

Joanna KARCZ, Monika MUSIAŁ, Marcelina BITENC, Marek DOMAŃSKI

e-mail: joanna.karcz@zut.edu.pl

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

Charakterystyka wielkości pęcherzy gazowych w strefie wznoszenia kolumny airlift z zewnętrzną cyrkulacją płynu

Wstęp

Wzrost popularności reaktorów typu *airlift* przejawia się w coraz szerszym ich zastosowaniu – na stałe wpisały się one do przemysłu chemicznego, biotechnologicznego, farmaceutycznego i biologicznego. Aparaty typu *airlift* należą do grupy kolumnowych reaktorów barbożowych. Rozróżnia się kolumny *airlift* z cyrkulacją wewnętrzną lub zewnętrzną płynu. Konstrukcję reaktora *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu stanowią dwie równoległe do siebie kolumny połączone na szczycie i przy dnie [Kawalec-Pietrenko, 1992]. Do zalet aparatów typu *airlift* zaliczyć należy prostą konstrukcję, która pozwala na modyfikacje i dopasowywanie do potrzeb procesu. Kolumny te odznaczają się brakiem obszarów o wysokich naprężeniach ścinających. Charakteryzują się dużą wydajnością oraz pracą w szerokich zakresach natężeń przepływów, dlatego mogą być stosowane uniwersalnie – od skali laboratoryjnej do wielkoprzemysłowej [Chisti, 1989].

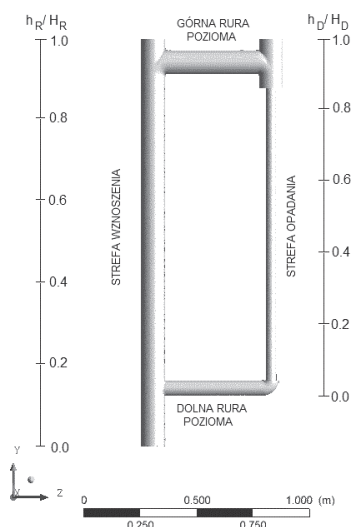
Hydrodynamikę w aparatach typu *airlift* analizowano na podstawie wyników badań doświadczalnych oraz modelowania numerycznego. Procesy przebiegające w kolumnie *airlift* z wewnętrzną cyrkulacją płynu badali między innymi Blażej i in. [2004], Huang i in. [2007; 2010], Hekmat i in. [2010], Luo i in. [2011], Šimčik i in. [2011] oraz Moraveji i in. [2011].

Badania dotyczące reaktora typu *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu były podejmowane przez takich autorów jak Hari i in. [2002], Roy i in. [2006], Cao i in. [2009], Silva i in. [2010] oraz Karcz i in. [2010].

Badania przedstawione w niniejszej pracy miały na celu charakterystykę rozmiarów pęcherzy gazowych rozpraszanych w cieczy w układzie ciecz newtonowska o niskiej lepkości – powietrze w strefie wznoszenia kolumny *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy.

Zakres badań numerycznych

W kolumnie *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu, zastosowanej w badaniach numerycznych przedstawionej na rys. 1, wyróżnić można dwie strefy: wznoszenia (R) oraz opadania (D). Średnica wewnętrzna kolumny strefy wznoszenia (R) wynosiła $D_R = 0,1056$ m, a jej wysokość była równa $H_R = 1,932$ m.



Rys. 1. Geometria kolumny *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu

Kolumnę strefy wznoszenia (R) podzielono względem bezwymiarowej współrzędnej osiowej h_R/H_R w taki sposób, że dno tej kolumny

odpowiadało wartości $h_R/H_R = 0,0$, natomiast do jej szczytu przypisano wartość równą $h_R/H_R = 1,0$.

Kolumna strefy opadania (D) charakteryzowała się średnicą wewnętrzną równą $D_D = 0,0464$ m oraz wysokością wynoszącą $H_D = 1,69$ m. Kolumnę strefy opadania (D) podzielono względem bezwymiarowej współrzędnej osiowej h_D/H_D podobnie jak kolumnę strefy wznoszenia.

Kolumny obu stref połączone były odcinkami o długości 0,5 m. Sitowe dno kolumny, przez które podawany był gaz, znajdowało się w strefie wznoszenia (R) na wysokości $h_R/H_R = 0,0$ i wyposażone było w symetrycznie rozmieszczone otworki w liczbie 3, 6 lub 12 o średnicy $d_{otw} = 0,002$ m.

Powietrze doprowadzane było do kolumny ze stałym natężeniem objętościowym równym $V_g = 12,1 \cdot 10^{-5}$ m³/s. Jako parametry fazy ciągłej przyjęto w obliczeniach numerycznych parametry fizyczne wody destylowanej.

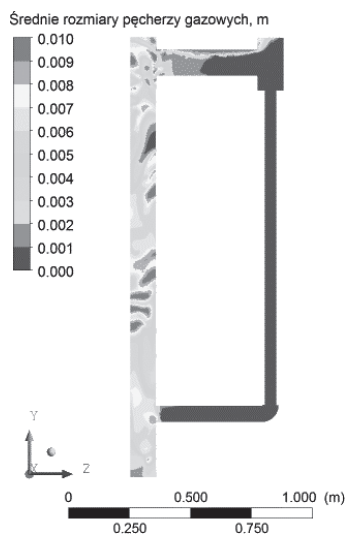
Symulacje numeryczne polidispersyjnego przepływu dwufazowego oraz warunków nieustalonych w czasie przeprowadzono na platformie ANSYS Workbench za pomocą solvera CFX 13. Całkowity czas symulacji wynosił 20 s, a krok czasowy był równy 0,01 s. Do modelowania rozkładu wielkości pęcherzy gazowych zastosowano model MUSIG (Multiple Size Group). Zdefiniowano 10 równych klas wielkości pęcherzy gazowych, odpowiadających zakresowi $<0, 0,01>$ m. Rozpad pęcherzy gazu uwzględniono za pomocą modelu Luo Svendsena opartego na teorii izotropowej turbulencji i prawdopodobieństwa. Model Prince'a Blancha zastosowany został do opisu zjawiska koalescencji pęcherzy gazowych. Fazę ciągłą modelowano za pomocą modelu burzliwości Shear Stress Transport. Wylot kolumny zdefiniowany został poprzez warunek odgazowania dyspersji ciecz – gaz. Zjawisko oporu międzyfazowego uwzględniono stosując model Grace'a. W obliczeniach zastosowano model Lopez de Bertodano do opisu siły dyspersji burzliwej.

Wyniki badań i ich analiza

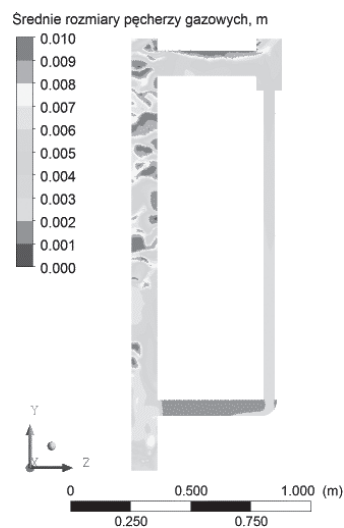
Kontury średnich rozmiarów pęcherzy gazu w przekroju osiowym kolumny *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu oraz z dystrybutorem powietrza o 3, 6 lub 12 otworkach w dnie sitowym są przedstawione na rys. 2–4. Biorąc pod uwagę strumień płynu wypływający z dolnej rury poziomej, można stwierdzić, że wpływa on na wielkość pęcherzy gazowych. W każdym z trzech przypadków obserwuje się duże zróżnicowanie rozmiarów pęcherzy powietrza w strefie wznoszenia ze zmianą położenia h_R/H_R , jak również znikomą ilość pęcherzy gazu w strefie opadania (D).

Wyniki obliczeń numerycznych wartości przeciętnej zastępczej średnicy d_b oraz powierzchni kontaktu międzyfazowego a_R w strefie wznoszenia (R) kolumny *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu są przedstawione w tab. 1. Przeciętną zastępczą średnicę d_b obliczono jako średnią arytmetyczną z N wartości rozmiarów pęcherzy zidentyfikowanych w przekroju promieniowym strefy wznoszenia usytuowanym na danej wysokości h_R/H_R , zakładając sferyczność tych elementów rozproszonych. Międzyfazowa wymiana masy zależy bezpośrednio od powierzchni kontaktu pomiędzy dwoma fazami. Jej intensywność wzrasta ze wzrostem powierzchni kontaktu międzyfazowego. Jak wynika z danych zawartych w tab. 1, obszar występowania największych pęcherzy gazu oraz największych wartości powierzchni kontaktu międzyfazowego zwiększa się wraz ze wzrostem h_R/H_R . Uwidacznia się zjawisko koalescencji pęcherzy gazu, o czym świadczą ich rozmiary rzędu od ok. 2 do 6 mm (w zakresie bezwymiarowej wysokości h_R/H_R w strefie wznoszenia). Wartości powierzchni a_R w zasadzie zależą od liczby otworów w dnie sitowym kolumny. Wyjątek stanowi położenie $h_R/H_R = 0,2$ oraz

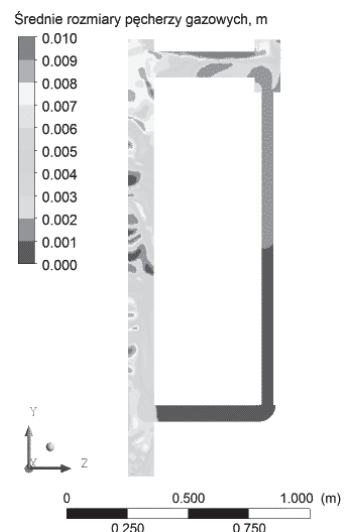
$h_R/H_R = 0,4$, w których wartości są zbliżone dla wszystkich trzech dys-
trybutorów gazu.



Rys. 2. Kontury średnich rozmiarów pęcherzy gazowych w przekroju osiowym kolumny *airlift* z dystrybutorem powietrza o 3 otworkach w dnie sitowym



Rys. 3. Kontury średnich rozmiarów pęcherzy gazowych w przekroju osiowym kolumny *airlift* z dystrybutorem powietrza o 6 otworkach w dnie sitowym



Rys. 4. Kontury średnich rozmiarów pęcherzy gazowych w przekroju osiowym kolumny *airlift* z dystrybutorem powietrza o 12 otworkach w dnie sitowym

Tab. 1. Wartości rozmiarów pęcherzy gazu d_b i powierzchni międzyfazowej a_R

3 otworki w dnie sitowym						
h_R/H_R	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$d_b \cdot 10^3, m$	2,2	5,6	6,0	6,0	4,0	5,1
$a_R, m^2/m^3$	18,3	15,1	36,8	29,3	62,0	70,2
6 otworków w dnie sitowym						
h_R/H_R	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$d_b \cdot 10^3, m$	2,6	5,6	5,7	5,0	8,5	3,8
$a_R, m^2/m^3$	22,1	15,5	35,5	59,5	28,3	75,5
12 otworków w dnie sitowym						
h_R/H_R	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$d_b \cdot 10^3, m$	2,8	5,9	5,4	4,9	7,0	6,6
$a_R, m^2/m^3$	31,2	16,0	36,8	49,6	30,0	43,7

Wnioski

Na podstawie symulacji numerycznych przeprowadzonych w reaktorze typu *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu można ocenić rozkłady fazy rozproszonej w aparacie, rząd wielkości pęcherzyków gazu wytwarzanych w układzie dwufazowym oraz wielkość powierzchni międzyfazowej dla różnej liczby otworów w dnie sitowym kolumny stanowiącym dystrybutor gazu.

Wyniki obliczeń ujawniły zróżnicowanie rozmiarów elementów fazy rozproszonej w cieczy wzdłuż wysokości kolumny, a więc i powierzchni kontaktu między fazami, co będzie miało decydujący wpływ na intensywność wymiany masy w takim układzie.

LITERATURA

- Ansys CFX, Release 10.0: Modelling, 2005. Ed. Ansys Europe Ltd.
- Błażej M., Cartland Glover G.M., Generalis S.C., Markoś J., 2004. Gas-liquid simulation of an airlift bubble column reactor. *Chem. Eng. Proc.*, **43**, 137-144. DOI: 10.1016/S0255-2701(03)00010-2
- Cao C., Zhao L., Xu D., Geng Q., Guo Q., 2009. Investigation into bubble size distribution and transient evolution in the sparger region of gas-liquid external loop airlift reactors. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 5824-5832. DOI: 10.1021/ie801700s
- Chisti M.Y., 1989, *Airlift bioreactors*. Elsevier Applied Science, London and New York
- Hari M., Tan R.B.H., 2002. A dynamical systems approach to mixing in circulating flows. *Chem. Eng. Tech.*, **25**, 811-818. DOI: 10.1002/1521-4125(20020806)25:8<811:AID-CEAT811>3.0.CO;2-B
- Hekmat A., Amooghini A.E., Moraveji M.K., 2010. CFD simulation of gas-liquid flow behaviour in an air-lift reactor: determination of the optimum distance of the draft tube. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **18**, 927-945. DOI: 10.1016/j.simpat.2010.02.009
- Huang Q., Yang C., Yu G., Mao Z-S, 2007, 3-D simulations of an internal airlift loop reactor using a steady two-fluid model. *Chem. Eng. Tech.*, **30**, 870-879. DOI: 10.1002/ceat.200700038
- Huang Q., Yang C., Yu G., Mao Z-S, 2010, CFD simulation of hydrodynamics and mass transfer in an internal airlift loop reactor using a steady two-fluid model. *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 5527-5536. DOI: 10.1016/j.ces.2010.07.021
- Karcz J., Bitenc M., Kacperski L., 2010. Badania hydrodynamiki w kolumnie air-lift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy. *Inż. Ap. Chem.*, **49**, nr 1, 57-58
- Kawalec-Pietrenko B., 1992, Charakterystyka hydrodynamiczna i wymiana masy w trójfazowym reaktorze airlift z cyrkulacją wewnętrzną. *Zesz. Nauk. Pol. Gdańskiej*, nr 494
- Luo H-P, Al-Dahhan H. M., 2011. Verification and validation of CFD simulations for local flow dynamics in a draft tube airlift bioreactor. *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 907-923. DOI: 10.1016/j.ces.2010.11.038
- Moraveji K. M., Sajjadi B., Jafarkhani M., Davarnejad R., 2011. Experimental investigation and CFD simulation of turbulence effect on hydrodynamic and mass transfer in a packed bed airlift internal loop reactor. *Int. Com. Heat Mass Transfer*, **38**, 518-524. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.12.033
- Roy S., Dhotre M.T., Joshi J.B., 2006. CFD simulation of flow and axial dispersion in external loop airlift reactor. *Chem. Eng. Res. Des.*, **84**, 677-690. DOI: 10.1205/cherd.05178
- Silva M. K., d'Avila M A., Mori M., 2010. CFD modeling of a bubble column with an external loop in the heterogeneous regime. *Can. J. Chem. Eng.*, **89**, 671-681. DOI: 10.1002/cjce.20417
- Šimčík M., Mota A., Ruzicka M. C., Vicente A., Teixeira J., 2011. CFD simulation and experimental measurement of gas holdup and liquid interstitial velocity in internal loop airlift reactor. *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 3268-3279. DOI: 10.1016/j.ces.2011.01.059