

Lubomira BRONIARZ-PRESS, Waldemar SZAFERSKI, Daniela DULSKA

e-mail: lubomira.broniarz-press@put.poznan.pl

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

Zapotrzebowanie energii dla różnych układów dwumieszadłowych na wspólnym wale

Wstęp

Mieszanie mechaniczne układów ciec-z-gaz stosuje się wtedy, gdy między fazą rozpraszającą a rozpraszaną zachodzi proces wymiany masy. Wykorzystuje się je przede wszystkim w procesach absorpcji gazów trudno rozpuszczalnych, i to zarówno absorpcji czysto fizycznej, jak i takiej, której towarzyszy reakcja chemiczna.

Stopień zatrzymania fazy gazowej w mieszaninie lub wielkość powierzchni międzyfazowej, zależą od szeregu parametrów fizycznych i kinetycznych prowadzenia procesu. Istotny wpływ ma rodzaj cyrkulacji wtórnej, która w zasadniczy sposób wpływa na warunki rozpraszania fazy gazowej. W procesach wymiany masy w dwufazowych układach rozproszonych ciec-z-gaz główny opór przenikania masy zlokalizowany jest po stronie cieczy. Szybkość transportu z fazy gazowej do otaczającej cieczy zależy w dużym stopniu od warunków hydrodynamicznych panujących w aparacie. Szczególnie istotną rolę odgrywają tutaj wymiary pęcherzy gazowych, prędkość ruchu oraz czas ich przebywania w cieczy. Mechaniczne mieszanie takiego układu prowadzi do intensyfikacji przebiegających w nim procesów. Warunki hydrodynamiczne wytworzone w mieszanym układzie dwufazowym zdeterminowane są przede wszystkim przez parametry konstrukcyjne mieszalnika, fizyczne płynów i kinetyczne prowadzenia procesów. Każde mieszadło wzbudza w aparacie pierwotny strumień cieczy, tzw. cyrkulację pierwotną, która generuje cyrkulację w całej objętości aparatu wzdłuż pętli cyrkulacyjnych (cyrkulacja wtórna). W wyniku badań rozkładu energii w strumieniach cieczy w typowych rozwiązaniach konstrukcyjnych aparatów z mieszadłami mechanicznymi wykazano, że energia cyrkulacji wtórnej, decydującej o efekcie mieszania, jest znacznie mniejsza niż pierwotnej [1–7].

Wyniki badań

Celem niniejszej pracy była analiza nakładów energetycznych, ilości zatrzymywanego gazu w mieszaninie oraz ocena efektywności pracy dwóch mieszadeł na wspólnym wale podczas wytwarzania układu ciec-z-gaz z wykorzystaniem różnych typów mieszadeł turbinowych. Badania przeprowadzono stosując wodny roztwór wysokocząsteczkowego poliakrylamidu (o masie molowej $4,4 \cdot 10^6$ kg/kmol) o stężeniu polimeru 1000 ppm. Badania doświadczalne prowadzono na stanowisku pomiarowym, którego głównym elementem był zbiornik z polimetakrylanu metylu o średnicy zewnętrznej 0,300 m, wyposażony w cztery płaskie przegrody. Schemat stanowiska opisano szczegółowo w pracach [8, 9]. W badaniach wykorzystano trzy typy mieszadeł: standardowe mieszadło turbinowe *Rushtona* (RT), mieszadło turbinowe tarczowe *Smitha* (ST) i mieszadło turbinowe z łopatkami pochyłonymi pod kątem 45° (PBT) oraz ich następujące kombinacje: RT-RT, RT-ST, RT-PBT, ST-ST, ST-RT, ST-PBT, PBT-PBT, PBT-RT, PBT-ST. Układ napowietrzający zakończono dyfuzorem membranowym-dyskowym typu GJ HD 270. Dyfuzor ten służy do drobnopęcherzykowego napowietrzania wody i ścieków. Wykonany jest z polipropylenu z dodatkiem włókna szklanego, natomiast membrana z monomeru etylenowo-propylenowo-dienowego. Dyfuzory te nie ulegają korozji, nie zatykają się i mogą być stosowane w procesach ciągłych i przerywanych. Zastosowanie dyfuzorów oraz odpowiednio zaprojektowany system gwarantuje doskonałe efekty napowietrzania przy jednoczesnym obniżeniu

kosztów eksploatacyjnych. Dyfuzory drobnopęcherzykowe wytwarzają pęcherzyki powietrza o średnicy poniżej 2,5 mm.

Pomiary wykonywano przy stałych częstościach obrotowych mieszadeł w zakresie od 5 do 30 1/s i wzrastającym objętościowym natężeniu przepływu gazu w zakresie od 0,069 do 1,111 [dm³/s].

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów przeanalizowano zależność stosunku mocy do objętości mieszanej cieczy od liczby *Reynoldsa*. Dla badanego nienewtonowskiego roztworu polimeru wykorzystano liczbę *Reynoldsa* zaproponowaną przez *Gluzę* i *Pawłuszenko* [10]:

$$Re_m = (4\pi)^{1-n'} \frac{n'^2 d^2 \rho}{K} \quad (1)$$

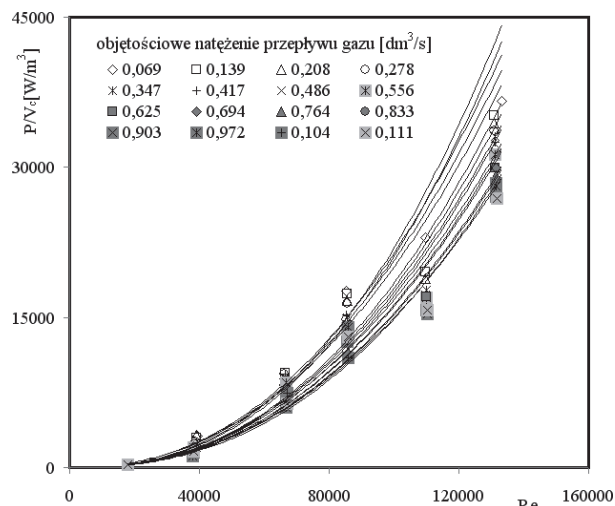
Wartość jednostkowego zużycia energii P/V_c zależy od wielkości objętościowego natężenia przepływu powietrza. Porównując prace mieszadeł przy stałym objętościowym natężeniu przepływu gazu można zauważyć wpływ częstości obrotów mieszadła na jednostkową moc mieszania. Na podstawie analizy napowietrzania roztworu płynu nienewtonowskiego dla badanych układów dwumieszadłowych wyznaczono zależność o postaci:

$$\frac{P}{V_c} = A \dot{V}_g^B Re^C \quad (2)$$

Współczynniki zależności (2) przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Współczynniki równania (2)

Mieszadło		Wartości		
górne	dolne	A	B	C
ST	PBT	$3,48 \cdot 10^{-13}$	0,19	3,24
RT	PBT	$9,74 \cdot 10^{-8}$	0,51	2,45
PBT	PBT	$1,64 \cdot 10^{-7}$	1,12	2,08
PBT	ST	$8,86 \cdot 10^{-9}$	0,16	2,44
PBT	RT	$3,28 \cdot 10^{-10}$	0,16	2,87
RT	ST	$3,17 \cdot 10^{-8}$	0,47	2,34
ST	RT	$1,06 \cdot 10^{-14}$	0,12	3,42
RT	RT	$3,49 \cdot 10^{-10}$	0,32	2,63
ST	ST	$2,59 \cdot 10^{-10}$	0,41	2,64



Rys. 1. Wpływ objętościowego natężenia przepływu gazu na jednostkową moc mieszania dla układu mieszadeł turbinowe *Rushtona* – turbinowe tarczowe *Smitha*

W praktyce przemysłowej do projektowania aparatów zaopatrzonych w dystrybutory gazu istotne jest, by zapewniały jak największą powierzchnię rozwinięcia międzyfazowego, czyli jak największą wartość współczynnika zatrzymania gazu, przy jednocześnie jak najniższym zużyciu energii. Ilość gazu zatrzymywanego w cieczy podczas prowadzenia procesu okazała się funkcją objętościowego natężenia przepływu gazu oraz częstości obrotów pary mieszadeł na wspólnym wale, co opisuje następujące równanie korelacyjne:

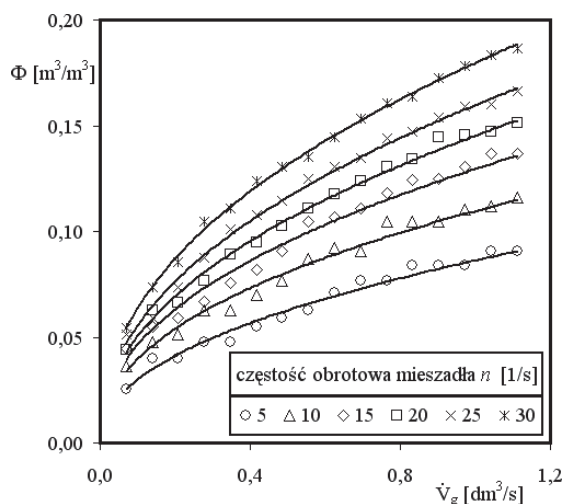
$$\Phi = An^B \dot{V}_g^C \quad (3)$$

Odpowiednie wartości współczynników i wykładników równania (3) zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Współczynniki równania (3)

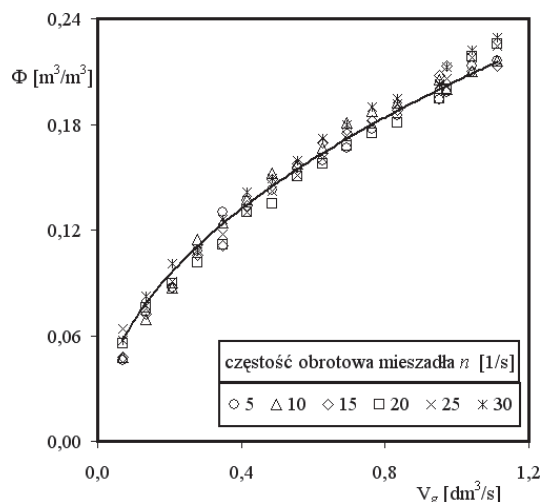
Mieszadło		Współczynnik		
górne	dolne	A	B	C
ST	PBT	0,206	0	0,52
RT	PBT	0,173	0	0,45
PBT	PBT	0,0443	0,40	0,45
PBT	ST	0,161	0	0,56
PBT	RT	0,185	0	0,51
RT	ST	0,0481	0,39	0,43
ST	RT	0,0973	0,18	0,41
RT	RT	0,0595	0,32	0,36
ST	ST	0,136	0,11	0,37

Na podstawie analizy ilości gazu zatrzymywanego w cieczy od objętościowego natężenia przepływu gazu wykazano, że dla zestawów mieszadeł, w których mieszadłem górnym lub dolnym było turbinowe z łopatkami pochylonymi pod kątem 45°, nie obserwuje się wpływu częstości obrotów mieszadła (Rys. 3). W przypadku pozostałej grupy mieszadeł częstość obrotowa mieszadła ma duże znaczenie i jest istotnym elementem w momencie projektowania mieszalnika z napowietrzaniem dyfuzorami membranowymi (Rys. 2).



Rys. 2. Przykładowy obraz wpływu częstości obrotowej mieszadła na ilość gazu zatrzymywanego w cieczy dla układu dwóch mieszadeł turbinowych z łopatkami pochylonymi pod kątem 45°

Podczas prowadzenia badań doświadczalnych zaobserwowano, że umieszczenie mieszadła turbinowych z łopatkami pochylonymi pod kątem 45° jako dolne powodowało lepszą stabilizację układu i zmniejszenie drgań przenoszonych się na cały mieszalnik. Zastosowanie górnego mieszadła turbinowego Rushtona oraz turbinowo tarczowego Smitha powodowało efektywniejsze zasysanie powietrza z zewnątrz.



Rys. 3. Przykładowy obraz braku wpływu częstości obrotowej mieszadła na ilość gazu zatrzymywanego w cieczy dla układu mieszadeł turbinowo tarczowych Smitha – turbinowe z łopatkami pochylonymi pod kątem 45°

Badania doświadczalne wykazały, że wszystkie zestawy mieszadeł charakteryzują się podobną ilością gazu zatrzymywanego w cieczy przy porównywalnym jednostkowym zużyciu energii i stałym objętościowym natężeniu przepływu gazu w aparacie.

Wnioski

Stwierdzono istotny wpływ objętościowego natężenia przepływu gazu na współczynnik zatrzymywania gazu w cieczy. Przy ustalonej wartości częstości obrotów mieszadła współczynnik zatrzymywania gazu w cieczy wzrasta wraz ze wzrostem objętościowego natężenia przepływu powietrza w badanym zakresie.

Wartość jednostkowej mocy mieszania zależy od wielkości objętościowego natężenia przepływu powietrza oraz od liczby *Reynoldsa*. Po przeanalizowaniu zależności jednostkowej mocy mieszania od liczby *Reynoldsa* dla zmiennego natężenia przepływu gazu w zakresie od 0,069 do 1,111 [dm³·s⁻¹] okazało się, że współczynnik zatrzymywania gazu w cieczy jest zależny od liczby *Reynoldsa*. Przy stałym natężeniu przepływu gazu wraz ze wzrostem częstości obrotów mieszadła, a tym samym liczby *Reynoldsa*, wzrasta współczynnik zatrzymywania gazu w cieczy.

Wykazano, że większą wartość współczynnika zatrzymywania gazu otrzymuje się stosując układy z wykorzystaniem mieszadeł standardowych turbinowych Rushtona (RT) oraz mieszadeł turbinowych tarczowych Smitha (ST). Jednocześnie układy te charakteryzowało najmniej zużycie energii.

LITERATURA

- [1] S. Nagata: Mixing. Principles and Applications. Kodansha Ltd., Tokyo 1975.
- [2] J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych. WNT, Warszawa 2004.
- [3] P.M. Doran: Bioprocess Engineering Principles. Academic Press, London 1995.
- [4] F. Stręk: Mieszanie i mieszalniki. WNT, Warszawa 1981.
- [5] J. Karcz: Inż. Ap. Chem., **41**, nr 1, 3 (2002).
- [6] H. Brauer: Ein- und Mehrphasen Strömungen. Biotechnology, Vol. 2, Weinheim 1985.
- [7] R. Pawełczyk: Inż. Chem. Proces., 8, nr 3, 599 (1988).
- [8] L. Broniarz-Press, W. Szaferski, D. Dulcka: Inż. Ap. Chem., **48**, nr 1, 90 (2009).
- [9] L. Broniarz-Press, W. Szaferski: Chem. Proc. Eng., **29**, 61 (2008).
- [10] M.D. Gluz, I.S. Pawluszenko: Ż. Prikl. Chimi **40**, 2475 (1967).