

ZBIGNIEW MATRAS

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Analiza przejściowej strefy przepływu roztworów polimerowo-micelarnych w rurach

Wprowadzenie

Pierwsze próby zbadania wpływu jednoczesnego dodania polimeru i substancji powierzchniowo czynnej (SPC) do wody na opory przepływu roztworu polimerowo-micelnego podjęto w pracach [1, 2]. Stwierdzono zasadnicze różnice analizowanego zjawiska redukcji oporów w porównaniu ze stosunkowo dobrze poznanymi zjawiskami redukcji oporów za pomocą dodatków polimerowych (zjawisko *Tomsa*) lub micelarnych (zjawisko *White'a*). W literaturze przedmiotu brak jest opracowań, których celem byłaby ilościowa i jakościowa analiza reologicznego zachowania się takiego wieloskładnikowego roztworu podczas jego przepływu w rurach. Nieznany jest również mechanizm zjawiska. Koncentrowano się dotąd głównie na aspektach fizykochemicznych wzajemnego oddziaływania polimerów z SPC w roztworach [3–6]. Brak jest natomiast informacji odnośnie do wpływu jednoczesnego dodania wielkocząsteczkowego polimeru i substancji powierzchniowo czynnej oraz wpływu złożonych reologicznie własności takich cieczy i ewidentnie nienewtonowskiego ich charakter na wielkość i zasięg redukcji oporów.

Analiza danych doświadczalnych

Celem przeprowadzenia ilościowo-jakościowej analizy wyników badań doświadczalnych dotyczących przejściowego zakresu przepływu cieczy polimerowo-micelarnych w rurach przedstawiono je w układzie pseudoreostabilnych liczb kryterialnych [7]:

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

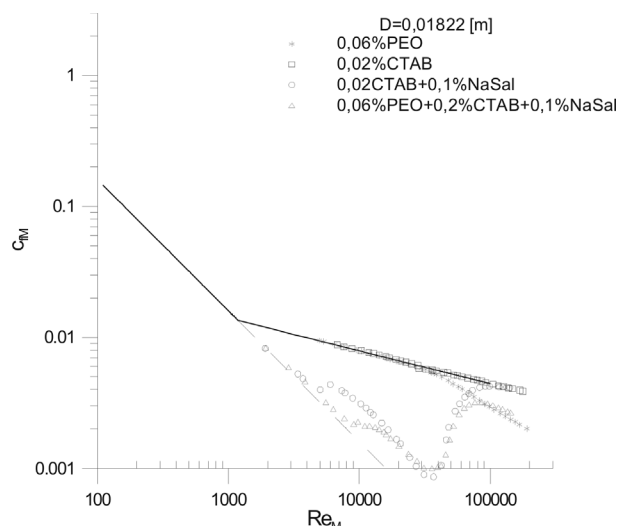
$$C_{fM} = \frac{D \Delta P}{\rho u_m^2} \left[\frac{2(n+1)}{3n+1} \right]^{2.5} \quad (2)$$

gdzie:

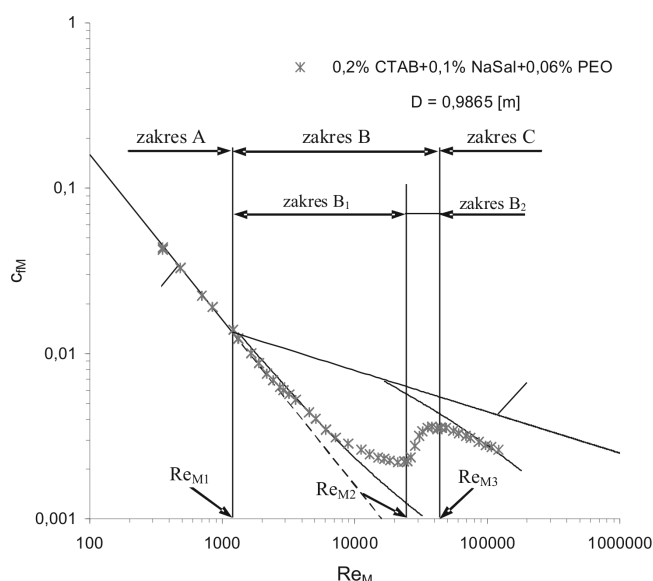
- K i n – stałe w modelu *Ostwald-de Waele*,
- D – średnica rury,
- u_m – średnia prędkość przepływu,
- $\Delta P/L$ – spadek ciśnienia,
- ρ – gęstość roztworu.

Jak wiadomo [7] krzywe oporów reostabilnych cieczy nienewtonowskich w tak zdefiniowanym układzie zmiennych bezwymiarowych sprowadzają się do pojedynczej krzywej w całym zakresie zmodyfikowanych liczb *Reynoldsa* (1), identycznej z klasyczną, newtonowską krzywą, opisaną w zakresie laminarnym równaniem *Fanninga* i w zakresie turbulentnym równaniem *Blasiusa*. Wybór takiego układu współrzęd-

nych podyktowany był ponadto tym, że znacznie ułatwił rozpoznanie i opis charakterystycznych dla zjawiska stref przepływu. Dlatego m.in. każde odchylenie krzywej oporów wykazującej anormalnie zmniejszone opory od pseudoreostabilnej krzywej *Blasiusa* pozwala na jednoznaczną identyfikację wpływu dodatków polimerowych, SPC i soli na zakres i zasięg badanego zjawiska. Do badań wykorzystano reometr kapilarno-rurowy własnej konstrukcji opisany szczegółowo w pracy [8]. Reprezentatywne wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych przedstawiono na rys. 1 i 2 gdzie zaznaczono



Rys. 1. Wpływ rodzaju dodawanej substancji na redukcję oporów przepływu roztworów w rurze



Rys. 2. Charakterystyczne strefy przepływu cieczy polimerowo-micelarnych w rurze

charakterystyczne strefy krzywej oporów przepływu roztworów o różnym składzie chemicznym. Celem ułatwienia dyskusji wyników, roztwory o różnym składzie dodatków oznaczono następującymi, umownymi symbolami:

roztwór PEO (polimerowy) – P,
 CTAB (roztwór substancji powierzchniowo czynnej) – C,
 CTAB + PEO (roztwór substancji powierzchniowo czynnej z dodatkiem polimeru) – C,
 CTAB + NaSal (roztwór micelarny) – CN,
 CTAB + NaSal + PEO (roztwór polimerowo-micelarny) – CNP.

Z analizy uzyskanych danych doświadczalnych wynika, że dodatek czystej substancji powierzchniowo czynnej nie wywołuje żadnej anormalnej deformacji klasycznej krzywej oporów w całym zakresie przepływu. Dodatek CTAB nie wywołuje redukcji oporów w zakresie turbulentnym oraz nie prowadzi do zmiany newtonowskiego zachowania się roztworu C w sensie reologicznym. Świadczą o tym typowo newtonowskie krzywe oporów, które, bez względu na wielkość średnicy rury, opisane są w zakresie laminarnym równaniem *Fanninga* i w zakresie turbulentnym równaniem *Blasiusa*.

Dopiero dodanie soli NaSal do roztworu CTAB w wyniku, czego tworzy się roztwór typu CN, wywołuje bardzo efektywną redukcję oporów przepływu. Warto przy tym zauważyć, że utrata stabilności ruchu laminarnego narasta bardzo łagodnie w miarę wzrostu liczby *Reynoldsa*. W tym zakresie, tj. $Re_{M1} < Re_M < Re_{M2}$, który nazwać można „wydłużoną, stabilną strefą przejściową”, względna redukcja oporów jest największa. Po przekroczeniu pewnej krytycznej wartości liczby Re_{M2} pojawia się niestabilna strefa przejściowa, w której następuje gwałtowny zanik zjawiska redukcji oporów, natomiast powyżej Re_{M3} ciecz zachowuje się jak klasyczna reostabilna ciecz nienewtonowska. Spektakularna redukcja oporów wywołana obecnością micel pręcikowych w roztworze CN jest z reguły większa od tej, obserwowanej w przypadku dodania wielkocząsteczkowego polimeru do rozpuszczalnika. Dodanie do rozpuszczalnika polimeru wywołuje powstanie zjawiska *Tomsa*. Zasadnicza różnica między roztworami typu CN i P polega na tym, że wyraźne zmniejszenie oporów obserwuje się w zakresie turbulentnym, tj. po przekroczeniu Re_{M3} . Zasięg i charakter stabilnej strefy przejściowej $Re_{M1} << Re_M < Re_{M2}$ jest w tym przypadku zbliżony do typowego dla cieczy reostabilnych przedziału zmienności pseudonewtonowskiej liczby *Reynoldsa* (1), z tym, że wartość Re_{M2} rośnie wraz ze wzrostem stężenia polimeru i lepkości roztworu. Analogiczny, charakterystyczny dla zjawiska *Tomsa*, przebieg krzywej oporów ma miejsce w przypadku roztworów CP. Dodanie polimeru PEO do roztworu substancji powierzchniowo czynnej CTAB wywołuje identyczny, w sensie jakościowym i ilościowym, efekt obniżenia strat ciśnienia w zakresie przepływu turbulentnego jak w przypadku wodnych roztworów polimeru.

Szczególnie interesująco zachowują się wieloskładnikowe roztwory utworzone w wyniku jednoczesnego dodania do roz-

puszczalnika dodatku substancji powierzchniowo czynnej, soli i wielkocząsteczkowego polimeru CNP. Stwierdzono, że dodanie polimeru do roztworu CN wzmaga zjawisko redukcji oporów, charakterystyczne dla roztworów CN, nie tylko w strefie przejściowej $Re_{M1} < Re_M < Re_{M2}$, ale szczególnie w zakresie turbulentnym, tj. po przekroczeniu Re_{M3} . Daje się również zauważyć wyraźny wzrost wartości krytycznych liczb *Reynoldsa* Re_{M2} i Re_{M3} w porównaniu z odpowiednimi wartościami tych liczb w przypadku roztworów CN. Powstałe w wyniku zmieszania roztworu polimerowego z roztworem micelarnym agregaty polimerowo-micelarne powodują nasilenie się i istotne rozszerzenie anormalnej redukcji oporów, zwłaszcza w strefie przejściowej i turbulentnym zakresie przepływu tego rodzaju cieczy w rurach. Na rys. 2 zaznaczono charakterystyczne dla roztworów CNP zakresy przepływu. Ich zasięg wyznaczony jest granicznymi, krytycznymi wartościami Re_{M1} , Re_{M2} i Re_{M3} . Na podstawie przeprowadzonych, wielowariantowych badań oporów przepływu roztworów o różnym składzie należy stwierdzić, że wartości tych liczb są zmienne i zależą od rodzaju i wzajemnego udziału poszczególnych komponentów w roztworze, nienewtonowskich i lepkościowych właściwości roztworu, struktury agregatów polimerowo-micelarnych oraz średnicy wewnętrznej rury, w której ma miejsce przepływ.

Wnioski

W strefie przejściowej przepływu złożonych reologicznie roztworów polimerowo-micelarnych wyróżnić można cztery podstrefy: 1. stabilną, w której o wielkości i zasięgu redukcji oporów decyduje dodatek substancji powierzchniowo czynnej z solą, 2. niestabilną podstrefę gwałtownego wzrostu oporów przepływu oraz 3. turbulentną podstrefę redukcji oporów, gdzie na jej zasięg i stopień zmniejszenia oporów ma wpływ głównie dodatek polimerowy. Czwartą podstrefę wyznacza krzywa oporów zmierzająca asymptotycznie wraz ze wzrostem liczby *Reynoldsa* do klasycznej krzywej *Blasiusa*, gdzie o jej przebiegu decyduje mechaniczna degradacja struktury utworzonej przez agregaty polimerowo-micelarne.

LITERATURA

1. Z. Matras, T. Malcher: Czasopismo Techniczne, Zeszyt 5-M, 137 (2001).
2. Z. Matras, S. Walczak: Systems, 11, 1/2, 442 (2006).
3. Z. Hou, Z. Li, H. Wang: Colloid Polym. Sci., 277, 1011 (1999).
4. S. Panmai, R.K. Prud'homme, D.G. Peiffer, S. Jockusch, N.J. Turro: Langmuir, 18, 3860 (2002).
5. F.M. Witte, J.B.F.N. Engberts: Colloid Surfaces, 36, 417 (1989).
6. R.H. Colby: Rheology of polymer / surfactant aqueous mixtures, Royal Society of Chemistry and British Society of Rheology Joint Research Conference, Durham, UK, Book of Abstract (2000).
7. Z. Matras: Przepływ cieczy Tomsa w przewodach kołowych. Politechnika Krakowska, Monografia 29 (1984).
8. Z. Matras: Inż. Chem. Proces., 24, 139 (2003).