

Paweł BUDZYŃSKI, Adam GWIAZDA, Marek DZIUBIŃSKI

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

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

Wymiana masy w barbożowych kolumnach pulsacyjnych

Wprowadzenie

Wprowadzając pulsacje do klasycznej kolumny barbożowej, zasadniczo zmienia się hydrodynamika przepływu pęcherzy gazowych przez warstwę cieczy [Ellenberger 2005, Budzynski 2014]. W wyniku wprowadzonych pulsacji o częstotliwości rezonansowej na przepływające pęcherze działa dodatkowa siła (poza siłą oporu, wyporu i ciężkości) tzw. siła Bjerknesa, skierowana przeciwnie do siły wyporu. Oddziaływanie tej siły na pęcherze, powoduje zmniejszenie prędkości ich przepływu oraz stopnia zatrzymania gazu w cieczy, a tym samym zwiększenie czasu kontaktu faz co w efekcie skutkuje wzrostem wartości współczynnika wnikania masy. Na zmiany wartości tego współczynnika wpływają również zmiany wielkości średnicy pęcherzy gazu powstających u wylotu z dyfuzora [Hinze 1955, Ellenberger 2003, Budzynski 2011] oraz zmiany wielkości powierzchni swobodnej cieczy [Bretsznajder i Pasiuk 1964].

W prezentowanej pracy podjęto próbę ustalenia wpływu pulsacji, z częstotliwościami rezonansowymi, na wartość wyznaczanego współczynnika wymiany masy w barbożowej kolumnie pulsacyjnej dla kolumn o małej smukłości $3 < H_p/D < 10$.

Badania doświadczalne

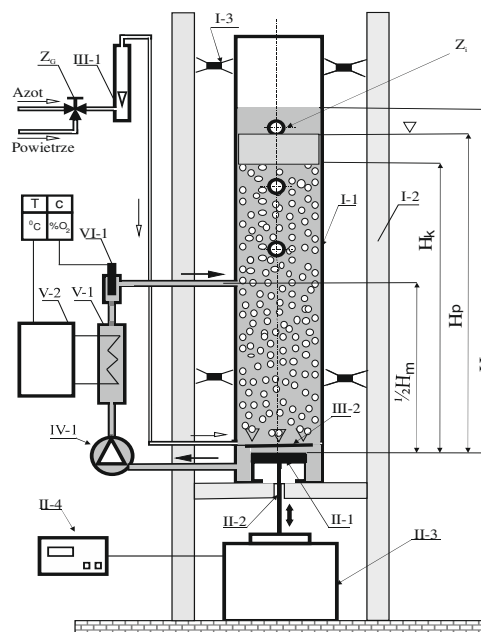
Aparatura. Badania przeprowadzono w Katedrze Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej. Schemat aparatury przedstawiono na rys. 1. Głównym elementem stanowiska doświadczalnego była kolumna (I-1) wykonana ze szkła o kwadratowym przekroju poprzecznym, boku $D = 0,135$ m i wysokości całkowitej $H_c = 2,25$ m, osadzona na nieruchomym statywie (I-2) i połączona z nim zestawem sprzężyn (I-3).

W dnie kolumny zainstalowano okrągłą płytkę pulsatora (II-1) wykonaną ze stali o średnicy $d_p = 0,105$ m i grubości 10 mm. Płytkę osadzono szczelnie na elastycznej membranie i połączono z napędem mimośrodowym (II-2) zainstalowanym na wale silnika (II-3). Częstotliwość drgań płytki f pulsatora ustalano poprzez regulację obrotów silnika (II-3) za pomocą falownika (II-4), w zakresie od 1 do 100 Hz, a amplitudę A pulsacji płytki od 0,25 do 2 mm poprzez ustawienie mimośrodów (II-2).

Powietrze wprowadzono do układu z sieci wydzielowej poprzez zawór Z_G , rotametr (III-1) i dalej do kolumny (I-1) poprzez ruszt napowietrzający (III-2) z 20 otworami o średnicy $d_0 = 0,8$ mm. Do oznaczania zmian stężenia tlenu w cieczy w sposób ciągły instalacja wyposażona była w obieg cyrkulacyjny wody (IV). Ciecz pobierana była przez pompę perystaltyczną (IV-1) z dolnej części kolumny poniżej płytki pulsatora i przetaczana do układu termostatującego (V-1,2), a następnie do przepływowego naczynka pomiarowego, w którym zainstalowano sondę pomiarową (VI-1) do pomiaru stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie c i temperatury T . W pomiarach stosowano sondę tlenową *Oxi 3310 Setz Incl. Cellox 325-3* firmy WTW, Niemcy. Woda była przetaczana przez układ pomiarowy ze stałym objętościowym natężeniem przepływu $Q_w = 1$ dm³/min.

Media. Jako mediów doświadczalnych użyto wody wodociągowej (fazy ciągłej) natomiast fazę rozproszoną stanowił azot techniczny z butli (*Linde 4.0.*) i powietrze z sieci wydzielowej. Badania doświadczalne przeprowadzono w temperaturze $18 \pm 0,2$ °C.

Metodyka pomiarowa. Kolumnę (I-1) napełniano wodą wodociągową do zadanej wysokości H_p , wykorzystując otwory przelewowe w bocznej ścianie kolumny (Z_i). Otwory przelewowe były połączone przewodami elastycznymi z naczyniami pomiarowymi. Po ustaleniu wysokości cieczy w kolumnie otwory zamykano hydraulicznie.



Rys. 1. Schemat aparatury badawczej

Gaz do cieczy wprowadzano poprzez zawór (Z_G), rotametr (III-1) i napowietrzacz (III-2), z zadanimy objętościowym natężeniem przepływu Q_p . W pomiarach stosowano objętościowe natężenia przepływu gazu 200, 400 i 600 dm³/h, co odpowiada prędkości gazu na pustym aparacie $U_i = 3,1; 6,2$ i $9,3$ mm/s. Najpierw wprowadzano azot, a po wysyceniu tlenu z wody przelączano zawór Z_G i wprowadzano powietrze. Podczas wysycania tlenu z wody azotem, ustalano częstotliwość i amplitudę pulsacji pulsatora. Po ustaleniu się parametrów pracy kolumny (Q_G, Q_w, f, A, T) fotografowano położenie powierzchni swobodnej mieszaniny dwufazowej ciecz-gaz dla ustalenia wysokości H_m . Następnie otwierano zamknięcie hydrauliczne Z_i i zlewano nadmiar wody. Po wysyceniu tlenu z wody ($C < 0,1$ mg / dm³) zmieniano położenie zaworu Z_G i do kolumny wprowadzono powietrze o natężeniu przepływu Q_p , które było równe natężeniu przepływu azotu $Q_G = Q_N$, i rozpoczynano właściwy, ciągły pomiar dynamiki zmian stężenia tlenu c i temperatury T w czasie napowietrzania t . Po zakończeniu pomiaru, wyłączano układ dopływu powietrza (III) oraz pulsator i po ustaleniu się położenia powierzchni swobodnej mierzono wysokość wody w kolumnie H_k .

Metodyka obliczeń

Stopień zatrzymania gazu ϵ_G wyznaczano metodą przelewową i klasyczną (w oparciu o pomiar bezpośredni – fotografie kolumny) z zależności

$$\epsilon_G = \frac{H_p - H_k}{H_p} \quad (1)$$

Objętościowy współczynnik wnikania tlenu do wody k_{LA} wyznaczano i obliczano analogicznie jak w pracach [Ellenberger 2002, Ferreira 2015] z zależności

$$\ln \frac{c^* - c}{c^*} = -k_{LA} a t \quad (2)$$

gdzie:

 a – powierzchnia właściwa wymiany masy, [m²/m³]

c – aktualne stężenie tlenu w wodzie, [mg/dm³]
 c^* – stężenie równowagowe na granicy faz, [mg/dm³]
 k_L – współczynnik wnikania tlenu do wody, [m/s]
 t – czas procesu natleniania, [s]

Wyniki i dyskusja

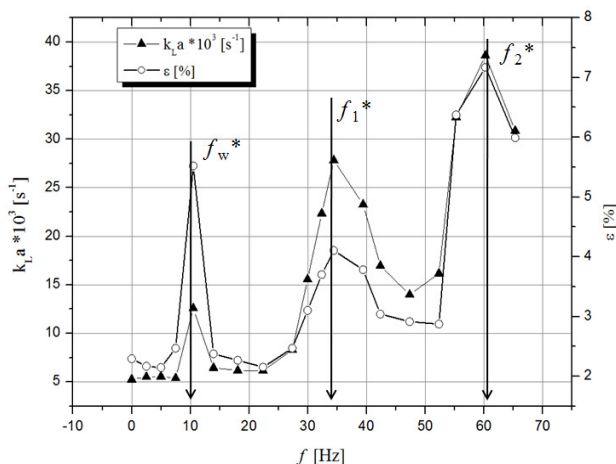
Przykładowe wyniki pomiarów, zmian wartości aparaturowego objętościowego współczynnika wnikania tlenu $k_L a$ oraz stopnia zatrzymania gazu ε_G od częstotliwości drgań płytki pulsatora przedstawiono na rys. 2.

Wprowadzając do układu dwufazowego ciecz-gaz pulsacje o częstościach rezonansowych, stwierdzono istotne wzrosty wartości stopnia zatrzymania gazu ε_G i aparaturowego objętościowego współczynnika wnikania tlenu $k_L a$ (Rys. 2). Szczególnie wysoki wzrost stopnia zatrzymania gazu odnotowywano przy częstościach drgań płytki pulsatora f_w^* odpowiadających pierwszym częstościom drgań własnych układów. W trakcie pomiaru obserwowano nieregularne, wychylenia powierzchni swobodnej, że pomiar stopnia zatrzymania gazu ε_G metodą klasyczną obarczony był trudnym do oszacowania błędem. W związku z tym zdecydowano się na pomiar stopnia zatrzymania gazu metodą przelewową.

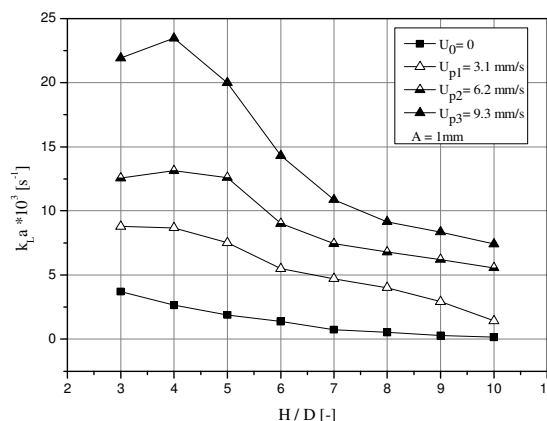
Moc całkowita wprowadzona do kolumny pulsacyjnej $P_c = P_G + P_p$ definiowana jest jako suma mocy wprowadzonej do układu z gazem $P_G = U_i g$ i z pulsacjami $P_p = (2\pi f_w^*)^2 A^3$. Przy zmniejszeniu się smukłości kolumny (malejącej wysokości H_p przy stałym przekroju) oraz przy stałym natężeniu przepływu powietrza Q_G , stałej amplitudzie pulsacji A i przy wzrastającej wartości pierwszej częstości rezonansowej f_w^* wzrasta moc całkowita P_c na jednostkę masy cieczy.

Jak wiadomo wartości częstości rezonansowych są odwrotnie proporcjonalne do pulsującej masy. Wraz ze wzrostem mocy dostarczonej na jednostkę masy należało by się spodziewać monotonicznego wzrostu wartości aparaturowego objętościowego współczynnika wnikania tlenu do wody. Tak jednak nie jest i jak wynika z rys. 3 progresywny wzrost objętościowego współczynnika wnikania tlenu przy smukłości $H/D < 5$ jest zakłócony, a przy wyższych prędkościach U_3 doprowadzanego gazu przy $H/D < 4$ współczynnik ten ulega nawet zmniejszeniu.

Obserwowana tendencja zmian wynika najprawdopodobniej z bardzo intensywnego falowania powierzchni i w efekcie zmniejszenia grubości warstwy cieczy przez, którą przepływają pęcherze gazu. Zwiększa się co prawda powierzchnia swobodna, ale w istotnej części objętości reakcyjnej nie ma cieczy, a więc nie następuje wymiana masy. W efekcie obserwujemy niższe wartości objętościowych właściwej powierzchni wymiany masy a .



Rys. 2. Zależność objętościowego współczynnika wnikania tlenu i stopnia zatrzymania gazu od częstotliwości drgań pulsatora, dla $H_p = 0,82$ m, $A = 1$ mm, $U = 6,2$ mm/s



Rys.3. Porównanie zmian współczynnika wnikania tlenu od smukłości kolumny H/D przy zastosowaniu pulsacji odpowiadających wartościom pierwszych częstości rezonansowych. F_w^* dla stałej amplitudy $A = 1$ mm.

Wnioski

Z analizy wyników przeprowadzonych badań wynika, że:

- Wzrost wartości współczynnika wnikania masy $k_L a$ jest proporcjonalny od sumy mocy wprowadzanej z powietrzem P_G i mocy wprowadzanej z pulsacją P_p . Wprowadzenie pulsacji o częstościach rezonansowych w istotny sposób intensyfikuje proces wymiany masy. Ze względów technicznych i ekonomicznych najbardziej efektywne wydaje się stosowanie pulsacji o najniższych wartościach rezonansowych czyli pulsacji o wartościach pierwszych częstości rezonansowych. Wyższe częstotliwości rezonansowe (harmoniczne) wymagają masywniejszych konstrukcji kolumn oraz stosowania pulsatorów o istotnie większej mocy zgodnie z zależnością $P_p = (2\pi f_w^*)^2 A^3$.
- Zastosowanie pierwszej częstości rezonansowej pulsacji pozwala na osiągnięcie największych wzrostów wartości objętościowego współczynnika wnikania tlenu dla kolumn barbotażowych o niskich wartościach smukłości $H/D < 7$. Trzeba się jednak liczyć że ze zmniejszeniem smukłości zwiększa się wpływ zjawiska falowania powierzchni swobodnej cieczy na warunki wnikania gazu do cieczy. W wyniku tego falowania rzeczywista wartość całkowitej powierzchni właściwej w kolumnie ulega obniżeniu i w efekcie obserwujemy niższe wartości objętościowych współczynników wnikania tlenu $k_L a$.

LITERATURA

- Bretsznajder S., Pasiuk W., 1964. Absorpcja w kolumnie pulsacyjnej – Część II: Zjawiska na powierzchni cieczy wywołane pulsacją. *Przem. Chem.*, **43**, nr 2, 74-79
- Budzyński P., 2011. Hydrodynamika pęcherzy gazowych w barbotażowej kolumnie pulsacyjnej. *Zesz. Nauk., PE*, 1107, 1-183
- Budzyński P., Dziubiński M., 2014. Intensification of bubble column performance by introduction pulsation of liquid. *Chem. Eng. Proc.*, **78**, 44-57. DOI: 10.1016/j.cep.2014.02.001
- Ellenberger J., Krishna R., 2002. Improving mass transfer in gas-liquid dispersion by vibration excitant. *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 4809-4815. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00272-5
- Ellenberger J., Krishna R., 2003. Influence of low-frequency vibrations on bubble and drop sizes formed at a single orifice. *Chem. Eng. Proc.*, **42**, 15-21. DOI: 10.1016/S0255-2701(02)00012-0
- Ellenberger J., van Baten J.M., Krishna R., 2005. Exploiting the Bjerknes force in bubble column reactors. *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 5962-5970. DOI: 10.1016/j.ces.2005.03.036
- Ferreira A., Teixeira J.A., Rocha F., 2015. O₂ mass transfer in an oscillatory flow reactor provided with smooth periodic constrictions. Individual characterization of k_L and a . *Chem. Eng. J.*, **262**, 499-508. DOI: 10.1016/j.cej.2014.09.125
- Hinze J.O., 1955. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE J.*, **1**, 3, 289-295. DOI: 10.1002/aic.690010303