{2F}}. \quad (2)$$

Uwzględniając występowanie spływu grawitacyjnego mieszaniny wodno-olejowej wartość poślizgu międzyfazowego poszukiwano w formie zależności

$$s^* = C Fr_o^{n_1} Fr_w^{n_2}, \quad (3)$$

w której występują liczby Frouda dla fazy olejowej i wodnej

$$Fr_o = \frac{w_{o,0}^2}{gd}, \quad Fr_w = \frac{w_{w,0}^2}{gd}. \quad (4)$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń korelacyjnych otrzymano wartości stałej $C = 1,109$ oraz wartości wykładników $n_1 = 0,25$ oraz $n_2 = 0,17$, uzyskując dla równania

$$s^* = 1,109 Fr_o^{0,25} Fr_w^{0,17} \quad (5)$$

Wartość współczynnika korelacji $r = 0,925$, a średnia wartość odchylenia standardowego wynosi 0,246. Wartości liczb Frouda zmieniały się w badaniach w zakresie $Fr_o = 5 \cdot 10^{-5} \div 1,178$ oraz $Fr_w = 0,002 \div 17,87$. Wstawiając zależność (5) do wzoru (1) uzyskano ogólne równanie do obliczania udziału objętościowego oleju dla spływu cieczy dwufazowej woda-olej

$$R_o = \frac{1}{1 + 1,109 Fr_o^{0,25} Fr_w^{0,17} \frac{1-x_o}{x_o} \frac{\rho_o}{\rho_w}}, \quad (6)$$

dla którego średnia wartość błędu względnego wynosi 21,6%. Biorąc pod uwagę dużą dokładność metody (7) można polecić ją do obliczania wartości udziału objętościowego oleju podczas spływu grawitacyjnego mieszaniny woda-olej.

LITERATURA

- Brandt A., (2015). *Przepływ pierścieniowy mieszaniny wielofazowej w rurach aparatów cienkowarstwowych*. Praca doktorska, Pol. Opolska Broniarz-Press L., (2004). *Hydrodynamika spływu filmowego cieczy i zjawiska przenoszenia w aparatach warstwowych*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań
- Czernek K., (2013). *Hydrodynamiczne aspekty projektowania aparatów cienkowarstwowych dla cieczy bardzo lepkich*. Studia i monografie, Pol. Opolska, Opole
- Filipczak G., (2007). *Teoretyczna i eksperymentalna ocena odparowania Smoly w przepływie dwufazowym z parą wodną*. Studia i Monografie. Pol. Opolska, Opole