

MATEUSZ PROŃCZUK, KATARZYNA BIZON, BOLESŁAW TABIŚ

DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW DYSPERSJI WZDŁUŻNEJ W HYBRYDOWYM APARACIE FLUIDYZACYJNYM AIRLIFT

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24,
31-155 Kraków

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących eksperymentalnego wyznaczenia wartości liczby Pecleta dla wybranych stref hybrydowego fluidyzacyjnego aparatu airlift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy. W tym celu przeprowadzono badania znacznikowe metodą bodziec-odpowiedź. Liczbę Pecleta wyznaczono przy użyciu metody momentów oraz algorytmu optymalizacyjnego sprzężonego z jednowymiarowym modelem dyspersyjnym.

Słowa kluczowe: fluidyzacja, hybrydowy aparat airlift, liczba Pecleta

This paper presents the results of experimental research concerning determination of Peclet number for selected zones of a hybrid fluidized-bed airlift apparatus with external liquid circulation. For this aim, the tracer stimulus-response experiments were carried out. Peclet number was then determined using the method of moments and optimization algorithm coupled with the one-dimensional dispersion model.

Keywords: fluidization, hybrid airlift apparatus, Peclet number

1. WPROWADZENIE

Trójfazowe aparaty fluidyzacyjne oraz trójfazowe aparaty airlift znajdują coraz częstsze zastosowanie w aerobowych procesach mikrobiologicznych [1]. Osadzenie biomasy na powierzchni drobnoziarnistego złoża cząstek stałych umożliwia zwiększenie ogólnego stężenia biomasy w aparacie, co prowadzi do znacznego zwiększenia ogólnej szybkości procesu. Dzięki obecności ruchomego złoża, w takim aparacie praktycznie nie zachodzi zjawisko nadmiernego przyrostu biofilmu, które może prowadzić do zatykania się złoża w aparatach ze złożem stacjonarnym [2]. Napowietrzanie w aparacie może pełnić dwojaką funkcję. W aparatach airlift, oprócz doprowadzania tlenu do przestrzeni reakcyjnej, jest ono również źródłem siły napędowej cyrkulacji cieczy. W strefie napowietrzania gaz wypiera część cieczy, przez co następuje zmniejszenie średniej gęstości środowiska. Powoduje to wystąpienie różnicy ciśnień między

strefą napowietrzaną a nienapowietrzaną, która wywołuje cyrkulację cieczy w aparacie.

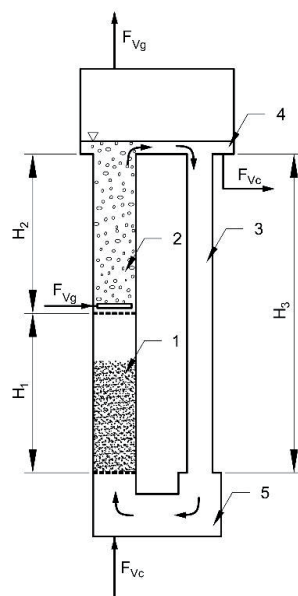
Jedną z wad klasycznych trójfazowych aparatów airlift jest występowanie w tej samej strefie aparatu zarówno pęcherzy gazowych jak i złoża cząstek stałych. Formowanie się i przepływ pęcherzy gazowych, stanowi źródło naprężeń ścinających. Mogą one prowadzić do zrywania delikatnego biofilmu z powierzchni cząstek stałych, a w efekcie do strat biomasy. W celu minimalizacji wpływu pęcherzy gazowych na mikroorganizmy zaproponowano aparat, w którym napowietrzanie cieczy prowadzone jest w zewnętrznym zbiorniku napowietrzającym [3]. W 1997 roku Guo i współaut. przedstawili koncepcję oddzielenia strefy barbotażu od fluidyzacji [4]. W zaproponowanym przez nich hybrydowym aparacie fluidyzacyjnym airlift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy, strefa fluidyzacji została umieszczona poniżej strefy barbotażu. W 2010 roku Olivieri i współaut. przedstawili wyniki badań własnych hydrodynamiki aparatu hybrydowego z wewnętrzną cyrkulacją cieczy [5].

Prończuk i współaut. [6–8] przeprowadzili badania właściwości hydrodynamicznych aparatu hybrydowego z zewnętrzną cyrkulacją cieczy. Do wyznaczenia właściwości hydrodynamicznych takiego aparatu został również sformułowany własny model analityczny. Zaproponowany w pracy [8] model wiąże ze sobą podstawowe parametry hydrodynamiczne pracy aparatu, takie jak prędkości mediów, stopień zatrzymania gazu i porowatość złoża fluidalnego. Poza wspomnianymi parametrami hydrodynamicznymi, ważną cechą hydrodynamiczną umożliwiającą prawidłowe zaprojektowanie aparatu oraz dobór odpowiednich parametrów pracy jest struktura przepływającego płynu. Celem niniejszej pracy jest określenie charakteru przepływu fazy ciekłej w poszczególnych strefach hybrydowego aparatu fluidyzacyjnego airlift z zewnętrzną cyrkulacją, za pomocą badań znacznikowych.

2. STANOWISKO BADAWCZE I METODYKA POMIARÓW

Na rys. 1 przedstawiono schemat stanowiska badawczego. W aparacie wyróżniono pięć stref charakteryzujących się odmiennym charakterem przepływu, są to odpowiednio strefy: fluidyzacji „1”, barbotażu „2”, opadania „3”, odgazowania „4” i przydenna „5”. Wysokości stref fluidyzacji, barbotażu i opadania wynosiły odpowiednio $H_1 = 1$ m, $H_2 = 1$ m oraz $H_3 = 2$ m. Średnica stref fluidyzacji i barbotażu wynosiła $d_1 = d_2 = 0,08$ m. Budowa aparatu pozwalała na zmianę średnicy strefy opadania d_3 , która mogła wynosić 0,03 m, 0,05 m lub 0,08 m. Szczegóły dotyczące budowy aparatu zostały szerzej opisane w pracy [8].

Jako znacznik został użyty stężony roztwór KCl, którego stężenie określono poprzez pomiar konduktancji roztworu. Znacznik był wprowadzany pomiędzy strefami odgazowania „4” i opadania „3”, a pomiar jego stężenia prowadzony był na dopływie i odpływie z każdej analizowanej strefy. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki uzyskane dla strefy fluidyzacji i barbotażu oraz dla całego aparatu.



Rys. 1. Schematyczny rysunek stanowiska badawczego
Fig. 1. Schematic drawing of the test stand

3. BADANIA STRUKTURY PRZEPLYWU STRUMIENIA CIECZY

Badania znacznikowe polegają na wprowadzeniu znacznika do strumienia cieczy wpływającej do aparatu i jednoczesnym pomiarze jego stężenia w strumieniu opuszczającym aparat lub wybraną strefę. W efekcie otrzymuje się krzywą rozkładu czasu przebywania znacznika. Porównując krzywą doświadczalną z modelowymi krzywymi rozkładu czasu przebywania można określić wartość liczby Pecleta, tj. liczby kryterialnej charakteryzującej stopień wzdłużnego wymieszania płynu. W przeprowadzonych badaniach znacznik był wprowadzany w postaci możliwie zbliżonej do dystrybucji Diraca. Do analizy krzywych rozkładu czasu przebywania zastosowano metodę momentów oraz metodę opartą na algorytmie optymalizacyjnym.

Metoda momentów polega na wyznaczeniu momentów krzywych rozkładu czasu przebywania znacznika i porównania ich z momentami krzywych modelowych. Ze względu na dyskretny charakter pomiarów, wartości pierwszego i drugiego momentu obliczano odpowiednio z zależności [9]:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n t_i C_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i \Delta t_i} \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i \Delta t_i} - \mu^2 \quad (2)$$

W niniejszej pracy wartości liczby Pecleta wyznaczano w oparciu o model dla kanału otwartego [10, 11]:

$$\frac{\sigma^2}{\mu^2} = \frac{2}{Pe} + \frac{8}{Pe^2} \quad (3)$$

Wybór ten podyktowany jest budową aparatu oraz tym, że w pracy [10] wykazano niewielkie rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi według modelu dla kanału otwartego, półotwartego i zamkniętego.

Alternatywna metoda wyznaczania liczby Pecleta sprowadzała się do porównania doświadczalnych krzywych rozkładu czasu przebywania znacznika z krzywymi otrzymanymi w wyniku rozwiązania równania opisującego transport płynu w aparacie. Pomijając wpływ dyspersji radialnej, równanie bilansu masy znacznika można zapisać w postaci bezwymiarowej jako:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \theta} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 \beta}{\partial z^2} - \frac{\partial \beta}{\partial z} \quad (4)$$

W celu jednoznacznego rozwiązania równania (4) przyjęto następujące warunki brzegowe (5a) i warunek początkowy (5b):

$$\beta(0, \theta) = \varphi(\theta), \quad \frac{\partial \beta(1, \theta)}{\partial z} = 0 \quad (5a)$$

$$\beta(z, 0) = 0, \quad z \in [0, 1] \quad (5b)$$

gdzie $\varphi(\theta)$ jest dowolną funkcją rozkładu czasu przebywania znacznika na dopływie do badanej strefy. Funkcja ta ma postać:

$$\varphi(\theta) = \frac{C_{Af}(t) - C_{A0}}{C_{A\infty} - C_{A0}} \quad (6)$$

Aby wyznaczyć wartość liczby Pecleta charakteryzującą przepływ w aparacie lub w wybranej strefie należy znaleźć takie rozwiązanie modelu dyspersyjnego (4)-(5), które będzie najbliższe otrzymanemu doświadczalnie rozkładowi czasu przebywania znacznika w sensie wybranej normy. Formalnie, problem ten sprowadza się zatem do minimalizacji funkcji celu w postaci:

$$f(Pe) = \sum_{i=1}^n [\beta_{eksp}(1, \theta_i) - \beta_{obl}(1, \theta_i)]^2 \quad (7)$$

Jak można zauważyć, funkcja celu nie zależy w sposób jawny od liczby Pecleta. Wyznaczenie jej wartości wymaga bowiem znajomości obliczonych wartości stężenia znacznika na wypływie z rozważanej części aparatu, $\beta_{obl}(1, \theta_i)$. Wartości te uzyskuje

się rozwiązując równanie różniczkowe cząstkowe (4). Do numerycznego rozwiązania wspomnianego równania zastosowano metodę linii.

Obliczenia przeprowadzono w środowisku obliczeniowym Matlab. Do minimalizacji funkcji (7) zastosowano procedurę optymalizacyjną `fminbnd` opartą m.in. na metodzie złotego podziału z zanurzoną w niej funkcją `ode15s` całkowania układu równań różniczkowych zwyczajnych powstałego z dyskretyzacji równania (4). Ze względu na zastosowanie metody całkowania ze zmiennym krokiem, rozkład czasu przebywania znacznika na dopływie do badanej strefy musi być funkcją ciągłą. Oznacza to konieczność aproksymacji danych doświadczalnych za pomocą pewnej funkcji. W niniejszej pracy została użyta funkcja w postaci:

$$\beta(0, \theta) = a_1 \exp\left(-\frac{\theta - a_2}{a_3}\right) \exp\left\{\left[\exp\left(-\frac{\theta - a_2}{a_3}\right)\right]^{a_4}\right\} \quad (8)$$

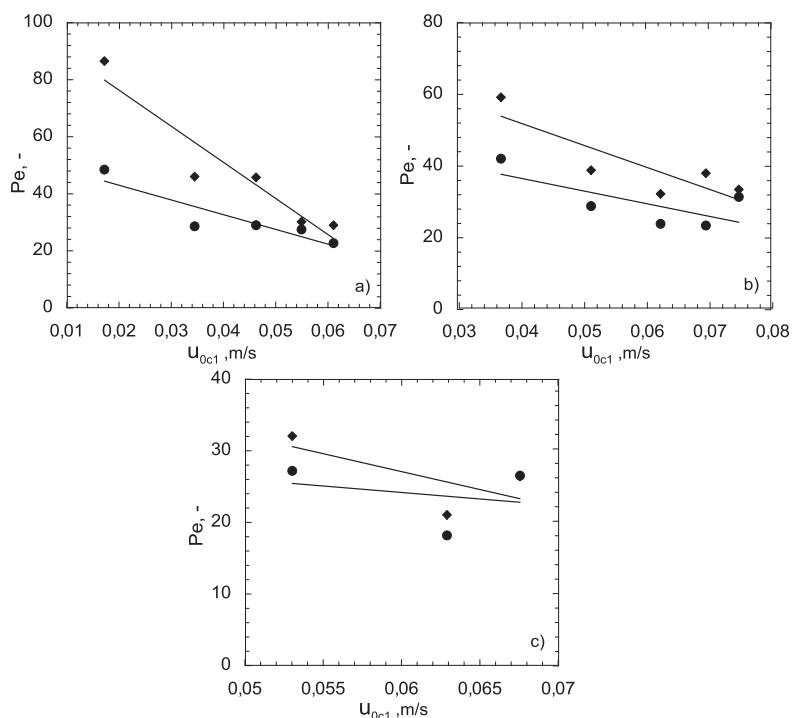
Do celów porównawczych, wartości liczby Pecleta dla całego aparatu wyznaczono również z analitycznego rozwiązania równania modelu dla kanału otwartego, uogólnionego na przypadek cyrkulacji cieczy w aparacie [11]:

$$\beta(1, \theta) = \sqrt{\frac{Pe}{4\pi\theta}} \sum_{x=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{Pe(x-\theta)^2}{4\theta}\right] \quad (9)$$

4. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

Na rys. 2 przedstawiono zależności liczby Pecleta Pe od prędkości pozornej cieczy u_{0c1} dla strefy fluidyzacji „1” uzyskane dla trzech różnych średnic strefy opadania. Symbolem (♦) oznaczono wartości otrzymane przy użyciu metody opartej na jednowymiarowym modelu dyspersyjnym, a symbolem (●) wartości otrzymane według metody momentów. Można zauważyć, że wyniki otrzymane za pomocą dwóch różnych metod charakteryzują się podobieństwem jakościowym, jednak wartości liczby Pecleta uzyskane według metody momentów mają mniejsze wartości.

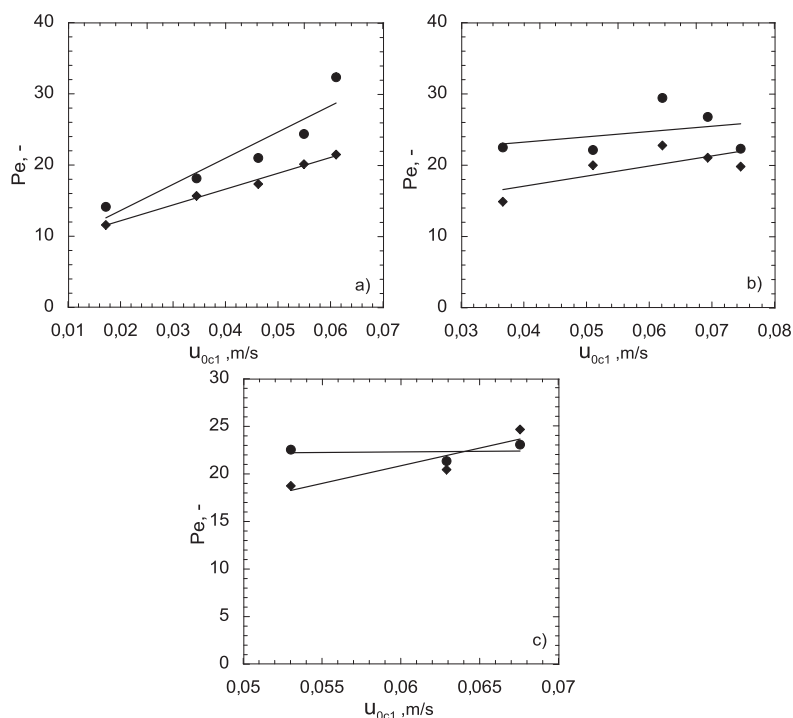
Wraz ze wzrostem prędkości cyrkulującej cieczy następuje zmniejszenie wartości liczby Pecleta dla strefy „1” (rys. 2). Spowodowane jest to zwiększeniem się wysokości złoża fluidalnego w strefie fluidyzacji „1”. W literaturze często przyjmuje się, że w obszarze złoża fluidalnego panują warunki zbliżone do całkowitego wymieszania, zatem złożo fluidalne cechuje się niskimi wartościami liczby Pecleta. Przy małych wartościach prędkości cieczy u_{0c1} złożo fluidalne posiada niewielką wysokość. Nad jego powierzchnią ma natomiast miejsce przepływ przez przewód kołowy, który charakteryzuje się warunkami zbliżonymi bardziej do przepływu tłokowego, któremu odpowiadają duże wartości liczby Pecleta. Zwiększenie wysokości złoża fluidalnego powoduje zwiększenie zatem udziału obszaru z dobrym wymieszaniami, co w efekcie prowadzi do obniżenia wartości liczby Pecleta dla całej strefy.



Rys. 2. Liczba Pecleta dla strefy fluidyzacji „1” obliczona według modelu dyspersyjnego (◆) i metody momentów (●) w zależności od prędkości pozornej cieczy u_{0c1} dla aparatu o średnicy strefy opadania równej: a) 0,03 m, b) 0,05 m i c) 0,08 m

Fig. 2. Peclet number for the fluidization zone "1" calculated according to a dispersion model (◆) and method of moments (●) depending on the superficial liquid velocity u_{0c1} for the apparatus with the downcomer diameter equal to: a) 0,03 m, b) 0,05 m and c) 0,08 m

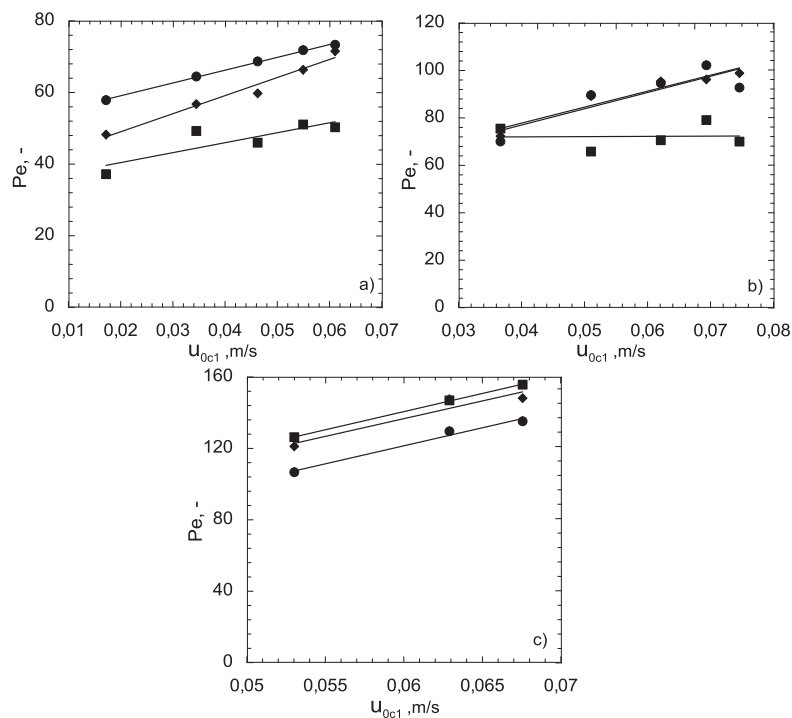
Na rys. 3 zilustrowano zależność liczby Pecleta od prędkości cieczy w aparacie u_{0c1} dla strefy barbotażu „2”. Można zaobserwować, że tendencja zmian wartości liczby Pecleta jest taka niezależnie od użytej metody wyznaczania Pe , jednak i w tym wypadku występują pewne rozbieżności ilościowe. W przeciwieństwie do strefy fluidyzacji „1”, w strefie barbotażu zwiększenie prędkości cieczy prowadzi do zwiększenia wartości liczby Pecleta. Powodowane jest to zwiększeniem burzliwości przepływu, co skutkuje zbliżeniem się charakteru przepływu do przepływu tłokowego. Unoszące się pęcherze gazowe posiadają jednak wyższą prędkość, niż ciecz płynąca przez strefę barbotażu. Ta różnica prędkości powoduje zaburzenia w strukturze przepływu płynu, co z kolei skutkuje dodatkowym wymieszaniem wzdłużnym cieczy w tej strefie i w efekcie stosunkowo niskimi wartościami liczb Pecleta w tej strefie.



Rys. 3. Liczba Pecleta dla strefy barbotażu „2” obliczona według modelu dyspersyjnego (◆) i metody momentów (●) w zależności od prędkości pozornej cieczy u_{0c1} dla aparatu o średnicy strefy opadania równej: a) 0,03 m, b) 0,05 m i c) 0,08 m

Fig. 3. Pelet number for the bubbling zone "2" calculated according to a dispersion model (◆) and method of moments (●) depending on the superficial liquid velocity u_{0c1} for the apparatus with the downcomer diameter equal to: a) 0,03 m, b) 0,05 m and c) 0,08 m

Na rys. 4 przedstawiono wyniki doświadczalne zależności liczby Pecleta od prędkości cieczy w aparacie u_{0c1} dla całego aparatu. Poza wartościami Pe wyznaczonymi według metody momentów i algorytmu optymalizacyjnego, na rys. 4 przedstawiono również wartości liczby Pecleta wyznaczone poprzez regresję danych doświadczalnych równaniem (9) (symbol ■). Zgodnie z przewidywaniami, wartość liczby Pecleta rośnie wraz ze wzrostem prędkości cieczy u_{0c1} . Ponadto można zaobserwować, że wartość liczby Pecleta dla całego aparatu rośnie wraz ze wzrostem średnicy strefy opadania. Powodowane jest to wzrostem objętości strefy opadania, dla której można przyjąć przepływ charakteryzujący się wysokimi wartościami liczb Pecleta. W efekcie, wzrost objętości strefy opadania oznacza jej większy udział objętościowy w całym aparacie.



Rys. 4. Liczba Pecleta dla całego aparatu obliczona według modelu dyspersyjnego (\blacklozenge), metody momentów (\bullet) i aproksymacji równaniem (9) (\blacksquare) w zależności od prędkości pozornej cieczy u_{0c1} dla aparatu o średnicy strefy opadania równej: a) 0,03 m, b) 0,05 m i c) 0,08 m

Fig. 4. Peclet number for the whole apparatus calculated according to a dispersion model (\blacklozenge), method of moments (\bullet) and approximation of Eq. (9) (\blacksquare) depending on the superficial liquid velocity u_{0c1} for the apparatus with the downcomer diameter equal to: a) 0,03 m, b) 0,05 m and c) 0,08 m

WNIOSKI

W oparciu o badania znacznikowe określono strukturę przepływu fazy ciekłej w hybrydowym fluidyzacyjnym aparacie airlift z cyrkulacją zewnętrzną. Wykazano, że dla strefy fluidyzacji „1” liczba Pecleta leży w przedziale $Pe \in (20, 80)$. Oznacza to, że w tej strefie występuje dość wyraźne mieszanie strumienia cieczy powodowane obecnością złoża fluidalnego. Wartości liczby Pecleta w strefie fluidyzacji „1” zmniejszają się wraz ze wzrostem prędkości przepływu cieczy. Jest to powodowane zwiększaniem się wysokości dynamicznej złoża fluidalnego. Strefa barbotażu „2” charakteryzuje się również stosunkowo niskimi wartościami liczby Pecleta. Dobre wymieszanie w tej strefie jest wynikiem obecności pęcherzy gazowych. Analiza wartości liczby Pecleta całego aparatu wykazuje wzrost wartości Pe wraz ze zwiększaniem się prędkości cieczy u_{0c1} . Liczba Pecleta całego aparatu jest

również silnie uzależniona od średnicy strefy opadania, mianowicie jej wartość wzrasta wraz ze zwiększaniem się średnicy tej strefy. Wynika to ze wzrostu udziału objętości strefy opadania w całkowitej objętości aparatu.

Wartości liczby Pecleta wyznaczone metodą momentów i metodą opartą na algorytmie optymalizacyjnym różnią się od siebie, przede wszystkim ilościowo. Powodem rozbieżności są pewne ograniczenia drugiej z metod. W przypadku dużo większej rozpiętości czasowej sygnału wymuszającego w stosunku do czasu przebywania cieczy w danej strefie, wynikającej ze znacznego oddalenia punktu dozowania znacznika od badanych stref, wyznaczone numerycznie odpowiedzi mogą przybierać niemal identyczne przebiegi dla bardzo szerokiego zakresu wartości liczby Pecleta.

OZNACZENIA – SYMBOLS

C	– stężenie znacznika, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ tracer concentration, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
d	– średnica, m diameter, m
F_V	– objętościowe natężenie przepływu, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ volumetric flow rate, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
H	– wysokość, m height, m
Pe	– liczba Pecleta, - Peclet number, -
t	– czas, s time, s
z	– bezwymiarowa długość, - dimensionless length, -
β	– bezwymiarowe stężenie, $(C_A - C_{A0}) / (C_{A\infty} - C_{A0})$, - dimensionless concentration, $(C_A - C_{A0}) / (C_{A\infty} - C_{A0})$, -
μ	– wartość średnia mean value
σ^2	– wariancja variance
θ	– czas bezwymiarowy, - dimensionless time, -

INDEKSY DOLNE I GÓRNE – SUBSCRIPTS AND SUPERSCRIPTS

A	– dotyczy składnika A refers to component A
c	– dotyczy cieczy refers to liquid
f	– dotyczy strumienia wlotowego refers to inlet stream
g	– dotyczy gazu refers to gas
0	– dotyczy wartości początkowej lub prędkości pozornej refers to initial value or superficial velocity
1, 2, 3, 4, 5	– dotyczy i -tej strefy aparatu

- ∞ refers to the i -th zone of the apparatus
 – dotyczy stężenia po całkowitym wymieszaniu
 refers to concentration after complete mixing

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE – REFERENCES

- [1] Roy D., 2015. Novel bioreactors for culturing marine organisms, In: Springer Handbook of Marine Biotechnology (pp. 327-386), Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Iliuta I., Larachi F., 2004. Biomass accumulation and clogging in trickle- bed bioreactors, AIChE Journal, 50(10), 2541-2551.
- [3] Dunn I. J., Tanaka H., Uzman S., Denac M., 1983. Biofilm fluidized-bed reactors and their application to waste water nitrification, Annals of the New York Academy of Sciences, 413, 168-183.
- [4] Guo Y.X., Rathor M.N., Ti H.C., 1997. Hydrodynamics and mass transfer studies in a novel external-loop airlift reactor, Chemical Engineering Journal, 67(3), 205-214.
- [5] Olivieri G., Marzocchella A., Salatino P., 2010, A novel three- phase airlift reactor without circulation of solids, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 88(4), 574-578.
- [6] Prończuk M., Grzywacz R., 2016. Wpływ geometrii hybrydowego reaktora airlift na wybrane parametry przepływu płynów. Przemysł Chemiczny, 95, 2003-2007.
- [7] Prończuk M., Bizon K., 2017. Dyskusja oporów lokalnych w hybrydowym fluidyzacyjnym aparacie airlift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy. Inżynieria i Aparatura Chemiczna.
- [8] Prończuk M., Bizon K., Grzywacz R., 2017. Experimental investigations of hydrodynamic characteristics of a hybrid fluidized bed airlift reactor with external liquid circulation. Chemical Engineering Research and Design, Vol. 126, 188-198.
- [9] Iller E., 1992. Badania znacznikowe w inżynierii procesowej, WNT, Warszawa.
- [10] Grzywacz R., 2012. Właściwości stacjonarne reaktorów barbotażowych typu airlift, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Seria Inżynieria i Technologia Chemiczna, monografia 410.
- [11] Levenspiel O., 1962. Chemical reaction engineering, John Wiley & Sons.

MATEUSZ PROŃCZUK, KATARZYNA BIZON, BOLESŁAW TABIŚ

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE AXIAL DISPERSION COEFFICIENTS IN THE HYBRID FLUIDIZED BED AIRLIFT APPARATUS

This paper presents the results of experimental research concerning determination of Peclet number for the selected zones of a hybrid fluidized-bed airlift apparatus with external liquid circulation. The apparatus is a modification of a three-phase airlift reactor. It combines the advantages of both a liquid-solid fluidized-bed apparatus and an airlift apparatus. Potential applications of the hybrid system are microbiological processes. It allows separating the bubbling zone from the fluidization zone by placing them one above the other. Gas bubbles are formed in the bubbling zone, which is located in the upper part of the riser. With properly adjusted process and design parameters, gas bubbles do not enter the downcomer and fluidization zone. As a result, shear stress induced by formation and flow of gas bubbles do not affect the biofilm layer.

Tracer stimulus-response experiments were carried out in order to characterize the structure of the liquid flow through the selected zones of the apparatus. Based on the tracer residence time distribution curves, measured in the inflow and outflow from a given zone, the Peclet numbers of the individual zones and the entire apparatus were determined. Peclet number was determined using the method of moments, optimization algorithm coupled with the one-dimensional dispersion model and analytical solution of the one-dimensional dispersion model. The tests were carried out for various apparent velocities of the liquid in the apparatus and different downcomer diameters.

Received: 17.09.2018

Accepted: 24.10.2018