

Sebastian FRANKIEWICZ, Szymon WOZIWOZDKI

e-mail: szymon.woziwodzki@put.poznan.pl

Zakład Inżynierii i Aparatury Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Mieszanie gaz-ciecz w mieszalniku z asymetrycznym mieszadłem BT-6

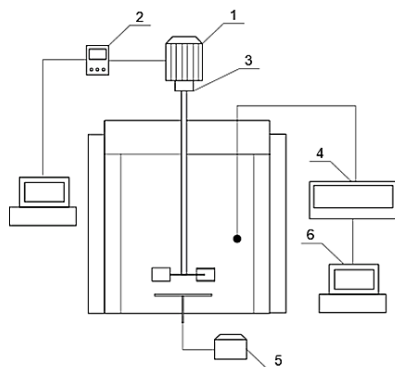
Wstęp

Mieszanie układów dwufazowych gaz-ciecz prowadzi się zwykle w mieszalnikach z mieszadłem generującym przepływ promieniowy (np. BT-6, Scaba SRGT, turbina *Smitha*, turbina *Rushtona*) z przegrodami o standardowej geometrii. Obecność gazu powoduje jednak spadek zapotrzebowania na moc mieszania, a tym samym zmniejszenie intensywności wymiany masy. Jest to szczególnie istotne w mieszalnikach, gdzie stosowanie przegród nie jest zalecane. W takich mieszalnikach w celu zwiększenia intensywności mieszania stosuje się niecentryczne położenie mieszadeł lub mieszanie nieustalone (zmienna w czasie częstość obrotów mieszadła). Mieszanie nieustalone przyczynia się do zwiększenia zapotrzebowania na moc mieszania oraz zwiększenia naprężeń w obszarze mieszadła [Woziwodzki, 2017], co powoduje zwiększenie intensywności wymiany masy. W przypadku mieszadeł o wygiętych łopatkach takich jak BT-6 czy Scaba SRGT podczas mieszania nieustalonego intensywność wymiany masy zależna jest od kierunku obrotów mieszadła, ponieważ mieszadło zagarnia ciecz stroną wypukłą łopatki a raz stroną wklęsłą. Powoduje to, że występowanie kawern gazowych oraz ich wielkość zależy od kierunku obrotów mieszadła.

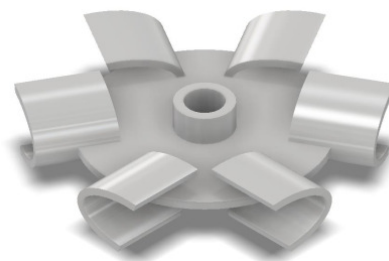
Celem pracy było zaproponowanie modyfikacji mieszadła BT-6, pozwalającej na uzyskanie równomiernego mieszania niezależnie od kierunku obrotów. Badania zostały podzielone na dwa etapy. W pierwszym analizowano zapotrzebowanie na moc mieszania, stopień zatrzymania gazu oraz intensywność wymiany masy podczas mieszania ustalonego układów gaz-ciecz.

Badania doświadczalne

Aparatura. Badania prowadzono w termostatowanym zbiorniku, z standardowymi przegrodami, o średnicy $D = 0,29$ m, wykonanym z przezroczystego polimetakrylanu metylu (Rys. 1). Stosunek wysokości napełnienia cieczą do średnicy mieszalnika wynosił $H/D = 1$. Zastosowano mieszadło typu BT-33 (Rys. 2) własnej konstrukcji [Frankiewicz, 2018]. Celem modyfikacji mieszadła była poprawa intensywności i efektywności mieszania nieustalonego. Mieszadło posiadało sześć łopatek w kształcie półelips o wymiarach charakterystycznych dla turbiny *Bakera* [Myers i in., 1999]. Trzy z nich zwrócone są częścią wklęsłą do kierunku obrotu, a pozostałe trzy częścią wypukłą i rozmieszczone są naprzemiennie (Rys. 2). Dzięki temu uzyskano taką samą charakterystykę mieszania w obu kierunkach.



Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1 – silnik, 2 – falownik, 3 – momentomierz, 4 – tlenomierz *Elmetron CO-501*, 5 – dmuchawa *Hiblow HP-40*, 6 – komputer



Rys. 2. Mieszadło BT-33 [Frankiewicz, 2018]

Średnica mieszadła wynosiła $d = 0,1$ m, wysokość łopatki $a = 0,02$ m a jej szerokość $w = 0,025$ m. Średnica dysku mieszadła wynosiła $d_0 = 0,075$ m

Metodyka. Moc mieszania analizowano metodą tensometryczną mierząc moment obrotowy na wale mieszalnika za pomocą momentomierza (3). Jako media robocze zastosowano wodę destylowaną (faza ciągła) i powietrze (faza rozpraszana). Natężenie przepływu gazu zmieniano w zakresie od 0,5 do 1,2 m³/h. Badania prowadzono w temperaturze $T = 21^\circ\text{C}$. Powietrze wprowadzano do mieszalnika przez bełkotkę pierścieniową o średnicy $d_b = 0,085$ m, umieszczoną na dnie mieszalnika. Stopień zatrzymania gazu mierzono metodą objętościową polegającą na obserwacji zmian wysokości słupa cieczy w mieszalniku.

Intensywność wymiany masy analizowano metodą dynamiczną mierząc za pomocą elektrody galwanicznej COG-1 stężenie tlenu rozpuszczonego w cieczy. Na podstawie zmian stężenia tlenu w czasie określano objętościowy współczynnik wnikania masy $k_L a$.

$$-k_L a(t - t_0) = \ln \frac{c^* - c_t}{c^* - c_0} \quad (1)$$

Dodatkowo stosowano korektę temperaturową w celu wyeliminowania wpływu zmian temperatury:

$$k_L a_{20^\circ\text{C}} = 1,024^{20-T} (k_L a)_T \quad (2)$$

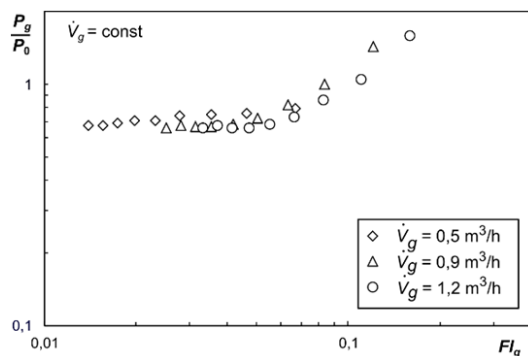
Wyniki i ich analiza

Moc mieszania cieczy jednorodnych w zakresie burzliwym była badana w pierwszym etapie. Stwierdzono, że liczba mocy dla mieszania burzliwego jest wielkością stałą i wynosi $Ne_m = 2,84 \pm 0,03$. Wartość ta jest około 30% mniejsza od liczby mocy dla mieszadła BT-6, dla którego $Ne_m = 3,78 \pm 0,09$ [Frankiewicz, 2017]. Otrzymane wyniki wskazują, że dla mieszadła BT-33 zmniejszeniu uległ współczynnik oporu, co przełożyło się na mniejsze zapotrzebowanie na moc mieszania. Dla mieszadła BT-6 przepływ występuje od strony wklęsłej łopatki. Z kolei dla mieszadła BT-3 dla 3 łopatek przepływ występuje od strony wypukłej.

Analiza mieszania układu gaz-ciecz została przeprowadzona w drugim etapie badań. Na rys. 3 zaprezentowano zależność względnej mocy mieszania P_g/P_0 w funkcji liczby przepływu gazu

$$Fl_g = \frac{\dot{V}_g}{nd^3}$$

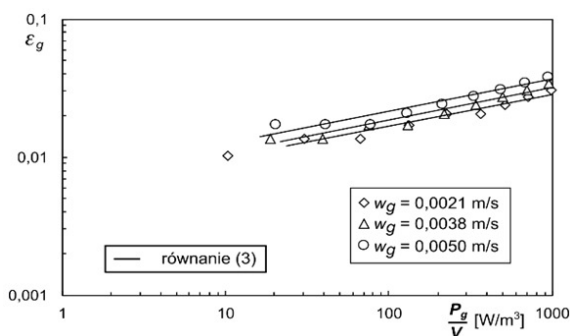
przy stałym wydatku gazu i zmiennej częstości obrotów mieszadła n . Wraz ze wzrostem częstości obrotów mieszadła względna moc mieszania maleje w zakresie liczby przepływu gazu zakresu $0,6 < Fl_g < 0,2$. Zaobserwowano, że dla małych częstości obrotów mieszadła ($Fl_g > 0,1$) moc względna jest większa od



Rys. 3. Zależność mocy względnej od liczby przepływu gazu dla mieszadła BT-33

jedności, co wskazuje na wzrost mocy mieszania w P_g/P_0 porównaniu do mocy mieszania dla układu jednorodnego. W zakresie $Fl_g \in (0,06; 0,1)$ moc względna maleje wraz ze wzrostem częstości obrotów mieszadła. Spowodowane jest to tworzeniem kawern gazowych po stronie wklęsłej łopatki skierowanej stroną wypukłą w kierunku przepływu. Dalsze zwiększanie częstości obrotów mieszadła powoduje niewielkie zmiany mocy mieszania. Najmniejsza wartość P_g/P_0 zmienia się w zależności od wydatku gazu i waha się między 0,67 a 0,7. W porównaniu z mieszadłem BT-6 przebieg zmian $P_g/P_0=f(Fl_g)$ jest podobny a minimalna wartość P_g/P_0 jest nieznacznie mniejsza [Frankiewicz, 2017].

Na rys. 4 przedstawiono zależność stopnia zatrzymania gazu ϵ_g od jednostkowej mocy mieszania P_g/V . Ilość zatrzymanego gazu w cieczy rośnie wraz z jednostkową mocą mieszania jak również z prędkością gazu liczoną na przekrój mieszalnika w_g .



Rys. 4. Zależność stopnia zatrzymania gazu od mocy jednostkowej dla mieszadła BT-33

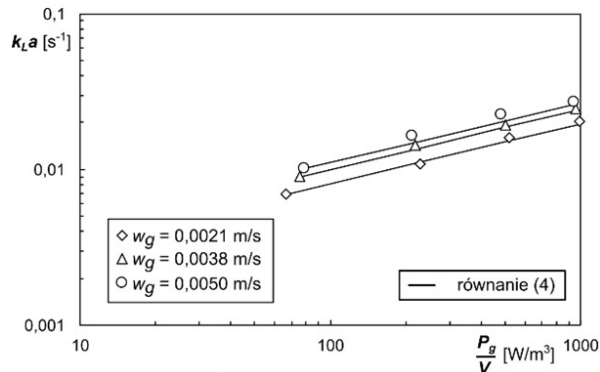
Uzyskane wartości stopnia zatrzymania gazu są większe w porównaniu do turbiny *Rushiona* [Kamieński, 2004] oraz mniejsze aniżeli dla mieszadła BT-6 [Zheng i in., 2018]. Przebieg zmian ϵ_g można opisać równaniem

$$\epsilon_g = 0,0236 \left(\frac{P_g}{V} \right)^{0,2617} w_g^{0,2591} \quad (3)$$

Kolejnym etapem badania mieszania układu gaz-ciecz w mieszalniku z mieszadłem BT-33 była analiza wymiany masy. Wymiana ta oceniana była poprzez pomiar objętościowego współczynnika wnikiwania masy $k_L a$. Na rysunku 5 zaprezentowano otrzymane zależności pomiędzy współczynnikiem $k_L a$ a jednostkową mocą mieszania P_g/V . Intensywność wymiany masy wzrasta wraz ze zwiększeniem jednostkowej mocy mieszania, jak również wraz z wzrostem wydatku gazu. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano równanie korelacyjne opisujące powyższe zmiany

$$k_L a = 0,0129 \left(\frac{P_g}{V} \right)^{0,3824} w_g^{0,3611} \quad (4)$$

Równ. (3) i (4) są słuszne w zakresie: $P_g/V \in (10; 1000) \text{ W/m}^3$; $w_g \in (0,0021; 0,005) \text{ m/s}$, $Re_m > 10000$.



Rys. 5. Zależność objętościowego współczynnika wnikiwania masy od jednostkowej mocy dla mieszadła BT-33

W równ. (4) wykładniki potęg wynosiły odpowiednio 0,3824 oraz 0,3611. Wykładnik przy mocy jednostkowej zbliżony jest do teoretycznej wartości 0,4. Należy jednak pamiętać, że wartość tego wykładnika może być większa ze względu na właściwości cieczy czy też intermitencję burzliwości [Martin i in., 2009]. Z kolei wykładnik przy w_g odbiega od typowej wartości wynoszącej 0,5. Jednakże analiza literaturowa wskazuje, że wartość tego wykładnika zmienia się w zakresie od 0,33 do 0,74 [Woźniowicz, 2017].

Podsumowanie i wnioski

W pracy zaprezentowano wyniki analizy mieszania układów gaz-ciecz w standardowym mieszalniku zaopatrzonego w zmodyfikowane mieszadło BT-33. Zastosowana modyfikacja ma za zadanie poprawienie wymiany masy podczas mieszania nieustalonego. Zaprezentowane wyniki stanowią pierwszy etap badań, które poświęcono podstawowym wielkościom takim jak moc mieszania, stopień zatrzymania gazu czy wymiana masy.

Zaproponowana modyfikacja mieszadła charakteryzuje się około 30% mniejszym zapotrzebowaniem na moc mieszania cieczy jednorodnych w porównaniu do mieszadła BT-6. W przypadku mieszania układów dwufazowych gaz-ciecz dla mieszadła BT-33 maksymalny spadek mocy wyniósł około 30% i był większy w porównaniu do mieszadła BT-6 i większy w porównaniu do turbiny *Rushiona*.

Analiza wymiany masy wskazuje, że jej poziom jest porównywalny z wymianą masy przy zastosowaniu mieszadła BT-6. Uzyskane wyniki wskazują, że zaproponowana modyfikacja mieszadła może przyczynić się do zwiększenia intensywności mieszania nieustalonego.

LITERATURA

- Frankiewicz S., (2018). *Mieszanie układów gaz-ciecz w mieszalniku z asymetrycznym mieszadłem BT-6 wykonującym ruch nieustalony*. Politechnika Poznańska, Poznań
- Frankiewicz S., (2017). *Projekt i badania podstawowe zmodyfikowanego mieszadła BT-6*. Politechnika Poznańska, Poznań
- Kamieński J., (2004). *Mieszanie układów wielofazowych*, WNT, Warszawa.
- Martin M., Montes F.J., Galan M.A., 2009. Physical explanation of the empirical coefficients of gas-liquid mass transfer equations, *Chemical Engineering Science*, 64, 410–425. DOI: 10.1016/j.ces.2008.10.035
- Myers K.J., Thomas A.J., Barker A., Reeder M.F. (1999). Performance of a gas dispersion impeller with vertically asymmetric blades, *Fluid Flow*, 77, 8, 728–730. DOI: 10.1205/026387699526872.
- Woźniowicz S., (2017). *Mieszanie nieustalone – analiza i wybrane zastosowania*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań
- Zheng Z., Sun D., Li J., Zhan X., Gao M., (2018). Improving oxygen transfer efficiency by developing a novel energy-saving impeller, *Chemical Engineering Research and Design*, 130, 199–207. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.12.021

Badania były finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej (03/32/DS-PB/0802).