

Jolanta SZOPLIK, Paulina STELMASIŃSKA

e-mail: jolanta.szoplik@zut.edu.pl

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

Badania hydrodynamiki w kolumnie air-lift z zewnętrzną cyrkulacją płynu

Wstęp

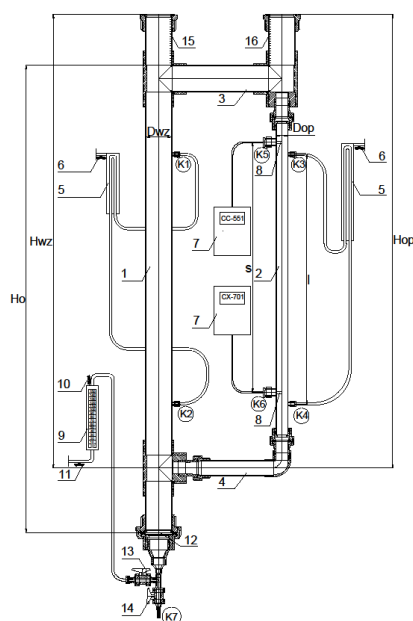
Reaktory kolumnowe, w tym kolumny *air-lift* stanowią alternatywę dla klasycznych reaktorów zbiornikowych z mieszaniem mechanicznym. Mnogość rozwiązań konstrukcyjnych oraz liczne zalety tych aparatów sprawiają, że są one coraz częściej stosowane na przykład w procesach biotechnologicznych. Odmiany konstrukcyjne oraz liczne przykłady zastosowań kolumn *air-lift* opisano w pracach [Kawalec-Pietrenko, 2003; 2004]. Wyniki badań eksperymentalnych oraz numerycznych w postaci rozkładów udziału gazu zatrzymanego w cieczy, wielkości pęcherzy gazowych, średnic oraz liczby komórek drożdży w czasie przedstawiono w pracach [Karcz i in., 2010; 2012; 2013a; 2013b].

Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy była analiza podstawowych wielkości hydrodynamicznych (udział gazu zatrzymanego w cieczy, prędkość cieczy w strefie wznoszenia i opadania oraz czas mieszania) charakteryzujących pracę kolumny *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu.

Badania doświadczalne

Aparatura. Badania prowadzono w kolumnie *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy (Rys. 1). Parametry konstrukcyjne aparatu zestawiono w tab. 1.

Media. Fazą ciągłą była woda lub 15% wodny roztwór gliceryny, natomiast fazę rozproszoną stanowiło powietrze, którego strumień objętościowy zmieniano w zakresie $V_g \cdot 10^{-7} \in (1; 3.5)$ m³/s. Fazę gazową wprowadzano od dołu do rury o większej średnicy (nr 1 na rys. 1). Właściwości oraz temperatury płynów stosowanych w badaniach zamieszczono w tab. 2.



Rys. 1. Schemat kolumny air - lift z zewnętrzną cyrkulacją [Stelmasińska 2015] 1 – rura napowietrzana (strefa wznoszenia), 2 – rura cyrkulacyjna (strefa opadania), 3, 4 – rura pozioma górna i dolna, 5 – manometr odwrócony, 6 – zawór odpowietrzający manometru, 7 – konduktometr, 8 – sonda pomiarowa, 9 – rotametr, 10 – zawór regulacji rotametru, 11 – zawór dopływu powietrza z sieci, 12 – płyta dyfuzora, 13 – zawór dopływu powietrza do kolumny, 14 – zawór spustowy cieczy, 15, 16 – skale do odczytu wysokości mieszanki ciecz-gaz dla strefy wznoszenia i opadania

Tab. 1. Podstawowe wymiary kolumny *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją [Karcz i in., 2012]

Parametry geometryczne	Oznaczenie	Wartość, [mm]
Średnica rury wznoszenia (1)	D_{wz}	110
Wysokość rury wznoszenia (1)	H_{wz}	1890
Średnica rury opadania (2)	D_{op}	50
Wysokość rury opadania (2)	H_{op}	1870
Wysokość słupa cieczy	H_0	2000
Odległość między króćcami manometrycznymi (K1-K2 i K3-K4)	l	1040
Odległość pomiędzy króćcami konduktometrycznymi na rurze cyrkulacyjnej (K5-K6)	s	1040

Tab. 2. Właściwości fizyczne mediów

Medium	Temperatura procesowa, [°C]	Gęstość, [kg/m ³]	Lepkość, [Pa·s]
woda	20	998	0,001
15 % wodny roztwór gliceryny	20	1035	$1,517 \cdot 10^{-3}$
powietrze	5	1,267	$1,745 \cdot 10^{-7}$

Metodyka. Zawartość gazu zatrzymanego w cieczy wyznaczano metodą manometryczną z zastosowaniem odwróconych manometrów oddzielnie dla strefy wznoszenia oraz opadania.

Udział gazu zatrzymanego w cieczy wyznaczano w zależności [Karcz i wsp., 2010]:

$$\varphi = \frac{\rho_c}{\rho_c - \rho_g} \frac{\Delta h_m}{l} \quad (1)$$

gdzie:

l – odległość między króćcami manometrycznymi, [m]

Δh_m – różnica poziomów cieczy w rurkach manometru (odpowiednio wznoszenia lub opadania), [m]

ρ_c, ρ_g – gęstość cieczy i gazu, [kg/m³]

Prędkość cieczy w strefie opadania obliczano z wzoru

$$w_{op} = \frac{s}{\Delta t} \quad (2)$$

gdzie:

s – odległość pomiędzy sondami pomiarowymi, [m],

Δt – uśredniony czas przepływu cieczy między sondami, [s].

Prędkość cieczy w strefie wznoszenia szacowano na podstawie zależności [Dziubiński i Sowiński, 1997; 2002]

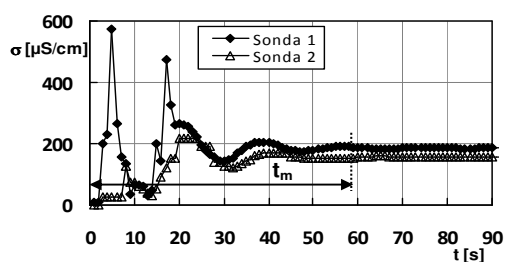
$$w_{wz} = w_{op} \frac{A_{op}(1 - \varphi_{op})}{A_{wz}} \quad (3)$$

gdzie: A_{op} – pole przekroju poprzecznego strefy opadania [m²], A_{wz} – pole przekroju poprzecznego strefy wznoszenia [m²], w_{op} – prędkość przepływu cieczy w strefie opadania [m/s], φ_{op} – stopień zatrzymania gazu w strefie opadania [-].

Czas mieszania mierzono metodą stężeniową z zastosowaniem trasera w postaci nasyconego roztworu NaCl, który w ilości 6 cm³ wprowadzano na powierzchnię cieczy w rurze strefy opadania. Czas mieszania wyznaczano na podstawie zarejestrowanych przez czujniki konduktometryczne odpowiedzi układu (zmiany przewodności roztworu w czasie). Czas mieszania definiowano jako czas od chwili wstrzyknięcia trasera do momentu wyrównania się stężenia NaCl

w całej objętości reaktora, tzn. gdy wahania przewodności były mniejsze niż $\pm 3 \mu\text{S/cm}$ końcowej przewodności płynu w reaktorze.

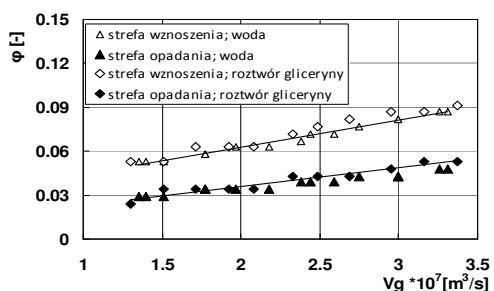
Przykładowy zapis zmiany przewodności cieczy w czasie oraz metodykę wyznaczania czasu mieszania t_m zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Wykres zmiany przewodności cieczy w czasie zarejestrowany przez czujniki konduktometryczne w króćcach K5 i K6; $V_g = 1,51 \cdot 10^{-7} [\text{m}^3/\text{s}]$

Wyniki i dyskusja

Wyniki pomiarów udziału gazu zatrzymanego w cieczy zmierzonego metodą manometryczną i obliczonego na podstawie zależności (1) pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Zależność udziału gazu ϕ zatrzymanego w cieczy w strefie wznoszenia i opadania od strumienia gazu V_g wprowadzanego do kolumny

Wyraźny jest wzrost udziału gazu zatrzymanego w cieczy ϕ ze wzrostem strumienia gazu wprowadzanego do kolumny zarówno w strefie wznoszenia, jak i opadania. Zaobserwowano wzrost różnic między wielkościami ϕ dla strefy wznoszenia i opadania, które zależą od wielkości strumienia gazu V_g . Nie stwierdzono natomiast wyraźnej zależności współczynnika ϕ od rodzaju fazy ciągłej. Wyniki badań opisano matematycznie za pomocą zależności:

$$\phi_{wz} = 1,94 \cdot 10^{-5} V_g + 0,026 \quad (4)$$

$$\phi_{op} = 1,09 \cdot 10^{-5} V_g + 0,013 \quad (5)$$

Prędkość cieczy w strefie opadania zależy tylko od wielkości strumienia powietrza wprowadzanego do kolumny, natomiast prędkość w strefie wznoszenia zależy dodatkowo od udziału gazu zatrzymanego w tej strefie. Wyniki pomiarów prędkości cieczy w każdej ze stref w funkcji strumienia powietrza wprowadzanego do aparatu opracowano matematycznie w postaci zależności (6) dla układu woda-powietrze oraz w postaci równania (7) dla układu roztwór gliceryny-powietrze:

$$w_{op} = 10^6 V_g + 0,088 \quad (6)$$

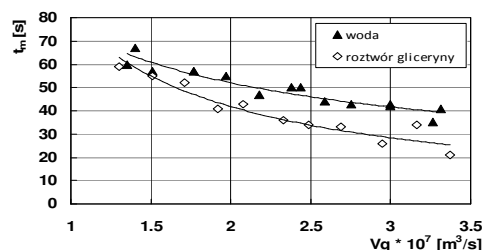
$$w_{op} = 2 \cdot 10^6 V_g + 0,068 \quad (7)$$

W tab. 3 porównano wyniki obliczeń prędkości cieczy w strefie wznoszenia oraz opadania dla badanych układów dla dwóch przykładowych wielkości strumienia gazu V_g . Stwierdzono, że większe prędkości cieczy (50÷70%) są charakterystyczne dla układu roztwór gliceryny-powietrze, chociaż wielkości udziału gazu zatrzymanego w cieczy nie zależą istotnie od układu ciecz-gaz. Wyższe prędkości cieczy w układzie roztwór gliceryny-powietrze wpływają jednak na wyraźne skrócenie czasu mieszania.

Tab. 3. Przykładowe wyniki obliczeń prędkości cieczy w_{op} , w_{wz} oraz udziału gazu zatrzymanego w cieczy ϕ_{op} w zależności od strumienia gazu V_g

$V_g \cdot 10^7$, [m ³ /s]	Układ					
	woda-powietrze			r-r gliceryny-powietrze		
	w_{op} [m/s]	ϕ_{wz} [-]	w_{wz} [m/s]	w_{op} [m/s]	ϕ_{wz} [-]	w_{wz} [m/s]
1,5	0,238	0,055	0,048	0,368	0,055	0,074
3,0	0,388	0,084	0,076	0,668	0,084	0,131

Na rys. 4 przedstawiono wyniki pomiarów czasu mieszania w funkcji strumienia powietrza i stwierdzono, że wzrost strumienia gazu V_g wpływa na skrócenie czasu potrzebnego do wyrównania stężenia traseru w całej objętości kolumny.



Rys. 4. Zależność czasu mieszania od strumienia gazu wprowadzanego do kolumny

Wyniki badań dla układu woda-powietrze opracowano w postaci zależności

$$t_m = 0,011 V_g^{-0,55} \quad (8)$$

a dla układu roztwór gliceryny-powietrze w postaci zależności

$$t_m = 2 \cdot 10^{-5} V_g^{-0,95} \quad (9)$$

Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań podstawowych wielkości charakteryzujących hydrodynamikę w kolumnie *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu stwierdzono, że udział gazu zatrzymanego w cieczy nie zależy istotnie od typu badanego układu ciecz-gaz, ale zwiększa się ze wzrostem strumienia wprowadzanego gazu i jest większy w strefie wznoszenia niż opadania.

Wyższe prędkości cieczy w strefie wznoszenia i opadania w układzie roztwór gliceryny-powietrze wpływają na wyraźne skrócenie czasu mieszania w tym układzie w porównaniu do układu woda-powietrze.

LITERATURA

- Dziubiński M., Sowiński J., 1997. Stopień zatrzymania gazu w kolumnach *air-lift*. *Inż. Ap. Chem.*, **4**, 15-20
- Dziubiński M., Sowiński J., 2002. Prędkość cyrkulacji cieczy w półtechnicznych kolumnach *air-lift*. *Inż. Chem. Proc.*, **23**, 141-150.
- Kawalec-Pietrenko B., 2003. Nowe obszary zastosowań reaktorów *air-lift*. *Przem. Chem.*, **82**, 1201-1202
- Kawalec-Pietrenko B., 2004. Trójfazowe reaktory *air-lift*. *Inż. Chem. Proc.*, **25**, 1925-1935
- Karcz J., Bitenc M., Kacperski Ł., 2010. Badania hydrodynamiki w kolumnie *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy. *Inż. Ap. Chem.*, **49**, nr 1, 57-58
- Karcz J., Bitenc M., Domański M., Kacperski Ł., 2012. Badania numeryczne przepływu ciecz-gaz w kolumnie *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy. *Inż. Ap. Chem.*, **51**, nr 6, 330-331
- Karcz J., Musiał M., Bitenc M., Domański M., 2013a. Charakterystyka wielkości pęcherzy gazowych w strefie wznoszenia kolumny *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu. *Inż. Ap. Chem.*, **52**, nr 4, 336-337
- Karcz J., Bitenc M., Domański M., Musiał M., 2013b. Analiza eksperymentalna i numeryczna bioprosesu w kolumnie *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu. *Inż. Ap. Chem.*, **52**, nr 4, 334-335
- Stelmasińska P., 2015. Uruchomienie stanowiska laboratoryjnego do badania dynamiki przepływu w aparacie kolumnowym. Praca inżynierska, ZUP, Szczecin.