

Adrian MRÓWCZYŃSKI, Lubomira BRONIARZ-PRESS, Marcin JAGODZIŃSKI

e-mail: mirka@box43.pl

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Badanie spływu filmowego roztworów polimerów

Wstęp

Filmowy spływ cieczy ma charakter bardzo złożony. W najogólniejszym przypadku dla płynów newtonowskich wyróżnia się gładki spływ laminarny, spływ falowy i spływ burzliwy. Teorię laminarnego spływu grawitacyjnego dowolnych cieczy nienewtonowskich po powierzchni płaskiej zaproponowali autorzy pracy [Astarita i in., 1964] przyjmując następujące założenia: spływ filmowy jest laminarny, jednokierunkowy i ustalony, lepkościowość płynu nie wpływa na film cieczy, prędkość cieczy przy ścianie może być albo równa zero, albo posiadać skończoną wartość w_p , co wynika z określonej zależności od przyściennego naprężenia ścinającego, faza gazowa nie oddziałuje na powierzchnię swobodną spływającej warstwy, na której zeruje się gradient prędkości, powierzchnia swobodna filmu jest gładka. [Astarita i in., 1964] przeprowadzili sprawdzające badania doświadczalne na płycie aluminiowej o wymiarach 58×614 mm nachylonej względem poziomu pod kątami $\theta \in (2^\circ; 20^\circ)$, po której spływały wodne roztwory: 60% gliceryny i 2% soli sodowej karboksymetylocelulozy NaCMC oraz roztwór 3,5% zawiesiny bentonitu w wodzie. Ocena ich wyników nie jest jednak możliwa, albowiem nie zostały podane charakterystyki reologiczne badanych układów ciekłych, oprócz sygnału, że roztwór NaCMC był płynem rozrzedzanym ścinaniem.

Badania spływu filmowego cieczy po powierzchniach z chropowatością regularną wykazały, że na podstawowe parametry hydrodynamiczne, a więc i na kinetykę procesów wymiany, mają wpływ: kształt, wysokość elementów powierzchniowych oraz odległość między nimi [Broniarz, 1991a, b, c; Broniarz, 1992; Broniarz-Press, 2004].

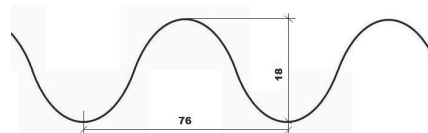
Celem przeprowadzonych badań było porównanie średniej grubości filmu roztworów polimerów spływających po powierzchni płaskiej i sinusoidalnej.

Część doświadczalna

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Układ pomp – 5 przetłaczał ciecz ze zbiornika głównego – 4 przez zawory regulujące natężenie przepływu – 6 oraz układ rotametrów – 7 do stabilizacyjnego zbiornika przelewowego – 1, który stanowił jednocześnie element urządzenia zraszającego daną powierzchnię – 2. Na przewodzie zasilającym umieszczono wyłącznik przelotowy, powodujący gwałtowne przerwanie dopływu cieczy do płyty, co z kolei umożliwiło mierzenie średniej grubości filmu cieczy wagowo-objętościową techniką odcina-

nia. Dodatkowym elementem pomiarowym grubości filmu była śruba mikrometryczna. Temperaturę cieczy mierzono termometrem – 8 z dokładnością $\pm 0,1$ K.

Prostokątna płyta płaska – 2, pokazana na rys. 1, wykonana była ze szkła organicznego. Całkowita długość drogi spływu filmu po płaszczyźnie o szerokości $L = 0,17$ m wynosiła $h = 1,045$ m. W przypadku pomiarów dla wody użyto także płyty falistej wykonanej z PCW. Długość drogi spływu wynosiła $h = 1,1825$ m, natomiast długość fali sinusoidalnej na powierzchni zmodyfikowanej wynosiła 76 mm, a jej amplituda 18 mm (Rys. 2). Płyty, po których odbywał się spływ grawitacyjny, nachylone były pod kątami $\Theta = 13^\circ, 24^\circ$ oraz 45° względem poziomu.



Rys. 2. Rzut płyty falistej z boku

Serie pomiarowe obejmowały pomiar grubości filmu przy różnych natężeniach przepływu dla wody oraz wodnych roztworów soli sodowej karboksymetylocelulozy (NaCMC) i poliakryloamidu (*Rokrysol WF1*) o stężeniu 1000 ppm. Pomiarzy prowadzono w temperaturze 293 K. Gęstości badanych cieczy wynosiły: wody $\rho = 998,2$ [kg/m³], wodnego roztworu *Rokrysolu WF1* $\rho = 1010$ [kg/m³], roztworu wodnego soli sodowej karboksymetylocelulozy $\rho = 1090$ [kg/m³]. Przed rozpoczęciem każdego pomiaru płyta była zraszana cieczą przez okres co najmniej 10 minut w celu zapewnienia zwilżenia całej powierzchni, po której ciecz płynie, a także ustabilizowania cyrkulacji płynu.

Średnią grubość filmu mierzono metodą odcinania. W momencie przerwania dopływu płynu do zbiornika przelewowego pod dolną krawędź powierzchni spływu podstawiano zbiornik pomiarowy. Zbierano w nim ciecz, która pozostawała na powierzchni płyty po odcięciu dopływu do zbiornika przelewowego i oceniano objętość V , aby wyznaczyć średnią grubość filmu z zależności:

$$s = \frac{V}{Lh} \quad (1)$$

gdzie: s – średnia grubość [m], V – objętość cieczy [m³], L – szerokość płyty [m], h – długość płyty [m].

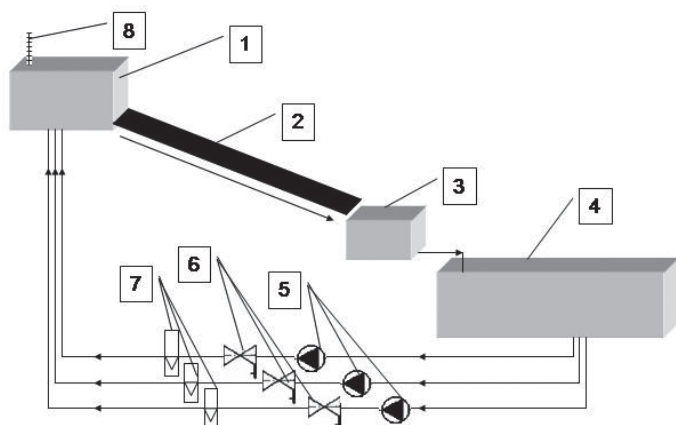
W przypadku, kiedy powierzchnia na płycie była sfalowana, dokonywano podwójnego zbierania cieczy. Pierwszy pomiar objętości V_0 wykonywano dla cieczy, która swobodnie spłynęła do zbiornika pomiarowego, co dawało wartość grubości filmu s_0 . Z kolei drugi odczyt obejmował objętość cieczy ΔV , która pozostała na płycie. Następnie wyznaczano średnią grubość filmu ze związku:

$$s = s_0 + \Delta s = \frac{V_0 + \Delta V}{Lh} \quad (2)$$

Dla każdego natężenia zraszania wykonywano serie składającą się z 5 pomiarów, po czym uśredniano uzyskane wartości.

Stwierdzono, że dla danego natężenia zraszania powierzchni Γ najniższe wartości średniej grubości filmu spływającego po powierzchni płaskiej charakteryzują wodę, wyższe roztwór soli sodowej karboksymetylocelulozy, a najwyższe – roztwór *Rokrysolu WF1*, co można wytłumaczyć różnymi charakterystykami reologicznymi stosowanych cieczy. Woda jest płynem newtonowskim, a wodne roztwory polimerów są rozrzedzanymi ścinaniem cieczami opisanymi równaniem potęgowym *Ostwalda - deWaele'a*:

– roztwór soli sodowej karboksymetylocelulozy



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego średniej grubości filmu cieczy: 1 – zbiornik przelewowy; 2 – powierzchnia badana; 3 – zbiornik pomiarowy; 4 – zbiornik główny; 5 – układ pomp; 6 – układ zaworów; 7 – rotametry; 8 – termometry

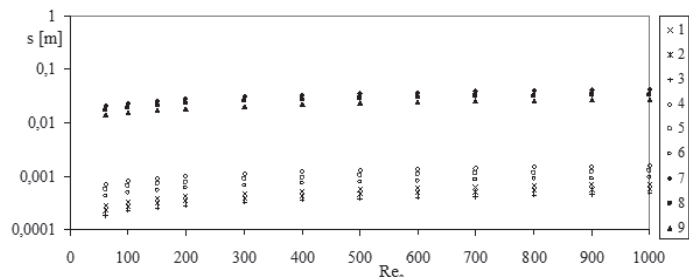
$$\tau = 0,0150\dot{\gamma}^{0,80} \quad (3)$$

– roztwór poliakrylamidu

$$\tau = 0,0306\dot{\gamma}^{0,68} \quad (4)$$

gdzie: τ – napężenie ścinające [Pa], $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania [1/s].

Wyniki pomiarów przedstawione na rys. 3 pokazują znaczne rozbieżności w wartościach średniej grubości filmu cieczy dla ekwiwalentnych wartości liczby *Reynoldsa*. Najniższe wartości uzyskano dla wody, a najwyższe dla wodnego roztworu poliakrylamidu.



Rys. 3. Wartości średniej grubości filmu badanych cieczy w funkcji liczby *Reynoldsa*, uwzględniającej charakterystykę reologiczną płynu: 1 – woda, $\theta = 13^\circ$; 2 – woda, $\theta = 24^\circ$; 3 – woda, $\theta = 45^\circ$; 4 – roztwór NaCMC, $\theta = 13^\circ$; 5 – roztwór NaCMC, $\theta = 24^\circ$; 6 – roztwór NaCMC, $\theta = 45^\circ$; 7 – roztwór PAA, $\theta = 13^\circ$; 8 – roztwór PAA, $\theta = 24^\circ$; 9 – roztwór PAA, $\theta = 45^\circ$

Wyniki pomiarów opracowano w postaci zależności bezwymiarowych:

– dla wody

$$s_{r,N} = \frac{s}{\delta_{e,N,\theta}} = f(Re_{e,N}) \quad (5)$$

– dla roztworów polimerów

$$s_{r,n} = \frac{s}{\delta_{e,n,\theta}} = f(Re_{e,n}) \quad (6)$$

gdzie: $s_{r,N}$ – zredukowana grubość filmu cieczy newtonowskiej, $s_{r,n}$ – zredukowana grubość filmu cieczy nienewtonowskiej, $\delta_{e,N,\theta}$ – zastępczy wymiar liniowy filmu wody spływającego po powierzchni nachylonej pod kątem θ

$$\delta_{e,n,\theta} = 3 \sqrt{\frac{\eta^2}{g\rho^2 \sin \theta}} \quad (7)$$

$Re_{e,N}$ – liczba *Reynoldsa* dla spływu grawitacyjnego cieczy newtonowskiej

$$Re_{e,N} = \frac{4\Gamma}{\eta} = \frac{4ws\rho}{\eta} \quad (8)$$

$\delta_{e,n,\theta}$ – zastępczy wymiar liniowy filmu cieczy potęgowej spływającego po powierzchni nachylonej pod kątem θ

$$\delta_{e,n,\theta} = \left[\frac{K^2}{(g \sin \theta)^{2-n} \rho^2} \right]^{1/(2+n)} \quad (9)$$

$Re_{e,n}$ – liczba *Reynoldsa* dla spływu grawitacyjnego cieczy potęgowej

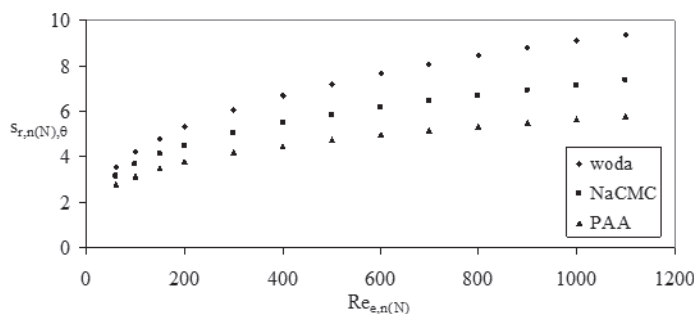
$$Re_{e,n} = \frac{4w^{2-n} s^n \rho}{3^{n-1} K} \left(\frac{3n}{2n-1} \right)^n \quad (10)$$

Obraz zależności $s_{r,n(N),\theta} = f(Re_{e,n(N)})$ pokazano na rys. 4.

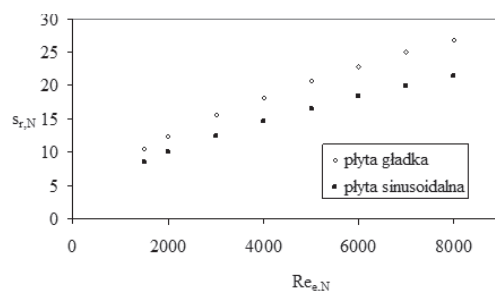
W wyniku przeprowadzonej analizy danych pomiarowych i ich aproksymacji wtórnej dla $\theta = 90^\circ$ dla roztworu *Rokrysolu* WF1 w zakresie wartości liczb *Reynoldsa* $Re_{e,n} \in (27; 1105)$ i dla roztworu NaCMC $Re_{e,n} \in (66; 1152)$ potwierdzono słuszność zależności [Broniarz-Press, 2004] zaproponowanej dla płynów potęgowych spływających po gładkiej powierzchni pionowej w zakresie wartości $Re_{e,n} < 1100$:

$$s_{r,n} = \left(\frac{3}{4} \right)^{n/(2+n)} \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^{2n/(2+n)} Re_{e,n}^{n/(2+n)} \quad (11)$$

Kolejnym etapem badań było porównanie średniej grubości filmu wody spływającego po powierzchni gładkiej i sinusoidalnej. Badania wykonano w zakresie spływu burzliwego ($Re_{e,N} \in (1533; 8127)$). Obraz uzyskanych zależności typu (3) przedstawia rys. 5.



Rys. 4. Wartości zredukowanej grubości filmu badanych cieczy w funkcji liczby *Reynoldsa*, uwzględniającej charakterystykę reologiczną płynu i definicje zastępczych wymiarów liniowych



Rys. 5. Porównanie wartości zredukowanej grubości filmu badanych cieczy w funkcji liczby *Reynoldsa* dla spływu wody po powierzchni gładkiej i sinusoidalnej

W wyniku opracowania wyników tych badań porównawczych uzyskano następujące związki korelacyjne dla wody spływającej po powierzchni:

– płaskiej $s_{r,N} = 0,1753 Re_{e,n}^{0,56} \quad (12)$

– sinusoidalnej $s_{r,N} = 0,1400 Re_{e,n}^{0,55} \quad (13)$

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że średnia zredukowana grubość filmu spływającego po powierzchni falistej jest o około 20% mniejsza niż obserwowana podczas spływu po powierzchni płaskiej.

Wnioski

W pracy pokazano, że średnia grubość filmu cieczy i grubość zredukowana zależą od charakteru płynu. Im jego właściwości nienewtonowskie były silniejsze, tym zredukowana grubość filmu była mniejsza.

Jednocześnie stwierdzono, że średnia zredukowana grubość filmu spływającego po powierzchni falistej jest o około 20% mniejsza niż obserwowana podczas spływu po powierzchni płaskiej.

LITERATURA

Astarita G., Marrucci G., Palumbo G., 1964. Non-Newtonian gravity flow along inclined plane surface, *Ind. Eng. Chem., Fund.*, **3**, 4, 333-339. DOI: 10.1021/i160012a010

Broniarz L., 1991a. *Intensyfikacja procesów wymiany metodą pasywnej turbulizacji strugi*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań

Broniarz L., 1991b. Oddziaływanie ściany aparatu warstewkowego na średnią grubość filmu cieczy i współczynnik wnikania masy w fazie ciekłej. *Inż. Chem. Proc.*, **12**, nr 2, 227-249

Broniarz L., 1991c. Intensyfikacja procesów wymiany w filmie cieczy spływającym grawitacyjnie. I. Analiza stanu dotychczasowych badań teoretyczno-doświadczalnych. *Inż. Chem. Proc.*, **12**, nr 4, 519-550, 1991

Broniarz L., 1992. Intensyfikacja procesów wymiany w filmie cieczy spływającym grawitacyjnie. II. Wpływ ozebrowania trójkątnego i pierścieniowego na proces wnikania masy w fazie ciekłej. *Inż. Chem. Proc.*, **13**, nr 2, 285-307

Broniarz-Press L., 1997. Enhancement of mass transfer coefficients in spiral films, *Int. J. Mass Heat Transfer*, **40**, 17, 4197-4208. DOI: 10.1016/S0017-9310(97)00025-2

Broniarz-Press L., 2004. *Hydrodynamika spływu filmowego cieczy i zjawiska przenoszenia w aparatach warstewkowych* Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań