

## Anna KIELBUS-RAPAŁA

e-mail: kielbus@zut.edu.pl

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

## Analiza doświadczalna wpływu wybranych parametrów na proces transportu masy w układzie trójfazowym o obniżonej zdolności do koalescencji w mieszalniku wielkolaboratoryjnym

### Wstęp

Aparaty z mieszadłem umożliwiają wytworzenie dużej powierzchni kontaktu gazu z cieczą, dlatego też znajdują szerokie zastosowanie do prowadzenia procesów w układach wielofazowych [Kamieński, 2004]. Efektywność prowadzonego w mieszalniku procesu transportu masy można zwiększyć poprzez odpowiedni dobór parametrów operacyjnych oraz typu zastosowanego mieszadła.

Celem prezentowanej pracy była analiza eksperymentalna procesu transportu masy między gazem a cieczą w obecności cząstek fazy stałej, prowadzonego w wielkolaboratoryjnym aparacie z mieszadłem (objętość robocza płynu  $V_L = 0,2 \text{ m}^3$ ). Analiza obejmowała określenie wpływu wybranych parametrów na wartość objętościowego współczynnika wnikania masy  $k_L a$  w układach ciecz – gaz – ciało stałe o obniżonej zdolności do koalescencji.

### Badania doświadczalne

#### Aparatura badawcza

Pomiary wykonano w przezroczystym zbiorniku o średnicy wewnętrznej  $D = 0,634 \text{ m}$ , wypełnionym cieczą do wysokości równej jego średnicy ( $H = D$ ). Mieszalnik posiadał płaskie dno oraz cztery standardowe przegrody. Do wprowadzenia gazu do aparatu zastosowano dystrybutor gazu w kształcie pierścienia o średnicy  $d_d = 0,7d$ , umieszczony w połowie odległości między mieszadłem a dnem zbiornika. Badane układy mieszano jednym z trzech typów mieszadeł szybkoobrotowych o średnicy  $d = 0,33D$ : mieszadłem turbinowym *Rushtona* (TR), turbino-*Smitha* (CD 6) lub mieszadłem A 315.

#### Układy ciecz – gaz – ciało stałe

Badano układy ciecz – gaz – ciało stałe charakteryzujące się obniżoną zdolnością do koalescencji, czyli łączenia się ze sobą pęcherzyków gazu w cieczy. Fazą ciekłą w poddanych analizie układach był wodny roztwór chlorku sodu o dwóch stężeniach równych  $0,4$  oraz  $0,8 \text{ kmol/m}^3$ , fazą gazową było powietrze, a fazą stałą – cząstki piasku o średniej średnicy  $d_p = 335 \text{ }\mu\text{m}$ , gęstości  $\rho_p = 2600 \text{ kg/m}^3$  i średnim udziale  $X = 0,5\% \text{ mas}$ .

#### Opis pomiarów

Pomiary wykonano przy częstościach obrotów równych oraz wyższych od krytycznych częstości obrotów mieszadła  $n_{\text{krę}}$ , niezbędnych do wytworzenia układu ciecz – gaz – ciało stałe dla każdego z zastosowanych mieszadeł. Wartości  $n_{\text{krę}}$  określano doświadczalnie, obserwując zachowanie cząstek w aparacie, w oparciu o kryterium *Zwieteringa*, zgodnie z którym żadna cząstka fazy stałej nie może pozostawać bez ruchu na dnie mieszalnika dłużej niż  $1 \text{ s}$ . Częstości obrotów mieszadła zmieniano w zakresie  $n = 4,67 \div 7,08 \text{ 1/s}$ . Badania wykonano przy pięciu wybranych wartościach strumienia objętościowego gazu, zmienianego w zakresie  $V_g = (0,56 \div 1,67) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , którym odpowiadała umowna liniowa prędkość gazu  $w_{\text{og}} = 4V_g/(\pi D^2)$  w zakresie  $w_{\text{og}} = (1,76 \div 5,28) \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .

#### Objętościowy współczynnik wnikania masy

Objętościowy współczynnik wnikania masy  $k_L a$  jest wielkością, stosowaną zwykle w literaturze do charakteryzowania i opisu ilościowego procesu transportu masy między gazem a cieczą w układach wielofazowych. Wartość tego współczynnika pozwala ocenić efektywność procesu transportu masy w danym układzie. Z tego powodu analizę wpływu wy-

branych parametrów na proces transportu masy przeprowadzono w tej pracy określając zależności współczynnika  $k_L a$  od parametrów operacyjnych, rodzaju fazy ciągłej oraz typu zastosowanego mieszadła.

Badania objętościowego współczynnika wnikania masy  $k_L a$  prowadzono metodą dynamiczną, szczegółowo opisaną we wcześniejszej pracy [Kielbus-Rapała i Karcz, 2009]. Metoda ta jest wybierana przez wielu badaczy z wielu względów, przede wszystkim dlatego, że można ją stosować w różnych układach, ponieważ nie zmienia właściwości układu [Karcz, 2002]. W pracy zastosowano wariant metody dynamicznej, w którym przy stałej częstości obrotów mieszadła  $n$  i stałym natężeniu przepływu gazu  $V_g$  zmieniano jego rodzaj w strumieniu doprowadzonym do zbiornika. Zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w cieczy mierzono za pomocą tlenomierza, wyposażonego w sondę, zanurzoną w badanej cieczy. Wartość współczynnika wnikania masy wyznaczano z nachylenia zależności:

$$\ln[(C^* - C_0)/(C^* - C)] = f(t) \quad (1)$$

gdzie:

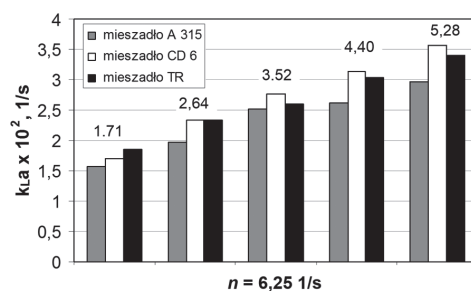
 $t$  – czas, $C^*$  – równowagowe stężenie tlenu rozpuszczonego w cieczy $C_0$  – stężenie w czasie  $t = 0$  $C$  – stężenie w czasie  $t$ .

Obliczenia wykonano metodą najmniejszych kwadratów.

### Wyniki badań

Parametrami operacyjnymi mającymi największy wpływ na przebieg procesu transportu masy w układzie ciecz – gaz – ciało stałe, podobnie jak w układzie ciecz – gaz [Kielbus-Rapała, 2012] są częstość obrotów mieszadła  $n$  oraz umowna liniowa prędkość gazu  $w_{\text{og}}$ .

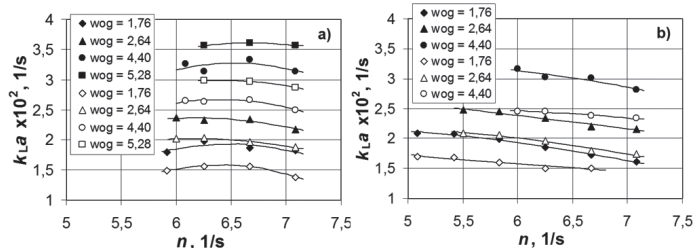
Na rys. 1 przedstawiono wartości  $k_L a$  uzyskane dla różnych mieszadeł, w układzie z ciałem stałym, w którym fazą ciągłą był wodny roztwór NaCl o stężeniu  $0,4 \text{ kmol/m}^3$ . W układzie ciecz – gaz – ciało stałe o obniżonej zdolności do koalescencji, w całym zakresie przeprowadzonych pomiarów, przy stałej wartości częstości obrotów mieszadła  $n$ , zwiększenie ilości gazu wprowadzanego do badanej cieczy (zwiększenie  $w_{\text{og}}$ ), powodowało zwiększenie wartości objętościowego współczynnika wnikania masy dla każdego z zastosowanych mieszadeł. Niezależnie od typu użytego mieszadła, różnice w wartościach współczynnika  $k_L a$ , otrzymanych dla różnych  $w_{\text{og}}$ , zwiększały się ze wzrostem wartości umownej liniowej prędkości gazu.



Rys. 1. Porównanie wartości  $k_L a$  uzyskanych dla różnych mieszadeł; układ:  $0,4 \text{ kmol/m}^3$  NaCl – powietrze;  $n = 6,25 \text{ 1/s}$ ; różne  $w_{\text{og}} \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

W obu układach ciecz – gaz – ciało stałe o obniżonej zdolności do koalescencji, mieszanych mieszadłami turbinowymi *Rushtona* i *Smitha* przebieg zmian wartości współczynnika  $k_L a$  z częstością obrotów mieszadła  $n$  nie jest prostoliniowy. Zależności współczynnika  $k_L a$  od częstości obrotów mieszadła dla układu trójfazowego przedstawiono na

rys. 2. Porównano na nim, osobno dla każdego z mieszadeł (CD 6 – Rys. 2a oraz TR – Rys. 2b), wyniki otrzymane w układach o różnym stężeniu elektrolitu.



Rys. 2. Porównanie zależności  $k_{La} = f(n)$  dla dwóch układów elektrolit-powietrze: punkty pełne – 0,4 kmol/m<sup>3</sup> NaCl – powietrze, punkty puste – 0,8 kmol/m<sup>3</sup> NaCl – powietrze; różne  $w_{og} \cdot 10^{-3}$  m/s; a) mieszadło CD 6, b) mieszadło TR

W przypadku układów mieszanych mieszadłem CD 6 (Rys 2a), wartości współczynnika  $k_{La}$  zwiększały się ze zwiększeniem częstości obrotów mieszadła do pewnej wartości  $n$ , a następnie zmniejszały się. Podobną tendencją zmian charakteryzował się analizowany we wcześniejszej pracy [Kielbus-Rapala, 2012] układ ciecz – gaz, w którym cieczą był elektrolit.

Rys. 2 ilustruje dodatkowo wpływ stężenia elektrolitu na wartość objętościowego współczynnika wnikania masy. W obu układach ciecz – gaz – ciało stałe o obniżonej zdolności do koalescencji pęcherzyków gazu w cieczy, wartości objętościowego współczynnika wnikania masy były większe, w porównaniu do wartości uzyskanych w modelowym układzie wykazującym zdolność do koalescencji, w którym fazą ciągłą była woda destylowana.

Jak wynika z danych przedstawionych na rys. 2, wyższe stężenie elektrolitu nie poprawiało efektywności procesu transportu masy. W całym zakresie przeprowadzonych pomiarów, zwiększenie stężenia elektrolitu z 0,4 do 0,8 kmol/m<sup>3</sup> NaCl, powodowało wyraźny spadek wartości współczynnika  $k_{La}$ . Różnice w wartościach  $k_{La}$  otrzymanych w obu układach, zwiększały się znacznie ze zwiększeniem ilości gazu wprowadzanego do układu (ze wzrostem  $w_{og}$ ). W przypadku mieszadła CD 6 oraz wyższych wartości  $w_{og} = 4,40 \cdot 10^{-3}$  czy  $5,28 \cdot 10^{-3}$  m/s różnice w wartościach objętościowego współczynnika wnikania masy otrzymanych w układach o stężeniu 0,4 oraz 0,8 kmol/m<sup>3</sup> wynosiły 20%.

Analizując wpływ typu mieszadła stwierdzono, że w obu układach ciecz – gaz – ciało stałe najniższe wartości objętościowego współczynnika wnikania masy uzyskano przy użyciu mieszadła A 315. Należy zauważyć, że zakładając stałą częstość obrotów mieszadła  $n$ , różnice w wartościach  $k_{La}$  uzyskanych dla mieszadła A 315 w porównaniu do mieszadeł turbinowych były większe, przy wyższych wartościach umownej liniowej prędkości gazu.

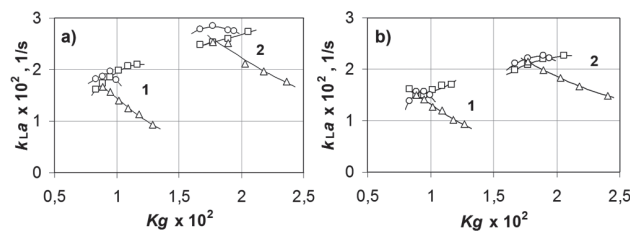
Porównując mieszadła turbinowe stwierdzono, że przy niskich wartościach umownej liniowej prędkości gazu, wyższe wartości współczynnika  $k_{La}$  charakteryzowały mieszadło TR, natomiast przy wyższych wartościach  $w_{og}$ , korzystniejszym do prowadzenia procesu wymiany masy w analizowanych układach było mieszadło CD 6. W górnym zakresie częstości obrotów mieszadła różnice w wartościach  $k_{La}$  uzyskanych przy zastosowaniu wszystkich trzech mieszadeł były niewielkie.

Na rys. 3 porównano wartości  $k_{La}$  w funkcji liczby przepływu gazu  $Kg$  ( $= V_g/(nd^3)$ ) otrzymane dla różnych mieszadeł. Przebieg tych zależności w układzie trójfazowym zależy od typu zastosowanego mieszadła.

W przypadku mieszadła A 315 wartość współczynnika  $k_{La}$  zmniejsza się ze zwiększeniem  $Kg$  w układach o obu stężeniach elektrolitu. Inną zależność przedstawiają wyniki otrzymane dla obu mieszadeł turbinowych. W tym przypadku wartość objętościowego współczynnika wnikania masy zwiększa się ze wzrostem liczby  $Kg$ , praktycznie w całym zakresie w układzie mieszanym mieszadłem TR, natomiast dla mieszadła CD 6 wartość  $k_{La}$  zwiększa się do pewnej wartości  $Kg$ , a następnie zaczyna się zmniejszać.

Wyniki pomiarów objętościowego współczynnika wnikania masy  $k_{La}$  w układzie ciecz – gaz – ciało stałe opisano matematycznie stosując zależność

$$k_{La} = AKg^B We^C Y^D \quad (2)$$



Rys. 3. Porównanie zależności  $k_{La} = f(Kg)$  dla różnych mieszadeł: (Δ) A 315, (◻) TR, (○) CD 6; dwie wybrane wartości  $w_{og} \cdot 10^{-3}$  m/s: 1=1,76; 2=3,52; faza ciekła: a) wodny roztwór 0,4 kmol/m<sup>3</sup> NaCl, b) wodny roztwór 0,8 kmol/m<sup>3</sup> NaCl

Zależność ta pokazuje związek współczynnika  $k_{La}$  ze zmiennymi operacyjnymi  $n$  oraz  $V_g$ , bez konieczności znajomości mocy mieszania. Równ. uwzględnia również zależność objętościowego współczynnika wnikania masy od rodzaju fazy ciekłej (stężenia elektrolitu), wyrażonej wielkością  $Y$ , której wartość wynosi 1,36 dla układu z elektrolitem o stężeniu 0,4 kmol/m<sup>3</sup> oraz 1,6 dla układu z elektrolitem o stężeniu 0,8 kmol/m<sup>3</sup>.

Wartości współczynnika  $A$  oraz wykładników  $B$ ,  $C$ ,  $D$  w równaniu przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wartości współczynnika  $A$  oraz wykładników  $B$ ,  $C$ ,  $D$  w równ. (2)

Lp.	Mieszadło	$A$	$B$	$C$	$D$	$\pm \Delta$
1	TR	0,49	0,53	-0,048	-1,23	2
2	CD 6	0,08	0,61	0,21	-1,27	3
3	A 315	0,0001	0,54	0,92	-0,90	3

Zakresy zmiennych  $Kg$  oraz  $We = (n^2 d^3 \rho) / \sigma$  dla których obowiązują równ. (2) dla każdego z testowanych mieszadeł zebrano w tab. 2.

Tab. 2. Zakresy zmiennych  $Kg$  oraz  $We$  w równ. (2)

Lp.	Mieszadło	$Kg \cdot 10^2$	$We$
1	TR	<0,84; 2,46>	<3326; 6516>
2	CD 6	<0,84; 2,84>	<4506; 6516>
3	A 315	<0,89; 3,54>	<2704; 5772>

## Wnioski

- W oparciu o przeprowadzoną analizę stwierdzono, że:
  - W układzie ciecz – gaz – ciało stałe o obniżonej zdolności do koalescencji, przy stałej wartości  $n$ , zwiększenie wartości umownej liniowej prędkości gazu, powodowało zwiększenie wartości współczynnika  $k_{La}$  dla każdego z zastosowanych mieszadeł, różnice w wartościach współczynnika  $k_{La}$ , otrzymanych dla różnych  $w_{og}$ , zwiększały się ze wzrostem wartości  $w_{og}$ ;
  - W analizowanych układach trójfazowych zależność  $k_{La} = f(n)$  nie jest prostoliniowa dla mieszadeł turbinowych TR oraz CD 6;
  - Zwiększenie stężenia elektrolitu w badanych układach powodowało spadek wartości współczynnika  $k_{La}$ , do 20% przy wyższych wartościach  $w_{og}$ ;
  - Korzystniejsze do prowadzenia procesu wymiany masy w analizowanych układach okazały się mieszadła TR oraz CD 6. Przy niskich wartościach  $w_{og}$  wyższe wartości współczynnika  $k_{La}$  otrzymano dla mieszadła TR, natomiast przy wyższych wartościach  $w_{og}$  – dla mieszadła CD 6.

Wyniki przedstawione w pracy zostały otrzymane w aparacie dużej skali i mogą mieć zastosowanie praktyczne. Zaproponowane równania opracowano w oparciu o dane dla układów o obniżonej zdolności do koalescencji, a takie typy układów spotyka się w praktyce przemysłowej.

## LITERATURA

- Kamieński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa
- Karcz J., 2002. Mieszanie układu ciecz-gaz w aparatach z mieszadłem szybko-obrotowym. *Inż. Ap. Chem.*, 43, nr 1, 3-14
- Kielbus-Rapala A., Karcz J., 2009. Influence of suspended solid particles on gas-liquid mass transfer coefficient in a system stirred by double impellers. *Chem. Pap.*, 63, 188-196. DOI: 10.2478/s11696-009-0013-y
- Kielbus-Rapala A., 2012. Charakterystyki transportu masy w układzie ciecz-gaz w wielkolaboratoryjnym aparacie z mieszadłem. *Inż. Ap. Chem.*, 51, nr 6, 344-345