

ROBERT GRZYWACZ\*

## WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELU HYDRODYNAMIKI REAKTORA AIRLIFT

---

### EXPERIMENTAL VERIFICATION OF HYDRODYNAMICS MODEL OF AIRLIFT REACTOR

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono weryfikację doświadczalną modelu hydrodynamiki reaktora airlift z cyrkulacją wewnętrzną. Do opisu hydrodynamiki zaproponowano model oparty na globalnym bilansie pędu. W celu jego weryfikacji wyznaczono w reaktorze laboratoryjnym stopień zatrzymania gazu w strefie wznoszenia i w całym reaktorze. Z uzyskanych wyników wyznaczono stopień zatrzymania w strefie wznoszenia. Wykorzystując badania znacznikowe w fazie ciekłej, wyznaczono prędkości przepływu cieczy przez strefę wznoszenia i opadania. Podobne badania przeprowadzono w fazie gazowej. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci wykresów. Na ich podstawie sformułowano odpowiednie wnioski.

*Słowa kluczowe: reaktor airlift, model hydrodynamiki, globalny bilans pędu, weryfikacja doświadczalna*

#### Abstract

In this work the experimental verification of the hydrodynamics model of internal loop airlift reactor has been shown. To describe hydrodynamics the model of global conservation of momentum has been proposed. To verify the model the values of hydrodynamic parameters were determined experimentally. In the experiment the riser gas hold-up and total gas hold-up were determined. On this base the downcomer gas hold-up was calculated. The liquid velocities in riser and in downcomer were determined on the base of marker investigations. Similarly, the gas velocity in riser was set. The obtained results have been shown on diagrams. Adequate conclusions have been formulated.

*Keywords: airlift reactor, hydrodynamics model, global conservation of momentum, experimental verification*

---

\* Dr inż. Robert Grzywacz,  
Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Krakowska.

Formułując modele matematyczne przepływowych reaktorów chemicznych i biochemicznych konieczne jest przyjęcie odpowiedniej struktury przepływu mediów. W przypadku skomplikowanych struktur przepływu należy przeprowadzić weryfikację poczynionych założeń modelowych. Taką weryfikację można przeprowadzić doświadczalnie lub z wykorzystaniem metod obliczeniowej dynamiki płynów (CFD).

W artykule przedstawiono weryfikację doświadczalną modelu hydrodynamiki reaktora airlift z wewnętrzną cyrkulacją cieczy. Do opisu hydrodynamiki zastosowano model globalnego bilansu pędu. Weryfikacje modelu przeprowadzono w reaktorze laboratoryjnym.

Reaktor airlift jest aparatem o złożonej strukturze mediów. Analizując konstrukcje reaktora oraz sposób przepływu mediów, można wyszczególnić w tym reaktorze cztery strefy hydrodynamiczne: strefę wnoszenia mieszaniny gazowo-ciekłej (I), strefę opadania (II), strefę odgazowania (III) oraz strefę przydenną (IV). Sposoby opisu struktury strumieni mediów w reaktorze airlift przedstawione zostały w publikacji [1]. Dodatkowo, reaktor pracuje w jednym z trzech obszarów hydrodynamicznych ze względu na przepływ gazu [2]. Obszar A, w którym mieszanina gazowo-ciekła całkowicie odgazowuje się w strefie III, obszar B, w którym następuje częściowe odgazowanie w strefie III oraz całkowite w strefie II oraz obszar C, w którym następuje pełna cyrkulacja gazu przez strefy I i II. Wystąpienie jednego z trzech obszarów zależy od natężenia przepływu gazu, natężenia przepływu cieczy, parametrów konstrukcyjnych reaktora oraz od parametrów fizykochemicznych środowiska reakcyjnego.

### 1. Model hydrodynamiki reaktora airlift

Jednym z modeli hydrodynamicznych stosowanych do opisu parametrów mediów przepływających przez reaktor airlift jest model globalnego bilansu pędu [3] (tzw. bilansu sił). Model opiera się na założeniu, że różnica ciśnień hydrostatycznych między strefami wznoszenia i opadania zostaje w całości zużyta na pokonanie oporów przepływu wokół pętli cyrkulacyjnej reaktora co obrazuje następujące równanie

$$\text{Siła wyporu cieczy spowodowana} \quad = \quad \text{Sumaryczna siła wszystkich oporów}$$

$$\text{różnicą gęstości w strefach 1 i 2} \quad \quad \quad \text{hydrodynamicznych}$$

czyli

$$g \cdot H_r \cdot (\varepsilon_{gl} - \varepsilon_{gII}) = 0,5 \cdot [(k_{\beta I} + k_{\beta III}) \cdot u_{cl}^2 + (k_{\beta II} + k_{\beta IV}) \cdot u_{cII}^2] \quad (1)$$

gdzie  $H_r$  jest wysokością warstwy cieczy liczoną wg wzoru  $H_r = H_I + H_{III}$

Równanie (1) spełnione jest gdy gęstość gazu jest dużo mniejsza od gęstości cieczy.

Na podstawie (1) należy napisać bilanse gazu, cieczy i pędu dla powierzchni pomiędzy strefami opadania i wznoszenia. Otrzymujemy wtedy następujące równania bilansowe dla poszczególnych obszarów hydrodynamicznych.

## Obszar hydrodynamiczny A

W tym obszarze  $u_{cII} < v$  oraz  $\varepsilon_{gII} = 0$  gdzie  $v$  jest prędkością poślizgu pęcherzy gazowych definiowaną jako  $v = u_g - u_c$ . Mamy zatem:

bilans gazu

$$S_I \cdot \varepsilon_{gl} \cdot (u_{cl} + v) = S_I \cdot u_{og} \quad (2a)$$

bilans cieczy

$$S_I \cdot (1 - \varepsilon_{gl}) \cdot u_{cl} = S_I \cdot u_{oc} + S_{II} \cdot u_{cII} \quad (2b)$$

gdzie  $u_{oc} = \frac{F_v^c}{S_I}$  i  $u_{og} = \frac{F_v^g}{S_I}$

oraz bilans pędu

$$g \cdot H_r \cdot \varepsilon_{gl} = 0,5 \cdot [(k_{fl} + k_{fll}) \cdot u_{cl}^2 + (k_{fl} + k_{flv}) \cdot u_{cII}^2] \quad (2c)$$

## Obszar hydrodynamiczny B

W tym obszarze  $u_{cII} = v$  oraz  $\varepsilon_{gl} - \varepsilon_{gII} = \text{const}$ . Po wprowadzeniu oznaczenia  $\varepsilon_{gl} - \varepsilon_{gII} = \varepsilon_g^*$  otrzymujemy  $\varepsilon_{gII} = \varepsilon_{gl} - \varepsilon_g^*$  i dalej można napisać:

bilans gazu

$$S_I \cdot \varepsilon_{gl} \cdot (u_{cl} + v) = S_I \cdot u_{og} \quad (3a)$$

bilans cieczy

$$S_I \cdot (1 - \varepsilon_{gl}) \cdot u_{cl} = S_I \cdot u_{oc} + S_{II} \cdot (1 - \varepsilon_{gII}) \cdot u_{cII} \quad (3b)$$

oraz bilans pędu

$$g \cdot H_r \cdot \varepsilon_g^* = 0,5 \cdot [(k_{fl} + k_{fll}) \cdot u_{cl}^2 + (k_{fl} + k_{flv}) \cdot u_{cII}^2] \quad (3c)$$

## Obszar hydrodynamiczny C

W tym obszarze  $u_{cII} > v$ , wtedy  $u_{gII} = u_{cII} - v$ . Można napisać następujące równania bilansowe:

bilans gazu

$$S_I \cdot \varepsilon_{gl} \cdot (u_{cl} + v) = S_I \cdot u_{og} + S_{II} \cdot \varepsilon_{gII} \cdot (u_{cII} - v) \quad (4a)$$

bilans cieczy

$$S_I \cdot (1 - \varepsilon_{gl}) \cdot u_{cl} = S_I \cdot u_{oc} + S_{II} \cdot (1 - \varepsilon_{gII}) \cdot u_{cII} \quad (4b)$$

bilans pędu

$$g \cdot H_r \cdot (\varepsilon_{gl} - \varepsilon_{gII}) = 0,5 \cdot [(k_{fl} + k_{fll}) \cdot u_{cl}^2 + (k_{fl} + k_{flv}) \cdot u_{cII}^2] \quad (4c)$$

Pozostałe wielkości obliczamy z następujących zależności [4]

$$v = 1,53 \cdot \left[ \frac{g \cdot \sigma \cdot (\rho_c - \rho_g)}{\rho_c^2} \right]^{0,25}$$

$$k_{fl} = \frac{0,3164}{\text{Re}_{cl}^{0,25}} \cdot \frac{H_r}{d_r}; \quad k_{fll} = \frac{0,3164}{\text{Re}_{cII}^{0,25}} \cdot \frac{H_r}{d_h}$$

gdzie  $d_h = d_{II} - d_r$  a  $d_r$  jest średnicą strefy wznoszenia powiększoną o grubość ścianki, czyli  $d_r = d_I + 2 \cdot g_r$ ,  $S_b$  jest polem przekroju pomiędzy strefą opadania a strefą wznoszenia liczoną według wzoru  $S_b = \pi \cdot d_r \cdot H_{IV}$

Współczynnik oporu w strefie III przyjęto jako równy zero ( $k_{III} \approx 0$ ). Założenie takie wynika z faktu, że w reaktorze airlift z cyrkulacją wewnętrzną przepływ w strefie separacji można przyrównać do przepływu w kanale otwartym. Natomiast przepływ ze strefy opadania do strefy wznoszenia w strefie przydennej odbywa się przekrojem ograniczonym i

dlatego opory w tym obszarze wyznacza się wzorem  $k_{IV} = 11 \cdot \left( \frac{S_{II}}{S_b} \right)^{0,79}$

Pozostaje jeszcze określenie wielkości  $\varepsilon_{gII}$  dla obszaru hydrodynamicznego C. Wielkość tę wyznacza się z zależności empirycznej  $\varepsilon_{gII} = f(\varepsilon_{gl})$  jedną z możliwych korelacji jest wyrażenie [4]  $\varepsilon_{gII} = a \cdot \varepsilon_{gl} - b$ . W artykule przyjęto  $a = 0,8$  i  $b = 0,0$ .

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla reaktora laboratoryjnego którego wymiary podano w tabeli 1. Ze względu na ograniczenie związane z użytą sprężarką i dostępnymi manometrami badania prowadzono dla prędkości przepływu gazu z zakresu  $u_{0g} = 0,0 - 0,18$  m/s i prędkości przepływu cieczy z zakresu  $u_{0c} = 0,001 - 0,003$  m/s. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów wartości  $u_{gl}$ ,  $u_{gII}$ ,  $u_{cb}$ ,  $u_{cII}$ ,  $\varepsilon_{gl}$  i  $\varepsilon_{gII}$  w zależności od  $u_{0g}$ .

Tabela 1

Wymiary analizowanego reaktora

Wysokość strefy wznoszenia $H_I$ , [m]	Wysokość strefy odgazowania $H_{III}$ , [m]	Wysokość strefy przydennej $H_{IV}$ , [m]	Średnica wewnętrzna rury wewnętrznej $d_I$ , [m]	Średnica wewnętrzna rury zewnętrznej $d_{II}$ , [m]	Grubość ścianki rury wewnętrznej $g_r$ , [m]
2,0	0,1	0,1	0,155	0,194	0,0075

## 2. Weryfikacja doświadczalna modelu hydrodynamiki

Badania hydrodynamiki polegały na doświadczalnym wyznaczeniu zatrzymania gazu w strefie wznoszenia, całkowitego zatrzymania gazu w reaktorze, prędkości przepływu cieczy przez strefy I i II oraz prędkości przepływu gazu przez strefę I. Badanie przeprowadzono w układzie woda–powietrze. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Zastosowano następującą metodykę badań.

### 2.1. Badanie zatrzymania gazu

Zatrzymanie gazu w strefie I badano poprzez napełnienie reaktora do wybranego poziomu cieczą oraz przepuszczaniu przez aparat gazu z wybranym natężeniem przepływu. Następnie mierzono różnicę poziomów cieczy nagazowanej i cieczy bez gazu, wyznaczając zatrzymanie gazu z zależności

$$\varepsilon_{gl} = \frac{H_I - H_C}{H_I} \quad (5)$$

Ogólne zatrzymanie gazu badano, napełniając reaktor do poziomu wylotu cieczy oraz przepuszczając przez aparat gaz z wybranym natężeniem przepływu. Przepływający gaz powodował odpływ cieczy przez wypływ. Nagazowanie przeprowadzano do momentu zakończenia wypływu cieczy. Zatrzymanie gazu wyznaczano mierząc różnicę poziomów przez i po nagazowaniu, wykorzystując wzór (5).

Zatrzymanie gazu w strefie II wyznaczano z ogólnego bilansu gazu z uwzględnieniem zatrzymania gazu w strefie III (6)

$$\varepsilon_{gII} = \frac{\varepsilon_{og} - \varepsilon_{gl} \cdot \zeta_I - \varepsilon_{gIII} \cdot \zeta_{III}}{\zeta_{II}} \quad (6)$$

gdzie  $\zeta$  to współczynnik podziału objętości liczony według wzoru  $\zeta_i = V_i/V$ , a  $i$  to numer strefy.

## 2.2. Badanie prędkości przepływu cieczy przez strefy I i II

Prędkości przepływu cieczy badano poprzez analizę czasu przepływu znacznika przez reaktor. Na wlocie do reaktora podawano porcję stężonego roztworu KCl w postaci impulsu  $\delta$ -Diraca. Na wylocie z reaktora umieszczono przepływowe naczynko konduktometryczne. Mierzono czas przepływu oraz czas cyrkulacji znacznika. Obliczenia przeprowadzono, korzystając z klasycznego wyrażenia na prędkość  $v = s/t$  z uwzględnieniem czasu dopływu znacznika do strefy I oraz czasu dopływu z wylotu ze strefy I do naczynka konduktometrycznego. Czas przepływu cieczy przez strefę II wyznaczano, odejmując od czasu cyrkulacji czas przepływu przez strefę I. Prędkość przepływu cieczy przez strefę II wyznaczano klasycznie ze wzoru przedstawionego powyżej.

## 2.3. Badanie prędkości przepływu gazu przez strefę I

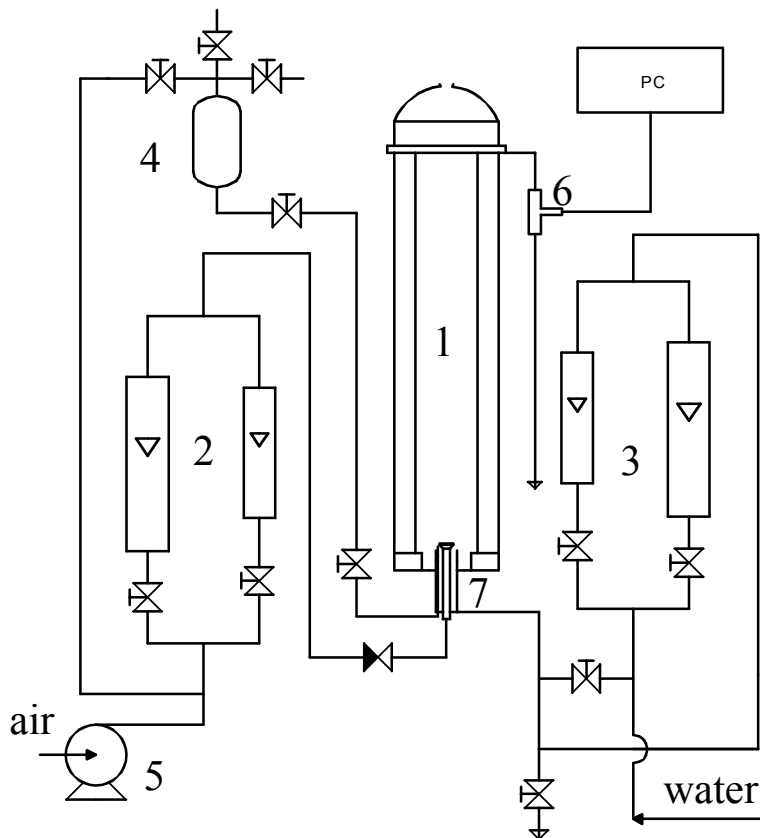
Prędkość przepływu gazu przez strefę I badano poprzez analizę czasu przepływu znacznika gazowego przez reaktor. Znacznikiem była 10 ml porcja metanu podawana na wlocie do reaktora do strumienia powietrza. Detektorem był czujnik FID. Obliczenia prędkości przepływu gazu przeprowadzono w sposób klasyczny, uwzględniając czas przepływu gazu do strefy I oraz czas przepływu gazu do strefy I do czujnika.

Uzyskane wyniki badań doświadczalnych przedstawiono w postaci wykresów wspólnie z wynikami badań numerycznych. Wybrane rezultaty przedstawiono na rys. 2.

## 3. Wnioski

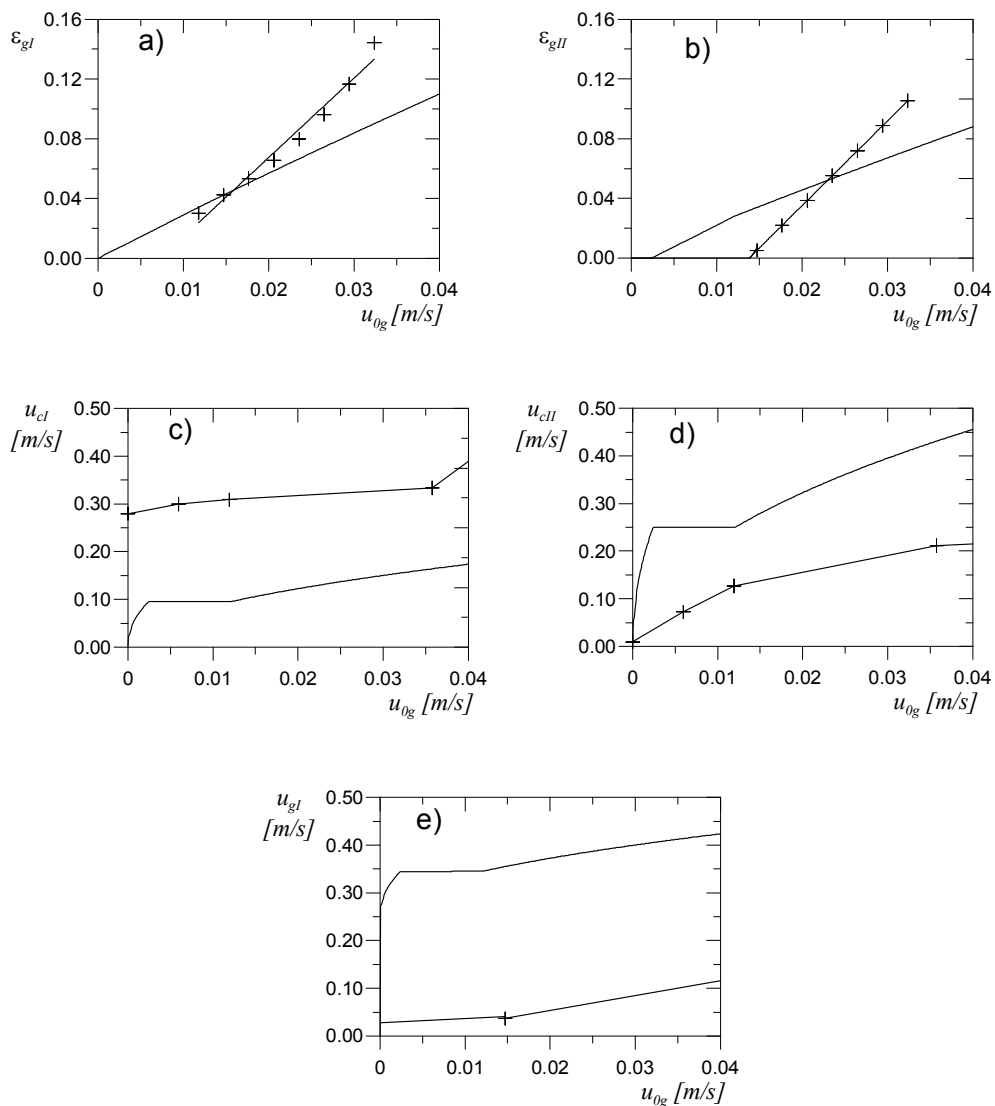
Analizując otrzymane wyniki, należy stwierdzić, że zaproponowany model, mimo istniejących różnic wyników symulacji i doświadczeń, opisuje prawidłowo jakościowe cechy hydrodynamiki płynów w reaktorze airlift. Dodatkowo uzyskane wyniki obliczeń numerycznych porównywalne są z wynikami otrzymanymi przez innych autorów [5]. Weryfikacja doświadczalna nie została uwieńczona sukcesem. Największym źródłem błędów była metoda wyznaczania zatrzymania gazu w strefach reaktora. W przyszłości planuje się przeprowadzić badania hydrodynamiczne z wykorzystaniem metody manometrycznej. Planuje się także zastosować do badań szerszy zakres średnic rur

wewnętrznych. Zaproponowany model cechuje się dobrą zbieżnością numeryczną, co jest ważne przy jego aplikacji do złożonych modeli opisujących stany stacjonarne i zachowania dynamiczne reaktorów airlift.



Rys. 1. Schemat aparatury: 1 – reaktor, 2 – punkt pomiaru przepływu powietrza, 3 – pomiar przepływu cieczy, 4 – znacznik, 5 – sprężarka, 6 – przepływowa sonda konduktometryczna, 7 – doprowadzenie mediów

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus: 1 – reactor, 2 – point of air flow measurement, 3 – point of water flow measurement, 4 – tracer, 5 – compressor, 6 – conductometric flow probe, 7 – media feed



Rys. 2. Porównanie wartości parametrów hydrodynamicznych uzyskanych z obliczeń symulacyjnych (\_\_\_\_) z wartościami uzyskanymi doświadczalnie (\_\_\_\_+\_\_\_\_) w funkcji prędkości przepływu gazu  $u_{0g}$ : a) zatrzymanie gazu w strefie wznoszenia, b) zatrzymanie gazu w strefie opadania, c) prędkość cieczy w strefie wznoszenia, d) prędkość cieczy w strefie opadania, e) prędkość gazu w strefie wznoszenia

Fig. 2 Comparison of calculus hydrodynamics parameters (\_\_\_\_) with experimental hydrodynamic parameters (\_\_\_\_+\_\_\_\_) as functions of the gas flow velocity  $u_{0g}$ : a) riser gas hold-up, b) downcomer gas hold-up, c) riser liquid velocity, d) downcomer liquid velocity, e) riser gas velocity

## Oznaczenia

$d$	– średnica strefy	[m]
$F_v$	– natężenie przepływu	[m <sup>3</sup> /s]
$g$	– przyspieszenie ziemskie	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	– wysokość strefy	[m]
$k_f$	– współczynniki oporu przepływu	
Re	– liczba Reynoldsa	
$S$	– pole powierzchni	[m <sup>2</sup> ]
$u, u_0$	– prędkość przepływu, prędkość przepływu odniesiona do przekroju strefy wznoszenia	[m/s]
$v$	– prędkość poślizgu pęcherzy	[m/s]
$\varepsilon_g$	– zatrzymanie gazu	
$\rho$	– gęstość	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	– napięcie powierzchniowe	[N/m <sup>2</sup> ]
$\zeta$	– współczynnik podziału objętości	

## Indeksy dolne i górne

$I$	– dotyczy strefy wznoszenia
$II$	– dotyczy strefy opadania
$III$	– dotyczy strefy odgazowania
$IV$	– dotyczy strefy przydennej
$c$	– dotyczy cieczy
$g$	– dotyczy gazu
$og$	– dotyczy całego reaktora

## Literatura

- [1] Grzywacz R.: *Metody wyznaczania stanów stacjonarnych bioreaktora airlift dla wybranych struktur hydrodynamicznych fazy ciekłej*, Inż. Chem. i Proc., **24**, 2003, 567.
- [2] Vial Ch., Poncin S., Wild G., Midoux N.: *A simple method for regime identification and flow characterisation in bubble columns and airlift reactors*, Chem. Eng. Proc., **40**, 2001, 135.
- [3] Garcia Calvo E., Leton P., *A fluid dynamic model for bubble column and airlift reactors*, Chem. Eng. Sci., **46**, 1991, 2947.
- [4] Young M.A., Carbonell R.G., Ollis D.F.: *Airlift bioreactors: analysis of local two-phase hydrodynamics*, AIChE Journal, **37**, 1991, 403.
- [5] Blazej M., Kisa M., Markos J.: *Scale influence on the hydrodynamics of an internal loop airlift reactor*, Chem. Eng. Proc., **43**, 2004, 1519.

Praca wykonana w ramach Grantu KBN Nr N207 001 31/0070 pt. *Wpływ warunków napowietrzania na proces biodegradacji aerobowej ścieków fenolowych w reaktorach barbotażowych.*