

Rafał RAKOCZY

e-mail: rrakoczy@zut.edu.pl

Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

Intensyfikacja procesu wymiany masy w wirującym polu magnetycznym

Wstęp

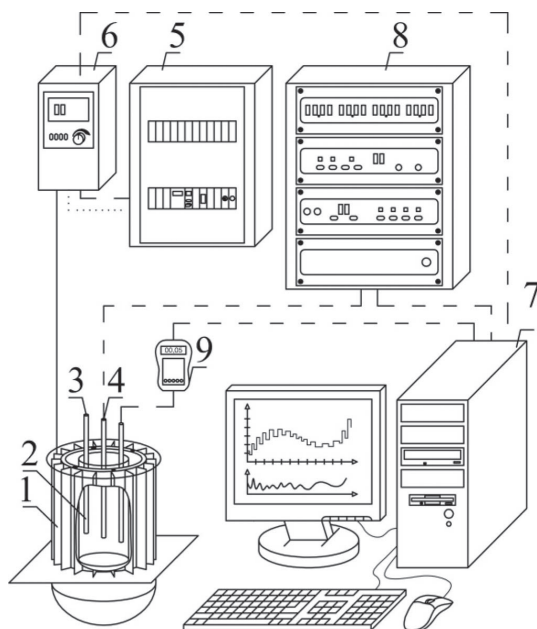
Szybkość procesów wymiany masy między ciałem stałym a otaczającą cieczą zależy od burzliwości płynu. W praktyce istnieją różnego typu urządzenia mieszające, które zapewniają odpowiedni poziom wytwarzanej burzliwości we wnętrzu mieszalnika. Najczęściej spotykany przypadek wymiany masy zachodzi w układzie ciecz – ciało stałe w procesie rozpuszczania ziaren ciała stałego oraz krystalizacji. W takim układzie opór dyfuzyjny przenikania masy jest zlokalizowany tylko po stronie fazy ciekłej.

W praktyce wymiana masy w układzie ciało stałe-ciecz jest zazwyczaj realizowana w mieszalnikach wyposażonych w mieszadła śmigłowe, turbinowe z łopatkami pochylonymi lub rzadziej łapowe. Pomimo dość dobrze opisanego problemu praktycznej realizacji procesu wymiany masy, można zaobserwować również prace badawcze proponujące zastosowanie oryginalnych rozwiązań konstrukcyjnych do intensyfikacji tego typu procesu [1–4].

Intensyfikacja procesu wymiany masy wirującym polem magnetycznym jest w literaturze źródłowej analizowana fragmentarycznie [5]. Dlatego też celowe było wykonanie serii badań potwierdzających korzystny wpływ tego typu pola na współczynniki wnikania masy w układzie ciało stałe – otaczająca ciecz.

Aparatura doświadczalna i procedura pomiarowa

Prace eksperymentalne wykonano wykorzystując aparaturę doświadczalną, przedstawioną na rys. 1.



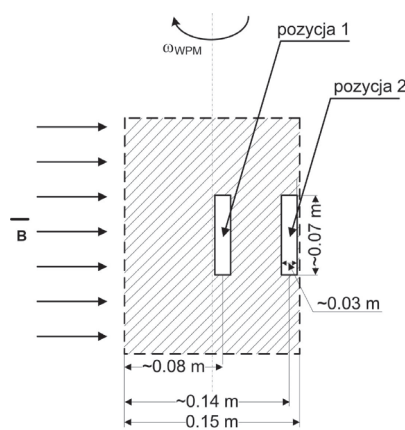
Rys. 1. Aparatura doświadczalna: 1 – generator wirującego pola magnetycznego, 2 – szklana zlewka, 3, 4 – sondy konduktometryczne, 5 – skrzynka zasilająca, 6 – przeмиennik częstotliwości, 7 – komputer, 8 – multiplexer wielofunkcyjny, 9 – czujnik hallotronowy

Dokładny opis instalacji badawczej został zamieszczony w pracy [5]. Głównym celem zrealizowanych badań doświadczalnych była ocena skuteczności oddziaływania wirującego pola magnetycznego na proce-

su wymiany masy oraz opis wyników w postaci równania korelacyjnego przydatnego do obliczeń projektowych

W pierwszym etapie prac badawczych rozpuszczano cylindryczne próbki NaCl w wodzie. Próbkę tę umieszczano w środkowej części generatora wirującego pola magnetycznego. Obecność tego typu pola wywołuje ruch cieczy znajdującej się w pobliżu próbki, wpływający na szybkość procesu wnikania masy od powierzchni ciała stałego do cieczy. Szczegółowa procedura przygotowania cylindrycznych próbek NaCl oraz ich analiza została przedstawiona w pracy [6].

Zastosowane wirujące pole magnetyczne charakteryzowało się silną niejednorodnością. Szczegółowa analiza rozkładu przestrzennego wartości indukcji magnetycznej we wnętrzu zastosowanego w prezentowanej pracy generatora wirującego pola magnetycznego została przedstawiona w pracy [7]. Z racji występowania rozkładu wartości indukcji magnetycznej przeprowadzono drugą serię badań, polegającą na zamianie umieszczania cylindrycznej próbki ciała stałego w zlewce umieszczonej w generatorze pola. Na rys. 2 zaprezentowano schematyczne umieszczenie próbek cylindrycznych we wnętrzu cieczy poddawanej oddziaływaniom wirującego pola magnetycznego.



Rys. 2. Schemat przedstawiający rozmieszczenie cylindrycznych próbek NaCl w zlewce wypełnionej wodą

Opracowanie i omówienie uzyskanych rezultatów

Współczynnik wnikania masy wyznaczono z równania kinetycznego wiążącego stosunek ubytku masy analizowanej cylindrycznej próbki ciała stałego do iloczynu zmian powierzchni próbki, przyrostu stężenia oraz czasu, w którym był realizowany proces. Zdecydowano się używane wyniki uogólnić w postaci równania kryterialnego zawierającego człony opisujące stosunek wnikania do czystej dyfuzji (liczba *Sherwooda*), charakterystykę natury czynnika pod względem dyfuzyjnym (liczba *Schmidta*) oraz podobieństwo zjawisk zachodzących pod działaniem sił odśrodkowych, wywołanych wirującym polem magnetycznym i siły tarcia wewnętrznego. Zastosowanie magnetycznej liczby *Taylor* pozwala uwzględnić w opisie analitycznym procesu rozpuszczania ciała stałego w cieczy, konwekcyjny wpływ wirującego pola magnetycznego.

Uzyskane rezultaty opracowano za pomocą następującej zależności ogólnej:

$$Sh = f(Ta_m, Sc) \Rightarrow Sh = f(Ha^2 Re_{\omega}, Sc) \quad (1)$$

Wprowadzając definicję liczb kryterialnych do równania (1) otrzymano następującą zależność funkcyjną:

$$\frac{\beta_{\text{NaCl}} \bar{d}_p}{D_{\text{NaCl}} C} = f\left(\frac{\sigma_e \omega_{\text{WPM}} B^2 d^4}{2\rho\nu^2}, \frac{\nu}{D_{\text{NaCl}}}\right) \quad (2)$$

gdzie:

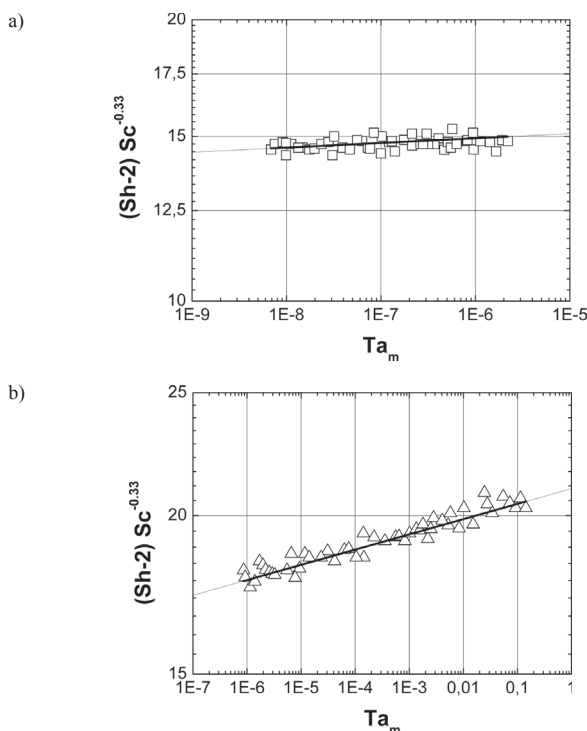
- B – indukcja magnetyczna, $[\text{kg}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}]$,
- C – koncentracja, $[\text{kg}_{\text{NaCl}}\cdot\text{kg}^{-1}]$,
- \bar{d}_p – średnia średnica próbki, $[\text{m}]$,
- d – średnica zlewki, $[\text{m}]$,
- D_{NaCl} – współczynnik dyfuzji, $[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$,
- β_{NaCl} – średni współczynnik wnikania masy, $[\text{kg}_{\text{NaCl}}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$,
- ρ – gęstość, $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$,
- ν – lepkość kinematyczna, $[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$,
- σ_e – przewodność elektryczna, $[\text{A}^2\cdot\text{s}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}]$,
- ω_{WPM} – prędkość wirującego pola magnetycznego, $[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$,

Właściwości fizykochemiczne występujące w modułach (2) zostały obliczone dla zakresu temperatur 20–30°C. Procedura wyznaczenia magnetycznej liczby *Taylor*a oraz zasada pomiaru indukcji magnetycznej i zależności analityczne opisujące jej zmienność od parametrów procesowych podano w pracach [5, 7].

Zależność pomiędzy współczynnikiem wnikania masy ujętym w liczbie *Sherwooda* a intensywnością procesu mieszania cieczy, wywołaną wirującym polem magnetycznym, zdecydowano się opisać następującą zależnością:

$$Sh = cTa_m^a Sc^b \quad (3)$$

Na rys. 3a, b przedstawiono wyniki uzyskane z pomiarów wykonanych dla procesu rozpuszczania cylindrycznych próbek NaCl w wodzie.



Rys. 3. Graficzna prezentacja wyników uzyskanych z procesu rozpuszczania ciała stałego w wodzie dla: a) pozycja 1 umieszczenia cylindrycznej próbki NaCl, b) pozycja 2 umieszczenia cylindrycznej próbki NaCl

Intensyfikację procesu wymiany masy za pomocą wirującego pola magnetycznego opisano w formie następującej zależności:

$$\frac{Sh-2}{Sc^{0.33}} = cTa_m^b \quad (4)$$

Zdecydowano się stopień wpływu liczby *Schmidta* na analizowany proces określić wykładnikiem równym 0,33, zgodnie z pracami [5, 6].

Linie ciągłe przedstawione na rys. 3 aproksymują uzyskane wyniki procesu wnikania masy. Współczynniki b i c dla tych rezultatów zostały wyznaczone za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Zależności korelujące wyniki pomiarów procesu wnikania masy intensyfikowanego wirującym polem magnetycznym są opisane następującymi równaniami:

$$\frac{Sh-2}{Sc^{0.33}} = 16Ta_m^{0.005} \quad (5a)$$

$$\frac{Sh-2}{Sc^{0.33}} = 21Ta_m^{0.012} \quad (5b)$$

Na podstawie uzyskanych wyników można sądzić, że proces wnikania masy od ciała stałego do cieczy wzrasta wraz z magnetyczną liczbą *Taylor*a, opisującą warunki hydrodynamiczne wytworzone przez wirujące pole magnetyczne: $Sh \sim Ta_m^{0.005}$ i $Sh \sim Ta_m^{0.012}$. Z porównania danych przedstawionych na rys. 3 oraz zależności korelujących (5a) i (5b) wynika, że intensyfikacja procesu rozpuszczania ciała stałego silnie zależy od miejsca wprowadzenia próbki. Jak wspomniano wcześniej, wywołane jest to niehomogenicznością stosowanego wirującego pola magnetycznego. W pobliżu ścianki zlewki obserwowane są większe wartości indukcji magnetycznej niż w środku zlewki. Powoduje to wytworzenie przez wirujące pole magnetyczne stanu hydrodynamicznego o intensywności malejącej w kierunku osi generatora pola, co przekłada się na intensyfikację procesu rozpuszczania ciała stałego.

Stosunkowo małe wartości magnetycznej liczby *Taylor*a świadczą o niewielkiej prędkości płynu wywołanej obecnością wirującego pola magnetycznego. Wytworzona w ten sposób burzliwość jest wystarczająca do wymywania warstwy dyfuzyjnej, charakteryzującej się potwierdzoną doświadczalnie wartością liczby *Sherwooda* $Sh = 2$. Umieszczenie próbki ciała stałego w pobliżu ścianki zlewki (pozycja 2 na rys. 2), gdzie obserwuje się największe wartości indukcji magnetycznej, wiąże się z uzyskaniem znacznie większych wartości magnetycznej liczby *Taylor*a, co świadczy o lepszych warunkach hydrodynamicznych do prowadzenia procesu rozpuszczania. Porównując wartości liczby *Sherwooda* dla obu pozycji umieszczenia próbki można powiedzieć, że intensyfikacja procesu wymiany masy w pobliżu punktu, w którym obserwuje się największe wartości indukcji magnetycznej jest o około 25% większa, niż dla tego samego procesu prowadzonego w środku zlewki.

Wnioski

Uogólnione w postaci zależności analitycznych wynik prac eksperymentalnych pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Przedstawiona analiza danych doświadczalnych pozwala stwierdzić, że istnieje wpływ wirującego pola magnetycznego na proces rozpuszczania ciała stałego w cieczy.
- Wykazano wpływ umieszczenia cylindrycznych próbek ciała stałego w cieczy na otrzymywane wartości bezwymiarowej liczby *Sherwooda*.
- Zaproponowano nową formę zależności uogólniającej (1), uwzględniającej wpływ wirującego pola magnetycznego na kinetykę wymiany masy.

LITERATURA

- [1] B. Bharathi, S. Kiran Appaji, B. Sanyasi Rao, G. J. V. Jagannadha Raku, P. Venkateswarlu: Chem. Eng. Process. **36**, 59 (1997).
- [2] A. Kannan, S. Khan Pathan: Chem. Eng. J. **102**, 45 (2004).
- [3] H. Hartmann, J. J. Derksen, H. E. A. van der Akker: Chem. Eng. Sci. **61**, 3025 (2006).
- [4] N. Prud'homme, D. Cachau-Herreillat, P. Papet, O. Cambon: J. Cryst. Growth **286**, 102 (2006).
- [5] R. Rakoczy, S. Masiuk: AIChE Journal, DOI 10.1002/aic.12097 (2010).
- [6] S. Masiuk: Chem. Eng. J. **83**, 139 (2001).
- [7] R. Rakoczy, S. Masiuk: Chem. Eng. Process. **48**, 1229 (2009).