

ROBERT GRZYWACZ

Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Wpływ parametrów konstrukcyjnych i procesowych na wartości współczynników zatrzymania gazu w strefie opadania dla reaktorów *airlift*

Wstęp

Reaktory *airlift* są aparatami barbotażowymi często używanymi w procesach biochemicznych. Analiza konstrukcji ukazuje, iż istnieją w nich cztery strefy hydrodynamiczne. Pierwsza strefa to obszar wznoszenia mieszaniny gazowo-ciekłej, strefa druga to strefa opadania częściowo lub całkowicie odgazowanej cieczy, strefa trzecia to strefa odgazowania oraz strefa czwarta to tzw. strefa przydenna.

Analizując natomiast ich działanie, można stwierdzić, iż w zależności od konstrukcji oraz od natężenia przepływu fazy ciekłej i gazowej pracują one w jednym z trzech obszarów hydrodynamicznych. Pierwszy obszar (A) charakteryzuje się nagazowaniem strefy wznoszenia oraz odgazowaniem strefy opadania. Drugi obszar (B) charakteryzujący się częściowym nagazowaniem strefy opadania bez cyrkulacji gazu. Oraz obszar trzeci (C) charakteryzującym się pełnym nagazowaniem obu stref.

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych stopnia zatrzymania gazu w strefie opadania dla reaktora *airlift* z wewnętrzną cyrkulacją cieczy. Dokonano także porównania z wynikami uzyskanymi z numerycznej symulacji hydrodynamiki.

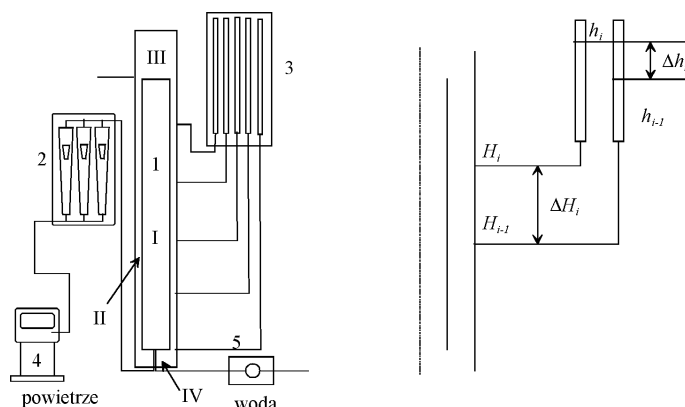
Metodyka badań doświadczalnych

W celu uzyskania wartości współczynnika zatrzymania gazu w strefie opadania zastosowano tzw. metodę manometryczną. Doświadczenia prowadzono w aparacie laboratoryjnych z rurą zewnętrzną o średnicy 0,09 m i wysokości 2,00 m oraz dla zestawu 5 rur wewnętrznych o średnicach odpowiednio 0,064, 0,054, 0,044, 0,034 i 0,024 m każda wysokości 1,70 m. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.

Idea metody manometrycznej opiera się na pomiarze ciśnienia hydrostatycznego na różnych poziomach strefy opadania. Wartość tego ciśnienia zależy od udziałów objętościowych fazy ciekłej i gazowej na danym poziomie. Możliwe jest zatem wyznaczenie lokalnych stopni zatrzymania gazu. Metoda ta oraz jej uzasadnienie przedstawiono w pracy [1].

W czasie przeprowadzonych badań mierzono ciśnienie hydrostatyczne dla pięciu punktów pomiarowych oddalonych od siebie o 0,30 m. Pierwszy punkt pomiarowy znajdował się na poziomie dolnej krawędzi rury cyrkulacyjnej tzw. poziom zerowy, co pozwoliło uzyskać poza lokalnymi, także średni stopień zatrzymania gazu w strefie opadania.

Metodyka pomiarowa polegała na napełnieniu reaktora wodą, ustawieniu na manometrze wymaganego natężenia



Rys. 1 Schemat stanowiska badawczego i idea metody manometrycznej. 1 – reaktor *airlift*, 2 – manometry pomiaru natężenia przepływu gazu, 3 – manometry pomiaru ciśnienia w strefie opadania, 4 – sprężarka, 5 – pompa perystaltyczna, I – strefa wznoszenia, II – strefa opadania, III – strefa odgazowania, IV – strefa przydenna

przepływu gazu i pomiarze poziomu cieczy w manometrach mierzących wartość ciśnienia hydrostatycznego (Rys.1).

Lokalne wartości zatrzymania gazu wyznaczono przyrównując zmierzone ciśnienie hydrostatyczne z ciśnieniem panującym na danym poziomie pomiarowym według wzoru (1)

$$(h_{i-1} - h_i)\rho_c = (H_i - H_{i-1})[\rho_c(1 - \varepsilon_{III}) + \rho_g\varepsilon_{gIII}] \quad (1)$$

z którego po przekształceniu do postaci (2) wyznacza się wartość lokalnego współczynnika zatrzymania gazu.

$$\varepsilon_{gIII} = \frac{\Delta h_i}{\Delta H_i} \frac{\rho_c}{\rho_c - \rho_g} \quad (2)$$

W powyższych wzorach:

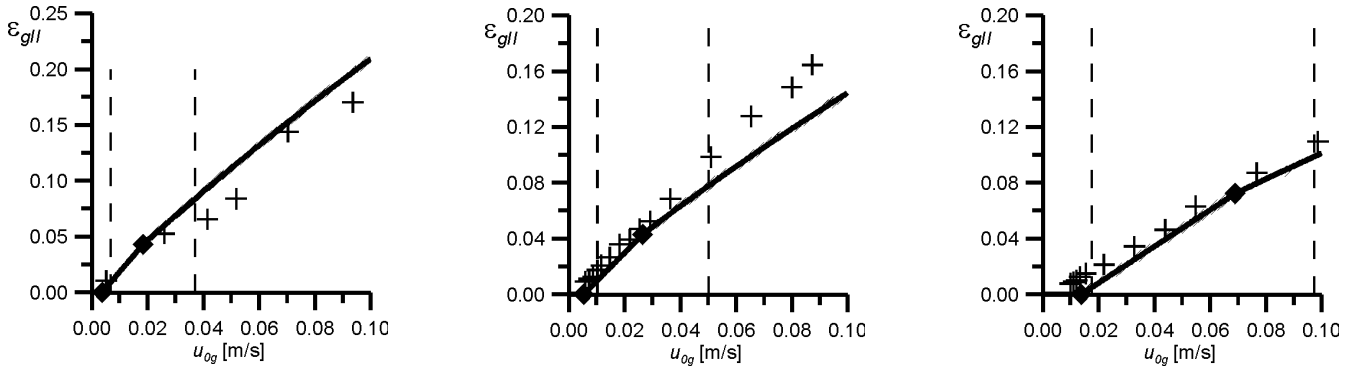
ρ – gęstość cieczy (c) i gazu (g),

h_i – wysokość cieczy w rurce manometrycznej na poziomie i -tym,

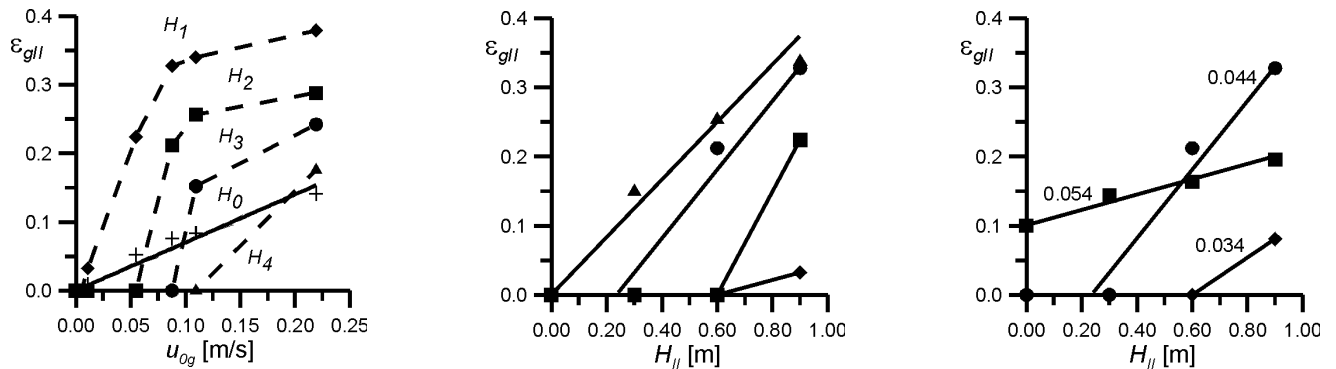
H_i – wysokość i -tego króćca pomiarowego w strefie opadania,

ε_g – wartość lokalnego (i) oraz średniego (o) współczynnika zatrzymania gazu.

Wartość globalnego współczynnika zatrzymania gazu można obliczyć wykorzystując wskazania manometru mierzącego ciśnienie hydrostatyczne na poziomie zerowym i korzystając ze wzoru (2).



Rys. 2. Porównanie wyników doświadczalnych i symulacyjnych globalnych wartości zatrzymania gazu w strefie opadania dla rur wewnętrznych o średnicach a) 0,064, b) 0,054, c) 0,044 m. — symulacja komputerowa, + wyniki doświadczeń, ◆ doświadczalne granice pomiędzy obszarami hydrodynamicznymi, - - - obliczeniowe granice między obszarami



Rys. 3. Lokalne wartości stopnia zatrzymania gazu w strefie opadania. a) zatrzymanie gazu dla rury wewnętrznej o średnicy 0,044 m dla kolejnych punktów pomiarowych oddalonych od siebie o 30 cm (- - -) w porównaniu ze średnim zatrzymaniem gazu w strefie opadania (—), b) rozkład zatrzymania gazu po długości reaktora (średnica wew. 0,044 m) dla $u_{og} = 0,01$ (◆), $0,05$ (■), $0,09$ (●), $1,1$ (▲) m/s, c) porównanie rozkładu stopnia zatrzymania gazu dla rur wewnętrznych o różnych średnicach dla $u_{og} = 0,09$ m/s

Model matematyczny hydrodynamiki reaktora airlift

Do opisu hydrodynamiki mediów przepływających przez reaktor *airlift* użyto modelu globalnego bilansu pędu [2] (tzw. bilansu sił). Model opiera się na następującym równaniu równowagi sił:

$$gH_r(\epsilon_{gI} - \epsilon_{gII}) = 0,5[(k_{fI} + k_{fIII})u_{cI}^2 + (k_{fII} + k_{fIV})u_{cII}^2] \quad (3)$$

gdzie:

- H_r – jest wysokością warstwy cieczy,
- k_f – współczynnikiem oporu przepływu dla odpowiednich stref reaktora,
- u_c – prędkością cieczy w odpowiedniej strefie.

W celu wyznaczenia równań opisujących kolejne obszary hydrodynamiczne reaktora należy przyjąć pewne założenia. W obszarze hydrodynamicznym A zakładamy, iż $u_{cII} < v$ oraz $\epsilon_{gII} = 0$ gdzie v jest prędkością poślizgu pęcherzy gazowych definiowaną jako $v = u_g - u_c$. W obszarze hydrodynamicznym B przyjmujemy, iż $u_{cII} = v$ oraz $\epsilon_{gI} - \epsilon_{gII} = \text{const}$, natomiast w obszarze hydrodynamicznym C zakładamy, że $u_{cII} > v$. Szczegółowe równania bilansowe dla poszczególnych obszarów hydrodynamicznych przedstawiono w pracy [3].

Rozwiązując szczegółowe równania dla poszczególnych obszarów uzyskujemy wartości stopni zatrzymania gazu, prędkości przepływu cieczy oraz prędkości przepływu gazu dla stref I i II. Zaproponowane równania modelowe pozwalają również na wyznaczenie granic pomiędzy poszczególnymi obszarami hydrodynamicznymi.

Należy stwierdzić, iż z rozwiązań równań modelowych uzyskuje się średnie wartości stopni zatrzymania gazu. W przy-

padku przebiegu procesu w obszarów hydrodynamicznych (A) i (C) przyjęcie do dalszych obliczeń projektowych średnich wartości stopnia zatrzymania gazu jest prawidłowe. Natomiast w przypadku pracy reaktora w obszarze hydrodynamicznym (B) takie założenie jest błędne. Dla tego obszaru obserwuje się mianowicie powstanie granicy pomiędzy strefą nagazowaną a strefą odgazowaną. Położenie tej granicy zależy od natężenia przepływu gazu i wraz z jego wzrostem przesuwa się w kierunku dołu kolumny. Poza modelami opartymi o obliczeniową dynamikę płynów (CFD) nie istnieją aktualnie znane propozycje rozwiązania tego problemu.

Wyznaczenie tej granicy jest ważne również ze względów procesowych w przypadku biochemicznych procesów aerobowych. Bowiem istnienie obszarów nie nagazowanych może skutkować w granicznych przypadkach wystąpieniem zjawiska anoksji mikroorganizmów.

Wyniki doświadczeń i symulacji komputerowych

Doświadczenia przeprowadzono dla układu woda – powietrze. Natężenie przepływu powietrza przyjęto tak, aby uzyskać wartości prędkości przepływu gazu mierzonej na pustym przekroju rury wewnętrznej – u_{og} – z zakresu 0–0,1 m/s. W tym obszarze prowadzonych jest większości biochemicznych procesów aerobowych. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów (Rys. 2) obrazujący zależność stopni zatrzymania gazu ϵ_g w strefie opadania od pozornej prędkości gazu u_{og} .

Na rys. 3 przedstawiono wartości lokalnych współczynników zatrzymania gazu dla kolejnych punktów pomiarowych dla wybranych średnic rur wewnętrznych.

Wnioski

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, iż model matematyczny dobrze opisuje hydrodynamikę reaktora dla rur wewnętrznych o stosunkowo dużych średnicach (0,064–0,044 m). Dla rur o średnicach małych (0,034 i 0,024 m) zaobserwowano znaczne odstępstwa od wyników doświadczeń. Wynika to ze zmiany charakteru przepływu gazu przez strefę wznoszenia z pęcherzykowego na tokowanie. Zaobserwowano zwiększające się ze zmniejszeniem rury wewnętrznej różnice w położeniu doświadczalnie wyznaczonych granic pomiędzy obszarami hydrodynamicznymi w stosunku do wartości wyliczonych z modelu.

Przy użyciu metody manometrycznej można wyznaczyć rozkład zatrzymania gazu po długości reaktora. Zauważono, iż

dla rur wewnętrznych o dużych średnicach układ pracuje w obszarze hydrodynamicznym (C) a dla rur o małych średnicach w obszarze hydrodynamicznym (A) co jest zgodne z przewidywaniami modelowymi.

W przypadku procesów aerobowych reaktor *airlift* powinien mieć duży stosunek powierzchni obszaru wznoszenia do opadania w celu ograniczenia zjawiska anoksji.

LITERATURA

1. *K. Kupiec, J. Magiera*. Wyd. PK, Mechanika, 10-M, (181), 29, (1974).
2. *E. Garcia Calvo, P. Leton*, Chem. Eng. Sci. 1991, 46, 2947.
3. *R. Grzywacz*, Wyd. PK, Mechanika, 5-M, (105), 151, (2008).