

Zbigniew MATRAS

e-mail: zmatras@mech.pk.edu.pl

Instytut Inżynierii Ciepłej i Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Jakościowa i ilościowa analiza zjawiska redukcji oporów przepływu za pomocą dodatków surfaktantów

Wstęp

Dodatek surfaktanta może spowodować kilkudziesięcioprocentowe zmniejszenie zużycia energii potrzebnej do pokonania oporów tarcia wewnętrznego, a co za tym idzie obniżyć całkowite koszty eksploatacji rurociągów lub też przyczynić się do zwiększenia strumienia objętości płynu bez wzrostu zużycia energii przez pompy [Ohlendorf i in., 1984; Gasljevic i Matthys, 1993; Takeuchi, 2011].

Niektóre surfaktanty zachowują swoją skuteczność w wysokich temperaturach [Takeuchi, 2011]. Szczególnie duże korzyści może przynieść wykorzystanie tej właściwości w sieciach ciepłowniczych. W pewnych przypadkach niekorzystna może okazać się jednak – towarzysząca zjawisku redukcji za pomocą dodatków surfaktantów (podobnie jak w przypadku zjawiska *Tomsa*) – zmniejszona wymiana ciepła, w stosunku do wymiany, jaka występuje przy przepływie rozpuszczalnika [Myska i in., 1996]. Z przeprowadzonej w pracy [Gasljevic i Matthys, 1993] analizy wynika jednak, że zastosowanie dodatków środków powierzchniowo czynnych w systemach grzewczych i chłodniczych budynków może okazać się skuteczne i prowadzić do znacznych oszczędności zapotrzebowania mocy (rzędu 50%) przy pompowaniu, przy niewielkich kosztach wdrożenia.

Dodatki surfaktantów nie wpływają niekorzystnie na pracę pomp odśrodkowych i mogą osłabiać niekorzystne skutki kawitacji [Gasljevic i Matthys, 1993]. Dodatkową zaletą surfaktantów jest również to, że posiadają własności bakteriobójcze, antykorozyjne i myjące [Gasljevic i Matthys, 1993; Kropie i Lipsus, 2009].

W pracy przedstawiono rezultaty badań doświadczalnych wpływu dodatków surfaktanta CTAB i soli NaSal na obniżenie strat ciśnienia przy przepływie wody w rurach. Zaproponowano równanie opisujące zmodyfikowaną krzywą oporów w stabilnej strefie przejściowej.

Analiza i interpretacja zjawiska redukcji oporów przepływu za pomocą dodatków surfaktantów

Przedmiotem szczegółowych badań reologicznych i oporów przepływu były wodne roztwory kationowych substancji powierzchniowo czynnych: bromku heksadecylotrójmetylamoniowego (CTAB) z dodatkiem salicylanu sodu (NaSal) o różnych udziałach masowych. Do badania oporów przepływu oraz identyfikacji reologicznej roztworów zastosowano reometr kapilarno-rurowy własnej konstrukcji [Matras, 2003]. Stwierdzono, że krzywe płynięcia wszystkich roztworów opisać można prawem *Ostwalda-de Waele*. Z analizy otrzymanych danych doświadczalnych wynika, że w miarę wzrostu stężenia roztworu, bez względu na dodawaną substancję, wartość wskaźnika płynięcia n maleje, co świadczy o narastających, nienewtonowskich cechach roztworu. Wzrost udziału masowego dowolnego składnika roztworu powoduje wzrost wartości stałej konsystencji.

Badania przeprowadzono w temperaturze 20°C. Zwracano uwagę na to, aby różnica temperatur na wlocie i wylocie do rurki nie przekraczała ±1°C. W celu lepszej interpretacji wpływu dodatków surfaktantów i soli na opory przepływu, uzyskane za pomocą reometru kapilarno-rurowego [Matras, 2003], dane doświadczalne przedstawiono w układzie zmodyfikowanych liczb kryterialnych Re_M , c_{fM} , opisanych równaniami [Matras, 1984]:

$$Re_M = \frac{D^n u_m^{2-n} \rho}{K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n 8^{n-1} \left[\frac{2(n+1)}{3n+1} \right]^{-2.5}} \quad (1)$$

$$c_{fM} = \frac{D \Delta P}{2 \rho u_m^2 L} \left[\frac{2(n+1)}{3n+1} \right]^{2.5} \quad (2)$$

gdzie: D – średnica rury, K – stała konsystencji, L – długość rury, n – wskaźnik płynięcia, ΔP – strata ciśnienia, u_m – średnia prędkość przepływu, ρ – gęstość.

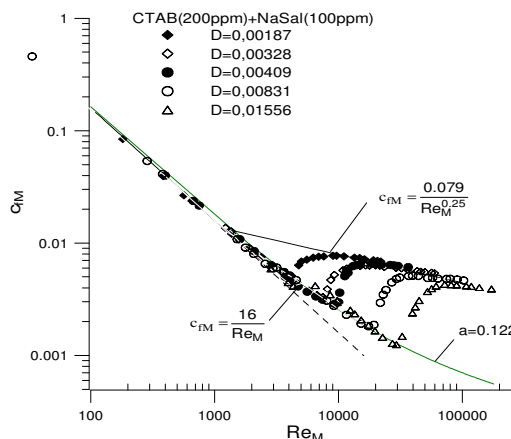
Ważnym punktem wyjściowym analizy jest stwierdzony eksperymentalnie fakt, że dodanie soli NaSal do roztworu CTAB – w wyniku, czego tworzy się roztwór micelarny - wywołuje niezwykle efektywną redukcję oporów przepływu. Dotyczy to zwłaszcza wydłużonej, stabilnej strefy przejściowej (Rys. 1), tj. $Re_{M1} < Re_M < Re_{M2}$, gdzie utrata stabilności ruchu laminarnego narasta bardzo łagodnie w miarę wzrostu liczby Reynoldsa. Względna redukcja oporów w tej strefie, począwszy od $Re_M \approx 1100$, jest największa. Zgodnie z wynikami badań doświadczalnych, po przekroczeniu pewnej krytycznej wartości liczby Re_{M2} , przy której wartość współczynnika oporów c_{fM} osiąga minimum – dla danej średnicy rury – (Rys. 1), następuje gwałtowny zanik zjawiska redukcji oporów. Z kolei po przekroczeniu Re_{M3} , gdzie c_{fM} osiąga lokalne maksimum dla tej średnicy, ciecz zachowuje się jak klasyczna reostabilna ciecz nienewtonowska.

Z analizy wybranego, przykładowego rys. 1. wynika, że wielkość średnicy przewodu nie wpływa w istotny sposób na przebieg krzywej oporów w stabilnej strefie przejściowej. Z drugiej strony, w miarę wzrostu średnicy rury, rosną wartości zarówno Re_{M2} jak i Re_{M3} oraz następuje wyraźne wydłużenie stabilnej strefy przejściowej. W przypadku wodnego roztworu CTAB (200ppm) dodatkiem NaSal (100ppm), krytyczne wartości Re_{M2} odpowiadające średnicom zawierającym się w przedziale 0,00187 ÷ 0,01556 m, wzrastają od 4000 do 30000. Podobnie wartości Re_{M3} , w tym samym przedziale zmienności średnic, wzrastają od 9 000 do 800 000.

Zjawisko redukcji oporów występuje jedynie wówczas, gdy wprowadzone do roztworu cząsteczki substancji powierzchniowo czynnej połączą się, tworząc micelle o kształcie pręcikowym.

Zdaniem autora, w zakresie laminarnym pręcikowe micelle układają się zgodnie z zasadą *minimum oporu*, tzn. równolegle do głównego kierunku przepływu. Opory przepływu w tej strefie można wyznaczać z takich samych zależności, jakie obowiązują w przypadku przepływu reostabilnych cieczy nienewtonowskich.

Przekroczenie krytycznej wartości liczby *Reynoldsa* $Re_{M1} \approx 1100$ powoduje pojawienie się zaburzeń laminarnej formy przepływu.



Rys. 1. Wpływ średnicy rury na wielkość i zasięg redukcji oporów wodnego roztworu CTAB (200ppm) z dodatkiem NaSal (100ppm)

Powstające zaburzenia są tłumione przez ułożone w kierunku przepływu micelle o kształcie pręcikowym. Opory przepływu w tym zakresie są tylko trochę większe od oporów przepływu laminarnego i dużo mniejsze od oporów przepływu turbulentnego. Największa redukcja oporów przepływu za pomocą dodatków surfaktantów ma miejsce w wydłużonej, w kierunku większych liczb Reynoldsa, stabilnej strefie przejściowej między zakresem laminarnym a zakresem turbulentnym. Wraz ze wzrostem niejednorodności mieszaniny, której miarą jest liczba *Knudsen*, następuje zaburzenie klasycznego ruchu laminarnego. Pod wpływem przyłożonych naprężeń stycznych, micelle ulegają obrotom wywołując lokalne wiry w polu przepływu. Intensywność tej mikro turbulencji jest tym większa im większa jest niejednorodność układu, stężenie zawieszony lub rozpuszczonej substancji, oraz średni wymiar wprowadzonych do rozpuszczalnika micel pręcikowych. Czynnikiem, który należy brać pod uwagę jest również ich konfiguracja i sprężystość.

Przekroczenie drugiej krytycznej wartości liczby *Reynoldsa* Re_{M2} , charakteryzującej warunki przepływu, przy których wartość współczynnika oporów c_{IM} jest minimalna, powoduje utratę, przez pręcikowe micelle, ułożenia zgodnego z kierunkiem przepływu. W niestabilnej strefie przejściowej $Re_{Mkr2} < Re_M < Re_{Mkr3}$ następuje gwałtowny zanik zjawiska redukcji oporów. Micelle związają się wówczas w kłębki, których kształt jest zbliżony do zwitków kulistych. Powoduje to nagły wzrost oporów i zanik zjawiska redukcji oporów. Po przekroczeniu krytycznej liczby *Reynoldsa* Re_{Mkr3} ciecz zachowuje się jak zwykła, reostabilna ciecz nienewtonowska; opory przepływu roztworów micelarnych w zakresie turbulentnym mogą być wyznaczone za pomocą zmodyfikowanego wzoru *Blasiusa*. Po zmniejszeniu liczby *Reynoldsa* do wartości $Re_M < Re_{M1}$ następuje rozwinięcie się kłębków i ułożenie się micel pręcikowych równolegle do głównej kierunku przepływu. Zjawisko degradacji struktury wewnętrznej roztworu micelarnego jest, zatem odwracalne.

Te oraz inne obserwacje skłaniają autora do uzasadnionego przypuszczenia, że w granicznym przypadku niejednorodnego pseudonewtonowskiego roztworu micelarnego krzywa oporów może być opisana za pomocą równania

$$c_{IM} = \frac{16}{Re_M} + \frac{0,079}{Re_M^{0,25}} a \quad (3)$$

Z analizy postaci równania (3) wynika, że reprezentuje ono jednoparametrową rodzinę krzywych oporów roztworów micelarnych, gdzie wartość parametru a zależy od udziału masowego surfaktanta w roztworze, jego struktury wewnętrznej oraz stopnia niejednorodności cieczy.

Na rys. 2 pokazano wpływ stężenia roztworu, na kształt i położenie krzywej oporów w stabilnej strefie przejściowej. Wyznacza ona charakterystyczny przebieg krzywych oporów, typowy dla roztworów substancji powierzchniowo czynnych z dodatkiem soli.

Łatwo zauważyć, że wraz ze wzrostem stężenia roztworu maleje wartość stałej a . Towarzyszy temu zmniejszenie się wartości współ-

czynnika oporów przy stałej wartości liczby *Reynoldsa*, a zatem nasilenia się redukcji oporów. W ogólnym przypadku, w miarę wzrostu homogeniczności reostabilnego roztworu w zakresie laminarnym, drugi człon w równaniu (3) odgrywa coraz mniejszą rolę. Przy założeniu doskonałej jednorodności cieczy $a \rightarrow 0$. Wtedy krzywa oporów, w tym zakresie, opisana jest asymptotą *Fanninga*

$$c_{IM} = \frac{16}{Re_M} \quad (4)$$

Podobnie w zakresie przepływu turbulentnego pierwszy człon równania (3) jest pomijalnie mały w porównaniu z członem drugim i w krańcowym przypadku płynu jednorodnego krzywa oporów sprowadza się do klasycznej krzywej *Blasiusa*

$$c_{IM} = \frac{0,079}{Re_M^{0,25}} \quad (5)$$

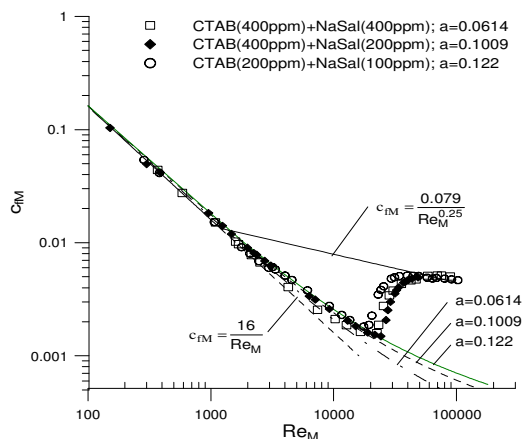
Wnioski

Wyniki badań doświadczalnych oporów przepływu i analiza krzywych oporów $c_{IM} = f(Re_M)$ badanych roztworów, w układzie zmodyfikowanych liczb kryterialnych, daje podstawę do sformułowania następujących wniosków:

- Poniżej $Re_M \approx 1100$, tj. w zakresie laminarnym, opory przepływu roztworów micelarnych – niezależnie od własności fizycznych i reologicznych roztworu – opisuje równanie (4).
- W przedziale liczb *Reynoldsa* $Re_{Mkr1} < Re_M < Re_{Mkr3}$ ma miejsce anormalnie wydłużony – w stosunku do czysto lepkiej cieczy nienewtonowskich – zakres przejściowy. W obrębie zakresu przejściowego można wyróżnić dwie strefy: strefę o stosunkowo dużej stabilności oraz strefę niestabilną.
- W stabilnej strefie przejściowej ($Re_{Mkr1} < Re_M < Re_{Mkr2}$) opory przepływu są znacznie mniejsze od oporów przepływu turbulentnego i nieco większe od oporów przy przepływie laminarnym. Spektakularna redukcja oporów w tej strefie stwarza potencjalne możliwości uzyskania poważnych oszczędności przez istotne obniżenie zapotrzebowanie na moc zestawów pompowych, dzięki którym realizowany jest transport cieczy na duże odległości. Krzywą oporów w tym zakresie opisać można za pomocą zaproponowanego w pracy równania (3).
- W miarę wzrostu średnicy rury rośnie wartość Re_{Mkr2} i następuje wyraźne wydłużenie stabilnej strefy przejściowej.
- W niestabilnej strefie przejściowej $Re_{Mkr2} < Re_M < Re_{Mkr3}$ następuje gwałtowny zanik zjawiska redukcji oporów.
- Po przekroczeniu krytycznej liczby *Reynoldsa* Re_{Mkr3} ciecz zachowuje się jak zwykła, reostabilna ciecz nienewtonowska; opory przepływu roztworów micelarnych w zakresie turbulentnym mogą być wyznaczone za pomocą zmodyfikowanego wzoru *Blasiusa* (5).

LITERATURA

- Gasljevic K., Matthys E.F., 1993. On saving pumping power in hydronic distribution systems through the use of drag-reducing additives, *Energy and Buildings*, **20**, 45-56. DOI: 10.1016/0378-7788(93)90037-U
- Krope A, Lipus L.C., 2009. Drag Reducing surfactants for district heating, *Appl. Therm. Eng.*, **30**, 833-838 DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.12.012
- Matras Z., 1984. *Przepływ cieczy Tomsa w przewodach kołowych*. Wyd. Pol. Krakowskiej, Monografia 29.
- Matras Z., 2003. Reometr kapilarno-rurowy. *Inż. Chem. Proc.* **24**, 239-148
- Myska J., Li X., Zakin J.L., 1996. Viscoelasticity of a surfactant and its drag reduction ability. *Appl. Sci. Res.*, **5**, 4, 29-300. DOI: 10.1007/BF00856637
- Ohlendorf D., Interhal W., Hoffmann H., 1984. *Drag reducing surfactant system. Concentration and temperature effects, flow characteristics*, IX International Congress on Rheology, Mexico, **2**, 41-49
- Takeuchi H., 2011. Demonstration test of energy conservation of central air conditioning system at Sapporo City Office Building. Reduction of pump power by flow drag reduction using surfactant. *Synthesiology*, **4**, 3, 132-139



Rys. 2. Zmodyfikowane krzywe oporów wodnych roztworów CTAB i NaSal o różnych udziałach masowych