

František RIEGER, Tomáš JIROUT

e-mail: frantisek.rieger@fs.cvut.cz

Department of Process Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University, Prague, Czech Republic

## Mieszanie zawiesin. Wpływ kształtu dna na krytyczną prędkość obrotową mieszadła

### Wstęp

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 oczyszczania ścieków. Szacuje się, że około 60% przypadków mieszania dotyczy właśnie układów dwufazowych ciecz – ciało stałe. Mieszadła z łopatkami pochyłymi są często używane do mieszania zawiesin.

Miarą zdolności danego mieszadła do wytwarzania zawiesiny ciała stałego jest minimalna częstość obrotowa mieszadła  $n$ , zwana też częstością krytyczną. Jest to taka częstość obrotów mieszadła, po przekroczeniu której, cząstki ciała stałego podczas mieszania nie będą pozostawać na dnie zbiornika ponad określony czas (np. nie dłużej niż 1 sekundę).

Wpływ kształtów dna na krytyczną prędkość obrotową mieszadła był już przedstawiony w pracy [Jirout i Rieger, 1999] i jest on również tematem niniejszej pracy.

### Podstawy teoretyczne

Na podstawie analizy wymiarowej równań *Eulera*, równania ciągłości oraz równania określającego równowagę sił działających na cząstkę zawieszoną w płynie, Rieger i Dittl [1994] zaproponowali równanie do obliczania zmodyfikowanej liczby Frouda  $Fr'$ , zawierającej wartość  $n$ , uzależniając ją od stosunku  $d_p/D$  oraz stężenia objętościowego fazy stałej  $c$ :

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

gdzie:

- $c$  – stężenie objętościowe ciała stałego, [-]
- $D$  – średnica mieszalnika, [m]
- $d$  – średnica mieszadła, [m]
- $d_p$  – średnia średnica cząstek ciała stałego, [m]
- $Fr'$  – zmodyfikowana liczba Froude'a, [-]
- $g$  – przyspieszenie ziemskie, [ $m \cdot s^{-2}$ ]
- $n$  – częstość obrotowa mieszadła, [ $s^{-1}$ ]
- $\rho$  – gęstość cieczy, [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
- $\Delta \rho$  – różnica gęstości ciała stałego i cieczy, [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

Równ. (1) jest słuszne dla układów geometrycznie podobnych, dla zakresu mieszania burzliwego.

Funkcję  $f$  po prawej stronie równ. (1) przedstawia się klasycznie w postaci zależności potęgowej, gdzie stała  $C$  oraz wykładnik potęgi  $\gamma$  są uzależnione od stężenia  $c$ :

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

Postaci zależności  $C = f(c)$  oraz  $\gamma = f(c)$  podał Rieger [2000]:

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

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

gdzie:  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – stałe.

### Część doświadczalna

Pomiary wykonywano w mieszalniku z wypukłym dnem o średnicy  $D = 300$  mm i w trzech mieszalnikach z dnem płaskim o średnicach 290, 600 i 800 mm. Zbiorniki były zaopatrzone w cztery standardowe przegrody i wypełnione cieczą do wysokości  $H = D$ .

Do mieszania używano standardowych cztero- i sześciolopatkowych mieszadeł turbinowych o łopatkach pochyłonych o średnicy  $d/D = 1/3$ . Wysokość zawieszenia mieszadeł nad dnem wynosiła  $H_2 = 0,5d$ . Strumień cieczy był wyrzucany przez mieszadło w kierunku dna mieszalnika.

Jako zawiesinę w mieszalniku z wypukłym dnem, stosowano izometryczne cząstki szklane o średnicach zastępczych z zakresu  $d_p = 0,18 \div 0,9$  mm i stężeniach objętościowych  $c = 0,025 \div 0,4$ .

W mieszalniku z dnem płaskim stosowano izometryczne cząstki szklane o średnicach zastępczych z zakresu  $d_p = 0,18 \div 1,19$  mm i stężeniach objętościowych  $c = 0,025 \div 0,2$ .

Moment wzniesienia wszystkich cząstek z dna (krytyczna prędkość) określono wizualnie jako stan, gdy żadna z cząstek nie przebywała na dnie przez czas dłuższy niż 1 sekunda.

### Wyniki badań i ich analiza

Zmierzone pierwotne wartości krytycznej prędkości obrotowej  $n$  przeliczane były na wielkości odpowiednich liczb kryterialnych i ich wartości podawane były w postaci wykresów określających warunki do wytwarzania zawiesiny. Dla zakresu mieszania burzliwego, charakterystyką jest zależność zmodyfikowanej liczby Frouda  $Fr'$  od bezwymiarowej wielkości cząstek  $d_p/D$ , dla stałej wartości objętościowego stężenia  $c$  fazy stałej.

Wyniki badań dla czterołopatkowych mieszadeł turbinowych o łopatkach pochyłonych w mieszalniku z dnem wypukłym zaprezentowano w pracy [Rieger i in., 2012a].

Wyniki doświadczeń dla sześciolopatkowych mieszadeł turbinowych o łopatkach pochyłonych w mieszalniku z wypukłym dnem przedstawiono w pracy [Rieger i in., 2011].

Wyniki doświadczeń dla sześciolopatkowych mieszadeł turbinowych o łopatkach pochyłonych w mieszalniku z płaskim dnem przedstawiono w pracy [Moravec i in., 2005].

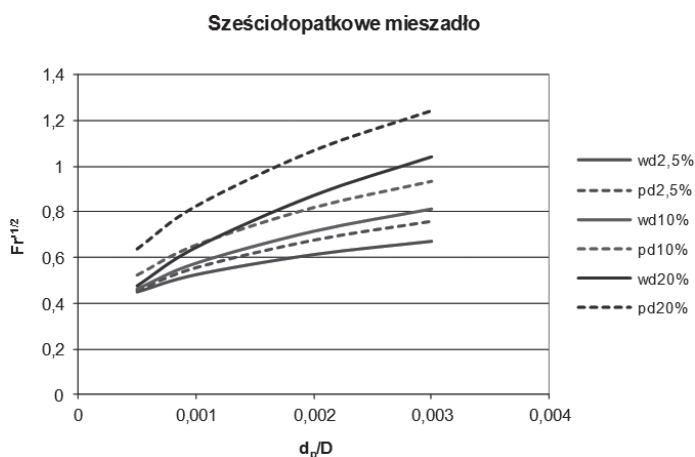
Wyniki doświadczeń dla czterołopatkowych mieszadeł turbinowych o łopatkach pochyłonych w mieszalniku z płaskim dnem zaprezentowano w pracy [Rieger i in., 2012b].

Wartości stałych w równ. (3) i (4) są podane w tab. 1.

Tab. 1. Wartości stałych w równaniach (3) i (4)

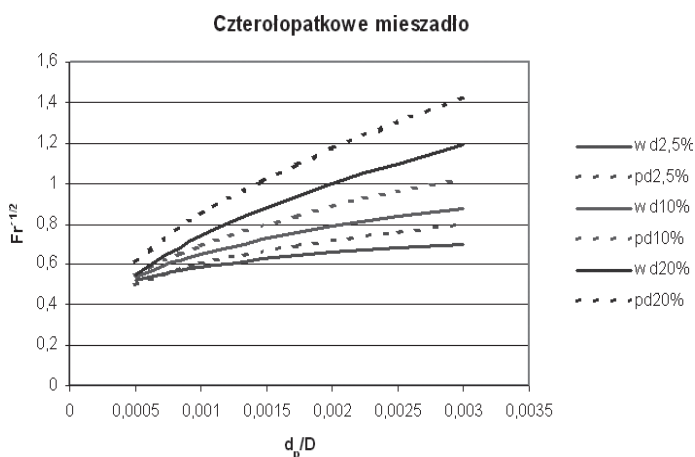
Mieszadło	A	B	$\alpha$	$\beta$
sześciolopatkowe, wypukłe dno	3,61	19,50	0,381	2,48
czterołopatkowe, wypukłe dno	1,77	23,90	0,247	3,07
sześciolopatkowe, płaskie dno	11,27	11,91	0,537	1,07
czterołopatkowe, płaskie dno	7,62	20,90	0,456	2,46

Zależność  $(Fr')^{0,5}$  od bezwymiarowej wielkości cząstek  $d_p/D$ , obliczona z równań (2) – (4) dla trzech stałych wartości objętościowego stężenia  $c$  fazy stałej dla sześciolopatkowego mieszadła turbinowego dla obu kształtów dna przedstawiona została na rys. 1.



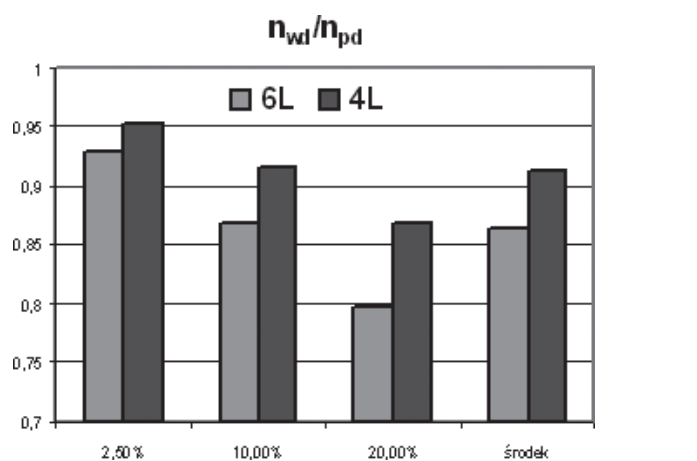
Rys. 1. Zależność  $(Fr')^{0.5}$  od bezwymiarowej wielkości cząstek  $d_p/D$ , obliczona z równań (2) – (4) dla trzech stałych wartości objętościowego stężenia  $c$  fazy stałej dla sześciopłatkowego mieszadła turbinowego dla obu kształtów dna

Podobna zależność  $(Fr')^{0.5}$  od bezwymiarowej wielkości cząstek  $d_p/D$ , obliczona z równań (2) – (4) dla trzech stałych wartości objętościowego stężenia  $c$  fazy stałej dla czterołopatkowego mieszadła turbinowego dla obu kształtów dna przedstawiona została na rys. 2.



Rys. 2. Zależność  $(Fr')^{0.5}$  od bezwymiarowej wielkości cząstek  $d_p/D$ , obliczona z równań (2) – (4) dla trzech stałych wartości objętościowego stężenia  $c$  fazy stałej dla czterołopatkowego mieszadła turbinowego dla obu kształtów dna

Z przedstawionych wykresów dla obu kształtów dna wynika, że w mieszalnikach z wypukłym dnem, krytyczna prędkość obrotowa (odpowiednio  $(Fr')^{0.5}$ ), była niższa niż w mieszalnikach z płaskim dnem. Jest to zgodne z wynikami powyżej cytowanej pracy [Jirout i Rieger, 1999], gdzie są porównywane wyniki dla sześciopłatkowego mieszadła turbinowego w zbiornikach z różnymi kształtami dna. Zostało to przedstawione na rys. 3, gdzie zostały porównane średnie wartości stosunku krytycznych prędkości dla wybranych stężeń oraz jest podana średnia wartość stosunku dla wszystkich trzech stężeń.



Rys. 3. Porównanie średnich wartości stosunku krytycznych prędkości mieszadła czterołopatkowego i sześciopłatkowego dla wybranych stężeń

Z rys. 3 wynika, że stosunek krytycznych prędkości obrotowych jest niższy dla sześciopłatkowego mieszadła niż dla czterołopatkowego, a jego wartość spada wraz z rosnącym stężeniem.

Średnia wartość stosunku krytycznych prędkości obrotowych  $n_{wd}/n_{pd} = 0,89$ . Ze względu na fakt, że w ruchu burzliwym moc mieszania jest proporcjonalna do trzeciej potęgi częstości obrotowej mieszadła ( $P \sim n^3$ ), stosunek mocy mieszania dla krytycznych częstości obrotowych dla obu typów dna wyniesie  $P_{wd}/P_{pd} = 0,70$ .

#### LITERATURA

- Jirout T., Rieger F., 1999. *Vliv úprav dna na suspenzační účinky šestilopatkového míchadla*. CHISA 1999 (CD in Czech)
- Rieger F., 2000. Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension. *Chem. Eng. J.*, **79**, nr 2, 171-175. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00171-6
- Rieger, F., Ceres, D., Jirout, T., 2012a. *Effect of blade number on particle suspension with pitched blade turbines*. 39<sup>th</sup> International Conference of SSCHE Slovak Society of Chemical Engineering, Bratislava, CD-ROM, 340-345
- Rieger F., Dítl P., 1994. Suspension of solid particles. *Chem. Eng. Sci.* **49**, nr 14, 2219-2227. DOI: 10.1016/0009-2509(94)E0029-P
- Rieger, F., Jirout, T., Ceres, D., 2012b. Scale-up of mixing equipment for suspensions. *Czasopismo techniczne* 109, nr 5, 195-200
- Rieger F., Kuncewicz C., Seichter P., 2011. Comparison of conditions for suspensions production for standard six blade turbine impeller and TX335 impeller. *Przem. Chem.* **90**, nr 12, 2179-2182
- Moravec J., Jirout T., Rieger F., 2005. *Vliv velikosti a koncentrace částic na suspenzační charakteristiku šestilopatkového míchadla v nádobě s rovným dnem*. CHISA 2005, CD (in Czech)

**Praca została wykonana w ramach Grantu FR-TII/005 finansowanego przez Ministerstwo Przemysłu i Handlu Republiki Czeskiej. Autorzy dziękują mgr Wandzie Ignatowskiej za współpracę przy tłumaczeniu tekstu.**