

Szymon WOZIWODZKI, Lubomira BRONIARZ-PRESS, Radosław RADECKI

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

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

Mieszanie układów ciecz-gaz w mieszalniku z mieszadłem A310 wykonującym ruch nieustalony

Wstęp

Mieszanie układów dwufazowych ciecz-gaz zwykle jest prowadzone w mieszalnikach zaopatrzonych w przegrody oraz mieszadła wytwarzające przepływ promieniowy (np. turbina *Rushtona*, turbina *Smitha*, turbina *Bakera*, *Scaba* SRGT) lub mieszadła hydrofoilowe (np. *Chemineer* A315, A345, *Maxflo*W). Mieszaniu tego typu układów mogą towarzyszyć zjawiska niekorzystne takie, jak obecność bezpośrednio za przegradami obszarów o mniejszym stopniu wymieszania, formowanie kawern gazowych za łopatkami mieszadła, występowanie zjawiska zachłystywania mieszadła gazem czy nierównomierna dyspersja gazu dla mieszadeł o większych średnicach.

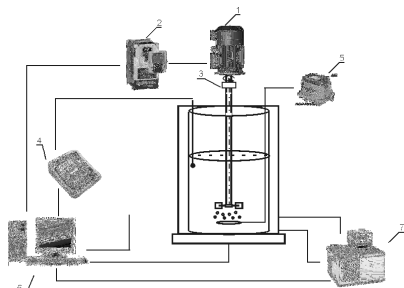
Biorąc pod uwagę powyższe zjawiska istnieje potrzeba rozwiązania tych problemów poprzez zaproponowanie nowego sposobu prowadzenia mieszania lub nowego typu mieszadła. Nowoczesne konstrukcje mieszadeł do wytwarzania układów ciecz-gaz posiadają specjalnie profilowane i asymetryczne łopatki mieszadła powodujące zmniejszenie obszarów obniżonego ciśnienia i zwiększenie mocy względnej, co korzystnie wpływa na wymianę masy.

Innym sposobem ograniczenia wymienionych wyżej problemów może być zastosowanie mieszania nieustalonego [Yoshida i in., 1996; 2005; Woziwodzki, 2011]. Mieszanie nieustalone z powodzeniem jest stosowane w aparatach kolumnowych, w których specjalnie półki wykonują ruch posuwisto-zwrotny intensyfikujący wymianę masy [Ni i in., 2003]. Zastosowanie oscylacji obrotów mieszadła może więc przyczynić się do intensyfikacji wymiany masy.

W pracy poddano analizie eksperymentalnej mieszanie układu dwufazowego ciecz-gaz za pomocą mieszadła A310 własnej konstrukcji. Mieszadło A310 obok mieszadła A315 należy do grupy mieszadeł uniwersalnych [SPX Flow Technology, 2014]. Skoncentrowano się na analizie mocy mieszania, stopnia zatrzymania gazu oraz wymianie masy.

Badania doświadczalne

Stanowisko badawcze (Rys. 1) wyposażone było w płaskodenny zbiornik bez przegród o średnicy $D = 0,29$ m, wykonany z przezroczystego polimetakrylanu metylu. Stosunek wysokości napełnienia cieczą do średnicy mieszalnika wynosił $H/D = 1$. Zastosowano mieszadło typu A310 (Rys. 2) własnej konstrukcji [Radecki, 2015].



Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1 – silnik, 2 – falownik, 3 – momentomierz, 4 – tlenomierz Elmetron CO-501, 5 – dmuchawa Hiblow HP-40, 6 – komputer, 7 – termostat

Media robocze stanowiły: woda destylowana (faza ciągła) i powietrze (faza rozpraszana).

Metodyka. Natężenia przepływu gazu zmieniano w zakresie od 0,5 do 1,7 m³/h. Badania prowadzono w temperaturze $T = 21$ °C. Powietrze wprowadzano do mieszalnika poprzez bełkotkę pierścieniową o średnicy $d_b = 0,085$ m, umieszczoną na dnie mieszalnika.

Zmiana częstości obrotów mieszadła w funkcji czasu miała cha-

rakter fali trójkątnej, dla której wartość maksymalna n_{max} i bezwzględna wartość minimalnej częstości obrotów n_{min} były takie same [Woziwodzki, 2011]. Zmiany te można opisać równaniem:

$$n = \frac{8}{\pi^2} n_{max} \left(\sin(2\pi ft) - \frac{1}{9} \sin(6\pi ft) + \frac{1}{25} \sin(10\pi ft) \right) \quad (1)$$

Dla mieszania nieustalonego zastosowano częstotliwości oscylacji: $f = 0,115 \pm 0,46$ Hz.



Rys. 2. Mieszadło A310

Współczynnik wymiany masy $k_L a$ wyznaczano metodą dynamiczną na podstawie pomiarów rozpuszczonego tlenu w fazie ciekłej za pomocą czujnika tlenowego, a stopień zatrzymywania gazu określano metodą objętościową na podstawie zmiany wysokości słupa cieczy w mieszalniku.

Wyniki i dyskusja

Moc mieszania

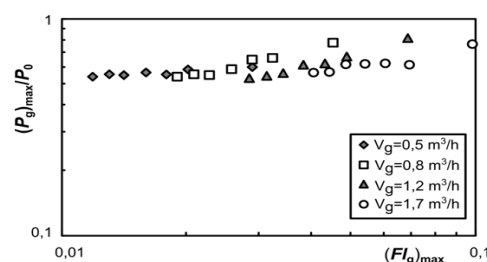
W pierwszym etapie badań analizowano zapotrzebowanie na moc mieszania. Dla układów dwufazowych ciecz-gaz zwykle operuje się pojęciem względnej mocy mieszania. W przypadku mieszania nieustalonego korzysta się ze średniej mocy względnej lub maksymalnej mocy względnej $(P_g)_{max}/P_0$.

W analizowanym zakresie częstotliwości oscylacji, dla wartości liczb *Keulegana-Carpentera*

$$KC = n_{max} f \quad (2)$$

powyżej 15, największy wpływ ma siła oporu. Moc mieszania nieustalonego zmienia się w czasie, dlatego maksymalna względna moc mieszania $(P_g)_{max}/P_0$ odpowiada największemu oporowi oraz pozwala ocenić ilość gazu zatrzymwanego bezpośrednio za łopatkami mieszadła.

Na rys. 3 przedstawiono zależność maksymalnej mocy względnej $(P_g)_{max}/P_0$ od maksymalnej liczby przepływu gazu $(F_{lg})_{max}$. W zakresie $0,025 < (F_{lg})_{max} < 0,1$ maksymalna moc względna maleje. Wskazuje to na zwiększanie się kawern gazowych za łopatkami mieszadła. Obserwacje formacji gazowych za łopatkami mieszadła A310 wskazuje, że przy maksymalnej częstości obrotów n_{max} za wszystkimi łopatkami wytwarzają się duże kawerny przylegające, które zajmują połowę powierzchni łopatki mieszadła. Najmniejsza wartość $(P_g)_{max}/P_0$ wynosiła około $(P_g)_{max}/P_0 = 0,55$.



Rys. 3. Zależność maksymalnej mocy względnej $(P_g)_{max}/P_0$ od maksymalnej liczby przepływu gazu $(F_{lg})_{max}$

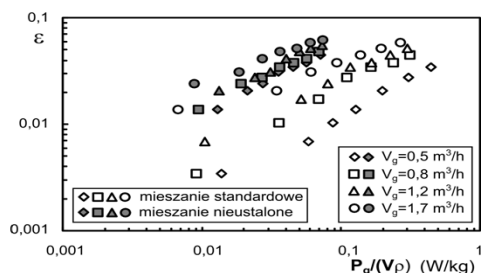
Osiągnięte wartości mocy względnej są większe o 20 % w stosunku do mieszania standardowego oraz około 25 % w stosunku do mieszadła PBT [Wozniowiczki i Broniarz-Press, 2014]. Wynika to z mniejszej liczby kawern, trzech zamiast sześciu oraz z niestabilności kawern. Częstość obrotów mieszadła zmienia się, co powoduje, że kawerny też zmieniają się. Przy wartościach maksymalnej liczby przepływu gazu $(Fl_g)_{max} > 0,02$ generują się kawerny przylegające, a maksymalna względna moc mieszania maleje. Poniżej $(Fl_g)_{max} = 0,02$ (częstość obrotów mieszadła rośnie) powstają duże kawerny, a maksymalna moc względna stabilizuje się.

Stopień zatrzymania gazu

W drugim etapie badań analizowano stopień zatrzymania gazu w cieczy (Rys. 4). Stopień zatrzymania gazu wzrasta wraz ze wzrostem prędkości przepływu gazu oraz wzrostem współczynnika rozpraszania energii liczonej na jednostkę masy. Zmiany powyższe można opisać równaniem

$$\varepsilon = 1,44 \left(\frac{P_g}{V\rho} \right)^{0,54} w_g^{0,34} \quad (3)$$

Jest ono słuszne w zakresie: $P_g/V\rho \in (0,01; 0,1)$ W/kg oraz prędkości przepływu gazu $w_g \in (0,002; 0,007)$ m/s. Współczynnik zmienności losowej CV równania wynosi 7%.

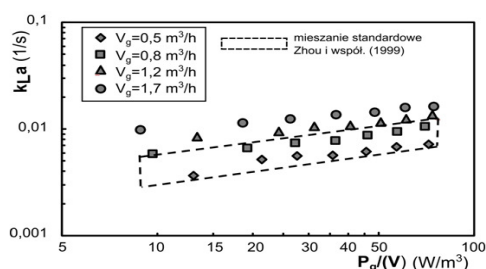


Rys. 4. Zależność stopnia zatrzymania gazu ε od współczynnika rozpraszania energii

Dla wszystkich prędkości przepływu gazu stopień zatrzymania gazu podczas mieszania niestandardowego był większy w porównaniu do mieszania standardowego (Rys. 4). Różnice między oba sposobami mieszania maleją wraz ze wzrostem natężenia przepływu gazu. Przyczyną tego stanu rzeczy jest większe zapotrzebowanie na moc mieszania niestandardowego. Liczba mocy dla mieszadła A310 pompującego ciecz do góry i mieszania standardowego cieczy jednorodnej wynosi $Ne = 0,72$, podczas gdy dla mieszania niestandardowego $Ne = 1,06$ [Radecki, 2015]. Moc mieszania niestandardowego o przebiegu trójkątnym jest średnio około 50 % większa w porównaniu do mieszania standardowego [Wozniowiczki, 2011].

Objętościowy współczynnik wnikania masy

W kolejnym etapie badań przeprowadzono analizę objętościowego współczynnika wnikania masy $k_L a$. Współczynnik ten określano metodą dynamiczną poprzez pomiar ilości tlenu rozpuszczonego. Na rys. 5 przedstawiono zależność objętościowego współczynnika wnikania masy $k_L a$ od współczynnika rozpraszania energii P_g/V .



Rys. 5. Zależność objętościowego współczynnika wnikania masy od współczynnika rozpraszania energii

Podobnie, jak w przypadku mieszania standardowego, $k_L a$ dla mieszania niestandardowego wzrasta ze wzrostem współczynnika rozpraszania energii liczonego na jednostkę objętości oraz ze wzrostem prędkości przepływu gazu w_g . Zależność między tymi parametrami można opisać przy pomocy równania:

$$k_L a = 14,8 \cdot 10^{-2} \left(\frac{P_g}{V} \right)^{0,27} w_g^{0,68} \quad (4)$$

Równ. (3) jest słuszne w zakresie: $P_g/V \in (9; 75)$ W/m³ oraz prędkości przepływu gazu $w_g \in (0,002; 0,007)$ m/s. Współczynnik zmienności losowej CV wynosi 4 %. Na rys. 5 pokazano również porównanie otrzymanych wyników z wynikami Zhou i in. [1999] dla mieszadła A310 i mieszania standardowego w mieszalniku z przegrodami. Uzyskane wyniki wskazują, że podczas mieszania niestandardowego wymiana masy zachodzi z większą intensywnością w porównaniu do mieszania standardowego. Różnica w intensywności wymiany masy wzrasta wraz ze wzrostem prędkości przepływu gazu w_g , jednakże maleje wraz ze wzrostem współczynnika rozpraszania energii. Dla $P_g/V = 9$ W/m³ wartość $k_L a$ dla mieszania niestandardowego jest około 1,85 razy większa podczas, gdy dla $P_g/V = 74$ W/m³ o około 33 %. Uwidacznia się to mniejszą wartością wykładnika potęgi w porównaniu do równania Zhou i in. Dla mieszania niestandardowego większy wpływ na wartość $k_L a$ wykazuje prędkość przepływu gazu w_g , z tego względu zalecane jest stosowanie mieszadła A310 przy większych prędkościach przepływu gazu $w_g > 0,005$ m/s.

Wnioski

Analizowano mieszanie układu dwufazowego woda-powietrze pod względem zapotrzebowania na moc mieszania, stopnia zatrzymania gazu oraz objętościowego współczynnika wnikania masy.

Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie mieszania niestandardowego powoduje wzrost wymiany masy. Jest to szczególnie wyraźne dla prędkości gazu $w_g > 0,005$ m/s oraz mniejszych wartości współczynnika rozpraszania energii. Większa intensywność wymiany masy wynika z większego zapotrzebowania na moc mieszania niestandardowego oraz stopnia zatrzymania gazu.

LITERATURA

- Ni X., Mackley M.R., Harvey A.P., Stonestreet P., Baird M.H.I., Rama Rao N.V., 2003. Mixing through oscillations and pulsations – a guide to achieving process enhancements in the chemical and process industries. *Chem. Eng. Res. Des.*, **81**, 373–383. DOI: 10.1205/02638760360596928
- Radecki R., 2015. *Analiza mieszania ciecz-gaz w mieszalniku z zmodyfikowanym mieszadłem A310*. Praca dyplomowa, Pol. Poznańska, Poznań
- SPX Flow Technology, 2014. *When Mixing Matters. Mixing Technology from Lightnin*. B-956 (07-2015): <http://www.spx.com/en/lightnin/support/product-literature/>
- Yoshida M., Kitamura A., Yamagiwa K., Ohkawa A., 1996. Gas hold-up and volumetric oxygen transfer coefficient in an aerated agitated vessel without baffles having forward-reverse rotating impellers. *Can. J. Chem. Eng.*, **74**, 31-39. DOI: 10.1002/jctb.498
- Yoshida M., Akiho M., Nonaka H., Yamagiwa K., Ohkawa A., Tezura S., 2005. Mixing and mass transfer characteristics of an unbaffled aerated agitation vessel with unsteadily forward-reverse rotating multiple impellers. *Lat. Am. App. Res.*, **35**, 37-42.
- Wozniowiczki, S., 2011. Unsteady mixing characteristics in a vessel with forward-reverse rotating impeller. *Chem. Eng. Technol.* **34**, 767-774. DOI: 10.1002/ceat.201000455
- Wozniowiczki, S., Broniarz-Press L., 2014. *Mass transfer intensification in a vessel with unsteadily rotating impeller*. 21st Int. Congress of Chem. Proc. Eng. CHISA, Prague, Czech Republic, 23-27 July
- Zhou Y., Bandopadhyay P.C., Wu J., 1999. Measurement of gas-liquid mass transfer in an aerated vessel – a comparison between different impellers. 3rd Int. Symp. on Mixing in Industrial Processes, Osaka, Japan, September 19-22, 389-396

Badania były finansowane ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego 03/32/DSPB/0502