

Agata BRANDT, Stanisław WITCZAK, Marcin PIETRZAK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Hydrodynamika spływu cieczy dwufazowej woda – olej w rurze pionowej

Wstęp

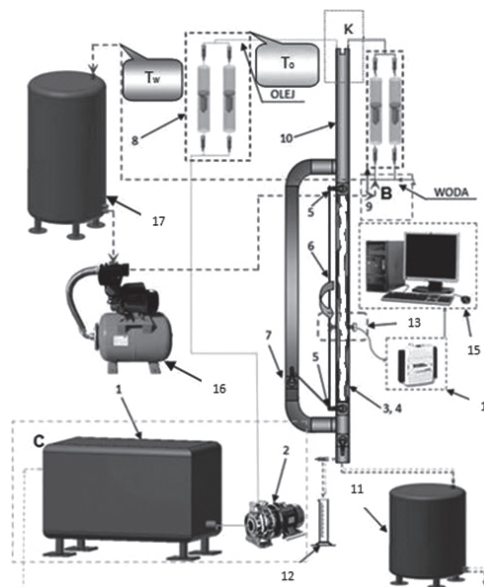
Przepływy wielofazowe, w tym także z udziałem cieczy wzajemnie niemieszających się występują w wielu urządzeniach przemysłowych, a w szczególności w wyparkach i reaktorach rurowych. Równoczesny przepływ dwóch cieczy powoduje, że tworzą się różne struktury przepływu związane z wzajemnym roz mieszaniem poszczególnych składników ciekłej mieszaniny dwufazowej.

W przypadku projektowania aparatury wykorzystującej ten rodzaj przepływu istotnego znaczenia nabierają problemy określania takich wielkości jak: minimalna wartość zraszania, zakresy występowania poszczególnych struktur przepływu, rzeczywiste wartości udziałów objętościowych faz oraz wartość grubości tworzących się filmów cieczy dwufazowej. Nie bez znaczenia jest również wskazanie, która ze spływających cieczy stanowi fazę ciągłą a która fazę rozproszoną. Ma to istotne znaczenie na efektywność procesów wymiany ciepła oraz masy, które są ściśle związane z hydrodynamiką spływu cieczy dwufazowej, na co zwracają uwagę m.in. Troniewski [1989], Broniarz-Press [2004] i Filipczak [2007].

Celem określenia oraz opisu części z omawianych zagadnień w pracy przedstawiono wyniki badań związanych z określeniem rodzajów struktur spływających cieczy typu woda-olej, wartości ich udziałów objętościowych oraz średniej grubości tworzących się filmów cieczy.

Zakres i metodyka prowadzenia badań

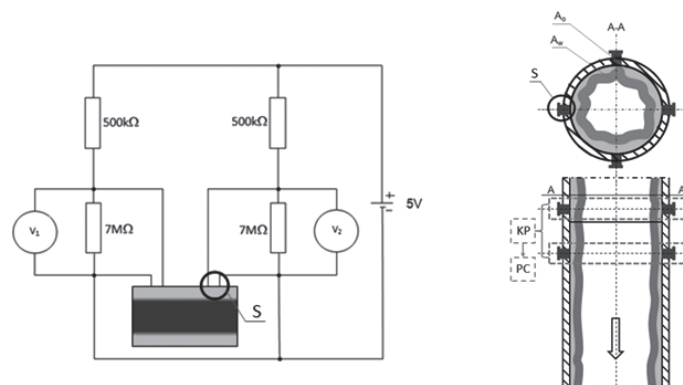
Badania doświadczalne prowadzono na instalacji doświadczalnej, której schemat przedstawiono na rys. 1. Podstawowymi elementami instalacji był pionowy kanał pomiarowy – 3, wykonany z pleksiglasu o średnicy wewnętrznej 12,5 mm, układ zasilania wodą i olejem, odpowiednie układy pomiarowe strumienia przepływu 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 dwufazowej. Olej tłoczony był do instalacji i układu zasilania (z dyszą centralną) za pomocą pompy zębatej – 2, napędzanej silnikiem prądu stałego, umożliwiającym płynność regulacji obrotów pompy. Woda pobierana była bezpośrednio z sieci wodociągowej, skąd po odgazowaniu w zbiorniku wody za pomocą hydroforu – 16 kierowana była do układu zasilania, poprzez baterię rotametrów – 9, za pomocą których dokonywano regulacji i pomiaru wartości jej przepływu. Wytworzona w komorze mieszania wodno-olejowa przepływała początkowo przez nieprzezroczysty odcinek kanału pomiarowego – 10, gdzie 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. Po dynamicznym zamknięciu zaworów odcinających – 5, zamknięta w pułapce mieszanina cieczy gromadziła się w dolnej części kanału pomiarowego, a następnie za pomocą sprężonego powietrza wytłaczana była do cylindrów miarowych, w których po grawitacyjnym rozdzieleniu się faz ciekłych odczytywano objętość oleju i wody. Bazując na zmierzonych wartościach udziałów objętościowych faz ciekłych obliczano średnie grubości filmów cieczy. W części przezroczystej 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,



Rys. 1. Schemat instalacji eksperymentalnej: 1 – zbiornik oleju, 2 – pompa zębata, 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

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, którego schemat oraz sposób rozmieszczenia czujników (sond pomiarowych) przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat elektryczny i rozmieszczenie sond w układzie do pomiaru przewodności mieszaniny wodno-olejowej, KP – karta pomiarowa, PC – komputer, S – sonda

W przedstawionym układzie pomiarowym wykorzystywano zjawisko różnej rezystancji obu ciekłych składników mieszaniny. Przyjmując, że olej jest dobrym izolatorem elektrycznym, a woda może przy odpowiednim stężeniu soli stanowić ciecz o określonej przewodności cieplnej, w omawianej metodzie mierzono wartości napięcia na sondach pomiarowych – 13 rozmieszczonych koncentrycznie w dwóch

plaszczynach ściany rurki wykonanej z pleksiglasu. Badania wykonano w zakresie wartości napięcia 2,4÷4,7 V.

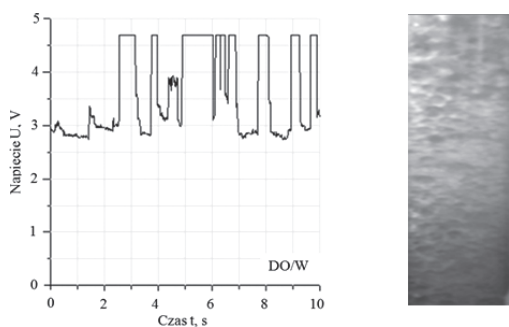
Wszystkie wartości napięcia mierzono i archiwizowano za pomocą karty pomiarowej firmy *National Instruments* – 14 współpracującej z oprogramowaniem *DIAdem Evaluation Version* – 15. Badania przeprowadzono z udziałem trzech olejów o różnej gęstości i lepkości: Iterm 6Mb, Iterm 12 i L-AN 15. W tab. 1 przedstawiono charakterystykę wybranych właściwości fizycznych użytych w badaniach olejów oraz wartości prędkości pozornych poszczególnych cieczy, liczonych na pełny przekrój kanału.

Tab. 1. Charakterystyka właściwości olejów i zakres parametrów przepływowych

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

Wyniki badań i ich analiza

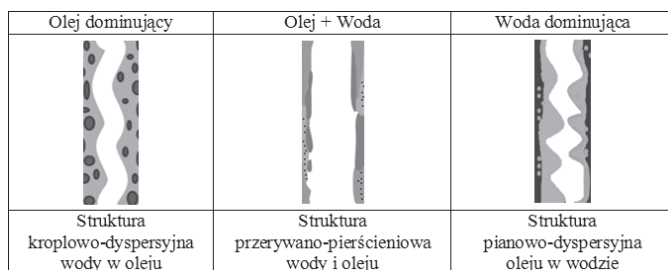
Na rys. 3 przedstawiono przykładowy przebieg zmian napięcia na sondach pomiarowych, które uzyskano przy przepływie dyspersyjnym kropelek oleju w wodzie (ozn. DO/W) w spływającej warstewce dwufazowej cieczy wodno-olejowej.



Rys. 3. Rzeczywisty przebieg zmian napięcia i odpowiadająca mu struktura przy przepływie dwufazowym cieczy-ciecz

Struktura taka tworzyła się gdy faza wodna pozostawała stale w kontakcie ze ścianką kanału a olej płynął w postaci pojedynczych kropelek lub skupisk dużej ilości mniejszych kropełek wewnątrz warstewki wody. Jest to widoczne na charakterystyce napięciowej, na której widoczne są znaczne wahania, od wartości minimalnej dla wody (2,7 V) do wartości maksymalnej, charakterystycznej dla oleju (4,7 V). Wartość napięcia w trakcie przepływu pozostawała w granicach 2,75÷3,25 V, co wskazywało na dominację fazy wodnej.

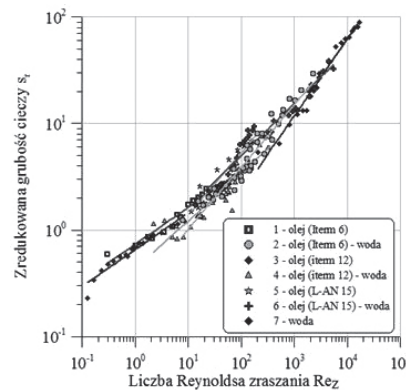
Na rys. 4 przedstawiono schematy wybranych struktur przepływu dwufazowego cieczy-ciecz, na których to odcieniem ciemnym oznaczono wodę, a jasnym olej. Jak można zauważyć, przy zróżnicowanych wartościach przepływu, fazę dominującą może stanowić olej lub woda. W przypadku dominacji fazy olejowej wyszczególniono strukturę kropłowo-dyspersyjną, czyli taką, w której przy ścianie kanału płynęła warstwa oleju ze zdyspergowanymi drobnymi kroplami wody. Z kolei, przy dominacji fazy wodnej w przepływie, woda występowała przy ścianie kanału i zawierała drobne krople oleju. Z powodu intensyw-



Rys. 4. Schematy obserwowanych struktur dwufazowych woda-olej uzyskanych w warunkach spływu mieszaniny tych składników w rurze pionowej o średnicy 12,5 mm

nego przepływu mieszaniny cieczy, struktura ta miała charakter piany. Natomiast, struktura przerywano-pierścieniowa to taka, w której przy ścianie kanału płynęły obie fazy ciekłe naprzemiennie. W strukturze tej obserwowano także dyspersję kropelek wody w fazie olejowej.

W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono także wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz. Stwierdzono przy tym pewną zależność ich wartości z określonymi strukturami przepływu. Celem ilościowego opisu tych relacji konieczne jednak jest prowadzenie dalszych badań i analiz.



Rys. 5. Zredukowane grubości filmów cieczy przy spływie grawitacyjnym różnych olejów i wody

Występowanie różnych struktur dwufazowych w filmie cieczy powodowało z kolei to, że w zależności od ich występowania otrzymywano zróżnicowane ich grubości. Przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono na rys. 5. Na wykresie naniesiono wartości zredukowanych grubości filmów cieczy przy spływie grawitacyjnym s_r , dla trzech różnych olejów oraz wody, wyrażonych zależnością,

$$s_r = \frac{s_0}{\vartheta_z} = C Re_z^n \quad (1)$$

gdzie s_0 – zmierzona średnia grubość filmu cieczy.

Wartości wymiaru zastępczego ϑ_z oraz liczby *Reynoldsa* dla warunków zraszania Re_z obliczono z wykorzystaniem zmierzonych wartości udziałów objętościowych wody R_w i oleju R_{ol} do określania gęstości i lepkości cieczy dwufazowej, a mianowicie:

$$\vartheta_z = \left[\frac{\eta_c^2}{(\rho_c^2 g)} \right]^{1/3}, \quad Re_z = \frac{4\Gamma}{\eta_c}, \quad \Gamma = \frac{m_c}{\pi D_w} \quad (2)$$

$$\eta_c = \eta_w R_w + \eta_{ol} R_{ol}, \quad \rho_c = \rho_w R_w + \rho_{ol} R_{ol}$$

Układ punktów pomiarowych oraz linii przedstawionych na rys. 5 wskazuje, że wartości zredukowanych grubości filmów cieczy zależą znacząco od zakresu liczby Re_z , przy czym uzyskane wartości niewiadomych C i n (Tab. 2) mieszczą się w zakresie ogólnych zależności podawanych w monografii [Broniarz-Press, 2004].

Tab. 2. Równania zmierzonych zredukowanych grubości filmów cieczy przy spływie grawitacyjnym cieczy

Lp.	Równanie	Lp.	Równanie
1	$s_r = 0,737 Re_z^{0,346}$	5	$s_r = 0,582 Re_z^{0,364}$
2	$s_r = 0,267 Re_z^{0,583}$	6	$s_r = 0,533 Re_z^{0,488}$
3	$s_r = 0,655 Re_z^{0,345}$	7	$s_r = 0,081 Re_z^{0,721}$
4	$s_r = 0,430 Re_z^{0,452}$	Współczynnik korelacji poszczególnych równań $r = 0,854 \pm 0,980$	

Wnioski

Jakkolwiek uzyskane wyniki badań pozwoliły na wskazanie osobliwości spływu ciekłej mieszaniny dwufazowej typu woda-olej wewnątrz pionowej rury, to opracowanie odpowiednich zależności obliczeniowych, przydatnych do projektowania aparatów wykorzystujących takie przepływy, wymaga dalszych prac badawczych i analitycznych.

LITERATURA

Broniarz-Press L., 2004. *Hydrodynamika spływu filmowego cieczy i zjawiska przenoszenia w aparatach warstewkowych*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań
 Filipczak G., 2007. *Teoretyczna i eksperymentalna ocena odparowania smoły w przepływie dwufazowym z parą wodną*. Studia i Monografie. Wyd. Pol. Opolskiej, Opole
 Troniewski L., 1989. *Aparaty z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy*. Studia i Monografie. Wyd. WSI, Opole