

Barbara DYBEK, Jerzy HAPANOWICZ

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Prędkość unoszenia fazy rozproszonej przy wznoszącym przepływie ciekłego układu dyspersyjnego typu o/w

Wprowadzenie

Jednym ze zjawisk występujących podczas współprądowego przepływu układów wielofazowych jest różnica średnich prędkości ich składników, czyli tzw. poślizg. W jego efekcie udział faz, wynikający z relacji ich strumieni na wlocie do rury, jest inny niż rzeczywisty stopień jej wypełnienia każdą z nich. Fakt ten sprawia, że kłopotliwe staje się ustalenie tak podstawowych właściwości układu, jak chociażby jego gęstość.

Poślizg ujawnia się szczególnie wyraźnie w trakcie przepływu układu ciecz-gaz w rurze pionowej i dla takiego właśnie przypadku jest najlepiej przebadany i opisany w literaturze przedmiotu. Ze względu na istotną różnicę pomiędzy gęstością cieczy i gazu, jego rozproszone pęcherze poruszają się względem ściany rury z prędkością wyraźnie odmienną niż strumień ciągłej fazy ciekłej.

Poślizg ujawnia się również podczas przepływu innych układów dwufazowych, w tym układu ciecz – ciecz. Jednak szereg możliwych relacji pomiędzy właściwościami faz w układzie ciecz – ciecz komplikuje opis ich poślizgu. W układzie ciecz – gaz jest on łatwiejszy, bo relacje gęstości i lepkości gazu do cieczy są jednoznacznie mniejsze od jedności, a napięcie powierzchniowe ujawnia tylko jedna z faz.

Analiza literatury przedmiotu pokazuje, że w opisie poślizgu wykorzystywany jest często model *drift-flux* [1]. Model ten został co prawda opracowany dla układu ciecz – gaz, ale podejmowane są próby jego wykorzystania również dla układu ciecz – ciecz. Zgodnie z tym modelem, prędkość ruchu kropli cieczy w_k wypełniających rurę w stopniu R_k wynosi

$$w_k/R_k = Cw_{2F} + w_{k,df}. \quad (1)$$

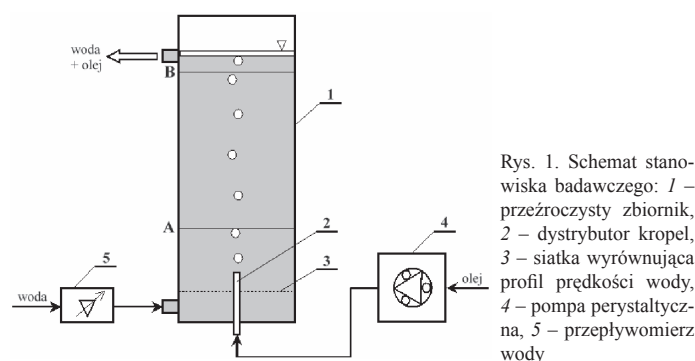
Prędkość układu dwufazowego w_{2F} to średnia prędkość przepływu mieszaniny ciecz – ciecz w rurze. Stała C określana jest mianem parametru rozproszenia, natomiast $w_{k,df}$ to tzw. prędkość dryfu. Oba te parametry są niezmiernie trudne do precyzyjnego określenia na drodze rozważań teoretycznych i dlatego w procedurze ustalania ich wartości korzysta się zazwyczaj z wyników eksperymentów. Ich prowadzenie jest jednak kłopotliwe i stąd niekiedy badacze próbują wykorzystać zależności słuszne dla najlepiej dotychczas przebadanego układu ciecz-gaz w odniesieniu do innych układów dwufazowych. W szczególności próby te dotyczą wyrażenia prędkości dryfu za pomocą zależności funkcyjnej, m.in. dla układu ciecz – ciecz [2].

W stosunku do pęcherzy gazowych, krople oleju (zwłaszcza oleju o dużej lepkości) są bardziej trwałe i słabiej ulegają deformacji, a stąd pomimo identycznego rozmiaru mogą poruszać się z inną niż te pęcherze prędkością. Ze względu na stosunkowo niewielką różnicę gęstości faz w układzie ciecz-ciecz, siła ich wyporu jest mniejsza niż pęcherzy gazowych. Mniejsza prędkość ruchu wywołuje mniejsze siły oporu ośrodka. Natomiast to one właśnie deformują kształt kropli i ostatecznie powodują ich rozpad. Mając powyższe na uwadze, w niniejszej pracy przedstawiono próbę eksperymentalnej oceny słuszności kilku zależności opisujących swobodny ruch cząstek rozproszonych w płynie do wyrażenia prędkości dryfu kropli oleju w unoszącym je strumieniu wody.

Opis badań własnych

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rys. 1. Jego zasadniczy element stanowił wypełniony wodą przezroczysty prostopadłościenny zbiornik – 1 o przekroju 80×150 mm. Woda była ośrodkiem ciągłym, unoszącym krople oleju. Krople te wytwarzano za pośrednictwem pojedynczego dystrybutora rurkowego – 2 o średnicy 10 mm. Dobierając średnicę rurki kierowano się tym, ażeby krople oleju wykazywały sto-

sunkowo duże rozmiary, a prędkość wypływu oleju z otworu dystrybutora była niewielka.



Ruch kropli badano zarówno w wodzie nieruchomej, jak też przepływającej w zbiorniku w kierunku wznoszącym. Dla wyrównania profilu jej prędkości, w dolnej części zbiornika umieszczono metalową siatkę o drobnych oczkach – 3. Prędkość ruchu kropli ustalano mierząc czas konieczny do przebycia przez nie odcinka drogi o długości 400 mm. Odległość tą wyznaczały linie znacznikowe A i B naniesione trwale na ścianie zbiornika. Pomiar prędkości prowadzono w odniesieniu do dziesięciu przypadkowo wybranych kropli, powstających przy danym strumieniu rozpraszanego oleju i określonym strumieniu wody zasilającej zbiornik. Strumień wody kontrolowano przepływomierzem – 5, a jej przepływ miał charakter laminarny, co pozwalało uzyskać prostoliniowy tor ruchu kropli. Maksymalna wartość liczby *Reynoldsa* wody, odpowiadająca jej największemu strumieniowi, wynosiła ok. 1200. Olej do rurki dystrybucyjnej wprowadzano pompą perystaltyczną – 4. Pomiar czasu potrzebnego do utworzenia się określonej liczby kropli, ze znanego strumienia objętości oleju, pozwalał ustalić wprost ich średnią średnicę objętościową d_k . Zmiany strumienia rozpraszanego oleju wywoływały zmienną (aczkolwiek w ograniczonym zakresie) średnicę kropli.

W badaniach wykorzystano wodę i dwa oleje maszynowe, które różniły się znacząco lepkością. Ich gęstość ρ_{ol} , lepkość η_{ol} i napięcie międzyfazowe względem wody σ_{ol-w} oraz gęstość ρ_w i lepkość η_w samej wody, podano w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości olejów i wody w temperaturze badań

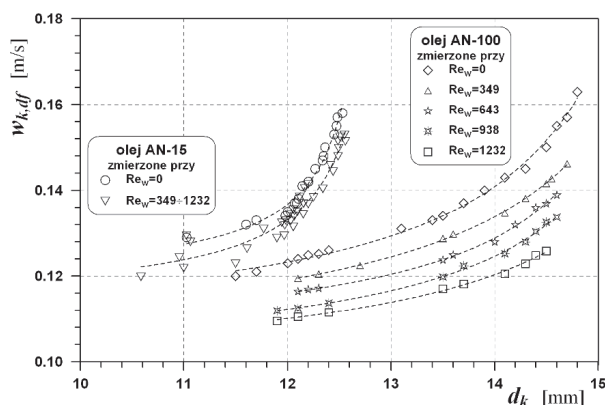
olej	ρ_{ol} , kg/m ³	η_{ol} , mPa·s	σ_{ol-w} , N/m	ρ_w , kg/m ³	η_w , mPa·s
AN-15	855	34	0,0342	998	1
AN-100	872	92	0,0265		

Wylot rurki dystrybucyjnej był umiejscowiony powyżej siatki stabilizującej prędkość wody, jednak w odległości $15d$, poniżej znacznika A. W ten sposób starano się zniwelować ewentualny wpływ prędkości wypływu kropli z dystrybutora na dalszą prędkość ich ruchu. Badania prowadzono w wodzie nieruchomej oraz przy czterech stałych jej strumieniach. Strumień oleju zwiększano do chwili utworzenia przez krople przepływu łańcuchowego.

Ocena wyników badań

W celu dokonania oceny prędkości wznoszenia się kropli oleju w wodzie, od zmierzonych wartości prędkości ich ruchu względem ścian zbiornika odjęto prędkość przepływu samej fazy ciągłej. Dystrybutor oleju umiejscowiony był centralnie w dnie zbiornika, a zatem krople były unoszone przez warstwy wody płynące w jego osi. Korzystając z parabolicznego rozkładu prędkości w przepływie laminarnym, lokalną

prędkość wody w osi zbiornika przyjęto równą podwojonej prędkości średniej. Wyniki ustalonej w ten sposób zmierzonej prędkości swobodnego wznoszenia się kroplek obu olejów, w zależności od ich średnicy d_k , przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wpływ średnicy i właściwości kroplek oleju na prędkość ich swobodnego wznoszenia się w różnych strumieniach wody

Jak z niego wynika, pomimo mniejszej gęstości oleju AN-15 prędkość wznoszenia się jego kroplek okazała się niemal identyczna jak prędkość kroplek oleju AN-100 w nieruchomej wodzie. Tą „osobliwość” należy tłumaczyć różnicą w lepkości obu olejów. Duża lepkość oleju AN-100 powodowała, że powierzchnia jego kropli nie ulegała swobodnym deformacjom. Pomimo ich dużych rozmiarów siły zewnętrzne nie były bowiem zdolne do wywołania ruchu lepkiej cieczy w samej kropli. Ich osiowa deformacja w stosunku do kroplek oleju AN-15 była również mniejsza, a to dlatego, że miały one większą gęstość. Działała na nie zatem mniejsza siła wyporu, mniejsza była ich tendencja do unoszenia się, a tym samym mniejsza siła oporu ośrodka. Krople mniej lepkiego oleju AN-15, który jednocześnie wykazywał mniejszą niż olej AN-100 gęstość, ulegały większej deformacji. Stąd też opory ich ruchu były większe. Zatem zilustrowane na rys. 2 wyniki pomiarów wskazują, że to nie krople cięższego oleju poruszały się zbyt szybko, lecz krople oleju lżejszego zbyt wolno, w porównaniu do ruchu sztywnych cząstek kulistych.

Jak łatwo zauważyć na rys. 2 wpływ ruchu wody na prędkość wznoszenia się kroplek ujawnił się stosunkowo wyraźnie jedynie w odniesieniu do kroplek oleju o większej lepkości i gęstości. Jednak jego napięcie międzyfazowe było mniejsze niż oleju AN-15. W tej sytuacji spadek prędkości wznoszenia się kroplek wraz ze wzrostem prędkości przepływu wody wynikał stąd, że one również ulegały deformacjom swego kształtu. Nie wynikały one jednak z ruchu cieczy wewnątrz kropli, a z niewielkich sił powierzchniowych dążących do utrzymania ich kulistego kształtu.

Ustalone w trakcie badań wartości prędkości dryfu kroplek porównano z wartościami obliczonymi przy wykorzystaniu dostępnych w literaturze przedmiotu metod. Ich liczba jest bardzo ograniczona, stąd też uwzględniono również równania stosowane dla układu ciecz – gaz. Jednym z nich jest zależność podana w pracy [1]. Propozycję jej wykorzystania w układzie ciecz – ciecz zawiera praca [3]. Równanie to dla układu woda – olej przyjmuje postać

$$w_{k,df} = 1,53 \left(\frac{g(\rho_w - \rho_{ol})\sigma_{ol-w}}{\rho_w^2} \right)^{0,25} \quad (2)$$

Postać ta nie uwzględnia średnicy poruszającej się kropli, co wynika stąd, że równanie (2) ustalono przy założeniu iż kropla wykazuje największy stabilny rozmiar, możliwy do osiągnięcia w trakcie jej ruchu w danym środowisku. Na brak wpływu średnicy kropli na jej prędkość ruchu w środowisku ciekłym wskazuje jednak także praca [4]. Brak ten ujawnia się co prawda w obszarze burzliwego opływu kropli przez płyn, ale takie właśnie warunki występowały podczas badań własnych. W pracy [4] przytoczono dwie zależności, które dla ruchu kroplek oleju w wodzie należy zapisać jako

$$w_{k,df} = 6,25 \frac{(\rho_w - \rho_{ol})^{0,28} \eta_w^{0,1} \sigma_{ol-w}^{0,18}}{\rho_w^{0,55}} \quad (3)$$

$$w_{k,df} = \left(\frac{(\rho_w - \rho_{ol})gd_k}{2\rho_{ol}} + \frac{3\sigma_{ol-w}}{\rho_w d_k} \right)^{0,5} \quad (4)$$

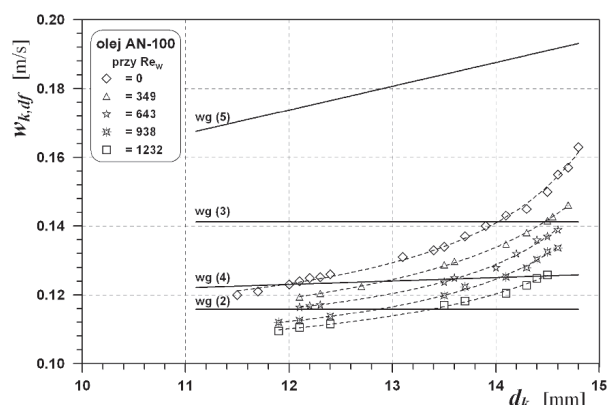
Do obliczeń porównawczych wykorzystano również klasyczne równanie obowiązujące dla kulistej cząstki wznoszącej się w nieruchomej cieczy, czyli dla układu woda – olej

$$w_{k,df} = \left(\frac{4d_k(\rho_w - \rho_{ol})g}{3\rho_w \xi} \right)^{0,5} \quad (5)$$

Przy burzliwym opływie kulistej cząstki stałej współczynnik oporu ośrodka wynosi $\xi = 0,44$. Ustalając jego wartość dla kropli uwzględniono jednak, zgodnie ze wskazówkami podanymi w [4], mnożnik poprawkowy zalecany dla dużych kroplek cieczy, czyli w sumie

$$\xi = 0,44 \frac{3\eta_w + 3\eta_{ol}}{3\eta_w + 2\eta_{ol}} \quad (6)$$

Efekty obliczeń porównawczych w odniesieniu do zmierzonej i obliczonej prędkości dryfu kroplek oleju AN-100 ilustruje rys. 3.



Rys. 3. Porównanie zmierzonych prędkości dryfu kroplek oleju AN-100 z prędkościami obliczonymi wg różnych metod

Wynika z niego, że istnieją rozbieżności pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczonymi wg kolejnych równań. Punkty pomiarowe zdają się jednak wypełniać obszar zawarty pomiędzy równaniami (2) i (5). Dla kroplek o mniejszych rozmiarach bardziej słuszne jest równanie (2). Z kolei prędkości kroplek największych dążą do wartości uzyskanych na podstawie (5). Analogiczny rozkład położenia linii reprezentujących kolejne równania uzyskano również dla kroplek oleju AN-15.

Lepsze poznanie rozważanego zjawiska, a zwłaszcza próba jego bardziej precyzyjnego matematycznego opisu wymaga zgromadzenia bardziej obszernych danych eksperymentalnych. Obecnie prowadzone są stosowne prace w tym zakresie.

Wnioski

Swobodnemu wznoszeniu się dużych kroplek oleju w wodzie towarzyszą efekty które nie występują w trakcie swobodnej sedymentacji ziaren stałych lub swobodnego ruchu pęcherzy gazu.

Prędkość dryfu kroplek unoszonego przez wodę oleju powinna być ustalana raczej wg równań dotyczących tego właśnie przypadku, aczkolwiek brak ich obecnie w literaturze przedmiotu.

Szeroki zakres potencjalnych właściwości fazy olejowej sprawia, że deformacja jej kroplek o identycznej średnicy może być różna. Różne będzie wówczas oddziaływanie na nie sił pochodzących od unoszącej jej fazy wodnej, a tym samym różna prędkość dryfu.

Pomimo oczywistych rozbieżności pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczonymi, wg wykorzystanych metod, na uwagę zasługuje fakt, że wartości te nie różnią się jednak od siebie w sposób zdecydowany i bardzo istotny.

LITERATURA

- [1] N. Zuber, J.A. Findlay: Trans. ASME, J. of Heat Transfer **85**, 453, (1965).
- [2] N.D. Jin i in.: Flow Measurement and Instrumentation **14**, 177, (2003).
- [3] N.D. Jin i in.: Flow Measurement and Instrumentation **14**, 169, (2003).
- [4] R. Koch, A. Noworyta: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej. WNT, Warszawa 1998.