

Zatrzymanie gazu i moc mieszania w aparacie z zamkniętym mieszadłem turbinowym

Jerzy Kamiński

Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki
Politechnika Krakowska
Kraków

1. Wstęp

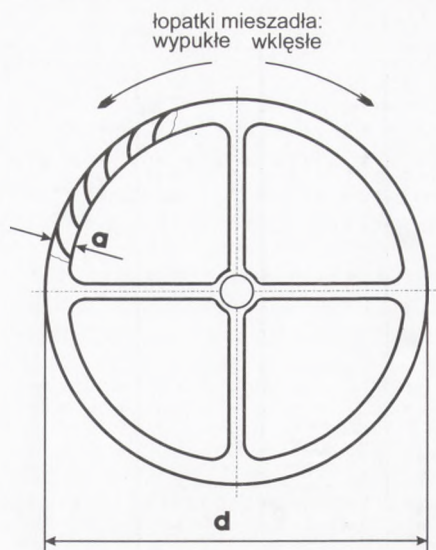
W wielu procesach prowadzonych w bioreaktorach, m.in. biosyntezy metodą hodowli wglębnej, zasadniczą sprawą jest zapewnienie efektywnego napowietrzania podłoża. W układach barbotowanych główny opór przenikania masy zwykle zlokalizowany jest po stronie cieczy. O szybkości jej transportu z pęcherzy gazowych do otaczającej cieczy decydują warunki hydrodynamiczne panujące w aparacie. Szczególnie istotną rolę odgrywają wymiary pęcherzy gazowych oraz prędkości ich ruchu i czasy przebywania w cieczy.

Wprowadzenie mechanicznego mieszania takiego układu intensyfikuje przebiegające w nich procesy. Mieszadło dysperguje bowiem doprowadzany gaz w postaci pojedynczych, małych pęcherzyków, rozprowadzając je równocześnie — dzięki wytworzonej w aparacie cyrkulacji cieczy — w miarę równomiernie w całej jego objętości, tym samym zapobiegając występowaniu w nim „martwych stref”. Rośnie zawartość gazu zatrzymanego, a tym samym i czas jego przebywania w cieczy, zwiększa się wyraźnie także powierzchnia kontaktu międzyfazowego, zaś skraca czas jej odnawiania. Dzięki temu wyniki biosyntezy osiągane w reaktorach mieszańdłowych niejednokrotnie są najlepsze [1].

Z wielu znanych rozwiązań mieszadeł w tego typu układach najczęściej stosowane są wysokoobrotowe mieszadła turbinowe, a spośród nich te o największym spektrum zastosowań — tarczowe z płaskimi, pionowymi łopatkami. Na podstawie uzyskanych wyników z przeprowadzonych niektórych badań wskazuje się jednak, że w takich przypadkach równie efektywne mogą być inne mieszadła, z inaczej ukształtowanymi łopatkami. Mogą one być pochylone [2,3] wygięte zarówno w płaszczyźnie pionowej (np. łopatki wklęsłe [4,5]) jak i w poziomej (łopatki zakrzywione [6]), a także mieć kształt inny niż prostokątny [7,8].

Przy większych objętościach cieczy procesy prowadzone są zazwyczaj w smukłych aparatach, w których wysokość napełnienia $H > \sim 1,25D$ i sta-

Rys. 1. Badane mieszadło turbinowe zakryte.



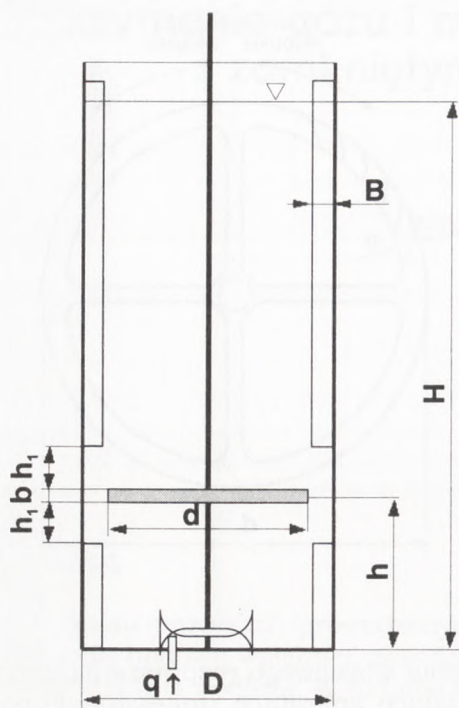
nowi wielokrotność średnicy. Dla zapewnienia właściwego rozpraszania gazu w całej objętości cieczy konieczne jest w takich aparatach umieszczenie na wale kilku mieszadeł. Ich liczba zależy od wysokości napełnienia oraz odległości między mieszadłami, wynoszącej zwykle $\Delta h = (1 \div 3) d$.

W pracy zaproponowano inne rozwiązanie, z jednym mieszadłem turbinowym tarczowym zakrytym, nowej konstrukcji. Schematycznie pokazano je na rysunku 1. Przypomina ono wirnik pompy odśrodkowej; w porównaniu ze znanymi mieszadłami ma jednak znacznie więcej łopatek, ale za to spiralnie zakrzywionych i o mniejszej szerokości.

Za cel postawiono sobie wyznaczenie ilości gazu zatrzymanego w mieszanej, barbotowanej cieczy oraz pobieranej w tych warunkach mocy mieszania, przy różnych parametrach: kinematycznych procesu (częstościach obrotów mieszadła, wydatkach podawanego gazu) i geometrycznych układu (zakrzywieniu łopatek mieszadła, wysokościach napełnienia aparatu cieczą). Porównanie tych wyników z otrzymanymi przez innych autorów w aparatach z dwoma mieszadłami klasycznej konstrukcji pozwoli ocenić na ile to rozwiązanie jest atrakcyjne i czy stanowi ono alternatywę dla dotychczas stosowanych.

Zawartość gazu zatrzymanego jest podstawową wielkością hydrodynamiczną, powszechnie używaną do opisu tego typu układów; jej wartość w zasadniczy sposób rzutuje bowiem na wytwarzaną powierzchnię międzyfazową. Równie znaczący parametr stanowi rzeczywista moc mieszania. Tradycyjnie występuje ona w ujęciach ilościowych, opisujących nie tylko zatrzymanie gazu w cieczy, ale i inne ważne wielkości procesowe, jak choćby wspomniana jednostkowa powierzchnia międzyfazowa czy zastępcza średnica wytworzonych pęcherzyków.

Rys. 2. Geometria badanego aparatu.



2. Zakres badań

Badania przeprowadzono w przezroczystym zbiorniku z płaskim dnem, o średnicy wewnętrznej $D = 0,288$ m, przy dwóch różnych wysokościach napełnienia go cieczą $H = 2D$ i $3D$. Wyposażony on był w cztery dzielone przegrody o standardowej szerokości $B = D/10$ usytuowane w odległości $h_1 = 0,2d$ od górnej i dolnej krawędzi mieszadła. Geometrię aparatu pokazano schematycznie na rysunku 2. Mieszadło o średnicy $d = 0,83D$ i wysokości $b = 0,1d$ miało 44 łopatki o szerokości $a = 0,05d$ i umieszczone było w odległości od dna równej średnicy zbiornika $h = D$ (a zatem zależnie od wysokości napełnienia w jej połowie lub jednej trzeciej). Analizowano dwa przypadki odpowiadające różnemu zakrzywieniu łopatek mieszadła w stosunku do kierunku jego obrotów: pierwszy, gdy były one wypukłe i drugi — wklęsłe.

Badano układ: woda-powietrze. Doprowadzane ono było przez pierścieniową bełkotkę usytuowaną centralnie, nad dnem zbiornika. Jego wydatek objętościowy zmieniano w trakcie badań w zakresie $(2,8 + 13,9) \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, co odpowiada $0,45 + 2,22 \text{ vvm}$ (przy $H = 2D$) i $0,3 + 1,5$ (przy $H = 3D$) oraz umownej prędkości przepływu gazu w przeliczeniu na pusty przekrój zbiornika $w_g = 4,3 \cdot 10^{-3} + 2,13 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$.

Moc mieszania wyznaczano na podstawie pomiarów momentu pierwotnego na wale mieszadła oraz częstości jego obrotów. Moment mierzono momen-

tomierzem indukcyjnym z dokładnością $\pm 0,01$ Nm, zaś częstość obrotów licznikiem z dokładnością ± 1 obr/min.

3. Wyniki badań

Objętość pęcherzyków gazu znajdujących się aktualnie w mieszaniu dwufazowej, nazywana powszechnie zawartością gazu zatrzymanego (ang. *hold-up*), przyjęło się podawać jako jego stosunek objętościowy ε bądź też udział objętościowy φ . W artykule posłużono się tym pierwszym — stosunkiem objętości zatrzymanego gazu do objętości cieczy ε . Wyznaczano go w oparciu na średniej wysokości mieszanki dwufazowej H_m , określanej na podstawie pomiarów wykonanych w kilku punktach jego przekroju poprzecznego, rozmieszczonych wzdłuż promienia między dwoma przegrodami, powtarzanych w czasie.

$$\varepsilon = \frac{H_m - H}{H} \quad (1)$$

Zawartość gazu zatrzymanego w objętości cieczy przedstawia się w literaturze przeważnie w formie korelacji wymiarowych postaci:

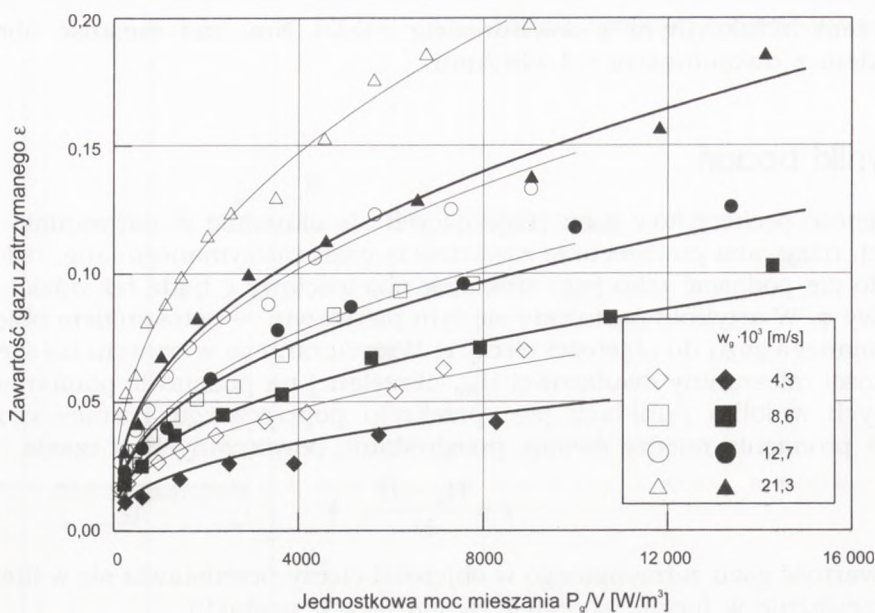
$$\varepsilon \text{ (lub } \varphi) = C \cdot \left(\frac{P_g}{V}\right)^m \cdot w_g^r \quad (2)$$

bądź też

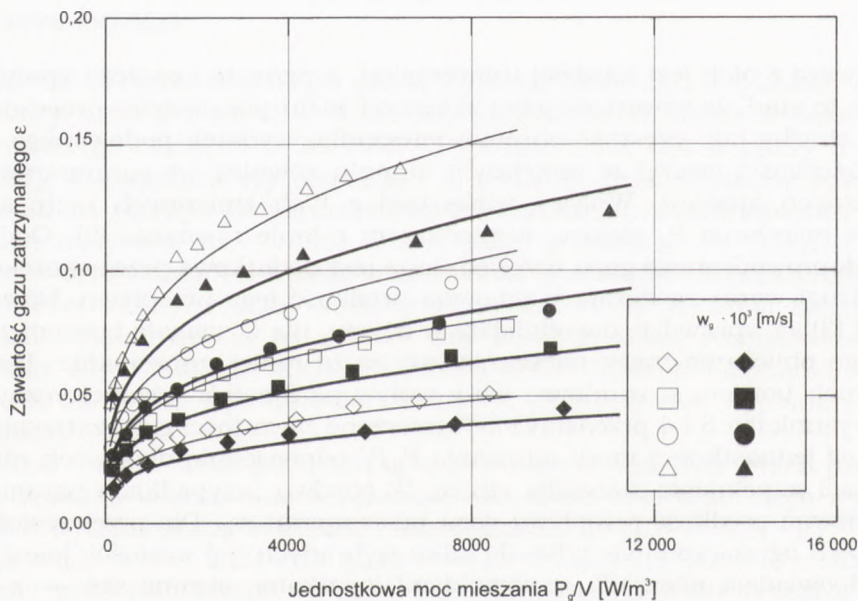
$$\varepsilon \text{ (lub } \varphi) = C \cdot n^p \cdot w_g^r \quad (3)$$

Pierwsza z nich jest bardziej uniwersalna, a przez to i częściej spotykana. Wynika to stąd, że zawartość gazu zależy od wielu parametrów procesowych, takich choćby jak: częstość obrotów mieszadła, wydatek podawanego gazu, czy właściwości cieczy; w mniejszym stopniu również od parametrów geometrycznych aparatu. Wpływy większości z tych zmiennych ujęte są już w mocy mieszania P_g stojącej w pierwszym członie równania (2). Oddziaływanie doprowadzanego gazu uwzględniane jest dodatkowo przez skorelowany z nią drugi wyraz zawierający umowną prędkość jego przepływu. Równania postaci (3) są wprawdzie dogodniejsze w użyciu, nie wymagają bowiem wcześniejszego obliczania mocy mieszania, ale za to mniej uniwersalne. Ujawnia się w nich bowiem stosunkowo silny wpływ parametrów geometrycznych.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono zmierzone zawartości gazu zatrzymanego w funkcji jednostkowej mocy mieszania P_g/V odpowiednio dla dwóch różnych wysokości napełnienia zbiornika cieczą. W obydwu przypadkach parametrem jest umowna prędkość przepływu gazu przez aparat w_g . Dla przejrzystości na rysunkach ograniczono się tylko do kilku wybranych jej wartości; jasne symbole odpowiadają mieszadłu z wypukłymi łopatkami, ciemne zaś — z wklęsłymi. Rozmieszczenie punktów pomiarowych wskazuje, że dla każdej z wysokości napełnienia wyniki badań można opracować w formie zależności (2).



Rys. 3. Zawartość gazu zatrzymanego w cieczy w funkcji jednostkowej mocy mieszania. Wysokość napełnienia $H = 2D$. Jasne symbole odpowiadają łopatkom wypukłym, ciemne — wklęsłym.



Rys. 4. Zawartość gazu zatrzymanego w cieczy w funkcji jednostkowej mocy mieszania. Wysokość napełnienia $H = 3D$. Jasne symbole odpowiadają łopatkom wypukłym, ciemne — wklęsłym.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano szczegółowe jej po-
stacie:

dla wysokości napełnienia $H = 2D$

$$\varepsilon = C \cdot \left(\frac{P_g}{V} \right)^{0,40} \cdot w_g^{0,71} \quad (4)$$

dla wysokości napełnienia $H = 3D$

$$\varepsilon = C \cdot \left(\frac{P_g}{V} \right)^{0,28} \cdot w_g^{0,71} \quad (5)$$

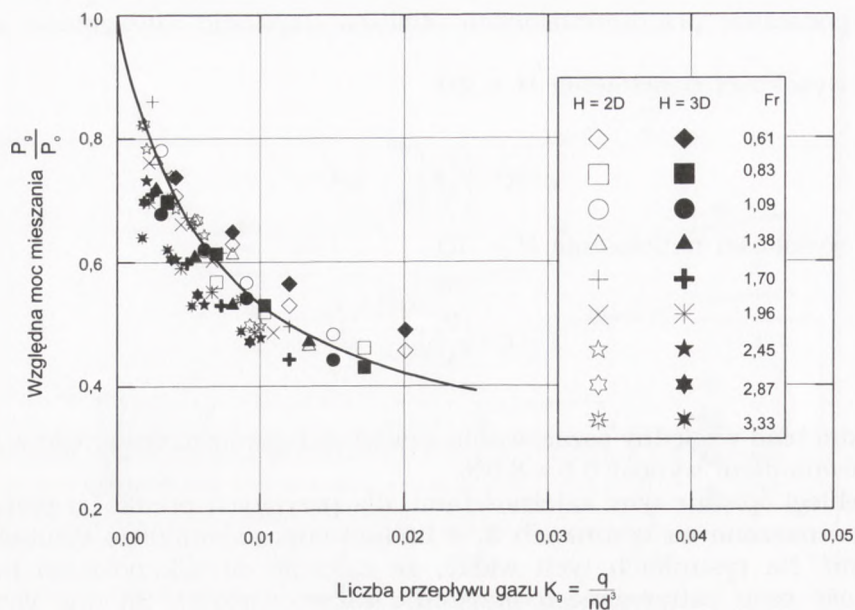
Średni błąd względny oszacowania zawartości gazu zatrzymanego w cieczy
tymi równaniami wynosi $5,5 + 8,5\%$.

Przebiegi opisane tymi zależnościami, dla przyjętych prędkości przepływu
gazu, zaznaczono na rysunkach 3, 4 liniami odpowiednimi do symboli gru-
bościami. Na rysunkach tych widać, że zależnie od zakrzywienia łopatek
zawartość gazu zatrzymanego przyjmuje różne wartości. Są one wyraźnie
większe przy wypukłych łopatkach, gdy mieszadło tłoczy ciecz na zewnątrz,
ku ściance zbiornika. W otrzymanych równaniach ujmuje to stała C , której
wartości zestawiono w tabeli 1.

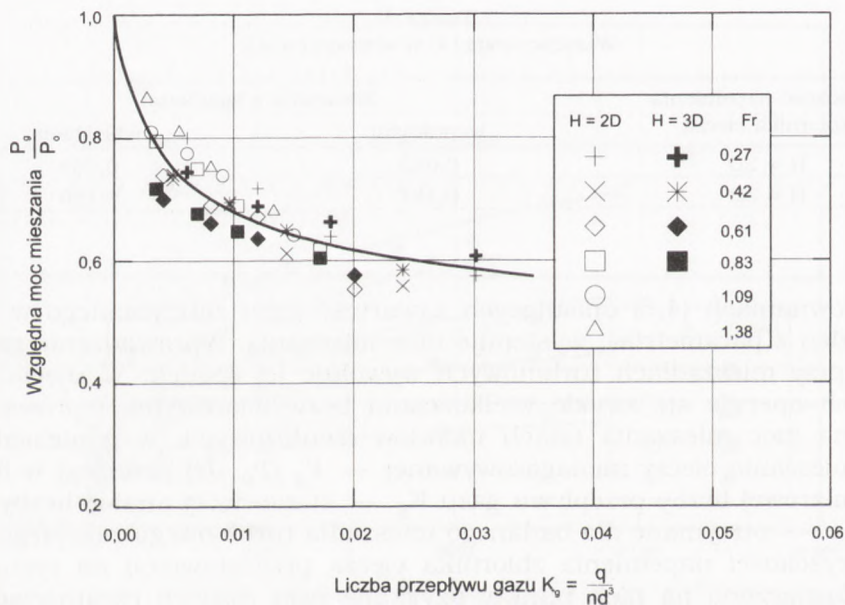
TABELA 1
WARTOŚCI STAŁEJ C W RÓWNANIACH (4,5)

Wysokość napełnienia zbiornika cieczą	Mieszadło z łopatkami	
	wypukłymi	wklesłymi
$H = 2D$	0,082	0,059
$H = 3D$	0,187	0,150

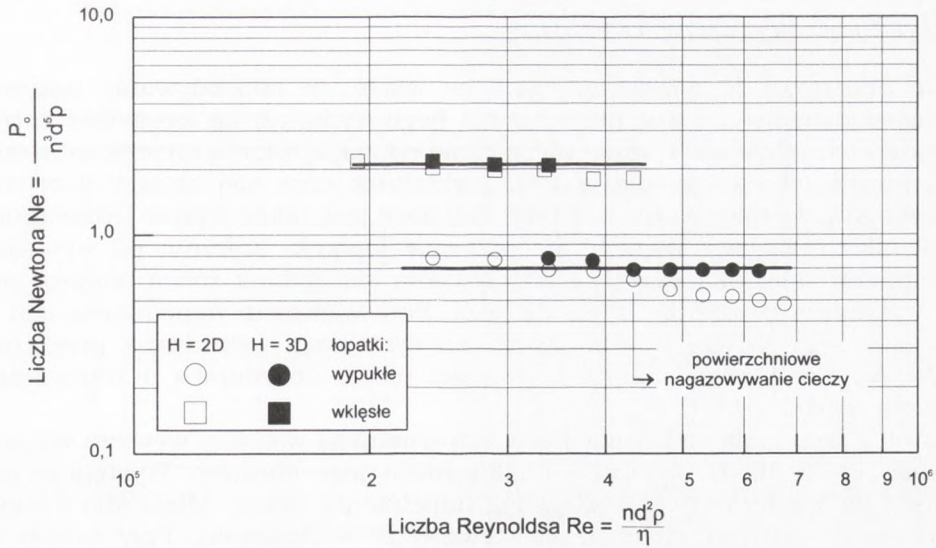
W równaniach (4,5) opisujących zawartość gazu zatrzymanego w cieczy
jako jeden z parametrów, występuje moc mieszania. Wprowadzenie gazu do
cieczy przy mieszadłach turbinowych wywołuje jej spadek. W ujęciach ilo-
ściowych operuje się zwykle wielkościami bezwymiarowymi, wprowadzając
względną moc mieszania takich układów dwufazowych; w odniesieniu do
mocy mieszania cieczy nienagazowywanej — P_g/P_o . Jej przebiegi w funkcji
bezwymiarowej liczby przepływu gazu K_g — stanowiącej analog liczby pom-
powania — otrzymane dla badanego mieszadła turbinowego zakrytego i róż-
nych wysokości napełnienia zbiornika cieczą przedstawiono na rysunkach
5, 6. Zaznaczono na nich punkty uzyskane przy różnych częstościach ob-
rotów mieszadła (różnych wartościach liczby Froude'a dla mieszania Fr).
Ogólna tendencja zmian w obydwu przypadkach, jak widać, jest taka sama;
ze wzrostem liczby przepływu gazu (wzrostem wydatku gazu lub spadkiem



Rys. 5. Względna moc mieszania w funkcji liczby przepływu gazu dla mieszadła z łopatkami wypukłymi. Jasne symbole odpowiadają wysokości napełnienia $H = 2D$, ciemne $H = 3D$.



Rys. 6. Względna moc mieszania w funkcji liczby przepływu gazu dla mieszadła z łopatkami wklęsłymi. Jasne symbole odpowiadają wysokości napełnienia $H = 2D$, ciemne $H = 3D$.



Rys. 7. Charakterystyki mocy badanego mieszadła. Jasne symbole odpowiadają: wysokości napełnienia cieczą $H = 2D$, ciemne — $H = 3D$, kółka — łopatkom wypukłym, prostokąty — wklęsłym.

częstości obrotów mieszadła) względna moc mieszania maleje, początkowo szybko, później wolniej, dążąc do stałej wartości. Natomiast, w podanym zakresie zmian, zarówno liczba Froude'a, jak i wysokość napełnienia, praktycznie na nią nie wpływają.

Tym samym względna moc mieszania opisano zależnościami:

dla mieszadła z wypukłymi łopatkami, w zakresie $0,61 \leq Fr \leq 3,33$

$$\frac{P_g}{P_o} = 0,24 + \frac{0,76}{1 + 160 \cdot K_g} \quad (6)$$

i analogicznie dla mieszadła z łopatkami wklęsłymi oraz $0,27 \leq Fr \leq 1,38$

$$\frac{P_g}{P_o} = 0,44 + \frac{0,42}{1 + 32 \cdot K_g^{0,69}} \quad (7)$$

Równania te pozwalają oszacować względną moc ze średnim błędem względnym wynoszącym odpowiednio: 5,8 i 7,4%.

Występującą w nich moc mieszania samej cieczy bez gazu P_o można wyznaczyć znając wartość liczby Newtona Ne jako:

$$P_o = Ne \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot \rho \quad (8)$$

W przebadanym zakresie przepływu burzliwego w aparacie liczba Newtona przyjmuje stałe wartości, niezależnie od wysokości napełnienia zbiornika (rys. 7), dla mieszadeł: z wypukłymi łopatkami $Ne = 0,7$ zaś z wklęsłymi — $Ne = 2,1$.

4. Dyskusja wyników badań

Na podstawie otrzymanych wyników widać, że oddziaływanie umownej prędkości przepływu gazu przez aparat (jego wydatku) na zawartość zatrzymaną w cieczy jest takie samo niezależnie od zakrzywienia łopatek mieszadła oraz wysokości napełnienia cieczą. Wykładnik przy niej stojący przyjmuje bowiem zawsze taką samą wartość. Podobny jest także wpływ jednostkowej mocy mieszania, bez względu na wygięcie łopatek. Zależnie od wysokości napełnienia zbiornika siła jej oddziaływania jest jednak różna; stojący przy niej wykładnik przyjmuje inne wartości. Przy większym napełnieniu jest on mniejszy, słabsza jest bowiem wówczas cyrkulacja wzbudzana przez mieszadło w górnej części aparatu, powyżej niego, decydująca o zatrzymaniu pęcherzy gazu.

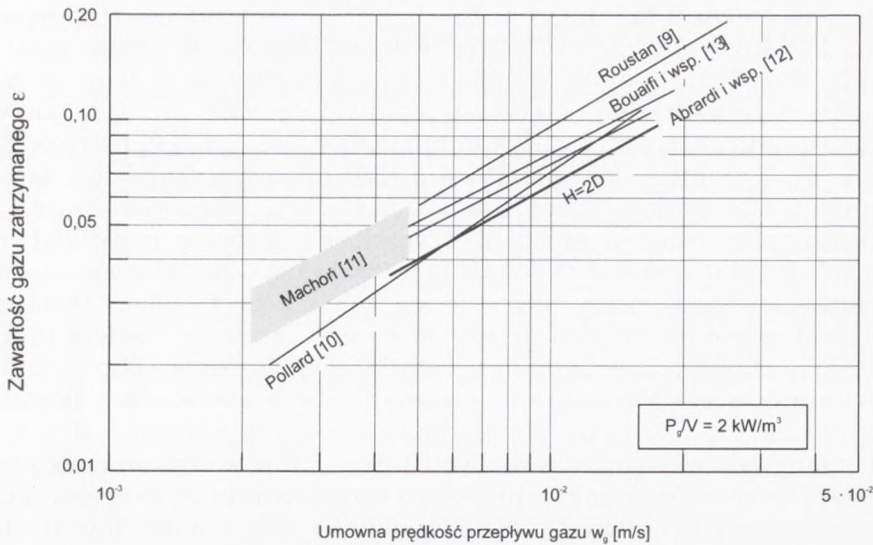
Istotny wpływ na zawartość gazu zatrzymanego w cieczy wywiera wygięcie łopatek mieszadła w stosunku do kierunku jego obrotów. Występuje przy tym wyraźna interakcja z wysokością napełnienia cieczą. Mieszadło z wypukłymi łopatkami jest znacznie efektywniejsze w działaniu. Przy takich samych: jednostkowej mocy mieszania i prędkości przepływu gazu, pozwala ono bowiem zatrzymać od 25% (przy $H = 3D$) do 39% (przy $H = 2D$) więcej gazu w mieszanej cieczy niż mieszadło z łopatkami wklęsłymi. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że z kolei przy takich samych: częstościach obrotów i wydatkach podawanego gazu moc mieszania przy wklęsłych łopatkach P_g jest 2,2 + 3,5 razy większa niż przy wypukłych. W efekcie powoduje to, że w takich warunkach i przy takiej konfiguracji łopatek można uzyskać większe zawartości gazu nawet do 12% (przy $H = 3D$) i 19% (przy $H = 2D$).

W układzie cieczy barbotowanej mieszadło z wklęsłymi łopatkami gazem nie pracuje jednak równomiernie. W obszarze bezpośredniego jego działania obserwuje się duże różnice lokalnych, chwilowych zawartości gazu w cieczy. Cyklicznie pojawiają się i zanikają na przemian strumienie zawierające bardzo dużo pęcherzyków gazowych oraz praktycznie ich pozbawione, tym częściej im wyższe są częstości obrotów mieszadła. Wówczas gdy łopatki mieszadła są wypukłe zjawisko takie w ogóle nie występuje, ma miejsce równomierne i stabilne dyspergowanie gazu.

Wyniki badań własnych porównano z otrzymanymi przez innych autorów w aparatach o podobnej geometrii, lecz z dwoma mieszadłami turbinowymi osadzonymi na wspólnym wale. Wartości stałych oraz wykładników z równania postaci (2) podane przez tych autorów zebrano w tabeli 2.

Pod uwagę wzięto mieszadło z wypukłymi łopatkami. Ogólnie można stwierdzić, że w tym przypadku zawartość gazu zatrzymanego w cieczy mieszanej jest podobna jak przy dwóch klasycznych mieszadłach turbinowych (rys. 8).

Wykładniki stojące przy umownej prędkości przepływu gazu (z wyjątkiem podanego przez Pollarda [10]) obejmują stosunkowo wąski przedział wartości, a wyznaczona dla badanego mieszadła bliska jest górnej jego granicy. Z kolei, przy wysokości napełnienia $H = 2D$, wpływ jednostkowej mocy mieszania jest silniejszy niż przy znanych mieszadłach turbinowych. Wykładnik stojący przy mocy w równaniu (4) jest zdecydowanie większy od podanych w tabeli 2.



Rys. 8. Zależność zawartości gazu zatrzymanego od umownej prędkości przepływu gazu dla układów dwóch mieszadeł turbinowych na wale i badanego mieszadła zakrytego.

TABELA 2

WARTOŚCI STAŁYCH WYKŁADNIKÓW W RÓWNANIACH POSTACI (2) WEDŁUG DANYCH LITERATUROWYCH, W APARATACH Z DWOMA MIESZADŁAMI NA WALE

Stała C	Wykładniki		Uwagi		Literatura
	m	r	H/D	mieszadła turbinowe z łopatkami	
0,223	0,33	0,73	2	prostymi, tarczowe	[9]
0,485	*0,27	0,86	2,18	pochylonymi $\alpha = 85^\circ$	[10]
0,133	0,375	0,690	2	prostymi, tarczowe	[11]
0,155	0,311	0,659		górne: pochylonymi $\alpha = 45^\circ$ dolne: prostymi, tarczowe	
0,350	0,228	0,723		górne: pochylonymi $\alpha = 135^\circ$ dolne: prostymi, tarczowe	
0,210	0,270	0,665	5/3	prostymi, tarczowe	[12]
0,26	0,24	0,65	2	górne: pochylonymi $\alpha = 45^\circ$ dolne: prostymi, tarczowe	[13]

*W równaniu (2) występuje moc efektywna będąca sumą mocy mieszania P_g i części strumienia energii doprowadzanej wraz z gazem P_q .

Spadek mocy towarzyszący wprowadzeniu gazu do mieszanej cieczy jest dla badanego mieszadła większy niż dla innych klasycznych turbinowych

[16-18] i ma miejsce już przy bardzo małych wartościach liczby przepływu gazu K_g (a zatem małych wydatkach wprowadzanego do cieczy gazu bądź wysokich częstościach obrotów mieszadła). Świadczy to o tym, że w tym przypadku, w bezpośrednim otoczeniu łopatek mieszadła gromadzi się więcej gazu niż za mniej licznymi łopatkami mieszadeł klasycznej konstrukcji. Liczba mocy analizowanego mieszadła jest o rząd mniejsza niż dwóch mieszadeł turbinowych standardowej geometrii osadzonych na wspólnym wale.

Uwzględniając różne w obydwu przypadkach średnice mieszadeł można stwierdzić, że proponowane rozwiązanie pozwala uzyskać podobne zawartości gazu zatrzymanego w cieczy już przy znacznie niższych, blisko dwukrotnie, częstościach obrotów. Jest to niezwykle istotne, pozwala bowiem pracować w zakresie częstości odległym od krytycznych, przy wyraźnym obniżeniu drgań układu napędowego. Mieszadło to sytuowane było wysoko, w odległości od dna $h = D$, znacznie wyżej niż standardowe mieszadła turbinowe ($h = 0,33D$). Dzięki temu wał mieszadła może być krótszy; uniknąć można podpierania go w dnie aparatu. Wyeliminowanie tego łożyskowania w bioreaktorach nie tylko upraszcza ich budowę, ale także ułatwia eksploatację (nie następuje zarastanie biomasą, nie ma kłopotów ze smarowaniem).

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki badań proponowane rozwiązanie z jednym zamkniętym mieszadłem turbinowym można zatem uznać za w pełni alternatywne w stosunku do dotychczas stosowanych, z kilkoma mieszadłami klasycznej konstrukcji umieszczanymi na wspólnym wale, a pod względem ruchowym nawet korzystniejsze.

Wykaz oznaczeń

a — szerokość łopatki mieszadła, m; b — wysokość mieszadła, m; C — stała; D — wewnętrzna średnica zbiornika, m; d — średnica mieszadła, m; g — przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ; H — wysokość napełnienia zbiornika cieczą, m; H_m — wysokość mieszaniny dwufazowej, m; h — odległość mieszadła od dna zbiornika, m; h_1 — odległość przegrody od krawędzi mieszadła, m; n — częstość obrotów mieszadła, $1/s$; m, p, r — wykładniki; q — objętościowy strumień gazu, m^3/s ; P_o — moc mieszania cieczy, W; P_g — moc mieszania cieczy barbotowanej gazem, W; P_q — strumień energii doprowadzanej z gazem, W; w_g — umowna prędkość przepływu gazu (liczona na pusty przekrój zbiornika), m/s ; V — objętość cieczy, m^3 ; α — kąt pochylecia łopatki mieszadła względem płaszczyzny obrotu (do poziomu), °; η — dynamiczny współczynnik lepkości cieczy, $kg/(ms)$; ρ — gęstość cieczy, kg/m^3 ; ϵ — zawartość gazu (stosunek objętościowy gazu w cieczy), m^3 gazu/ m^3 cieczy; ϕ — zawartość gazu (udział objętościowy gazu w mieszaninie), m^3 gazu/ m^3 mieszaniny.

Moduły bezwymiarowe

$$Fr = \frac{n^2 d}{g} \text{ — liczba Froude'a dla procesu mieszania}$$

$$K_g = \frac{q}{nd^3} \text{ — liczba przepływu gazu}$$

$$Ne = \frac{P_o}{n^3 d^5 \rho} \text{ — liczba Newtona dla procesu mieszania (liczba mocy)}$$

$$Re = \frac{nd^2 \rho}{\eta} \text{ liczba Reynoldsa dla procesu mieszania}$$

Literatura

1. Leśniak W., Pietkiewicz J., Podgórski W., (1993), *Biotechnologia*, 3 (22), 48-55.
2. Medek J., Fort. F., (1997), *Mixing IX Multiphase Systems. Récents Progrés en Génie des Procédés*, 52, 107-114.
3. Machoń V., Ferlane C. M., Nienow A. W., (1991), *Materiały 7th European Conference on Mixing*, Brugge, 243-249.
4. Warmoeskerken M. M. C. G., Smith J. M., (1989), *Chem. Eng. Res. Des.*, 67, 193-198.
5. Karcz J., Abragimowicz A., (1996), *Materiały VII Ogólnopolskiego Seminarium „Mieszanie”*, Kołobrzeg, 91-100.
6. Pandit A. B., Rielly C. D., Niranjan K., Davidson J. F., (1989), *Chem. Eng. Sci.*, 11, 2463-2474.
7. Kamiński J., (1996), *Inż. Chem. Proc.*, 4, 565-572.
8. Kamiński J., (1996), *Materiały VI Ogólnokrajowej Konferencji Naukowej „Postępy Inżynierii Bioreaktorowej”*, Łódź.
9. Roustan M., (1978), Thesis, Université de Toulouse.
10. Pollard R., (1978), *Materiały Proc. Int. Symp. on Mixing*, Mons.
11. Machoń V., Vlček J., Hudcova V., (1987), *Materiały Seminarium „Badania przenoszenia pędu, ciepła i masy w mieszalnikach”*, Szczecin.
12. Abrardi V., Rovero G., Sicardi S., Baldi G., Conti R., (1988), *Materiały 6th European Conference on Mixing*, Pavia, 329-336.
13. Bouaifi M., Roustan M., Djebbar R., (1997), *Mixing IX Multiphase Systems. Récents Progrés en Génie des Procédés*, 52, 137-144.
14. Nocentini M., Magelli F., Pasquali G., Fajner D., (1988), *Chem. Eng. Sci.*, 1, 53-59.
15. Kamiński J., (1993), *Wybrane zagadnienia mechanicznego mieszania układów ciecz-gaz*, Politechnika Krakowska, Monografia 147, Kraków.
16. Calderbank P. H., (1958), *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 36, 443-463.
17. Zlokarnik M., (1973), *Chem. Ing. Techn.*, 10a, 689-692.
18. Rzycki E., (1979), *Inż. Ap. Chem.*, 3, 31-32.

Hold-up and mixing power in vessel with closed turbine impeller**Summary**

Measurements of hold-up and mixing power in air-water system for a new closed turbine impeller have been carried out. The influence of liquid level in the vessel and direction of bending blades has been investigated. The hold-up has been described by dimensional correlations (4), (5) and illustrated in Fig. 3, 4. One of the parameters in the equations is a specific mixing power in two-phase gas-liquid system. It has been described by the undimensional equations

(7) and (8) as the dependence of the relative power on gas flow number and illustrated in Fig. 5, 6.

The results of tests show that the effect of gas capacity on liquid hold-up is not dependent on the bending of the blades and the liquid level. The effect of the power of mixing changes depending of the liquid level. It becomes smaller with the increase of the liquid level. A more effective mixer is one with convex blades. It can achieve the similar constants of hold-up gases as in vessel with two turbine mixers of typical desing, but with twice smaller frequency of revolutions.

key words:

mixing, gas-liquid system, hold-up, mixing power.

Adres do korespondencji:

Jerzy Kamiński, Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków.