

JERZY KAMIŃSKI
STANISŁAW SPYTKOWSKI

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Efektywność wytwarzania zawiesiny w smukłym aparacie

Wprowadzenie

Procesy przebiegające w układach wielofazowych realizowane są często w aparatach z mieszadłami. Przy większych objętościach ciekłej fazy ciągłej stosuje się smukłe aparaty, w których jedno mieszadło nie gwarantuje właściwego rozproszenia faz w całym układzie. Jest to możliwe dopiero po wprowadzeniu kolejnych mieszadeł. W układach z ciałem stałym, unoszenie jego ziaren z dna aparatu i ich zawieszanie w strumieniu cieczy wywołuje zawsze dolne mieszadło. Zastosowanie drugiego mieszadła poprawia jakość powstającej zawiesiny, staje się ona bardziej jednorodna, a samo mieszanie może wtedy przebiegać efektywniej [1]. Jeżeli jednak w cieczy oprócz ciała stałego ma być równocześnie dyspergowany gaz pojawiają się problemy. Nie ma bowiem mieszadeł, które równie dobrze rozpraszająby obydwie te fazy w cieczy. Rozwiązaniem może być umieszczenie w aparacie niezależne napędzanych mieszadeł, z których jedno dysperguje ciało stałe, drugie zaś gaz. Pracę poświęcono badaniom nad powstawaniem samej zawiesiny w takim aparacie, w kontekście efektywności przebiegu tego procesu.

Zakres badań

Dolne mieszadło obracając się w cieczy powoduje unoszenia cząstek ciała stałego z dna zbiornika, początkowo tych leżących najwyżej w górnej warstwie złoża, a w miarę zwiększania częstości obrotów mieszadła coraz większych jego fragmentów. Przy pewnych, granicznych częstościach jego obrotów wszystkie cząstki ciała stałego zostają już uniesione z dna aparatu i zawieszane w cieczy. Niektóre z nich mogą ponownie opadać na dno, nie pozostają jednak w spoczynku, lecz są natychmiast znowu unoszone lub wprawiane w ruch po dnie.

W pracy [2] wyznaczono graniczne częstości obrotów dolnego mieszadła, dla różnych rodzajów, częstości i kierunków obrotów górnego mieszadła, a także odległości między mieszadłami. Poniżej przedstawiono zmierzone w tych warunkach moce mieszania obydwu mieszadeł, oceniając efektywność wytwarzania zawiesiny. Za miarę jej jednorodności przyjęto uzyskiwany wówczas stopień zmieszania układu.

W badaniach stosowano dwa zestawy mieszadeł. W obydwu dolnym było mieszadło A315 tłoczące ciecz w dół, górnym zaś takie samo – zestaw A315–A315, lub turbinowe tarczowe – zestaw A315–TR. Mieszadła miały standardową średnicę $d = D/3$. Dolne mieszadło umieszczone było w odległości od dna równej jego średnicy, zaś odstęp między mieszadłami zmieniano w zakresie $\Delta h = (1,5-3)d$. Zawiesinę tworzyły ziarna agalitu o średniej średnicy 0,58 mm i gęstości 2315 kg/m³ w wodzie, w ilości odpowiadającej jego udziałowi masowemu

0,02 kg/kg. Badania wykonano w cylindrycznym zbiorniku o wewnętrznej średnicy $D = 288$ mm, z płaskim dnem i czterema standardowymi przegrodami. Napełniony był on wodą do wysokości $2D$. Na dnie zbiornika znajdowały się dwie wkładki, zapobiegające gromadzeniu się na nim ciała stałego [3].

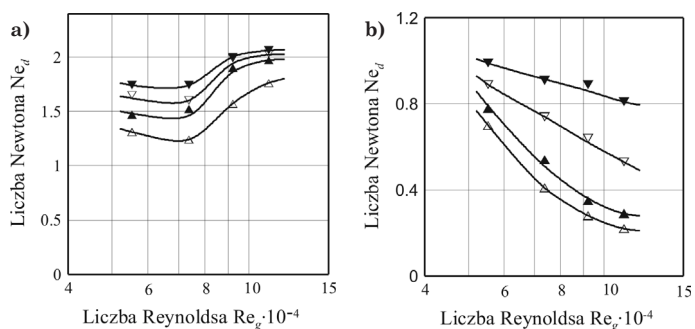
Moc mieszania

Do oceny efektywności wytwarzania zawiesiny w mieszalniku konieczna jest znajomość ponoszonych nakładów energetycznych. Składają się na nie moce mieszania obydwu mieszadeł, wyrażane zwykle w formie bezwymiarowych liczb *Newtona*.

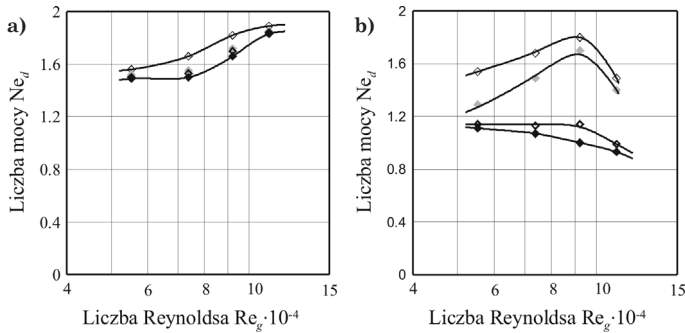
Liczba ta dla dolnego mieszadła A315, przy granicznych częstości jego obrotów, przyjmuje różne wartości zależnie od rodzaju górnego mieszadła, częstości i kierunku jego obrotów oraz odstepu między mieszadłami. Dla badanych zestawów mieszadeł pokazano to na rys. 1, 2, wprowadzając w miejsce częstości obrotów górnego mieszadła odpowiadającą im liczbę *Reynoldsa* Re_g .

Jak widać w zestawie A315-A315 liczba *Newtona* Ne_d przyjmuje tym niższe wartości, im bliżej siebie znajdują się mieszadła. Ten wpływ odstepu mieszadeł jest większy wtedy, gdy obracają się one w przeciwnych kierunkach. Wówczas liczba *Newtona* dolnego mieszadła przyjmuje zdecydowanie niższe wartości, niż przy zgodnych kierunkach obrotów mieszadeł. Jej wartości maleją monotonicznie ze wzrostem częstości obrotów górnego mieszadła. Jeżeli natomiast górnym mieszadłem jest mieszadło turbinowe, to liczba Ne_g przyjmuje mniejsze wartości przy większych odległościach między mieszadłami, przy czym gdy obracają się one w tym samym kierunku jej zmiany są stosunkowo niewielkie.

Liczby mocy górnych mieszadeł przyjmują stałe wartości niezależnie od wzajemnego usytuowania mieszadeł. Zależą



Rys. 1. Liczba *Newtona* dolnego mieszadła A315 w zależności od liczby *Reynoldsa* górnego mieszadła A315 i odstepu między mieszadłami. Kierunki obrotów mieszadeł: a) zgodne; b) przeciwnie.
△ – $\Delta h/d = 1,5$; ▲ – $\Delta h/d = 2$; ▽ – $\Delta h/d = 2,5$; ▼ – $\Delta h/d = 3$



Rys. 2. Liczba Newtona dolnego mieszadła A315 w zależności od liczby Reynoldsa górnego mieszadła TR i odstępu między mieszadłami. Kierunki obrotów mieszadeł: a) zgodne; b) przeciwnie. \diamond - $Dh/d = 1,5$; \blacklozenge - $Dh/d = 2$; \blacklozenge - $Dh/d = 2,5$; \blacklozenge - $Dh/d = 3$

one jednak od kierunku obrotów mieszadeł i dla górnego mieszadła A315 przyjmują wartości: $Ne_g = 1,54$ – przy zgodnych i $Ne_g = 1,43$ – przy przeciwnych kierunkach obrotów, zaś dla mieszadła turbinowego TR odpowiednio $Ne_g = 4,80$ i $4,66$.

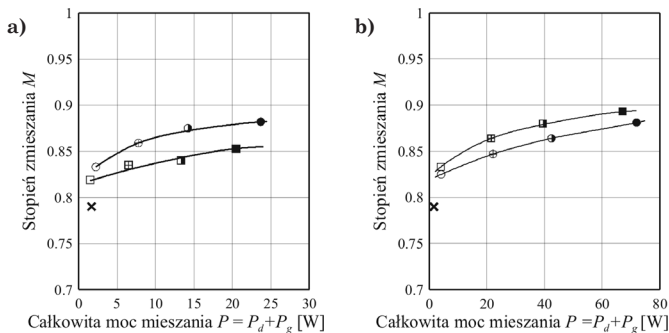
Efektywność wytwarzania zawiesiny

Wprowadzenie drugiego, oddzielnie napędzanego mieszadła skutkuje poprawą jednorodności powstającej zawiesiny; wiąże się jednak z dodatkowymi nakładami mocy mieszania. Jako ilościową miarę jednorodności zawiesiny wprowadzono stopień jej zmieszania, według definicji Rose'a [4]:

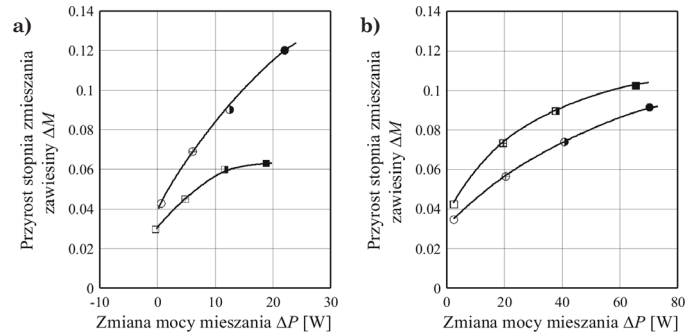
$$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (3)$$

Na rys. 3 pokazano jak zmienia się stopień zmieszania powstającej zawiesiny wraz z mocą mieszania, a na rys. 4 o ile wzrasta jego wartość dzięki zastosowaniu drugiego mieszadła, powodującego zmianę mocy mieszania o ΔP .

Przyrost ΔM jest tym większy, im wyższe są częstotliwości obrotów górnego mieszadła, a co za tym idzie i większe moce mieszania. Biorąc pod uwagę efektywność wytwarzania zawiesiny korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie dwóch mieszadeł A315 obracających się w tym samym kierunku. Nawet przy niskich częstotliwościach obrotów górnego mieszadła ($n_g = 4s^{-1}$) i praktycznie takiej samej mocy mieszania, otrzymuje się wtedy bardziej jednorodną zawiesinę, któ-



Rys. 3. Stopień zmieszania powstającej zawiesiny w funkcji mocy mieszania. \times – jedno mieszadło A315. Zestaw mieszadeł: a) A315-A315; b) A315-TR. Kierunki ich obrotów zgodne: \circ - $n_g = 4s^{-1}$, \oplus - $n_g = 8s^{-1}$, \bullet - $n_g = 10s^{-1}$, \bullet - $n_g = 12s^{-1}$, przeciwnie: \square - $n_g = 4s^{-1}$, \boxtimes - $n_g = 8s^{-1}$, \blacksquare - $n_g = 10s^{-1}$, \blacksquare - $n_g = 12s^{-1}$, $\Delta h/d = 1,5$



Rys. 4. Przyrost stopnia zmieszania powstającej zawiesiny wywołany obecnością drugiego mieszadła w zależności od zmiany całkowitej mocy mieszania. Zestaw mieszadeł: a) A315-A315; b) A315-TR. Kierunki ich obrotów zgodne: \circ - $n_g = 4s^{-1}$, \oplus - $n_g = 8s^{-1}$, \bullet - $n_g = 10s^{-1}$, \bullet - $n_g = 12s^{-1}$, przeciwnie: \square - $n_g = 4s^{-1}$, \boxtimes - $n_g = 8s^{-1}$, \blacksquare - $n_g = 10s^{-1}$, \blacksquare - $n_g = 12s^{-1}$, $\Delta h/d = 1,5$

rej stopień zmieszania jest o kilka procent wyższy od osiąganego w aparacie z jednym mieszadłem. Dalsze zwiększenie stopnia zmieszania wymaga jednak dodatkowych, szybko rosnących nakładów energetycznych. Jak widać z rys. 4 a chcąc podnieść go o 12% trzeba blisko 13 razy zwiększyć moc mieszania wnoszoną do układu. Stosując natomiast dodatkowe mieszadło turbinowe uzyskanie podobnego efektu wymaga jeszcze większych mocy mieszania, mniej więcej trzykrotnie w porównaniu z zestawem A315-A315.

Oznaczenia

- d – średnica mieszadła, [m],
- D – średnica zbiornika mieszalnika, [m],
- Fr – liczba Froude'a, $Fr = n^2 d/g$,
- g – przyspieszenie ziemskie, [m/s^2],
- Δh – odległość między mieszadłami, [m],
- M – stopień zmieszania zawiesiny, [-],
- n_d – częstość obrotów dolnego mieszadła przy których powstaje zawiesina, gdy górne mieszadło obraca się z częstością n_g , [s^{-1}],
- n_{d1} – częstość obrotów dolnego mieszadła przy których powstaje zawiesina, gdy $n_g = 0$, [s^{-1}],
- n_d – częstość obrotów górnego mieszadła, [s^{-1}],
- P – moc mieszania, [W],
- Re – liczba Reynoldsa górnego mieszadła, $Re = nd^2\rho/\eta$,
- η – dynamiczny współczynnik lepkości cieczy, [Pas],
- ρ – gęstość cieczy, [kg/m^3],
- σ – odchylenie standardowe stężenia ciała stałego w wytworzonej zawieszynie, [-],
- σ_0 – odchylenie standardowe stężenia w stanie całkowitej segregacji faz, [-].

Indeksy

- d – dolne mieszadło
- g – górne mieszadło

LITERATURA

1. G. Niesmak: Chemie Ing. Techn. 55, nr 4, 318 (1983).
2. J. Kamiński, S. Spytkowski: Materiały konferencyjne XI Ogólnopolskiego Seminarium „Mieszanie”, Łódź, 2008.
3. M.W. Chudacek: Chem. Eng. Sci. nr 3, 385 (1985).
4. H.E. Rose: Trans. IChemE. nr 37, 47 (1959).