

MAREK DZIUBIŃSKI  
ALEKSANDRA WITCZAK-STAWICKA  
PAWEŁ BUDZYŃSKI

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

# Analogia procesu sedymentacji i fluidyzacji cząstek w płynach nienewtonowskich

## Wprowadzenie

Opublikowane w literaturze przedmiotu badania dotyczące sedymentacji i fluidyzacji potwierdzają pełną analogię między tymi procesami dla układów cząstki ciała stałego – płyn newtonowski. Podstawowe równania *Richardsona-Zaki* [1], powszechnie stosowane do opisu procesu sedymentacji w oryginale zostały opracowane dla procesu fluidyzacji. *Richardson* i *Zaki* [1] byli najprawdopodobniej pierwszymi badaczami, którzy mimo pewnych różnic w charakterze pól prędkości stwierdzili pełną analogię między procesem fluidyzacji i sedymentacji w płynach newtonowskich. Natomiast w literaturze przedmiotu brak jest prac potwierdzających analogie procesu sedymentacji i fluidyzacji w płynach nienewtonowskich.

Celem pracy było podjęcie próby opisu danych doświadczalnych dotyczących prędkości sedymentacji zawiesin nienewtonowskich za pomocą opublikowanych w literaturze modeli sedymentacji i fluidyzacji cząstek w płynach nienewtonowskich.

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących stabilności zawiesin farmaceutycznych, wykazujących cechy nienewtonowskie. Uzyskane dane doświadczalne opisano zmodyfikowanym modelem procesu sedymentacji *Richardsona-Zaki* [2, 3, 7] oraz znanymi w literaturze modelami fluidyzacji w płynach nienewtonowskich. Należą do nich model *Mishry, Singha* i *Mishry* [4], model *Machaća, Balcara* i *Lecjaks* [5] oraz model *Kawase* i *Ulbrechta* [6].

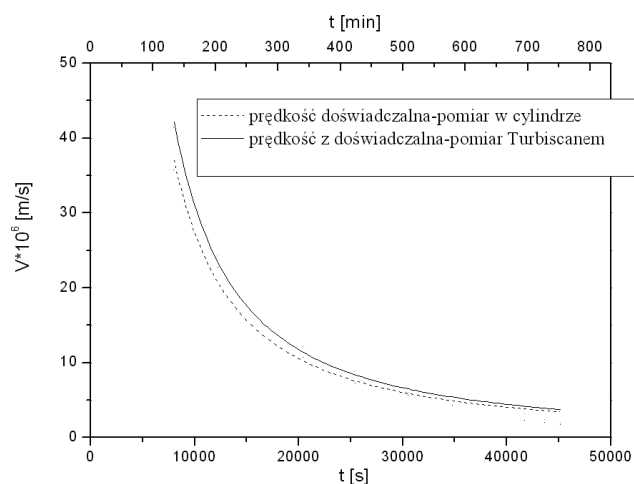
## Część eksperymentalna

W badaniach prędkości sedymentacji stosowano następujące media doświadczalne. Jako substancje zagęszczające stosowano *Blanozę* o stężeniu od 0,01 do 2 g/100 ml H<sub>2</sub>O. Substancją zawieszoną był węglan dwuhydroksyglinowo-sodowy (DASC) o stężeniach 2, 6, 10 g/100 ml H<sub>2</sub>O. W badaniach użyto substancji konserwujących o następujących nazwach handlowych: *Nipagina P* (0,05 g/100 ml H<sub>2</sub>O), i *Nipagina M* (0,1 g/100 ml H<sub>2</sub>O).

Pomiary lepkości mediów doświadczalnych wykonano za pomocą reometru rotacyjnego *Rheotec RC 20* firmy *Haake* (Niemcy), natomiast do pomiarów szybkości sedymentacji użyto cylindra pomiarowego oraz aparatu *Turbiscan Lab Expert*.

## Omówienie wyników

Na przykładowym wykresie (Rys. 1) przedstawiono porównanie zmian prędkości sedymentacji w czasie dla zawiesiny DASC'u w wodnym roztworze *Blanozy*, uzyskanych dla dwóch różnych metod pomiarowych. Różnica między wynika-



Rys. 1. Zależność prędkości sedymentacji 2% zawiesiny cząstek ciała stałego DASC zdyspergowanych w 0,3% wodnym roztworze *Blanozy* w funkcji czasu

mi pomiarów uzyskanych dwiema niezależnymi metodami dla wszystkich serii pomiarowych nie przekroczyła 10%, co potwierdza poprawność wykonanych pomiarów.

Uzyskane dane doświadczalne prędkości sedymentacji porównano z wartościami teoretycznymi obliczonymi ze zmodyfikowanego modelu *Richardsona-Zaki* [2, 3, 7] o postaci

$$\frac{v_s}{v_o} = \varepsilon^z \quad (1)$$

Wykładnik  $z$  w równaniu (1) został zdefiniowany jako:

$$z = 4,65 + \frac{1-n}{n} \quad (2)$$

W celu poszukiwania analogii procesu sedymentacji i fluidyzacji do opisu danych doświadczalnych zastosowano następujące modele procesu fluidyzacji w płynach nienewtonowskich:

– model *Mishry, Singha, Mishry* [4] o postaci:

$$(\rho_s - \rho_L)g = A(n) \frac{(1-\varepsilon)^n}{\varepsilon^{2n+1}} \cdot \frac{k}{d_p^{n+1}} v_F^n + B \frac{\rho}{\varepsilon^3 d_p} v_F^2 \quad (3)$$

w którym

$$A(n) = 12,5 \left( \frac{9n+3}{n} \right)^n \quad (4)$$

zaś stała  $B$  przyjmuje wartość równą 1,75,  $v_F$  – prędkość fluidyzacji.

– model Machaća, Balcara i Lecjakska [5]

$$\varepsilon = \left(\frac{v_F}{v_o}\right)^{0,218-0,404\left(\frac{d_p}{D}\right)} - 0,862(1-n)\left(\frac{v_F}{v_o}\right)^{0,802-1,35\left(\frac{d_p}{D}\right)}$$

dla  $10^{-3} < Re \leq 0,3$  (5)

$$v_F = v_o \varepsilon^z \quad \text{dla} \quad 0,3 < Re \leq 165 \quad (6)$$

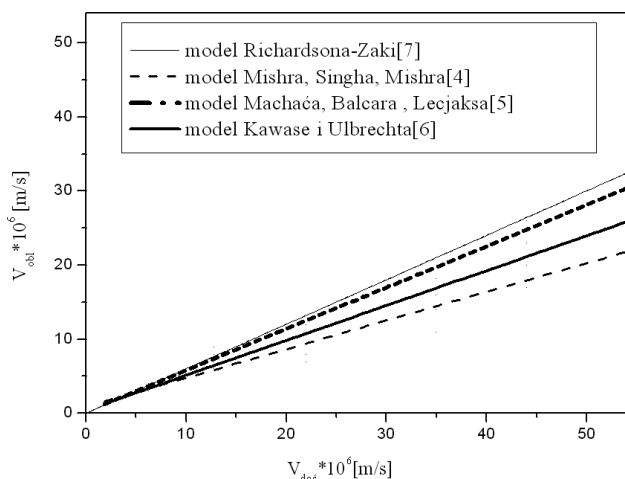
gdzie:

$$z = \left(4,7 + 8,8 \frac{d_p}{D}\right) Re^{-0,1} \quad (7)$$

– model Kawase i Ulbrechta [6]

$$v_F = \left(\frac{(\rho_s - \rho_L)d_p^{n+1} g \varepsilon^{4,65n}}{18kY}\right) \quad (8)$$

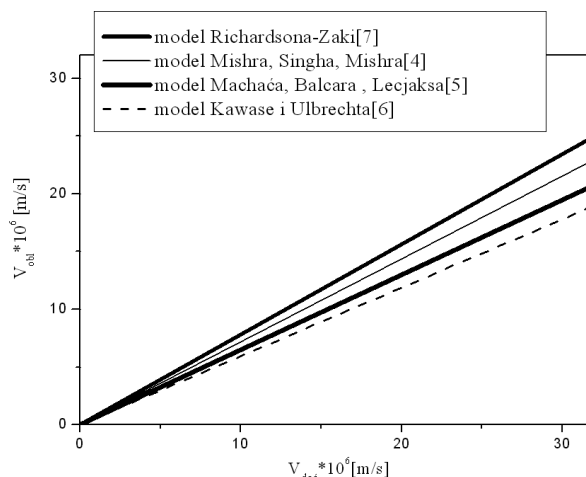
$$Y = 3^{\frac{3n-3}{2}} \left(\frac{-22n^2 + 29n + 2}{n(n+2)(2n+1)}\right) \quad (9)$$



Rys. 2. Porównanie doświadczalnej wartości prędkości sedymentacji z prędkością obliczoną z równań modelowych procesu sedymentacji i fluidyzacji dla 10% zawiesiny cząstek DASC w 0,1% wodnym roztworze Blanozy

Na przykładowych wykresach (Rys. 2, Rys. 3) przedstawiono porównanie opisu danych doświadczalnych za pomocą modeli sedymentacji i fluidyzacji cząstek w płynach nienewtonowskich. Z przeprowadzonych badań wynika, iż w granicach błędu pomiarowego można przyjąć istnienie analogii pomiędzy procesem sedymentacji a fluidyzacji cząstek w płynach nienewtonowskich.

Z analizy uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że najbardziej zbliżony opis danych doświadczalnych uzyskano dla zmodyfikowanego modelu sedymentacji Richardsona i Zaki [2, 3, 7] i modelu fluidyzacji cząstek w płynach nienewtonowskich Mishry, Singha i Mishry [4]. Różnica opisu



Rys. 3. Porównanie doświadczalnej wartości prędkości sedymentacji z prędkością obliczoną z równań modelowych procesu sedymentacji i fluidyzacji dla 10% zawiesiny cząstek DASC w 0,2% wodnym roztworze Blanozy

danych doświadczalnych za pomocą tych modeli nie przekraczała 5%.

Z przeprowadzonych badań wynika, że w granicach błędu pomiarowego można przyjąć istnienie analogii procesu sedymentacji i fluidyzacji cząstek w płynach nienewtonowskich. Badania wykonano dla płynów nienewtonowskich o parametrach reologicznych modelu potęgowego  $0,42 < n < 0,87$ ;  $0,06 < k < 1,93$  Pas i zakresu wartości liczby Reynoldsa  $2 \cdot 10^{-5} < Re < 10^{-4}$ .

### Oznaczenia

- $d_p$  – średnica cząstki,
- $D$  – średnica kolumny,
- $k, n$  – parametry reologiczne modelu potęgowego płynu nienewtonowskiego,
- $v_s$  – prędkość sedymentacji zawiesiny, [m/s],
- $v_o$  – prędkość sedymentacji pojedynczej cząstki, [m/s],
- $v_F$  – prędkość fluidyzacji, m/s,
- $Re$  – liczba Reynoldsa dla prędkości opadania pojedynczej cząstki w płynie nienewtonowskim zdefiniowana w pracy [7],
- $Y$  – stała zdefiniowana równaniem (9),
- $\rho_L, \rho_S$  – gęstość cieczy i cząstek ciała stałego,
- $\varepsilon$  – porowatość,
- $\phi$  – udział objętościowy.

### LITERATURA

1. J.F. Richardson, W.N. Zaki: Trans. Inst. Chem. Eng., 32, 35 (1954).
2. P.U. Foscolo, L.G. Gibilaro, S.P. Waldram: Chem. Eng. Sci., 38, 1251 (1983).
3. H. Miura, T. Takahashi, J. Ichikawa, Y. Kawase: Powder Technology., 117, 242 (2001).
4. P. Mishra, D. Singh, I.M. Mishra: Chem. Eng. Sci., 30, 397 (1975).
5. I. Machać, M. Balcar, Z. Lecjaks: Chem. Eng. Sci., 41, 591 (1986).
6. Y. Kawase, J. Ulbrecht: Chem. Eng. Commun., 32, 263 (1985).
7. D. Ciceron, J. Comiti, R.P. Chhabra, M. Renaud: Chem. Eng. Sci., 57, 3225 (2002).