

JERZY KAMIENSKI<sup>1</sup>ROZPRASZANIE GAZU W CIECZY Z UŻYCIEM DWÓCH  
INDYWIDUALNIE NAPĘDZANYCH MIESZADEŁGAS– LIQUID DISPERSION IN AGITATED VESSELS  
WITH TWO INDEPENDENTLY IMPELLERS

## Streszczenie

Przeprowadzono badania dyspersji gazu w cieczy w aparacie z dwoma oddzielnie napędzonymi mieszadłami. Gaz wprowadzono pod górne mieszadło, wyznaczając przy jakich częstościach jego obrotów dociera on do dna aparatu. Stan ten przyjęto za graniczny, badając jak wpływa na niego położenie i kierunki obrotów mieszadeł, wydatek gazu oraz częstość obrotów dolnego mieszadła.

*Słowa kluczowe: mieszanie, dyspergowanie gazu w cieczy*

## Abstract

Researches on mixing in gas-liquid system in a vessel with two independently driven impellers were carried out. Gas was fed under upper stirrer and the impeller rotational frequency for the case when gas reached the vessel bottom was determined. These conditions were accepted as a critical state and influence of mixer direction of rotation, its location in the vessel, gas flow rate and bottom stirrer direction of rotation on it was investigated.

*Keywords: mixing, gas dispersion in liquid*

<sup>1</sup> Prof. dr hab. inż. Jerzy Kamiński, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Procesy wymiany masy między gazem a cieczą, w których główny opór przenikania leży po stronie cieczy, można zintensyfikować stosując mieszanie mechaniczne. W aparatach o niewielkich pojemnościach stosuje się standardowo tylko jedno mieszadło. Przy większych, mających na ogół postać smukłych aparatów, utrzymanie odpowiedniej intensywności mieszania wymaga dodatkowych mieszadeł.

W aparacie z jednym mieszadłem rozpraszanie gazu w cieczy przebiega podobnie, niezależnie od wysokości napełnienia cieczą oraz usytuowania w niej mieszadła. Tak samo jest w aparatach z kilkoma mieszadłami, jeżeli są one dostatecznie oddalone od siebie na tyle, że wzbudzone przez nie strumienie cyrkulacji cieczy nie nakładają się. Rozpraszanie gazu przez najniżej położone mieszadło następuje wtedy przy takich samych częstościach obrotów, jak w aparacie z jednym mieszadłem. Zbliżanie mieszadeł do siebie powoduje wzrost tych częstości, ze względu na recyrkulację części gazu w okolicy dolnego mieszadła dociera bowiem więcej gazu niż wprowadza się do cieczy.

Jeżeli w cieczy oprócz gazu ma być dyspergowane także ciało stałe, to sytuacja komplikuje się. Nie ma bowiem mieszadeł które równie dobrze rozpraszaliby w cieczy obydwie te fazy. Najlepiej w takich przypadkach stosować mieszadła różnych typów, przypisując im różne cele, które można osiągnąć napędzając mieszadła oddzielnie, niezależnie od siebie.

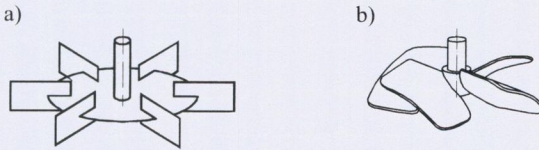
Do podrywania cząstek ciała stałego z dna aparatu i ich zawieszania w cieczy najlepiej nadają się mieszadła wytwarzające przepływ osiowy lub promieniowo-osiowy, skierowany w dół, w kierunku dna aparatu. Takie mieszadła jednak źle rozpraszają gaz, do tego celu najodpowiedniejsze są mieszadła promieniowe. Biorąc to uwagę zaproponowano stosowanie do wytwarzania układów trójfazowych ciecz-gaz-ciało stałe 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.

## 2. Cel i zakres badań

Tradycyjnie za kryterium oceny właściwego rozproszenia gazu w mieszanej cieczy przyjmuje się stan w którym pęcherze gazu krążą wraz z cieczą w całej jej objętości. W aparatach z jednym mieszadłem promieniowym ma to miejsce po przekroczeniu częstości obrotów, przy których pęcherze gazu docierające do ścianki aparatu na wysokości mieszadła, przedostają się już niżej, w dolne rejony aparatu. W rozpatrywanym tutaj przypadku takie kryterium nie jest wystarczające. Mieszadło dyspergujące gaz umieszczone jest bowiem znacznie wyżej, w większej odległości od dna, przez co pełne rozproszenie gazu występuje dopiero wtedy, gdy jego pęcherze docierają do dna aparatu.

Częstości obrotów górnego mieszadła przy jakich to następuje  $n_{G-dno}$  przyjęto za graniczne, badając jaki wpływ na nie ma kierunek obrotów tego mieszadła, częstość obrotów dolnego mieszadła  $n_D$ , odstęp między obydwoma mieszadłami  $\Delta h$  oraz wydatek objętościowy podawanego gazu, wyrażony przez umowną prędkość jego przepływu przez aparat  $w_g$ . Wyniki podane w tym artykule dotyczą dyspergowania gazu w samej cieczy; dane dotyczące powstawania zawiesiny przedstawiono w [1, 2].





Rys. 1. Stosowane mieszadła: a) turbinowe tarczowe, b) A315

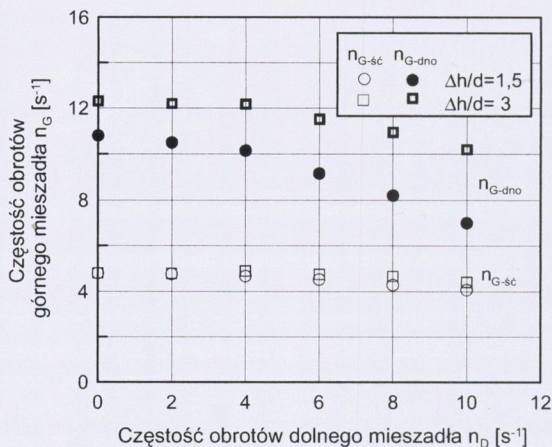
Fig. 1. The investigated impellers: a) Rushton turbine, b) A315

Badania wykonano w cylindrycznym zbiorniku o wewnętrznej średnicy  $D = 288$  mm, z płaskim dnem i czterema standardowymi przegrodami, napełnionym wodą do wysokości równej dwóm średnicom. Gazem było powietrze podawane rurką, centralnie bezpośrednio pod górne mieszadło. Jego umowna prędkość, liczona na pełny przekrój zbiornika, dochodziła maksymalnie do  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s. Górnym mieszadłem, pod które wprowadzano gaz, było mieszadło turbinowe tarczowe otwarte, w wykonaniu standardowym, dolnym – mieszadło A315. Obydwa mieszadła miały średnice  $d = D/3$ . Dolne mieszadło było umieszczone w odległości od dna równej jego średnicy, a odstęp między mieszadłami wynosił  $\Delta h = 1,5$  i  $3 \cdot d$ .

## 2. Wyniki badań

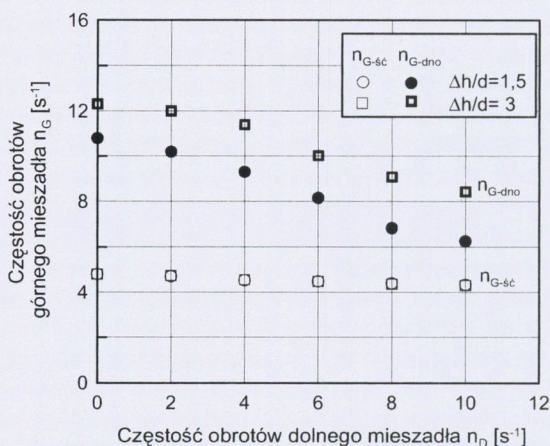
Obecność dolnego mieszadła wywołuje zmianę granicznych częstości obrotów górnego mieszadła, przy czym ich wartość zależy od wydatku objętościowego gazu, częstości obrotów dolnego mieszadła, wysokości zawieszenia górnego mieszadła w cieczy i kierunku jego obrotów. Na rysunku 2 pokazano jak zmieniają się graniczne częstości obrotów górnego mieszadła turbinowego przy jakich dyspergowany przez nie gaz dociera w postaci pęcherzy do ścianki aparatu na wysokości zawieszenia mieszadła –  $n_{G-śc}$  oraz do dna aparatu –  $n_{G-dno}$ , w zależności od częstości obrotów obracającego się w tę samą stronę dolnego mieszadła A315.

Jak widać wprawienie w ruch, w tym samym kierunku, dolnego mieszadła powoduje zmianę granicznych częstości obrotów mieszadła dyspergującego gaz. Częstości przy których pęcherze gazu docierają do ścianki  $n_{G-śc}$  zmieniają się nieznacznie, niewielki ich spadek występuje dopiero przy wyższych częstościach obrotów dolnego mieszadła, równie niewielki wpływ na nie ma odległość między mieszadłami. Istotne jest natomiast oddziaływanie dolnego mieszadła na graniczne częstości obrotów  $n_{G-dno}$  gwarantujące rozproszenie gazu w całej objętości cieczy, a więc osiągnięcie stanu gdy pęcherze docierają do dna aparatu. Wraz ze wzrostem częstości obrotów dolnego mieszadła analizowane częstości górnego mieszadła maleją, tym bardziej, im szybciej obraca się dolne mieszadło. Wielkość tego spadku zależy od odległości górnego mieszadła od dna zbiornika  $\Delta h + d$  (im jest ona większa, tym spadek ten jest mniejszy) oraz od wydatku wprowadzanego do cieczy gazu.



Rys. 2. Graniczne częstości obrotów mieszadła turbinowego przy jakich pęcherze gazu docierają do ścianki aparatu na wysokości mieszadła  $n_{G-śc}$  oraz do dna aparatu –  $n_{G-dno}$  w zależności od częstości obrotów dolnego mieszadła  $n_D$ . Zgodne kierunki obrotów mieszadeł,  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s

Fig. 2. Critical rotational frequency of Rushton turbine for the case when the gas bubbles reached wall at height of impeller –  $n_{G-śc}$  and the vessel bottom –  $n_{G-dno}$  as a function of lower impeller rotational frequency –  $n_D$ . Concurrent directions of the impellers revolutions,  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s



Rys. 3. Graniczne częstości obrotów mieszadła turbinowego przy jakich pęcherze gazu docierają do ścianki aparatu na wysokości mieszadła  $n_{G-śc}$  oraz do dna aparatu –  $n_{G-dno}$  w funkcji częstości obrotów dolnego mieszadła  $n_D$ . Przeciwnie kierunki obrotów mieszadeł,  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s

Fig. 3. Critical rotational frequency of Rushton turbine for the case when the gas bubbles reached wall at height of impeller  $n_{G-śc}$  and the vessel bottom –  $n_{G-dno}$  as a function of lower impeller rotational frequency –  $n_D$ . Opposite directions of the impellers revolutions,  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s



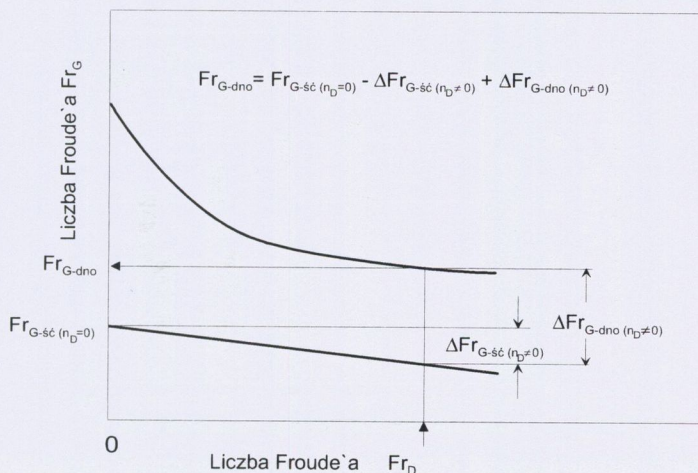
Podobne tendencje występują wtedy, gdy mieszadła obracają się w przeciwnych kierunkach (rys. 3). W tym przypadku skala tej obniżki jest jednak inna.

Redukcja granicznych częstości obrotów mieszadła turbinowego  $n_{G-dno}$  w miarę zwiększania częstości obrotów dolnego mieszadła A315 jest większa wtedy, gdy mieszadła obracają się w przeciwnych kierunkach, zwłaszcza przy niedużych odstępach między nimi.

Wyniki badań przedstawiono w formie bezwymiarowej (1) podającej wartości liczby Froude'a odpowiadającej granicznym częstościom obrotów mieszadła turbinowego  $n_{G-dno}$ , przy jakich dyspergowane przez to mieszadło pęcherze gazu docierają do dna aparatu.

$$Fr_{G-dno} = \frac{n_{G-dno}^2 d}{g} = Fr_{G-śc(n_D=0)} - \Delta Fr_{G-śc(n_D \neq 0)} + \Delta Fr_{G-dno} \quad (1)$$

Pierwsze dwa wyrazy po prawej stronie tego równania opisują wartości liczby Froude'a przy jakich pęcherze gazu osiągają ściankę aparatu na wysokości zawieszenia mieszadła turbinowego, pierwszy – pracującego samodzielnie, przy nieruchomym dolnym mieszadle A315 ( $n_D = 0$ ), drugi – jej zmianę wywołaną przez obracające się dolne mieszadło ( $n_D \neq 0$ ). Trzeci wyraz podaje o ile trzeba zwiększyć tę liczbę, aby osiągnąć pełne rozproszenie gazu w cieczy, przy którym pęcherze gazu docierają już do dna aparatu.



Rys. 4. Interpretacja równania (1)

Fig. 4. Interpretation of equation (1)

W wyniku obliczeń otrzymano szczegółowe postacie poszczególnych wyrazów równania (1):

– niezależnie od kierunku obrotów mieszadła turbinowego:

$$Fr_{śc(n_D=0)} = 0,098 \cdot Re_g^{0,20} \quad (2)$$

– przy takich samych kierunkach obrotów obydwu mieszadeł:

$$\Delta Fr_{\acute{s}c(n_{D\neq 0})} = 5,62 \cdot Fr_D^{0,95} \cdot Re_g^{-0,43} \cdot \left( \frac{\Delta h}{d} + 1 \right)^{-2,99} \quad (3)$$

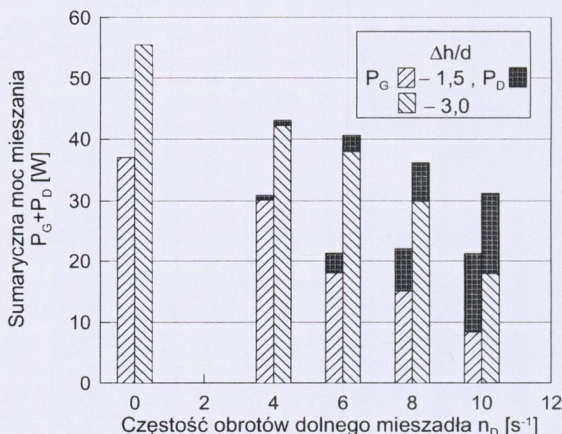
$$\Delta Fr_{G-dno} = 0,043 \cdot Fr_D^{-0,28} \cdot Re_g^{0,25} \cdot \left( \frac{\Delta h}{d} + 1 \right)^{1,36} \quad (4)$$

– przy przeciwnych kierunkach obrotów mieszadeł:

$$\Delta Fr_{\acute{s}c(n_{D\neq 0})} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot Fr_D^{-0,014} \cdot Re_g^{0,70} \cdot \left( \frac{\Delta h}{d} + 1 \right)^{1,73} \quad (5)$$

$$\Delta Fr_{G-dno} = 0,011 \cdot Fr_D^{-0,62} \cdot Re_g^{0,32} \cdot \left( \frac{\Delta h}{d} + 1 \right)^{1,75} \quad (6)$$

Średni błąd względny oszacowania wartości liczby Froude'a  $Fr_{G-dno}$  równaniem (1), z uwzględnieniem zależności (2) ÷ (4) wynosi 11 %, zaś z zależnościami (2), (5), (6) – 8,4 %.



Rys. 5. Sumaryczna moc mieszania obydwu mieszadeł przy granicznych częstościach obrotów mieszadła turbinowego  $n_{G-dno}$  w zależności od częstości obrotów dolnego mieszadła  $n_D$ .

Zgodne kierunki obrotów mieszadeł,  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s

Fig. 5. Total power mixing of two impellers at critical rotational frequency of Rushton turbine  $n_{G-dno}$  depending on rotational frequency of lower impeller  $n_D$ .

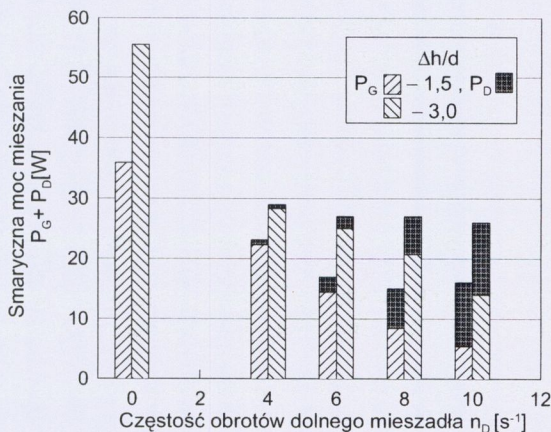
Concurrent directions of the impellers revolutions,  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3}$  m/s

W przydatku umieszczenia mieszadła turbinowego dyspergującego gaz, znacznie wyżej niż standardowo, wprowadzenie poniżej niego drugiego mieszadła osiowego A315,



pozwała rozpraszać 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 osiągany jest taki sam stopień rozproszenia gazu. Dla przypadków z rys. 2 i 3 pokazano to na rys. 4, 5. Jak widać dyspersja gazu w mieszanej cieczy przebiega najefektywniej wtedy, gdy mieszadła obracają się w przeciwnych kierunkach, dolne z częstością  $n_D \geq 6 \text{ s}^{-1}$ . Osiągnięcie takiego samego efektu, przy takich samych kierunkach obrotów mieszadeł wymaga większych nakładów mocy. W tym przypadku, przy małych odstępach między mieszadłami moc ta praktycznie nie zmienia się, zaś przy dużych odstępach ( $\Delta h = 3 \cdot d$ ) maleje wraz z rosnącymi obrotami dolnego mieszadła.



Rys. 6. Sumaryczna moc mieszania obydwu mieszadeł przy granicznych częstościach obrotów mieszadła turbinowego  $n_{G-dno}$  w zależności od częstości obrotów dolnego mieszadła  $n_D$ .  
Przeciwnie kierunki obrotów mieszadeł,  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Fig. 6. Total power mixing of two impellers at critical rotational frequency of Rushton turbine  $n_{G-dno}$  depending on rotational frequency of lower impeller  $n_D$ .  
Opposite directions of the impellers revolutions,  $w_g = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

### Oznaczenia

$d$	– średnica mieszadła	[m]
$D$	– średnica zbiornika	[m]
$\Delta h$	– odległość między mieszadłami	[m]
$g$	– przyspieszenie ziemskie	[m/s <sup>2</sup> ]
$n_D$	– częstość obrotów dolnego mieszadła	[s <sup>-1</sup> ]
$n_G$	– graniczne częstości obrotów górnego mieszadła	[s <sup>-1</sup> ]

$P_D$	–	moc mieszania dolnego mieszadła	[W]
$P_G$	–	moc mieszania górnego mieszadła	[W]
$w_g$	–	umowna prędkość przepływu gazu	[m/s]
$\eta_g$	–	dynamiczny współczynnik lepkości gazu	[Pas]
$\rho_g$	–	gęstość gazu	[kg/m <sup>3</sup> ]
$Fr_D = \frac{n_D^2 \cdot d}{g}$	–	liczba Froude'a dla dolnego mieszadła	
$Re_g = \frac{w_g \cdot D \cdot \rho_g}{\eta_g}$	–	liczba Reynoldsa dla gazu	

### Indeksy

<i>dno</i>	–	dotyczy stanu, gdy pęcherze gazu docierają do dna aparatu
<i>śc</i>	–	dotyczy stanu, gdy pęcherze gazu docierają do ścianki aparatu na wysokości górnego mieszadła

### Literatura

- [1] Kamiński J., Spytkowski S.: Inżynieria i Aparatura Chemiczna 48, (2009), 94-95.
- [2] Kamiński J., Spytkowski S.: Przemysł Chemiczny 89, (2010), 164-168.
- [3] Karcz J., Siciarz R., Bielka I.: Inżynieria i Aparatura Chemiczna 41, (2002), 74-76.
- [4] Kiełbus-Rapała A., Karcz J.: Inżynieria i Aparatura Chemiczna 48, (2009), 104-106.
- [5] Kamiński J.: *Mieszanie układów wielofazowych*, WNT, Warszawa 2004.