

Lubomira BRONIARZ-PRESS, Janusz DOBRYCHŁOP

e-mail: lubomira.broniarz-press@put.poznan.pl

Zakład Inżynierii i Aparatury Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Opór opadania pojedynczej cząstki w wodnych roztworach soli sodowej karboksymetylocelulozy

Wstęp

Na pojedynczą cząstkę ciała stałego znajdującą się w płynie działają następujące siły: siła ciężkości, siła wyporu, siła wywołana ruchem wirowym płynu oraz siła wywołana istnieniem pola elektrycznego. Jeżeli cząstka rozpoczyna opadanie od początkowej prędkości równej zeru, wówczas w ciągu krótkiego czasu będzie ona opadać ruchem przyspieszonym. Jednocześnie w miarę wzrostu prędkości opadania, rosnąć będzie opór ośrodka, przeciwstawiający się dalszemu wzrostowi prędkości opadania. Od tego momentu, gdy siła oporu ośrodka stanie się równa sile ciężkości, ustala się prędkość, z jaką porusza się opadająca cząstka. Ten rodzaj ruchu cząstki nazywany jest opadaniem ustalonym [Bandrowski i in., 2001].

W przypadku badań opadania cząstek ciała stałego w cieczach ni-newtonowskich [Dazhi i Tanner, 1985; Tripathi i in., 1994; Tripathi i Chhabra, 1995; Chhabra i Richardson, 2008] współczynnik oporu ζ przedstawiano dotychczas najczęściej w postaci zależności

$$\zeta = f(Re, n) \quad (1)$$

gdzie:

 Re – liczba Reynoldsa dla cieczy

$$Re = \frac{wd\rho_c}{\eta} \quad (2)$$

n – charakterystyczny wskaźnik płynięcia dla płynów potęgowych o krzywej płynięcia opisanej związkiem [Dziubiński i in., 2009]:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

 τ – naprężenie ścinające, [Pa]

– szybkość ścinania, [1/s]

 k – współczynnik konsystencji, [Pa·sⁿ]

W pracy Machača i in. [1995] zaproponowano dla opadania pojedynczej cząstki zastępczą liczbę Reynoldsa o postaci:

$$Re = \frac{w^{2-n}d^n\rho_c}{k} \quad (4)$$

gdzie:

 d – średnica cząstki, [m] w – średnia prędkość opadania, [m/s]

Natomiast Agaciński [2004] oraz Broniarz-Press i in. [2007] wykazali, że dla procesów przepływowych w układach ciała stałe – ciecz potęgowa słuszna jest następująca postać liczby Reynoldsa [Kembłowski i in., 1988]:

$$Re_{o,n} = \frac{w^{2-n}d^n\rho_c}{k(1-\varepsilon)^n} \left(\frac{4n}{1+3n} \right)^n \left(\frac{15\sqrt{2}}{\varepsilon^2} \right)^{1-n} \quad (5)$$

która jednak nie może być wykorzystana w przypadku opadania pojedynczej cząstki ($\varepsilon = 1$).

Celem pracy jest określenie wpływu właściwości nienewtonowskich cieczy na opory przepływu swobodnie opadającej pojedynczej cząstki kulistej.

Część eksperymentalna

W badaniach stosowano kolumnę ze szkła organicznego o wymiarach wewnętrznych 50×39 mm i wysokości 0,8 m. Kolumna wyposażona była w skalę do odczytu położenia opadającej cząstki.

Naczynie pomiarowe napełniano badanym roztworem, następnie wprowadzano pojedyncze cząstki stałe i za pomocą stopera rejestrowano czas, w jakim pokonują odległość 55 cm. Cząstki stałe wprowadzano

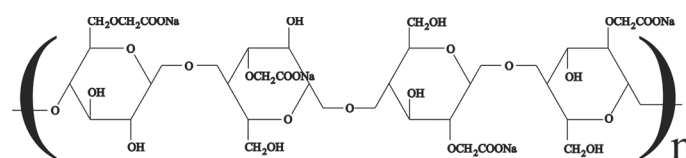
tak, aby całą powierzchnią zostały zwilżone przez płyn, co pozwoliło wyeliminować pęcherze powietrza, które przyczepione do opadających cząstek powodują powstawanie błędów pomiarowych poprzez wydłużenie czasu opadania cząstki.

W badaniach jako cząstki stałe wykorzystano granulaty agalitowy, którego głównym składnikiem jest mieszanina krzemianów magnezu $Mg(HSiO_3)_2 \cdot 2MgSiO_3$. Agalit charakteryzuje się stosunkowo dużą gładkością powierzchni, jednolitą twardością w skali Mohsa oraz „woskowatą” barwą. Badania przeprowadzono stosując trzy frakcje granulatu agalitowego: 1÷1,12; 1,8÷2 oraz 2,24÷2,50 mm, uzyskane metodą analizy sitowej. Ogółem przebadano po 75 cząstek w każdym roztworze. Cząstki poddano ocenie wizualnej, na podstawie której przyjęto wartość sferyczności $\psi \approx 1$. Gęstość cząstek ciała stałego wyznaczono za pomocą pikometru prostego. W tab. 1 przedstawiono charakterystykę cząstek wykorzystanych w badaniach.

Tab. 1. Charakterystyka frakcji cząstek stosowanych w badaniach

Lp.	Frakcja cząstek [mm]	Gęstość ρ_s [kg/m ³]	Średnia średnica cząstki \bar{d} [mm]	Odchylenie standardowe σ
1	1,00÷1,12	2119,6	1,05	0,0348
2	1,80÷2,00	2192,1	1,90	0,0588
3	2,24÷2,50	2431,7	2,41	0,0507

Cieczami stosowanymi w badaniach były wodne roztwory soli sodowej karboksymetylocelulozy (Na-CMC) produkcji firmy POCH o masie molowej 90000, której strukturę przedstawiono na rys. 1 [Imeson, 2011] o stężeniach: 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2 i 1,5% wag. Badania prowadzono w temperaturze 21°C.



Rys. 1. Wzór makrocząsteczki Na-CMC

Gęstość roztworów wodnych wyznaczono przy użyciu areometrów prowadząc pomiary w cylindrze miarowym o pojemności 500 cm³. W pomiarach wykorzystano dwa areometry o zakresach pomiarowych $\rho_c \in (950; 1000)$ i $(1000; 1050)$ [kg/m³], o podziałce 1 [kg/m³] oraz dokładności ± 1 [kg/m³].

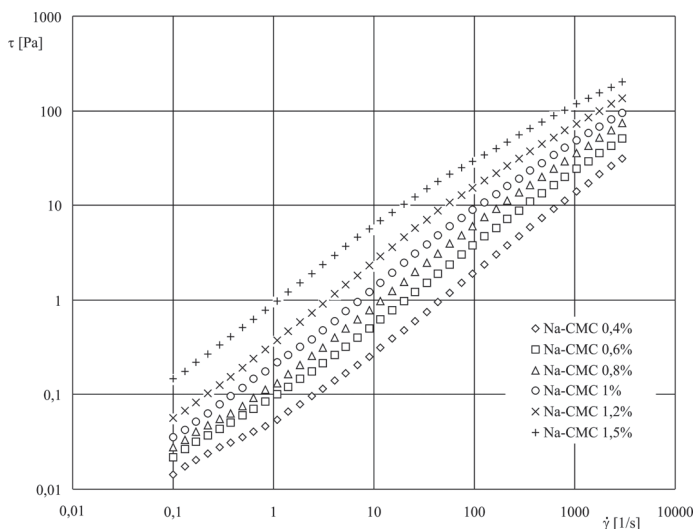
Badania właściwości reologicznych przeprowadzono reometrem rotacyjnym Physica MCR-501 Anton Paar przy wykorzystaniu układu pomiarowego CP-60 typu stożek-plytka. Potwierdzono, że wodne roztwory Na-CMC o masie molowej 90000 wykazują właściwości lepkich płynów rozrzedzanych ścinaniem. W tab. 2 podano charakterystykę badanych roztworów.

Tab. 2. Charakterystyka wodnych roztworów Na-CMC

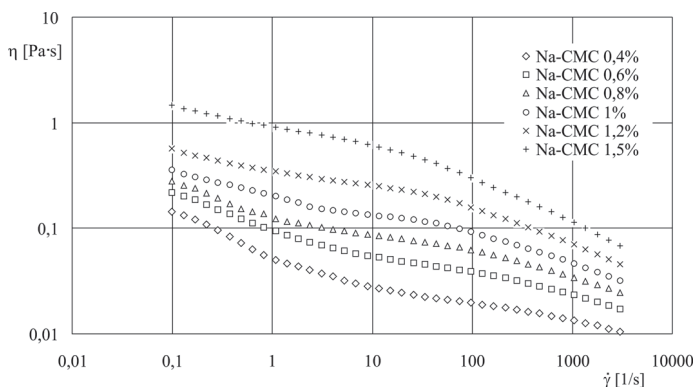
Lp.	Stężenie Na-CMC w roztworze	Parametry reologiczne		Gęstość ρ_c [kg/m ³]
		k [Pa·s ⁿ]	n [-]	
1	0,4%	0,0561	0,5921	1000,0
2	0,6%	0,0968	0,6418	1000,0
3	0,8%	0,1241	0,6459	1001,0
4	1,0%	0,2103	0,8436	1001,0
5	1,2%	0,3606	0,8396	1002,0
6	1,5%	0,9253	0,8099	1003,0

Wyniki badań

Na rys. 2 przedstawiono krzywe płynięcia roztworów wykorzystanych w badaniach opadania pojedynczej cząstki, natomiast rys. 3 przedstawia krzywe lepkości tych roztworów. Wykazano znaczący wpływ stężenia roztworu na współczynnik konsystencji, który zmienił się od 0,0561 [Pa·sⁿ] dla roztworu 0,4%-owego do 0,9253 [Pa·sⁿ] dla roztworu o stężeniu 1,5%.



Rys. 2. Krzywe płynięcia roztworów badanych



Rys. 3. Krzywe lepkości roztworów badanych

Na podstawie pomiarów czasów opadania t pojedynczych cząstek w badanych roztworach wyznaczano ich prędkości opadania ze wzoru:

$$w = l/t \quad (6)$$

Wartość liczby *Reynoldsa* obliczano z równ. (4), a współczynnik oporu ośrodka ze wzoru zaproponowanego w pracy [Schiller i Naumann, 1933] do wyznaczania prędkości opadania cząstek kulistych w płynach newtonowskich:

$$\zeta = \frac{4}{3} \frac{\rho_s - \rho_c}{\rho_c} \frac{dg}{w^2} \quad (7)$$

gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie, [m/s²]

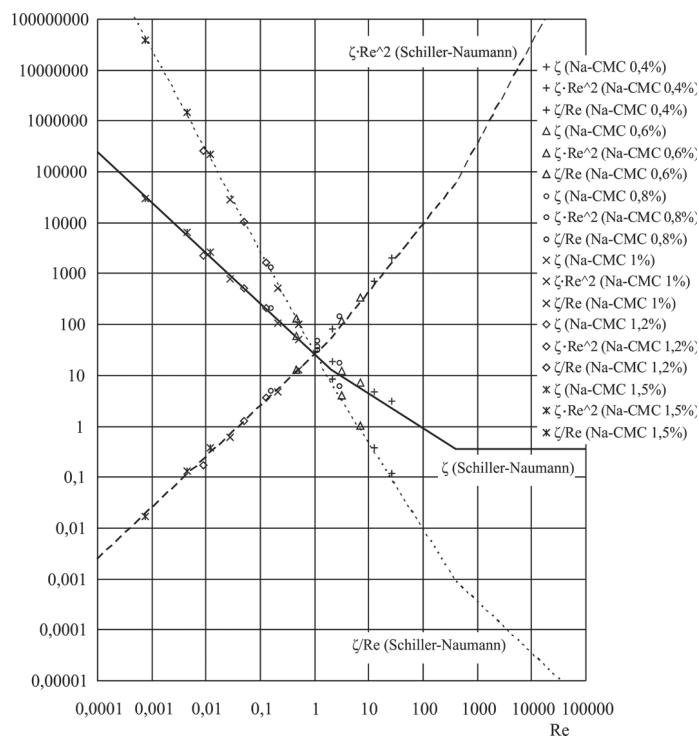
l – odległość między punktami pomiarowymi, [m]

t – czas opadania cząstki, [s]

Stwierdzono, że ze wzrostem stężenia Na-CMC w roztworze następuje wzrost właściwości lepkości roztworu, co skutkuje wydłużeniem czasów opadających pojedynczych cząstek.

Na podstawie otrzymanych wartości współczynników oporu (7) w funkcji liczby *Reynoldsa* (4) wykreślono zmodyfikowany dla płynów potęgowych wykres *Schillera-Naumanna* (Rys. 4).

Z analizy otrzymanych zależności (Rys. 4) wynika, że wykresy *Schillera i Naumanna* mogą być stosowane do oceny opadania pojedynczej cząstki kulistej nie tylko w płynach newtonowskich, lecz również w płynach nienewtonowskich bez granicy płynięcia (płyny *Stokesa*).



Rys. 4. Porównanie wyników badań własnych z wynikającymi z uogólnionego dla płynów *Stokesa* wykresu *Schillera-Naumanna*

Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań opadania pojedynczych cząstek ciała stałego w nienewtonowskich roztworach wodnych soli sodowej karboksymetylocelulozy.

Z analizy otrzymanych zależności wynika, że wykresy *Schillera i Naumanna* mogą być stosowane nie tylko do oceny opadania pojedynczej cząstki kulistej w płynach newtonowskich, lecz również w płynach nienewtonowskich bez granicy płynięcia (płyny *Stokesa*), gdy wykorzystamy definicję liczby *Reynoldsa* zaproponowaną przez *Machača* i in. [1995].

LITERATURA

- Agaciński P., 2004. *Badania procesu fluidyzacji w cieczach o złożonych właściwościach reologicznych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań
- Bandrowski J., Merta H., Ziolo J., 2001. *Sedymentacja zawiesin. Zasady i projektowanie*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice
- Broniarz-Press L., Agacinski P., Rozanski J., 2007. Shear-thinning fluids flow in fixed and fluidised bed. *Int. J. Multiphase Flow*, **33**, nr 6, 675-689. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.12.004
- Chhabra R.P., Richardson J.F., 2008. *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology, Engineering Applications*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford
- Dazhi G., Tanner R.I., 1985. The drag on a sphere in power-law fluid, *J. Non-Newton. Fluid*, **17**, nr 1, 1-12. DOI: 10.1016/0377-0257(85)80001-X
- Dziubiński M., Kiljański T., Sęk J., 2009. *Podstawy reologii i reometrii płynów*. Politechnika Łódzka, Łódź
- Imeson A., 2010. *Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents*. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom
- Kembłowski Z., Dziubiński M., Sęk J., 1988. *Flow of non-Newtonian fluids through granular media [w:] Transport Phenomena in Polymeric Systems*, 117-175, Ellis Horwood, Chichester
- Machač I., Ulbrichová I., Elson T.P., Cheesman D.J., 1995. Fall of spherical particles through non-Newtonian suspension. *Chem. Eng. Sci.* **50**, nr 20, 3323-3327. DOI: 10.1016/0009-2509(95)00168-5
- Schiller L., Naumann A., 1933. Über die grundlegenden Berechnungen der Schwerkraftaufbereitung. *Z. Ver. Deutsche Ing.* **77**, 318-320.
- Tripathi A., Chhabra R.P., 1995. Drag on spheroidal particles in dilatant fluids, *AIChE J.* **41**, nr 3, 728-731. DOI: 10.1002/aic.690410330
- Tripathi A., Chhabra R.P., Sundararajan T., 1994. Power law fluid flow over spheroidal particles, *Ind. Eng. Chem. Res.* **33**, 403-410. DOI: 10.1021/ie00026a035