

ANNA KIELBUS-RAPAŁA
JOANNA KAR CZ

Instituto Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

Mieszanie układu trójfazowego ciecz – gaz – ciało stałe w zbiorniku z jednym lub dwoma mieszadłami

Wprowadzenie

Mieszane mechanicznie układy trójfazowe mają szerokie zastosowanie w przemyśle chemicznym jak i w przemysłach pokrewnych. Badaniami układów ciecz – gaz – ciało stałe zajmowało się wielu badaczy [1–9]. Typ zastosowanego mieszadła, minimalna częstość obrotów mieszadła, niezbędna do równoczesnego rozproszenia gazu i zawieszenia cząstek ciała stałego w cieczy, moc mieszania, udział gazu zatrzymanego w cieczy, wymiana masy i ciepła to główne zagadnienia stanowiące przedmiot tych badań.

Celem prezentowanej pracy była analiza eksperymentalna hydrodynamiki układu ciecz-gaz-ciało stałe w mieszalniku. Podstawę analizy stanowiły badania doświadczalne krytycznej częstości obrotów mieszadła n_{kr} , mocy mieszania P_{G-L-S} , udziału gazu ϕ zatrzymanego w cieczy oraz czasu t_R przebywania pęcherzyków gazu w układzie trójfazowym ciecz-gaz-ciało stałe w aparacie z jednym lub dwoma mieszadłami.

Część doświadczalna

Pomiary przeprowadzono w przezroczystym mieszalniku o średnicy wewnętrznej $D = 0,288$ m, wyposażonym w płaskie dno i cztery standardowe przegrody. Zbiornik wypełniony był cieczą do wysokości $H = D$ (objętość robocza płynu w zbiorniku $V_L = 0,02$ m³) lub $H = 2D$ ($V_L = 0,04$ m³). Zastosowano trzy typy mieszadeł szybkoobrotowych: mieszadło turbinowe *Rushtona*, turbinowe *Smitha* (CD 6) oraz A 315. Wszystkie mieszadła miały średnice $d = 0,33D$. Dodatkowo, w celu określenia wpływu średnicy mieszadła na badane wielkości przeprowadzono pomiary z zastosowaniem mieszadła A 315 o średnicy $d = 0,5D$. W układach z dwoma mieszadłami ($H = 2D$) na wspólnym wale w pozycji górnej montowano mieszadło *Rushtona*, natomiast jako dolne mieszadła A 315 lub CD 6. Gaz doprowadzany był do mieszalnika za pomocą pierścieniowego dystrybutora o średnicy $d_d = 0,7d$ umieszczonego w odległości $e = 0,5d$ od dna zbiornika.

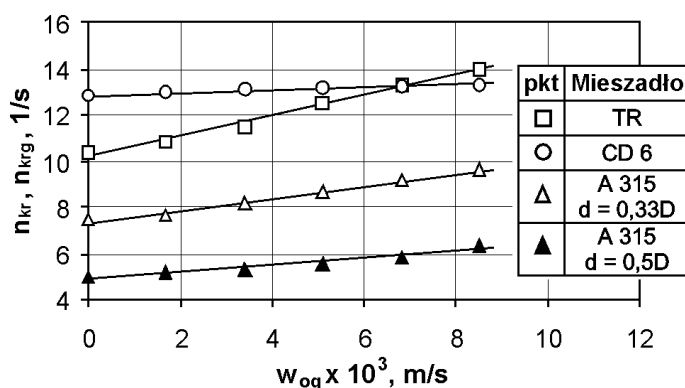
Badane układy trójfazowe różniły się zdolnością do koalescencji pęcherzyków gazu w cieczy. Cieczami były: woda destylowana oraz wodne roztwory elektrolitu (chlorku sodu) o stężeniach 0,4 oraz 0,8 kmol/m³. Fazą gazową było powietrze, fazą stałą cząstki piasku o średniej średnicy $d_p = 335$ μ m. Pomiary przeprowadzono przy różnych wartościach częstości obrotów mieszadła wyższych od krytycznej częstości obrotów mieszadła n_{kr} dla każdego z badanych układów. Pozostałymi zmiennymi parametrami były objętościowe natężenie przepływu gazu $\dot{V}_g \in <0; 5,56 \cdot 10^{-4}>$ m³/s (umowna liniowa

prędkość gazu w zakresie $w_{og} \in <0; 8,53 \cdot 10^{-3}>$ m/s) oraz stężenie cząstek ciała stałego $X \in <0; 5>$ % mas.

Krytyczną częstość obrotów mieszadła dla układu trójfazowego określono w oparciu o kryterium *Zwieteringa* [10]. Moc mieszania mierzono metodą tensometryczną. Udział gazu zatrzymanego w układzie określono na podstawie pomiaru wysokości słupa cieczy oraz mieszaniny trójfazowej odczytanych z podziałki umieszczonej na ścianie mieszalnika.

Wyniki

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych określono krytyczną częstość obrotów mieszadła n_{kr} dla każdej geometrii układu. Otrzymane wyniki pozwoliły na określenie wpływu typu mieszadła, jego średnicy, stężenia fazy stałej, oraz parametrów operacyjnych na warunki powstawania układu trójfazowego w mieszalniku. Zarówno w aparacie z jednym jak i dwoma mieszadłami krytyczne częstości obrotów mieszadła niezbędne do wytworzenia układu ciecz – gaz – ciało stałe, silnie zależą zarówno od stężenia cząstek fazy stałej jak i ilości doprowadzanego gazu. Wartości n_{kr} zwiększały się ze zwiększaniem stężenia X oraz umownej liniowej prędkości gazu w_{og} dla każdego typu mieszadła. W zbiorniku z pojedynczym mieszadłem największy wzrost n_{kr} ze wzrostem w_{og} zaobserwowano w przypadku mieszadła turbinowego natomiast największy wzrost n_{kr} ze wzrostem X dla mieszadła CD 6. Wpływ typu mieszadła na wartość krytycznej częstości obrotów ilustruje rys. 1. Wytwarzające promieniowy przepływ płynu mieszadła turbinowe wymagały znacznie wyższych n_{kr} , w porównaniu z mieszadłem A 315. Zwiększe-



Rys. 1. Zależność n_{kr} , $n_{kr} = f(w_{og})$ dla różnych mieszadeł; faza ciecia: woda destylowana; $X = 2,5$ % mas.

nie średnicy tego mieszadła umożliwiło znaczą redukcję n_{kr} . W aparacie z dwoma mieszadłami znacznie wyższe wartości n_{kr} charakteryzowały zestaw TR-CD 6.

Zależność krytycznych częstości obrotów mieszadła n_{kr} dla układu ciecz – gaz – ciało stałe, wytwarzanego w mieszalniku z pojedynczym mieszadłem, w funkcji krytycznych częstości obrotów mieszadła n_{kr} dla układu dwufazowego ciecz – ciało stałe, średniego udziału X cząstek ciała stałego w układzie oraz objętościowego natężenia przepływu gazu Q_{GV} [vvm = (m³/min)/m³] opracowano matematycznie w postaci równania:

$$n_{kr} = f(n_{kr}, X, Q_{GV}) = n_{kr}(X)[1 + a(X)Q_{GV}], \quad [1/s] \quad (1)$$

Równanie (1) jest słuszne w następujących zakresach zmiennych: $0 \leq X$ [% wag.] $\leq 0,05$; $0 \leq Q_{GV}$ [vvm] $\leq 1,78$. Szczegółowe równania otrzymane dla każdego typu testowanych mieszadeł, zebrano w tablicy 1. Średni błąd aproksymacji równań wynosi $\pm 4\%$.

Wyniki pomiarów mocy mieszania P_{G-L-S} umożliwiły obliczenie średniej jednostkowej energii rozpraszanej ϵ_{kr} [W/kg], odpowiadającej krytycznym częstościom obrotów mieszadła n_{kr} wyrażonej, jako stosunek mocy mieszania do jednostki masy układu.

Wyniki dotyczące jednostkowej energii rozpraszanej opracowano matematycznie w postaci zależności ϵ_{kr} , odpowiadającej krytycznym częstościom obrotów mieszadła n_{kr} dla układu trójfazowego, w funkcji jednostkowej energii ϵ_{kr} , opowiadającej krytycznym częstościom obrotów mieszadła n_{kr} w układzie ciecz – ciało stałe, średniego udziału X cząstek fazy stałej w układzie oraz natężenia przepływu gazu Q_{GV}

$$\epsilon_{kr} = f(\epsilon_{kr}, X, Q_{GV}) = \epsilon_{kr}(X)[1 + a(X)Q_{GV}] \quad [1/s] \quad (2)$$

Szczegółowe postaci funkcji $\epsilon_{kr}(X)$ oraz $a(X)$ otrzymane dla każdego z testowanych mieszadeł, zebrano w tablicy 2. Równania są słuszne w zakresach przeprowadzonych badań.

Doświadczalne wyniki badań zawartości gazu w płynie w układzie trójfazowym opracowano w postaci zależności, wiążącej udział gazu ϕ z jednostkową mocą mieszania P_{G-L-S}/V_L , umowną liniową prędkością gazu w_{og} oraz stężeniem cząstek fazy stałej X w układzie

$$\phi = A \left(\frac{P_{G-L-S}}{V_L} \right)^B w_{og}^C X^D \quad (3)$$

Szczegółowe wartości współczynnika A oraz wykładników B , C , D w równaniu (3) dla różnych typów mieszadeł, pracujących w układach: wykazującym oraz nie wykazującym zdolności do koalescencji pęcherzyków gazu w cieczy, zestawiono w tablicy 3. Równanie (3) obowiązuje w następujących zakresach:

Tablica 1
Zależności $n_{kr} = n_{kr}(X)[1 + a(X)Q_{GV}]$ dla różnych mieszadeł

Mieszadło	Zależność	Numer równania
Turbinowe <i>Rushтона</i> (RT)	$n_{kr} = (65,2X + 8,43)[1 + (0,229 - 1,19X)Q_{GV}]$	(1 – 1)
Turbinowe <i>Smitha</i> (CD 6)	$n_{kr} = (81,9X + 10,2)[1 + (0,035 - 0,27X)Q_{GV}]$	(1 – 2)
A 315; $d/D = 0,33$	$n_{kr} = (67,6X + 6,34)[1 + (0,19 - 1,74X)Q_{GV}]$	(1 – 3)
A 315; $d/D = 0,5$	$n_{kr} = (47,5X + 3,57)[1 + (0,153 - 0,69X)Q_{GV}]$	(1 – 4)

Tablica 2
Szczegółowe postaci funkcji $\epsilon_{kr}(X)$ oraz $a(X)$ dla różnych mieszadeł

Mieszadło	$\epsilon_{kr}(X)$	$a(X)$	$\pm\Delta$, [%]
Turbinowe <i>Rushтона</i> (RT)	$(65,4X + 0,912)$	$(0,165 - 3,99X)$	24
Turbinowe <i>Smitha</i> (CD 6)	$(32,08X + 0,781)$	$(-0,115 + 0,89X)$	4,6
A 315; $d/D = 0,33$	$(10,79X + 0,049)$	$(0,043 - 1,492X)$	25

Tablica 3
Wartości współczynnika A oraz wykładników B , C , D w równaniu (3)

Mieszadło	Liquid phase	$A \cdot 10^2$	B	C	$D \cdot 10^2$	$\pm\Delta$	Punkty dośw.
Turbinowe <i>Rushтона</i> (RT)	Woda destylowana	7,788	0,515	0,368	-4,275	8,5	100
Turbinowe <i>Smitha</i> (CD 6)		1,495	0,585	0,562	-5,670	8,1	98
A 315; $d/D = 0,33$		18,94	0,200	0,522	-7,819	18,2	108
Turbinowe <i>Rushтона</i> (RT)	Wodny roztwór NaCl o stężeniu 0,4 kmol/m ³	0,009	0,422	0,182	-0,01	5,4	91
Turbinowe <i>Smitha</i> (CD 6)		0,007	0,645	0,419	-0,022	4,5	92
A 315; $d/D = 0,33$		0,043	0,457	0,639	-0,179	8,7	113
Turbinowe <i>Rushтона</i> (RT)	Wodny roztwór NaCl o stężeniu 0,8 kmol/m ³	0,003	0,536	0,154	-0,012	5,7	96
Turbinowe <i>Smitha</i> (CD 6)		0,005	0,659	0,32	-0,024	6,3	93
A 315; $d/D = 0,33$		0,087	0,49	0,672	0,045	8,1	118

X [% wag.] $\in <0; 0,05>$; $w_{og} \cdot 10^{-3}$ [m/s] $\in <1,71; 8,53>$; liczba *Reynoldsa* $Re \cdot 10^4 \in <6,7; 12,9>$.

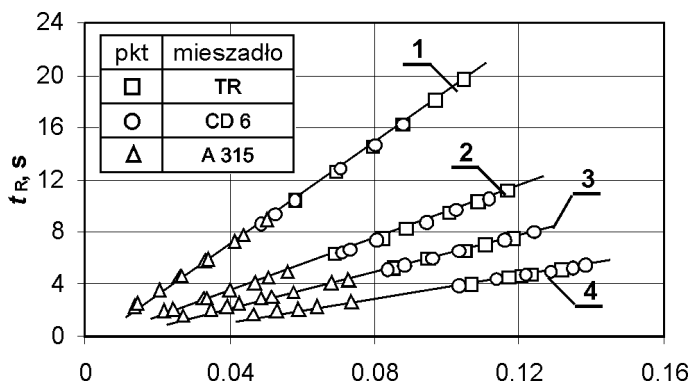
Przydatność danego mieszadła do utrzymania pęcherzyków gazu rozproszonych w płynie może być oszacowana na podstawie średniego czasu przebywania t_R tych pęcherzyków w układzie. Znając udział ϕ gazu, średni czas t_R można obliczyć z zależności [9]

$$t_R = \frac{V_L \phi}{V_G (1 - \phi)} \quad (4)$$

gdzie:

- V_G – objętościowe natężenie przepływu gazu, [m³/s],
- V_L – objętość cieczy, [m³].

Na rys. 2 porównano zależności $t_R = f(\phi)$ otrzymane dla różnych mieszadeł przy różnych wartościach umownej liniowej prędkości gazu. W układach nie wykazujących zdolności do koalescencji, średni czas przebywania pęcherzyków gazu w płynie był dłuższy w porównaniu z danymi uzyskanymi dla układu wykazującego taką zdolność. W zakresie przeprowadzonych pomiarów wartość t_R nieznacznie malała ze zwięk-



Rys. 2. Zależność $t_R = f(\varphi)$ dla układu trójfazowego; różne mieszadła; faza ciekła: wodny roztwór NaCl ($0,4 \text{ kmol/m}^3$); $w_{og} \neq \text{const}$; 1 - $w_{og} = 1,71 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, 2 - $w_{og} = 3,41 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, 3 - $w_{og} = 5,12 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, 4 - $w_{og} = 8,53 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, $X = 2,5\% \text{ mas.}$

szaniem stężenia cząstek X w układzie nie wykazującym zdolności do koalescencji.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza eksperymentalna wytwarzania układu trójfazowego pozwoliła na określenie wpływu różnych parametrów fizycznych, operacyjnych oraz geometrycznych na badane wielkości. Krytyczna częstość obrotów mieszadła wzrasta ze wzrostem objętościowego natężenia przepływu gazu oraz stężenia cząstek fazy stałej w układach z jednym i dwoma mieszadłami. W aparacie z pojedynczym mieszadłem największy wpływ gazu na wartość n_{krg} zaobserwowano dla układu z mieszadłem turbinowym *Rushtona*, natomiast największy wpływ stężenia fazy stałej stwierdzono dla układu z mieszadłem CD 6. Stopień zatrzymania gazu wzrasta ze wzrostem umownej liniowej prędkości gazu, w każdym z badanych układów trójfazowych i osiąga wyższe wartości w układach nie wykazujących zdolności do koalescencji. W układach z elektrolitem, jako fazą ciągłą, zaobserwowano

nieznaczny spadek φ ze wzrostem stężenia cząstek. Analiza otrzymanych wyników pod kątem efektywności pracy mieszadła wykazała, że mieszadło A 315, umożliwiające wytworzenie układu trójfazowego przy niższych wartościach krytycznych częstości obrotów n_{krg} , (a tym samym niższych ϵ_{krg}) charakteryzuje się równocześnie względnie niskim udziałem gazu zatrzymanego w płynie oraz krótkim czasem przebywania pęcherzyków gazu w układzie. Generujące promieniowy przepływ cieczy w zbiorniku mieszadła turbinowe *Rushtona* i *Smitha* charakteryzują się dużym zapotrzebowaniem energii, pozwalają jednak uzyskać znacznie dłuższy czas t_R oraz osiągnąć wyższy stopień zatrzymania gazu w układzie trójfazowym. Do wytwarzania układu ciecz – gaz – ciało stałe w aparacie z dwoma mieszadłami korzystniej jest zastosować zestaw TR–CD 6.

Na podstawie danych doświadczalnych, dla każdego mieszadła opracowano matematyczne zależności pozwalające na obliczenie n_{krg} , jednostkowej mocy mieszania ϵ_{krg} oraz udziału gazu φ zatrzymanego w układzie.

LITERATURA

1. J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych. Warszawa, WNT, 2004.
2. W. Bujalski, A.W. Nienow, L.Huoxing: Chem. Eng. Sci., **45**, (2), 415 (1990).
3. C.M. Chapman, A.W. Nienow, M. Cooke J.C. Middleton: Chem. Eng. Res. & Des., **61** (3), 167 (1983a).
4. C.M. Chapman, A.W. Nienow, M. Cooke J.C. Middleton: Chem. Eng. Res. & Des., **61** (3), 182 (1983b).
5. N. Dohi, Y.Matsuda, N. Itano, K. Shimizu, K. Minekawa Y. Kawase: Chem. Engineering Comm., **171**, 211 (1999).
6. N. Dohi, T. Takahashi, K. Minekawa, Y. Kawase: Chem. Eng. J., **97**, 103 (2004).
7. N.N. Dutta, V.G Pangarkar: Can. J. Chem. Eng., **73**, 273 (1995).
8. J.J. Frijlink, A. Bakker, J.M. Smith: Chem. Eng. Sci., **45**, (7), 1703 (1990).
9. S.S. Alves, C.I. Maia, J.M.T. Vasconcelos: Proceed. edited by VDI-GVC Pp. 237-244, 11th European Conf. on Mixing, Bamberg, Germany, (2003).
10. T.N. Zwietering: Chem. Eng. Sci., **8**, 3/4, 244 (1958).

INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA

Czasopismo naukowo-techniczne

- poświęcone problemom obliczeń procesowych i zagadnieniom projektowo-konstrukcyjnym aparatury i urządzeń dla przemysłów przetwórczych, w tym szczególnie dla przemysłu chemicznego, jak również dla energetyki, gospodarki komunalnej i ochrony środowiska;
- prezentujące procesy i operacje jednostkowe w aspekcie poprawy wydajności, lepszego wykorzystania surowców, oszczędności energii, ochrony środowiska; omawiające badania naukowe, nowe lub ulepszone konstrukcje oraz właściwą eksploatację i obsługę aparatów i urządzeń;
- przeznaczone dla pracowników badawczych, projektantów, konstruktorów, a także menadżerów i inżynierów ruchomych.

Artykuły główne są recenzowane przez specjalistów.