

## Magdalena CUDAK

e-mail: cudak@zut.edu.pl

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

## Udział gazu zatrzymanego w cieczy dla układu gaz-ciecz w mieszalniku z dwoma mieszadłami

### Wstęp

Udział gazu zatrzymanego w cieczy zależy od wielu czynników, m.in. intensywności mieszania, parametrów geometrycznych zbiornika i mieszadła, rodzaju, liczby oraz konfiguracji mieszadeł a także od własności fizycznych fazy ciekłej [Karcz i in., 2004; Kamiński, 2004; Kamiński i Spytkowski, 2011; Adamiak i Karcz, 2007; Moucha i in., 2003; Kielbus, 2011].

Badania miały na celu określenie wpływu wybranych parametrów (natężenie przepływu gazu  $V_g$ , częstość obrotów mieszadła  $n$ , stężenie sacharozy  $x$  w wodnym roztworze) oraz konfiguracji mieszadeł na udział  $\varphi$  gazu zatrzymanego w cieczy dla układu gaz-ciecz w mieszalniku z dwoma mieszadłami o zmodyfikowanym kształcie łopatek.

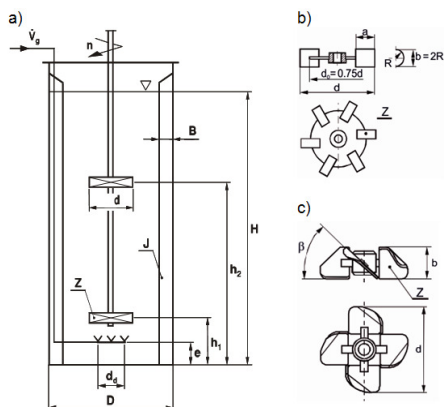
### Badania doświadczalne

**Aparatura.** Pomiary udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy zostały wykonane w zbiorniku ze standardowymi przegrodami ( $J = 4$ ;  $B = 0,1D$ ) o objętości roboczej  $V = 0,02 \text{ m}^3$ . Mieszalnik o średnicy  $D = 0,288 \text{ m}$  był napełniony cieczą do wysokości  $H = 2D$ . Płyn mieszano jednym z dwóch zestawów mieszadeł o zmodyfikowanym kształcie łopatek: turbinowe *Smitha* (górne) – A 315 (dolne) oraz A 315 (górne) - turbinowe *Smitha* (dolne). 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. Parametry geometryczne zbiornika i mieszadeł przedstawiono na rys. 1

**Materiały.** Fazę ciekłą stanowiła woda destylowana, 2,5% oraz 5% wodny roztwór sacharozy, a fazę gazową powietrze.

**Zakres badań.** Pomiary wykonano, w zakresie burzliwego przepływu cieczy w zbiorniku ( $Re \in \langle 60000; 125000 \rangle$ ), dla trzech wartości objętościowego natężenia przepływu  $V_g$  powietrza przez mieszalnik ( $V_g [\text{m}^3/\text{s}] \in \langle 2,22 \cdot 10^{-4}; 5,56 \cdot 10^{-4} \rangle$ ). Parametry fizyczne układu zmieniały się w następujących zakresach: gęstość  $\rho [\text{kg}/\text{m}^3] \in \langle 1000; 1019 \rangle$ , napięcie powierzchniowe  $\sigma [\text{N}/\text{m}] \in \langle 0,072; 0,086 \rangle$ ; dynamiczny współczynnik lepkości fazy ciekłej  $\eta_c [\text{Pas}] \in \langle 1 \cdot 10^{-3}; 1,2 \cdot 10^{-3} \rangle$ .

Udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy obliczano jako średnią wartość z 10 odczytów wysokości słupa mieszaniny gaz-ciecz na pionowej ścianie mieszalnika.



Rys. 1. Parametry geometryczne mieszalnika i mieszadeł: a) mieszalnik; b) mieszadło turbinowe *Smitha* (CD 6); c) mieszadło A 315

### Wyniki i dyskusja

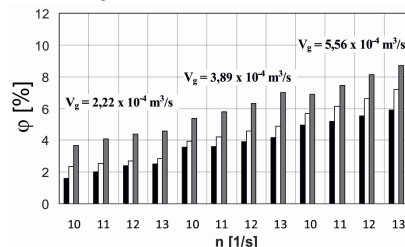
Wpływ natężenia przepływu gazu  $V_g$ , częstości obrotów mieszadła  $n$  oraz stężenia sacharozy  $x$  w układzie na udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy przeanalizowano na podstawie około 200 punktów pomiarowych uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań.

Wartości krytycznej częstości obrotów mieszadła  $n_{kr}$  konieczne do odpowiedniego rozproszenia pęcherzyków gazu w układzie przedstawiono w tab. 1. Wartości krytycznej częstości obrotów mieszadła  $n_{kr}$  zwiększały się ze wzrostem objętościowego natężenia przepływu gazu  $V_g$  oraz zmniejszały się ze wzrostem stężenia sacharozy  $x$  w układzie. Znacznie wyższe wartości krytycznej częstości obrotów mieszadła uzyskano w przypadku, kiedy na wale jako dolne zamontowane było mieszadło turbinowe *Smitha* (CD 6).

Tab. 1. Wartości krytycznych częstości obrotów mieszadła  $n_{kr}$

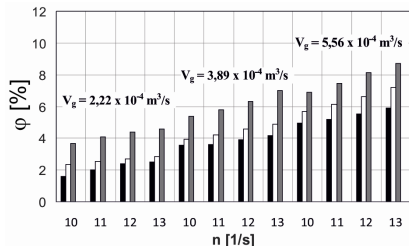
Konfiguracja mieszadeł	$V_g [\text{m}^3/\text{s}] \rightarrow$ $x [\%] \downarrow$	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-4}$
		$n_{kr} [1/\text{s}]$		
CD 6 <sub>g</sub> – A 315 <sub>d</sub>	0	8	8,67	9,67
	2,5	8,33	8,67	9,33
	5	8	8,33	9
A 315 <sub>g</sub> – CD 6 <sub>d</sub>	0	9,67	9,67	10
	2,5	9	9	9,33
	5	8,67	8,67	9

Zależność  $\varphi = f(n)$  dla przebadanych konfiguracji mieszadeł pokazano na rys. 2-4. Największy wpływ na udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy ma objętościowe natężenia przepływu  $V_g$ . Ze wzrostem wartości objętościowego natężenia przepływu  $V_g$  udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy zwiększa się dwukrotnie (dla konfiguracji mieszadeł CD 6<sub>g</sub> – A 315<sub>d</sub>) a nawet trzykrotnie (dla konfiguracji mieszadeł A 315<sub>g</sub> – CD 6<sub>d</sub>) dla układu powietrze woda (Rys. 2, 3). Wpływ ten maleje ze wzrostem stężenia sacharozy  $x$  w układzie. Dla układu powietrze-wodny roztwór sacharozy zwiększenie wartości objętościowego natężenia przepływu gazu  $V_g$  powoduje około 60% lub 80% wzrost udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy odpowiednio dla konfiguracji mieszadeł CD 6<sub>g</sub> – A 315<sub>d</sub> i A 315<sub>g</sub> – CD 6<sub>d</sub>.



Rys. 2. Zależność  $\varphi = f(n)$ ; konfiguracja mieszadeł: CD 6<sub>g</sub> – A 315<sub>d</sub>; pasek czarny – powietrze-woda; pasek biały – powietrze-2,5% wodny roztwór sacharozy; pasek szary – powietrze-5% wodny roztwór sacharozy

Dodanie sacharozy  $x$  do wodnego roztworu, dla obu konfiguracji mieszadeł oraz dla niższych wartości  $V_g = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , powoduje około dwukrotny wzrost udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy (Rys. 2, 3). Wpływ stężenia  $x$  sacharozy w wodnym roztworze na udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy maleje ze wzrostem wartości objętościowego natężenia przepływu  $V_g$ . Przy wyższych wartościach objętościowego natężenia przepływu gazu w układzie dodanie sacharozy zwiększa

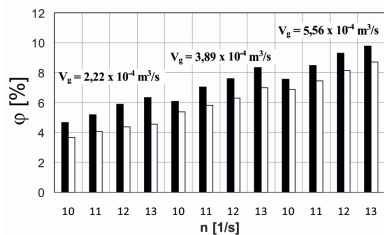


Rys. 3. Zależność  $\varphi = f(n)$ ; konfiguracja mieszadeł: A 315<sub>g</sub>-CD 6<sub>d</sub>; pasek czarny – powietrze-woda; pasek biały – powietrze-2,5% wodny roztwór sacharozy; pasek szary – powietrze - 5% wodny roztwór sacharozy

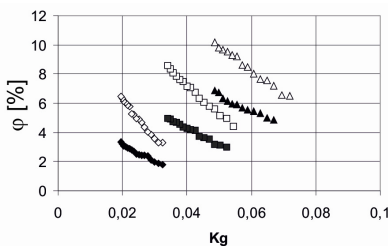
wartości udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy o około 60÷70% dla  $V_g = 3,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  i o około 40÷50% dla  $V_g = 5,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Wpływ częstotliwości obrotów mieszadła na udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy jest znacznie mniejszy niż objętościowego natężenia przepływu gazu  $V_g$  i stężenia wodnego roztworu sacharozy  $x$  (Rys. 2, 3). Zwiększenie częstotliwości obrotów mieszadła z 10 1/s do 13 1/s powoduje wzrost udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy średnio o około 35% dla konfiguracji mieszadeł CD 6<sub>g</sub> – A 315<sub>d</sub> i o około 25% dla konfiguracji mieszadeł A 315<sub>g</sub> – CD 6<sub>d</sub>.

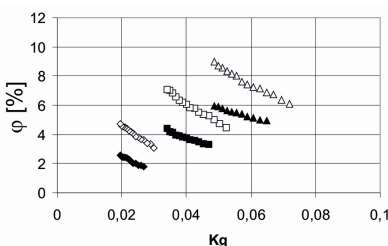
Wpływ konfiguracji mieszadeł na udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy w mieszalniku zależy od wartości objętościowego natężenia przepływu gazu  $V_g$  i maleje ze wzrostem  $V_g$  (Rys. 4). Dla  $V_g = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  wartości udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy, dla przebadanych konfiguracji różnią się o około 30%, dla  $V_g = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , o około 20% – dla  $V_g = 3,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  natomiast dla najwyższego objętościowego natężenia gazu  $V_g = 5,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  różnica wynosi około 10%. We wszystkich analizowanych przypadkach wyższe wartości udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego cieczy uzyskano dla konfiguracji mieszadeł CD 6<sub>g</sub> – A 315<sub>d</sub>.



Rys. 4. Zależność  $\varphi = f(n)$ ;  $x = 5\%$ ; pasek czarny – CD 6<sub>g</sub>-A 315<sub>d</sub>; pasek biały – A 315<sub>g</sub>-CD 6<sub>d</sub>



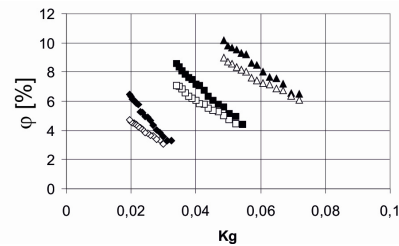
Rys. 5. Zależność  $\varphi = f(Kg)$ ; konfiguracja mieszadeł: CD 6<sub>g</sub>-A 315<sub>d</sub>; kolor czarny – powietrze-woda; kolor biały – powietrze-5% wodny roztwór sacharozy;  $\blacklozenge, \diamond$  -  $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $\blacksquare, \square$  -  $3,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $\blacktriangle, \triangle$  -  $5,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$



Rys. 6. Zależność  $\varphi = f(Kg)$ ; konfiguracja mieszadeł: A 315<sub>g</sub>-CD 6<sub>d</sub>; kolor czarny – powietrze-woda; kolor biały –powietrze-5% wodny roztwór sacharozy;  $\blacklozenge, \diamond$  -  $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $\blacksquare, \square$  -  $3,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $\blacktriangle, \triangle$  -  $5,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Zależność  $\varphi = f(Kg)$  przedstawiono na rys. 5-7. Ze wzrostem wartości liczby przepływu gazu  $Kg$  udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy maleje. Większy wpływ  $Kg$  na  $\varphi$  stwierdzono w przypadku, kiedy do układu dodano sacharozy  $x$  (Rys. 5, 6). Przy założeniu  $Kg = \text{const}$  dodanie do układu sacharozy powoduje nawet dwukrotny wzrost udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy (rys. 5, 6). Wpływ stężenia sacharozy  $x$  na udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy zmniejsza się ze wzrostem liczby przepływu gazu ( $V_g = \text{const}$ ). Zwiększenie wartości objętościowego natężenia przepływu gazu  $V_g$  w układzie (przy założeniu  $Kg = \text{const}$ ) powoduje nawet ponad dwukrotny wzrost udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy (dla CD 6<sub>g</sub> – A 315<sub>d</sub>).

Większy wpływ liczby przepływu  $Kg$  na udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy uzyskano dla konfiguracji mieszadeł CD 6<sub>g</sub> – A 315<sub>d</sub> (Rys. 7). Wpływ ten maleje ze wzrostem wartości liczby przepływu gazu  $Kg$  (przy założeniu  $V_g = \text{const}$ ).



Rys. 7. Zależność  $\varphi = f(Kg)$ ;  $x = 5\%$ ; kolor czarny – CD 6<sub>g</sub>-A 315<sub>d</sub>; kolor biały – A 315<sub>g</sub>-CD 6<sub>d</sub>;  $\blacklozenge, \diamond$  -  $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $\blacksquare, \square$  -  $3,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $\blacktriangle, \triangle$  -  $5,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Wyniki badań udziału gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy uwzględniając liczbę przepływu gazu  $Kg$ , liczbę Webera, stężenie wodnego roztworu sacharozy  $x$  przedstawiono w postaci zależności

$$\varphi = aKg^b We^c (1+x)^d \quad (1)$$

gdzie:  $Kg = V_g/(nd^3)$ ;  $We = n^2 d^3 \rho/\sigma$

Wartości współczynnika  $a$  oraz wykładników  $b, c, d$  zestawiono w tab. 2.

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

Konfiguracja mieszadeł	$a \cdot 10^4$	$b$	$c$	$d$	$\pm \Delta$
A 315 <sub>g</sub> – CD 6 <sub>d</sub>	7,886	0,82	0,89	9,64	6
CD 6 <sub>g</sub> – A 315 <sub>d</sub>	3,531	0,63	0,93	10,84	6

Równ. (1) obowiązuje w następującym zakresie zmiennych:

$$Kg \in <0,01; 0,08>; \quad We \in <750; 2200>; \quad x \in <0; 0,05>.$$

## Wnioski

Na podstawie badań stwierdzono, że w przypadku mieszalnika z dwoma mieszadłami największe wartości udziału  $\varphi$  gazu zatrzymanego w cieczy uzyskano dla konfiguracji mieszadeł CD 6<sub>g</sub> – A 315<sub>d</sub>.

Największy wpływ na udział  $\varphi$  gazu zatrzymanego w cieczy ma objętościowe natężenie przepływu gazu  $V_g$  oraz stężenia  $x$  sacharozy w wodnym roztworze. Wpływ pozostałych dwóch parametrów, częstotliwości obrotów mieszadła oraz konfiguracji mieszadeł na  $\varphi$  jest znacznie mniejszy.

## LITERATURA

- Adamiak R., (2002). *Badania warunków dyspergowania gazu w cieczy w mieszalnikach różnej skali*. Praca doktorska, Pol. Szczecińska, Szczecin
- Kamiński J., (2004). *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa
- Kamiński j., Spytkowski S., (2011). Dyspergowanie gazu w cieczy w aparacie z dwoma oddzielnymi napędzanymi mieszadłami. *Inż. Ap. Chem.*, 50(4), 26-27
- Karcz J., Siciarz R., Bielka I., (2004). Gas hold-up in a reactor with dual system of impellers. *Chem. Pap.*, 58(6), 404-409
- 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, nr 9, 1839-1846. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00682-6