

Paweł BUDZYŃSKI, Marek DZIUBIŃSKI

e-mail: pawel.budzynski@p.lodz.pl

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

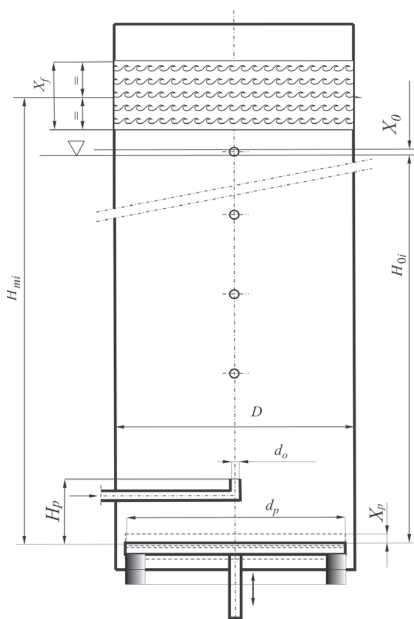
## Udział powierzchni swobodnej w całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej

### Wstęp

W klasycznych kolumnach barbotażowych mamy do czynienia z bardzo niekorzystnym zjawiskiem występowania stref martwych oraz obszarów cyrkulacji zwanych *klatkami* co wpływa na obniżenie współczynników wnikania masy. Dla uniknięcia tych zjawisk w niektórych przypadkach wprowadza się do kolumn mieszadła mechaniczne. Rozwiązanie to jest kosztowne i nie zapobiega powstawaniu stref martwych ze względu na wymuszony ruch osiowy faz i w konsekwencji ich rozdział. Rozwiązaniem pozwalającym uniknąć tych problemów jest zastosowanie barbotażowych kolumn pulsacyjnych. W kolumnach tych możliwe jest uzyskanie praktycznie łokowego przepływu pęcherzy gazu. Podstawowym problemem w projektowaniu tego typu reaktorów jest określenie częstości oscylacji i ich amplitudy dla uzyskania maksymalnej powierzchni kontaktu międzyfazowego. Powierzchnia ta składa się zarówno z powierzchni pęcherzy gazu o określonych rozmiarach jak i powierzchni swobodnej cieczy. Jak wynika z prac wielu autorów [Bretsznajder, 1964; Eaton i in., 1980; Budzyński, 2011] pomijanie wpływu powierzchni swobodnej może prowadzić do poważnych błędów przy oznaczaniu objętościowych współczynników wnikania masy.

### Aparatura i media doświadczalne

Badania przeprowadzono w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej bez przegród o wysokości roboczej od  $H_m = 0,6 \div 1,6$  m i przekroju kwadratu o boku  $D = 0,15$  m. Badania przeprowadzono w zakresie zmian amplitudy od  $X_p = 0,5 \div 2$  mm, częstości pulsacji od 0 do 100 Hz. Powietrze dostarczano z sieci z natężeniem przepływu  $Q_p$  od 100 do 900  $\text{dm}^3/\text{h}$  przez dysze o średnicach  $d_o = 0,5 \div 2$  mm. Jako fazę ciągłą stosowano wodę wodociągową. Schemat barbotażowej kolumny pulsacyjnej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska doświadczalnego

### Metodyka pomiarów

W czasie pomiarów rejestrowano amplitudę wychylenia powierzchni cieczy swobodnej  $X_f$ , (Rys. 1). Uruchomienie podczas wykonywanych

badania pulsatora, powodowano zniekształcenie dotychczas płaskiej powierzchni cieczy. Przy niewielkich częstościach drgań zwierciadło cieczy unosiło się do góry o wysokość podwojonej amplitudy pulsatora, a następnie opadało do poprzedniego położenia z częstością równą częstości pulsacji płytki pulsatora. Zwiększając dalej częstość pulsacji obserwowano regularne fale powierzchniowe, których długość była równa wielokrotności średnicy kolumny. Dalsze zwiększanie częstości pulsacji płytki powodowało coraz intensywniejsze wzbudzenie powierzchni, którym towarzyszyło wyrzucanie małych porcji (kropli) cieczy na wysokość kilkudziesięciu centymetrów. Maksymalne wzbudzenia powierzchni cieczy  $X_{f1}$ , następowało przy charakterystycznej częstości pulsacji, zwanej pierwszą częstością własną lub pierwszą częstością rezonansową  $f_{w1}^*$ . Dalsze zwiększanie częstości powodowało uspakajanie się powierzchni cieczy i ponowne wzbudzenie dla drugiej częstości rezonansowej  $f_{w2}^*$ . Cała powierzchnia pokrywała się regularnymi wzniesieniami i zagłębieniami, a obwód widoczny przez ściankę kolumny, przedstawiał krzywą o charakterze sinusoidalnym. Kształt powierzchni lustra cieczy był analogiczny jak przy zastosowaniu pierwszych częstości rezonansowych. Różnica między falami, przy zachowaniu podobnego kształtu, polegała jedynie na wielkości amplitudy ich wychylenia. Amplituda wychylenia omawianej powierzchni  $X_{f2}$  była mniejsza o ponad połowę, w stosunku do wychylenia fali przy niższej pierwszej częstości rezonansowej  $f_{w1}^*$ . Zwiększając dalej częstość pulsacji płytki pulsatora falowania powierzchni były coraz intensywniejsze aż do osiągnięcia kolejnego maksimum wzbudzenia powierzchni przy wprowadzeniu częstości pulsacji o wartości równej trzeciej rezonansowej częstości własnej układu  $f_{w3}^*$ . Obserwowana amplituda wychylenia powierzchni  $X_{f3}$ , mierzona wysokością na jaką były wyrzucane krople cieczy, była mniejsza niż poprzednio.

Kolejnych, czwartych i dalszych, częstości rezonansowych nie zaobserwowano w badanym zakresie częstości pulsacji do 100 Hz.

### Udział powierzchni swobodnej w całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej

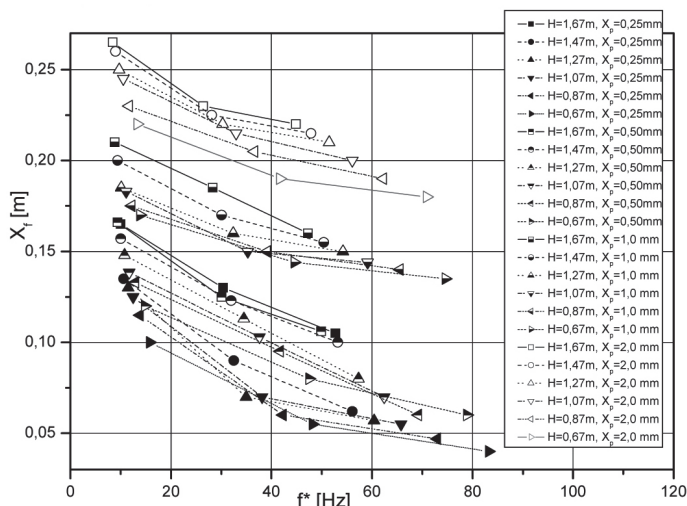
Dla oszacowania wielkości powierzchni swobodnej  $A_B$  w stosunku do całkowitej powierzchni wymiany masy w kolumnie  $A_C$  wprowadzono wielkość  $\Phi$  [%] zdefiniowaną jako

$$\Phi = A_B/A_C \quad A_C = A_b + A_B \quad (1)$$

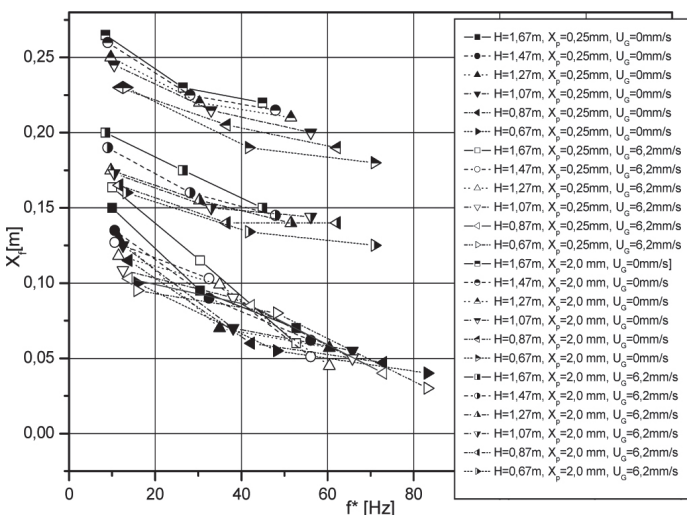
Wielkość powierzchni pęcherzy  $A_b$  obliczono przy założeniu ich kulistego kształtu w oparciu o stopień zatrzymania gazu  $\varepsilon_{Gc}$  a wielkość powierzchni lustra cieczy  $A_{Bi}$  z zależności zaproponowanej w pracy [Bretsznajder i Pasiuk, 1964]. Do obliczeń porównawczych przyjęto arbitralnie, że w cieczy znajdują się jedynie kuliste pęcherzyki gazu o średnicach  $d_p = 2$  mm lub  $d_p = 5$  mm. Jako zmienne do analizy przyjęto wysokość mieszaniny w kolumnie:  $H_m = 0,6$  m i 2,0 m, wielkość stopnia zatrzymania gazu w cieczy  $\varepsilon_{Gc} = 1\%$  i 5% oraz wychylenie zwierciadła cieczy i mieszaniny ciecz-gaz  $X_f = 0$  mm; 50 mm; 200 mm.

### Omówienie wyników

Przykładowe wyniki pomiarów wychylenia powierzchni swobodnej pulsującej cieczy  $X_f$ , bez napowietrzania i przy zastosowaniu napowietrzania przedstawiono na rys. 2 i 3. Porównując je należy stwierdzić, że wychylenie lustra mieszaniny woda-powietrze (Rys. 3) jest mniejsze niż w przypadku takich samych wartości częstości i amplitudy pulsacji wprowadzanych do cieczy nienapowietrzanej.



Rys. 2. Zależność zmian amplitudy pulsacji powierzchni swobodnej wody  $X_f$  od częstotliwości wprowadzanych pulsacji rezonansowych  $f^*$ , bez napowietrzania



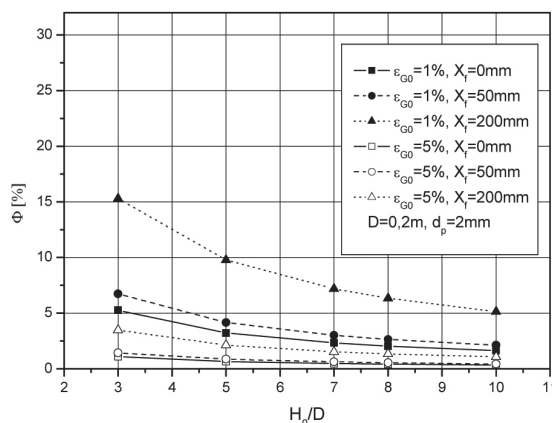
Rys. 3. Zależność zmian amplitudy pulsacji powierzchni swobodnej wody  $X_f$  od częstotliwości wprowadzanych pulsacji rezonansowych  $f^*$ , z napowietrzaniem

Przykładowe wyniki obliczeń udziału powierzchni swobodnej w stosunku do całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej dla średnic pęcherza  $d_p = 2$  mm i 5 mm przedstawiono odpowiednio na rys. 4 i 5.

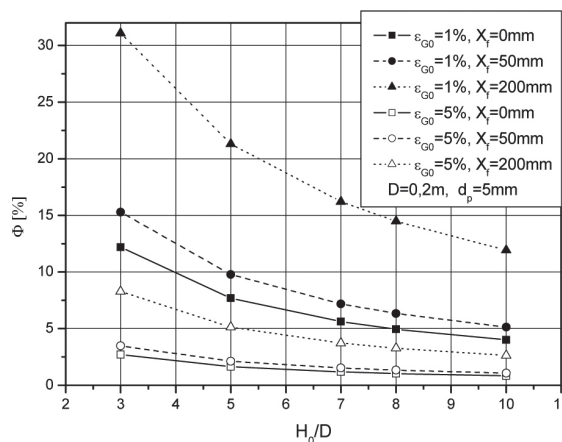
Dla średnicy pęcherza  $d_p = 2$  mm, przy stopniu zatrzymania pęcherzy gazowy w wodzie  $\varepsilon = 1,0\%$ , największy udział powierzchni swobodnej  $A_{Bi}$  w całkowitej powierzchni wymiany masy  $A_c$  dla kolumn o wysokościach  $H_0 = 0,6$  m i 2 m oraz wysokości wychylenia powierzchni  $X_f = 200$  mm wynosił odpowiednio 15,3% i 5,1%. Natomiast udział powierzchni swobodnej  $A_{Bi}$  w całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego  $A_c$  w kolumnie barbotażowej bez wprowadzenia pulsacji (wychylenie  $X_f = 0$  mm) dla kolumn o wysokościach  $H_0 = 0,6$  m i 2 m, wynosił odpowiednio  $\Phi = 5,3\%$  i 1,6%.

Przy tym stopniu zatrzymania pęcherzy gazowy w wodzie  $\varepsilon = 1,0\%$ , ale dla średnicy pęcherza  $d_p = 5$  mm największy udział powierzchni swobodnej  $A_{Bi}$  w całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego  $A_c$  dla kolumn o wysokościach  $H_0 = 0,6$  m i 2 m oraz wysokości wychylenia powierzchni  $X_f = 200$  mm, wynosił odpowiednio  $\Phi = 31,1\%$  i 11,9%. Udział powierzchni swobodnej  $A_{Bi}$  w całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego  $A_c$  bez wprowadzenia pulsacji (wychylenie  $X_f = 0$  mm) dla kolumn o wysokościach  $H_0 = 0,6$  m i 2 m, wynosił odpowiednio  $\Phi = 12,2\%$  i 4%.

Natomiast analogiczne obliczenia wykonane dla znacznie większego stopnia zatrzymania gazowy w wodzie  $\varepsilon = 5,0\%$  wskazują, że ze wzrostem stopnia zatrzymania gazowy w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej udział powierzchni swobodnej w całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego



Rys. 4. Zależność wartości współczynnika  $\Phi$  w zależności od stosunku  $H_0/D$  kolumn pulsacyjnych,  $d_p = 2$  mm



Rys. 5. Zależność wartości współczynnika  $\Phi$  w zależności od stosunku  $H_0/D$  kolumn pulsacyjnych,  $d_p = 5$  mm

zowego maleje i w zależności od wysokości kolumny  $H_0 = 0,6$  m i 2 m dla wysokości wychylenia powierzchni  $X_f = 200$  mm wynosił odpowiednio od  $\Phi = 3,5\%$  do 1,1% dla średnicy pęcherza  $d_p = 2$  mm oraz  $\Phi = 8,3\%$  do 2,61% dla średnicy pęcherza  $d_p = 5$  mm. Udział powierzchni swobodnej  $A_{Bi}$  w całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego  $A_c$  bez wprowadzenia pulsacji (wychylenie  $X_f = 0$  mm) dla kolumn o wysokościach  $H_0 = 0,6$  m i 2 m, wynosił odpowiednio  $\Phi = 1,1\%$  i 0,3% dla średnicy pęcherza  $d_p = 2$  mm i  $\Phi = 2,7\%$  i 0,8% dla średnicy pęcherza  $d_p = 5$  mm.

### Wnioski

Podczas badań obserwowano tłumienie falowania powierzchni swobodnej barbotażowej kolumny pulsacyjnej ze wzrostem stopnia zatrzymania gazowy. Wiąże się to z hamowaniem wzrostu amplitudy fali powierzchniowej na granicy faz przez pęcherzyki powietrza wpływające z cieczy.

Z przeprowadzonych badań i obliczeń wynika jednoznacznie, że w przypadku stosowania barbotażowych kolumn pulsacyjnych pominięcie wpływu powierzchni swobodnej na całkowitą powierzchnię kontaktu międzyfazowego może prowadzić do istotnych błędów, ponieważ jej udział w całkowitej powierzchni kontaktu międzyfazowego może być istotny.

### LITERATURA

Bretsznajder S., W. Pasiuk W., 1964. Absorpcja w kolumnie pulsacyjnej. *Przem. Chem.*, 43, nr 2, 74-79  
 Eaton A.R., Frey S.F., Cusano D.M., Plesniak M.W., Sojka P.E., Hashimoto H., Sudo S., 1980. Surface disintegration and bubble formation in vertically vibrated liquid column. *AIAA Journal*, 18, 4, 442-449. DOI: 10.2514/3.7649  
 Budzyński P., 2011. Hydrodynamika przepływu pęcherzy gazowych w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej. *Zesz. Nauk. Pol. Łódzkiej Nr 1107*, 1-184, Łódź, ISSN 0137-4834