

PAWEŁ BUDZYŃSKI
MAREK DZIUBIŃSKI
MAGDALENA ORCZYKOWSKA

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Wpływ efektu *Bjerknesa* na hydrodynamikę przepływu pęcherzy gazu w pulsacyjnej kolumnie barbotażowej

Wprowadzenie

W ciągu ostatnich kilku lat toczy się dyskusja na temat sposobu opisu hydrodynamiki przepływu pęcherzy gazu w cieczy w kolumnach pulsacyjnych. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie stanowiska w dyskusji na temat wpływu efektu *Bjerknesa* na hydrodynamikę przepływu pęcherzy gazu w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej w oparciu o własne dane doświadczalne.

Rozważania dotyczące bilansu sił działających na pęcherzyki gazu poruszające się w kolumnie pulsacyjnej bez przegród zostały przedstawione między innymi w pracach [1–6]. Opierają się one na założeniu, że pęcherzyk zatrzyma się na określonej wysokości fazy ciekłej, w przypadku gdy wypadkowa sił: wyporu F_C i kinetycznej siły wyporu *Bjerknesa* F_B będzie równa sile oporu ośrodka F_0 .

$$F_0 = F_C - F_B \quad (1)$$

dla $\rho_L \gg \rho_G$ mamy

$$F_C = \rho_L V_0 g \quad (2a)$$

zaś kinematyczna siła wyporu *Bjerknesa* zdefiniowana jest następująco

$$F_B = \frac{A\omega^2}{2} \Delta V_{\max} \quad (2b)$$

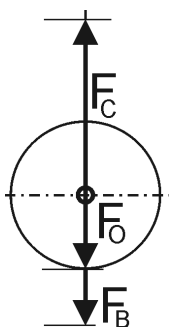
gdzie ΔV_{\max} jest to maksymalny przyrost objętości pęcherza o początkowej objętości V_0 na skutek pulsacji ciśnienia w cieczy.

Siła oporu ośrodka F_0 jest zdefiniowana następująco

$$F_0 = \frac{1}{2} \rho_L U^2 C_D \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3)$$

gdzie:

C_D – współczynnik oporu ośrodka zdefiniowany jako
 $C_D = 10/Re$, dla $Re < 500$; $Re = dU/\nu$,



Rys. 1. Bilans sił działających na pęcherzyk powietrza

d – średnica pęcherzyka, [m],
 U – prędkość wznoszenia pęcherzyka, [m/s],
 ν – lepkość kinematyczna płynu, [m²/s]

Waghmare i inni [5, 6] proponują następujące wyrażenie na całkowitą wartość stopnia zatrzymania gazu w kolumnie pulsacyjnej

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{15}{2}\right)^{2/3}}{1,7} \cdot \frac{U_{op} [gU_{op} + 0,5A^2\omega^3]^{2/5}}{(\nu_L/\rho_L)^{3/5} (g/\sqrt{\nu})^{2/3}} \cdot E(B_{jH}) \quad (4)$$

gdzie: $E(B_{jH}) = \frac{3}{B_{jH}} [1 - (1 - B_{jH})^{1/3}]$ B_{jH} liczba *Bjerknesa*.

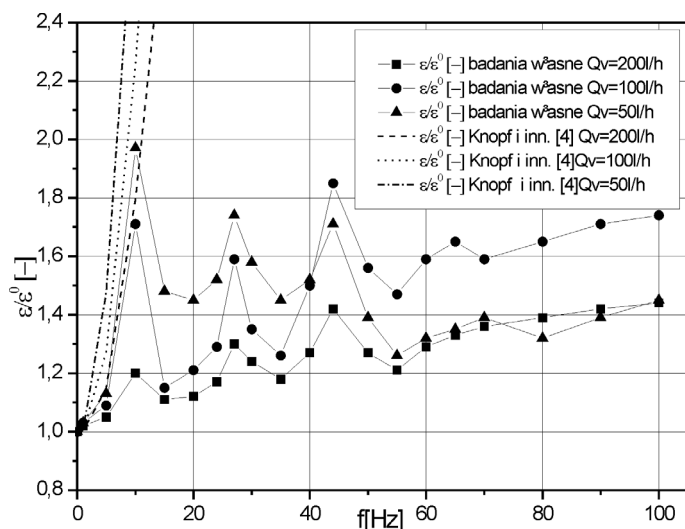
która na głębokości H od lustra cieczy przyjmuje wartość $B_{jH} = (4\rho_L H A^2 \omega) / (2gP_o)$, A – amplituda pulsacji [m], ω – częstotliwość pulsacji $2\pi f$ [rad/s] gdzie f – częstotliwość pulsacji [Hz], U_{op} – prędkość pęcherzy powietrza liczona na pusty aparat [m/s], ρ_L – gęstość cieczy [kg/m³], P_o – ciśnienie nad lustrem cieczy [N/m²]

Aparatura doświadczalna i metodyka pomiarów

Weryfikacji doświadczalnej przedstawionego powyżej modelu *Waghmare* i inni [5, 6] dokonano w oparciu o własne wyniki badań wpływu częstotliwości i amplitudy pulsacji na stopień zatrzymania pęcherzy powietrza w wodzie w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej o przekroju kwadratu o boku 0,15 m i wysokości $H = 2,25$ m. Stopień zatrzymania gazu ε określano metodą przelewową. Pulsacje wprowadzono za pomocą płytki stalowej o średnicy $d = 110$ mm umieszczonej 50 mm od dna kolumny. Amplitudę pulsacji płytki A ustalano, ustawiając wielkość przesunięcia mimośrodowo, do którego była zamocowana dźwignia połączona przegubem mimośrodowo z stalową płytką pulsującą, a częstotliwość pulsacji poprzez zmianę obrotów silnika. Amplitudę zmieniano w zakresie od $A = 0,5$ –4 mm, a częstotliwości pulsacji f od 0 do 100 Hz. Stosowano dysze o średnicach od $d_o = 0,5$ –4 mm. Natężenia przepływu powietrza wynosiły od 50 do 400 dm³/h.

Dyskusja

Na rys. 2 przedstawiono porównanie własnych danych doświadczalnych oraz stopnia zatrzymania gazu obliczonego z równania (4) zaproponowanego przez *Waghmare* i innych [5, 6]. Z przedstawionych na tym rysunku wyników badań wynika jednoznacznie, że przy stosowaniu pulsacji o określonych częstotliwościach tzw. częstotliwościach rezonansowych, występuje istotny bo około dwukrotny wzrost stopnia zatrzymania pęcherzy powietrza w wodzie w stosunku do stopnia za-

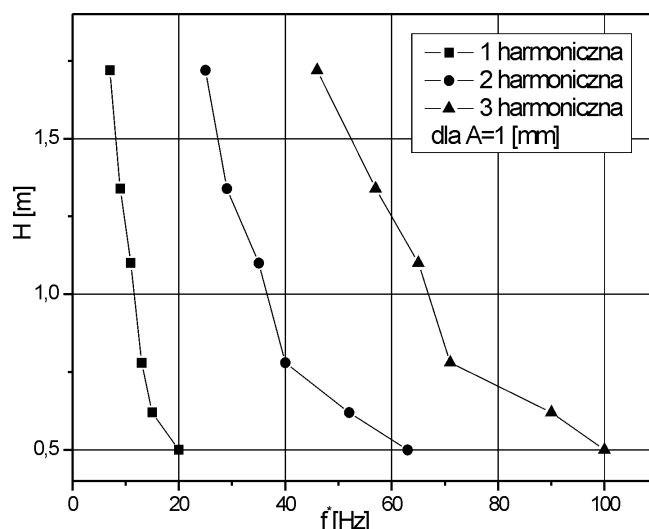


Rys. 2. Porównanie wyników pomiarów stopnia zatrzymania powietrza w wodzie z obliczonymi na podstawie równania (12) dla $A = 1$ mm, $d_o = 1$ mm

trzymania gazu podczas przepływu pęcherzy powietrza bez pulsacji fazy ciągłej. Wystąpienie nagłych wzrostów a następnie spadków wartości stopnia zatrzymania gazu (pik na wykresie, Rys. 2) przy wprowadzaniu pulsacji o coraz wyższej częstotliwości świadczy o wystąpieniu dla maksymalnej wartości piku fal stojących w kolumnie, analogicznie jak zauważył to w swojej pracy *Bird* [7] a aktualnie przedstawiają to ilościowo w swoich doniesieniach *Budzyński* [9], *Krishna*, *Ellenberger* [9, 10]. Przeczy to mechanizmowi monotonicznego wzrostu stopnia zatrzymania gazu ze wzrostem częstotliwości pulsacji w reaktorach pulsacyjnych zaproponowanemu przez *Waghmare* i in. [5, 6].

Dodatkowo *Waghmare* i in. [5, 6] proponują ograniczenie stosowania swojego modelu do częstości pulsacji poniżej $f < 25$ Hz nazywanej przez siebie „punktem zalewania kolumny”. Po analizie doniesień *Waghmare* [5, 6] oraz wyników badań własnych, porównaj rys. 2, stwierdzono, że zjawisko które autorzy ci nazywają „punktem zalewania kolumny” – to nic innego jak punkt pracy kolumny – wielkość częstotliwości pulsacji – przy której w kolumnie występuje tzw. pierwsza harmoniczna fala stojąca. Wartość częstotliwości rezonansowej, przy której występuje fala stojąca, jak wiadomo zależy od wysokości cieczy (mieszaniny) w kolumnie. Wybrane wyniki badań własnych wystąpienia fali stojącej w kolumnie wypełnionej wodą przedstawiono na rys. 3. Pierwsza fala stojąca występuje w zakresie częstotliwości kilku herców (ok. 5 Hz) przy wysokości mieszaniny reakcyjnej $H = 1,8$ m oraz przy częstotliwościach rzędu dwudziestu kilku herców (około 20 Hz) przy wysokości $H = 0,5$ m. Wyniki analogiczne do uzyskanych w badaniach własnych autorów prezentowanej pracy przedstawiają w swoich doniesieniach *Krishna* i inni [9, 10].

W związku z powyższym należy stwierdzić, że prezentowany w pracach *Waghmare* i innych [5, 6] model nie jest poprawny, ponieważ nie uwzględniono w nim podstawowego zjawiska fizycznego, za jakie należy uznać występowanie fal



Rys. 3. Wpływ wysokości cieczy H w kolumnie pulsacyjnej na wartość częstotliwości pulsacji płytki f^* , przy której w kolumnie występuje harmoniczna fala stojąca

stojących w kolumnach pulsacyjnych, które powodują zatrzymywanie dużych pęcherzy w strzałkach a mniejszych w węzłach określonej fali stojącej [9].

Wnioski

Na podstawie własnych i opublikowanych w literaturze przedmiotu danych doświadczalnych wykazano niesłuszność modelu prezentowanego w pracach *Waghmare* i innych [5, 6] opisującego i zakładającego monotoniczne zmiany stopnia zatrzymania gazu ze wzrostem częstotliwości pulsacji w reaktorach pulsacyjnych.

Wykazano, że ze wzrostem częstotliwości pulsacji występują maksima (piki) wartości stopnia zatrzymania gazu, odpowiadające występowaniu kolejnych harmonicznych fal stojących wzdłuż wysokości kolumny.

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. *G.J. Jameson*: Chem. Eng. Sci., **21**, 35 (1966).
4. *F.C. Knopf, J. Ma, R.G. Rice, D. Nikitopoulos*: AIChE J. **52**, 1103 (2006a,b).
5. *Y.G. Waghmare, F.C. Knopf, R.G. Rice*: AIChE, **53**, nr 7, 1678 (2007)
6. *Y.G. Waghmare, R.G. Rice, F. Knopf*: Ind. Eng. Chem. Res. **47**, 15, 5386 (2008).
7. *M.H.I. Baird*: Can. J. Chem. Eng. **13**, 52 (1963).
8. *P. Budzyński*: Chem. Proc. Eng. **28**, 995 (2007).
9. *R. Krishna, J. Ellenberger*: Chem. Eng. Sci. **57**, 4809 (2002).
10. *R. Krishna, J. Ellenberger, M. Jasper van Baten*: Chem. Eng. Sci. **60**, 5962 (2005).

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr 1 T09C 019 30 finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki.