

Jan UMIŃSKI

BADANIA PORÓWNAWCZE NIEKTÓRYCH TYPÓW MIESZADEŁ
STOSOWANYCH W CYRKULACYJNYCH KOMORACH FLOKULACJI
CZĘŚĆ I. MOC MIESZANIA

Streszczenie. Na efekty pracy cyrkulacyjnej komory flokulacji ma wpływ mieszadło, jego parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne. Dla oceny tego wpływu przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych badania porównawcze obejmujące niektóre typy i odmiany konstrukcyjne mieszadeł turbinowych i śmigłowych. Jednym z badanych wskaźników była moc mieszania. W opracowaniu przedstawiono metodykę i wyniki tej części badań.

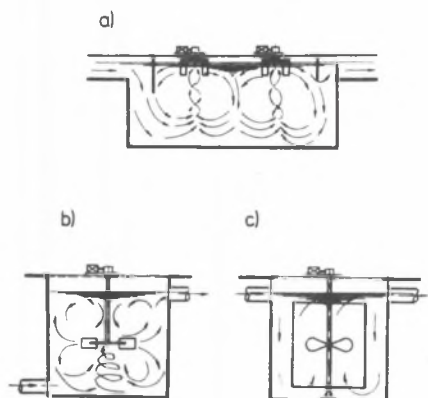
Najmniejsze zużycie mocy wykazały czterolopatkowe mieszadła śmigłowe, zaś największe - turbinowe talerzowe otwarte i dyskowe z łopatkami prostymi.

1. Wprowadzenie

W technologii uzdatniania wody - obok doskonalenia procesów - coraz większego znaczenia nabiera optymalizacja doboru urządzeń, parametrów ich pracy i konstrukcji. Odnosi się to w pełni do cyrkulacyjnych komór flokulacji z mieszadłami turbinowymi i śmigłowymi. Komory te stosowane są zarówno w ramach zespolonych urządzeń wielofunkcyjnych do koagulacji i klarowania wody (typu akcelator, reaktywator, recyrkulator itp.), jak też pracować mogą jako wydzielone - w układzie klasycznym. W urządzeniach wielofunkcyjnych [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9] komory z mieszadłami turbinowymi i śmigłowymi odgrywają decydującą rolę w przebiegu mieszania, flokulacji i klarowania wody, zaś w układzie klasycznym współpracować mogą z nowoczesnymi, wysokosprawnymi osadnikami wielostrumieniowymi.

W komorach tego typu szczególnie ważną rolę pełni mieszadło. Konstrukcja i parametry eksploatacyjne mieszadła decydują o ilości, rozkładzie oraz stopniu wykorzystania doprowadzonej do układu energii. Jest rzeczą ogólnie znaną, że mieszadło w dużym stopniu determinuje koszty eksploatacyjne urządzenia oraz wyniki procesu mieszania i flokulacji. Dotychczasowe fragmentaryczne dane doświadczalne nie dają jednak odpowiedzi na pytanie, jak istotny jest wpływ różnych, spotykanych w praktyce cech konstrukcji oraz jakie czynniki z tego zakresu w największym stopniu obniżać mogą koszty oraz poprawiać przebieg procesu.

Na rys. 1 przedstawiono przykłady cyrkulacyjnych komór reakcji z mieszadłami o osi pionowej: rys. 1a, b - komory z mieszadłami turbinowymi, rys. 1c - komora z mieszadłem śmigłowym.



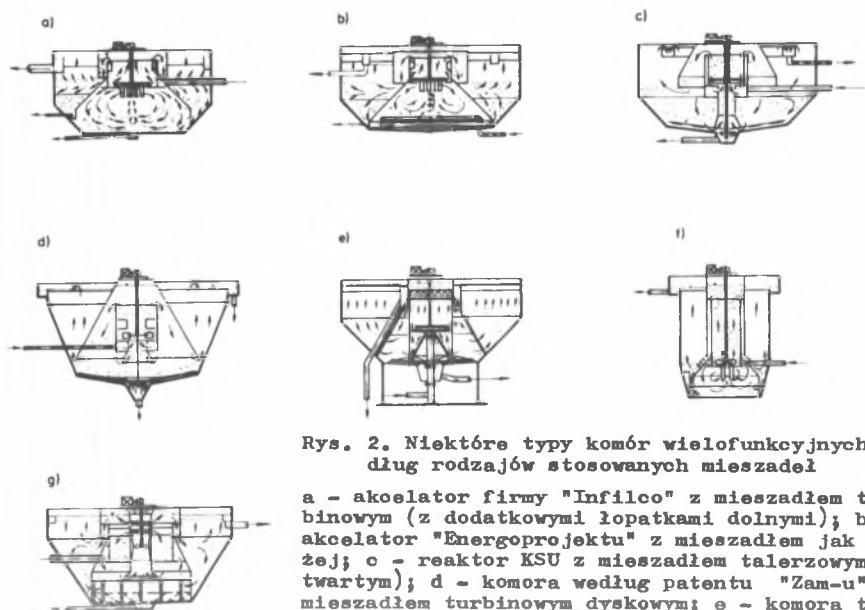
Rys. 1. Cyrkulacyjne komory reakcji z mieszadłami o osi pionowej
a, b - komory z mieszadłami turbinowymi, c - komora z mieszadłami śmigłowymi

Na Zachodzie, szczególnie w USA, komory z mieszadłami turbinowymi znalazły zastosowanie w szeregu dużych stacji wodociągowych [15].

Na rys. 2 przedstawiono niektóre typy urządzeń wielofunkcyjnych według rodzajów stosowanych mieszadeł.

Przy mieszadłach turbinowych górne komory reakcji urządzeń wielofunkcyjnych wyposażone są z reguły w tzw. kierownice (w technice mieszania określane też jako tzw. przegrody). Zadaniem kierownic jest wyhamowanie składowych okrężnych prędkości przepływu wody, powstających na skutek ruchu obrotowego mieszadła [3].

Zwykle kierownice te wykonywane są w postaci prostych, pionowych przegród przymocowanych od wewnątrz



Rys. 2. Niektóre typy komór wielofunkcyjnych według rodzajów stosowanych mieszadeł

a - akcelerator firmy "Infilco" z mieszadłem turbinowym (z dodatkowymi łopatkami dolnymi); b - akcelerator "Energoprojektu" z mieszadłem jak wyżej; c - reaktor KSU z mieszadłem talerzowym (otwartym); d - komora według patentu "Zan-u" z mieszadłem turbinowym dyskowym; e - komora typu "Płock" z mieszadłem turbinowym zamkniętym z łopatkami zakrzywionymi; f - komora według koncepcji IMŻ z mieszadłem śmigłowym (z dodatkowymi łopatkami dolnymi); g - recyrkulator (NRD) z mieszadłem śmigłowym

do ścian górnej komory reakcji. W akcelatorze Energoprojektu (rys. 2b) są one stosunkowo nieduże. W niektórych urządzeniach (np. w reaktorze KSU - rys. 2c) przegrody pionowe stosuje się na całej wysokości komory flokulacji. Taka konstrukcja zbliżona jest do typowego rozwiązania przegród w mieszalnikach stosowanych w inżynierii chemicznej.

W przedstawionej pracy zajęto się zagadnieniem wpływu niektórych cech konstrukcji mieszadeł turbinowych i śmigłowych oraz przegród pionowych w reaktorze na wyniki wolnego mieszania. Przy doborze badanych właściwości brano m.in. pod uwagę różnice występujące w stosowanych odmianach konstrukcyjnych. Spodziewając się, że poszczególne cechy konstrukcji mogą mieć wpływ na wyniki wolnego mieszania, za cel badań porównawczych obrano określenie tych cech (parametrów), których zmiany w największym stopniu determinują efektywność mieszania i flokulacji, a w konsekwencji - najwydatniej przyczynić się mogą do poprawy działania urządzeń.

Jednym z badanych wskaźników pracy mieszadeł była moc mieszania. W opracowaniu przedstawione zostaną wyniki tej części badań.

2. Moc mieszania

Przez moc mieszania należy rozumieć energię przekazywaną cieczy przez mieszadło w jednostce czasu [12]. Moc ta charakteryzuje więc pośrednio zużycie energii i koszty eksploatacyjne pracy mieszadła. W przypadku komór flokulacji ustalenie mocy mieszania daje możliwość określenia bezwymiarowej liczby kryterialnej procesu, będącej iloczynem tzw. przeciętnego gradientu prędkości i czasu flokulacji.

Mimo iż moc mieszania jest bardzo istotnym parametrem projektowym i eksploatacyjnym mechanicznych komór flokulacji, dorobek dotychczasowych badań w tym zakresie jest skromny i dotyczy głównie wolnoobrotowych mieszadeł wielołopatkowych [7].

Z badań nad zużyciem mocy i konstrukcją mieszadeł turbinowych i śmigłowych najbardziej zaawansowane są badania prowadzone w dziedzinie inżynierii chemicznej. Nie obejmują one jednak wolnego mieszania w komorach flokulacji, w których proces kłazkowania zanieczyszczeń wody stawia wobec mieszadeł specyficzne wymagania co do ilości i rozkładu rozpraszanej energii.

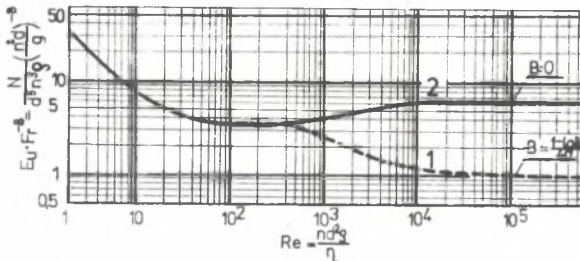
Dotychczasowy stan wiedzy o procesie mieszania cieczy umożliwia formułowanie związków między parametrami procesu jedynie w sposób przybliżony. Metodą analizy wymiarowej wykorzystującą twierdzenie π Buckinghama [5, 12] moc mieszania scharakteryzować można ogólnie za pomocą następującej zależności:

$$\frac{N}{d^5 n^3 g} = C_0 \left(\frac{nd^2 g}{\rho} \right)^{A_0} \left(\frac{n^2 d}{g} \right)^{B_0} i_1^{F_1} i_2^{F_2} \dots i_n^{F_n} \quad (1)$$

Dla rodziny mieszalników geometrycznie podobnych równanie kryterialne mocy mieszania przyjmuje postać prostszą:

$$Eu = C Re^A Fr^B \quad (2)$$

Pierwsze badania mocy mieszadeł turbinowych oraz śmigłowych przeprowadzili Rushton, Costich i Everett [10, 11]. Z punktu widzenia zużycia mocy w cyrkulacyjnych komorach flokulacji interesujące są badania autorów [10, 11] odnoszące się do wpływu przegród pionowych w mieszalniku. Wykazały one, że przegrody te powodować mogą istotne powiększenie mocy mieszania. Np. dla mieszadła turbinowego dyskowego otwartego z sześcioma łopatkami prostymi przy $Re = 10\ 000$ wzrost mocy mieszania pod wpływem czterech przegród o szerokości $0,1 D$ (rys. 3) jest pięciokrotny.



Rys. 3. Charakterystyka mocy mieszania dla mieszadła turbinowego dyskowego (R) z sześcioma łopatkami prostymi według badań Rushtona, Costicha i Everetta

1 - zbiornik bez przegród, 2 - zbiornik z czterema przegradami standardowymi

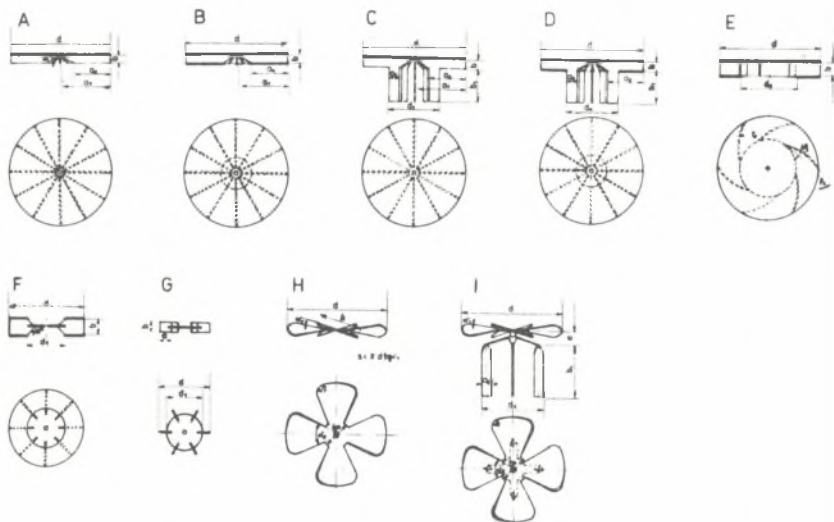
Na podstawie przebadanych konstrukcji mieszadeł autorzy [10, 11] rozróżnili następujące zakresy występowania poszczególnych faz ruchu: laminarny dla $Re < 10$, burzliwy dla $Re > 10^4$ oraz przejściowy dla $10 \leq Re \leq 10^4$. W zakresie ruchu laminarnego charakterystyki mocy $Eu = f(Re, Fr)$ wykreślone w siatce dwulogarytmicznej przedstawiają linie proste o współczynniku kątowym nachylenia $A \approx -1$. Natomiast w zakresie ruchu burzliwego wartości liczby mocy Eu praktycznie nie zależą od liczby Re .

Według Kasatkina [5] obszar ruchu laminarnego występuje przy $Re < 30$, zaś w pełni rozwinięta turbulencja przy $Re > 10^5$, przy czym mogą występować - zależnie od konstrukcji mieszadła i zbiornika - odchylenia od tych granic.

Według autorów [10, 11] w zbiorniku bez przegród 1 przy $Re \geq 300$ wartość B w równaniu (2) jest różna od zera, co oznacza, że na moc mieszania ma wpływ liczba Froude'a. Jednak w późniejszych badaniach wielu autorów [12] stwierdziło brak wpływu liczby Froude'a na moc mieszania. M.in. Bła-

siński, Kochański i Rzyski [1] wykazali, że w przypadku braku falowania cieczy liczba Froude'a nie ma istotnego znaczenia i można ją pomijać.

Równanie (2) przedstawia jedynie ogólną zależność między modułami podobieństwa. Każdy układ geometryczny mieszadło - zbiornik może dać inną charakterystykę mocy, wobec czego stałe C, A i B należy określać na nowo przy każdej zmianie proporcji geometrycznych.



Rys. 4. Typy mieszadeł poddane badaniom porównawczym

Mieszadła turbinowe talerzowe: A - otwarte z łopatkami prostymi (1a, 2a, 3a, 3, 3b, 5), B - zamknięte z łopatkami prostymi (4, 4a, 4b, 6), C - otwarte z dodatkowymi łopatkami dolnymi (3a₁, 3a₂), D - zamknięte z dodatkowymi łopatkami (4a₁), E - zamknięte z łopatkami zakrzywionymi (8a, 8, 8b). Mieszadła turbinowe dyskowe z łopatkami prostymi: F - zamknięte (9), G - otwarte (R). Mieszadła śmigłowe: H - czterolopatkowe (7, 7a), I - z dodatkowymi łopatkami u dołu (7a₁)

W przedstawianych badaniach pomiarom porównawczym poddano niektóre typy i odmiany konstrukcyjne mieszadeł stosowanych w cyrkulacyjnych komorach flokulacji:

- 1) mieszadła turbinowe talerzowe z łopatkami prostymi, otwarte (rys. 4A) i zamknięte (rys. 4B), zamknięte z łopatkami zakrzywionymi (rys. 4E), otwarte i zamknięte z dodatkowymi łopatkami dolnymi (rys. 4C, D);
- 2) turbinowe dyskowe (rys. 4F, G);
- 3) śmigłowe czterolopatkowe z dodatkowymi łopatkami u dołu (rys. 4I) i bez łopatek dolnych (rys. 4H).

Szczegółowe własności, wymiary, proporcje oraz przyjętą numerację badanych mieszadeł zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie właściwości geometrycznych
oraz numeracja badanych mieszadeł

a) mieszadła turbinowe z łopatkami prostymi. (Oznaczenia parametrów według rys. 4A, B, C, D, F, G)

Określenie rodzaju mieszadeł	Numer mieszadła	Średnica d (mm)	Wartość inwariantów podobieństwa geometrycznego								Ilość łopatek	
			$\frac{b}{d}$	$\frac{a_1}{d}$	$\frac{a_2}{d}$	$\frac{d_1}{d}$	$\frac{a_0}{d}$	$\frac{b_1}{d}$	α	$\frac{D}{d}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Ta- le- rzo- we o- twar- te (rys. 4A i 4C)	Bez dodat- kowych łopa- tek dol- nych	1a	160	0,075	0,463	0,35	-	-	-	26°	1,75	4
		2a	160	0,075	0,463	0,35	-	-	-	26°	1,75	8
		3a	160	0,075	0,463	0,35	-	-	-	26°	1,75	12
		3	120	0,10	0,45	0,30	-	-	-	26°	2,33	12
		3b	80	0,15	0,425	0,20	-	-	-	26°	3,50	12
		5	120	0,167	0,417	0,25	-	-	-	45°	2,33	8
	Z do- datko- wymi łopa- tkami dolny- mi	3a ₁	160	0,075	0,463	0,35	0,488	0,0938	0,313	26°	1,75	12
		3a ₂	160	0,075	0,463	0,35	0,488	0,0938	0,156	26°	1,75	12
Ta- le- rzo- we zam- knię- te (rys. 4B i 4D)	Bez dodat- kowych łopa- tek dol- nych	4a	160	0,075	0,463	0,35	-	-	-	26°	1,75	12
		4	120	0,10	0,45	0,30	-	-	-	26°	2,33	12
		4b	80	0,15	0,425	0,20	-	-	-	26°	3,50	12
		6	120	0,167	0,417	0,25	-	-	-	45°	2,33	8
	Z do- datko- wymi łopa- tkami	4a ₁	160	0,075	0,463	0,35	0,488	0,0938	0,313	26°	1,75	12
Dys- kowe (rys. 4F i 4G)	Zam- knięte	9	120	0,20	-	-	0,50	-	-	-	2,33	8
	Otwar- te	R	80	0,20	-	-	0,70	0,25	-	-	3,50	6

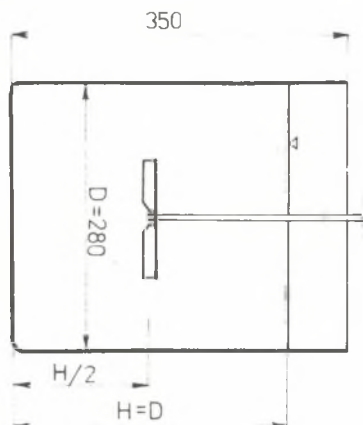
cd. tabeli 1

b) mieszadła turbinowe talerzowe zamknięte z łopatkami zakrzywionymi. (Oznaczenia parametrów geometrycznych według rys. 4E)

Numer mieszadła	Średnica d (mm)	Wartości inwariantów geometrycznych						Ilość łopatek z
		$\frac{b}{d}$	$\frac{d_0}{d}$	$\frac{r_2}{d}$	$\frac{D}{d}$	β_1	β_2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8a	160	0,1813	0,5625	0,5	1,75	25°	34°	6
8	120	0,2083	0,5833	0,5	2,33	25°	34°	6
8b	80	0,1813	0,5625	0,5	3,50	25°	34°	6

c) mieszadła śmigłowe (Oznaczenia parametrów geometrycznych według rys. 4H, I)

Określenie rodzaju mieszadła	Numer mieszadła	Średnica d (mm)	Wartości inwariantów geometrycznych											Ilość łopatek z
			$\frac{b}{d}$	$\frac{d_0}{d}$	α_1	$\frac{s}{d}$	α_2	$\frac{r_1}{d}$	$\frac{d_1}{d}$	$\frac{b_1}{d}$	$\frac{a_0}{d}$	$\frac{c}{d}$	$\frac{D}{d}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Śmigłowe	7a	160	04063	025	16°	09	60°	0075	-	-	-	-	175	4
	7	120	04167	033	16°	09	60°	0075	-	-	-	-	233	4
Śmigłowe z dodatkowymi łopatkami dolnymi	7a ₁	160	04063	025	16°	09	60°	0075	0644	0469	00938	00938	175	4

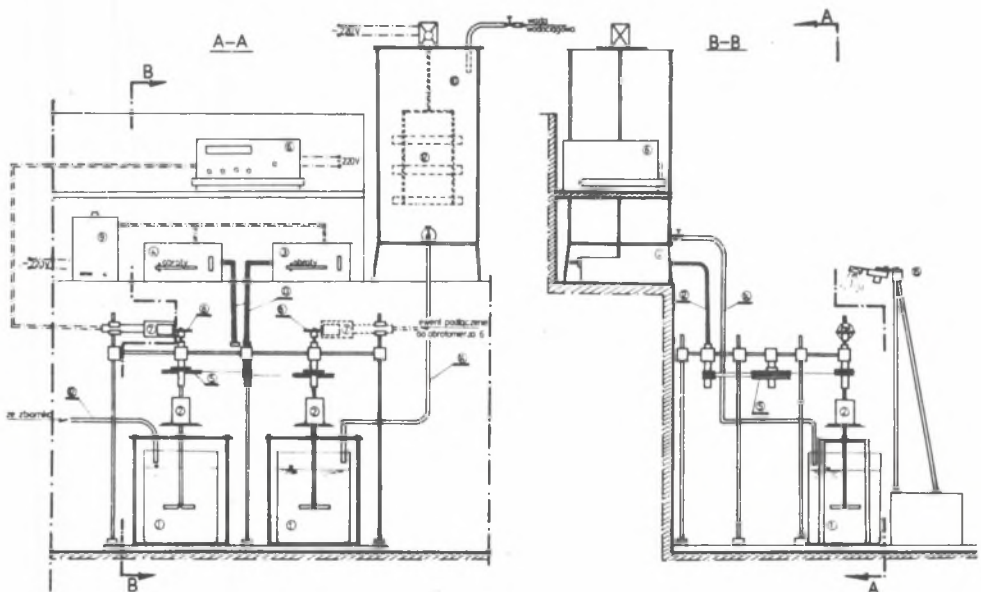


W pomiarach wykorzystano cylindryczny zbiornik bez przegród o średnicy $D = 280$ mm i początkowym napełnieniu $H = D$, przedstawiony na rys. 5.

Rys. 5. Zbiornik użyty w badaniach

2. Opis instalacji doświadczalnej, metodyki pomiarów i sposobu opracowania wyników

Schemat zasadniczych elementów instalacji badawczej pokazano na rys. 6. Mieszanie odbywało się równolegle w dwóch zbiornikach. Obydwa mieszadła miały wspólny zespół napędowy typu ML-3. Napęd przenoszony był za pośrednictwem giętkiego wałka i podwójnej przekładni pasowej na dynamometry skrętne oraz mieszadła. Pomiar mocy mieszania prowadzono na wodzie wodociągowej po doprowadzeniu jej temperatury do 293 K (20°C). Kierunek obrotu mieszadeł był odwrotny do ruchu wskazówek zegara. Oznacza to na przykład że dla mieszadeł talerzowych z łopatkami zakrzywionymi stosowany kierunek obrotów był bezuderzeniowy ($\beta_2 = 34^\circ$), zaś przy mieszadłach śmigłowych wymuszał pompowanie wody w górę. Ilość obrotów mierzono za pomocą elektronicznego obrotomierza cyfrowego typu N-103. Zespół napędowy umożliwiał płynną regulację ilości obrotów w zakresie 15-470 obr./min.



Rys. 6. Schemat podstawowych elementów stanowiska badawczego

1 - mieszalniki (reaktory), 2 - napęd mieszania wolnego typu ML-3 z ciągłą regulacją obrotów, 3 - napęd mieszania szybkiego, 4 - podwójne przekładnie pasowe, 5 - elektroniczny obrotomierz cyfrowy typu N-103, 6 - sonda fotoelektryczna obrotomierza, 7 - tarcza obrotomierza, 8 - stabilizator napięcia, 9 - zbiorniki do magazynowania i preparowania wody, 10 - silnik elektryczny o regulowanej ilości obrotów, 11 - mieszadło, 12 - wałki giętkie do przenoszenia napędu, 13 - przewód elastyczny dla doprowadzenia wody, 14 - aparat na statywie do fotografowania tarcz dynamometru

Do pomiaru mocy mieszania początkowo rozważano m.in. zastosowanie metody elektrycznej, przez określenie mocy użytecznej silnika napędowego. Po bliższej analizie okazało się jednak, że w warunkach omawianych badań metoda ta nie dałaby dostatecznej dokładności ze względu na trudności w określeniu rzeczywistej charakterystyki i strat własnych silnika w całym zakresie niezbędnej regulacji obrotów. Ostatecznie wybrano mechaniczną metodę pomiarów z określeniem momentu obrotowego bezpośrednio na wał mieszadła [13]. W tym celu skonstruowano specjalny dynamometr skrętny, dostosowany do warunków pomiarów.

W wyniku pomiarów otrzymywano najpierw kąty skręcenia tarcz dynamometru odpowiadające poszczególnym prędkościom obrotowym mieszadła. Z charakterystyk dynamometrów ustalano następnie równoważne obciążenie dźwigni cechowniczej P wyrażone w $[G]$. Przy znanej długości tej dźwigni $l=0,228$ m umożliwiało to określenie momentu obrotowego M oraz mocy mieszania N za pomocą następujących wzorów przeliczeniowych:

$$M = Pl = 0,0098066 \cdot 0,228 P = 10^{-3} \cdot 2,236 P \text{ [Nm]} \quad (3)$$

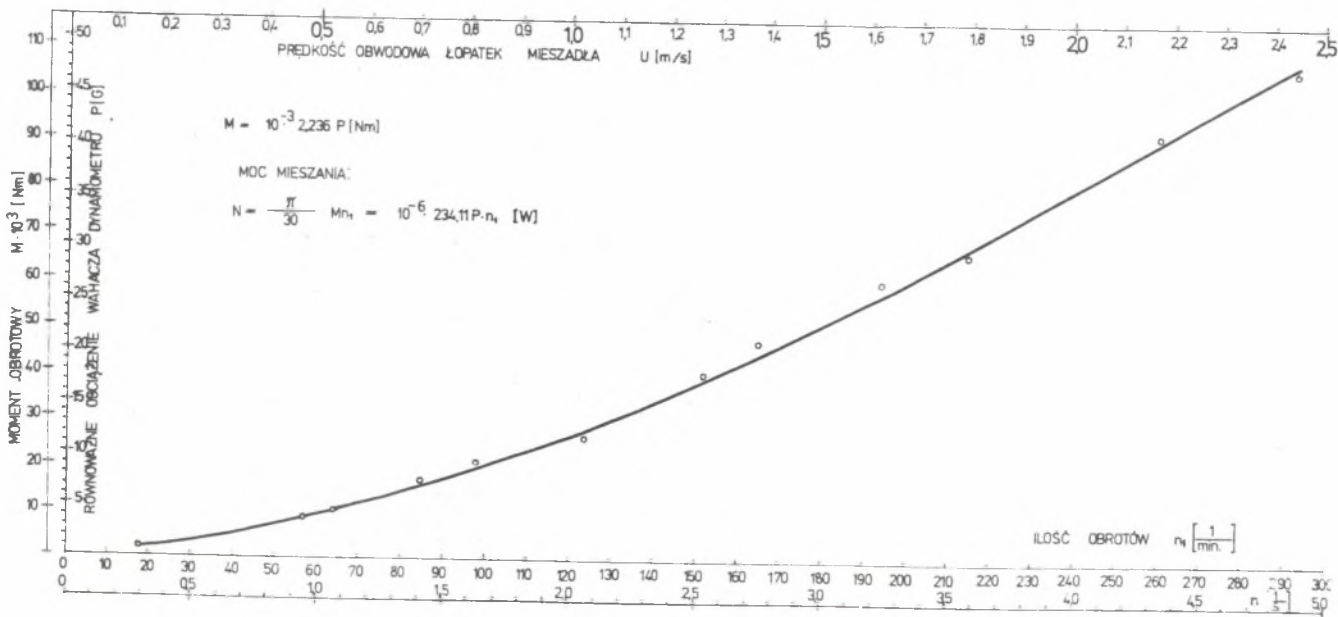
$$N = M\omega = \frac{\pi}{30} Mn_1 = 10^{-6} \cdot 234,11 Pn_1 \text{ [W]} \quad (4)$$

Wyniki pomiarów momentu obrotowego M zestawiono na wykresach $M = f(n_1)$, z których jeden, dla przykładu, przytoczony jest na rys. 7.

Przy określaniu wartości P i N odliczano straty na tarcie dynamiczne i statyczne wywoływane przez ułożyskowanie. Tarcie dynamiczne określono przez pomiar kąta skręcenia tarcz dynamometru w biegu jałowym (w pustym reaktorze) przy różnych prędkościach obrotowych mieszadła. Zaś tarcie statyczne zmierzono po unieruchomieniu wału napędowego, odłączeniu sprężyny i obciążeniu w odpowiedni sposób dźwigni cechowniczej aż do momentu poruszenia się tarcz względem siebie.

Przyjmując za miarę dokładności pomiarów maksymalny błąd względny, można stwierdzić, że na dokładność tę duży wpływ wywierała prędkość obrotowa mieszadła. Maksymalny błąd względny przy pomiarze obrotów obrotomierzem N-103 wynosił $(0,5 + \frac{100}{n_1})\%$, co dawało np. przy $n_1 = 20$ obr/min błąd 5,5%, zaś przy $n_1 = 200$ obr/min - 1%. Aby zwiększyć dokładność pomiarów w zakresie $n_1 < 60$ obr/min sprawdzano obroty poprzez bezpośrednią obserwację i wykorzystanie stopera. Na skutek tego w zakresie tym błąd maksymalny nie przekraczał 1,0%, a przy $n_1 \geq 60$ obr/min. - 2,2%.

Przy pomiarze momentu obrotowego błąd maksymalny wahał się od 6,1 do 1,2%. Maksymalny błąd względny pomiaru mocy mieszania zależał również od rodzaju mieszadła i był tym większy, im mniejsze zużycie mocy wykazywało mieszadło. Przy niskich obrotach (20-50 obr/min) dochodził do 7,1%, ale dosyć szybko malał ze wzrostem ilości obrotów.



Rys. 7. Wyniki pomiaru momentu obrotowego netto na wale mieszadła 1a

Tabela 2

Współczynniki empiryczne w równaniach mocy mieszania
i zakresy ich ważności

Symbol odmiany konstrukcyjnej mieszadła	Wartości współczynników w równaniu (2)		Przedział ufności dla współczynnika C przy poziomie ufności 0,95		Wartości Re ograniczające obszar określoności równania (2)	
	C	A				
1a	89,268	-0,5	(86,711; 91,834)		[7,68.10 ⁻³ ; 124,93.10 ³]	
3a	4,0564	-0,2	(3,7456; 4,3672)		[7,68.10 ⁻³ ; 153,6.10 ³]	
3	174,76	-0,5	(165,16; 184,36)		[4,32.10 ⁻³ ; 688,32]	
3b	21348	-0,9	(19881; 22816)		[21,12.10 ⁻² ; 44,29.10 ³]	
3a ₁	4,4529	-0,2	(3,9947; 4,9111)		[8,96.10 ⁻³ ; 118,53.10 ³]	
4a	7,5717	-0,3	(6,6134; 8,5300)		[7,68.10 ⁻³ ; 117,25.10 ³]	
4a ₁	8144,3	-1,0	(6638,8; 9649,8)		[7,68.10 ⁻³ ; 146,43.10 ³]	
7a	0,0439	0,1	(0,0297; 0,0581)		[94,72.10 ⁻² ; 128,77.10 ³]	
8a	0,0341	0,2	(0,0191; 0,0491)		[8,96.10 ⁻³ ; 147,97.10 ³]	
Symbol odmiany konstrukcyjnej mieszadła	Wartości współczynników w równaniu (5)		Przedział ufności dla współczynnika C ₁		Wartości n ₁ ograniczające obszar określoności równania (5)	
	C ₁	E				
2a	134,09.10 ⁻⁸	2,6	(129,43.10 ⁻⁸ ; 138,39.10 ⁻⁸)		[17; 246]	
3a ₂	35,84.10 ⁻⁸	2,9	(22,81.10 ⁻⁸ ; 39,76.10 ⁻⁸)		[22; 325]	
4	11,747.10 ⁻⁸	2,8	(9,897.10 ⁻⁸ ; 13,494.10 ⁻⁸)		[19; 386]	
4b	23,76.10 ⁻⁸	2,5	(20,19.10 ⁻⁸ ; 27,28.10 ⁻⁸)		[18,5; 460]	
5	21,14.10 ⁻⁸	2,8	(18,74.10 ⁻⁸ ; 23,52.10 ⁻⁸)		[29; 333]	
6	30,74.10 ⁻⁸	2,7	(25,86.10 ⁻⁸ ; 35,59.10 ⁻⁸)		[26; 325]	
7	21,40.10 ⁻⁸	2,6	(14,60.10 ⁻⁸ ; 28,2.10 ⁻⁸)		[19; 350]	
7a ₁	3,325.10 ⁻⁸	3,2	(1,591.10 ⁻⁸ ; 5,054.10 ⁻⁸)		[16; 285]	
8	3,558.10 ⁻⁸	3,1	(1,64.10 ⁻⁹ ; 6,95.10 ⁻⁸)		[18; 300]	
8b	39,35.10 ⁻⁸	2,4	(27,35.10 ⁻⁸ ; 51,29.10 ⁻⁸)		[18; 385]	
9	11,284.10 ⁻⁸	2,9	(8,307.10 ⁻⁸ ; 14,251.10 ⁻⁸)		[25; 335]	

Uogólnienie wyników badań oparto w zasadzie na stosowanych w tym zakresie modułach podobieństwa [5, 12]. Dla określenia równań opisujących moc mieszania zastosowano rachunek wyrównawczy metodą najmniejszych kwadratów. Współczynniki regresji oraz przedziały ufności dla linii regresji przy poziomie ufności 0,95 określono za pomocą maszyny cyfrowej ODRA-1304.

Dla dziesięciu mieszadeł odróżniających się zasadniczymi właściwościami konstrukcji (1a, 3a, 3a₁, 3, 3b, 4a, 4a₁, 7a, 8a) charakterystyki mocy przedstawiono za pomocą równań typu (2). Uogólniając wyniki pomiarów, opar-

to się na założeniu, że w warunkach prowadzonych badań wpływ liczby Froude'a nie występuje, bądź też jest minimalny ($B \approx 0$). Założenie to umożliwiły m.in. stosowany zakres Re , brak falowania oraz brak lub nieduży na ogół lej depresyjny.

Jednym z zasadniczych celów pomiarów mocy było określenie przeciętnych gradientów prędkości do badań procesu flokulacji. Z tego powodu wyniki pomiarów mocy mieszania ujęte w postaci równań kryterialnych oddzielnie dla każdego zbioru inwariantów podobieństwa geometrycznego. Równania te odnoszą się do ograniczonego pomiarami zakresu Re . Na dość ograniczony zakres badanych liczb Reynoldsa miało wpływ dostosowanie instalacji do badań koagulacji.

Dla pozostałych odmian konstrukcyjnych - 2a, 3a₂, 4, 4b, 5, 6, 7, 7a₁, 8, 8b, 9 - wyniki pomiarów mocy mieszania pozostawiono w formie prostszej, ułatwiającej obliczanie gradientów prędkości [13]. Drogą obliczeń na maszynie cyfrowej wyniki te uogólniono w postaci równań typu:

$$N = C_1 n_1^E \quad (5)$$

Współczynniki empiryczne oraz przedziały ufności przy poziomie 0,95 podano w tabeli 2.

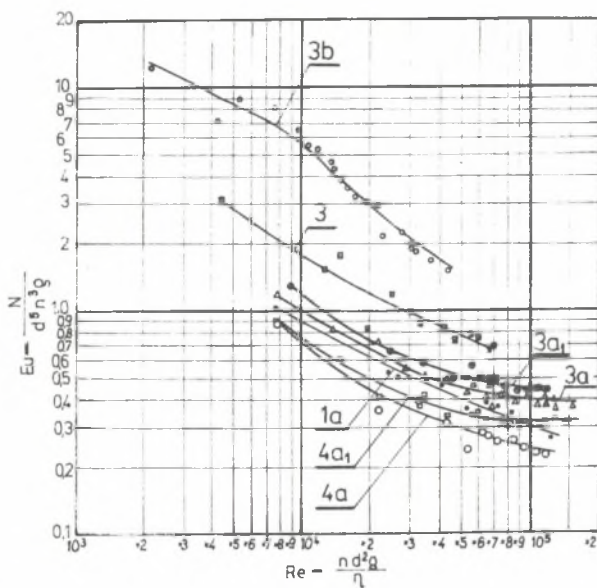
3. Analiza i omówienie wyników badań

Różnice między poszczególnymi typami i odmianami konstrukcyjnymi mieszadeł dały możliwość porównania wpływu takich czynników, jak:

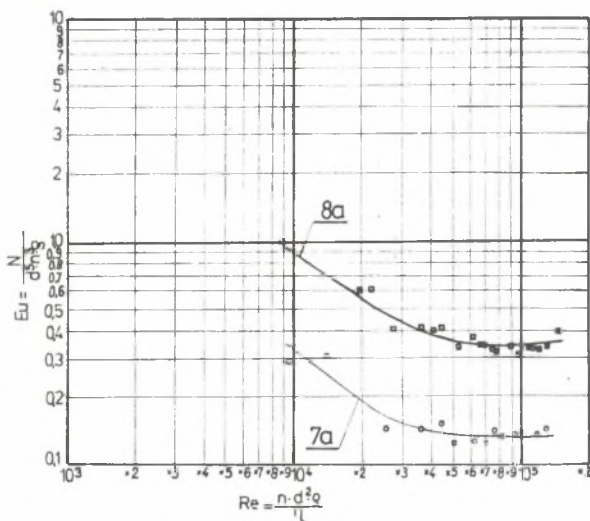
- 1) typ mieszadła (turbinowe talerzowe, turbinowe dyskowe, śmigłowe);
- 2) ilość i kształt łopatek w mieszadłach turbinowych talerzowych;
- 3) zastosowanie pierścienia zamykającego łopatki od dołu w mieszadłach talerzowych (zamkniętych);
- 4) stosunek średnic reaktora i mieszadła $\frac{D}{d}$ oraz względną szerokość łopatek $\frac{b}{d}$;
- 5) zastosowanie dodatkowych łopatek dolnych w mieszadłach talerzowych i śmigłowych;
- 6) rozstaw (średnice) dodatkowych łopatek dolnych.

Wszystkie szczegółowe wyniki pomiarów mocy mieszania zestawiono w pracy [13].

Stosunkowo największe zużycie mocy wykazywały mieszadła turbinowe talerzowe otwarte (3b, 3, 5, 3a₁, 3a, 2a, 1a) i turbinowe dyskowe (9). Mniejszą moc mieszania wykazały mieszadła talerzowe zamknięte z łopatkami zakrzywionymi (8, 8b, 8a), a następnie talerzowe zamknięte z łopatkami prostymi (4a₁, 4a, 4, 4b, 6). Zdecydowanie najmniejszym natomiast zużyciem mocy charakteryzowały się mieszadła śmigłowe (7, 7a). W porównaniu z ta-



Rys. 8. Charakterystyki mocy mieszania dla mieszadeł turbinowych talerzowych z łopatkami prostymi



Rys. 9. Charakterystyki mocy mieszania dla mieszadła śmigłowego (7a) oraz talerzowego zamkniętego z łopatkami zakrzywionymi (8a)

talerzowymi otwartymi mieszadła śmigłowe w badanym zakresie proporcji charakteryzowały się mocą mieszania od 1,5 do 4 razy mniejszą.

Przebieg charakterystyk mocy mieszania dla mieszadeł turbinowych talerzowych oraz śmigłowych pokazano przykładowo na rys. 8 i 9. W porównaniu z talerzowymi 1a i 8a mieszadło 7a wykazało moc mieszania około trzykrotnie mniejszą. Mieszadła 1a, 8a i 7a miały tę samą średnicę (160 mm , $\frac{D}{d} = 1,75$) oraz identyczną powierzchnię rzutu łopatek na płaszczyznę pionową (przechodzącą przez oś obrotu i środek łopatki). Obydwa mieszadła talerzowe - otwarte z łopatkami prostymi (1a) i z łopatkami zakrzywionymi (8a) - wykazały zbliżone do siebie wartości mocy mieszania, z tym że w obszarze $Re = 7680-70000$ większą moc miało mieszadło 1a (przeciętnie o 13%).

Dla $Re > 70\ 000$ mieszadło 8a wykazywało moc mieszania większą niż 1a (np. dla $Re = 125\ 000$ o 21%). Dla innych badanych proporcji tj.: $\frac{D}{d} = 2,33$ oraz $\frac{D}{d} = 3,5$ w całym zakresie liczb Re mieszadła talerzowe z łopatkami zakrzywionymi wykazały mniejszą moc mieszania niż mieszadła otwarte z łopatkami prostymi.

Zależność $Eu = f(Re)$ wskazuje na charakter ruchu cieczy w procesie mieszania. Jak wynika z rys. 8, większość mieszadeł talerzowych z łopatkami prostymi pracowała w zakresie przejściowym. Mimo stosunkowo dużych wartości liczb Reynoldsa moc mieszania zależy wyraźnie od Re . Charakterystyka $Eu = f(Re)$ jest nachylona do osi poziomej, przy czym kąt nachylenia nieznacznie maleje ze wzrostem Re (wzrasta burzliwość ruchu). Nieco inny przebieg ma charakterystyka mocy dla mieszadła talerzowego zamkniętego z łopatkami zakrzywionymi (8a). Wpływ liczby Re na moc mieszania zaznacza się tu jedynie w zakresie $Re = 9000-70\ 000$. Powyżej $70\ 000$ krzywa $Eu = f(Re)$ jest pozioma, co wskazuje na w pełni rozwiniętą burzliwość ruchu cieczy oraz świadczy o braku wpływu liczby Reynoldsa na moc mieszania. Dla mieszadła śmigłowego 7a krzywa $Eu = f(Re)$ wykazuje podobny przebieg, jak dla mieszadła 8a.

Ogólnie można stwierdzić, że obszar rozwiniętej w pełni turbulencji ruchu dla badanych mieszadeł zaczynał się przy znacznie wyższych wartościach liczb Reynoldsa niż dla mieszadeł przebadanych przez Rushtona, Costicha i Everetta [10, 11].

Wpływ ilości łopatek przebadano na mieszadłach talerzowych otwartych z łopatkami prostymi (mieszadło 1a - 4 łopatki, 2a - 8 łopatek, 3a - 12 łopatek). Z ilością łopatek moc mieszania wzrastała, jednak w stopniu mniejszym, niż się tego spodziewano. Większy wpływ ilości łopatek zaobserwowano dla liczb Re powyżej 50.000. I tak np. przy wzroście łopatek z czterech (1a - rys. 8) do dwunastu (3a) dla $Re = 100\ 000$ liczba Eulera wzrosła 1,33 raza.

W grupie mieszadeł talerzowych z łopatkami prostymi mieszadła zamknięte odróżniają się od otwartych tym, że mają dodatkowy pierścień zamykający przestrzeń międzyłopatkową od dołu (rys. 4B). Podczas pracy mieszadła woda wpływa do przestrzeni międzyłopatkowej przez kołowy obszar odsłaniający od dołu środkową część mieszadła.

Wpływ dodatkowego pierścienia dolnego prześledzić można porównując wyniki pomiarów mocy mieszania dla następujących par mieszadeł: 3a-4a; 3-4; 3b-4b; 5-6. (W każdej z wymienionych par pierwsze mieszadło jest bez pierścienia, zaś drugie - z pierścieniem). Dla mieszadeł 3a i 4a charakterystyki mocy mieszania $E_u = f(Re)$ mają kształt zbliżony (rys. 8), jednak mieszadło otwarte (4a) wykazuje 1,5-krotnie większą moc mieszania niż mieszadło zamknięte (4a). Jak wynika z porównania mieszadeł 3-4, 3b-4b i 5-6 (tab. 2), większe zapotrzebowanie mocy przez mieszadła otwarte jest prawidłowością obserwowaną w całym zakresie przeprowadzonych pomiarów. W sumie pierścień "zamykający" łopatki od dołu wyraźnie zmniejszył moc mieszania. Dla par mieszadeł 3-4 ($\frac{D}{d} = 2,33$) oraz 3b-4b ($\frac{D}{d} = 3,5$) zmniejszenie to jest nadspodziewanie duże. Przy tej samej średnicy i obrotach moc mieszadeł zamkniętych jest około dwukrotnie mniejsza niż otwartych. Przy małej ilości obrotów różnica ta jest jeszcze większa. Jednak dla mniejszej ilości łopatek ($z = 8$) oraz większej ich szerokości (o 67% - mieszadła 5-6) różnica w mocy mieszania dla obu typów gwałtownie maleje (do 10-20%). Jak widać z przebiegu wykresów $E_u = f(Re)$ dla mieszadeł 3a i 4a, zastosowanie pierścienia powoduje zwiększenie krytycznej liczby Re dla ruchu burzliwego. Pierścień ten zmniejsza więc również turbulancję ruchu.

Pomiary na mieszadłach talerzowych 3, 3a, 3b, 4, 4a, 4b, 8a, 8, 8b prowadzono przy trzech inwariantach podobieństwa geometrycznego $\frac{D}{d}$: 1,75; 2,33; 3,5; zaś na mieszadłach śmigłowych (7a, 7) przy dwóch inwariantach $\frac{D}{d}$: 1,75 i 2,33 (tab. 1). Wartości tego inwariantu zaznaczone są pośrednio w przyjętej numeracji mieszadeł: numery mieszadeł z literą "a" odpowiadają $\frac{D}{d} = 1,75$, z literą "b" - $\frac{D}{d} = 3,5$, zaś numery bez dodatkowej litery - $\frac{D}{d} = 2,33$. W przypadku mieszadeł talerzowych z łopatkami prostymi (3a, 3, 3b, 4a, 4, 4b) ze zmianą stosunku $\frac{D}{d}$ od 1,75 do 3,5 zmieniał się też inwariant szerokości łopatek b/d i przyjmował odpowiednio wartości: 0,075; 0,10 i 0,15. Inwariant b/d zwiększał się więc wprost proporcjonalnie do wzrostu $\frac{D}{d}$. Natomiast w przypadku mieszadeł talerzowych z łopatkami zakrzywionymi oraz śmigłowych przy zmianie stosunku $\frac{D}{d}$ inwariant szerokości łopatek b/d pozostawał praktycznie stały.

W tym względzie badania wykazały, że ze wzrostem stosunku średnic zbiornika i mieszadła moc mieszania wyrażana liczbą kryterialną Eulera wyraźnie wzrasta. Gdy wraz z powiększaniem się stosunku $\frac{D}{d}$ wzrastał inwariant b/d , zaobserwowano szczególnie duży przyrost mocy mieszania. Odnosi się to zwłaszcza do mieszadeł talerzowych otwartych z 12 łopatkami prostymi (rys. 8, mieszadła 3a, 3, 3b). Przy jednoczesnym dwukrotnym zwiększeniu inwariantów $\frac{D}{d}$ i $\frac{b}{d}$ (mieszadła 3a i 3b) liczba mocy E_u dla $Re = 30\ 000$ wzrosła ok. 3,8 raza. W przypadku utrzymania stosunku szerokości łopatek do średnicy (b/d) na stałym poziomie (mieszadła 8a, 8, 8b oraz 7a i 7) wzrost inwariantu powodował znacznie mniejszy przyrost mocy mieszania. Dla mieszadeł 8a i 8b przy $Re = 30\ 000$ wzrost liczby E_u był w przybliżeniu dwukrotny. Z porównania wyników otrzymanych w obu przypadkach można wnioskować, że duży wpływ na moc mieszania ma szerokość łopatek (b).

W urządzeniach wielofunkcyjnych z recyrkulacją osadu pokoagulacyjnego, a zwłaszcza w komorach zbliżonych konstrukcyjnie do akcelatora "Infilco" stosuje się mieszadła z dodatkowymi łopatkami dolnymi, których zadaniem jest wywołanie cyrkulacji i mieszania cieczy w dolnej komorze reakcji (rys. 2a). Wśród mieszadeł badanych ten typ reprezentowały mieszadła $3a_1$, $3a_2$, $4a_1$ i $7a_1$. Jak wynika z rys. 4 i tab. 1, mieszadło $3a_1$ to mieszadło $3a$ plus dodatkowe, wydłużone łopatki u dołu ($z = 12$) w środkowej części mieszadła. Odpowiednio - mieszadło $4a_1$ to mieszadło $4a$ plus dodatkowe łopatki dolne, identyczne jak w przypadku $3a_1$. Mieszadło $3a_2$ to $3a$ i łopatki dolne, dwa razy krótsze niż w przypadku mieszadła $3a_1$, zaś mieszadło $7a_1$ złożone było z mieszadła $7a$ i dodatkowych, czterech łopatek u dołu.

Badania wykazały (rys. 8 i 9 oraz tab. 2), że łopatki dodatkowe powiększają moc mieszania, ale w stopniu nieoczekiwanie małym. Dotyczy to zwłaszcza mieszadeł talerzowych otwartych ($3a_1$, $3a_2$). Dla mieszadła $3a_1$, np. przy $Re = 80\ 000$, wzrost mocy mieszania w porównaniu z $3a$ wynosił zaledwie ok. 13%. Dla mieszadła $4a_1$ analogiczny wzrost mocy (w porównaniu z $4a$) był również nieduży, ale wyraźnie powiększał się ze wzrostem Re . Przy $Re = 80\ 000$ wynosił bowiem około 25%, zaś przy $Re = 100\ 000$ - około 34%. W przypadku mieszadła śmigłowego dodatkowe łopatki u dołu spowodowały stosunkowo największy przyrost mocy mieszania. Np. dla $Re = 84\ 000$ przyrost ten ($7a_1 - 7a$) wynosił ok. 60%.

Istotny wpływ na moc mieszania może mieć rozstaw dodatkowych łopatek dolnych, na co wskazują badania przedstawione w opracowaniu [14].

4. Podsumowanie

1. Spośród porównywanych typów mieszadeł najmniejszym zużyciem mocy charakteryzują się mieszadła śmigłowe, zaś największym - turbinowe talerzowe otwarte i dyskowe z łopatkami prostymi.
2. Z porównywanych cech konstrukcyjnych największy wpływ na liczbę mocy Eulera wywiera stosunek średnic reaktora i mieszadła ($\frac{D}{d}$) oraz względna szerokość łopatek ($\frac{b}{d}$).
3. Przy małej szerokości łopatek w mieszadłach turbinowych talerzowych istotny wpływ na moc mieszania wywierać może zastosowanie pierścienia "zamykającego" łopatki od dołu. Pierścień zmniejsza zużycie mocy i zwiększa krytyczną wartość liczby Reynoldsa dla ruchu burzliwego. Zmniejszenie zużycia mocy uzyskać można również poprzez odpowiednie zakrzywienie łopatek w mieszadłach talerzowych.
4. W zakresie przeprowadzonych pomiarów stosunkowo mały wpływ na moc mieszania wykazała ilość łopatek oraz zastosowanie dodatkowych łopatek dolnych w mieszadłach talerzowych.
5. Dla pełniejszej oceny cech konstrukcji i geometrii mieszadeł niezbędne jest rozpatrzenie ich działania z szerszego punktu widzenia, przy u-

względnieniu takich kryteriów, jak: efekt pompujący, szybkość homogenizacji, nakład energii dla optymalnego formowania kłaczków itp. Optymalizacja procesu mieszania w cyrkulacyjnych komorach flokulacji wymaga dalszych, kompleksowych badań modelowych w większej skali oraz w warunkach ciągłego przepływu wody.

LITERATURA

- [1] Błasiński H., Kochański B, Rzycki E.: Kryterium Froude'a w procesie mieszania. *Chemia Stosowana* VI, 3B, 267 (1969).
- [2] Brzuchański E.: Akcelatory do uzdatniania wody. Materiały na V Konferencję N.-T. "Zag. Zaopatrzenia w Wodę Miast i Wsi", Poznań 1976, 109-114.
- [3] Biuro Projektów Przemysłu Naftowego: Akcelatory. Badania modelowe do części mechanicznej, Kraków 1962.
- [4] Jędrzejowski K., Mielus S.: Badania w skali półtechnicznej nad uzdatnianiem wody w komorze wielofunkcyjnej. Sprawozdanie nr 292, IMZ, Gliwice czerwiec 1970. Praca nie publikowana.
- [5] Kasatkina A.G.: Osnovnyje processy i apparaty chemiczeskoj tiechnologii, Izd. 8, "Chimija", Moskwa 1971.
- [6] Kłaczko W.A., Apelcyń I.E.: Oczyszczka prirodných wod. Izdat. Lit. po Stródk, Moskwa 1971.
- [7] Kucharski J., Moniuszko A.: Oczyszczanie wód i ścieków przemysłowych metodą koagulacji. WNT, Warszawa 1967.
- [8] Opis patentowy: Urządzenie wielofunkcyjne do oczyszczania ścieków i uzdatniania wody. Urząd Patentowy PRL. Patent nr 58806 Kl. 85 c, 2.
- [9] Prospekty firm Bran-Lubbe oraz Walker Process Equipment.
- [10] Rushton J.H., Costich E.W., Everett H.J.: Power characteristics of mixing impellers. Part I. *Chemical Engineering Progress*. Vol. 46, Nr 8, August 1950, 395-404.
- [11] Rushton J.H., Costich E.W., Everett H.J.: Power characteristics of mixing impellers. Part II. *Chemical Engineering Progress*. Vol. 46, Nr 9, 467-476.
- [12] Strępek F.: Inżynieria chemiczna. Mieszanie i mieszalniki. WNT, Warszawa 1971.
- [13] Umiński J.: Wpływ niektórych typów mieszadeł i reaktorów na wyniki wolnego mieszania w procesie koagulacji zanieczyszczeń wody w świetle wybranych kryteriów. Praca doktorska, Gliwice 1977 (maszynopis).
- [14] Umiński J.: Wpływ rozstawu łopatek mieszadła na parametry charakteryzujące intensywność i wyniki wolnego mieszania w komorze flokulacji. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Inżynieria Sanitarna* z. 20 (w druku).
- [15] Walker J.D.: High-Energy Flocculation Units. *JAWWA*, Nr 11, 1968, 1271-1279.

Zestawienie oznaczeń

- A, A₀, B, B₀, C, C₀, C₁, F₁, F₂ ... F_n, E - współczynniki empiryczne;
 a, a₀, a₁, a₂, b, b₁, c, d₀, d₁, s - parametry geometryczne mieszadeł według rys. 4;
- D - średnica reaktora (mieszalnika) [m];
 d - średnica mieszadła [m];
 g - przyspieszenie ziemskie [m/s²];
 H - wysokość napełnienia reaktora [m];
 i₁, i₂ ... i_n - inwarianty podobieństwa geometrycznego układu mieszadło - zbiornik;
 M - moment obrotowy netto na wale mieszadła [Nm];
 N - moc mieszania [W];
 n - ilość obrotów mieszadła na sekundę;
 n₁ - ilość obrotów mieszadła na minutę;
 P - obciążenie dźwigni cechowniczej dynamometru wyrażone w [G], odpowiadające przy stałej długości dźwigni l = 0,228 m - momentowi obrotowemu M;
 z - ilość łopatek mieszadła;
 α, α₁, α₂, β₁, β₂ - parametry geometryczne mieszadeł według rys. 4;
 η - współczynnik lepkości dynamicznej wody [Pa.s];
 ρ - gęstość cieczy [kg/m³];
 ω - prędkość kątowna mieszadła [rd/s];
 Eu = $\frac{N}{d^5 n^3 \rho}$ - liczba Eulera dla procesu mieszania (liczba mocy);
 Fr = $\frac{n^2 d}{g}$ - liczba Froude'a;
 Re = $\frac{nd^2 \rho}{\eta}$ - liczba Reynoldsa.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ МЕШАЛОК,
 ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КАМЕРАХ ФЛОКУЛЯЦИИ.
 ЧАСТЬ 1. МОЩНОСТЬ СМЕШИВАНИЯ

Резюме

Эффекты работы циркуляционной камеры флокуляции имеет влияние мешалка, ее конструкционные и эксплуатационные параметры. Для оценки этого влияния проведены в лабораторных условиях сравнительные исследования, заключающие в себе некоторые типы и конструкционные разновидности турбинных и пропеллерных мешалок. Одним из исследуемых показателей была мощность смешивания. В обработке представлена методика и результаты этой части исследований. Наименьшее потребление мощности проявили четырехлопастные пропеллерные мешалки, а наибольшее - турбинные тарельчатые открытые и дисковые с простыми лопастями.

THE COMPARATIVE INVESTIGATION OF SOME TYPES OF MIXERS
USED IN THE CIRCULATION FLOCCULATION CHAMBERS.

PART I. THE POWER OF MIXING

S u m m a r y

The mixer, its construction and parameters, influence the effects of performance of the circulation flocculation chamber. In aim to estimate this influence, the comparative investigation embracing some types and constructional variations of the propeller and turbine mixers has been performed in the laboratory conditions. The mixing power was one of the examined indices. The methodology and results of this part of research have been presented in this paper. The least power consumption was indicated by the four-paddle propeller mixers, and the greatest, by the turbine open dihedral disk mixers and disk straight paddled mixers.