

Paweł BUDZYŃSKI

e-mail: budzynsk@wipos.p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Stopień zatrzymania gazu w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej

Wstęp

Zasada działania reaktorów pulsacyjnych (bez przegród) polega na wprowadzeniu do przepływającej mieszaniny dwufazowej w kolumnie barbotażowej pulsacji. Pulsacje te powodują zmniejszenie i ujednoczenie rozmiarów pęcherzyków i zmniejszenie ich prędkości przepływu, a tym samym zwiększenie powierzchni kontaktu międzyfazowego i czasu przebywania gazu w objętości reakcyjnej.

Prezentowane w literaturze przedmiotu modele opisujące hydrodynamikę przepływu gazu w kolumnach pulsacyjnych można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

– pierwsza grupa prac, prezentowana w doniesieniach [1–4], w których autorzy w oparciu o bilans sił wyporu i oporu z uwzględnieniem tzw. pierwszej kinematycznej siły wyporu *Bjerknesa* (tzw. efekt *Bjerknesa*) wyznaczają prędkość przepływu pęcherzy gazu. Autorzy ci nie uwzględniają jednak faktu występowania rezonansowych fal stojących ciśnienia wzdłuż wysokości kolumny wraz ze wzrostem częstotliwości pulsacji.

– druga grupa prac [5–8], zawiera rozważania i wyniki badań w szerszym zakresie częstotliwości pulsacji do $f \approx 200$ Hz. Wyniki te jednoznacznie potwierdzają występowanie kolejnych ekstremów stopnia zatrzymania gazu wraz ze wzrostem częstotliwości pulsacji. Występowanie ekstremów stopnia zatrzymania gazu jednoznacznie świadczy o wystąpieniu w kolumnie fal stojących. Zjawisko to zauważył i opisał w swojej pracy z lat 60. ub. wieku *Bird* [8].

Dodatkowo należy stwierdzić, że prezentowane w literaturze przedmiotu modele dotyczą jedynie w pełni rozwiniętych jednorodnych przepływów turbulentnych dla układów o własnościach fizykochemicznych zbliżonych do układu woda-powietrze.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie własnego modelu pozwalającego obliczyć zmiany stopnia zatrzymania pęcherzy gazu, podczas ich przepływu przez warstwę pulsującej lepkiej cieczy.

Wyznaczenie częstotliwości i amplitud rezonansowych w kolumnie pulsacyjnej

Wartość określonej częstotliwości rezonansowej f_s^* dla i -tej harmonicznej fali stojącej, można obliczyć z następującej zależności:

$$f_s^* = \frac{w_m}{\lambda_i} \quad (1)$$

gdzie w_m – prędkość fali w mieszaninie dwufazowej, w 1. przybliżeniu można ją obliczyć dla układu woda powietrze z zależności [9]:

$$w_m^2 = \frac{P_\infty}{\rho_L \langle \varepsilon_s \rangle (1 - \langle \varepsilon_s \rangle)} \quad (2)$$

$\langle \varepsilon_s \rangle$ – przewidywana wartość stopnia zatrzymania gazu

λ_i – długość i -tej fali stojącej (harmonicznej)

$$\lambda_i = \frac{4}{(2i - 1)} H \quad (3)$$

Wyznaczenie objętości pęcherzyka gazu wprowadzanego do pulsującej cieczy

W oparciu o analizę wyników badań własnych proponuje się obliczać wartość promienia pęcherza gazu u wylotu z dyfuzora do lepkiej cieczy r_1 z następującej zależności:

$$r_1 = r_K e^{bI_i^*} + r_{\min} \quad (4)$$

gdzie:

r_K – promień wypływającego pęcherza gazu do cieczy [10]

$$\left(\frac{r_0}{r_K}\right)^3 = \frac{3\sigma}{2(\rho_L - \rho_G)r_K^2} + \frac{27\mu_L u_d}{8(\rho_L - \rho_G)r_K r_0} \quad (5)$$

u_d – prędkość przepływu gazu z dyfuzora zdefiniowana jako:

$$u_d = \frac{\xi Q}{\pi r_0^2} \quad (6)$$

r_{\min} – to minimalny promień pęcherza gazu zdefiniowany jako:

$$r_{\min} = \frac{1}{2} \left[\frac{0,4\sigma}{(\rho_L - \rho_G)g} \right]^{1/2} \quad (7)$$

b – stała w równaniu (4) [-],

I_i^* – intensywność pulsacji [-], zdefiniowana jako:

$$I_i^* = \frac{(2\pi f_i^*)^2 X_i^*}{g} \quad (8)$$

Przepływ pęcherzy przez warstwę pulsującej cieczy

W prezentowanym modelu przepływu pęcherzyka gazu przez warstwę pulsującej cieczy przyjęto następujące założenia:

1. Pęcherzyki gazu płyną swobodnie.
2. Pole pulsacji (objętość drgań) jest jednorodne i niezależne od wielkości pęcherzyka.
3. Fazą ciągłą jest płyn newtonowski.
4. Przepływ jest izotermiczny.

Przepływ pęcherzyka gazu przez warstwę pulsującej cieczy można opisać za pomocą dwóch równań różniczkowych (9) i (12). Pierwsze jest to równanie bilansu sił oddziaływujących na pęcherzyk przepływający przez pulsującą ciecz, z klasycznym uwzględnieniem sił oporu i wyporu oraz tzw. pierwszej siły *Bjorknesa* jako efektu wprowadzonych pulsacji [8, 9];

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_G \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \frac{dP(z,t)}{dz} + (\rho_L - \rho_G) \frac{4}{3}\pi r^3 g + \frac{1}{2} C_D \rho_L \left| \frac{dz}{dt} \right| \frac{dz}{dt} \pi r^2 \quad (9)$$

gdzie:

$$\frac{dP(z,t)}{dz} = 2A_p \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(2\pi \frac{z}{\lambda_i}\right) \cos(2\pi f^* t) \quad (10)$$

A_p – maksymalna amplituda pulsacji ciśnienia wyrażona następującą zależnością [1];

$$A_p = \rho_m Z (2\pi f^*)^2 X_i^* \quad (11)$$

Drugie równanie to klasyczne równanie *Raileigha-Plesseta* pozwalające określić zmiany objętości pęcherza w czasie jego przepływu wzdłuż kolumny pulsacyjnej.

$$\rho_L r \frac{d^2 r}{dt^2} = -\rho_L \frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 - 4\mu_L \frac{dr}{dt} \frac{1}{r} - 2\frac{\sigma}{r} + (P_0 + 2\frac{\sigma}{r_1}) \left(\frac{r_1}{r}\right)^3 + 2A_p \sin\left(2\pi \frac{z}{\lambda_i}\right) \cos(2\pi f^* t) - P_0 \quad (12)$$

Rozwiązując (numerycznie) układ równań (9) i (12) można obliczyć lokalną prędkość pęcherza $u = (dz/dt)$ i dalej – wartość średnią prędkości wznoszenia pęcherza $\langle u \rangle$ wzdłuż całej wysokości kolumny H .

Obliczenie stopnia zatrzymania gazu

Na podstawie definicji stopnia zatrzymania gazu oraz dysponując natężeniem dopływu powietrza Q , objętością pojedynczego pęcherza V_p i jego prędkością średnią $\langle u \rangle$ otrzymujemy:

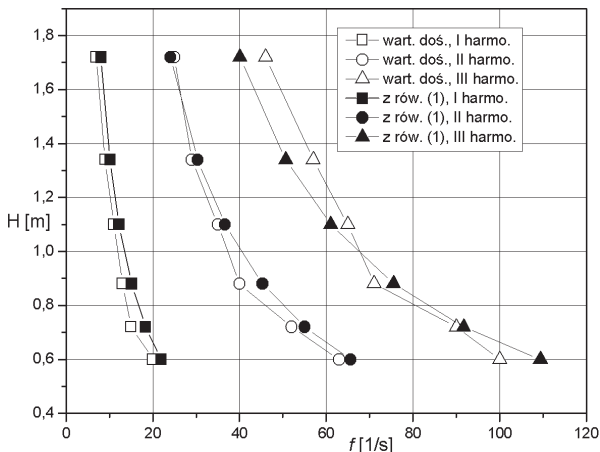
$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{V_{cp}}{V_c} = \frac{1}{V_c} \frac{i_0 Q H}{V_p \langle u \rangle} \quad (13)$$

Jeśli uzyskana wartość stopnia zatrzymania gazu $\langle \varepsilon \rangle$ różni się istotnie od wartości założonej $\langle \varepsilon_s \rangle$, jak w równaniu (2), należy skorygować wartości f_s^* i powtórzyć obliczenia.

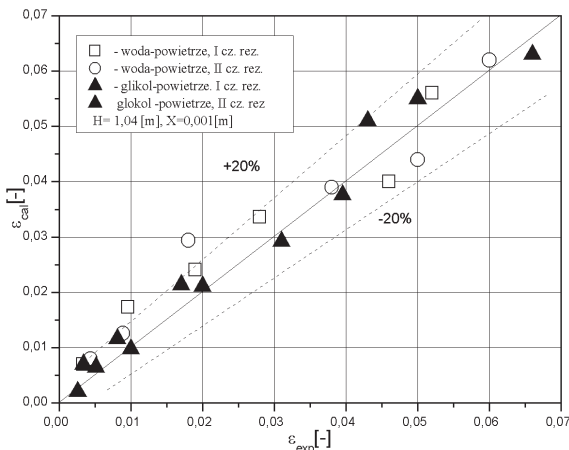
Omówienie wyników

Opracowany model zweryfikowano doświadczalnie w zakresie częstotliwości pulsacji f od 0 do 100 Hz i amplitudy pulsacji od X od 0,5 do 2 mm dla mieszanin woda – powietrze i glikol trójetylenowy – powietrze w kolumnie o przekroju kwadratu o powierzchni 0,134 m² i wysokości mieszaniny w kolumnie od 0,6 do 1,64 m.

Wartości zmian częstotliwości rezonansowych pulsacji w zależności od wysokości słupa cieczy w kolumnie pulsacyjnej dla wartości stopnia zatrzymania powietrza w wodzie dla $\langle \varepsilon \rangle = 4\%$ wyznaczono doświadczalnie oraz obliczono z równania (1) przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Porównanie wartości częstotliwości rezonansowych f^* wyznaczonych doświadczalnie z wartościami obliczonymi z zależności (1)



Rys. 2. Porównanie wartości stopnia zatrzymania gazu wyznaczonych doświadczalnie z wartościami obliczonymi z modelu (13) dla doświadczalnych wartości częstotliwości rezonansowych $f_s^* = f_{exp}^*$

Podsumowanie

Jak wynika z rys. 1 przewidywane wartości częstości rezonansowych fal stojących z równania (1), w badanym zakresie zmian badanych parametrów pulsacji, praktycznie pokrywają się z wartościami doświadczalnymi. Na rys. 2 porównano obliczone wartości maksymalne wartości stopnia zatrzymania gazu, z równania (13) z wartościami wyznaczonymi doświadczalnie, dla układu woda – powietrze i glikol – powietrze.

Uzyskane wyniki doświadczalne mieszczą się w granicach ok. 20% błędów w stosunku do wartości przewidywanych za pomocą zaproponowanego modelu, co należy uznać za zadowalające i wystarczające do celów technicznych.

Oznaczenia

- A_p – maksymalna amplituda pulsacji ciśnienia, [Pa]
- b – stała w równaniu (4), [-]
- C_D – współczynnik oporu $C_D = 1,21$, [-]
- $\langle \varepsilon \rangle$ – stopień zatrzymania gazu, [-]
- $\langle \varepsilon_s \rangle$ – przewidywana średnia wartość stopnia zatrzymania gazu w kolumnie równanie (2), [-]
- f^* – częstość rezonansowa pulsacji, [Hz]
- f_s^* – częstość rezonansowa pulsacji (wstępna), [Hz]
- g – przyspieszenie ziemskie, [m/s²]
- Γ – intensywność pulsacji, [-]
- H – całkowita wysokość warstwy pulsującej mieszaniny, [m]
- i_0 – liczba dyfuzorów, [-]
- λ_i – długość i -tej harmonicznej fali stojącej, [m]
- μ_L – lepkość cieczy (fazy ciągłej), [Pa·s]
- P – ciśnienie, [Pa]
- P_0 – ciśnienie atmosferyczne, [Pa]
- P_∞ – ciśnienie wewnątrz pęcherzyka, [Pa]
- Q – natężenie dopływu gazu przez pojedynczy dyfuzor, [m³/s]
- r – promień pęcherza, [m]
- r_0 – promień wewnętrzny dyfuzora, [m]
- r_k – promień pęcherza u wylotu z dyfuzora, [m]
- r_{min} – promień pęcherza gazu zdefiniowany równ. (7), [m]
- ρ_L – gęstość cieczy (fazy ciągłej), [kg/m³]
- ρ_G – gęstość gazu (fazy rozproszonej), [kg/m³]
- σ – napięcie międzyfazowe, [N/m]
- t – czas, [s]
- u_d – prędkość wypływu gazu z dyfuzora, [m]
- $\langle u \rangle$ – średnia prędkość wznoszenia pęcherza, [m/s]
- V_p – objętość pęcherza, [m³]
- V_c – całkowita objętość mieszaniny ciecz – gaz, [m³]
- V_{cp} – całkowita objętość pęcherzy w mieszaninie, [m³]
- w_m – prędkość fali w mieszaninie ciecz – gaz, [m/s]
- X – amplituda pulsacji wzbudnika (sztywne), [m]
- ξ – współczynnik wypływu, [-]
- z – położenie pęcherza wzdłuż wysokości kolumny, [m]

Indeksy

- i – oznaczenie kolejnych wartości rezonansowych, 1, 2, 3...
- * – oznaczenie wartości rezonansowych

LITERATURA

- [1] R.H. Buchanan, G.J. Jameson, D. Oedjoe: Ind. Eng. Chem. Res., 1, 82 (1962).
- [2] G.J. Jameson, J. F. Davidson: Chem. Eng. Sci., 21, 29 (1966).
- [3] F.C. Knopf, J. Ma, R.G. Rice, D. Nikitopoulos: AIChE J. 52, 1103 (2006a,b).
- [4] Y.G. Waghmare, R.G. Rice, F.C. Knopf: Ind. Eng. Chem. Res. 47, 15, 5386 (2008).
- [5] J. Ellenberger J., J.M. van Baten, R. Krishna: Chem. Eng. Sci. 60, 5962 (2005).
- [6] P. Budzyński: Chem. Proc. Eng. 28, 995 (2007).
- [7] P. Budzyński, M. Dziubiński: Inż. Ap. Chem. 48, nr 6, 33, (2009).
- [8] M.H.I. Baird: Can. J. Chem. Eng. 13, 52 (1963).
- [9] A. Prosperetti: Ultrasonics 22, 115 (1984).
- [10] S.S. Kutateladze, M.A. Styrikovich: Hydraulics of Gas-Liquid Systems, Moscow, Wright Field trans F-TS-9814/v 1958.