

Joanna KARCZ, Marcelina BITENC, Łukasz KACPERSKI

e-mail joanna.karcz@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 cieczy

Wstęp

Rosnące znaczenie procesów biochemicznych w wielu technologiach wiąże się z koniecznością doboru odpowiednich aparatów do prowadzenia przemian z udziałem mikroorganizmów. Reaktory typu *air-lift* stanowią klasę aparatów, do których energia doprowadzana jest poprzez strumień przepływającego gazu. Konsekwencją braku mieszadeł mechanicznych w tych aparatach są mniejsze naprężenia ścinające w układzie, które mogą niekorzystnie wpływać na błony komórkowe [1, 2]. Procesy przebiegające w różnych typach kolumn *air-lift* stanowiły przedmiot systematycznych badań między innymi Kawalec-Pietrenko [3, 4] oraz Dziubińskiego i Sowińskiego [5].

Biorąc pod uwagę zalety bioreaktorów *air-lift*, w badaniach własnych zastosowano ten aparat do zawieszinowej hodowli drożdży piekarniczych. Badania doświadczalne przedstawione w tej pracy miały na celu określenie warunków hydrodynamicznych w kolumnie *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy, którymi były roztwory sacharozy.

Badania doświadczalne

Badania przeprowadzono dla wody oraz wodnych roztworów sacharozy o stężeniach 5, 10 lub 20% masowych jako fazy ciekłej i powietrza jako fazy gazowej. Objętościowe natężenie przepływu powietrza zmieniano w zakresie V_g [m³/s] ∈ <3,64·10⁻⁵; 3,18·10⁻⁴> dla wody oraz V_g [m³/s] ∈ <3,64·10⁻⁵; 2,16·10⁻⁴> dla wodnych roztworów sacharozy o stężeniu x_A ∈ <0,05; 0,2> kg sacharozy/kg roztworu. Wyznaczone doświadczalnie właściwości fizyczne badanych cieczy przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości fizyczne wodnych roztworów sacharozy w temperaturze 20°C

Lp.	Stężenie x_A sacharozy [kg sacharozy/kg roztworu]	Gęstość [kg/m ³]	Lepkość [mPas]	Napięcie powierzchniowe [N/m]
1	0	999	1	0,0727
2	0,05	1018,5	1,2	0,0739
3	0,1	1039	1,42	0,0765
4	0,2	1082	2,03	0,0792

Aparatura badawcza składała się z czterech głównych zespołów: kolumny typu *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy, instalacji doprowadzającej sprężone powietrze do aparatu, przyrządów pomiarowych oraz stanowiska komputerowego do cyfrowej analizy rejestrowanych danych. Średnice wewnętrzne rur kolumny *air-lift* wynosiły $D_R = 0,1056$ m (strefa wznoszenia) oraz $D_D = 0,0464$ m (strefa opadania), a ich wysokości były równe odpowiednio $H_{OR} = 1,932$ m i $H_{OD} = 1,69$ m. Odległość pomiędzy pionowymi osiami symetrii w obu strefach wynosiła 0,5 m. Gaz był podawany przez dno sitowe, w którym na średnicy podziałowej $d_p = 0,073$ m zostały symetrycznie rozmieszczone trzy otworki o średnicy 2 mm.

Badania udziału φ_R gazu zatrzymanego w cieczy w strefie wznoszenia przeprowadzono stosując dwie metody: ekspansji objętości [6] lub manometryczną z manometrem odwróconym [1, 2]. W pierwszej z tych metod udział φ_R gazu zatrzymanego w cieczy określa się na podstawie odczytu wysokości słupa mieszaniny ciecz – gaz w kolumnie

$$\varphi_R = \frac{h_d - H_0}{h_d} \quad (1)$$

gdzie:

- h_d – wysokość słupa dyspersji, [m];
- H_0 – wysokość słupa cieczy w paracie, [m].

Zastosowanie manometru odwróconego wymaga znajomości gęstości cieczy ρ_c i gazu ρ_g w aktualnej temperaturze układu oraz odległości l pomiędzy króćcami manometrycznymi. Udział gazu zatrzymanego w cieczy określa się wówczas z równania [1]

$$\varphi_R = \frac{\rho_c}{\rho_c - \rho_g} \frac{\Delta h_m}{l} \quad (2)$$

gdzie:

- ρ_c – gęstość cieczy, [kg/m³];
- ρ_g – gęstość gazu, [kg/m³];
- Δh_m – różnica poziomów cieczy w obu rurkach manometru, [m];
- l – odległość pomiędzy króćcami manometrycznymi, [m].

Ze względu na mniejszą dokładność wyników otrzymanych metodą ekspansji objętości do dalszej analizy wykorzystano dane uzyskane metodą manometryczną. W obliczeniach przyjmowano wartość udziału gazu zatrzymanego w cieczy, określoną jako średnia z około dziesięciu odczytów w danym punkcie pomiarowym.

Prędkość cieczy w_{cD} w strefie opadania oraz czas cyrkulacji cieczy t_c w aparacie określano metodą znacznikową [1, 4, 7]. Zmiany konduktancji w czasie, po wprowadzeniu określonej ilości nasyconego roztworu chlorku sodu do górnej części strefy opadania, mierzono dwiema sondami konduktometrycznymi EC-60 połączonymi z miernikiem laboratoryjnym CX-721. Na podstawie zarejestrowanych komputerowo łącznie $4 \times 1400 = 5600$ punktów zmiany przewodności w czasie opracowano tzw. krzywe odpowiedzi, z których określano wielkości t_c oraz w_{cD} .

Liniową prędkość cieczy w_{cD} w strefie opadania dla danej serii pomiarowej obliczano na podstawie następującej definicji [7]

$$w_{cD} = \frac{s}{\Delta t} \quad (3)$$

gdzie:

- s – odległość pomiędzy dwiema sondami, umieszczonymi w strefie opadania, [m];
- Δt – czas przepływu cieczy pomiędzy sondami, określony na podstawie odległości między pikami na krzywych odpowiedzi zarejestrowanych przez te sondy.

Prędkość liniową przepływu cieczy w strefie wznoszenia w_{cR} obliczano uwzględniając równanie ciągłości oraz udział gazu zatrzymanego w strefie wznoszenia [1,4,7]

$$w_{cR} = w_{cD} \frac{A_D}{A_R(1 - \varphi_R)} \quad (4)$$

gdzie:

- A_R – przekrój poprzeczny strefy wznoszenia, [m²];
- A_D – przekrój poprzeczny strefy opadania, [m²].

Wyniki badań

Uzyskane na podstawie badań doświadczalnych wyniki udziału gazu zatrzymanego w cieczy w strefie wznoszenia φ_R , prędkości cieczy w strefie opadania w_{cD} oraz czasu cyrkulacji t_c opracowano matematycznie, uwzględniając w równaniach wpływ stężenia sacharozy x_A na wielkość analizowanych parametrów hydrodynamicznych.

Wyniki eksperymentalne dla udziału gazu zatrzymanego w cieczy w strefie wznoszenia φ_R uogólniono w postaci następującego równania

$$\varphi_R = (-7x_A^2 + 0,42x_A + 1,4) Fr_g^{-0,19x_A + 0,416} \quad (5)$$

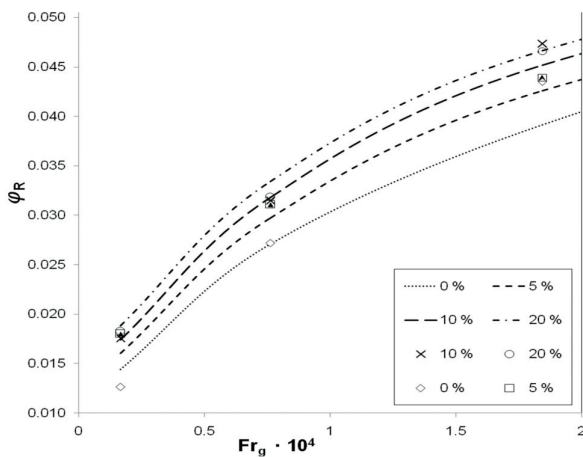
gdzie:

x_A – ułamek masowy sacharozy [kg_{sacharozy}/kg_{roztworu}],

Fr_g – zmodyfikowana liczba Froude'a zdefiniowana w następujący sposób

$$Fr_g = \frac{w_{0g}^2}{D_R g} \quad (6)$$

W definicji (6) $w_{0g} = 4V_g/\pi D_R^2$ oznacza umowną liniową prędkość gazu liczoną na pusty przekrój strefy wznoszenia, m/s; g – przyspieszenie ziemskie, m/s². Równanie (5) opisuje wyniki ze średnim błędem względnym ±5% i obowiązuje w zakresie $x_A \in <0; 0,2>$ oraz $Fr_g \cdot 10^4 \in <0,167; 5,9>$. Zależności $\phi_R = f(Fr_g)$ dla różnych stężeń x_A sacharozy w roztworze są przedstawione na rys. 1. Linie ciągłe na tym rysunku opisują wartości ϕ_R obliczone na podstawie równania (5). Jak wynika z danych zamieszczonych na rys. 1, ze wzrostem zmodyfikowanej liczby Froude'a Fr_g (wzrostem natężenia przepływu gazu V_g) oraz stężenia x_A znacząco wzrasta udział ϕ_R gazu zatrzymanego w cieczy w strefie wznoszenia.



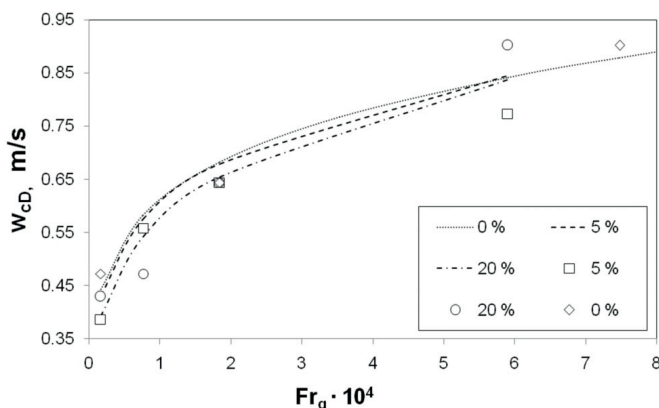
Rys. 1. Zależność udziału gazu zatrzymanego w strefie wznoszenia od zmodyfikowanej liczby Froude'a

Wyniki pomiarów prędkości cieczy w strefie opadania w_{cD} aproksymowano w postaci następującego równania

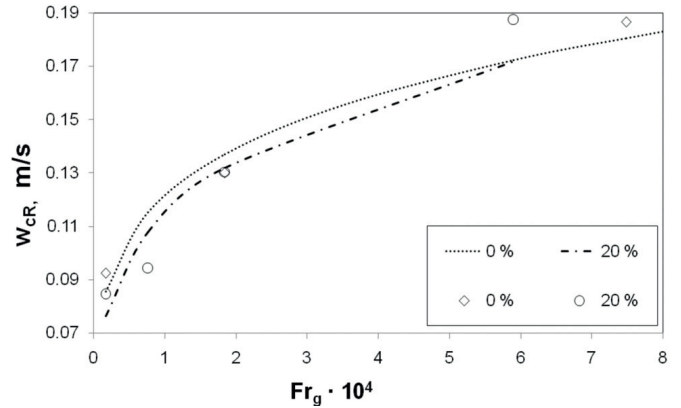
$$w_{cD} = (4,2x_A + 3,21) Fr_g^{0,16x_A + 0,18} \quad [m/s] \quad (7)$$

Równanie (7) przybliża dane pomiarowe z błędem względnym ±9% i obowiązuje w takim samym zakresie zmiennych jak równanie (5). Wyniki otrzymane z równania (7) porównano z danymi pomiarowymi na rys. 2. Jak wynika z tych danych, ze wzrostem zmodyfikowanej liczby Fr_g wartość w_{cD} wzrasta, a ze wzrostem stężenia x_A wyraźnie zmniejsza się. Zależność $w_{cR} = f(Fr_g)$ jest zilustrowana na rys. 3.

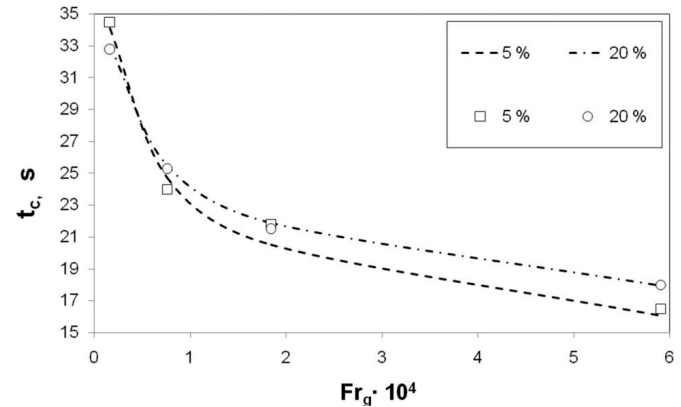
Zależność czasu cyrkulacji od zmiennych x_A oraz Fr_g opisano następującym równaniem:



Rys. 2. Zależność prędkości cieczy w strefie opadania od zmodyfikowanej liczby Froude'a



Rys. 3. Zależność prędkości cieczy w strefie wznoszenia od zmodyfikowanej liczby Froude'a



Rys. 4. Zależność czasu cyrkulacji płynu od zmodyfikowanej liczby Froude'a

$$t_c = (150,12x_A^2 - 26,14x_A + 4,27) Fr_g^{3,48x_A^2 - 0,6x_A - 0,19} \quad [s] \quad (8)$$

Aproksymuje ono dane doświadczalne ze średnim błędem względnym ±5%, w takim samym zakresie zmiennych jak równanie (5). Doświadczalne wartości t_c i obliczone z równania (8) zostały porównane na rys. 4. Jak wynika z tych danych, czas t_c zmniejsza się ze wzrostem liczby Fr_g i wzrasta ze wzrostem stężenia x_A .

Wnioski

Na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzonych w kolumnie air-lift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy oszacowano wpływ stężenia x_A sacharozy w roztworach wodnych na: udział ϕ_R gazu zatrzymanego w cieczy, prędkości płynu w_{cD} i w_{cR} , odpowiednio, w strefach opadania i wznoszenia, a także na czas cyrkulacji t_c . Wyniki opracowano w postaci równań (5), (7) i (8). Stwierdzono, że w zakresie przeprowadzonych pomiarów, ze wzrostem stężenia x_A wzrastają udział ϕ_R (o ok. 30%) i czas cyrkulacji t_c . Natomiast prędkości w_{cD} i w_{cR} wyraźnie zmniejszają się ze wzrostem x_A .

LITERATURA

- [1] M. Y. Chisti: Airlift bioreactors. Elsevier Applied Science, London and New York 1989.
- [2] W.A. Al-Masry, A.E. Abasaed: Chem. Eng. Sci., **53**, 4085 (1998).
- [3] B. Kawalec-Pietrenko: Zesz. Nauk. Pol. Gdańskiej, nr 494 (1992).
- [4] B. Kawalec-Pietrenko: Bioprocess Engineering **23**, 397 (2000).
- [5] M. Dziubiński, J. Sowiński: Inż. Chem. i Proc., **23**, 141 (2002).
- [6] B. Jin, P. Yin, P. Lant: Chemical Engineering and Processing, **45**, 608 (2006).
- [7] C. Freitas, M. Fialova, J. Zahradnik, J. A. Teixeira: Chem. Eng. Sci., **55**, 4961 (2000).