

Jerzy SEK, Anna STRZELECKA

e-mail: jerzysek@p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Symulacje numeryczne procesu koalescencji w emulsjach spożywczych

Wstęp

Emulsje są jednym z często spotykanych produktów przemysłu spożywczego, kosmetycznego, włókienniczego, farb i lakierów, skórzanego, farmaceutycznego i innych. Ich znaczenie wzrasta ciągle, a każdy rok przynosi nowe metody i procesy z ich zastosowaniem. Emulsje są bardzo często bezpośrednio artykułami spożywczymi, ale również występują liczne półprodukty, które są tego rodzaju układami. Jedne z nich są produktami naturalnymi, jak np. mleko, śmietana, inne są otrzymywane sztucznie, np. emulsje do zwilżania form piekarskich, majonezy, sosy musztardowe i inne [1].

Emulsja jest układem, który przeważnie rozpatruje się jako układ dwufazowy: rozróżniamy fazę ciągłą i fazę rozproszoną. Faza ciągła stanowi ośrodek, w którym są zawieszone cząstki fazy rozproszonej o wymiarach od 0,5 do kilku mikrometrów. Jeśli jako kryterium podziału przyjmujemy charakter chemiczny faz, to możemy rozróżnić dwa typy emulsji. W przypadku, gdy woda stanowi fazę ciągłą, a ciecz organiczna fazę rozproszoną, mamy do czynienia z emulsją typu *olej w wodzie*. Emulsję typu odwrotnego określa się jako *woda w oleju*. Tutaj fazą ciągłą jest ciecz organiczna („olej”), a fazą rozproszoną – woda [1].

Mleko jest emulsją typu *olej w wodzie*, w której fazę olejową stanowią kropelki tłuszczu, fazę wodną – roztwór wodny białek, cukrów i soli mineralnych. Jest to ciecz nieprzezroczysta, która zawdzięcza swą białą barwę obecności w osoczu kropli tłuszczowych o średnicy od 0,1 do 10 μm . Stężenie fazy olejowej w emulsji może zmieniać się w stosunkowo szerokim zakresie, na przykład mleko kobyłe zawiera 1,17% tłuszczu, krowie 3,8%, podczas gdy mleko pewnych ssaków morskich może zawierać ponad 40% tłuszczu [1].

Jest rzeczą ogólnie znaną, że mleko pozostawione w naczyniu rozdziela się po pewnym okresie czasu na dwie warstwy. Górna warstwa zawiera kilkakrotnie wyższe stężenie kropli tłuszczu niż mleko w dolnej części naczynia. Górna warstwę możemy więc określić jako emulsję o wyższej zawartości fazy rozproszonej. Faza rozproszona w mleku składa się głównie z tłuszczu, ma więc mniejszą gęstość niż ośrodek wodny, w którym jest zawieszona i z tego powodu utrzymuje się w górnej części naczynia. Zjawisko to nosi nazwę *śmietankowania* [1]. Proces ten sprzyja zlewaniu się pojedynczych kropli fazy zdyspergowanej emulsji w coraz większe formacje. W krańcowym etapie doprowadza to do wydzielania się fazy wewnętrznej, czyli całkowitego rozbitcia emulsji. Jest to najgroźniejsza forma niestabilności emulsji i nosi nazwę koalescencji [2].

Rozdzielanie emulsji można przyspieszyć przez zwiększenie wartości sił masowych. Dokonuje się tego drogą wirowania. W ten sposób otrzymywana jest śmietana na skalę przemysłową. Siły odśrodkowe działające na emulsje podczas odwirowywania są wielokrotnie wyższe od siły ciężkości. Mogą ją przewyższać od 7 do 600 tysięcy razy [1].

Zagadnienie badania procesów przemieszczania się kropli fazy olejowej w emulsjach pod działaniem sił zewnętrznych są bardzo skomplikowane. Literatura przedmiotu pozwala na oszacowanie prędkości przemieszczania się zazwyczaj tylko jednej kropli poruszającej się w nieograniczonej objętości fazy zewnętrznej [3].

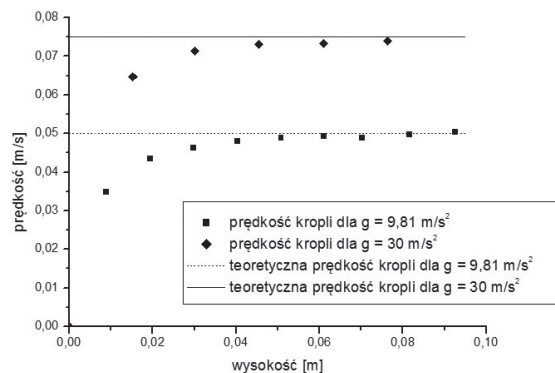
Zagadnienia przewidywania jednoczesnego ruchu wielu takich kropli są bardzo trudne do analitycznego opisu lub doświadczonego zbadania. Istniejące metody bezpośredniej obserwacji wizualnej jak i metody turbidymetryczno-nefelometryczne pozwalają w zasadzie śledzić narastanie wysokości warstwy wodnej wydzielającej się w czasie procesu *śmietankowania*. Zjawiska zachodzące wewnątrz powstającej warstwy śmietany są w zasadzie niedostępne dla metod obserwacyjnych. Jedyłą możliwością badania procesów tam zachodzących jest zastosowanie symulacji numerycznych.

Założenia i weryfikacja modelu numerycznego

W pracy podjęto próby analizy przebiegu procesu *śmietankowania* i koalescencji za pomocą programu *Fluent*. Siatki obliczeniowe stworzono korzystając z programu *Gambit*. W zależności od średnicy przepływających kropli stworzono dwie siatki. Dla kropli o średnicy $d = 1$ mm siatka miała rozmiar 5×10 cm, natomiast dla kropli o średnicy $d = 0,1$ mm miała rozmiar 5×10 mm. W każdej z nich zdefiniowano 200000 komórek. Symulacje opisane w tej pracy stanowią wstęp do badania zagadnień rozwarstwiania się emulsji. Ruch kropli o takich średnicach może dawać wstępną orientację dotyczącą zjawisk zachodzących w emulsjach podczas ich rozwarstwiania się.

W pierwszej kolejności przeprowadzono symulacje wstępne mające na celu określenie wiarygodności wykonywanych obliczeń. Zbadano przepływ pojedynczej kropli tłuszczu o średnicy 1 mm, na którą działało przyspieszenie $9,81 \text{ m/s}^2$. Następnie zwiększono działające na nią przyspieszenie do 30, a w ostatnim przypadku do 10000 m/s^2 . Uzyskane w wyniku tych badań średnie prędkości unoszących się kropli wynosiły dla każdego przypadku odpowiednio: $u_1 = 0,05 \text{ m/s}$ i $u_2 = 0,075 \text{ m/s}$. Przy największej wartości przyspieszenia następowało rozpadanie się kropli i nie można było zmierzyć jej prędkości poruszania się.

Przyjęto następujące wartości parametrów $d = 10^{-3} \text{ m}$ (średnica unoszącej się kropli), $\rho_F = 1000 \text{ kg/m}^3$ (gęstość ośrodka płynnego), $\rho = 781,8 \text{ kg/m}^3$ (gęstość unoszącej się kropli), $\eta_F = 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ (lepkość ośrodka płynnego) i wartości g odpowiednie dla każdego z przypadków. Następnie obliczono z zależności $\lambda Re^2 = f(Re)$ [3] teoretyczne wartości szybkości unoszenia się kropli. Wartości te porównano z prędkościami wyznaczonymi na podstawie wstępnych symulacji (Rys. 1). Wynika z niego, że obliczone teoretycznie prędkości mają zbliżone wartości do uzyskanych na drodze numerycznej. Można również zauważyć, że od pewnej wysokości naczynia, w którym się znajdują, krople poruszają się ruchem ustalonym.



Rys. 1. Zależności prędkości przepływającej kropli o średnicy 1 mm od wysokości

Symulacje numeryczne

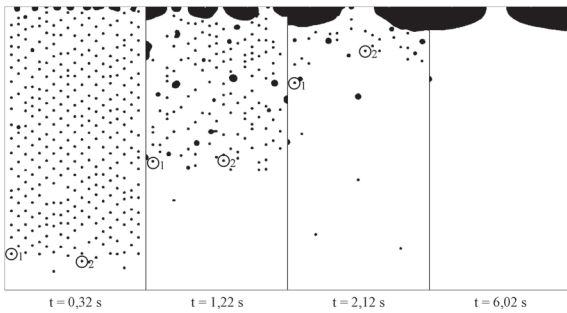
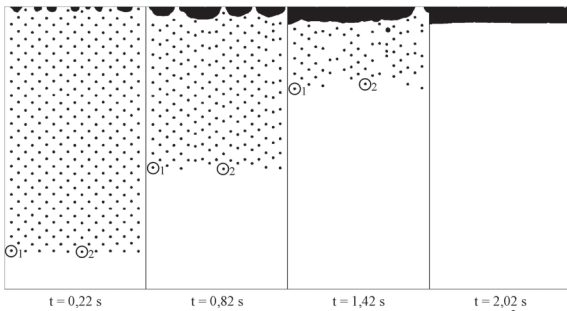
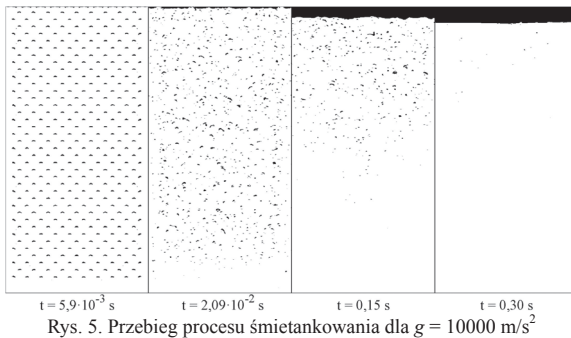
Zbudowano układ składający się z kropli o średnicy 1 mm przedstawiony na rys. 2. Jest on układem dwufazowym zawierającym 17% fazy rozproszonej o niższej gęstości niż faza ciągła (Rys. 2).

Na schematach rys. 3–5 przedstawiono zachowanie emulsji w trakcie procesu *śmietankowania* dla trzech różnych wartości przyspieszenia.

W pierwszym przypadku (Rys. 3) na układ działało przyspieszenie równe $9,81 \text{ m/s}^2$. Przy przepływie wielu kropli fazy wewnętrznej można było obserwować ich łączenie się w większe formacje – koalescencję. Nie poruszały się one ruchem prostoliniowym. Nastąpiła tutaj całkowita koalescencja kropli fazy rozproszonej w górnej części naczynia. Kształt



Rys. 2. Początkowe rozmieszczenie kropeł fazy rozproszonej

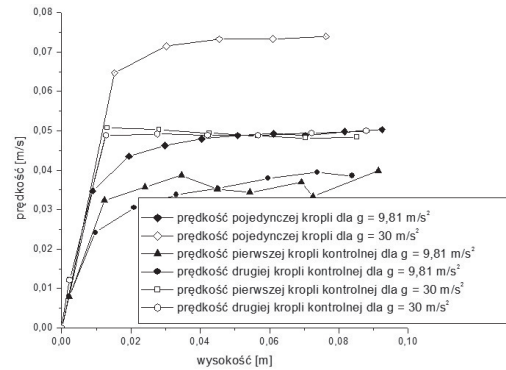
Rys. 3. Przebieg procesu śmietankowania dla $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ Rys. 4. Przebieg procesu śmietankowania dla $g = 30 \text{ m/s}^2$ Rys. 5. Przebieg procesu śmietankowania dla $g = 10000 \text{ m/s}^2$

kropeł pozostawał kulisty i nie następowała ich deformacja. Całkowity czas, po którym układ rozdzielił się wyniósł 7 sekund.

W drugim przypadku (Rys. 4) na układ działa siła w przybliżeniu trzykrotnie wyższa od poprzedniej. W tym przypadku krople poruszały się w sposób prostoliniowy, miały zbliżone do siebie prędkości i rzadziej łączyły się w większe formacje. Tak jak poprzednio, krople zachowywały kształt kulisty. Nastąpiło tutaj całkowite rozdzielenie się emulsji po 2 sekundach.

Przy przyspieszeniu wynoszącym 10000 m/s^2 (Rys. 5) można było zaobserwować deformacje kropeł, które również występowały przy przepływie pojedynczej kropli badanym w ramach prac weryfikacyjnych. Deformacje te były na tyle duże, że krople rozpadały się i łączyły ze sobą tworząc nieregularne formacje, które mogły również ulec rozpadowi. Czas rozwarstwienia się emulsji wyniósł 0,3 sekundy.

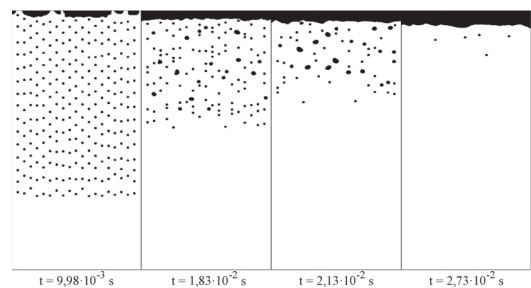
Porównano prędkość przepływu dwóch wybranych kropeł z dwóch pierwszych układów z prędkościami przepływu pojedynczych kropeł wyznaczonymi w ramach obliczeń weryfikujących (Rys. 6). Można za-



Rys. 6. Porównanie prędkości kropeł unoszących się w roju z prędkościami pojedynczych kropeł

uważyć, że prędkości kropeł poruszających się w otoczeniu innych są niższe od tych, które osiągają pojedyncze krople. W pierwszym przypadku prędkość kropeł kontrolnych w roju, oznaczonych na rys. 3, wynosiła $0,035 \text{ m/s}$. Jest ona nieznacznie niższa, od tej jaką osiągała pojedyncza kropla w takich samych warunkach. Mogło to być spowodowane częstym łączeniem się kropeł ze sobą, a co za tym idzie zmianą toru ruchu sąsiadujących kropeł. W drugim przypadku prędkość przepływu kropeł kontrolnych w roju, zaznaczonych na rys. 4, wynosiła $0,049 \text{ m/s}$. Była ona również mniejsza od tej, którą osiągała samotnie przepływająca kropla. W pierwszym przypadku wartość prędkości poruszających się kropeł kontrolnych wynosiła 70% wartości tej poruszającej się samotnie, natomiast w drugim 65,3%. W trzecim przypadku nie udało się zmierzyć prędkości poruszania się kropeł ze względu na ich ciągłe rozpadanie i łączenie się.

W ostatnim przypadku stworzono domenę podobną do poprzedniej, z tą różnicą, że zawierała ona krople o średnicy $0,1 \text{ mm}$. Sprawdzono jak zachowuje się taki układ poddany przyspieszeniu równym 10000 m/s^2 . Na rys. 7 można zaobserwować, że w tym przypadku nie zachodziły zjawiska rozpadu kropeł. Obserwowano natomiast łączenie się kropeł ze sobą. Krople też nie poruszały się ruchem prostoliniowym. Całkowity czas, po którym nastąpił rozdział emulsji wyniósł $2,8 \cdot 10^{-2}$ sekundy, co w przybliżeniu odpowiada prędkości rzędu $0,35 \text{ m/s}$. W przypadku ruchu pojedynczej kropli o takiej średnicy zarówno obliczona teoretycznie, jak i wyznaczone numerycznie prędkość unoszenia wynosiła około $0,5 \text{ m/s}$.

Rys. 7. Przebieg procesu śmietankowania dla $g = 10000 \text{ m/s}^2$

Przeprowadzone symulacje numeryczne pozwalają uzyskać obraz zjawisk jakie mogą zachodzić w roju unoszących się kropeł. Taka analiza tych zagadnień jest niedostępna przy stosowaniu klasycznych metod obserwacyjnych. Uzyskane wyniki pozwalają również ocenić wpływ całej struktury roju na prędkości przemieszczania się poszczególnych kropeł i określenie odstępstw od wartości obliczanych za pomocą zależności analitycznych.

LITERATURA

- [1] J. Gilewicz: Emulsje. PWN, Warszawa 1957.
- [2] J. Cygańska, J. Witwicka: Emulgatory i emulsje w przemyśle spożywczym. Wyd. Przemysłu Lekkiego i Spożywczego, Warszawa 1967.
- [3] M. Serwiński: Zasady inżynierii chemicznej, WNT, Warszawa 1971.