

Anna KIELBUS-RAPAŁA

e-mail: kielbus@zut.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

Analiza hydrodynamiki układu ciecz-gaz w zbiorniku z dwoma mieszadłami

Wstęp

Prowadzenie dowolnego procesu, np. wymiany masy, w mieszanym mechanicznie układzie ciecz-gaz, wymaga zapewnienia odpowiednich do jego przebiegu warunków, przede wszystkim dobrego rozproszenia gazu w cieczy. Dotychczasowe badania pokazują, że zwiększenie intensywności mieszania zapewnia zastosowanie kilku mieszadeł na wspólnym wale. Dlatego aparaty z więcej niż jednym mieszadłem są stosowane coraz częściej [1, 2, 4], m.in. w przemyśle kosmetycznym, spożywczym, czy biotechnologii.

W przypadku zbiornika z dwoma mieszadłami, dobór odpowiedniej konfiguracji mieszadeł, a zwłaszcza górnego, którego zadaniem jest rozprowadzenie pęcherzy gazowych w objętości cieczy, jest kluczowym problemem przy projektowaniu takiego aparatu do prowadzenia procesów w układzie ciecz-gaz. Intensywność dyspergowania gazu przez dane mieszadło, można określić znając wartości wielkości hydrodynamicznych charakterystycznych dla układu ciecz-gaz m.in. udziału objętościowego gazu zatrzymanego w cieczy oraz średniego czasu przebywania pęcherzyków gazu w cieczy.

Celem prezentowanej pracy była analiza eksperymentalna hydrodynamiki układu ciecz-gaz w smukłym aparacie, wyposażonym w dwa mieszadła na wspólnym wale. Analizę przeprowadzono w oparciu o badania udziału gazu zatrzymanego w cieczy.

Część doświadczalna

Pomiary wykonano w smukłym, przezroczystym mieszalniku o średnicy wewnętrznej $D = 0,288$ m, wypełnionym cieczą do wysokości $H = 2D$. Zbiornik miał płaskie dno i cztery standardowe przegrody. Faza gazowa doprowadzana była do mieszalnika za pomocą dystrybutora w kształcie pierścienia o średnicy $d_d = 0,7d$, umieszczonego w odległości $e = 0,5d$ od dna zbiornika. W badaniach zastosowano trzy typy mieszadeł szybkoobrotowych o średnicy $d = 0,33D$: mieszadło turbinowe *Rushtona*, A 315 oraz HE 3, mocowanych po dwa na wale. W obu konfiguracjach, jako dolne mieszadło pracowało mieszadło turbinowe *Rushtona*, natomiast w pozycji górnej montowano mieszadła generujące różne profile przepływu płynu w mieszalniku: A 315 lub HE 3. Mieszadło A 315 wytwarza promieniowo-osiową cyrkulację cieczy, natomiast mieszadło HE 3 – cyrkulację osiową. Oba mieszadła charakteryzuje niska wartość mocy mieszania.

Do analizy doświadczalnej wybrano układy różniące się zdolnością do koalescencji pęcherzyków gazu w cieczy. Fazą ciągłą były: woda destylowana oraz elektrolit wodny roztwór chlorku sodu o dwóch stężeniach: $0,4 \text{ kmol/m}^3$ oraz $0,8 \text{ kmol/m}^3$. Fazą gazową – powietrze. Zdolność badanych układów do koalescencji, czyli łączenia się ze sobą pęcherzyków gazu w cieczy, opisano przy użyciu parametru Y , stosowanego przez *Machona* i wsp. [3], opisanego równaniem

$$Y = 2 - \exp(-\psi^+) \quad (1)$$

gdzie $\psi^+ = \psi/\psi_{kr}$. Zmienna ψ określająca gradient napięcia powierzchniowego, została zdefiniowana jako

$$\psi = \Delta\sigma \frac{RT}{2} = c \left(\frac{d\sigma}{dc} \right)^2 \phi \quad (2)$$

a wielkość ϕ opisuje równanie

$$\phi = \frac{1}{1 + \frac{d \ln f}{d \ln c}} \quad (3)$$

Pomiary wykonano przy dobrym rozproszeniu pęcherzyków gazu w objętości cieczy, w zakresie burzliwego przepływu płynu w mieszalniku. Pomiary przeprowadzono przy kilkunastu (13–14) różnych wartościach częstości obrotów mieszadła z zakresu $n \in <4,17; 15 \text{ 1/s}>$.

Dolną wartość częstości obrotów mieszadła ustalano wizualnie, oceniając stopień rozproszenia pęcherzy gazowych w cieczy, przy danym natężeniu przepływu gazu. Jako najmniejszą, przyjmowano wartość n , dla której obserwowano w zbiorniku stan rozproszenia gazu z recyrkulacją (pęcherzyki gazu są rozprowadzone w całej objętości cieczy i recyrkulują pod płaszczyznę mieszadła). Górna wartość z zakresu n była największą, przy której nie występowało napowietrzanie powierzchniowe. Badania wykonano dla ośmiu wartości objętościowego natężenia przepływu gazu zmienianego w zakresie $V_G \in <1,11 \cdot 10^{-4}; 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}>$ (co odpowiada umownej liniowej prędkości gazu w zakresie $w_{og} \in <1,71 \cdot 10^{-3}; 7,68 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}>$).

Objętościowy udział gazu zatrzymanego w cieczy φ zdefiniowany równaniem

$$\varphi = \frac{V_G}{V_L - V_G} = \frac{H_{G-L} - H_L}{H_{G-L}} \quad (4)$$

określono na podstawie dziesięciokrotnego odczytu wysokości słupa mieszaniny ciecz-gaz H_{G-L} oraz wysokości słupa cieczy H_L z podziałki umieszczonej na ścianie zbiornika, w połowie odległości między sąsiednimi przegrodami. Na podstawie otrzymanych wartości udziału gazu φ obliczono średni czas przebywania pęcherzyków gazu w cieczy t_R zgodnie z definicją

$$t_R = \frac{V_L \varphi}{V_G (1 - \varphi)} \quad (5)$$

gdzie V_L – objętość cieczy, m^3 , V_G – objętościowe natężenie przepływu gazu, m^3/s .

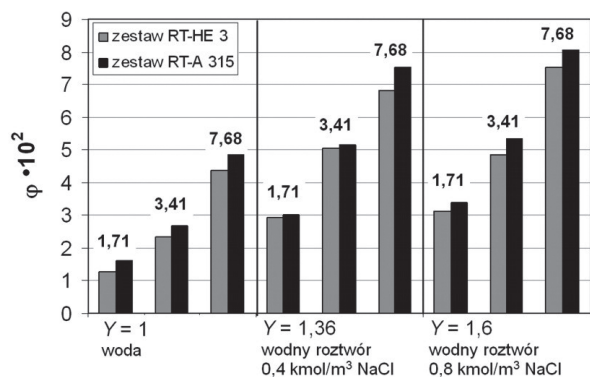
Wyniki badań

Na podstawie otrzymanych wyników badań możliwe było określenie wpływu rodzaju fazy ciekłej oraz typu i geometrii zastosowanego, jako górne mieszadła (generowanego przez mieszadło profilu przepływu płynu), na warunki wytwarzania układu ciecz-gaz oraz wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy i średniego czasu przebywania pęcherzyków gazu w układzie.

Z analizy danych eksperymentalnych wynika, że w zakresie przeprowadzonych pomiarów typ górnego mieszadła istotnie wpływa na wielkości φ oraz t_R zarówno w układzie wykazującym zdolność do koalescencji, jak i w układach nie wykazujących tej zdolności. Generalnie, wyższe wartości objętościowego udziału gazu φ zatrzymanego w cieczy we wszystkich badanych układach dwufazowych, uzyskano stosując zestaw mieszadeł z górnym mieszadłem A 315. Mieszadło wytwarzające promieniowo-osiowy strumień przepływu płynu pozwoliło zapewnić korzystniejsze warunki do wytwarzania układu ciecz-gaz (lepsze rozprowadzenie pęcherzyków gazu w objętości płynu), od generującego typowo osiowy przepływ mieszadła HE 3.

Wpływ typu górnego mieszadła na wartość udziału gazu φ zatrzymanego w różnych układach dwufazowych przedstawiono na rys. 1. Porównano na nim wartości φ otrzymane w trzech różnych układach ciecz-gaz, dla trzech wybranych wartości umownej liniowej prędkości gazu w_{og} . Największe różnice w wartościach udziału gazu φ dla dwóch testowanych zestawów mieszadeł zaobserwowano w układzie wykazującym zdolność do koalescencji: woda destylowana – powietrze ($Y = 1$). W układzie tym, przy niskiej wartości umownej liniowej prędkości gazu (równiej $1,71 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$), wyższe o ok. 30% wartości φ otrzymano dla zestawu z górnym mieszadłem A 315. Ze wzrostem w_{og} różnice w wartościach udziału gazu zatrzymanego w cieczy uzyskanych dla obu zestawów mieszadeł zmniejszały się do 15% przy najwyższej wartości w_{og} .

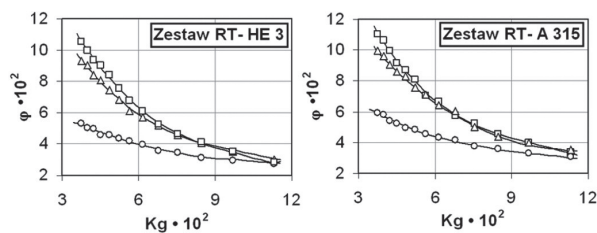
W układach nie wykazujących zdolności do koalescencji, wyższe wartości φ otrzymano również przy zastosowaniu zestawu mieszadeł RT-A 315 (średnio o ok. 10%). Jednak przy niższych wartościach liniowej prędkości gazu w_{og} , różnice między wartościami udziału gazu



Rys. 1. Zależność $\phi = f(Y)$ dla dwóch konfiguracji mieszadeł; różne wartości umownej liniowej prędkości gazu $w_{og} \cdot 10^{-3}$ m/s; różne układy, $n = 10,83$ 1/s

zatrzymanego w układzie, w którym fazę ciągłą stanowił elektrolit o niższym stężeniu równym $0,4 \text{ kmol/m}^3$ ($Y = 1,36$), otrzymanymi dla obu zestawów mieszadeł, były niewielkie (do 5%).

Przeprowadzone badania wykazały, że udział objętościowy gazu silnie zależy od zdolności układu do koalescencji pęcherzyków gazu w cieczy (od rodzaju fazy ciągłej). Wartość ϕ wzrasta, gdy zmniejsza się zdolność układu do koalescencji, zależność ta nie przebiega jednak liniowo. Wpływ rodzaju cieczy na wartość zatrzymanego w układzie gazu przedstawiono na rys. 2.

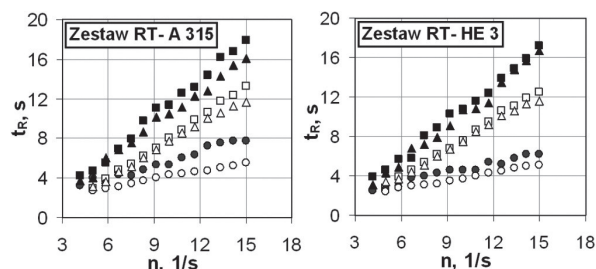


Rys. 2. Porównanie zależności $\phi = f(Kg)$ dla dwóch zestawów mieszadeł; różne układy ciec-z-gaz: (○) $Y = 1$, (△) $Y = 1,36$, (□) $Y = 1,6$; $w_{og} = \text{const} = 7,68 \cdot 10^{-3}$ m/s

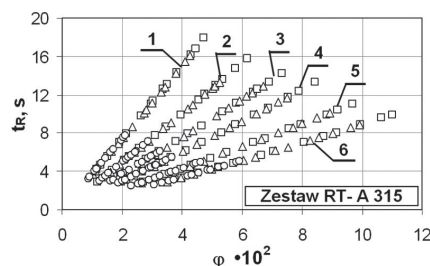
Porównując wartości ϕ otrzymane przy stałej liniowej prędkości gazu w_{og} , w różnych układach ciec-z-gaz można stwierdzić, że znacznie wyższe wartości charakteryzują układy nie wykazujące zdolności do koalescencji, w porównaniu do układu z wodą destylowaną. Przykładowo, przy stałej liczbie przepływu gazu $Kg = 4,84 \cdot 10^{-2}$, dla zestawu RT-A 315 wartość ϕ była większa o 60% w układzie, gdzie $Y = 1,36$, zaś o 70% w układzie gdzie $Y = 1,6$, w porównaniu do układu $Y = 1$. Zwiększenie stężenia elektrolitu powodowało niewielki wzrost wartości udziału gazu. Różnice w wartościach ϕ otrzymanych w trzech badanych układach wzrastały ze zmniejszaniem liczby Kg (ze wzrostem częstości obrotów mieszadła n).

Kolejnym parametrem, który wzięto pod uwagę analizując hydrodynamikę badanych układów, był średni czas przebywania pęcherzyków gazu w cieczy t_R . Wpływ zdolności układu do koalescencji na czas przebywania ilustruje rys. 3, na którym porównano wartości t_R uzyskane w trzech układach ciec-z-gaz, mieszanych zestawem mieszadeł RT-A 315 (Rys. 3a) oraz RT-HE 3 (Rys. 3b), przy dwóch różnych wartościach liniowej prędkości gazu w_{og} (punkty pełne lub puste). Układ wykazujący zdolność do koalescencji ($Y = 1$) charakteryzował znacznie krótszy czas przebywania t_R , w porównaniu do wartości otrzymanych w układach nie wykazujących tej zdolności. Dla największych n wartości czas t_R był ponad dwa razy dłuższy w układzie ($Y = 1,36$) dla obu zestawów mieszadeł, a w układzie, gdzie $Y = 1,6$ blisko trzykrotnie dłuższy dla zestawu RT-HE 3 (i dużych wartości w_{og}), w porównaniu z układem wykazującym zdolność do koalescencji.

Zależności $t_R = f(\phi)$ w analizowanych układach przyjmują postać liniową (Rys. 4). Dla danej (stałej) wartości w_{og} , punkty odpowiadające poszczególnym układom ciec-z-gaz (koła: $Y = 1$; trójkąty: $Y = 1,36$; kwadraty: $Y = 1,6$) układają się na wspólnej prostej. Średni czas przebywania wzrasta ze wzrostem ϕ , natomiast maleje ze wzrostem liniowej prędkości gazu we wszystkich badanych układach.



Rys. 3. Porównanie zależności $t_R = f(n)$ dla dwóch zestawów mieszadeł; różne układy ciec-z-gaz: (○●) $Y = 1$, (△▲) $Y = 1,36$, (□■) $Y = 1,6$; różne wartości w_{og} ; punkty pełne: $w_{og} = 1,71 \cdot 10^{-3}$ m/s, punkty puste: $w_{og} = 4,26 \cdot 10^{-3}$ m/s



Rys. 4. Zależność $t_R = f(\phi)$ dla zestawu mieszadeł RT-A 315; różne wartości $w_{og} \cdot 10^{-3}$ m/s: (1) 1,71, (2) 2,56, (3) 3,41 (4) 4,26, (5) 5,97 (6) 7,68; (○) $Y = 1$, (△) $Y = 1,36$, (□) $Y = 1,6$

Wyniki pomiarów udziału gazu zatrzymanego w cieczy opisano równaniem bezwymiarowym

$$\phi = AKg^B We^C Y^D \quad (6)$$

które wiąże udział gazu ϕ ze zmiennymi operacyjnymi n oraz V_G , nie wymagającym przy tym znajomości mocy mieszania, natomiast wpływ zdolności układu do koalescencji na wartość ϕ ujmując parametrem Y . Wartości współczynnika A oraz wykładników w równaniu (6) przedstawiono w tab. 1. Równanie (6) obowiązuje w następującym zakresie zmiennych $Kg \in <0,84 \cdot 10^{-2}; 11,3 \cdot 10^{-2}>$; $We \in <210; 2752>$; $Y \in <1; 1,6>$.

Tab. 1. Wartości współczynnika A oraz wykładników B, C, D w równaniu (6)

Lp.	Konfiguracja mieszadeł		$A \cdot 10^{-4}$	B	C	D	$\pm \Delta$
	dolne	górne					
1	turbinowe Rushtona	A 315	7,34	0,577	0,807	1,229	9,7
2	turbinowe Rushtona	HE 3	5,89	0,538	0,809	1,294	12

Wnioski

- Znacznie wyższe wartości udziału gazu ϕ zatrzymanego w cieczy otrzymano w układach nie wykazujących zdolności do koalescencji ($Y = 1,36$ oraz $1,6$) dla obu zestawów mieszadeł. Różnice w wartościach ϕ uzyskanych dla dwóch układów z chlorkiem sodu o różnych stężeniach, były znacznie mniejsze, w porównaniu z różnicą w wartościach ϕ dla tych układów, a dla układu z wodą destylowaną.
- Generalnie, w układzie ciec-z-gaz korzystniejszym do zapewnienia dobrego rozproszenia gazu w objętości cieczy okazał się zestaw mieszadeł TR-A 315.
- Do obliczania udziału gazu zatrzymanego w cieczy w aparacie z dwoma mieszadłami, zaproponowano równanie, uwzględniające wpływ parametrów operacyjnych oraz właściwości fizycznych fazy ciągłej (zdolności układu do koalescencji pęcherzyków gazu w cieczy).

LITERATURA

- [1] T. Moucha, V. Linek, E. Prokopova: Chem. Eng. Sci, 58 (2003).
- [2] J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych. Warszawa, WNT (2004).
- [3] V. Machon, J. Vlcek, V. Kudrna: Collect. Czech. Chem. Commun. (1978).
- [4] A. Kielbus-Rapala, J. Karcz: Chem. Pap. 63, nr 2, 188 (2009).

Praca dedykowana Panu Profesorowi Fryderykowi Strękowski z okazji Jubileuszu 85. urodzin.