

z. 2-M/2008 ISSN 0011-4561 ISSN 1897-6328

ANDRZEJ DUDA, JERZY KAMIEŃSKI, JAN TALAGA*

WYDAJNOŚĆ POMPOWANIA W MIESZALNIKU Z DWOMA MIESZADŁAMI NA WALE

THE PUMPING EFFICIENCY IN DUAL IMPELLER AGITATOR

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki obliczeń wydajności pompowania dla różnych zestawów mieszadeł w mieszalniku dwustopniowym. Określono wpływ odległości pomiędzy dwoma mieszadłami na wartość sumarycznej wydajności pompowania. Zaprezentowano również wartości liczby pompowania wyznaczone dla poszczególnych mieszadeł w układach dwustopniowych. Słowa kluczowe: mieszalnik dwustopniowy, wydajność pompowania

Abstract

The results of pumping efficiency for different impeller configurations in dual impeller agitator were presented. The influence of the impellers' spacing on the overall pumping efficiency was evaluated. The flow numbers calculated for separate impellers in dual systems were discussed. Keywords: dual impeller, pumping efficiency, impeller spacing

Mgr inż. Andrzej Duda (doktorant), prof. dr hab. inż. Jerzy Kamieński, dr inż. Jan Talaga, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Aparaty zbiornikowe z dwoma mieszadłami mechanicznymi umieszczonymi na wspólnym wale, tj. mieszalniki z dwustopniowym układem mieszadeł, stosowane są w aparatach o wskaźniku smukłości większym od jedności. Wysokość napełnienia cieczą w tych aparatach jest większa od wartości standardowej, równej średnicy zbiornika. Konieczność zastosowania drugiego mieszadła występuje zwykle już przy $H \ge 1,2 D$ [1, 2]. Rozwiązanie takie zapewnia wytworzenie odpowiednio intensywnej cyrkulacji cieczy w całej objętości mieszalnika, zachodzącej w wyniku nakładania się przepływów generowanych przez obydwa mieszadła. Cyrkulacja cieczy w aparacie jest z kolei ściśle związana z wydajnością pompowania samych mieszadeł, która charakteryzuje strumień cieczy przepływający przez łopatki mieszadła, analogicznie jak w przypadku wirnika pompy. Obydwie te wielkości są do siebie proporcjonalne, co potwierdza wiele prac [3-5]. W opracowaniach tych podkreślana jest również teza, że dla mieszalnika wyposażonego w turbiny Rushtona wydajność cyrkulacji w całym mieszalniku jest około dwukrotnie większa od wydajności pompowania pojedynczego mieszadła. Jednak mając na uwadze ilość i różnorodność procesów, w jakich mają zastosowanie mieszalniki z dwustopniowym układem mieszadeł, powyższe proporcje należy traktować jako ogólne i przybliżone. Wnikliwe studium zmian wydajności pompowania oraz wydajności objętościowej cyrkulacji cieczy w mieszalniku, dla różnych typów mieszadeł, można znaleźć w pracach [6–8]. Autorzy ci jednak przeprowadzili badania tylko w aparatach z jednym mieszadłem.

Geometria mieszadeł oraz ich wzajemne usytuowanie w mieszalniku dwustopniowym ma decydujący wpływ na generowaną przez nie cyrkulację cieczy w aparacie, a w konsekwencji tego na przebieg mieszania i efekty realizowanego procesu technologicznego. Wśród wielu parametrów geometrycznych szczególnie istotne znaczenie w takim przypadku wydaje się mieć odległość pomiędzy mieszadłami. Wpływ tego parametru na wydajność pompowania cieczy w mieszalniku dwustopniowym był do tej pory przedmiotem bardzo niewielu prac. Aparaty z dwoma mieszadłami wykorzystywano przykładowo w pracach [9–12], jednak badania dotyczyły głównie procesów dyspergowania w cieczy gazów lub innych cieczy, a autorzy skoncentrowali się na efektach samego procesu, takich jak średnica wytwarzanych kropel cieczy lub pęcherzy gazu czy też czas i moc mieszania.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki obliczeń wydajności pompowania dla różnych zestawów mieszadeł w mieszalniku dwustopniowym. Określono wpływ odległości pomiędzy dwoma mieszadłami na wartość sumarycznej wydajności pompowania. Zaprezentowano również wartości liczby pompowania wyznaczone dla poszczególnych mieszadeł w układach dwustopniowych.

2. Warunki prowadzenia badań i obliczeń

Obliczeń dokonano na podstawie wartości średnich prędkości cieczy w mieszalniku. Do obliczeń wykorzystano składowe promieniowe i osiowe prędkości, zmierzone w najbliższym otoczeniu mieszadeł. Pomiarów prędkości przepływu cieczy dokonano za pomocą dwukanałowego anemometru laserowego (argonowo-jonowego).

Lp.	Dolne mieszadło	Górne mieszadło	Symbol konfiguracji
1	TR-6	TR-6	TT
2	TR-6	PBT-6	TS
3	PBT-6	PBT-6	SS
4	PBT-6	TR-6	ST
5	A-315	TR-6	AT
6	HE-3	TR-6	HT

Zestawienie kombinacji mieszadeł stosowanych w mieszalniku dwustopniowym

Pomiary prędkości przeprowadzono w mieszalniku o średnicy wewnętrznej D = 286mm z dnem płaskim, wyposażonym w cztery przegrody sięgające do dna aparatu. Wysokość napełnienia cieczą wynosiła H = 1,5 D. Średnica mieszadeł wynosiła $d \approx 1/3 D = 95$ mm. Odległość pomiędzy mieszadłami zmieniano w granicach $\Delta h = (0,5-2)d$, przy czym dolne mieszadło usytuowane było zawsze w odległości h = 0,5d od dna zbiornika. Mieszaną cieczą był sulfotlenek dwumetylu ($\rho_c = 1100 \text{ kg/m}^3$, $\eta_c = 0,0023 \text{ Pa-s}$). Częstość obrotowa mieszadła była stała i wynosiła 5 s⁻¹, co gwarantowało prowadzenie procesu w warunkach ruchu turbulentnego w mieszalniku.



Rys. 1. Schemat rozkładu prędkości w obszarze mieszadła

Fig. 1. The sketch of the velocity distribution in the impeller region

Do badań wykorzystano mieszadła o czterech różnych geometriach: turbinę tarczową z sześcioma łopatkami TR-6, turbinę z sześcioma pochylonymi łopatkami PBT-6, a także mieszadła typu *hydrofoil*: Lightnin A315 oraz Chemineer HE-3. Konstrukcje te zostały opisane w [2, 13]. Zestawienie oraz oznaczenia badanych konfiguracji mieszadeł pokazano w tabeli 1.

Wydajność pompowania mieszadła determinuje, zgodnie z literaturą [1, 2], strumień cieczy przepływający przez to mieszadło w kierunku osiowym bądź promieniowym. Zgodnie z tym, wartość Q_p tego wydatku jest proporcjonalna do obrotów mieszadła oraz jego średnicy

$$Q_p = \mathbf{K}_p \cdot \boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{d}^3 \tag{1}$$

gdzie K_p jest bezwymiarową liczbą wydajności pompowania, zależną od geometrii mieszadła i dla Re > 10³ niezmieniającą się z liczbą Reynoldsa [2]. Przy opisie wydajności pompowania, częściej stosuje się bezwymiarową liczbę K_p jako bardziej uniwersalną

$$K_{p} = \frac{Q_{p}}{n \cdot d^{3}}$$
(2)

W celu wyznaczenia liczb wydajności pompowania K_p dla poszczególnych zestawów mieszadeł obliczano wydatek Q_p , całkując profile odpowiednich składowych prędkości średnich w bezpośrednim sąsiedztwie mieszadeł. Schematycznie pokazano to na rys.1 dla zestawu dwustopniowego AT. Metodyka obliczania wydatku cieczy Q_p pompowanej przez wirnik mieszadła została szczegółowo opisana w pracy [1]. W niniejszej publikacji zastosowano ten sposób do układów dwóch mieszadeł zamocowanych na jednym wale. Całkowity wydatek mieszadła Q_p jest zgodnie z rys.1. równy wartości strumienia wpływającego z lub wypływającego do każdego z dwóch mieszadeł, zgodnie z kierunkami i zwrotami wektorów składowych prędkości średnich

$$Q_{p} = Q_{p1}^{(+)} + Q_{p2}^{(+)} = Q_{p}^{(-)}$$
(3)

Zgodnie z rys.1, przy założeniu osiowej symetrii mieszadła, odpowiednie wydatki dla mieszadła dolnego można wyznaczyć równaniami

$$Q_{p1}^{(+)} = 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot \int_{z_1}^{z_2} [u_r(z)]_{r=r_s} dz$$
(4)

$$Q_{p_2}^{(+)} = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_w}^{r_s} [u_z(r)]_{z=z_2} \cdot r \, dr \tag{5}$$

$$Q_{p}^{(-)} = 2 \cdot \pi \cdot \int_{0}^{r_{s}} [u_{z}(r)]_{z=z_{1}} \cdot r \, dr \tag{6}$$

Analogicznie, bilans przepływu dla obszaru górnego mieszadła zamyka się równaniami

$$Q_{p}^{(-)} = 2 \cdot \pi \cdot r_{s} \cdot \int_{z_{3}}^{z_{4}} [u_{r}(z)]_{r=r_{s}} dz$$
(7)

$$Q_{p1}^{(+)} = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_w}^{r_s} [u_z(r)]_{z=z_3} \cdot r \, dr \tag{8}$$

$$Q_{p2}^{(+)} = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_w}^{r_s} [u_z(r)]_{z=z_4} \cdot r \, dr \tag{9}$$

3. Omówienie wyników i wnioski

W niniejszym artykule, wydajność pompowania dla układu dwóch mieszadeł obliczano jako sumę wydajności pompowania mieszadła górnego i mieszadła dolnego. Obliczenia wykonano dla każdego z sześciu badanych zestawów mieszadeł. W ramach każdego zestawu, obliczenia powtarzano dla czterech różnych odległości Δh między mieszadłami wynoszących: 0,5*d*, 1*d*, 1,5*d* oraz 2*d*.

Tabela 2

Wartości sumarycznej liczby pompowania K
p dla badanych zestawów mieszadeł, w zależności od odległości
 Δh

A 1- / J	Konfiguracja					
Δn/d	TT	ST	T HT AT	AT	SS	TS
0,5	0,80	1,02	0,56	1,18	1,25	1,16
1	0,94	1,16	0,74	1,27	1,03	1,13
1,5	1,03	1,22	0,81	1,32	0,90	1,06
2	0.84	1.00	0.77	1.13	1.05	0.97



Rys. 2. Liczba wydajności pompowania K_p w funkcji bezwymiarowej odległości Δh między mieszadłami. Zestawy z mieszadłem górnym TR-6

Fig. 2. The flow number K_p versus dimensionless distance between impellers Δh . The configurations with upper TR-6 impeller

Wyznaczone wartości liczb pompowania K_p przedstawiono w tabeli 2. Na rys. 2 zestawiono wartości liczby pompowania K_p w funkcji bezwymiarowej odległości $\Delta h/d$ między mieszadłami dla układów dwustopniowych, w których górnym było mieszadło turbinowe TR-6. Przy niewielkiej odległości między mieszadłami układ pracuje jak jedno mieszadło hybrydowe, a liczba K_p jest podobna jak dla pojedynczego mieszadła. Przykładowo, dla zestawu TT i dystansu $\Delta h = 0.5d$, liczba K_p wynosi około 0,8. Jest to zgodne z pracą [6], w której dla pojedynczej turbiny TR-6 liczba K_p wynosiła w podobnych warunkach 0,74. Świadczy to o tym, że dla mieszadła o działaniu promieniowym zwiększanie wysokości łopatki mieszadła powyżej standardowej [1, 2] nie wpływa znacząco na zmianę jego liczby wydajności pompowania K_p .



Rys. 3. Liczba wydajności pompowania K_p w funkcji bezwymiarowej odległości Δh między mieszadłami. Zestawy z mieszadłem dolnym PBT-6

Fig. 3. The flow number K_p versus dimensionless distance between impellers Δh . The configurations with lower PBT-6 impeller

W miarę zwiększania odstępu między mieszadłami liczba K_p wzrasta, osiągając maksimum w okolicy $\Delta h = 1,5d$. Prawidłowość ta występuje dla wszystkich czterech konfiguracji mieszadeł przedstawionych na rys. 2. Świadczy to o tym, że przy takiej odległości między mieszadłami występuje efekt wzmacniania się strumieni generowanych przez zestawy dwustopniowe, w których mieszadłem górnym jest turbina TR-6. Stopień tego wzmocnienia zależy natomiast od geometrii dolnego mieszadła.

Rysunek 3 przedstawia z kolei wartości liczby pompowania K_p w funkcji $\Delta h/d$ dla układów dwustopniowych, w których górnym było mieszadło turbinowe o pochylonych łopatkach, typu PBT-6. Zestawy tego typu wykazują odwrotną prawidłowość w odniesieniu do zestawów z rys. 2. Rozsuwanie mieszadeł powoduje w tym przypadku (rys. 3) obniżanie liczby K_p , co świadczy o braku efektu wzmacniania strumieni generowanych przez mieszadła lub o ich wzajemnym tłumieniu. Dla konfiguracji TS spadek wartości liczby

pompowania jest jednostajny i proporcjonalny, niemal liniowy, osiągając najmniejszą wartość dla $\Delta h = 2d$. Inaczej jest w przypadku zestawu SS, gdzie minimalna wartość K_p odpowiada dystansowi $\Delta h = 1,5d$, co może wskazywać na efekt tłumienia mieszadeł tak rozstawionych, a więc przeciwnie niż przy zestawach z górnym mieszadłem turbinowym TR-6. Godne uwagi jest również to, że zestaw SS w odległości 0,5*d* wykazuje liczbę K_p na poziomie 1,25. Jest to wynik niemal dwukrotnie wyższy od wynoszącego w [6] dla pojedynczej turbiny PBT-6 w podobnych warunków pracy 0,73. Oznacza to z kolei, że dla mieszadeł o działaniu osiowym dołożenie drugiego mieszadła w bliskiej odległości powoduje proporcjonalne wzmocnienie efektu pompowania.

Jak widać, wybór najkorzystniejszej pod względem wydajności pompowania dwustopniowej konfiguracji mieszadeł zależy zarówno od geometrii samych mieszadeł, jak i od odległości między nimi. Analizując otrzymane wyniki, trudno jednoznacznie wytypować najkorzystniejszą konfigurację mieszadeł, niemniej najwyższe wartości liczba K_p przyjmuje dla konfiguracji AT, tj. takiej, w której dolnym mieszadłem jest Lightnin A-315, górnym zaś mieszadło turbinowe TR-6.

W tabeli 3 porównano wkład poszczególnych mieszadeł do sumarycznej liczby pompowania K_p, dla każdej ich konfiguracji i różnych odległości między mieszadłami. Mówiąc inaczej, wartości liczb pompowania mieszadeł górnego i dolnego przedstawiono w formie udziałów procentowych. Jak widać, w większości przypadków udziały te tylko nieznacznie zmieniają się wraz z odległością między mieszadłami (konfiguracje ST, AT, HT, SS), w zakresie od 2 do 4,5%. Większa różnica występuje dla dwóch mieszadeł turbinowych tarczowych w zestawie TS, w którym liczba wydajności pompowania dolnego mieszadła przyjmuje wyższe wartości od liczby dla mieszadła górnego i monotonicznie maleje w miarę rozstawiania mieszadeł. W przedziale $\Delta h = (0,5-2)d$ zmiana ta wynosi sumarycznie 11,6%.

W zestawach TT, ST i SS wydajności pompowania obydwu mieszadeł są bardzo podobne. W pozostałych zestawach (HT, AT, TS) różnice tych udziałów sięgają nawet 20–30%, przy czym w układzie HT większy udział w wydajności pompowania ma górne mieszadło turbinowe, a w układach AT i TT mieszadło dolne.

Tabela 3

Konfiguracja	Mieszadło	$\Delta h = 0.5d$	$\Delta h = 1d$	$\Delta h = 1,5d$	$\Delta h = 2d$
TT	górne	48,7%	58,6%	53,2%	50,1%
11	dolne	51,3%	41,4%	46,8%	49,9%
ST.	górne	50,1%	53,5%	52,5%	51,4%
51	dolne	49,9%	46,5%	47,5%	48,6%
ИТ	górne	60,0%	59,2%	58,6%	57,7%
пі	dolne	40,0%	40,8%	41,4%	42,3%
۸T	górne	45,4%	43,7%	43,7%	47,9%
AI	dolne	54,6%	56,3%	56,3%	52,1%
CC	górne	48,9%	51,0%	50,8%	49,5%
55	dolne	51,1%	49,0%	49,2%	50,5%
TC	górne	35,7%	39,5%	41,5%	47,3%
15	dolne	64,3%	60,5%	58,5%	52,7%

Procentowe udziały mieszadeł górnego i dolnego w liczbę wydajności pompowania K_p

Oznaczenia

d	—	średnica mieszadła	[m]
D	_	średnica wewnętrzna zbiornika mieszalnika	[m]
Δh	—	odległość między mieszadłami	[m]
Η	_	wysokość napełnienia mieszalnika	[m]
K_P	_	liczba wydajności pompowania	
п	_	częstość obrotowa mieszadła	$[s^{-1}]$
Q_p	—	wydajność pompowania mieszadła	$[m^{3}/s]$
r	—	oś pozioma mieszalnika	[m]
Re	—	liczba Reynoldsa	
Z	_	oś pionowa mieszalnika	[m]

Oznaczenia

- [1] S t r ę k F.: *Mieszanie i mieszalniki*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.
- [2] K a m i e ń s k i J.: *Mieszanie układów wielofazowych*, Wydawnictwo Naukowo--Techniczne, Warszawa 2004.
- [3] M a g n i J., C o s t e s J., B e r t r a n d J., C o u d e r c J. P.: Proceedings of the 6th European Conference on Mixing, BHRA, Pavia 1988, 7-14.
- [4] M a h o u a s t M., F o n t a i n e P., M a l l e t J.: Proceedings of the 7th European Conference on Mixing, BHRA, Br, Brügge, 181-185.
- [5] V a s c o n c e l o s J. M. T., A l v e s S. S., B a r a t a J. M.: Chemical Engineering Science, **50**, 1995, 2343-2354.
- [6] J a w o r s k i Z., N i e n o w A. W., D y s t e r K. W.: The Canadian Journal of Chemical Engineering, 74, 1996, 3-15.
- [7] J a w o r s k i Z., N i e n o w A. W., K o u t s a k o s E., D y s t e r K., B u j a l s k i W.: Transaction of Institution of Chemical Engineers, 69, 1991, 313-320.
- [8] J a w o r s k i Z., N i e n o w A. W.: Eighth European Conference on Mixing, Cambridge 1994, No. 136.
- [9] B u c h m a n n M., Me w e s D.: Chemical Engineering Journal, 77, 2000, 3-9.
- [10] B o m b a č A., Ž u n I.: Chemical Engineering Science, **55**, 2000, 2995-3001.
- [11] G a o Z., S m i t h J. M., M ü l l e r S t e i n h a g e n H.: Chemical Engineering and Processing, 40, 2001, 489-497.
- [12] Bouaifi M., Roustan M.: Chemical Engineering and Processing, 40, 2001, 87-95.
- [13] T a l a g a J., D u d a A.: Sixteenth International Conference "Chemical Engineering and Plant Design", Berlin 2006, 159-168.