

Magdalena CUDAK, Mateusz ROZDEBA

e-mail: cudak@zut.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

Analiza wpływu wybranych parametrów na udział gazu zatrzymanego w cieczy dla układu biofaza-gaz-ciecz w mieszalniku z dwoma mieszadłami

Wstęp

Uzyskanie określonego udziału φ gazu zatrzymanego w cieczy wymaga dobrania odpowiednich parametrów fizycznych i operacyjnych oraz konfiguracji mieszadeł. Mieszadła stosowane do układów trójfazowych ciało stałe (biofaza)-gaz-ciecz powinny dobrze rozpraszać fazę gazową i biofazę. Ze względu na to, że inne mieszadła równomiernie rozpraszają gaz w całej objętości zbiornika, a inne zawieszają cząstki ciała stałego (biofazy) w cieczy korzystnym rozwiązaniem jest montaż na wale więcej niż jednego mieszadła [Stręk, 1981; Kamiński, 2004].

Wpływ wybranych parametrów (np. liczby i typu mieszadła, częstości obrotów mieszadła n , objętościowego natężenia przepływu gazu V_g , gęstości i lepkości fazy ciekłej) na udział φ gazu zatrzymanego w cieczy w mieszalniku z więcej niż jednym mieszadłem był przedmiotem wielu badań [Moucha i in., 2003; Adamiak, 2005; Karcz i in., 2007; Kamiński i Spytkowski, 2011; Kielbus, 2011]. Jednak w dalszym ciągu w literaturze przedmiotu niewiele jest prac dotyczących wpływu tych parametrów na udział gazu φ zatrzymanego w cieczy dla układu trójfazowego w mieszalniku z wieloma mieszadłami [Karcz i Kielbus, 2003; Bao i in., 2005; Spytkowski, 2014].

Badania przedstawione w niniejszej pracy miały na celu określenie wpływu takich parametrów jak: pozorna prędkość przepływu gazu w_{og} , częstość obrotów mieszadła n , stężenie sacharozy x , a także konfiguracja mieszadeł na udział φ gazu zatrzymanego w cieczy dla układu biofaza-gaz-ciecz w mieszalniku z dwoma mieszadłami.

Badania doświadczalne

Aparatura. Badania udziału φ gazu zatrzymanego w cieczy wykonano w zbiorniku o średnicy wewnętrznej $D = 0,288$ m oraz wysokości słupa mieszaniny biofaza-ciecz $H = 2D$. W mieszalniku znajdowały się cztery przegrody o szerokości $B = 0,1D$. Płyn mieszano jednym z trzech zestawów mieszadeł. Jako górne stosowano zawsze mieszadło turbinowe Rushtona (TR, $Z = 6$), a jako dolne – wymiennie mieszadła: turbinowe Rushtona, turbinowe Smitha (CD 6, $Z = 6$) lub A 315 ($Z = 4$). Mieszadła o średnicy $d = 0,33D$ były zamontowane na wale w odległości $h_1 = 0,167H$ oraz $h_2 = 0,67H$ od płaskiego dna mieszalnika. Pierścieniowy dystrybutor gazu o średnicy $d_d = 0,7d$ był umieszczony w połowie odległości między mieszadłem a dnem mieszalnika.

Materiały. Fazę ciekłą stanowił wodny roztwór sacharozy o trzech różnych stężeniach masowych wynoszących kolejno 1%, 2,5% oraz 5%, fazą gazową było powietrze, a biofazą - zawiesina drożdży o stężeniu masowym 0,5%.

Zakres badań. Parametry fizyczne układu zmieniały się w następujących zakresach: η [Pas] $\in <1,7 \cdot 10^{-3}; 2,8 \cdot 10^{-3}>$, ρ [kg/m³] $\in <1003; 1014>$, σ [N/m] $\in <0,072; 0,084>$. Badania przeprowadzono, w zakresie burzliwego przepływu cieczy w zbiorniku ($Re \in <18000; 60000>$), dla trzech wartości natężenia przepływu V_g powietrza przez mieszalnik (V_g [m³/s] $\in <1,11 \cdot 10^{-4}; 2,78 \cdot 10^{-4}>$), (w_{og} [m/s] $\in <1,7 \cdot 10^{-3}; 4,28 \cdot 10^{-3}>$), gdzie: $w_{og} = 4V_g/(\pi D^2)$.

Metodyka Udział gazu zatrzymanego w cieczy obliczano jako:

$$\varphi = \frac{h_{b-g-c}}{h_{b-g-c} + H} \quad (1)$$

gdzie:

h_{b-g-c} – różnica między wysokością słupa mieszaniny biofaza-gaz-

ciecz a wysokością słupa mieszaniny biofaza-ciecz, [m]

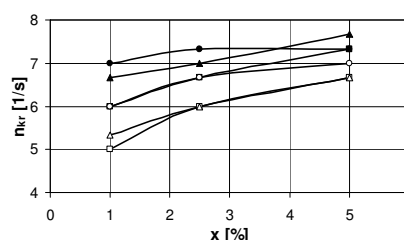
Wartość h_{b-g-c} , określano jako średnią z 10 odczytów przyrostu wysokości słupa mieszaniny biofaza-gaz-ciecz na pionowej ścianie mieszalnika.

H – wysokość słupa mieszaniny biofaza-ciecz, [m]

Wyniki i dyskusja

Wpływ pozornej prędkości przepływu gazu w_{og} , częstości obrotów mieszadła n , typu konfiguracji mieszadeł oraz stężenia sacharozy x w układzie na udział gazu zatrzymanego w cieczy określono na podstawie około 400 punktów pomiarowych uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań.

Wartości krytycznej częstości obrotów mieszadła n_{kr} , niezbędnych do rozproszenia gazu i biofazy w cieczy, przedstawiono na rys. 1. Wartości krytycznej częstości obrotów mieszadła n_{kr} , od których rozpoczynano pomiary, zwiększały się zarówno ze wzrostem stężenia x sacharozy w wodnym roztworze, jak i pozornej prędkości przepływu gazu w_{og} w układzie.

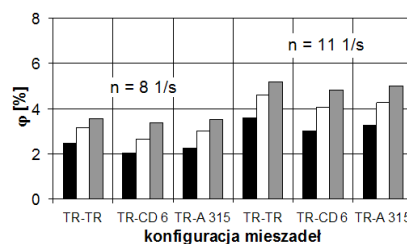


Rys. 1. Zależność $n_{kr} = f(x)$; ■, □ – TR-TR; ▲, △ – TR-CD6; ●, ○ – TR-A 315; □, △, ○ – $w_{og} = 1,71 \cdot 10^{-3}$ m/s; ■, ▲, ● – $w_{og} = 4,28 \cdot 10^{-3}$ m/s

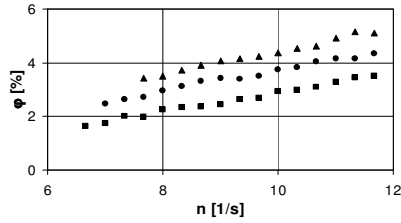
Zależność $\varphi = f(n)$, dla różnych konfiguracji mieszadeł przedstawiono na Rys. 2-4. Największe wartości udziału gazu φ zatrzymanego w cieczy uzyskano dla konfiguracji mieszadeł TR-TR (Rys. 2).

Udział gazu zatrzymanego w cieczy, we wszystkich analizowanych przypadkach, zwiększa się ze wzrostem częstości obrotów mieszadła n . Największy wpływ częstości obrotów mieszadła n (ponad 2,5-krotny) na udział φ gazu zatrzymanego w cieczy stwierdzono dla konfiguracji mieszadeł TR-CD 6 (Rys. 3, 4). Wpływ ten maleje ze wzrostem pozornej prędkości przepływu gazu w_{og} .

Udział φ gazu zatrzymanego w cieczy, przy założeniu stałej wartości częstości obrotów mieszadła n oraz stałej wartości stężenia x sacharozy w układzie zwiększa się, prawie dwukrotnie, ze wzrostem pozornej prędkości przepływu gazu w_{og} (Rys. 2-4).

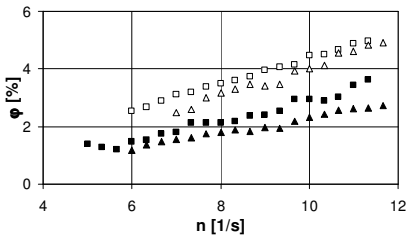


Rys. 2. Zależność $\varphi = f(\text{konfiguracji mieszadeł})$ dla układu 0,5% zawiesina drożdży - powietrze - 2,5% wodny roztwór sacharozy; ■ – $w_{og} = 1,71 \cdot 10^{-3}$ m/s; □ – $w_{og} = 2,99 \cdot 10^{-3}$ m/s; ■ – $w_{og} = 4,27 \cdot 10^{-3}$ m/s



Rys. 3. Zależność $\varphi = f(n)$ dla układu 0,5% zawiesina drożdży – powietrze – 5% wodny roztwór sacharozy; konfiguracja mieszadeł: TR-CD6; ■, – $w_{og} = 1,71 \cdot 10^{-3}$ m/s; ●, – $w_{og} = 2,99 \cdot 10^{-3}$ m/s; ▲, – $w_{og} = 4,28 \cdot 10^{-3}$ m/s

Wpływ pozornej prędkości przepływu gazu w_{og} na udział φ gazu zatrzymanego w cieczy maleje ze wzrostem częstości obrotów mieszadła n .



Rys. 4. Zależność $\varphi = f(n)$ dla układu 0,5% zawiesina drożdży – powietrze – 1% wodny roztwór sacharozy; ■, ▲ – $w_{og} = 1,71 \times 10^{-3}$ m/s; □, Δ – $w_{og} = 4,28 \times 10^{-3}$ m/s; ■, □ – TR-TR; ▲, Δ – TR-A 315

Wpływ stężenia x sacharozy w roztworze na udział φ gazu zatrzymanego w cieczy jest znacznie mniejszy niż pozostałych parametrów. W większości przypadków, przy założeniu $n = \text{const}$ i $w_{og} = \text{const}$, stwierdzono wzrost udziału gazu φ zatrzymanego w cieczy, dochodzący do 40%, ze wzrostem stężenia x . (Rys. 5). Zależność $\varphi = f(Kg)$ dla wybranych układów przedstawiono na Rys. 6-7.

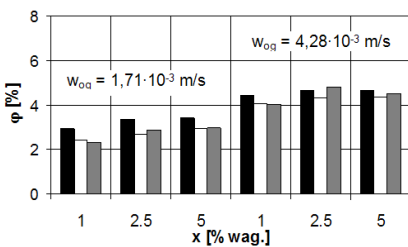
Udział φ gazu zatrzymanego w cieczy znacząco zmniejsza się ze wzrostem liczby przepływu gazu Kg ($w_{og} = \text{const}$), niezależnie od wartości w_{og} . Ze wzrostem pozornej prędkości przepływu gazu w_{og} , przy założeniu stałej wartości liczby przepływu gazu Kg , udział gazu φ zatrzymanego w cieczy zwiększa się ponad dwukrotnie (Rys. 6). Przy założeniu $Kg = \text{const}$, stwierdzono również nieznaczny wzrost udziału φ gazu zatrzymanego w cieczy ze wzrostem stężenia x sacharozy w wodnym roztworze. Wpływ ten zależy od wartości pozornej prędkości przepływu gazu w_{og} .

Wpływ liczby przepływu gazu Kg , liczby Webera We oraz stężenia x sacharozy w układzie na udział φ gazu zatrzymanego w cieczy opracowano w postaci równania (2)

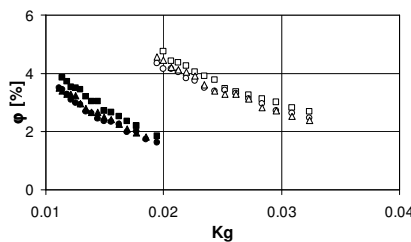
$$\varphi = aKg^b We^c (1 + dx)^g \quad (2)$$

gdzie:

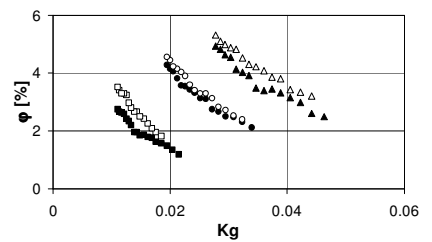
$$We = \frac{n^2 d^3 \rho}{\sigma}; \quad Kg = \frac{V_g}{nd^3}$$



Rys. 5. Zależność $\varphi = f(x)$ dla $n = 10$ 1/s; ■ – TR-TR; □ – TR-CD6; ▣ – TR-A315



Rys. 6. Zależność $\varphi = f(Kg)$ dla układu 0,5% zawiesina drożdży – powietrze – 5% wodny roztwór sacharozy; ■, ●, ▲ – $w_{og} = 1,71 \cdot 10^{-3}$ m/s; □, ○, Δ – $w_{og} = 2,99 \cdot 10^{-3}$ m/s; ■, □ – TR-TR; ●, ○ – TR-CD6; ▲, Δ – TR-A 315



Rys. 7. Zależność $\varphi = f(Kg)$, TR-A315; ■, □ – $w_{og} = 1,71 \cdot 10^{-3}$ m/s; ●, ○ – $w_{og} = 2,99 \cdot 10^{-3}$ m/s; ▲, Δ – $w_{og} = 4,28 \times 10^{-3}$ m/s; ■, ● – $x = 1\%$; □, ○, Δ – $x = 5\%$

Tab. 1. Wartości współczynników a, d oraz wykładników b, c, g w równ. (2)

Konfiguracja	$a \cdot 10^4$	b	c	d	g	$\pm \Delta$
TR - TR	6,572	0,42	0,79	30,20	0,28	5
TR - CD6	6,869	0,54	0,82	63,90	0,22	5
TR - A 315	4,665	0,52	0,86	129,88	0,21	5

Równanie (2) obowiązuje w zakresie:

$$Kg \in <0,01; 0,06>; \quad We \in <290; 1650>; \quad x \in <0,01; 0,1>$$

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w przypadku mieszalnika z dwoma mieszadłami największe wartości udziału φ gazu zatrzymanego w cieczy uzyskano dla konfiguracji mieszadeł TR-TR.

Największy wpływ na udział φ gazu zatrzymanego w cieczy ma częstość obrotów mieszadła n . Zwiększenie częstości obrotów mieszadła z $n = 6$ 1/s do $n = 11$ 1/s ($w_{og} = \text{const}$; $x = \text{const}$) powoduje nawet 2,5-krotny wzrost udziału gazu φ zatrzymanego w cieczy.

Wpływ pozornej prędkości przepływu gazu w_{og} na udział φ gazu zatrzymanego w cieczy jest nieco mniejszy.

Wpływ pozostałych dwóch parametrów: typu konfiguracji mieszadeł oraz stężenia x sacharozy w wodnym roztworze na φ jest znacznie mniejszy i wynosi odpowiednio 30% i 40%.

LITERATURA

- Adamiak R., (2005). *Badania warunków dyspergowania gazu w cieczy w mieszalnikach różnej skali*. Praca doktorska, Pol. Szczecińska.
- Kamieński J., Spytkowski S., (2011). Dyspergowanie gazu w cieczy w aparacie z dwoma oddzielnie napędzanymi mieszadłami. *Inż. Ap. Chem.*, 50(4), 26-27
- Kamieński J., (2004). *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa
- Karcz J., Kielbus A., (2003). Postępy w badaniach mieszanego mechanicznie układu trójfazowego ciecz-gaz-ciało stałe. *Inż. Ap. Chem.*, 42(5), 84-85
- Karcz J., Adamiak R., Kielbus A., (2007). Agitation of gas-liquid system. Scale-up effects on the process characteristics. *Inż. Chem.Proc.*, 28,(1), 93-113
- Kielbus A., (2011). Analiza hydrodynamiki układu ciecz-gaz w zbiorniku z dwoma mieszadłami. *Inż. Ap. Chem.*, 50(4), 18-19
- Moucha T., Linek V., Prokopowa E., (2003). Gas hold-up, mixing time and gas-liquid volumetric mass transfer coefficient of various multiple configurations: Rushton turbine, pitched blade and Techmix impeller and their combinations. *Chem. Eng. Sci.*, 58(9), 1839-1846. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00682-6
- Bao Y., Hao Z., Gao Z., Shi L., Smith J.M., (2005). Suspension of buoyant particles in a three phase stirred tank. *Chem. Eng. Sci.*, 60(8-9), 2283-2292. DOI: 10.1016/j.ces.2004.10.040
- Spytkowski S., (2014). *Analiza pracy mieszalnika układów wielofazowych z niezależnie napędzanymi mieszadłami* Praca doktorska, Politechnika. Krakowska
- Stręk F., (1981). *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa