

Jerzy HAPANOWICZ, Adriana SZYDŁOWSKA

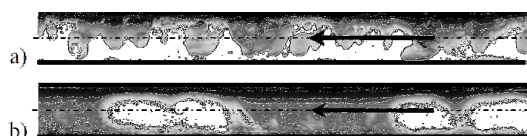
e-mail: j.hapanowicz@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Wpływ warunków przepływu na lepkość układu dyspersyjnego ciecz-ciecz

Wstęp

Układy ciecz-ciecz mogą być charakteryzowane przez bardzo różne właściwości reologiczne. Cechy składników w stanie czystym, udziały objętościowe w mieszaninie, poziom rozproszenia oraz stopień jednorodności rozmiarów kropeł tworzonych przez jedną z faz ciekłych decydują o tym, czy i w jakim stopniu ciepla substancja dwufazowa ujawnia cechy płynu nieniuonowskiego. Trwałe emulsje są najlepiej znanymi układami ciecz-ciecz. Są one najczęściej płynami rozrzedzonymi ścinaniem, ale mogą również wykazywać granicę płynięcia, ujawniać efekty tiksotropii, a nawet lepkością sprężystości. Wszystkie te ich cechy stosunkowo łatwo ustalić na podstawie badań prowadzonych przy wykorzystaniu reometrów rotacyjnych. Jednak pomimo łatwego dostępu do szerokiej gamy tych obecnie bardzo zaawansowanych technicznie przyrządów pomiarowych nie można z nich niestety korzystać w odniesieniu do płynących w rurze nietrwiałych układów dyspersyjnych ciecz-ciecz, których przepływowi towarzyszą tzw. struktury dwufazowe: oleju w wodzie lub wody w oleju [Hapanowicz, 2007]. Przykłady takie przedstawiono na rys. 1.

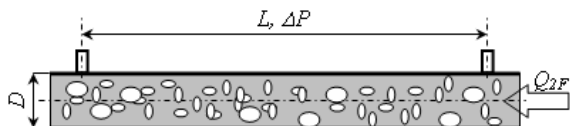


Rys. 1. Przepływ mieszaniny woda-olej w rurze o średnicy 16 mm
a) krople oleju w wodzie, b) korki i krople wody w oleju

Wspomniane struktury powstają jedynie w ściśle określonych warunkach przepływowych, a niestabilne formy tworzone przez fazę rozproszoną mają często znaczne rozmiary. Brak jest jednak możliwości pobrania reprezentatywnej próbki substancji z wnętrza rury i umieszczenia jej w przestrzeni pomiarowej reometru rotacyjnego. Problematiczne staje się nie tylko określenie charakteru reologicznego substancji, ale również ustalenie tak podstawowej jej cechy, jaką jest lepkość. Tymczasem znajomość lepkości jest nieodzowna chociażby do wyznaczania zapotrzebowania na energię do tłoczenia substancji, nie tylko w rurowciągach, ale też w innych aparatach rurowych.

Wyznaczanie tzw. rurowej krzywej płynięcia

W ocenie lepkości płynących w rurze nietrwiałych układów dyspersyjnych ciecz-ciecz skuteczne stają się jedynie badania prowadzone *in-line* przy wykorzystaniu reometru rurowego [Matras, 2003]. Istotą jego budowy i działania przedstawiono na schemacie (Rys. 2). Pomiar oporu przepływu strumienia mieszaniny dwufazowej Q_{2F} w odcinku rury o długości L i średnicy D pozwala określić wartość tworzących się w tej substancji naprężeń stycznych na ścianie τ_w . Z kolei szybkość jej ścinania $\dot{\gamma}$ związana jest ze średnią prędkością przepływu. Zatem możliwe staje się wyznaczenie tzw. rurowej krzywej płynięcia, której przebieg jest wyrażony następującym dwuparametrowym (k' i n') modelem reologicznym:



Rys. 2. Istota budowy i działania reometru rurowego

$$\tau_w = \frac{D \Delta P}{4L} = k' \left(\frac{32 Q_{2F}}{\pi D^3} \right)^{n'} = k' \left(\frac{8w}{D} \right)^{n'} \quad (1)$$

Wynika on z ogólnego równania przepływu ciśnieniowego w rurze [Dziubiński i inni, 2009] i obowiązuje w obszarze laminarnego charakteru przepływu substancji. Charakter ten ustalany jest na podstawie zmodyfikowanej postaci liczby *Reynoldsa*

$$Re' = \frac{w^{2-n'} D^{n'} \rho}{k' 8^{n'-1}} \quad (2)$$

Przyjęcie jej wartości krytycznej na poziomie 2100, pozwala zabezpieczyć warunki konieczne do poprawnej pracy reometru rurowego.

Aczkolwiek lepkość płynu nieniuonowskiego jest parametrem zmiennym, to jednak przyjmując, że rozpatrywana jest dwufazowa substancja reologicznie stabilna w danych warunkach przepływu laminarnego w rurze ($w = \text{idem}$), jej stałą wtedy lepkość odpowiadającą tym właśnie warunkom można rozumieć jako

$$\eta_{2F} = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128L Q_{2F}} = \frac{D^2 \Delta P}{32 L w} \quad (3)$$

Jej wartość wyraża nie tylko tarcie między warstwami płynu, ale ujmuje łącznie również wszelkie inne siły (oddziaływania) powstające zarówno na ścianie rury, jak też pomiędzy elementami samej substancji. Jest to szczególnie istotne w przypadku przepływu nietrwiałej dyspersji typu ciecz-ciecz.

Wykorzystanie reometru rurowego ma również tę zaletę, że badania można prowadzić w konkretnej rurze, zapewniając w niej rzeczywiste warunki samego przepływu. Zatem nie ma potrzeby ekstrakcji modeli reologicznych używanych do opisu wyników pomiarów pochodzących z reometrów rotacyjnych na często zupełnie inny zakres szybkości ścinania, odpowiadający przepływowi płynów w rurowciągach.

Badania doświadczalne

Materiały. Badaniom poddano ciekłe mieszaniny dwufazowe typu O/W, tworzone przez wodę i dwa rodzaje oleju maszynowego. Właściwości faz w stanie czystym podano w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości faz ciekłych w temperaturze 20°C.

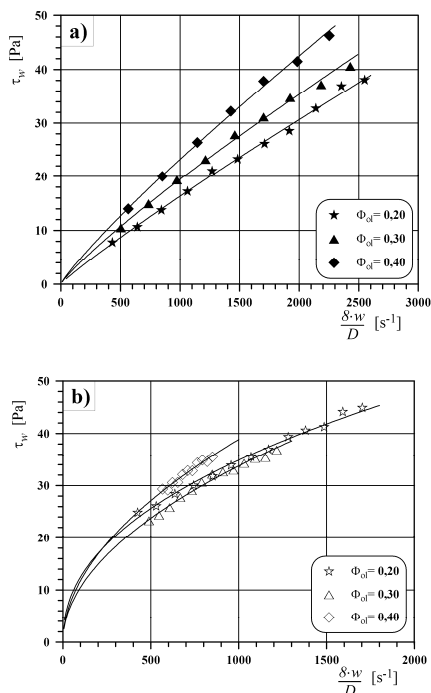
Ciecz	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość, η [Pa·s]
Olej AN15	860	0,027
Olej AN100	883	0,310
Woda	998	0,001

Udział strumienia objętości oleju Φ_{oi} w strumieniu mieszaniny dwufazowej wprowadzanej do układu przepływowego wynosił 0,2, 0,3 i 0,4.

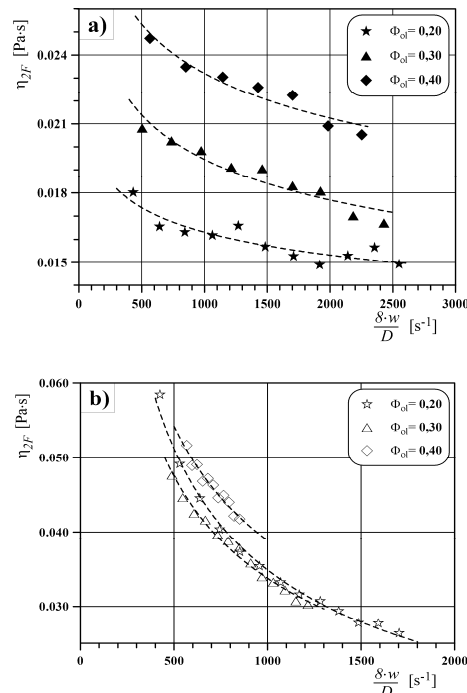
Układ pomiarowy. Kanał pomiarowy reometru miał długość 150 mm i średnicę wewnętrzną 10 mm, która jednocześnie odpowiadała średnicy rury w całej instalacji przepływowej. Zmiana sumarycznego strumienia mieszaniny cieczy (przy danym $\Phi_{oi} = \text{idem}$) wpływała na rodzaj struktury dwufazowej oraz skutkowałą zmianą szybkości ścinania płynącej substancji. Parametrami mierzonymi bezpośrednio były strumienie każdej z faz oraz opór przepływu mieszaniny na długości reometru. Pomiaru prowadzono w temperaturze otoczenia.

Wyniki i ich ocena

Wykreślone na bazie uzyskanych wyników pomiarów rurowe krzywe płynięcia dla dwóch badanych niestabilnych układów olej-woda typu O/W zilustrowano na rys. 3. Wynika z niego, że bardziej nieniuonowski charakter wykazują układy z olejem o większej



Rys. 3. Rurowe krzywe płynięcia niestrawnej dyspersji ciecz-ciecz: a) oleju AN15 w wodzie, b) oleju AN100 w wodzie



Rys. 4. Zmiany lepkości niestrawnej dyspersji ciecz-ciecz płynącej w rurze: a) oleju AN15 w wodzie, b) oleju AN100 w wodzie

lepkości (AN100). Aczkolwiek jego udział, jako fazy rozproszonej w dyspersji cieczy, był taki sam, jak w przypadku mniej lepkiego oleju (AN15), to właśnie ze względu na jego większą lepkość, formy olejowe ulegały w mniejszym stopniu rozpadowi wywołanemu efektem mieszania w przepływie. W konsekwencji układ z olejem AN100 był mniej jednorodny, niż z bardziej rozproszonym olejem AN15. Tymczasem to właśnie jednorodność substancji wpływa w głównej mierze na jej cechy reologiczne. Układami pseudojednorodnymi mogą być jedynie emulsje trwałe i dlatego też, po spełnieniu pewnych dodatkowych warunków, niekiedy wykazują nawet cechy płynu niutonskiego.

W literaturze przedmiotu brak równań opisujących lepkość niestrawnych mieszanin ciecz-ciecz, a zwłaszcza układów dyspersyjnych płynących w rurze. Dostępne są głównie metody obliczeniowe słuszne dla układów jednorodnych. Jedną z propozycji wynika z założeń modelu homogenicznego układu dwufazowego i ma postać [Orzechowski, 1990]

$$\eta_{2F} = \Phi_{ol} \eta_{ol} + (1 - \Phi_{ol}) \eta_w \quad (4)$$

Chociaż nie ma ona ścisłego teoretycznego uzasadnienia, to jednak ze względu na swoją prostotę chętnie jest stosowana w praktyce do szybkiego szacowania oporów przepływu mieszaniny dwufazowej w instalacjach lub aparatach procesowych.

Znane są również bardziej złożone zależności, które lepkość układu ciecz-ciecz uzależniają od jego typu i stanowią rozwinięcie klasycznego równania *Einsteina* wyrażającego lepkość rozcieńczonych układów dyspersyjnych. Przykładem może tu być przywoływana często np. w pracy [Pal, 2000] zależność *Taylor*a dla układu ciecz-ciecz typu O/W w postaci

$$\frac{\eta_{2F}}{\eta_w} = 1 + \frac{5\kappa + 2}{2(\kappa + 1)} \Phi_{ol} \quad ; \quad \kappa = \frac{\eta_{ol}}{\eta_w} \quad (5)$$

Korzystając z równań (4) i (5) obliczono lepkość układów ciecz-ciecz, dla których wykonano badania reometrem rurowym. Uzyskane wyniki zawarto w tab. 2 i skonfrontowano z wynikami pomiarów na rys. 4.

Tab. 2. Obliczone wartości lepkości układu ciecz-ciecz

Układ dyspersyjny typu O/W	η_{2F} [Pa·s]					
	wg zal. (4)			wg zal. (5)		
	$\Phi_{ol} = 0,2$	$\Phi_{ol} = 0,3$	$\Phi_{ol} = 0,4$	$\Phi_{ol} = 0,2$	$\Phi_{ol} = 0,3$	$\Phi_{ol} = 0,4$
Olej AN15 - woda	0,0062	0,0088	0,0114	0,00149	0,00173	0,00198
Olej AN100 - woda	0,0628	0,0937	0,1246	0,00150	0,00175	0,00200

W pierwszej kolejności należy zauważyć, że badane substancje miały cechy płynów rozrzedzanych ścinaniem, przy czym zmiana ich lepkości ujawniła się w większym stopniu w przypadku układu z olejem o większej lepkości, co potwierdza rys. 3b.

Ponadto okazuje się, że lepkość tego właśnie układu wcale nie rosła ze wzrostem udziału fazy olejowej (Rys. 4b). Przyczyn takiego stanu rzeczy należy upatrywać w specyfice towarzyszących przepływowi, zmieniających się struktur dwufazowych.

Najważniejszy jednak wydaje się fakt, że wartości zmierzonej lepkości (aczkolwiek zmiennej) są zupełnie inne od obliczonych wg zależności (4) i (5). Tym samym okazuje się, że sposób obliczania lepkości płynącego w rurze układu dyspersyjnego ciecz-ciecz powinien być zupełnie inny, niż proponowany dla emulsji trwałych.

Jedynie eksperymenty prowadzone przy wykorzystaniu reometru rurowego dostarczyć mogą stosownych danych do jego opracowania.

Wnioski

Lepkość płynących niestabilnych układów wodno-olejowych może być określona w sposób właściwy jedynie za pomocą reometru rurowego. Na jej zmieniającą się wartość mają wpływ zjawiska wynikające z hydrodynamiki przepływu dwufazowego.

Obliczanie lepkości niestrawnej dyspersji cieczy na podstawie równań słusznych dla emulsji trwałych może prowadzić do znacznych błędów. Jednak opracowanie skutecznych w tym zakresie metod wymaga prowadzenia dalszych szczegółowych prac badawczych.

LITERATURA

- Dziubiński M., Kiliański T., Sęk J., (2009). *Podstawy reologii i reometrii płynów*. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź
- Hapanowicz J., (2007). *Przepływy ciekłych układów dyspersyjnych*. Studia i Monografie, z. 205. Wyd. Politechniki Opolskiej, Opole
- Matras Z., (2003). Reometr kapilarno-rurowy. *Inż. Chem. Proc.*, 24(1), 139-149
- Orzechowski Z., (1990). *Przepływy dwufazowe: jednowymiarowe, ustalone, adiabatyczne*. PWN, Warszawa
- Pal R., (2000). Viscosity-concentration equation for emulsions of nearly spherical droplets. *J. Coll. Interface Sci.*, 231, 168. DOI: 10.1006/jcis.2000.7133