

Leon TRONIEWSKI, Stanisław WITCZAK, Kamila MYDLARZ-GABRYK

e-mail: j.troniewski@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Badania hydrauliki układów wodno-olejowych

Wstęp

Z punktu widzenia praktyki przemysłowej, poznanie i opisanie zjawisk charakterystycznych dla wznoszących, pionowych, współprądowych przepływów mieszaniny wodno-olejowej, stanowi podstawowe narzędzie do projektowania procesów i aparatury przemysłowej czy też doboru urządzenia tłoczącego, a tym samym ma duże znaczenie dla ich eksploatacji. Ponadto, do chwili obecnej, liczba opublikowanych prac w zakresie problematyki tego rodzaju przepływów jest znacznie ograniczona, a prezentowane w nich wyniki, szczegółowo przeanalizowane w pracach [1-6], nie pozwalają na dokonanie uogólnień zachodzących zjawisk.

Mając na uwadze powyższe informacje, celowym było podjęcie w tej dziedzinie prac badawczych.

Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne prowadzono na instalacji, której jednym z głównych elementów była pionowa rura wykonana ze szkła organicznego. W badaniach wykorzystano dwa kanały pomiarowe o średnicach wewnętrznych 30 i 40 mm oraz długościach odpowiednio 7121 i 7704 mm. Planując badania starano się tak dobrać zakresy zmian prędkości pozornych poszczególnych czynników, aby uzyskać zarówno przepływ z dominującą fazą olejową (W/O), jak również z dominującą fazą wodną (O/W), tj. dla rury o średnicy wewnętrznej 30 mm w zakresie prędkości pozornych oleju $w_{ol,o} = 0,02 \div 0,58$ m/s oraz wody $w_{w,o} = 0,01 \div 1,05$ m/s, natomiast dla rury o średnicy wewnętrznej 40 mm – $w_{ol,o} = 0,04 \div 0,30$ m/s oraz $w_{w,o} = 0,04 \div 0,47$ m/s. Jako czynników roboczych tworzących mieszaninę dwufazową użyto wody oraz oleju maszynowego L-AN 15, którego gęstość oraz lepkość w temperaturze 20°C wynosiły odpowiednio 856 kg/m³ i 29,2 mPa·s. Składniki mieszaniny doprowadzane były w sposób bezpośredni do układu regulacji i pomiaru strumienia przepływu, a następnie do komory zasilania, po opuszczeniu której przepływały przez kanał składający się z trzech odcinków: rozbiegowego, pomiarowego i redukującego efekt wylotowy. W części rozbiegowej kanału dochodziło do stabilizacji przepływu i formowania się określonej struktury przepływu. W części pomiarowej kanału dokonywano identyfikacji struktur przepływu oraz pomiaru strat ciśnienia, a także pomiaru rzeczywistych udziałów objętościowych poszczególnych faz. Po przejściu mieszaniny przez odcinek kanału redukującego efekt wylotowy, ze względu na konieczność ponownego użycia oleju do badań, mieszaninę kierowano do separatora grawitacyjnego.

Badania prowadzono w ten sposób, że przy stałym strumieniu oleju, zwiększano odpowiednio strumień wody, dokonując jednocześnie identyfikacji struktur przepływu, pomiarów rzeczywistych udziałów objętościowych faz oraz strat ciśnienia.

Identyfikacji kształtujących się struktur przepływu dokonywano w oparciu o obserwacje wizualne mieszaniny wodno-olejowej w świetle przechodzącym, podświetlając kanał pomiarowy lampą halogenową. Obserwacje te prowadzono powyżej odcinka rozbiegowego, w miejscu zapewniającym wytworzenie się w pełni wykształconych struktur. Rejestracji kształtujących się podczas przepływu struktur dokonywano za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego.

Pomiaru rzeczywistych wartości udziałów objętościowych faz dokonywano klasyczną metodą objętościową, zwaną również metodą pułapkową. Po ustabilizowaniu się przepływu mieszaniny wodno-olejowej zamykane były równocześnie obydwie końce odcinka pomiarowego. Równoczesne zamknięcie zaworów powodowało zatrzymanie porcji mieszaniny o taki składzie, jaki był charakterystyczny dla danego

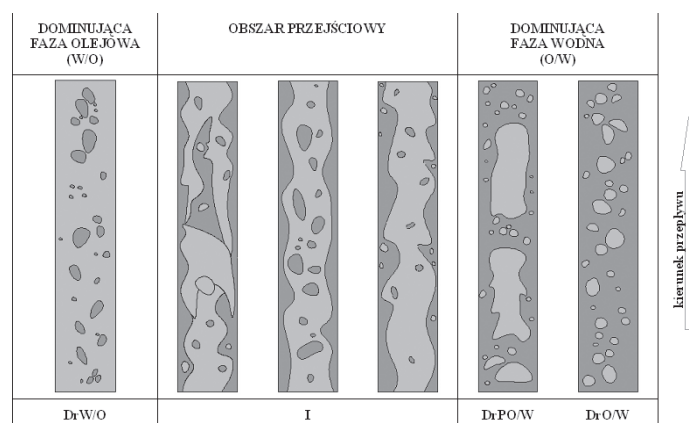
przepływu. Następnie, zamkniętą w odcinku pomiarowym mieszaninę wytłaczano za pomocą sprężonego powietrza do cylindrów miarowych, w których, po grawitacyjnym rozdzieleniu się cieczy, mierzone były objętości wody i oleju.

Straty ciśnienia mierzono metodą polegającą na bezpośrednim pomiarze różnicy ciśnień na początku i końcu odcinka pomiarowego za pomocą elektronicznego przetwornika ciśnienia różnicowego. Otrzymane za pomocą tej metody wyniki poddane zostały następnie analizie.

Wyniki badań i ich analiza

Struktury i mapa przepływu

Wyróżniono i zdefiniowano cztery podstawowe formy wznoszącego, pionowego, współprądowego przepływu mieszaniny wodno-olejowej: jedną z dominującą fazą olejową (krople wody w oleju (DrW/O)), przejściową (inwersję (I)) oraz dwie z dominującą fazą wodną (kropelkowo-korkowy olej w wodzie (DrPO/W) i krople oleju w wodzie (DrO/W)). Schematy struktur przedstawiono na rys. 1.



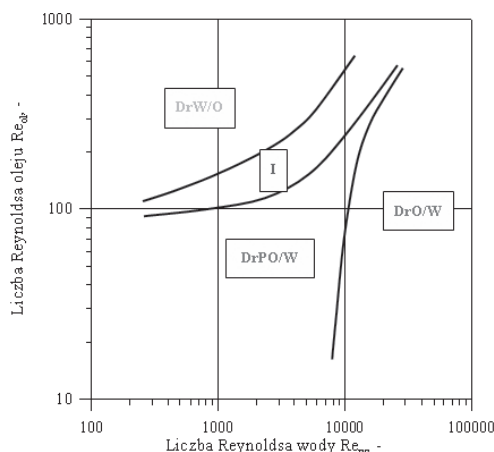
Rys. 1. Struktury wznoszącego, pionowego, współprądowego przepływu mieszaniny wodno-olejowej

Biorąc pod uwagę możliwość uwzględnienia zmiany średnicy rury i właściwości fizycznych ciekłej strugi dwufazowej, zaproponowano mapę przepływu w układzie współrzędnych liczb *Reynoldsa* wody i oleju $Re_w - Re_{ol}$ (Rys. 2), która jednoznacznie wskazuje na obszary mogących pojawić się określonych struktur przepływu, a której zaletą jest możliwość nie tylko określenia charakteru przepływu poszczególnych składników ciekłej mieszaniny, ale również dokonanie rozdziału na przepływ z dominującą fazą olejową i wodną. Mapa ta obowiązuje w szerokim zakresie zmian parametrów przepływu, co również jest istotne dla jej praktycznego wykorzystania.

Zaobserwowane zjawisko inwersji faz zachodziło w obszarze przejściowym, w którym każdy ze składników ciekłej mieszaniny mógł stanowić fazę ciągłą.

Rzeczywiste udziały objętościowe faz

Wskazano, że na wartość rzeczywistego udziału objętościowego oleju, w sposób wyraźny wpływają prędkości pozorne obu faz. Stwierdzono, że stopień zapelnienia kanału olejem R_{ol} , w zależności od warunków przepływu, przyjmuje wartości mniejsze lub większe od jego wlotowego udziału objętościowego ϵ_{ol} , co oznacza, że rzeczywista prędkość



DrW/O – kropki wody w oleju, I – inwersja,
DrPO/W – kropłowo-korkowy olej w wodzie, DrO/W – kropki oleju w wodzie

Rys. 2. Mapa wznoszącego, pionowego, współprądowego przepływu mieszaniny wodno-olejowej

przepływu fazy olejowej może być zarówno większa, jak i mniejsza od rzeczywistej prędkości fazy wodnej. Zauważono, że szczególnie duże rozbieżności pomiędzy tymi wielkościami występują w zakresie zmian wlotowego udziału objętościowego oleju $0,3 < \varepsilon_{ol} < 0,9$. Przy czym, tendencja wzrostu różnicy pomiędzy wartościami stopnia zapelnienia olejem a jego wlotowym udziałem objętościowym zanika dla wartości $\varepsilon_{ol} < 0,3$ oraz $\varepsilon_{ol} > 0,9$. Okazało się również, że wraz ze wzrostem prędkości strugi dwufazowej, następuje wyrównanie wartości rzeczywistego udziału objętościowego oleju względem jego udziału wlotowego, co z kolei oznacza, że względny wskaźnik poślizgu oleju jest równy jedności ($S_{wzgl,ol} = 1$).

Przeprowadzona adaptacja i weryfikacja wytypowanych metod obliczania rzeczywistego udziału objętościowego fazy lżejszej – oleju wykazała, że najkorzystniejszą (blisko 80% udział liczb punktów w zakresie $\pm 30\%$ błędu względnego), a zarazem najbardziej praktyczną, ze względu na możliwość jej wykorzystania, metodą obliczania rzeczywistego udziału objętościowego oleju, jest metoda *Rouhaniego* [5] oparta na modelu *drift-flux* i powszechnie stosowana do obliczania rzeczywistego udziału objętościowego gazu w układach gaz – ciecz

$$R_{ol} = \frac{\frac{x_{ol}}{\rho_{ol}}}{\left[1 + 0,12(1 - x_{ol})\right] \left(\frac{x_{ol}}{\rho_{ol}} + \frac{1 - x_{ol}}{\rho_w}\right) + \frac{1,18(1 - x_{ol})[\check{g}\sigma_w(\rho_w - \rho_{ol})]^{0,25}}{g_{c-c}\rho_w^{0,5}}} \quad (1)$$

O słuszności wyboru tej metody świadczyły również przedstawione w pracy [4] stwierdzenia, których źródłem jest praca *Coddingtona* i *Maciana* [1], że metody oparte na modelu *drift-flux* są stosunkowo proste, jeśli chodzi o ich zastosowanie, dają dobrą zgodność oraz pozwalają na szeroką adaptację dla potrzeb innych rodzajów przepływów, jak właśnie w rozpatrywanym przypadku.

Wartość rzeczywistego udziału objętościowego wody zdecydowano się określać jako uzupełnienie do 1, poprzez relację

$$R_w = 1 - R_{ol} \quad (2)$$

Stwierdzono, że przyjęta metoda obliczania rzeczywistych udziałów objętościowych faz ze względu na swoją uniwersalność i dokładność obliczeń jest godną polecenia w praktyce inżynierskiej.

Straty ciśnienia

Wykazano złożony charakter zmian wartości zarówno całkowitych strat ciśnienia, jak również oporów przepływu. W obu przypadkach zaobserwowano zjawisko redukcji straty ciśnienia, związane ze zmianami struktur przepływu, prowadzącymi ostatecznie do inwersji fazy.

Zaproponowano metodę obliczania jednostkowych całkowitych strat ciśnienia, stanowiących sumę straty ciśnienia wywołanej tarciami (opo-

rów przepływu) – $(\Delta P/\Delta H)_{c-c,R}$ oraz zmianą energii potencjalnej (ciśnienia hydrostatycznego) – $(\Delta P/\Delta H)_{c-c,H}$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta H}\right)_{c-c} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta H}\right)_{c-c,R} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta H}\right)_{c-c,H} \quad (3)$$

W przypadku określenia oporów przepływu zdecydowano się na adaptację modelu *Hapanowicza* [2], przy czym jednostkowe opory przepływu obliczono korzystając z zależności

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta H}\right)_{c-c,R} = \frac{(1 + 1,21 X_{c-c}^{1,38} Fr_{w,o}^{-0,4}) \Delta P_{w,o}}{\Delta H} \quad (4)$$

z kolei wartość jednostkowego ciśnienia hydrostatycznego wyznaczono z zależności

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta H}\right)_{c-c,H} = \rho_{c-c} \check{g} \quad (5)$$

w której gęstość zastępczą układu określono wg zależności

$$\rho_{c-c} = R_{ol} \rho_{ol} + R_w \rho_w \quad (6)$$

Występujące w równaniu (6) wartości rzeczywistych udziałów objętościowych faz wyznaczono w oparciu o zaproponowaną wcześniej metodę *Rouhaniego* [5] (1) w przypadku fazy olejowej, a w przypadku fazy wodnej – równanie (2).

Stwierdzono, że opracowana metoda wyznaczania jednostkowych całkowitych strat ciśnienia we wznoszącym, pionowym, współprądowym przepływie ciekłej strugi dwufazowej zapewnia otrzymanie wysokiej dokładności obliczeń (ponad 90% udział liczb punktów w zakresie $\pm 10\%$ błędu względnego), zatem uznaje się ją za metodę godną polecenia do obliczeń projektowych.

Wnioski

W oparciu o przeprowadzone badania oraz analizę procesu sformułowano następujące wnioski:

1. Zaproponowana systematyka struktur przepływu, zawężona do czterech podstawowych form, jest uproszczeniem umożliwiającym porównanie wyników badań różnych autorów oraz pozwala na wyraźne wyodrębnienie obszaru inwersji faz (Rys. 1).
2. Do wyznaczenia obszarów występowania struktur przepływu zaproponowano mapę przepływu, zbudowaną w układzie $Re_w - Re_{ol}$ (Rys. 2).
3. Do obliczania wartości rzeczywistego udziału objętościowego oleju proponuje się met. *Rouhaniego* [5], opartą na modelu *drift-flux* (1).
4. W obliczeniach inżynierskich, dla wlotowego udziału objętościowego oleju $\varepsilon_{ol} < 0,3$ i $\varepsilon_{ol} > 0,9$ wartości tych można używać zamiast rzeczywistego udziału objętościowego oleju.
5. Obliczanie całkowitych strat ciśnienia (3) proponuje się dokonywać, wykorzystując zaproponowany sposób wyznaczania rzeczywistych udziałów objętościowych faz (1) i (2), z jednoczesnym wykorzystaniem w przypadku strat ciśnienia hydrostatycznego (5) oraz metodę *Hapanowicza* [2] do obliczania oporów przepływu (4).
6. Zaobserwowane zjawiska dotyczące inwersji faz, redukcji straty ciśnienia oraz zmiany fazy dominującej mogą być wykorzystane zarówno przy projektowaniu, jak i eksploatacji urządzeń i aparatów w których zachodzą procesy w układzie dwufazowym ciecz – ciecz. Szczegółowy opis badań eksperymentalnych, uzyskanych wyników i ich pełna analiza zawarte zostały w pracy [3].

LITERATURA

- [1] P. Coddington, R. Macian: Nucl. Eng. Design 215, (2002).
- [2] J. Hapanowicz: Praca doktorska, Inst. Inż. Chem. PAN, Gliwice 1996.
- [3] K. Mydlarz-Gabryk: Praca doktorska, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Procesowej, Opole 2009.
- [4] B. Pendyk, S. Witczak: Inż. Ap. Chem. 45, nr 3, 16 (2006).
- [5] Z. Rouhani: AB Atomenergie, Studsvik, Sweden, 1986.
- [6] L. Troniewski, S. Witczak, J. Trembacz: Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej, Seria: Mechanika z. 65, nr 264 (2000).