

KRZYSZTOF SZULC

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Moc mieszania mieszadeł ślimakowych pracujących w zbiorniku z przegrodami

Wprowadzenie

Prezentowana praca jest etapem wstępnym do wykonania optymalizacji parametrów geometrycznych mieszadła ślimakowego pracującego w nietypowym układzie geometrycznym, na drodze modelowania matematycznego. Celem głównym pracy było określenie mocy mieszania mieszadeł ślimakowych o zmiennej średnicy i skoku wstęgi, pracujących z przegrodami o różnej szerokości. Jak wynika z dokonanego przeglądu literaturowego, największa względna moc mieszania P/P_0 (gdzie: P_0 – moc odniesienia) w układzie z przegrodami występuje dla liczby przegród $n_p \approx 4$, przy względnej szerokości przegrody $B/D \approx 0,3$. Dodatkowo z opracowań literaturowych [1, 2, 3, 9] wynika, że pewnym ekwiwalentnym rozwiązaniem dla mieszadeł ślimakowych obok ich zastosowania w układzie ekscentrycznym jest ich zastosowanie w układzie z przegrodami.

Część doświadczalna

Badania przeprowadzono dla trzech przypadków układów mieszadło-mieszalnik. W mieszalniku zaopatrzonego w cztery symetrycznie rozmieszczone przegrody o inwariancie szerokości przegrody do średnicy mieszalnika B/D zmieniającym się w zakresie 0,103–0,171 (szerokości 0,03 m $\leq B \leq$ 0,05 m), grubości ok. 0,003 m, oddalone od wewnętrznej ścianki mieszalnika o ok. 0,002 m. Także dla tego samego mieszalnika pracującego bez przegród, ale zaopatrzonego w dyfuzory. Przebadano również mieszalnik z samym mieszadłem ślimakowym. Parametry mieszadeł przedstawia tabela 1. Płaskodenny zbiornik szklany o średnicy $D = 0,292$ m wypełniono cieczą $H/D = 1$. Badaną cieczą był roztwór syropu ziemniaczanego o lepkości $\eta = 15$ i 5 Pa·s i gęstości $\rho = 1350 \pm 5$ kg/m³. W pomiarach $Re = 0,1$ –1,6.

Tabela 1
Parametry przebadanych mieszadeł ślimakowych

Mieszadło	Średnica d [m]	Wysokość h [m]	Liczba zwojów i [-]	Skok ślimaka p [m]
S1	0,084	0,170	2	0,085
S2	0,135	0,170	1	0,170
S3	0,135	0,170	2	0,085
S4	0,135	0,170	3	0,056
S5	0,164	0,170	2	0,085

Opracowanie i dyskusja wyników

Dla opisanych geometrii z klasycznych zależności obliczono: moc mieszania $P = 2\pi NM$ [W], liczbę Newtona $Ne = P/(N^3 d^5 \rho)$ [-], liczbę Reynoldsa $Re = (Nd^2 \rho)/\eta$ [-], gdzie N – liczba obrotów [1/s], ρ – gęstość cieczy [kg/m³], η – lepkość cieczy [Pa·s], d – średnica mieszadła [m]. Otrzymane w ten spo-

sób wielkości Ne i Re dla mieszadeł ujętych w tabl. 1, aproksymowano zależnością obowiązującą ruchu laminarnym [1, 4]

$$Ne = A_{dos.} Re^{a_{dos.}} \quad (1)$$

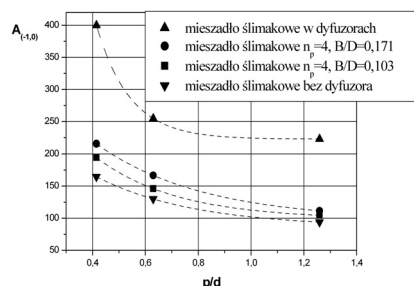
wyznaczając współczynniki mocy $A_{dos.}$. Charakterystyki mocy w obszarze przepływu laminarnego są liniami prostymi o nachyleniu zbliżonym do wartości -1 lub są liniami o nachyleniu $\alpha = 135^\circ$ dla $Re < 100$ (głębokiego ruchu laminarnego). Dlatego przeprowadzono aproksymację danych pomiarowych przyjmując w równaniu (1) wykładnik $a_{dos.} = -1$. Zebrane dane posłużyły więc ostatecznie do wyznaczenia stałych $A_{(-1,0)}$ charakteryzujących poszczególne mieszadła. Zestawienie otrzymanych wartości doświadczalnych współczynników mocy $A_{dos.}$ wraz z wykładnikami $a_{dos.}$ równania (1) oraz stałych $A_{(-1,0)}$ dla mieszadeł ślimakowych pracujących z przegrodami o skrajnych szerokościach prezentuje tabela 2. Podobne zestawienia dla mieszadeł ślimakowych pracujących bez dyfuzora oraz w dyfuzorze prezentuje tabela 3. Z przedstawionego na rys. 1. wykresu wynika, że we wszystkich przypadkach układów geometrycznych wartość stałej $A_{(-1,0)}$ maleje ze wzrostem inwariantu p/d i najmniejsze jej wartości dla porównywanych mieszadeł są osiągane przy stosunku $p/d \approx 1,26$. Jak wynika z prac [1, 2] minimalna wartość stałej A dla mieszadeł ślimakowych pracujących w dyfuzorze jest osiągana dla

Tabela 2
Zestawienie współczynników równania (1) dla przebadanych mieszadeł ślimakowych pracujących w układzie z czterema przegrodami o skrajnych inwariantach szerokości B/D

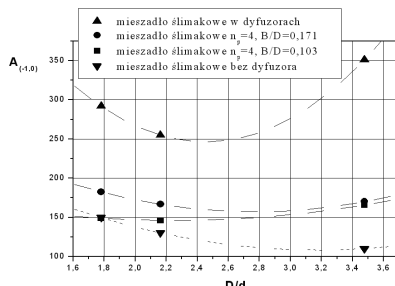
Mieszadło	Średnica mieszadła d [m]	Liczba zwojów i [-]	$B/D = 0,103$			$B/D = 0,171$		
			$a_{dos.}$	$A_{dos.}$	$A_{(-1,0)}$	$a_{dos.}$	$A_{dos.}$	$A_{(-1,0)}$
S1	0,084	2	-0,9236	169,2	165,9	-0,9066	177,2	170,1
S2	0,135	1	-0,9498	105,1	104,6	-0,9362	114,1	111,7
S3	0,135	2	-0,9898	146,8	146,2	-0,9624	169,3	166,8
S4	0,135	3	-0,9857	195,0	194,6	-0,9054	233,5	215,9
S5	0,164	2	-0,9642	150,8	149,1	-0,9684	184,4	182,6

Tabela 3
Zestawienie współczynników równania (1) dla przebadanych mieszadeł ślimakowych pracujących bez dyfuzora i pracujących w dyfuzorze

Mieszadło	Średnica mieszadła d [m]	Liczba zwojów i [-]	Bez dyfuzora			W dyfuzorze		
			$a_{dos.}$	$A_{dos.}$	$A_{(-1,0)}$	$a_{dos.}$	$A_{dos.}$	$A_{(-1,0)}$
S1	0,084	2	-0,7043	109,6	110,2	-1,056	379	351
S2	0,135	1	-0,7974	77,94	93,98	-0,998	221	223
S3	0,135	2	-0,8264	109,5	130,1	-0,915	203	255
S4	0,135	3	-0,8400	140,7	164,8	-1,021	421	400
S5	0,164	2	-0,8656	125,2	149,6	-0,962	260	292



Rys. 1. Porównanie zależności stałej $A_{(-1,0)}$ w funkcji inwariantu skoku p/d dla mieszadła ślimakowego o inwariancie średnic $D/d = 2,16$



Rys. 2. Porównanie zależności stałej $A_{(-1,0)}$ w funkcji inwariantu średnic D/d dla mieszadła ślimakowego o liczbie zwojów $i = 2$

inwariantu $p/d \cong 1,3$, natomiast dalsze zwiększanie stosunku p/d powoduje nieznaczny wzrost, a następnie ustabilizowanie tej stałej.

Jak wynika z rys. 2. we wszystkich trzech przypadkach należy spodziewać się wystąpienia minimalnej wartości stałej $A_{(-1,0)}$. Dla mieszadeł ślimakowych pracujących w dyfuzorze dla inwariantu $D/d \cong 2,4$, natomiast dla mieszadeł ślimakowych pracujących z przegrodami położenie minimum zmienia się w zakresie wzrastającego inwariantu średnicy $\sim 2,3 \leq D/d \leq \sim 2,7$ wraz ze wzrostem inwariantu B/D . Dla mieszadeł pracujących samodzielnie wartość minimalna stałej $A_{(-1,0)}$ występuje dla $D/d \cong 3,2$. Nie oznacza to jednak minimalnej mocy mieszania dla tego inwariantu średnic. Przy analizie wpływu średnicy mieszadeł na moc mieszania należy dodatkowo brać pod uwagę definicję liczby mocy Ne oraz liczby Reynoldsa Re . Jak wynika z pracy [1] dla mieszania laminarnego moc mieszania $P = f(A_{(-1,0)} \cdot d^3)$, gdyż $P = AN^2d^3\eta$. Dominującą rolę od-

grywa tu czynnik d^3 , gdyż średnica mieszadła zmieniała się prawie dwukrotnie (Tablice 1–3). Analizując rys. 2, można wysnuć wniosek, że mieszadło o najmniejszej średnicy $D/d = 3,476$ w układzie z dyfuzorem uzyskiwało największą wartości liczby mocy. Nie oznacza to jednak, że pobiera ono największą moc mieszania.

Moc mieszania mieszadła ślimakowego pracującego w dyfuzorze o inwariancie średnic $D/d = 2,163$ była ok. trzy razy większa od mocy mieszania mieszadła $D/d = 3,476$ o najmniejszej średnicy, dla tych samych obrotów N i lepkości cieczy η (Tablica 4). Dla granicznych inwariantów średnic wykazało ok. sześciokrotną różnicę

mocy obu mieszadeł. Podobnie dla mieszadeł pracujących z przegrodami (Tablica 5), jednak z nieznacznie wyższą ok. siedmiokrotną różnicą mocy dla granicznych inwariantów. Wyższe, bo aż dziesięciokrotne wartości różnicy mocy względnej $P/P_{(d=0,084)}$ uzyskano dla skrajnych średnic samodzielnych mieszadeł ślimakowych (Tablica 6).

W przebadanych układach zbiornika z przegrodami oraz zbiornika z dyfuzorem moc mieszania rosła w mniejszym stopniu niż czynnik d^3 , choć mieszadła pracujące z przegrodami wykazywały wyższą wartość proporcji porównywanych mocy. Wyjątek zaś stanowi układ mieszalnik-mieszadło ślimakowe, w którym moc mieszania rosła w większym stopniu niż czynnik d^3 . Przyczyną takiego stanu rzeczy może być odmienny charakter hydrodynamiki układu mieszalnik-(samo) mieszadło ślimakowe. Mieszalnik z dyfuzorem wykazuje wyższe zapotrzebowanie mocy niż zaopatrzony w przegrody. Najniższe zaś zapotrzebowanie mocy wykazuje samo mieszadło ślimakowe. Największą moc mieszania wykazywało mieszadło o najmniejszym skoku $p/d = 0,42$ (największej liczbie zwojów $i = 3$) niezależnie od typu badanej geometrii. Różnice liczb mocy Ne dla mieszadeł dwu- i jednozwojowego oraz trój- i dwuzwojowego są nieproporcjonalne (0,181/0,819) dla mieszadła pracującego w dyfuzorze. Dla mieszadeł pracujących z przegrodami zbliżają się do proporcjonalności. Wraz z wzrastającym inwariantem szerokości przegród B/D różnice liczb mocy Ne dla mieszadeł trój- i dwuzwojowego są coraz mniejsze. Dla mieszadeł ślimakowych pracujących w dyfuzorze moc mieszania wzrasta wraz z liczbą zwojów, przy czym na początku wzrost ten jest nieznaczny. Dla mieszadeł pracujących z przegrodami moc mieszania również wzrasta z liczbą zwojów mieszadła, ale na początku wzrost ten jest znaczny i maleje ze wzrostem inwariantu B/D . W układzie samo mieszadło-mieszalnik wzrost mocy mieszania z liczbą zwojów zbliża się do proporcjonalnego. Generalnie użycie przegród zmniejsza moc mieszania w porównaniu z układem, z dyfuzorem.

Tablica 4
Porównanie rzeczywistych mocy pobieranych przez przebadane mieszadła ślimakowe pracujące w dyfuzorze

d [m]	D/d [-]	N [s ⁻¹]	A [-]	η [Pa·s]	Ne [-]	Re [-]	P [W]	$\frac{P}{P_{(d=0,084)}}$ [-]
0,164	1,780	2	292	4	16,1	18,1	20,6	6,19
0,135	2,163	2	255	4	20,7	12,3	10,0	3,02
0,084	3,476	2	351	4	73,7	4,76	3,33	1

Tablica 5
Porównanie rzeczywistych mocy pobieranych przez przebadane mieszadła ślimakowe pracujące z przegrodami o inwariancie $B/D = 0,103$

d [m]	D/d [-]	N [s ⁻¹]	A [-]	η [Pa·s]	Ne [-]	Re [-]	P [W]	$\frac{P}{P_{(d=0,084)}}$ [-]
0,164	1,780	1	149,1	15,69	64,43	2,314	10,32	6,69
0,135	2,163	1	146,2	15,69	93,23	1,568	5,644	3,66
0,084	3,476	1	165,9	15,69	273,3	0,607	1,543	1

Tablica 6
Porównanie rzeczywistych mocy pobieranych przez przebadane mieszadła ślimakowe pracujące bez dyfuzora

d [m]	D/d [-]	N [s ⁻¹]	A [-]	η [Pa·s]	Ne [-]	Re [-]	P [W]	$\frac{P}{P_{(d=0,084)}}$ [-]
0,164	1,780	2	149,6	5,04	10,38	14,41	13,30	10,10
0,135	2,163	2	130,1	5,04	13,32	9,763	6,453	4,900
0,084	3,476	2	110,2	5,04	29,15	3,780	1,317	1

LITERATURA

1. K. Szulc: Modelowanie przepływu w mieszalniku – zakres laminarny, mieszadła wstęgowe i ślimakowe, Łódź WIPOS PŁ, Rozpr. dokt., 2004.
2. Cz. Kuncewicz, K. Szulc, T. Kurasiniński: Chem. Eng. Process. 44, 766 (2005).
3. Cz. Kuncewicz, K. Szulc, T. Kurasiniński: Inż. Ap. Chem., 45, nr 3s, 107 (2003).
4. F. Stręk: Mieszanie i mieszalniki, Warszawa, WNT, 1971.
5. Cz. Kuncewicz, K. Szulc, P. Budzyński: Inż. Chem. Proc. 22, 3C, 837 (2001).
6. M. Serwiński, H. Błasiński: Chem. Stos., 3-4, 325 (1960).
7. V.V. Chavan, J. Ulbrecht: Ind. End. Chem. Process Des. Develop., 12, 472 (1973).
8. P. Seichter, J. Dohnal, F. Rieger: Coll. Czech. Chem. Commun. 46, 2007 (1981).
9. F.A. Holland., F.S. Chapman: Reinhold Publ. Corp., New York, 1966.