

Porównanie warunków wytwarzania suspensji przy użyciu standardowego mieszadła sześciolopatkowego oraz mieszadła TX335

Comparison of conditions for suspensions production for standard six blade turbine impeller and TX335 impeller

Porównano pracę dwóch mieszadeł o działaniu osiowym, sześciolopatkowego mieszadła turbinowego o łopatkach pochylonych oraz mieszadła TX335 podczas mieszania układu dwufazowego ciała stałe-ciecz. Okazało się, że pomimo wyższych częstości obrotowych, które należy stosować w przypadku mieszadła TX335 jest ono bardziej ekonomiczne od mieszadła turbinowego. Jest to efekt bardziej opływowych kształtów mieszadła TX335.

Two various stirrers were compared at room temp. for mixing efficiency in liq.-solid system (glass spheres diam. 0.18–0.9 mm in water). The TX335 stirrer was more efficient than the 6-pitch blade turbine.

Wytwarzanie zawiesiny ciała stałego w cieczy jest często spotykaną operacją w przemyśle chemicznym, np. podczas reakcji w układzie dwufazowym ciecz–ciało stałe oraz w inżynierii środowiska w technologiach oczyszczaniu ścieków. Szacuje się, że ok. 60% przypadków mieszania dotyczy właśnie układów dwufazowych ciecz–ciało stałe.

Ze względu na ważność tego zagadnienia w literaturze przedmiotu opublikowano wiele prac dotyczących sposobów wytwarzania takich układów¹⁻⁵⁾. Przegląd tych prac można znaleźć m.in. w opracowaniu Riegera i Ditla^{5, 6)}. Z analizy prac wynika jednoznacznie, że mieszadła o działaniu osiowym, które wytwarzają przede wszystkim osiowy strumień cieczy opuszczający obszar mieszadła, najlepiej nadają się do wytwarzania zawiesiny ciała stałego w cieczy. Strumień cieczy kierowany przez mieszadło do dna mieszalnika (zaleca się stosować taki kierunek obrotów mieszadła, aby przepływ cieczy w środku mieszalnika był do dołu, a nie do góry mieszalnika) dociera do wyoblonego dna, gdzie ciśnienie dynamiczne zaburza obszar stagnacji i podrywa spoczywające na dnie cząstki transportując je do góry mieszalnika.

Sześciolopatkowe mieszadło turbinowe o łopatkach pochylonych jest klasycznym typem mieszadła stosowanym do wytwarzania ukła-

dów dwufazowych ciecz–ciało stałe, gdyż osiowy strumień cieczy wytwarzany przez to mieszadło wynika z jego konstrukcji (rys. 1a). Jego pewną wadą jest stosunkowo duży opór obracających się łopatek podczas pracy samego mieszadła. Z kolei mieszadło TX335 o działaniu osiowym przedstawione na rys. 1b, ma wyprofilowane, na podobieństwo śrub okrętowych, cztery łopatki mieszadła, których opór powinien być znacznie mniejszy niż opór standardowego mieszadła turbinowego.

Aby właściwie zaprojektować układ mieszający do wytwarzania zawiesiny należy określić warunki jakie muszą być spełnione, aby z technologicznego punktu widzenia wytworzony wewnątrz mieszalnika układ dwufazowy ciecz–ciało stałe można było uznać za zawieszinę niezmienną w czasie. Najczęściej stosowanym kryterium jest kryterium Zwieterlinga, które mówi, że wtedy układ dwufazowy ciecz–ciało stałe uważany jest jako trwały jeśli żadna z cząstek nie kontaktuje się z dnem dłużej niż 1 s. Częstość obrotową mieszadła, przy których warunek ten jest spełniony określany jest krytyczną częstością obrotową mieszadła n_c .

Na podstawie analizy inspekcyjnej równań Naviera i Stokesa, równania ciągłości oraz równania określającego równowagę sił działających na zawieszoną cząstkę w płynie, Rieger i Ditl⁶⁾ zaproponowali równanie (1) do obliczania zmodyfikowanej liczby Frouda Fr' zawie-



Rys. 1. Sześciolopatkowe mieszadło turbinowe o łopatkach pochylonych (a) oraz mieszadło TX335 (b)

Fig. 1. Six-pitch blade turbine (a) and TX335 impeller (b)

Dr hab. Czesław KUNCEWICZ, prof. PŁ – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr 09/2011, str. 1625.

* Adres do korespondencji:

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczajska 213, 90-924 Łódź, tel.: (42) 631-37-27, fax: (42) 636-30-69, e-mail: kuncewicz@wipos.p.lodz.pl

Prof. dr hab. inż. František RIEGER – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr 09/2011, str. 1633.

rającego wielkość n_c i uzależniając jej wartość od stosunku d_p/D oraz stężenia objętościowego fazy stałej c_v wzorem

$$Fr' = \frac{n_c^2 d_p \rho}{g \Delta \rho} = f\left(\frac{d_p}{D}, c_v\right) \quad (1)$$

w którym ρ oznacza gęstość cieczy, a $\Delta \rho$ różnicę gęstości ciała stałego i cieczy. Równanie (1) jest słuszne dla układów geometrycznie podobnych, dla zakresu mieszania burzliwego. Funkcja f po prawej stronie równania (1) przedstawiana jest najczęściej w postaci funkcji potęgowej (2), gdzie stała C oraz γ są uzależnione od stężenia c_v .

$$Fr' = C \left(\frac{d_p}{D}\right)^\gamma \quad (2)$$

Postać funkcyjną zależności $C, \gamma = f(c_v)$ podał w swoich pracach Rieger^{7, 8}. Na podstawie badań doświadczalnych zaproponował on zależności (3) i (4), w których wszystkie wielkości występujące w tych równaniach są wielkościami bezwymiarowymi.

$$C = A \exp(Bc_v) \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha + \beta c_v \quad (4)$$

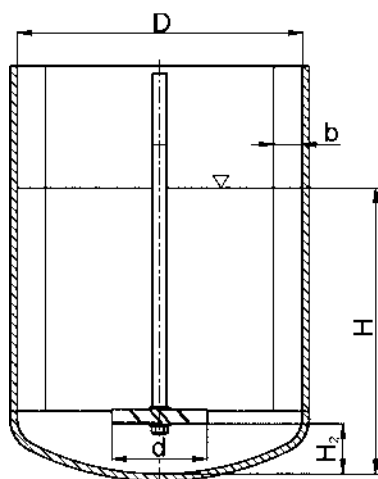
Aby utrzymać cząstki ciała stałego w postaci zawiesiny, do mieszalnika należy dostarczać energię w postaci mocy mieszania. Bezwymiarowym kryterium określającym jej wielkość jest kryterium π_s zawierające w sobie liczbę mocy Po oraz zmodyfikowaną liczbę Frouda Fr' ⁹.

$$\pi_s = Po \sqrt{(Fr')^3 (d/D)^7} \quad (5)$$

Celem pracy było doświadczalne porównanie efektywności mieszania standardowego mieszadła turbinowego z łopatkami pochylonymi z efektywnością mieszadła TX335 przedstawionych na rys. 1.

Część doświadczalna

Pomiary przeprowadzono w mieszalniku z dnem wyoblonym (rys. 2) o średnicy $D = 300$ mm wypełnionego cieczą do wysokości $H = D$ i zaopatrzonego w 4 standardowe przegrody o szerokości



Rys. 2. Schemat stanowiska doświadczalnego

Fig. 2. Scheme of the experimental stand

Dr inż. Pavel SEICHTER w roku 1963 ukończył studia inżynierskie i uzyskał dyplom inżyniera na Politechnice w Brnie. W 1981 r. obronił pracę doktorską na Politechnice Czeskiej w Pradze. Całą swoją karierę zawodową do 1992 r. związał z Instytutem Badawczym Zakładów Chemicznych. Po 1992 r. rozpoczął pracę w prywatnej firmie TECHMIX specjalizującej się w zagadnieniach mieszania w różnego rodzaju urządzeniach, w tym w bioreaktorach. W firmie tej pracuje do chwili obecnej. Specjalność – mieszanie.

$b = 0,1D$. Do mieszania używano mieszadeł przedstawionych na rys. 1 o średnicy $d/D = 1/3$. Wysokość zawieszenia mieszadeł nad dnem dla mieszadła turbinowego wynosiła $H_2 = 0,5d$, natomiast dla mieszadła TX335 wartość $H_2 = 0,75d$. Jako ciecz mieszaną stosowano wodę o lepkości $\eta = 110^{-3}$ Pa·s i gęstości 1000 kg/m³. Jako zawiesinę stosowano izometryczne cząstki szklane (gęstość $\rho_s = 2550$ kg/m³) o średnicach zastępczych z zakresu $d_p = 0,18-0,9$ mm i stężeniach objętościowych $c_v = 0,025-0,4$.

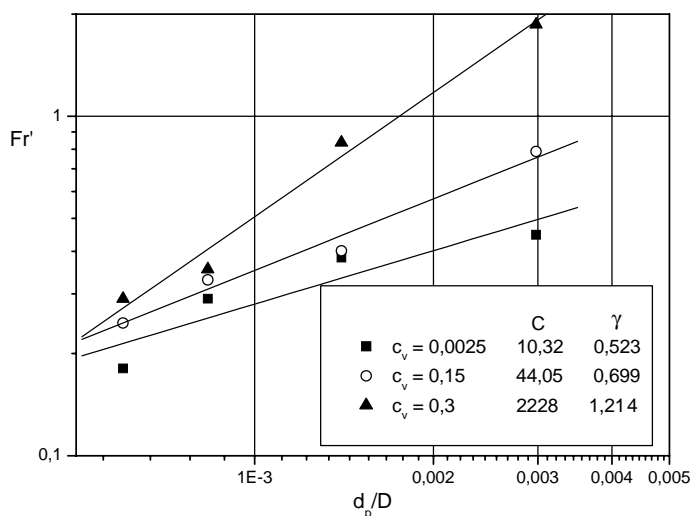
Podczas pomiarów określano krytyczną częstość obrotową n_c oraz odpowiadającą tej wartości moc mieszania P . Jako kryterium określającym wartość n_c stosowano kryterium Zwitterlinga¹⁰, natomiast moment obrotowy potrzebny do obliczenia mocy mieszania określano za pomocą dwóch tensometrów.

Wyniki badań

Na podstawie zmierzonych pierwotnych wartości n_c oraz momentu obrotowego M obliczano wielkości odpowiednich liczb kryterialnych. Ich wartości pozwalały określać warunki, jakie należy zapewnić wewnątrz mieszalnika, aby uzyskać zawiesinę stabilną w czasie. Na rys. 3 przedstawiono wykres zależności zmodyfikowanej liczby Fr' od bezwymiarowej wielkości cząstek d_p/D , dla zakresu mieszania burzliwego oraz dla stałej wartości c_v fazy stałej. Przedstawione wykresy na tym rysunku dotyczą sześciolopatkowego mieszadła turbinowego dla trzech wybranych stężeń c_v .

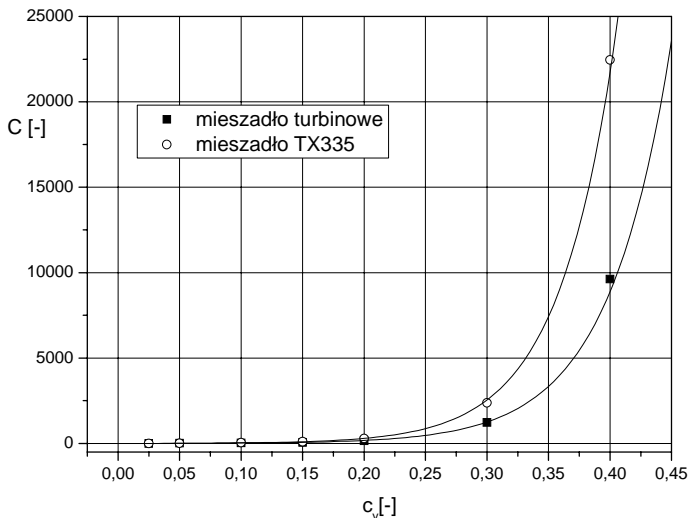
W układzie podwójnie logarymicznym uzyskano linie proste o różnym nachyleniu w zależności od wartości c_v . Linie proste na rys. 3 świadczą o właściwym doborze funkcji (2) jako funkcji aproksymującej wyniki doświadczalne. Łatwo zauważyć, że bezwymiarowe liczby Fr' (częstości krytyczne n_c) bardzo mocno zależały od stężenia i rozmiaru cząstek, co jest zgodne z równaniami (2–4). W granicznym przypadku (rys. 3) wartości Fr' różniły się ponad dziesięciokrotnie, co oznacza, że krytyczne wartości obrotowe n_c różniły się ponad trzykrotnie. W tabeli na rys. 3 zamieszczono uzyskane wartości stałych C i γ odpowiadające poszczególnym liniom. O ile stała γ (nachylenie prostej) zmieniła się w niezbyt szerokich granicach, to wartość stałej C zmieniła się nawet o trzy rzędy wielkości (dla stężenia $c_v = 0,3$). Aby pokazać wielkość tych zmian, na rys. 4 w układzie normalnym przedstawiono zależność stałej C od stężenia c_v .

Odczytane z rys. 3 wartości stałych C i γ korelowano równaniami (3) i (4), a na rys. 5 oraz rys. 6 przedstawiono wizualizację uzyskanych w ten sposób wyników. Na rys. 5 w układzie półlogarymicznym dla obu mieszadeł uzyskano linie proste pomimo zmiany wartości C o ponad cztery rzędy wielkości. Świadczy to o właściwym doborze funkcji (3) w pracach^{3,4} jako funkcji aproksymującej wyniki $C = f(c_v)$.

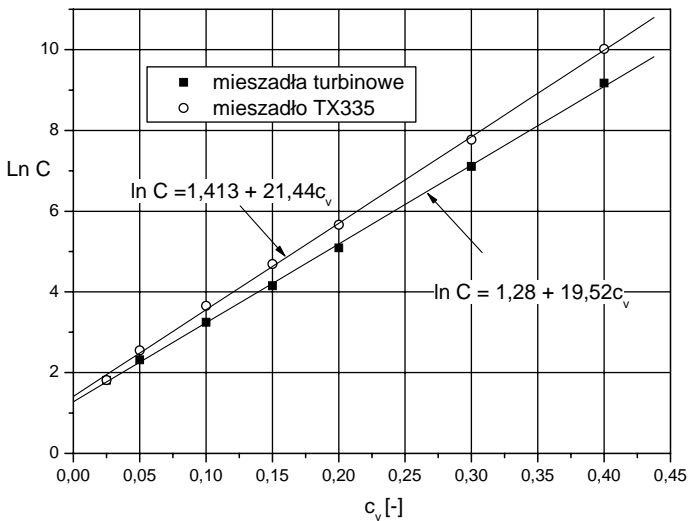


Rys. 3. Zależność zmodyfikowanej liczby Frouda Fr' od średnicy cząstek zawiesiny d_p

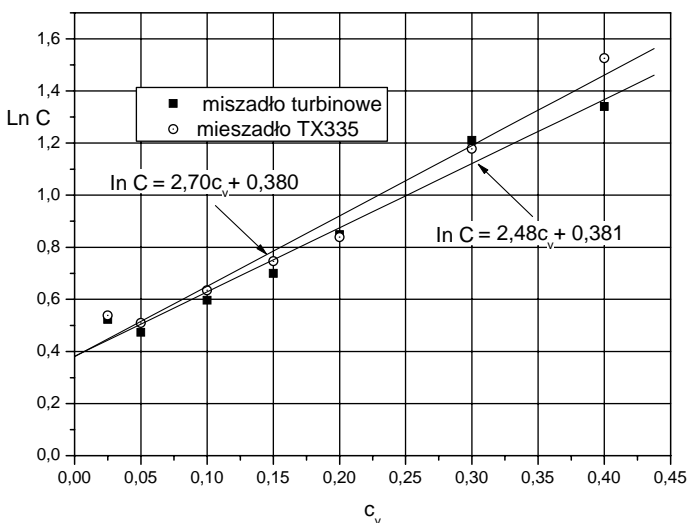
Fig. 3. Effect of the diameter of particles d_p on the modified Froude number Fr'



Rys. 4. Zależność stałej C w równaniu (2) od stężenia cząstek fazy stałej
 Fig. 4. Effect the concentration of solid phase on the constant C in equation (2)



Rys. 5. Sprawdzenie poprawności założenia wyrażonego równaniem (2)
 Fig. 5. Validation the assumption expressed by equation (2)



Rys. 6. Zależność stałej γ w równaniu (2) od stężenia cząstek fazy stałej
 Fig. 6. Effect of the concentration of solid particles on the constant γ in equation (2)

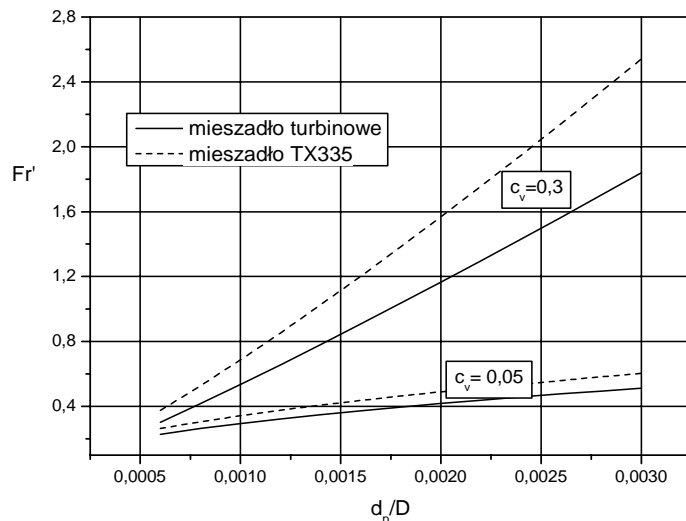
Ostatecznie, ustalone na podstawie pomiarów szczegółowe postacie równania (2) dla mieszadła turbinowego oraz mieszadła TX335 można było przedstawić w postaci równań (6) i (7).

$$Fr' = \frac{n_c^2 d_p \rho}{g \Delta \rho} = 3,608 \exp(19,52c_v) \left(\frac{d_p}{D}\right)^{(2,48c_v+0,38)} \quad (6)$$

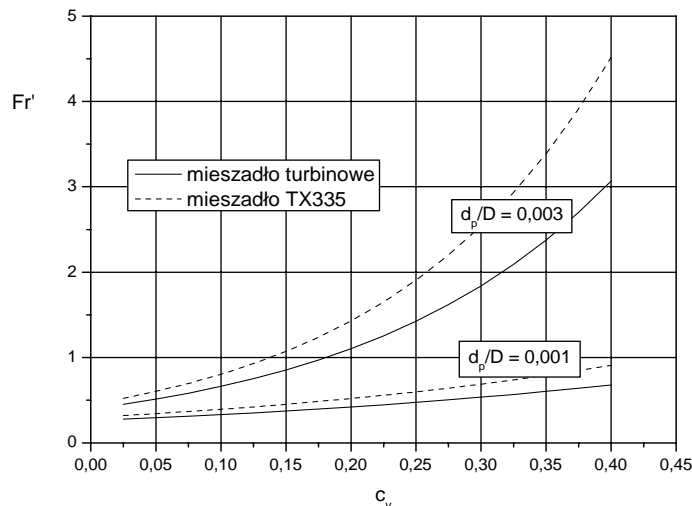
$$Fr' = \frac{n_c^2 d_p \rho}{g \Delta \rho} = 4,11 \exp(21,44c_v) \left(\frac{d_p}{D}\right)^{(2,70c_v+0,38)} \quad (7)$$

Aby stwierdzić, jakie wartości bezwymiarowej liczby Fr' należy osiągnąć, aby w mieszalniku wytworzyć trwałą zawiesinę stosując standardowe mieszadła turbinowe oraz mieszadła TX335, na rys. 7 przedstawiono wykresy funkcji (6) i (7) dla obu mieszadeł. Wykresy te sporządzono dla różnych rozmiarów cząstek zawiesiny (d_p/D) i dwóch wybranych stężeń ciała stałego $c_v = 0,05$ oraz $c_v = 0,3$. Z kolei, na rys. 8 przedstawiono te same funkcje w zależności od stężenia c_v fazy stałej dla dwóch wybranych wielkości rozmiarowych cząstek $d_p/D = 0,001$ oraz $d_p/D = 0,003$.

Jak wynika z przedstawionych wykresów na rys. 7 i 8, aby wytworzyć zawiesinę w mieszalniku należało stosować wyższe częstotliwości krytyczne n_c (wyższe wartości zmodyfikowanych liczb Fr') wraz ze zwiększaniem się stężenia fazy stałej oraz zwiększaniem się rozmiarów zawieszonych cząstek. Jest to zgodne z wynikami innych prac dotyczących tego problemu, jak również z intuicyjnym wyczuciem autorów.



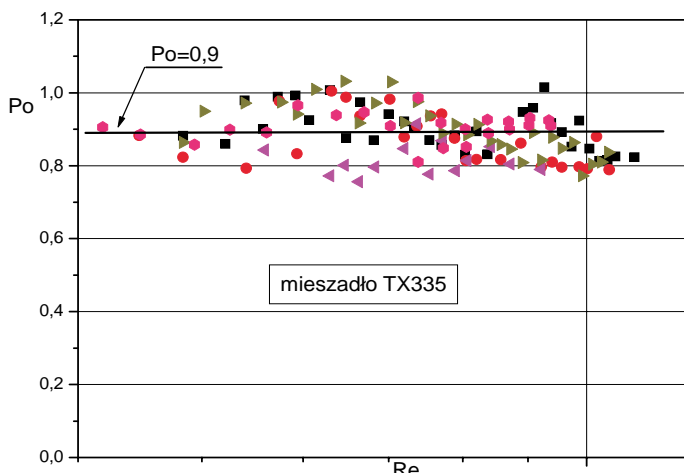
Rys. 7. Warunki wytwarzania zawiesiny w zależności od wielkości ziaren d_p/D
 Fig. 7. Conditions for the suspension production depending on particle size d_p/D



Rys. 8. Warunki wytwarzania zawiesiny w zależności od stężenia zawiesiny
 Fig. 8. Conditions for the suspension production depending on the concentration of suspension

Jednocześnie, do wytworzenia zawiesiny w mieszalniku, stosując mieszadło TX335 należało zawsze stosować większe częstotliwości obrotowe niż w przypadku sześciopłatkowego mieszadła turbinowego. Wynika to z większego strumienia cieczy wypływającego z obszaru mieszadła w dół mieszalnika w przypadku mieszadła turbinowego w porównaniu z podobnym strumieniem w przypadku mieszadła TX335¹¹.

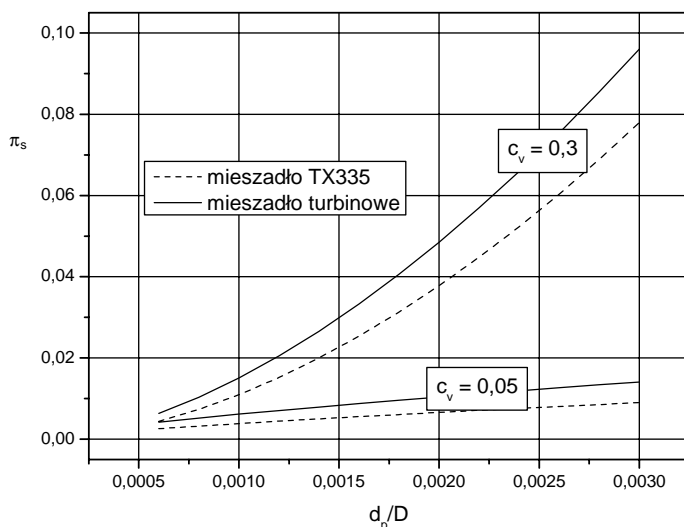
Stosowanie większych częstotliwości obrotowych mieszadła nie musi zawsze oznaczać konieczności stosowania większych mocy mieszania. Wielkość energii, którą należy dostarczyć do układu w celu podtrzymania odpowiednio intensywnego przepływu zawiesiny wewnątrz mieszalnika, zależy również od oporów łopatek mieszadła, czyli od wielkości mocy mieszania P . Na rys. 9 przedstawiono zmierzone wartości bezwymiarowej liczby mocy Po w zależności od liczby Reynoldsa. Obliczenia statystyczne wykazały, że dla mieszadła TX335 i ruchu burzliwego ($Re > 10000$) można przyjąć $Po = 0,9 = \text{const.}$ ¹²). Podobna wartość dla sześciopłatkowego mieszadła turbinowego wynosiła $Po = 1,8$ ⁹.



Rys. 9. Moc mieszania dla mieszadła TX335

Fig. 9. Power consumption for TX335 impeller

Kryterium, które ujmuje w sobie zmodyfikowaną liczbę Fr' , jak również moc mieszania P , jest kryterium π_s zaproponowanym w pracy⁹). Wartość tego kryterium dla poszczególnych typów mieszadeł decyduje o ich efektywności mieszania. Na rys. 10 przedstawiono wartości π_s dla obu badanych mieszadeł. Jak wynika z analizy danych przedstawionych na tym rys. 10, mieszadło TX335 pomimo konieczności stosowania większych częstotliwości krytycznych n_c okazało się mieszadłem bardziej efektywnym. W każdym przypadku wartości π_s dla tego mieszadła były



Rys. 10. Porównanie efektywności mieszania mieszadła turbinowego oraz mieszadła TX335

Fig. 10. Comparison of mixing efficiency for the pitched blade turbine and TX335 impeller

mniejsze od podobnych wartości dla mieszadła turbinowego. Wynika to niewątpliwie z mniejszego zapotrzebowania mocy do napędu mieszadła TX335 (bardziej wyprofilowane łopatki mieszadła) w porównaniu z mieszadłem turbinowym. Należy zauważyć, że zgodnie z równaniem (5) wartości π_s są proporcjonalne do mocy mieszania, zatem i moce mieszania P będą mniejsze w takim samym stosunku, jak wynika to z rys. 10.

Podobne relacje, jak na rys. 10, uzyskano również z nieprzedstawionych w tej pracy wykresów zależności $\pi_s = f(c_v)$ dla różnych wielkości rozmiarowych cząstek d_p/D .

Wnioski

Badania potwierdziły słuszność propozycji dotyczących postaci równań (3) i (4) przedstawionych w pracach^{7,8}). Do wytworzenia zawiesiny dla tych samych stężeń i tych samych rozmiarów cząstek, mieszadło TX335 wymagało zawsze większych częstotliwości obrotowych n_c .

Ze względu na mniejszą moc mieszania, mieszadło TX335 okazało się w każdych warunkach mieszadłem bardziej efektywnym od standardowego mieszadła turbinowego sześciopłatkowego.

Praca została wykonana w ramach Grantu FR-T11/005 finansowanego przez Ministerstwo Przemysłu i Handlu Republiki¹¹ oraz w ramach działalności statutowej W-10/1/2011/Dz.St. Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej².

Stosowane oznaczenia

- A, B stałe w równaniu (3),
- b szerokość przegrody w mieszalniku, m
- C stała proporcjonalności w równaniu (2) określona równaniem (3),
- c_v stężenie objętościowe ciała stałego,
- D średnica mieszalnika, m
- d średnica mieszadła, m
- d_p średnia średnica cząstek ciała stałego, m
- g przyspieszenie ziemskie, m/s²
- H wysokość cieczy w mieszalniku, m
- H_2 wysokość zawieszenia mieszadła nad dnem, m
- M moment obrotowy, Nm
- n częstota obrotowa mieszadła, obr/s
- n_c krytyczna częstota obrotowa mieszadła, obr/s
- P moc mieszania – $2\pi nM$, W
- α, β stałe w równaniu (4),
- γ wykładnik potęgi w równaniu (2) określony równaniem (4),
- ρ gęstość cieczy, kg/m³
- $\Delta\rho$ różnica gęstości ciała stałego i cieczy, kg/m³
- η lepkość cieczy, Pa·s

Liczby kryterialne

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\eta} \text{ liczba Reynoldsa} \quad Fr' = \frac{n_c^2 d\rho}{g\Delta\rho} \text{ zmodyfikowana liczba Frouda}$$

$$Po = \frac{P}{n^3 d^5 \rho} \text{ liczba mocy} \quad \pi_s = Po \sqrt{Fr'^3 (d/D)^7} \text{ kryterium mocy}$$

Otrzymano: 13-09-2011

LITERATURA

1. D. Fajner, F. Magelli, M. Nocentini, G. Pascali, *Chem. Eng. Res. Des.* 1985, **63**, 235; *Chem. Eng. Res. Des.* 1986, **64**, 473.
2. O. Molerus, W. Latzel, *Chem. Eng. Sci.* 1987, **42**, 1423.
3. K. Wichterle, *Chem. Eng. Sci.* 1988, **43**, 467.
4. P. Zehner, K. Tebel, *Hydrodynamik beim Suspendieren in Rührbehälter. Mischvorgänge*, Freising 1984 r.
5. G.R. Kasat, A.B. Pandit, *Can. J. Chem. Eng.* 2005, **83**, 618.
6. F. Rieger, P. Dittl, *Chem. Eng. Sci.* 1994, **49**, 2219.
7. F. Rieger, *Chem. Eng. J.* 2000, **79**, 171.
8. F. Rieger, *Chem. Eng. Proces.* 2002, **41**, 381.
9. F. Rieger, Mat. VI. Polish Seminar on Mixing, Kraków 1993 r., 79.
10. T.N. Zwieterling, *Chem. Eng. Sci.* 1958, **8**, 244.
11. I. Fort, B. Kysela, T. Jirout, *Inż. Chem. Proc.* 2010, **31**, nr 4, 661.
12. F. Rieger, T. Jirout, I. Fort, D. Ceres, J. Moravec, *Badanie nowych konstrukcji mieszadeł do zawiesin ciała stałego w cieczy*, Sprawozdanie z grantu FR-T11/005 finansowanego przez Ministerstwo Przemysłu i Handlu Republiki Czeskiej, 2011 r.