

Jerzy KAMIENSKI, Stanisław SPYTKOWSKI

e-mail: jkamen@usk.pk.edu.pl

Katedra Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

## Dyspergowanie gazu w cieczy w aparacie z dwoma oddzielnie napędzanymi mieszadłami

### Wstęp

Procesy zachodzące w układach wielofazowych często są prowadzone w aparatach z mieszadłami. Zależnie od potrzeb aparaty te mogą mieć różne proporcje, nie zawsze standardowe. W smukłych aparatach, w których wysokość napełnienia cieczą jest znacznie większa od ich średnicy, dla zapewnienia właściwego wymieszania i rozproszenia faz w całym układzie konieczne jest stosowanie kilku mieszadeł. Zwykle umieszcza się je na jednym wale, dbając o to, aby odstęp między nimi był odpowiedni, ani zbyt mały, ani zbyt duży.

Przy dyspergowaniu gazu w cieczy prowadzonym w aparacie z jednym mieszadłem nie jest ważne to, do jakiej wysokości jest on napełniony cieczą i jak daleko od dna jest umieszczone mieszadło, jeżeli tylko zachowany jest rodzaj wywołwanego przez nie przepływu. Podobnie jest w aparatach z kilkoma mieszadłami, znajdującymi się na tyle daleko od siebie, że wzbudzone przez nie strumienie cyrkulacji cieczy nie nakładają się na siebie. Wtedy rozpraszanie gazu w cieczy przez najniższe położone mieszadło następuje przy takich samych częstościach obrotów, jak w mieszalnikach z jednym mieszadłem. Zbliżanie do siebie mieszadeł powoduje jednak wzrost tych częstości, bowiem z racji recyrkulacji części gazu rozpraszanego przez wyżej położone mieszadło w okolicie dolnego mieszadła dociera więcej gazu niż doprowadza się do aparatu.

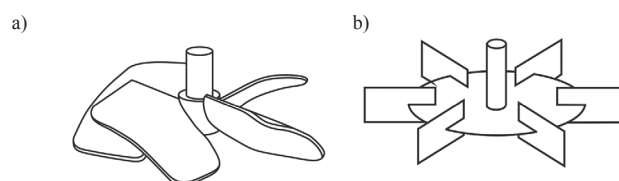
Sytuacja komplikuje się jeżeli oprócz gazu w cieczy ma być dyspergowane także ciało stałe. Nie ma bowiem mieszadeł które równie dobrze rozpraszająby w cieczy obydwie te fazy. Najlepiej w takich przypadkach stosować mieszadła różnych typów, przypisując im odmienne role, których realizację można osiągnąć wprowadzając indywidualne, niezależnie od siebie napędzane mieszadła.

### Cel i zakres badań

Do podrywania cząstek ciała stałego z dna aparatu i ich zawieszania w cieczy najlepiej nadają się te mieszadła, które wytwarzają przepływ osiowy lub promieniowo-osioowy, skierowany w dół, w kierunku dna. Niestety takie mieszadła źle rozpraszają gaz. Do tego najodpowiedniejsze są mieszadła promieniowe. Biorąc to uwagę w odniesieniu do mieszania układów trójfazowych ciecz – gaz – ciało stałe zaproponowano zastosowanie dwóch oddzielnie napędzanych mieszadeł, z których dolne – osiowe ma za zadanie podrywać ciało stałe i zawieszać je w cieczy, zaś górne – promieniowe dyspergować doprowadzany pod nie gaz. Powinien on być rozprowadzany w całej objętości cieczy, tym samym za kryterium oceny zdyspergowania układu przyjmuje się stan w którym pęcherze gazu zawieszane w strumieniu cieczy tłoczonym przez mieszadło, zaczynają już krążyć w całym aparacie. W klasycznych rozwiązaniach ze standardowo usytuowanymi mieszadłami promieniowymi zwykle przyjmuje się, że stan ten następuje po przekroczeniu częstości obrotów, przy których pęcherze gazu docierające do ścianki aparatu przedostają się dolnej jego części, poniżej mieszadła. W rozpatrywanym tutaj przypadku takie kryterium nie jest wystarczające; pełne rozproszenie gazu ma miejsce dopiero wtedy, gdy pęcherze gazu docierają do dna aparatu. Częstości obrotów górnego mieszadła przy jakich to następuje  $n_G$  przyjęto za graniczne, badając jaki wpływ na nie ma rodzaj i kierunek obrotów tego mieszadła, częstość obrotów dolnego mieszadła  $n_D$ , odstęp między obydwojma mieszadłami  $\Delta h$  oraz wydatek objętościowy podawanego gazu. Wyniki podane w tym arty-

kule dotyczą dyspergowania gazu w samej cieczy; wyniki dotyczące powstawania zawiesiny przedstawiono w [1, 2].

Badano prowadzono stosując dwa różne zestawy złożone z mieszadeł pokazanych na rys. 1. Dolnym było mieszadło A315 tłoczące ciecz w dół, górnym takie samo A315, albo turbinowe tarczowe TR.

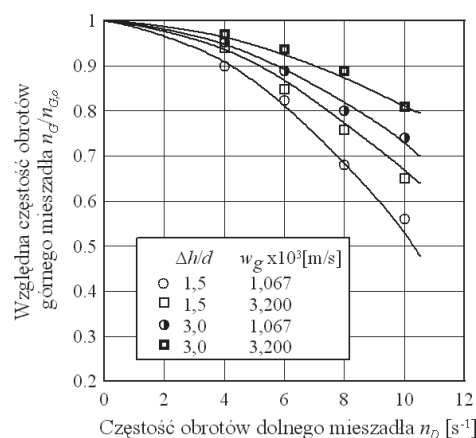


Rys. 1. Badane mieszadła a) A315, b) turbinowe tarczowe (turbina Rushtona) TR

Wszystkie mieszadła miały taką samą standardową średnicę  $d = D/3$ . Dolne mieszadło umieszczone było w odległości  $d$  od dna, zaś odstęp między mieszadłami zmieniano w zakresie  $\Delta h = (1,5-3)d$ . Badania wykonano w cylindrycznym zbiorniku o wewnętrznej średnicy  $D = 288$  mm, z płaskim dnem i czterema standardowymi przegrodami, napełnionym wodą do wysokości  $2D$ . Gazem było powietrze podawane rurką, centralnie bezpośrednio pod górne mieszadło. Jego umowna prędkość, liczona na pełny przekrój zbiornika, dochodziła do  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s.

### Wyniki badań

Obecność dolnego mieszadła wywołuje zmianę granicznych częstości obrotów górnego mieszadła, przy czym ich wartość zależy od wydatku objętościowego gazu, częstości obrotów dolnego mieszadła, rodzaju górnego mieszadła, wysokości jego zawieszenia w cieczy i kierunku obrotów. Na rys. 2 pokazano jak zmieniają się graniczne częstości obrotów górnego mieszadła turbinowego  $n_G$  w zależności od częstości obrotów dolnego mieszadła A315, w stosunku do występujących wtedy, gdy dolne mieszadło jest nieruchome –  $n_{G,o}$ .

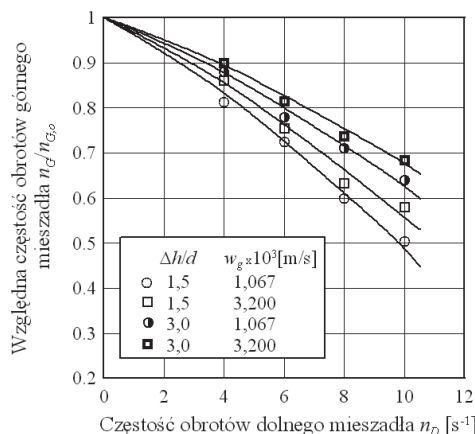


Rys. 2. Względna częstość obrotów górnego mieszadła TR w zależności od częstości obrotów dolnego mieszadła A315, dla różnych prędkości gazu i odstępów między mieszadłami. Zgodne kierunki obrotów mieszadeł

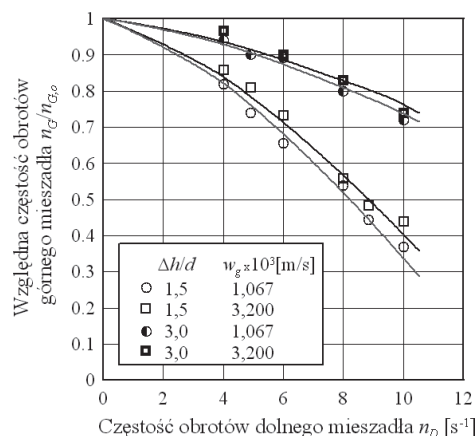
Jak widać wprawienie w ruch, w tym samym kierunku, dolnego mieszadła powoduje zmniejszenie granicznych częstości obrotów mieszadła dyspergującego gaz, tym większy, im szybciej obraca się dolne

mieszadło. Wielkość tego spadku zależy oczywiście od wydatku gazu oraz od odległości górnego mieszadła od dna zbiornika  $\Delta h+d$  (maleje on z ich wzrostem).

Podobna tendencje występują wtedy, gdy te mieszadła obracają się w przeciwnych kierunkach (Rys. 3), a także wtedy, gdy górnym mieszadłem jest A315 (Rys. 4). Inna jest jednak w tych przypadkach skala tej obniżki. Redukcja granicznych częstości obrotów mieszadła turbinowego w miarę zwiększania częstości obrotów dolnego mieszadła jest większa, gdy mieszadła obracają się w przeciwnych kierunkach, zwłaszcza wtedy, gdy odstęp między nimi jest niewielki.



Rys. 3. Względna częstość obrotów górnego mieszadła TR w zależności od częstości obrotów dolnego mieszadła A315, dla różnych prędkości gazu i odstępów między mieszadłami. Przeciwne kierunki obrotów mieszadła



Rys. 4. Względna częstość obrotów górnego mieszadła A315 w zależności od częstości obrotów dolnego mieszadła A315, dla różnych prędkości gazu i odstępów między mieszadłami. Zgodne kierunki obrotów mieszadła

W przypadku dwóch takich samych mieszadeł A315, toczących ciecz w dół, w kierunku dna aparatu, wpływ wydatku gazu jest niewielki (w badanym zakresie praktycznie pomijany). Bardzo silnie na graniczne częstości obrotów mieszadła dyspergującego gaz oddziałuje natomiast wysokość jego zawieszania. Wpływ ten znacznie silniejszy, niż w przypadku mieszadła turbinowego.

Względne wartości granicznych częstości obrotów górnego mieszadła, rozpraszającego doprowadzany pod niego gaz, wyznaczyć można z równania postaci:

$$\frac{n_G}{n_{G,0}} = 1 - C_1 Fr_D^a Re_g^b \left( \frac{\Delta h}{d} + 1 \right)^{c_1} \quad (1)$$

w którym:

$$Fr_D = \frac{n_D^2 d}{g} - \text{liczba Froude'a dla dolnego mieszadła,}$$

$$Re_g = \frac{w_g D \rho_g}{\eta_g} - \text{umowna liczba Reynoldsa dla gazu.}$$

Stała  $C_1$  i wykładniki  $a_1, b_1, c_1$  przyjmują dla badanych mieszadeł różne wartości, zebrane w tabeli 1. Podano w niej także wartości średniego błędu względnego aproksymacji tym równaniem.

Tab. 1. Stała i wykładniki w równaniu (1)

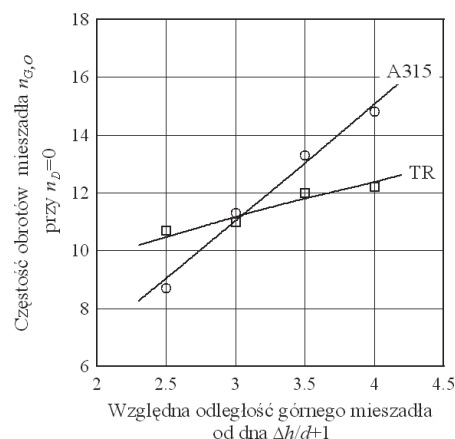
Zestaw mieszadeł	Kierunki obrotów	$C_1$	$a_1$	$b_1$	$c_1$	Średni błąd względny [%]
A315-TR	zgodne	3,486	0,900	-0,325	-1,190	3,3
A315-TR	przeciwne	1,436	0,613	-0,132	-0,672	2,3
A315-A315	zgodne	5,470	0,718	-0,096	-1,969	4,0

Występujące w równaniu (1) graniczne częstości obrotów górnego mieszadła  $n_{G,0}$ , przy jakich dyspergowany przez nie gaz dociera już do dna zbiornika wtedy, gdy dolne mieszadło nie obraca się, można wyznaczyć z zależności (2) z parametrami podanymi w tab. 2.

Tab. 2. Stała i wykładniki w równaniu (2)

Mieszadło	$C_2$	$b_2$	$c_2$	Średni błąd względny [%]
TR	0,380	0,094	0,715	3,3
A315	0,110	0	2,167	1,0

Jak widać w przypadku, gdy górnym mieszadłem rozpraszającym doprowadzany pod niego gaz jest tłoczona ciecz w dół mieszadło A315, w badanym zakresie zmian wpływ wydatku gazu na częstość obrotów  $n_{G,0}$  jest pomijalny. Jak można było się spodziewać silne oddziaływanie na te częstości wywiera natomiast odległość tego mieszadła od dna. Jest ono zdecydowanie większe przy mieszadło A315, w porównaniu z turbinowym tarczowym, co widać na rys. 5.



Rys. 5. Graniczne częstości obrotów mieszadła  $n_{G,0}$  w zależności od względnej odległości górnego mieszadła od dna zbiornika;  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s

## Uwagi końcowe

W przydatku umieszczenia mieszadła dyspergującego gaz, znacznie wyżej niż standardowo, wprowadzenie poniżej niego drugiego mieszadła pozwala rozpraszac gaz w całej objętości cieczy przy niższych częstościach obrotów górnego mieszadła. Takie rozwiązanie jest korzystne także z energetycznego punktu widzenia. Stwierdzono bowiem, że sumaryczna moc mieszania obydwu mieszadeł jest wtedy mniejsza od mocy mieszania samodzielnie pracującego górnego mieszadła, przy jakiej osiągnięty jest taki sam stopień rozproszenia gazu.

## LITERATURA

- [1] J. Kamiński, S. Szytkowski: Inż. Ap. Chem. **48**, nr 6, 94 (2009).
- [2] J. Kamiński, S. Szytkowski: Przem. Chem. **89**, 164. (2010).
- [3] J. Karcz, R. Siciarz, I. Bielka: Inż. Ap. Chem. **41**, nr 4s,74 (2002).
- [4] A. Kielbus-Rapala, J. Karcz: Inż. Ap. Chem. **48**, nr 6, 104 (2009).