

Dr inż. Marek OCHOWIAK
 Prof. dr hab. Lubomira BRONIARZ-PRESS
 Inż. Agata KACZMAREK
 Inż. Natalia KUJAWA
 Wydział Technologii Chemicznej
 Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej
 Zakład Inżynierii i Aparatury Chemicznej
 Politechnika Poznańska

BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA MASY W PROCESIE MIESZANIA Z NAPONIETRZANIEM WODY®

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych współczynnika wnikania masy w procesie mieszania cieczy mieszadłem turbinowym Rushtona oraz mieszadłem śmigłowym z jednoczesnym napowietrzaniem. Wykazano, że mieszadło śmigłowe nadaje się bardziej do rozprowadzania tlenu przy niższych wartościach częstości obrotowych mieszadła. Turbina Rushtona lepiej rozprowadzała tlen przy większych wartościach częstości obrotów.

Słowa kluczowe: wnikanie masy, mieszanie, współczynnik wnikania masy, mieszadło, natlenianie.

WPROWADZENIE

Mechaniczne mieszanie cieczy z gazem stosuje się wtedy, kiedy mają przebiegać między nimi procesy wymiany masy, a główny opór przenikania jest związany z cieczą. W takich przypadkach szybkość wnikania masy w cieczy limituje przebieg całego procesu. Można go zintensyfikować rozwijając powierzchnię kontaktu międzyfazowego przez rozproszenie w cieczy gazu w postaci możliwie małych pęcherzy [12]. Sam barbotaż w takich przypadkach zwykle nie wystarcza, konieczne jest dodatkowe intensywne mieszanie układu. Pozwala ono nie tylko na znaczne powiększenie powierzchni kontaktu, ale także na ciągłe jej odnawianie w trakcie procesu. Wywoływana przez mieszadło cyrkulacja cieczy powoduje równocześnie zmniejszenie grubości warstwy granicznej przy powierzchni zetknięcia się obydwu faz, a tym samym skrócenie drogi i czasu dyfuzji składników wymienianych między nimi. W efekcie następuje wydajna intensyfikacja wymiany masy między gazem a cieczą przy niezbyt dużych nakładach energetycznych [4, 5, 13]. Często spotykanym w praktyce rozwiązaniem układu mieszalnik-aerator jest wprowadzanie powietrza przy dnie zbiornika z jednoczesnym mieszaniem mechanicznym. Wprowadzenie pęcherzyków powietrza przy intensywnym mieszanym wydłuża czas ich przebywania w ściekach, co pozwala efektywniej wykorzystać zawarty w pęcherzykach tlen [1, 3]. Do oceny procesu napowietrzania niezbędna jest znajomość mocy mieszania oraz współczynnika wnikania masy [3, 7, 8].

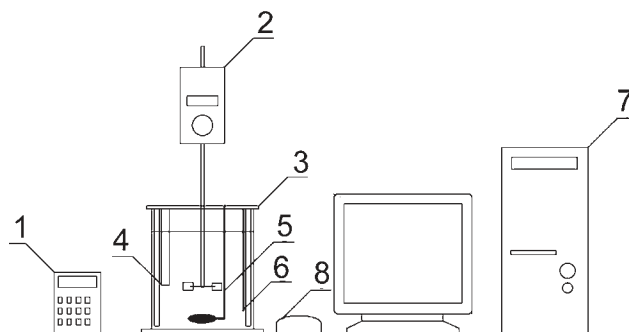
Mieszanie mechaniczne z jednoczesnym napowietrzaniem jest ważnym procesem przemysłowym [8, 12]. Znajduje ono zastosowanie m.in. w procesie biologicznego oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego, w procesie wstępnego napowietrzania ścieków stosowanym do ich odświeżania (tj. do usunięcia siarkowodoru oraz innych gazowych produktów beztlenowego rozkładu związków organicznych), w procesach oczyszczania ścieków i uzdatniania wody do usuwania rozpuszczonych gazów oraz odżelaziania i odmanganiania

wody [3, 9]. Do oczyszczania ścieków przemysłu mleczarskiego stosowane są różne metody, m.in. sekwencyjne biologiczne reaktory (SBR). Oczyszczalnie typu SBR zbudowane są z reaktorów pracujących cyklicznie. Każdy cykl składa się z fazy napełniania, mieszania i napowietrzania, sedimentacji i dekantacji [15, 16].

Celem artykułu jest przedstawienie uzyskanych wyników przeprowadzonych prac badawczych dotyczących porównania współczynników wnikania masy w procesie mieszania cieczy mieszadłem turbinowym Rushtona oraz mieszadłem śmigłowym z jednoczesnym napowietrzaniem.

STANOWISKO I METODYKA BADAŃ

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 1. Głównymi jego elementami były: tlenomierz, układ napędzający mieszadło, zbiornik, elektroda, kamień napowietrzający, termometr, komputer, aerator



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego.

1 – tlenomierz, 2 – układ napędzający mieszadło, 3 – zbiornik, 4 – elektroda, 5 – kamień napowietrzający, 6 – termometr, 7 – komputer, 8 – aerator

Źródło: Opracowanie własne

perlisty wypływ powietrza. Pomiary zawartości tlenu dokonano za pomocą mikrokomputerowego tlenomierza CO-505 produkcji przedsiębiorstwa ELMETRON S.A. Do pomiaru zawartości tlenu w wodzie wykorzystano czujnik tlenowy typu COG-1 firmy ELMETRON S.A. Badania wykonano dla dwóch mieszadeł po 11 serii po 200 punktów pomiarowych, obroty mieszadła zwiększano co 1,67 [1/s] w zakresie od 0 do 16,67 [1/s]. Pomiary powtarzano trzykrotnie. Nastawy częstości obrotów dokonywano dzięki zastosowaniu układu napędzającego mieszadło IKA EUROSTAR Power Control Visc.

Badania procesu wnikania masy podczas mieszania z napowietrzaniem przeprowadzono w płaskodennym zbiorniku cylindrycznym przy średnicy mieszalnika $D = 0,2$ m, wysokości napełnienia zbiornika $H = 0,2$ m i standardowym inwariancie geometrycznym układu mieszadło-mieszalnik [11]. W zbiorniku umieszczono cztery przegrody o szerokości $B = 0,02$ m. W badaniach zastosowano dwa rodzaje mieszadeł: mieszadło śmigłowe ($d = 0,0662$ m) oraz turbinę Rushtona ($d = 0,074$ m). Mieszadła zostały zamocowane na wysokości $h = D/3$ od dna zbiornika. W mieszalniku znajdowała się woda o objętości $V = 0,004$ m³ i temperaturze $t_w = 20^\circ\text{C}$.

Dynamiczna metoda wyznaczania objętościowego współczynnika wnikania masy ($k_L a$) opiera się na analizie kinetyki natleniania wstępnie odtlenionej cieczy. Szybkość zmian stężenia tlenu w cieczy można przedstawić jako [14]:

$$\frac{dx}{dt} = (k_L a)(x^* - x_t) \quad (1)$$

Całkowanie tego równania, przy warunku granicznym $x_t = 0$ dla $t = 0$, prowadzi do zależności:

$$\ln \frac{(x^* - x_t)}{x^*} = -(k_L a)t \quad (2)$$

Objętościowy współczynnik wnikania masy można zatem wyznaczyć jako nachylenie prostej w układzie:

$$\ln \frac{(x^* - x_t)}{x^*} = f(t) \quad (3)$$

Jako początek procesu napowietrzania cieczy przyjmuje się moment, gdy sygnał czujnika zaczyna wzrastać od wartości początkowej odpowiadającej $x_t = 0$ w środowisku beztlenowym. Proces prowadzi się do czasu, gdy zawartość tlenu w wodzie przyjmie ustaloną wartość odpowiadającą stanowi nasycenia wody tlenem ($x_t = x^*$) w aktualnych warunkach pomiaru. Nachylenie linii prostej opisanej zależnością (3) odpowiada wartości objętościowego współczynnika wnikania masy [11]. Dokładność wyznaczonych wartości $k_L a$ wynosi $\pm 0,0008$ [1/s] przy wartości współczynnika determinacji $R^2 > 0,95$ jako oceny dopasowania równań regresji liniowej do punktów doświadczalnych.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe obrazy procesu napowietrzania cieczy. Bez mieszania mechanicznego (oraz przy niewielkich częstościach obrotów) strumień gazu

w postaci pęcherzyków barbotuje ku zwierciadłu cieczy (rysunek 2a). W zakresie, w którym mieszadło zachłystuje się gazem, konstrukcja mieszadła w nieznacznym stopniu wpływa na przepływ pęcherzyków gazu w cieczy (rysunki 2 b i 2c), przy czym uzyskane wartości współczynników wymiany masy mają zbliżone wartości dla obu mieszadeł. Z analizy obrazów przedstawionych na rysunkach 2d i 2e uzyskanych dla dwóch przebadanych konstrukcji mieszadeł przy takiej samej wartości częstości obrotów wynika, że proces napowietrzania (rozproszenie gazu w wodzie) jest intensywniejszy dla turbiny Rushtona.

Na wstępie określono maksymalną wartość zawartości tlenu w wodzie dla stanu równowagi po zakończeniu procesu napowietrzania bez mieszania mechanicznego, która przyjmuje wartość $x^* = 5,06 \pm 0,04$ [mg/dm³]. W procesie mieszania z napowietrzaniem wartość średniej równowagowej zawartości tlenu w wodzie nieznacznie wzrasta wraz ze wzrostem częstości obrotów do częstości obrotów $n = 8,33$ [1/s], a następnie przyjmuje stałą wartość $x^* = 5,65 \pm 0,05$ [mg/dm³] niezależną od n .

Na podstawie uzyskanych danych określono wartość objętościowego współczynnika wnikania masy dla procesu prowadzonego bez mieszania mechanicznego. Wartość $k_L a$ w takim przypadku wynosi $0,0061 \pm 0,0008$ [1/s].

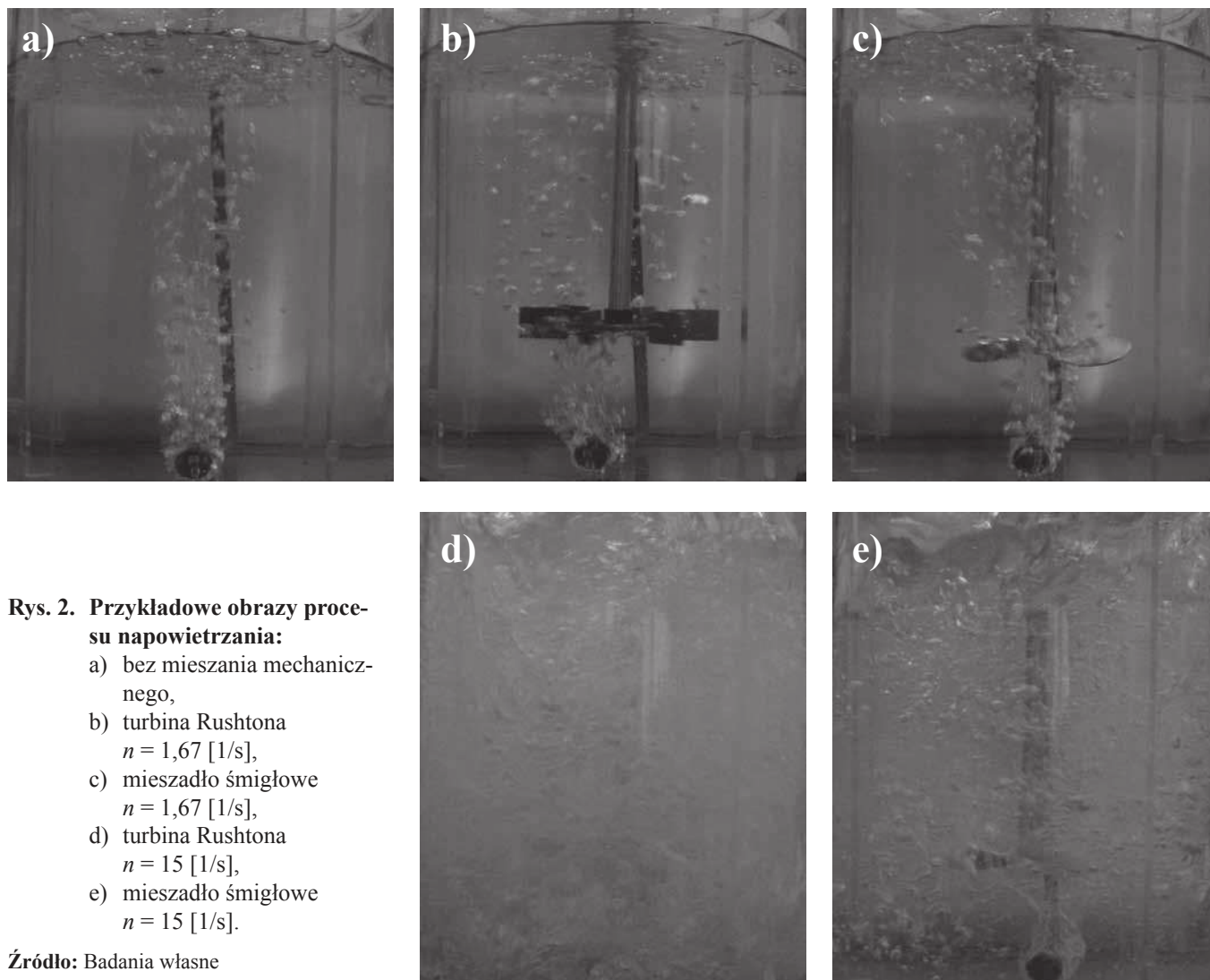
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy wykres zmian zawartości tlenu w wodzie w procesie napowietrzania cieczy w funkcji czasu dla mieszadła śmigłowego uzyskany dla częstości obrotowej mieszadła równej 11,67 [1/s]. Z uzyskanych danych wynika, że proces przebiega stabilnie dla częstości niższych niż 16,67 [1/s]. Powyżej częstości obrotowej 16,67 [1/s], dla turbiny Rushtona, zaobserwowano duży rozrzut punktów pomiarowych, co może świadczyć o zasysaniu tlenu z otoczenia poprzez zwierciadło cieczy oraz o całkowitym rozproszeniu gazu w cieczy.

Różnice w uzyskanych wynikach mogą wynikać z różnych charakterów pracy obu mieszadeł. Mieszadło turbino-we Rushtona przy niewielkich częstościach obrotów rozprowadza pęcherzyki gazu w górnej części aparatu (gaz barbotuje przez warstwę cieczy, szybko z niej uchodząc). Przy dużych prędkościach obrotowych część gazu krąży w dolnej części aparatu, a reszta przedostaje się do górnej części aparatu. Dodatkowo przy dużych prędkościach obrotowych turbina Rushtona zasysa gaz z nad powierzchni zwierciadła cieczy. Powoduje to znaczny wzrost wartości $k_L a$. Mieszadło śmigłowe rozprowadza gaz nawet przy niewielkich wartościach częstości obrotowych mieszadła w całej objętości zbiornika.

Na rysunku 4 przedstawiono wartości współczynników wnikania masy dla obu układów mieszadło-zbiornik z mieszaniem i bez mieszania. Zależność opisana równaniem (3) uzyskana dla turbiny Rushtona jest praktycznie liniowa i opisuje ją następująca zależność:

$$k_L a = 0,000771 \cdot n + 0,0061 \pm 0,0008 \text{ [1/s]} \quad (4)$$

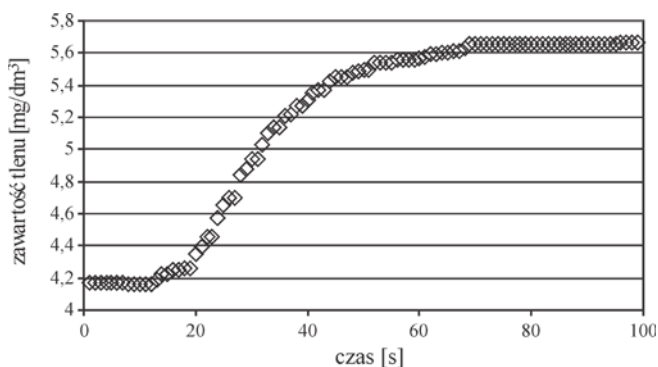
ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,975$. Wartość współczynnika wnikania masy wzrasta wraz ze wzrostem częstości obrotowej mieszadła. Zgodne jest to z danymi literaturowymi, które podają, że wraz ze wzrostem częstości obrotów oraz



Rys. 2. Przykładowe obrazy procesu napowietrzania:

- a) bez mieszania mechanicznego,
- b) turbina Rushtona
 $n = 1,67$ [1/s],
- c) mieszadło śmigłowe
 $n = 1,67$ [1/s],
- d) turbina Rushtona
 $n = 15$ [1/s],
- e) mieszadło śmigłowe
 $n = 15$ [1/s].

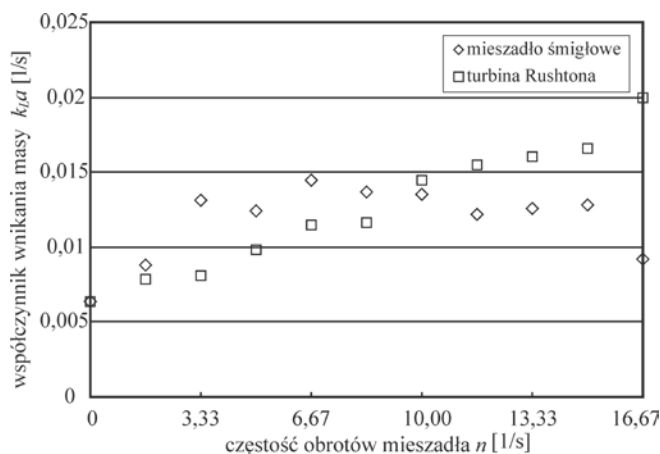
Źródło: Badania własne



Rys. 3. Wykres zmian zawartości tlenu w procesie napowietrzania wody za pomocą mieszadła śmigłowego przy częstotliwości obrotów 11,67 [1/s].

Źródło: Badania własne

strumienia gazu objętościowy współczynnik wnikania masy rośnie [6,14]. Dla mieszadła śmigłowego uzyskano współczynnik wnikania masy o średniej wartości 0,0127 [1/s] (w zakresie częstotliwości obrotów od 3,33 do 15 [1/s]). Wyniki uzyskane dla turbiny Rushtona są porównywalne z wynikami uzyskanymi w pracy [10] dla samozasysającego mieszadła tarczowego z wykorzystaniem metody dynamicznej z rejestracją zmian stężenia tlenu elektrodą tlenową.



Rys. 4. Zależność współczynnika wnikania masy od częstotliwości obrotów mieszadła.

Źródło: Badania własne

Na podstawie analizy otrzymanych wyników stwierdzono, że mieszadło śmigłowe lepiej nadaje się do rozprowadzania tlenu przy wartościach częstotliwości obrotów mieszadła poniżej 8,33 [1/s] niż turbina Rushtona. Turbina Rushtona lepiej rozprowadza tlen przy częstotliwościach obrotów większych niż 8,33 [1/s]. Przyczyną takiego zjawiska może być to, że

turbina Rushtona wytwarza promieniowy przepływ cieczy, natomiast mieszadło śmigłowe wytwarza głównie osiowy strumień cieczy [2]. Przegrody powodują zmniejszenie strumienia cyrkulacji pierwotnej oraz zwiększenie strumienia cyrkulacji wtórnej. Mieszadła śmigłowe są uważane za najbardziej odpowiednie w tych przypadkach, gdy konieczne jest wywołanie silnej cyrkulacji cieczy w mieszalniku przy najmniejszym zużyciu energii mechanicznej [1]. Spełniają one to zadanie lepiej od mieszadeł innego typu, np. mieszadeł turbinowych.

Wyniki badań są ważne z punktu widzenia prowadzenia procesu napowietrzania z mieszaniem mechanicznym oraz napowietrzania wraz z cyrkulacją biomasy w reaktorze SBR.

WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań i analiz otrzymanych wyników wykazano, że:

- ◆ mieszadło śmigłowe charakteryzuje się praktycznie stałym i niezależnym od częstości obrotów współczynnikiem wnikania masy;
- ◆ dla turbiny Rushtona współczynnik wnikania masy zależy wprost proporcjonalnie od częstości obrotów mieszadła;
- ◆ przy stosunkowo małych częstościach obrotów większe wartości współczynnika wnikania masy zaobserwowano dla mieszadła śmigłowego;
- ◆ przy częstościach obrotów większych niż 8,33 [1/s] wartości współczynnika wnikania masy dla turbiny Rushtona są większe niż wartości uzyskane przy zastosowaniu mieszadła śmigłowego.

Intensyfikację wnikania masy w procesie napowietrzania wody można osiągnąć poprzez zastosowanie mieszadeł mechanicznych lub poprzez dodatkowe zasysanie tlenu z nadzwierciadła cieczy.

LITERATURA

- [1] **BRONIARZ-PRESS L., SZAFERSKI W. 2009.** *Efektywność systemu napowietrzania stosowanego w oczyszczalniach ścieków.* Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 5, 103-104.
- [2] **GRYSZKO J. 2008.** Charakterystyka hydrodynamiczna pętlowego reaktora z mieszaniem ciecz-ciecz oraz opracowanie metody wytwarzania w nim mikrocząstek stałych. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- [3] **HEIM A., STELMACH J. 2007.** *Napowietrzanie powierzchniowe i wgłębne. Próba porównania.* Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska, seria: Inżynieria Środowiska, Politechnika Koszalińska, 23, 291-303.
- [4] **KAMIENSKI J. 2004.** Mieszanie układów wielofazowych. WNT, Warszawa.
- [5] **KOWAL A.L., ŚWIDERSKA-BRÓŻ M. 2000.** *Oczyszczanie wody.* PWN, Warszawa-Wrocław.
- [6] **MANTZOURIDOU F., ROUKAS T., KOTZEKIDOU P. 2002.** *Effect of the aeration rate and agitation speed on β -carotene production and morphology of *Blakeslea trispora* in a stirred tank reactor: mathematical modeling.* Biochemical Engineering Journal, 10, 123-135.
- [7] **MONTES F.J., GALAN M.A., CERRO R.L. 1999.** *Mass transfer from oscillating bubbles in bioreactors.* Chemical Engineering Science, 54, 3127-3136.
- [8] **PAUL E.L., ATIEMO-OBENG V.A., KRESTA S.M. 2004.** *Handbook of industrial mixing.* John Wiley & Sons, New Jersey.
- [9] **RAO A.R., KUMAR B. 2009.** *Simulating surface aeration systems at different scale of mixing time.* Chinese Journal of Chemical Engineering, 17, 2, 355-358.
- [10] **STELMACH J. 2000.** *Badania pracy samozasysającego mieszadła tarczowego.* Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź.
- [11] **STREK F. 1971.** *Mieszanie i mieszalniki.* WNT, Warszawa.
- [12] **SUN H., MAO Z.S., YU G. 2006.** *Experimental and numerical study of gas hold-up in surface aerated stirred tanks.* Chemical Engineering Science, 61, 4098-4110.
- [13] **SZAFERSKI W. 2004.** *Badania napowietrzania układów złożonych w mieszalnikach mechanicznych.* Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań.
- [14] **ZOKAEI-KADIJANI S., SAFDARI J., MOUSAVIAN M.A., RASHIDIA. 2013.** *Study of oxygen mass transfer coefficient and oxygen uptake rate in a stirred tank reactor for uranium ore bioleaching.* Annals of Nuclear Energy, 53, 280-287.
- [15] Materiały firmy Eko-Systemy Sp. z o.o. (www.eko-systemy.pl).
- [16] Materiały firmy Bioires Filip Kosim (www.bioires.pl).

THE STUDIES ON MASS TRANSFER COEFFICIENT IN THE MIXING PROCESS WITH AERATION

SUMMARY

The paper presents results of experimental studies on the volumetric mass transfer coefficient for two types of impellers (Rushton turbine and propeller stirrer) in the mixing process with the aeration. It has been shown that propeller stirrer is more suitable for a distribution of oxygen at lower rotation speeds. It appeared that the Rushton turbine distributes oxygen better at the higher rotation of speeds.