

JERZY SĘK

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Modelowanie procesu rozdzielania się faz w emulsjach

Wprowadzenie

Zagadnienie stabilności emulsji jest jednym z ważnych problemów związanych z ich przetwórstwem i własnościami użytkowymi. Zazwyczaj zachowanie przez emulsje niezmienną w czasie strukturę jest jak najbardziej pożądaną cechą decydującą na przykład o sukcesie rynkowym danego produktu. Istnieją jednak procesy takie jak na przykład usuwanie tłuszczu w czasie przetwórstwa mleka, gdzie rozdzielanie faz powinno następować jak najszybciej.

Rozdzielanie się faz w emulsjach zazwyczaj nie polega na rozwarstwieniu się układu na czyste składniki. Znacznie częściej mamy do czynienia z tak zwanym procesem śmietankowania polegającym na gromadzeniu się górnej części naczynia warstwy stężonej emulsji o dużej zawartości fazy wewnętrznej. Jednocześnie w dolnej części naczynia tworzy się warstwa czystej fazy zewnętrznej o rosnącej wysokości. Proces ten nazywany jest również bardzo często antysedymencją ponieważ jego siłą napędową, tak jak w przypadku sedymentacji ciał stałych jest różnica gęstości faz ciągłej i rozproszonej. Literatura przedmiotu zawiera wiele modeli służących przewidywaniu szybkości rozdzielania się układów ciał stałe – ciecz. Nie istnieją natomiast żadne osobne modele do opisu szybkości przebiegu tego procesu w emulsjach. Celem przeprowadzonych badań było więc sprawdzenie przydatności własnego modelu do opisu takich procesów.

Równania modelowe

Proces rozwarstwiania się emulsji polega na unoszeniu się zazwyczaj ku górze, przeciwnie do kierunku działania sił grawitacji, kropeł fazy rozproszonej. Prędkość v tego procesu jest zazwyczaj przedstawiana jako zależność szybkości narastania warstwy wodnej w funkcji udziału objętościowego fazy rozproszonej w warstwie emulsji po danym czasie. Wykorzystuje się tutaj na przykład zmodyfikowane równanie *Stokesa* lub *Carmana* [1]. Modelowanie tego zjawiska może być także przeprowadzone z wykorzystaniem teorii *Kozenego-Carmana* opisującej opory przepływu cieczy przez warstwy ziarniste [2, 3]. Na podstawie istniejących zależności można wykazać, że siła tarcia ze strony płynu działająca na pojedynczą kroplę unoszącą się ku górze w sąsiedztwie innych kropeł może być wyrażona następującą zależnością:

$$F_N = C_K \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon} \frac{1}{d_p^2} \frac{V}{N} v_{KC} \eta \quad (1)$$

gdzie:

- V – całkowita objętość próbki emulsji,
- N – liczba kropeł fazy rozproszonej,
- d_p – średnia średnica kropeł fazy wewnętrznej w emulsji,

ε – porowatość emulsji czyli stosunek objętości zajmowanej przez fazę ciągłą w emulsji do całkowitej objętości próbki,

v_{KC} – prędkości ruchu kropeł fazy wewnętrznej ku górze,

η – lepkość fazy zewnętrznej w emulsji,

C_K – parametr.

Siłą napędową procesu rozdziału faz jest siła wynikająca z różnicy gęstości fazy ciągłej i rozproszonej. Wartość tej siły G_N można wyznaczyć dla kulistych kropeł za pomocą ogólnej znanej zależności [2]

$$G_N = \frac{\pi d_p^2}{6} (\rho_z - \rho_w) g \quad (2)$$

gdzie:

ρ_z – gęstość fazy zewnętrznej,

ρ_w – gęstość fazy wewnętrznej,

g – przyspieszenie ziemskie.

Zakładając, że w warunkach ruchu quasi-ustalonego wypadkowa sił działających na unoszącą się kroplę jest równa zero można przyrównać do siebie zależności (1) i (2) uzyskując

$$\frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_z - \rho_w) g = C_K \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon} \frac{1}{d_p^2} \frac{V}{N} u_0 \eta \quad (3)$$

Mnożąc obie strony równania (3) przez N oraz przez wyrażenie

$$\frac{(\rho_z - \rho_w) d_p^2}{\eta^2}$$

oraz wyznaczając objętość fazy wewnętrznej w emulsji za pomocą wzoru

$$V_w = \frac{\pi d_p^3}{6} N \quad (4)$$

można, po przekształceniach, uzyskać następujące równanie

$$(\rho_z - \rho_w)^2 \frac{d_p^3 g}{\eta^2} = C_K \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{v_{CK} d_p (\rho_z - \rho_w)}{\eta} \quad (5)$$

a stąd kolejną zależność pozwalającą przewidywać szybkość rozwarstwiania się emulsji

$$v_{KC} = K_C \frac{d^2 g}{\eta} (\rho_z - \rho_w) \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \quad (6)$$

gdzie $K_C = 1/C_K$

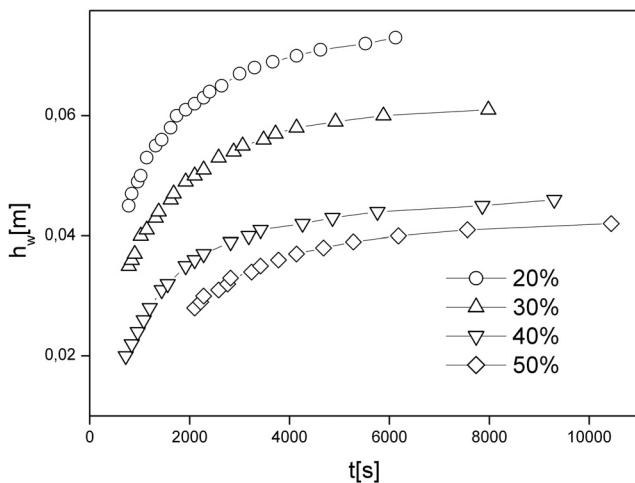
Ponieważ proces rozwarstwiania się faz w emulsji następuje od pewnej początkowej wartości wewnętrznej porowatości należy zależność (6) przekształcić do następującej postaci

$$v_{KC} = K_C \frac{d^2 g}{\eta} (\rho_z - \rho_w) \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} - K_{C0} \quad (7)$$

Badania eksperymentalne

Sprawdzenia przydatności wymienionych powyżej modeli dokonano korzystając z własnych wyników badań eksperymentalnych procesu rozwarstwiania się faz w emulsjach. Jako media wykorzystano emulsje typu olej w wodzie, w których fazę rozproszoną stanowiła nafta, a fazę zewnętrzną woda z dodatkiem 0,1% żelatyny jako środka zwiększającego lepkość i spowalniającego szybkość procesów rozwarstwiania się faz. Pomiarów lepkości fazy zewnętrznej dokonano za pomocą wiskozymetru *Hoepplera*, a gęstości mediów oznaczono piknometrycznie. Średnią średnicę kropelek fazy rozproszonej w emulsjach wyznaczano za pomocą mikroskopu połączonego z komputerowym systemem analizy obrazów. Przyjęto również, że średnia prędkość unoszenia się granicy pomiędzy fazami w badanych emulsjach jest wprost proporcjonalna do szybkości ruchu kropelek fazy wewnętrznej.

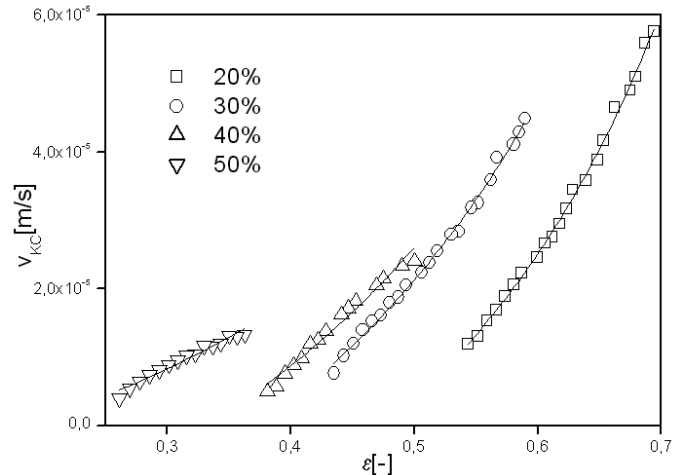
Przedstawione wyniki dotyczą czterech układów emulsyjnych, w których udziały objętościowe fazy wewnętrznej wynosiły 20, 30, 40, 50 procent. Podczas pomiarów rejestrowano zmiany wysokości h_w wydzielającej się warstwy wodnej w funkcji czasu tak jak to przedstawiono na wykresie (Rys. 1). Z wykresu tego wynika im wyższe stężenie fazy wewnętrznej tym niższa końcowa wysokość warstwy wodnej po ustaniu procesu rozdzielania się faz. Sam proces przebiega również znacznie wolniej.



Rys. 1. Wykres zależności $h = f(t)$

Korzystając z tych wyników pomiarów obliczono również zmiany szybkości przebiegu procesu rozwarstwiania się próbek emulsji v_{KC} oraz towarzyszące im zmiany porowatości warstwy emulsji ε w czasie. Zależność pomiędzy tymi wielkościami przedstawiono na wykresie (Rys. 2).

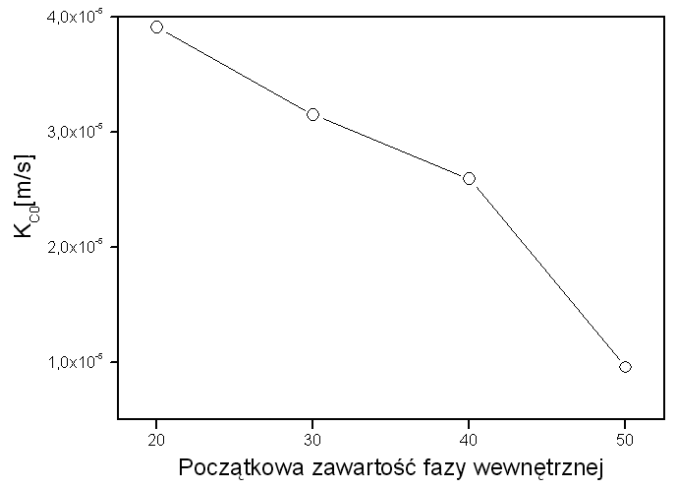
Z wykresu tego wynika, że największy przedział zmian porowatości oraz największy zakres zmian prędkości procesu



Rys. 2. Wykres zależności $v_{KE} = f(\varepsilon)$

rozwarstwiania się faz następuje dla emulsji o najniższym stężeniu fazy wewnętrznej.

Wyniki badań przedstawione na wykresie (Rys. 2) opisano za pomocą zależności (7). Można zauważyć, że zaproponowane równanie modelowe opisuje wyniki eksperymentów z dokładnością w pełni akceptowalną z inżynierskiego punktu widzenia. Stwierdzono, że wartości parametru K_C są bardzo bliskie jedności, a parametr K_{C0} jest wielkością zależną od początkowej zawartości fazy wewnętrznej w emulsji tak jak to przedstawiono na wykresie (Rys. 3).



Rys. 3. Zależność parametru K_{C0} od początkowej zawartości fazy wewnętrznej w emulsji

LITERATURA

1. J. Bandrowski, H. Merta, J. Ziolo: *Sedymentacja zawiesin*. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 1995.
2. Z. Kemblowski, Cz. Strumiłło, R. Zarzycki, St. Michałowski: *Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej*. WNT, Warszawa, 1985.
3. J. Sęk: *Wyznaczanie współczynników dyfuzji za pomocą modeli hydrodynamicznych w ciekłych układach jedno- i dwuskładnikowych*. ZN Politechnika Łódzka nr: 950, 2004.