

ANDRZEJ DUDA  
JERZY KAMIŃSKI  
JAN TALAGA

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

## Badania sprawności hydraulicznej w mieszalniku z dwoma mieszadłami na wspólnym wale

### Wstęp i przedmiot pracy

Mieszalniki z dwoma mieszadłami mechanicznymi umieszczonymi na wspólnym wale, nazywane również mieszalnikami dwustopniowymi, stosowane są w aparatach o wskaźniku smukłości większym od jedności. Wysokość napełnienia cieczą  $H$  w tych aparatach jest większa od wartości standardowej, równej średnicy zbiornika. Konieczność zastosowania drugiego mieszadła występuje zwykle już wtedy, gdy  $H \geq 1,2D$  [1, 2]. Takie rozwiązanie zapewnia wytworzenie odpowiednio intensywnej cyrkulacji cieczy w całej objętości mieszalnika, w wyniku nakładania się przepływów generowanych przez poszczególne mieszadła. Każde z nich cechuje określona wydajność, stanowiąca strumień cieczy przepływającej przez jego łopatki oraz strumień cieczy cyrkulującej w całej objętości mieszalnika. Stosunek wielkości strumienia przepływu cyrkulacyjnego lub pompowanego przez mieszadło do pobieranej przez nie mocy decyduje o jego sprawności hydraulicznej. W mieszalniku dwustopniowym strumienie cieczy generowane przez mieszadła i pobierana przez nie moc zależą zarówno od geometrii samych mieszadeł, jak i ich wzajemnego usytuowania, wpływając tym samym na sprawność hydrauliczną takiego układu mieszającego. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń sprawności hydraulicznej dla różnych zestawów dwóch mieszadeł umieszczonych na wspólnym wale, w różnej odległości od siebie.

### Warunki prowadzenia badań i opracowane wyniki

Wydajności pompowania i przepływu cyrkulacyjnego w mieszalniku obliczono na podstawie zmierzonych średnich prędkości cieczy w mieszalniku. Do obliczeń wykorzystano składowe promieniowe i osiowe prędkości. Pomiarów prędkości cieczy dokonano za pomocą dwukanałowego anemometru laserowego (argonowo-jonowego). Pomiarów przeprowadzono w mieszalniku o średnicy wewnętrznej  $D = 286$  mm z płaskim dnem i czterema przegrodami o szerokości  $0,1D$ , sięgającymi do dna aparatu. Wysokość napełnienia cieczą wynosiła  $H = 1,5 D$ . Wszystkie mieszadła miały taką samą standardową średnicę  $d = 95$  mm. Odległość pomiędzy mieszadłami zmieniano w granicach  $\Delta h = (0,5 \div 2)d$ , przy czym dolne mieszadło usytuowane było zawsze w odległości  $h = 0,5d$  od dna zbiornika. Mieszana cieczą był sulfotlenek dwumetylu ( $\rho_c = 1100$  kg/m<sup>3</sup>,  $\eta_c = 0,0023$  Pas). Częstota obrotów mieszadła była stała i wynosiła  $n = 5$  s<sup>-1</sup>, co gwarantowało prowadzenie procesu w warunkach ruchu turbulenty w mieszalniku. Szczegółowy schemat stanowiska badawczego zamieszczono we wcześniejszej pracy [3]. Do badań wykorzystano mieszadła o czterech różnych geometriach: turbinę tarczową

z sześcioma łopatkami TR-6, turbinę z sześcioma pochyłymi łopatkami PBT-6, a także mieszadła typu „hydrofoil”: *Lighthnin* A315 oraz *Chemineer* HE-3. Mieszadła te zostały szczegółowo opisane w pracach [2, 3]. Badane konfiguracje mieszadeł zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1  
Zestawienie badanych układów dwóch mieszadeł na wale

Numer konfiguracji	Mieszadło dolne	Mieszadło górne
1	TR-6	TR-6
2	TR-6	PBT-6
3	PBT-6	PBT-6
4	PBT-6	TR-6
5	A-315	TR-6
6	HE-3	TR-6

W oparciu o pomiary momentu skręcającego na wale mieszadeł oraz ich częstość obrotów wyznaczono łączną moc mieszania i odpowiadającą jej liczbę mocy  $Ne$ , której wartości dla poszczególnych zestawów mieszadeł posłużyły do obliczenia sprawności hydraulicznej. Wydajności poszczególnych zestawów dwóch mieszadeł na wale przedstawiono w postaci następujących bezwymiarowych liczb [2–6]:

$$K_p = Q_p / (nd^3) \quad (1)$$

$$K_c = Q_c / (nd^3) \quad (2)$$

Wielkość  $Q_p$  jest wydajnością pompowania mieszadeł i odnosi się do obszaru ich bezpośredniego oddziaływania w mieszalniku. Wydajność pompowania  $Q_p$  zestawu dwóch mieszadeł jest sumą wydajności pompowania mieszadła górnego i mieszadła dolnego i może być wyznaczona na podstawie objętościowego natężenia przepływu cieczy zasysanej w obszar mieszadeł  $Q_{in}$  lub cieczy wyrzucanej z tego obszaru  $Q_{out}$  [7], tj.:

$$|Q_{in}| = |Q_{out}| = |Q_p| \quad (3)$$

Z kolei wielkość  $Q_c$  jest wydajnością strumienia cyrkulacyjnego w mieszalniku, charakteryzującą przepływ cieczy w całym aparacie. Wydatek cyrkulacyjny  $Q_c$  zestawu dwóch mieszadeł na wale wyznaczono całkując profile prędkości średniej w przekrojach wzdłuż wysokości napełniania cieczą (wydatek w kierunku promieniowym  $Q_r$ ) lub wzdłuż średnicy zbiornika mieszalnika (wydatek w kierunku osiowym  $Q_z$ ). W pierwszym przypadku do obliczeń wykorzystywano składowe promieniowe prędkości, w drugim – składowe osiowe, przyjmując za [4]:

$$Q_c = \max_r \{ |Q_r| \} = \max_z \{ |Q_z| \} \quad (4)$$

Obliczenia poszczególnych wydatków oraz odpowiadających im liczb kryterialnych wykonano dla każdego z sześciu badanych zestawów mieszadeł. W ramach każdego zestawu, obliczenia powtarzano dla czterech różnych odległości między mieszadłami  $\Delta h$ . Uzyskano w ten sposób obraz zmian sumarycznej liczby pompowania  $K_p$  oraz liczby wydajności cyrkulacyjnej  $K_c$  – wyznaczonych z równań (1) i (2) – w funkcji parametru  $\Delta h$ .

### Omówienie wyników i wnioski

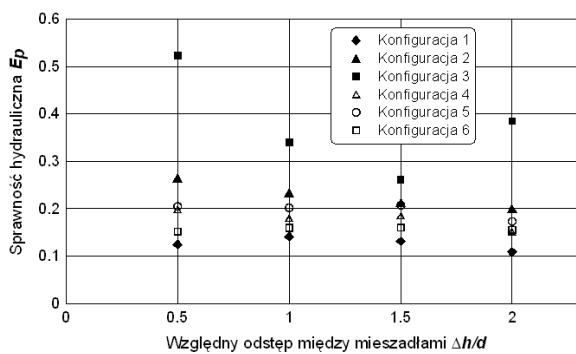
Sprawność hydrauliczną układu dwóch mieszadeł charakteryzuje wydajność ich pompowania (dla obszaru mieszadeł) lub wydajność cyrkulacji cieczy (dla całego mieszalnika), odniesiona do wnoszonej mocy mieszania. Im stosunek ten przyjmuje większe wartości, tym dany układ mieszadeł jest sprawniejszy z hydraulicznego punktu widzenia. Uwzględniając fakt, że wszystkie pomiary wykonano przy stałej częstotliwości obrotów mieszadeł, mających tę samą średnicę, jako kryterium oceny sprawności hydraulicznej przyjęto:

$$E_p = K_p / Ne \quad (5)$$

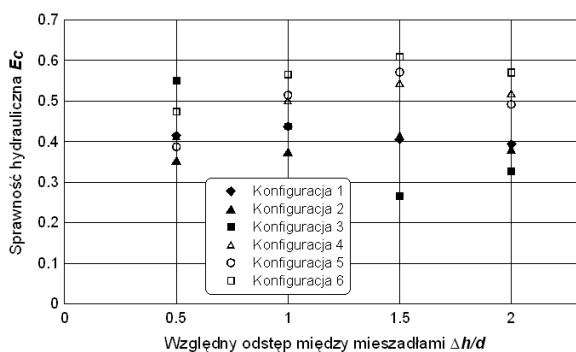
$$E_c = K_c / Ne \quad (6)$$

Otrzymane wartości sprawności  $E_p$  oraz  $E_c$  zestawiono w tablicach 2 i 3 oraz przedstawiono na rys. 1 i 2) w funkcji bezwymiarowej odległości między mieszadłami  $\Delta h/d$ .

Uzyskane wyniki badań wskazują, że z punktu widzenia wydajności pompowania mieszadeł najbardziej sprawnym jest układ dwóch mieszadeł PBT-6, dla wszystkich czterech badanych odległości między mieszadłami. Jeśli jednak wziąć pod uwagę wydajność cyrkulacyjną, uznawaną często za wielkość ważniejszą od wydajności pompowania [4], najwyższe



Rys. 1. Sprawność hydrauliczna  $E_p$  określona dla wydajności pompowania wyrażonej poprzez liczbę  $K_p$  w funkcji bezwymiarowej odległości między mieszadłami  $\Delta h/d$



Rys. 2. Sprawność hydrauliczna  $E_c$  określona dla wydajności cyrkulacyjnej wyrażonej poprzez liczbę  $K_c$  w funkcji bezwymiarowej odległości między mieszadłami  $\Delta h/d$

sprawności wykazuje układ z dolnym mieszadłem hydrofoilowym HE-3 oraz górną turbiną TR-6.

Tablica 2  
Sprawność hydrauliczna  $E_p$  badanych zestawów mieszadeł dla różnych odległości między mieszadłami

$\Delta h/d$	Konfiguracja					
	1	2	3	4	5	6
0,5	0,13	0,26	0,52	0,20	0,31	0,15
1	0,14	0,23	0,34	0,18	0,20	0,16
1,5	0,13	0,21	0,26	0,19	0,21	0,16
2	0,11	0,20	0,38	0,15	0,17	0,16

Tablica 3  
Sprawność hydrauliczna  $E_c$  badanych zestawów mieszadeł dla różnych odległości między mieszadłami

$\Delta h/d$	Konfiguracja					
	1	2	3	4	5	6
0,5	0,41	0,35	0,55	0,41	0,59	0,47
1	0,44	0,37	0,44	0,50	0,51	0,57
1,5	0,41	0,41	0,26	0,54	0,57	0,61
2	0,39	0,38	0,33	0,52	0,49	0,57

### Oznaczenia

- $d$  – średnica mieszadła, [m]
- $D$  – średnica wewnętrzna zbiornika mieszalnika, [m]
- $\Delta h$  – odległość między mieszadłami, [m]
- $H$  – wysokość napełnienia mieszalnika, [m]
- $E_c$  – sprawność hydrauliczna określ. dla wydajności  $Q_c$ , [-]
- $E_p$  – sprawność hydrauliczna określ. dla wydajności  $Q_p$ , [-]
- $K_c$  – liczba wydajności przepływu cyrkulacyjnego, [-]
- $K_p$  – liczba wydajności pompowania, [-]
- $Ne$  – liczba mocy mieszania, [ $s^{-1}$ ]
- $n$  – częstość obrotów mieszadła, [ $s^{-1}$ ]
- $Q_c$  – wydajność przepływu cyrkulacyjnego w mieszalniku dwustopniowym, [ $m^3/s$ ]
- $Q_p$  – wydajność pompowania dla zestawu mieszadeł, [ $m^3/s$ ]
- $\eta_c$  – dynamiczny współczynnik lepkości mieszanej cieczy, [Pa s]
- $\rho_c$  – gęstość mieszanej cieczy, [ $kg/m^3$ ]
- $Q_{in}$  – strumień cieczy zasysany przez zestaw dwóch mieszadeł, [ $m^3/s$ ]
- $Q_{out}$  – strumień cieczy wyrzucany z obszaru mieszadeł, [ $m^3/s$ ]
- $Q_r$  – wydajność przepływu cyrkulacyjnego w kierunku promieniowym, [ $m^3/s$ ]
- $Q_z$  – wydajność przepływu cyrkulacyjnego w kierunku osiowym, [ $m^3/s$ ]

### LITERATURA

1. F. Stręk: Mieszanie i mieszalniki, Warszawa, WNT, 1981.
2. J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych, Warszawa, WNT, 2004.
3. J. Talaga, A. Duda: 16<sup>th</sup> International Conference "Chemical Engineering and Plant Design", 159-168, Berlin 2006.
4. Z. Jaworski, A.W. Nienow, K.W. Dyster: Can. J. Chem. Eng. **74**, 3-15, 1996.
5. Z. Jaworski., A.W. Nienow, E. Koutsakos, K.W. Dyster, W. Bujalski: Trans. Inst. Chem. Eng. Part A. **69**, 313-320 (1991).
6. Z. Jaworski, A.W. Nienow: 8<sup>th</sup> European Conference on Mixing, Cambridge, nr 136, 1994.
7. A. Duda, J. Kamiński, J. Talaga: Czasop. Techn. 67-74, z. 2-M (2008).