ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

KAROL KUŚ

MODELOWANIE PRZEPŁYWÓW W OSADNIKACH KONTAKTOWYCH Do uzdatniania wody

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA

Z. 30 GLIWICE 1987

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE



MODELOWANIE PRZEPŁYWÓW W OSADNIKACH KONTAKTOWYCH **DO UZDATNIANIA WODY**

GLIWICE 1987

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Apolinary L. Kowal Prof. dr inż. Marek Roman

KOLEGIUM REDAKCYJNE

- NY Prof. dr hab. inż. Wiesław Gabzdyl
- 2 DZIAŁU Dr inż. Wacław Kusznik
 - Mgr Elżbieta Stinzing
- CZŁONKOWIE KOLEGIUM Prof. dr hab. inż. Adolf Maciejny
 - Prof. dr inż. Stanisław Malzacher
 - Prof. dr hab. inż. Bronisław Skinderowicz

OPRACOWANIE REDAKCYJNE Mgr Aleksandra Kłobuszowska

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0072-4696

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej ul Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakl. 150–185 Ark. wyd.9,585 Ark. druk. 8,75 Papier offset. kl. 111.70x100,78g Oddano do druku 24.08.87 Podpis.do druku 25.09.87 Druk ukończ. w paźdz. 1987 Zam. 723/87 L-23 Cena zł 192,-

Skład, fotokopie, druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

REDAKTOR NACZELNY REDAKTOR DZIAŁU SEKRETARZ REDAKCJI

SPIS TRESCI

		Str.
1.	WSTEP	15
	1.1. Podstawy teorii sedymentacji cząstek kłaczkowatych	16
	1.2. Teoria działania urządzeń z zawieszonym osadem	17
	1.3. Klasyfikacja warstwy zawieszonego osadu	19
	1.4. Własności hydrodynamiczne warstwy zawieszonego osadu	21
	1.5. Tworzenie cząstek kłaczkowatych w funkcji gradientu prędko- ści	25
	1.6. Charakterystyka natężenia przepływu wody przez warstwę za- wieszonego osadu	3.
	1.7. Modelowanie przepływów i ocena efektów technologicznych ak- celatorów i pulsatorów	32
2.	CHARAKTERYSTYKA PRZEMYSŁOWYCH AKCELATORÓW I PULSATORÓW	35
	2.1. Osadniki kontaktowe stosowane w praktyce	39
	2.2. Wpływ jakości wykonawstwa i poziomu eksploatacyjnego na sprawność hydrauliczną i efekt technologiczny akcelatorów i pulsatorów	36
	2.2.1. Akcelatory	36
	2.2.2. Pulsatory	38
	2.3. Wpływ jakości wody na efekt technologiczny	40
	2.4. Ekonomika osadników kontaktowych	47
	2.5. Ocena pracy akcelatorów 1 pulsatorów w Polsce	40
3.	FIZYKALNE MODELOWANIE AKCELATORÓW I PULSATORÓW	53
	3.1. Wprowadzenie	54
	3.2. Ogólne zasady fizykalnego modelowania	54
	3.3. Kryteria podobieństwa dla modelowania przepływów i procesów w układach wielofazowych	55
	3.3.1. Analiza dotychczasowych prac z zakresu modelowania osadników kontaktowych	55
	3.3.2. Matematyczny opis przepływów w warstwie zawieszonego osadu	57
	3.3.3. Kryteria podobieństwa modelowania przepływów w war- stwie zawieszonego osadu	60
	3.4. Modelowanie przybliżone	75
	3.5. Skale modelowania	76
	3.5. Dokładność badań modelowych	79

			011 -
4.	MODELOWANIE	PRZEPŁYWÓW W AKCELATORACH I PULSATORACH	80
	4.1. Metody	badawcze	80
	4.1.1.	Analiza dotychczasowych metod badawczych	82
	4.1.2.	Eksperymentalno-matematyczna metoda badań	82
	4.2. Progra	m badań	85
	4.3. Stanow	iska doświadczalne	88
	4.3.1.	Stanowisko do badań modelowych akcelatora	88
	4.3.2.	Stanowisko do badań modelowych pulsatora	88
	4.4. Wyniki	badań własnych i ich dyskusja	93
	4.4.1,	Modelowanie strug wody w strefie sedymentacji akce- latora	93
	4.4.2.	Modelowanie kształtu komór osadowych pulsatora	95
	4,4,3.	Analiza modelowa wpływu konstrukcji drenażu ne warun- ki przepływu wody w pulsatorze	100
	4.4.4.	Matematyczne modelowanie ruchu cząstek w strefie kla- rowanie pulsatora	106
	4.5. Możliw	ości praktycznego wykorzystania wyników badań	122
	4.6. Propoz	ycja wdrożeniowe	123
5.		ÓW TECHNOLOGICZNYCH OSADNIKÓW KONTAKTOWYCH	125
	5.1. Techno	logiczne aspekty modelowania osadników kontaktowych .	125
	5.2. Matema	tyczny opia efektu usuwania zawiesin	125
6.	WNIOSKI		129
	6.1. Wniosk	1 o cherakterze poznawczym	129
	6.2. Wniosk	i o charakterze utylitarnym	129
	6.3. Kierun	ki dalazych badań	130
LII	ERATURA		131
	1. S. A. A. L.		430
ST	RESZCZENIA .	***************************************	138.

СОДЕРЖАНИЕ

			orp.
1.	встуі	ШЕНИЕ	15
	1.1.	Основы теории седиментации флокуляционных частиц	16
	1.2.	Теория действия устройств со взвеленным осадком	17
	1.3.	Классификация слоя взвеленного осадка	19
	1.4.	Гидродинамические свойства слоя взвешенного осадка	21
	1.5.	Создавание флокуляционных частиц в функции градиента скорости	25
	1.6.	Характеристика мощности потока воды через слой взведенного осадка	30
	1.7.	Моделирование потоков и оценка технологических эффектов акце- лераторов и цульсаторов	31
2.	XAPAI	ктеристика промышленных акцелераторов и пульсаторов	35
	2.1.	Контактные отстойники применяемые на практике ,,	35
	2.2.	Влияние качества исполнения и эксплуатационного уровня на ги- дравлический кща и технологический эфрект акцелераторов и пульсатовов	36
		2.2.1. акцелераторы	35
		2.2.2. Пуяьсаторы	28
	2.3.	Влияние качества воды на технологический эффект	40
	2.4.	Экономика контактных отстойников	47
	2.5.	Оценка работы акцелераторов и пульсаторов в Польше	49
3.	физи	ческое моделирование акцелераторов и пульсаторов	53
	3.1.	Введение	54
	3.2.	Общие основы физического моделирования	54
	3.3.	Критерия подобия для моделирования потоков и процессов в мно- гофазных системах	55
		3.3.1. Анализ до сих пор проведённых работ по моделированию контактных отстойников	55
		3.3.2. Математическое описание потоков в слов взвешенного освдка	57
		3.3.3. Критерня подобыя моделирования потоков в слов взвешен- ного освдка	69
	3.4.	Приближенное моделирование	75
	3.5.	IRAAN NORCANDOBREE	76
	3.6.	TOWNOCTA MOISSANT RECERTORANE	.79

		Crp.
4.	оделирование потоков в акцелераторах и пульсаторах	. 60
	.1. Исследовательские методы	. 80
-	4.1.1. Анализ до сих пор применяемых исследовательских мето-	-
	408 ************************************	• 82
	4.1.2. Экспериментально-математический метод	82
	.2. Программа исследований	. 85
- 2	.З. Экспериментальные стенды	. 88
	4.3.1. Стенд для модельных исследований акцелератора	. 88
	4.3.2. Стенд для модельных исследований пульсатора	. 88
	.4. Результаты собственных исследований и их дискуссия	. 93
	4.4.1. Моделирование струй воды в зоне седиментации акцеле-	- 93
	4.4.2. Иолелирование формы отстойников камер пульсатора	95
1	4.4.3. Модельный аналы влияныя конструкции дренажа на усло- вия протекания воли в пульсаторе	100
	4.4.4. Maremarayeckoe Moneyepobatue ibuxetus wacrup a some	
23	очистки пульсатора	. 106
	.5. Возможности практического использования результатов исследования	. 122
	.6. Предложения по внедрению	. 123
2		
5.	ценка технологических эффектов контактных отстойников	. 125
	.1. Технологические аспекты моделирования контактных отстойниког	. 125
	.2. Математическое описание эффекта удаления взвеси	. 125
6.	ыводы	. 129
	.1. Выводы познавательного характера	. 129
-	.2. Выводы утилитарного характера	. 139
	.3. Направления дальнейших исследований	. 130
		122 123
JUN	РАТУРА	. 131
12	The for the second strain have a state	1. 1. 1. 1
PES	æ	. 138

- 6 -

CONTENTS

Page

			- 3 -
1.	INTRO	DDUCTION	15
	1.1.	Fundamentals of the theory of flocculent particle sedimen- tation	16
	1.2.	Theory of operation of the devices with suspended precipi- tate	17
	1.3.	Classification of suspended settling layer	19
	1.4.	Hydrodynamic properties of suspended settling layer	21
	1.5.	Formation of flocculent particles in the function of velo- city gradient	25
	1.6.	Characteristics of intensity of water flow through suspen- ded settling layer	30
	1.7.	Modelling of flows and estimation of technological effects of accelerators and pulsators	31
2.	CHAR/	ACTERISTICS OF INDUSTRIAL ACCELERATORS AND PULSATORS	35
	2.1.	Contact settling tanks practically used	35
	2.2.	Influence of handiwork and exploitation level on hydraulic efficiency and technological effect of accelerators and pul-	
			30
	2.3.	influence of water quality on technological effect ,	40
	2.4.	Economic of contact setting tanks functioning in	4.1
	2.7.	Poland	49
3.	PHYS	ICAL MODELLING OF ACCELERATORS AND PULSATORS	53
	3.1.	Introduction	54
	3.2.	Generals principles of physical modelling	. 54
	3.3.	Criteria of similarity for flow modelling and processes in multiphase systems	55
		3.3.1. Analysis of previous studies on contact settling tanks' modelling	55
		3.3.2. Mathematical description of flows in suspended sett- ling layer	57
•		3.3.3. Criteria of similarity of flow modelling in suspen- ded settling layer	69
	3.4.	Approximate modelling	75
	3.5.	Scales of modelling	.76
	3.6.	Accuracy of model testinge	79

			rage
	4. MOD	ELLING OF FLOWS IN ACCELERATORS AND PULSATORS	80
	4,1	Methods of testing	80
		4.1.1. Analysis of former testing methods	82
		4.1.2. Experimental-mathematical method of testings	82
	4.2	, Research programme	85
	4,3,	, Test stands	88
		4.3.1. Stand for accelerator's model testing	88
		4.3.2. Stand for pulsator's model testings	88
	4.4.	Results of own testings and discussing on them	93
		4.4.1. Modelling of water streams in the zone of accelera- tor sedimentation	93
		4.4.2. Modelling of shape of pulsator settling chambers	95
		4.4.3. Model analysis of influence of drainage structure on water flow conditions in pulsator	100
		4.4.4. Mathematical modelling of particle movement in the zone of pulsator clarification	106
	4.5.	Possibilities of practical application of testing results .	122
	4.6.	Implementation propositions	123
	5. ESTI	MATION OF TECHNOLOGICAL EFFECTS OF CONTACT SETTLING TANKS	125
1.5	5.1.	Technological aspects of modelling of contact settling tanks	125
	5,2,	Mathematical description of effect of suspension removal	125
i	6. CONC	LUSIONS	129
	6,1.	Cognitive conclusions	129
	6.2.	Utylitarian conclusions	129
	6.3.	Directions of further research	130
	BIBLIOG	RAPHY	131
	SUMMARY	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	138

OZNACZENIA

A	-	powierzchnia zewnętrzna ośrodka, m ²
A _c		powierzchnia całkowita przekroju pomiarowego, s ²
A		stała charakteryzująca układ domieszek wody
Akz	-	powierzchniowa aktywność kłaczków, m ² /g
Ar	-	liczba Archimedasa
A Aci		elementarne pole pomiarowe, m ²
C,Cp,Ck	-	stężenie wskaźnika, stężenie początkowe i końcowe, g/m ³
Ca	-	liczba Campa
Ce	-	stężenie wagowe osadu przy prędkości W _e , kg/m ³
C _m	-	stężenie zawiasin w odpływie z m-taj komory reaktora, kg/m ³
CR	-	stężenie substancji flokulujących, g/m ³
Ca	-	stężenie materiału stałego w jednostce objętości kłaczków,kg/m ³
C _{wo}	-	stężenie cząstek kłaczkowatych w warstwie osadu zawieszonego, kg/m ³
C,	-	współczynnik stężenia objętościowego,
C _x	-	stężenie wagowe osadu przy prędkości W _x , kg/m ³
D,Dj,Dr	-	dawka koagulantu, dawka jednostkowa, rodzaj i dawka reagentu, g/m ³
DE	-	współczynnik dyfuzji, m ² /s
E	-	afekt usuwania zewiesin
E	-	energia oddziaływania cząstek koloidalnych, s ² .kg/s ²
E,	÷	afakt jadnostkowy
Eel	-	sile elektrostatyczna, m ² .kg/s ²
Ek	-	stopień ekspansji, $E_k = \frac{V_p}{V_o}$
Eu	-	liczba Eulera
EVN	-	sile venderwala, m ² ,kg/a ²
Ew	•	energia wpływu cząstek koloidalnych między sobą, m ² .kg/s ²
F1.F3	-	ciężar jednostki mieszaniny, m/s ²

Fk	- siła masowa, m.kg/s ²
Fac	- miła masowa przypadejąca na składnik 🚓 . m.kg/e ²
Fr	- liczba Froude'a
G	- gradient prędkości, 1/e
но	- liczba jednoczesności
Jgrad	- liczba zderzeń w efekcie gradientu prędkości
K _A ,K _B	 współczynniki funkcji tworzenie i rozpadu częstek kłacz- kowatych
Ko	- współczynnik kohezji osadu
K1 . K2 . K3 K12	- kryteria podobieństwa
к,	- energia kinetyczna, = ² .kg/s ²
L	- długość, m
M	- masa, kg
Mk	- współczynnik nierównomierności rozkładu prędkości
P	- mos włożona w mieszanie, m ² .kg/s ²
Po	- liczba mocy
Pi	- sila powierzchniowa, kg/m.s ²
Pic	- siła powierzchniowa przypadająca na składnik c, kg/m.s ²
Q	- objętościowe natężenie przepływu, obliczeniowe, m ³ /s
Q1	- natężenie przepływu wody w okresach międzyzrzutowych,m ³ /a
02	- natężenie przepływu wody w czasie zrzutu, m ³ /s
Re	- liczba Reynoldsa
Raj	- érednica zderzenia, m
R^0, R^1, R^2, R^3, R^4	- ilości masy, kg/m ³ .s
Sx	- skala modelowania dowolnej wielkości fizycznej
Scot	- skala stężenia składnika @
s _F	- skala ciężaru jednostki masy
S _R α	- skala źródła masy między modelem a obiektem rzeczywistym
Suc	– skala prędkości składnika 🏾
Sw	- eksla prędkości średniej całej mieszaniny
Sjoc	- skala strumionia dla składnika 🕫
9 ₁	- skale wysokości, skale liniowa
8 ₈	- skala masy
8 _p	- skale ciénień

- 10 +

Spoc		skala ciśnień częstkowych na poszczególne składniki
s _t	-	skala czasu
Sç	-	skala gęstości mieszaniny
Spor		skala gęstości składnika od
Sg	-	skala przyspieszenia ziemskiego
т	**	temperatura wody, ^O C
U1,Uj		liczba pojedynczych cząstek
U	-	energia wewnętrzna, m ² .kg/s ²
V	***	objętość mieszanej cieczy, m ³
Vo		objętość osadu przy W _p = O, m ³
Vp	-	objętość osadu przy prędkości przepływu pionowego $W_{\rm p}$, m ³
Vz	-	prędkość fazy stałsj, m/s
v ₁	-	prędkość fazy ciekłej, m/s
$v_k^0, v_k^1, v_k^2, v_k^3, v_k^4$	-	prędkości: cząstek wody, zanieczyszczeń, cząstek kłaczko- wych ciężkich i lekkich oraz koagulantu, m/s
v _k ^{o,3}	-	prędkość wspólna cząstak wody i cząstak kłaczkowatych lakkich, m/s
V _k	-	prędkość średnia k-tego składnika mieszaniny
w,w ₃	-	prędkość średnia mieszaniny, m/s
We	-	prędkość pionowago strumienia wody równa 0,5 mm/s
Wg		prędkość graniczna przepływu wody w modelu, mm/s
W1.W1	-	składowe prędkości średniej, m/s
Wo	-	prędkość opadania pojedynczej cząstki osadu w wodzie, 🕬
Wm		prędkość opadania masy kłaczków, m/s
Wp	-	prędkość przepływu strumienia wody ponad warstwą żawie- szonego osadu, m/s
W _{P1}	-	prędkość w elementarnym polu przekroju pomiarowego, ທ/s
WPér	-	prędkość średnia w przekroju pomiarowym, m/s
w _r	-	prędkość rzeczywista strumienie wody w warstwie zawie- szonego osadu, m/s
W×	-	dowolna prędkość pionowago etrumienia wody, m/s
Y1,Y2	-	kryterialne liczby klarowania
e,k	-	wielkości uwzględniające rzeczywiste rozmiary koagulowa- nych cząstek

- 11 -

a 1		aktywność jednostkowej masy kłaczków
b	-	parametr zmienny
d		średnica cząstki, cząstek zawiesin w osadzis, cząstki osadu, m
d _{k≹}	-	wymiar kłaczków, m
dz	-	średnica zastępcza, średnica cząstki fazy stałej, m
0	-	wielkość bezwymiarowa zalażna od wzajemnej agregacji cząstek
F.B	-	wektor zewnętrzny sił masowych, m.kg/s ²
g	-	przyspieszenie ziemskie, m/s ²
∆h		strata ciśnienia wywołana przepływem wody, m
j ^k œ		odpowiednie strumienie wody, zanieczyszczeń, cząstek kłaczko- watych oraz koagulantu, kg/m ² .s
kr	-	krotność cyrkulacji wawnętrznej
ko,k	-	współczynniki
k _d ,a	-	wielkości uwzględniające rzeczywiste rozmiary koegulowanych częstek
1	-	wysokość warstwy osadu, m
	-	liczba komór reaktora
n	-	wykładnik potęgi
n, .	-	normalna
n _o ,n _t	-	liczba pierwotnych cząstek koloidalnych
P	-	ciśnienie wywierane na częstki mieszaniny, kg/m.s ²
рН	-	odczyn wody
par	-	ciśnienie cząstkowe składnika 🗴 , kg/m.s ²
ř.	-	uśredniony promień porów w kłaczku, m
τ	-	czas, czas flokulacji, s
u1.u1	-	składowe prędkości dyfuzyjnej, m/s
uk	-	prędkość dyfuzyjna, m/s
u ^o č	-	prędkość składnika 😋 , m/s
x,y,z	-	współrzędna układu odniesienia
×1,×2,×3	80	współrzędne cząstki mieszaniny
×k	-	k-ta współrzędna cząstki
Q = 0,1	4	- składniki mieszaniny
œp	-	wykładnik potęgi ($\alpha_p = 2,5$ dla ruchu turbulantnego i $\alpha_p > 5$ dla ruchu laminarnego)

с ₀	 współczynnik uwzględniający skuteczność łączenia się czastek
3	– współczynnik porowatości warstwy zawieszonego osadu
2h	– sprawność hydrauliczna, %
re	- współczynnik lepkości dynamicznej, kg/m.s
3	- współczynnik lepkości kinematycznej, m ² /s
P	– gęstość średnia mieszaniny, kg/m ³
Pk	- gęstość kłaczków, kg/m ³
Po	- gęstość cząstki osadu, kg/m ³
Pwo	– gęstość warstwy osadu zawieszonego, kg/m ³
p°, p ¹ , p ² , p ³ ,	4 - gęstości: wody, zanieczyszczeń, cząstek kłaczkowatych ciężkich i lekkich oraz koagulantu, kg/m ³
pa	- gęstość składnika∝, kg/m ³
ϕ_k^{QC}	 straty pędu składnika œ wynikające z oddziaływań z pozostałymi składnikami, m.kg/s
q	- objętość względna kłaczków
ω	- prędkość obrotowa, obr/min
5	- potencjał elektrokinetyczny, mV

Pozostałe indeksy

()' - natura
()" - model
()_z - faza stała
()₁ - faza ciekła

Z analizy mechanizmu procesu koagulacji w osadnikach kontaktowych w ujęciu hydraulicznym i technologicznym wynika, że jest on formą pośrednią pomiędzy koagulacją objętościową i powierzchniową. Jest to zasadniczą trudnością w jego kompletnym opisie z punktu widzenia modelowania przepływów i procesów w układach wielofazowych oraz w ocenie efektów technologicznych.

Trudności w równoczesnym uwzględnieniu podobieństwa geometrycznego, kinematycznego, dynamicznego, cieplnego i chemicznego oraz charakteru powiązań kinetyki flokulacji, adsorpcji i desorpcji z transportem masy i pędu w poszczególnych przestrzeniach mieszania tych urządzeń powodują, że tematyka ta nie została do końca rozwiązana tak w kraju, jak i za granicą.

Celem pracy była analiza, matematyczne opisanie oraz przedyskutowanie zjawisk i procesów zachodzących w osadnikach kontaktowych, szczególnie zaś w akcelatorach i pulsatorach, aby poszerzyć podstawy modelowania i oceny efektów technologicznych tych urządzeń jako zagadnień dotychczas mało zbadanych i nieopracowanych w dostatecznym stopniu. Praca ta pomyślana jest również jako studium możliwości wykorzystania badań modelowych w kierunku poznania i ulepszenia ich konstrukcji w celu ograniczenia do minimum liczby cząstek kłaczkowatych wynoszonych do odpływu.

Badania przeprowadzono zarówno na modelach płaskich, jak i przestrzennych, wykorzystując anemometr laserowy do pomieru rozkładu prędkości strug wody. Przy opisie matematycznym ruchu częstek kłaczkowatych w strefie klarowania posłużono się układem równań różniczkowych nieliniowych pierwszego rzędu. Na ich podstawie skonstruowano rozwiązania numeryczne z wykorzystaniem EMC.

Rozważania teoretyczne oraz badania własne poparte są analizą pracy przemyeżowych akcelatorów i pulsatorów oraz ich ekonomiką. Praca na zatem zarówno charakter poznawczy, jak i utylitarny.

Bezpośrednimi celami o charakterze poznawczym są:

- opis tworzenia cząstek kłaczkowatych w funkcji gradientu prędkości i temperatury wody w osadnikach kontaktowych,
- matematyczny opis przepływów w warstwie zawieszonago osadu z uwzględnieniem równań bilansów masy, pędu i energii,
- wyprowadzenie liczb kryterialnych do modelowania przepływów w warstwie zawieszonego osadu,
- zastosowanie aetody badań za pomocą anemometru laserowego.

1. WSTEP

Utylitarny aspekt pracy dotyczy:

- metod, kierunków i przykładów badań akcelatorów i pulsatorów w celu dostarczenia niezbędnych danych do ich projektowania z punktu widzenia kształtu i warunków hydrodynamicznych przepływu wody.
- wpływu jakości wykonawstwa i poziomu eksploatacyjnego na sprawność hydrauliczną i efekt technologiczny akcelatorów i pulsatorów,
- oceny pracy akcelatorów i pulsatorów w Polsce.

1.1. Postawy teorii sedymentacji cząstek kłaczkowatych

Pojęcie sedymentacji sprowadza się zasadniczo do dwóch podstawowych zjawisk [38], tj.: hydrodynamicznego, w którym obserwujemy opadanie cząstek ciał stałych w płynie pod wpływem działania siły ciężkości i technologicznego, w którym następuje oddzielanie od płynu rozproszonych w nim zawiesin opadających pod wpływem siły ciężkości. Ten podstawowy proces występujący w technologii wody i ścieków, w zależności od charakteru i stężenia zawiesin, można podzielić na:

- opadanie zawiesin ziarnistych,
- opadanie częstek kłaczkowatych,
- opadanie zakłócone bądź swobodne.

W swobodnej sedymentacji zawiesin ziarnistych cząstki zachowują indywiduslność i nie zmieniają w trakcie opadania swoich właściwości fizycznych, tzn.: wielkości, kształtu i gęstości. Charakter ich ruchu opisują prawa Stokesa, Allena i Newtona [22, 38, 44, 102]. Cząstka taka opada ze stała prędkością.

Sedymentację częstek kłaczkowatych cechuje rosnącą prędkość opadania na skutek powiększania ich masy i objętości w wyniku koagulacji zawiesin i zdolności do eglomeracji cząstek. Procesom tym towarzyszą zmiany gęstości i kaztałtu częstek, jak również właściwości fizycznych cieczy, która je otacza.

Sedymentacja zakłócona, zwana również masową zachodzi w przypadku znacznego stężenia zawiesin ziarnistych bądź kłaczkowatych. Opadające cząstki oddziałują wzajemnie na siebie, zakłócając prawa rządzące opadaniem pojedynczej cząstki. Opadanie zakłócone występuje przy objętościowym stężeniu zawiesiny > 0,22% [63]. Odpowiada to wagowemu stężeniu 6,0 g/dm³ mineralnej zawiesiny rzecznej bądź zawiesiny węglanu wapnia, lecz tylko 2,5 g/dm³ zawiesiny organicznej. Tak wysokie stężenia zawiesin występują w procesach oczyszczania wody w warstwie osadu w osadnikach, a zwłaszcza w osadnikach kontaktowych.

Teoretyczne ujęcie procesu sedymentacji częstek kłaczkowatych jest trudne i złożone. Wynika to między innymi z wzajemnych powiązań w układzie częstka – ciecz oraz zmiennego kształtu i wielkości częstki. Częstka kłaczkowata ma strukturę pierzastą i gromadzi w swej masie znaczną ilość wody. Przyrost wielkości cząstek jest ograniczony łamliwością kłaczka [63], który po osiągnięciu wartości krytycznej może rozpaść się na cząstki mniejsze. Dodatkową trudność stanowi zmieniający się w czasie skład wody, jej temperatura oraz działanie reagentów w zmiennych warunkach. Prace teoretyczne nad sedymentacją cząstek kłaczkowatych mogą zatem stanowić przybliżoną ocenę możliwości zachowań cząstek w tak zmiennych warunkach. Do ustalenia niezbędnych parametrów procesu potrzebne są odpowiednie badania laboratoryjne umożliwiejące sporządzenie krzywej opadalności zawiesin.

Prędkość swobodnego opadania pojedynczej cząstki kłaczkowatej jest zawsze większa od prędkości sedymentacji masowej, która występuje np. w warstwie osadu zawieszonego na skutek dużej koncentracji kłaczków. Związek między prędkością opadania masy kłaczków W i prędkością swobodnej sedymentacji poszczególnych cząstek W, opisuje zależność (44, 144]:

$$\log \frac{W_{m}}{W_{o}} = -2,75 \frac{C_{WO}}{C_{s}}$$

Wartość 2,75 została ustalona w doświadczeniach [44, 144] i zależy ona od właściwości hydrodynamicznych kłaczków, zmieniając się od 1 do 3. Wykreślnie zależności log W_m od C przedstawia prosta nachylona pod kątem & do osi rzędnych, a odcinek odcięty przez nią na osi rzędnych odpowiada log W_n.

(1)

1.2. Teoria działania urządzeń z zawieszonym osadam

W opracowaniach zajmujących się oczyszczaniem wody zarysowują się wyraźnie między innymi dwa podstawowe problemy, Pierwszy dotyczy sprowadzenia niepożądanych składników wody surowej za pomocą środków chemicznych do stanu zawiesiny kłaczkowatej, zaś drugi oddzielenia tej zawiesiny od klarowanej wody, Proces oddzielenia zawiesiny kłaczkowatej od oczyszczanej wody przebiega w wielu urządzeniach, z których za najlepsze uważane są osadniki kontaktowe, Wykorzystuje się tutaj efekt przyspieszenia kosgulacji ortokinetycznej poprzez kontakt kosgulowanych zanieczyszczen i roztworu kosgulanta z uprzednio wytworzonymi kłaczkami. Podszas przepływu oczyszczanej wody przez zawieszony osad następuje sglomeracja cząstek oraz adsorpcja koloidów, przez co kosgulacja zachodzi pewniej i szybciej przy mniejszych dawkach kosgulantu [68].

Znaczna powierzchnie właściwa osadu zawieszonego i jego zdolność sorpcyjna wykorzystywana jest przy przepływie wody w przeciwprądzie z opadającymi kłaczkami, co działa kontaktowo, przyspiesza proces koagulacji oraz tworzenie dużych cząstek, a także zatrzymuje drobna zawiesiny i mikrokłaczki, łącząc w ten sposób proces kosgulacji i sedymentacji [63]. Optymalny przebieg takiego procesu możliwy jest w warunkach, w których cała powierzchnia starych kłaczków uczestniczy w reakcji.

W celu utrzymania w stanie zawieszenia warstwy osadu tworzy się stan dynamicznej równowagi pomiędzy siłami ciążenia cząstek osadu a oparami hydraulicznymi, Prędkość opadania zawiesin w warstwie osadu jest mniejsza od prędkości swobodnego opadania pojedynczych cząstek, Na przykład przy stężeniu objętościowym wynoszącym 10% prędkość osiadania zmniejsza się dwukrotnie, zaś przy stężeniu 24% – sześciokrotnie w porównaniu z predkością swobodnego opadania zawiesin [44]. Tę zdolność fizyczną osadu zawieszonego wykorzystano w osadnikach kontaktowych poprzez doświadczalny dobór odpowiedniej prędkości wznoszenia wody w strefie osadu zawieszonego proporcjonalnej do jego stężenia, Warstwa zawieszona może pracować w dość szerokim przedziale prędkości strumienia wznoszącego. Praktycznie prędkość pionowego przepływu wody zawiera się w granicach od 0,7 do 1,1 mm/s, **a zawartość zawiesiny** w odpływie nie przekracza wówczas 20 mg/dm³ [63]. Zwiększanie tej prędkości powoduje spadek stężenia objętościowego cząstek osadu i rozlużnienie przestrzeni między kłaczkami warstwy. W górnym stanie granicznym warstwa ulega rozmyciu, a zawiesiny zostaja uniesione do odpływu. Dolny warunek graniczny utrzymania się warstwy osadu wystąpi w przypedku, kiedy siły hydraulicznego unoszenia cząstek zawieszonych będą mniejsze od sił ciążenia cząstek osadu. Wynika stęd, że w celu zachowanie w stanie zawieszenia warstwy osadu należy tak ustalić prędkość strumienia wznoszącego wody, aby znajdował się on w przedziale określonym górnym i dolnym warunkiem granicznym, Zbliżanie aie predkości wznoszacego strumienia wody do prędkości swobodnego opadania cząstek powoduje, że objątość porów w warstwie zdęże do jedności, a stężenie objętościowe osadu do zera.

Stała prędkość wznoszenia wody w strefie osadu zawieszonego przy zmienie ciężaru właściwego częstek kłaczkowatych sprzyja nadmiernemu zagęszczaniu górnej lub dolnej części warstwy osadu sprowadzając charakter jego pracy do stanu złoża zupełnego lub niezupełnego (co omówiono w rozdziałe 1.3). Działanie osadników kontaktowych ze złożem niezupełnym znacznie obniża efektywność koagulacji ortokinetycznej, stąd też stosuje się okresowe zwiększanie prędkości przepływu wody w formie przepływu przerywanego lub falującego, ewentualnie uśrednianie stężenia zawiesin poprzez cyrkulację osadu.

Zjawiskiem niekorzystnym związanym z rozbijaniem kłaczków jast ich starzenie się z upływem czasu i malejąca wskutek uporządkowanej struktury zdolność do powtórnej aglomeracji [12].

Podane wyżej operacje związane są z odmiennością konstrukcyjną poszczególnych osadników kontaktowych, które można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- urzędzenie o stałym jednostajnym przepływie wody,

- urządzenia o przepływie pulsacyjnym (pulsatory),
- urządzenia o stałym przepływie wody z komorą mieszania i nawracaniem wytrąconego osadu.

1.3. Klasyfikacja warstwy zawieszonego osadu

Cechy fizyczne, jakie wykazuje warstwa zawieszonego osadu, uzależnione są między innymi od kierunku przepływu wody. Pod tym względem osadniki kontaktowe można podzielić na dwa zasadnicze rodzaje:

- urządzenia o przepływie pionowym,
- urzędzenia o przepływie zbliżonym do poziomego.

Urzędzeniami o przepływie pionowym zajmowali się liczni autorzy: [1, 2, 5-9, 11, 14, 17, 18, 21, 23, 27, 31, 32, 39, 41, 46-51, 53, 55-57, 66-68, 88, 89, 91, 92, 101, 113, 131-134, 144, 146, 147]. Tesarik w studium dotyczącym działania osadników kontaktowych [131-134] dzieli stosowane w praktyce klarowniki z punktu widzenia cech fizycznych warstwy zawieszonego osadu na urządzenia:

- ze złożem zupełnym,
- ze złożem niezupełnym.

Złoże zupełne charakteryzuje się tym, że widoczna jest wyrażne granica rozdzielająca osad od strefy wody sklarowanej na skutek górnego odprowadzenia wody. Rozmieszczenie cząstek kłaczkowatych jest równomierne w przekroju poprzecznym przepływającego strumienia wody. Stężenie zawieszonego osadu zwiększa się w miarę wzrostu wysokości warstwy osadu. Złoże zupełne może istnieć jedynie przy zachowaniu odpowiedniego stanu hydrodynamicznej równowagi, wynikającej z jego cech fizycznych i prędkości przepływu wody. Na cząstki kłaczkowate zawieszonego osadu działają siły grawitacji 1 kohezji oraz siła strumienia przepływającej wody, tzn. parcie hydrauliczne unoszące złoże i siły ścinające, dążące do rozdzielenia masy złoże na drobne cząstki. Podwyższenie prędkości przepływu wody powoduje wzrost parcia hydrodynamicznego na złoże zawieszonego osadu i zwiększenie się sił ścinających, działających na poszczególne cząstki. Sprzyja to powiększaniu się odległości między cząstkami osadu i przechodzeniu złoża w stan fluidalny. Przy tym stanie złoża małe kłaczki przenikają do strefy wody sklarowanej powodując zmętnienie, zanik wyrażnej granicy osad - woda oraz pogorszenie jakości wody w odpływie z urządzenia.

Przyrost wielkości i masy kłaczków w złozu zupełnym następuje od dołu złoża, poprżez niewidoczne gołym okiem cząsteczki znajdujące się w strefie ruchu burzliwego. W miarę przemieszczania się ku górze zanika stopniowo ruch burzliwy, a wielkość kłaczków wzrasta, następuje flokulacja i filtracje kontaktowa. Kłaczki starsze, większe i bardziej dojrzałe przemieszczaję się ku górze dzięki pełzaniu, a ich możliwości ruchowe staję się coraz bardziej ograniczone. Ostatecznie ruch cząstek kłaczkowatych zanika, a zlepione kłaczki tworzą jednolitą masę – warstwę. W skutek dehydratyzacji część cząstek wykazuje tendencję do opadania, utrudnioną naporem hydrodynamicznym strumienia wznoszącego i siłami kohezji. Brak cząstek kłaczkowatych powyżej warstwy zawieszonego osadu powoduje zwiększenie czynnego przekroju i zmniejszenie prędkości przepływu wody w strefie klarowania. Nadmiar cząstek kłaczkowatych odprowadzany jest z górnej warstwy zawieszonego osadu do odpowiednich komór zagęszczenia. Klasycznym przykładem urządzenia ze złożem zupełnym zawieszonego osadu jest klarownik radziecki typu korytarzowego. Do grupy osadników kontaktowych ze złożem zupełnym można ponadto zaliczyć: klarownik typu CSAV, klarownik sprzężony SIGMA – VK, urządzenie węgierskie systemu "Cyclofloc", pulsator oraz wiele klarowników konstrukcji radzieckiej.

Zbyt duża prędkość wznoszenia wody w strefie osadu zawieszonego może być przyczyną zakłóceń eksploatacyjnych, przez co do komór zagęszczania będzie przedostawał się świeży osad znajdujący się ponad złożem, zaś stary osad przy wzrastającej dehydratyzacji częstek będzie przemieszczał się ku dołowi, zagęszczając strefę przydenną osadnika kontaktowego. Zmniejszenie strumienie wznoszącego wody w strefie osadu zawieszonego może z kolei przekształcić złoże zupełne w inną postać fizyczną złoża, określaną nazwą złoża niezupełnego.

Złoże niezupełne charakteryzuje się tym, że jego stężenie objętościowe w dolnej strefie klarownika jest znacznie większe niż w górnej. Przy dłużezym utrzymywaniu się takiego stanu powstają w złożu miejsca o zwiększonym zagęszczeniu kłaczków. Miejsca te powoduję wzrost oporu hydraulicznego dla wody przepływającej kanalikami, w których osad z czasem ulega wzrastającemu zagęszczeniu. Kontakt uzdatnianej wody z całą objętością warstwy zawieszonego osadu jest w ten sposób utrudniony, a przez to niepełny. Brak wyrażnego rozdziału między osadem zawieszonym a strefą wody sklarowanej. Utrzymuje się zwiększony stopień zmętnienia wody nad złożem osadu, a efekt klarowania obniża się. Ponadto część makrokłaczków formuje się w większe cząstki nie w złożu osadu, a dopiero w strefie wody sklarowanej, stęd częstki mniejsze zostają zabierane do odpływu. Eksploatacja osadników kontaktowych ze złożem niezupełnym prowadzi często do zaburzeń w ich działaniu, zachodzi więc potrzeba okresowego zwiększania obciążenia powierzchniowego tych urządzeń.

Zagrożeniem dla złoża zupełnego jest dłużej trwający stan jednostajnego przepływu wody, sprzyjający powstawaniu miejscowych zagęszczeń osadu, zwiększających nierównomierność przepływu strug wody i przyspieszających fazę przejścia w charakter złoża niezupełnego. Zjawisku temu można przeciwdziałać przepływem przerywanym o zwiększonym natężeniu lub spulchnianiem warstwy osadu za pomocą środków mechanicznych. Do tego typu urzędzeń można np. zaliczyć precipitator i reaktywator. Wyniki uzyskane z eksploatacji tych osadników kontaktowych są pozytywne. Warunkiem dobrego ich działania jest przestrzegenie zaleceń dotyczących obciążenia powierzchniowego. Z krótkiej charakterystyki cech fizycznych zachowania się złoża zupełnego i niezupełnego wynika, że w przypadku stosowania osadników kontaktowych ze złożem zupełnym istnieje możliwość większego obciążenia powierzchniowego tych urządzeń. Jednak dla zachowania ich odpowiedniej sprawności eksploatacyjnej konieczna jest praca pod stałym obciążeniem hydraulicznym.

Niedogodności w eksploatacji tych urządzeń powodują, że coraz częściej na większych stacjach wodociągowych uzdatniających wody powierzchniowe buduje się osadniki kontaktowe z zawieszonym osadem o przepływie zbliżonym do poziomego [17, 30, 54]. Do czynników, które zadecydowały o budowie tych urządzeń, należy zaliczyć większe bezpieczeństwo i stabilność pracy dzięki mniejszej ich wrażliwości na zmiany obciążenia hydraulicznego. Wśród konstrukcji proponowanych przez różne firmy zagraniczne, najczęściej spotyka się takie urządzenia, jak: akcelator, accentrifloc, hydrotritor, recyrkulator, reaktor KSU itp. [1, 2, 4, 8, 9, 10, 14, 17, 29, 42, 48, 51, 68, 97, 133, 135]. W Polsce najczęściej stosowane są akcelatory pracujące na potrzeby energetyczne i komunalne [10, 15, 16, 42, 58, 77, 79, 80, 120, 122, 124, 125, 128, 140].

1.4. Właściwości hydrodynamiczne warstwy zawieszonego osadu

Zachowanie się warstwy zewieszonego osadu w czasie przepływu przez nią strumienia wody zależy od ciężaru cząstek kłaczkowatych, naporu hydrodynamicznego wywołanego tym przepływem, od sił kohezji, na które ma duży wpływ struktura częstek oraz od wytrzymałości cząstek na działanie sił stycznych. Wymiary i kształt kłaczków są bardzo zróżnicowane, a utworzona z nich warstwa różni się w sposób zasadniczy od zawiesin o strukturze ziarnistej, ulegając cięgłej regeneracji. Istnieje ścisła zależność między prędkością wznoszącego się strumienia wody a stężeniem objętościowym cząstek zawieszonego osadu. Każdy nowy stan równowagi w wyniku zmiany prędkości wznoszenia wody powoduje inne stężenie cząstek kłaczkowatych w osadzie, zgodnie z hydrodynamicznymi warunkami przepływu i osiadania zawiesin oraz fizycznymi właściwościemi złoża. Dla zachowania w stanie zawieszonym warstwy osadu niezbędna jest wzajemne równowaga między oddziałującymi na siebie siłemi. Graniczną prędkość strumienia wznoszącego utrzymującego osad w stanie zawieszenia ustałe się doświedczałnie.

Wskażnikiem charakteryzującym stopień turbulencji warstwy zawieszonego. osadu jest liczba Raynoldsa, któraj wartość waha się od 0,2-500 [34]. Dla zakresu liczb Raynoldsa 0,2 < Ra < 1 występuja ruch laminarny dla 1 < Ra < 1000 przejściowy, zaś dla Ra > 1000 ruch burzliwy [132]. W dobrze pracującej warstwie zawieszonego osadu wartość Ra zawiera się na ogół w przedziała 1-10 [134].

- 21 -

Charakter przepływu wody prach osadu można określić za pomocą liczby Reynoldsa:

$$Re = \frac{W_0 \cdot d}{2}$$
 (2)

Prędkość przepływu strumienia wody ponad warstwą zawieszonego osadu, zwana często prędkością pozorną lub graniczną, określana jest z relacji [25, 35, 133, 134]:

$$W_{p} = W_{o} * \delta^{OC_{p}}$$
(3)

Wykładnik ^{OC}p zwiększa się wraz ze zmniejezeniem średnicy częstek i grubości waretwy zawieszonego osadu [133].

Prędkość opadania cząstek w obszarze przejściowym dla 1 < Re < 1000 określa wzór Allena [22, 134]:

$$W_{0} = 0.2 g \left(\frac{p_{0} - p^{0}}{p^{0}}\right)^{2/3} \frac{d}{q^{1/3}}$$
(4)

Przyjaując gęstość cząstek osadu za stałą ρ_{p} = const, wzór (4) upraezcza się do postaci:

$$W_{0} = k_{0} \frac{d}{\sqrt{1/3}}$$
(5)

k = const

Podetawiając wyrażenie (5) do wzoru na prędkość pozorną (3), otrzyma się następujące równanie [134]:

$$W_{p} = k_{0} \frac{d}{s^{1/3}} \tilde{\varepsilon}^{\alpha p}$$
(6)

Przy ustalonym charakterze ruchu wody, tj. stałej wartości wykładnika Ośp, wynika stęd, że prędkość przepływu strumienia wody ponad warstwę zawieszonego osadu zależy od średnicy częstek osadu, lepkości wody i stężenie osadu, ponieważ &= i = C, (C, - współczynnik stężenia objętościowego).

Francuska firma Degremont zaleca, aby przy projektowaniu pulsatorów korzystać z równania Leviela [25] w postaci:

$$W_{p} = K_{o}(E_{k} - 1)$$

Współczynnik kohezji osadu umożliwis określenie średniej pozornej prędkości wznoszenia wody w zależności od jej jakości oraz rodzaju użytych

(7)

- 22 -

koagulantów i flokulantów. Do jago wyznaczenia wykreśla się prostę w układzie współrzędnych $W_p = f(V_p)$. Punkt przecięcia się tej prostej z osię odciętych wyznacza objętość V_p , przy której prędkość $W_p = 0$. Otrzymana w ten sposób wielkość służy do ponownego wyskalowania osi odciętych w jednostkach stopnia ekspansji. Nachylenie prostej wyrażone w nowych jednostkach wyznacza potrzebny współczynnik K_p , który dla dużych i ciężkich kłaczków dochodzi do 1,2-1,5.

Klaczko [51] zaleca, aby pozorną prędkość wznoszenia wody w strefie sedymentacji dla klarowników określać doświadczalnie na modelu, którego podstawę stanowi pionowo ustawiona rura szklana o długości 3000 mmi średnicy 150-200 mm. W ten sposób wyznacza się prędkość graniczną, przy której ilość zawiesiny w sklarowanej wodzie nie przekracza 10-12 mg/dm³. Prędkość pozorną wznoszącego się strumienia wody oblicza się wówczas ze wzoru [51]:

$$W_0 = 0,75(W_0 - 0,1)$$

Klaczko [49] określa ponadto współzależność między prędkością dowolnego strumienia W_x a wagowym stężeniem osadu w warstwie oraz jego ekspansją, podając zależność:

$$C_{x} = C_{\theta} \frac{1 + E_{k} \cdot W_{\theta}}{1 + E_{k} \cdot W_{x}}$$
(9)

(8)

Na prędkość przepływu strumienia wody ponad warstwą zawieszonego osadu duży wpływ wywiera między innymi lepkość wody, która zależy bezpośrednio od temperatury. Przykładowo, temperaturze 273 i 293 K odpowiadają następujące współczynniki lepkości kinematycznej [136]:

$$\sqrt[3]{(273)} = 1.79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

 $\sqrt[3]{(293)} = 1.00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Zakładając średnicę cząstek osadu, porowatość i wykładnik potęgowy oć jako stałe, iloraz prędkości pozornej przyjmie postać [6, 75, 134]:

$$\frac{W_{p}(273)}{W_{p}(293)} = \left(\frac{\sqrt[3]{273}}{\sqrt[3]{293}}\right)^{1/3} = \left(\frac{1.79 \cdot 10^{-6}}{1.00 \cdot 10^{-6}}\right)^{1/3} = 0.825$$

Wynika stąd, że w okresie zimowym wydatek urządzeń z zawieszonym osadem powinien być o 17.5% mniejszy w porównaniu z okresem letnim, jeżeli przyjąć, że na przebieg procesu na wpływ jedynie zmiana współczynnika lepkości, zaś pozostałe parametry oczyszczanej wody są takie same.

- 23 -

Prędkość pozorna wznoszenia wody w klarownikach zawiera się na ogół w granicach od 0,6 do 1,1 mm/s, a jedynie przy dekarbonizacji dochodzi do 2,0 mm/s [51].

Prędkość rzeczywista W_r przepływającego strumienia wody w warstwie zawieszonego osadu jest większa od prędkości pozornej, co według Tesarika da się opisać następującym równaniem [25]:

$$W_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma}}{\mathcal{E}}$$
(10)

(11)

Z badań przeprowadzonych przez VITUKI [17] wynika, że

W

w zależności od stężenia objętościowego osadu. Sytuacja ta zmienia się w okresie zimy, kiedy temperatura wody jest niska, zaś ilość zawiesiny w wodzie mała. W tych warunkach flokulacja za pomocą kosgulantu typowego (Al³⁺, Fe³⁺) jest niepełna, a lekkie i drobne kłaczki wypływają ponad zawieszony osad. Wówczas małe dawki środków wspomagających wpływają korzystnie na flokulację i stałość warstwy zawieszonego osadu [6, 68, 134]. Użycie flokulantów w normalnych warunkach umożliwia często zwiększenie prędkości przepływu wody w urządzeniach z zawieszonym osadem i uzyskanie większej ich wydajności. Np. z badań przeprowadzonych przez Tesarika [134] wynika, że iloraz prędkości pozornej strumienie wody z flokulantem W_{p1} i bez W_{p2} jest w przybliżeniu wartością stałą dla każdej porowatości i wynosi:

$$\frac{21}{22} \approx 1.4$$
 (12)

Zwiększenie prędkości przepływu wody w warstwie zawieszonego osadu wynika w tym przypedku z powiększonych rozmiarów kłaczków i większego stężenia warstwy osadu, przy zmniejszonej ilości drobnych zawiesin wynoszonych do odpływu. Oprócz zwiększonego stężenia osadu wywołanego wzmożonę zdolnościę do kohezji zawiesin, poprawia się również odporność hydrauliczna kłaczków.

Przeprowadzona analiza właściwości hydrodynamicznych warstwy zawieszonego osadu pozwala na sformużowanie następujących uogólnień:

- w celu zachowania warstwy osadu w stanie zawieszonym, konieczna jest wzajemna równowaga między ciężarem cząstek kłaczkowatych a parciem hydrodynamicznym przepływającego strumienia wody,
- prędkość przepływającego strumienia wody jest funkcją wielkości i gęstości częstek osadu, ich stężenia i lepkości wody,
- graniczny zakres predkości ustala się każdorazowo metodą doświadczalną,

- w okresie zimowym na skutek zmiany lepkości wody, aby zachować niezbędny stopień oczyszczania w osadnikach kontaktowych, prędkość przepływu wody powinna być mniejsza od prędkości w okresie letnim,
- w okresach obniżonych temperatur wody małe dawki flokulantu wpływają korzystnie na flokulację i stałość warstwy zawieszonego osadu, powodując wzrost gęstości kłaczków, zaś w normalnych warunkach pracy tych urządzeń ich obecność pozwala często na zwiększenie prędkości przepływu wody.

1.5. Tworzenie częstek kłaczkowatych w funkcji gradientu prędkości

Charakterystyczna budowa cząstki koloidalnej, składającej się z jądra oraz warstwy adsorpcyjnej i dyfuzyjnej, powoduje, że między warstwą adsorpcyjną i ruchomą częścią warstwy dyfuzyjnej powstaje różnica potencjału se netktrokinetycznego, zwanego potencjałem ξ . Wielkość potencjału ξ decyduje o stabilności układu koloidowego. Im wyższy potencjał, tym większe siły odpychające działają między cząsteczkami [63]. Przyciąganie natomiast powodują siły van der Waalsa o znacznie ograniczonej odległości oddziaływania. Wynika stąd, że energię oddziaływania cząstek koloidalnych między sobą można określić jako wypadkową przeciwnie skierowanych sił, tj. elektrostatycznej E_{el} oraz vanderwalsowskiej E_{evil} , i zapisać równaniem [69]:

Eo = Eel + EvN

Energia ta może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne w zależności od grubości warstwy podwójnej i wysokości jej potencjału oraz odległości częstek. Wartości mniejsze od zera sprzyjają aglomeracji koloidów hydrofobowych. O aglomeracji koloidów hydrofilowych decyduje natomiast praca wykonana w celu przezwyciężenia molekularnych wiązań cząsteczek wody na powierzchni fazy rozproszonej [69]. Oprócz jonów, koagulację koloidów mogą powodować również zole o przeciwnym znaku.

(13)

Częstki koloidalne nie tylko oddziałują na siebie, ale również zderzają się z częstkami wody. Tę cechę układu koloidowego określają tzw. ruchy Browna.

Można przyjąć, że proces koagulacji przebiega w dwóch następujących po sobie etapach [12, 37], tj, etapie destabilizacji koloidów i etapie ich aglomeracji. Krótki czas destabilizacji koloidów pozwala założyć, że o szybkości koagulacji decydują warunki i sposób przeprowadzenia procesu kłaczkowania, dlatego taż rozróżnia eię:

- koagulację zachodzącą na skutek ruchów Browna,
- koagulację ortokinetyczną, wywołaną gradientem prędkości cząstek.

Udział tych procesów zmienia się w czasie i zależy od średnicy cząstek, które z upływem czasu koagulacji coraz bardziej różnią się rozmiarami. Na przykład dla częstek do 1 μ m i gradientu G = 1 $\frac{1}{5}$ udział obu procesów jest jednakowy, później wpływ koagulacji ortokinetycznej rośnie [19].

Z równania koagulacji ortokinatycznej wynika, że o formowaniu się kłaczków decyduje gradient prędkości wywołany mieszaniem [12, 13, 37] :

$$J_{grad} = \frac{4}{3} (R_{ij})^3 \cdot U_i \cdot U_j$$
 (14)

Liczba zderzeń i efektywność koagulacji rośnie bardzo szybko wraz z gradientem prędkości do pewnej wielkości granicznej, po przekroczeniu której następuje zniszczenie częstek kłaczkowatych. Przedłużanie czasu mieszania podobnie przyczynia się do wzrostu liczby zdarzeń, czemu towarzyszy zwiększenie czasu działania sił niszczących poszczególne cząstki. Z tego wynika, że efekt kłaczkowania zależy przede wszystkim od gradientu prędkości wywołanego mieszaniem i czasu tego mieszania, co jest określone liczbę Campa [115]:

$$C = \overline{G} \cdot t$$
 (15)

Zwiększanie tych parametrów możliwe jest tylko w określonym przedziałe wynikającym z odporności hydraulicznej częstek kłaczkowatych oraz postępującego procesu ich starzenia się.

Średni gradient prędkości mieszania wyznacza się pośrednio poprzez wcześniejsze określenie ilości energii rozproszonej w danej objętości wg wzoru [40, 118, 134, 141]:

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$
(16)

W przypadku urządzeń z zawieszonym osadam, moc włożoną w mieszanie utożsamia się z mocą niezbędną do przezwyciężenia straty ciśnienia wywołanej przepływem wody przez warstwę osadu zawieszonego i wyznacza ze wzoru [12, 134]:

 $P = Q \cdot P^0 \cdot g \cdot \Delta h \tag{17}$

Strate ciśnienia wywołana przepływem wody równoważy ciężar kłaczków stanowiących warstwę zewieszonego osadu oraz straty miejscowe na skutek tarcia. Zakładając, że straty miejscowe śę stałe dla danej konstrukcji urządzenia (Q = const), a zmianie ulega ciężar i stężenie kłáczków, to wzór na stratę ciśnienia wywołaną przepływem wody przyjmie postać:

$$\Delta h = \frac{c_{wo}(\rho_k - \rho^0)I}{\rho^0}$$
(18)

Trudności w bezpośrednim oznaczeniu gęstości kłaczków powodują, że wyznacza się gęstość warstwy osadu ($\rho_{\rm war}$) zawieszonego ze wzoru:

$$P_{WO} = (1 - C) P^{\circ} + C \cdot P_{k}$$
⁽¹⁹⁾

i obliczoną z niego ρ_k podstawia do wzoru (18) na Δh .

Strata ciśnienia wywołana przepływem wody jest wówczas funkcją gęstości warstwy osadu zawieszonago, jej wysokości i gęstości wody

$$\Delta h = \frac{(\rho_{wo} - \rho^{\circ})1}{\rho^{\circ}}$$
(20)

W rezultacie tych przekształceń wzór na średni gradient prędkości przyjmuje następującę postać:

$$\overline{G} = \sqrt{\frac{g(P_{WO} - P^{0})}{\mathcal{U} \cdot t}}$$
(21)

z której wynika, że zależy on od stężenia częstek kłaczkowatych, ich gęstości, wysokości warstwy osadu oraz czasu przepływu wody przez tę warstwę. Większe stężenie zawiesin w warstwie osadu zawieszonego stwarza większe prawdopodobieństwo ich zdarzeń oraz wzrost gradientu prędkości, a przez to lepsze warunki do przebiegu koagulacji ortokinetycznej. Wynika stąd, że dla tej samej wody, przy jednakowych dawkach reagentów i zbliżonych warunkach ich dozowania, typ osadnika kontaktowago nie ma większego znaczenia, a teoretyczne obciążenia tych urządzeń będą zbliżone do siebie. Jest to możliwe wówczas, kiedy flokulacja w warstwie osadu zawieszonego nie jest wywołana energią turbulencji [83]. W przypadku akcelatora, gdzie nie występuje zjawisko osadu zawieszonego, a częsteczki kłaczkowate znajdują się w ciągłej wędrówce na skutek wewnętrznej cyrkulacji, szczególną rolę pełni mieszanie. Jego zadanie sprowadza się do zapewnienia odpowiedniej intensywności mieszania, wymaganej wydajności pompowania i odpowiedniej krotności cyrkulacji osadu. Efekt procesu mieszania i flokulacji w akcelatorze zależy więc znacznie od konstrukcji i parametrów eksploatacyjnych mieszadła, rzutujących na stopień wykorzystania energii wprowadzonej do układu. Wykazali to już np. Klute i Walker [52, 141] . przeprowadzając badania nad skutecznością mieszania w procesie flokulacji, stwierdzając znaczący wpływ konstrukcji mieszadła na efekt agregacji kłaczków, Konstrukcja i geometria komór wolnego mieszania związana jest z wieloma czynnikami fizykalnymi wpływającymi na proces flokulacji.

- 27 -

Wynika to np. z równania kinetyki dla procesu prowadzonego metodę jar' testu [37]:

$$\frac{n_o}{n_e} = \exp(\frac{k_d \cdot a^3 \cdot \alpha c_o \cdot \varphi}{\Re} \cdot \overline{G} \cdot t)$$
(22)

W równaniu tym właśnie gradient prędkości jest tym parametrem, który uwzględnia czynnik kształtu i eksploatacji reaktora oraz mieszadła. Przeprowadzone badania modelowe [139] wpływu konstrukcji mieszadła i geometrii reaktora na efekt flokulacji wykazały, że gradienty prędkości i maksymalne prędkości obwodowe mieszadeł zależą nie tylko od wytrzymałości mechanicznej kłaczków, ale również od kształtu reaktora i mieszadła oraz charakteru cyrkulacji cieczy w komorze [123]. W warunkach przewagi cyrkulacji osiowej lub okrężnej dopuszczalne prędkości obwodowe mieszadeł turbinowych i śmigłowych mogę dochodzić do 1-1,2 m/s przy średnim gradiencie prędkości $\bar{G} = 100-130 \text{ s}^{-1}$ [137, 139]. Przy typowej cyrkulacji promieniowej niezczenie kłaczków może być zapoczątkowane po przekroczeniu prędkości 0,4 m/s, ($\bar{G} = 70 \text{ s}^{-1}$).

Gradient prędkości uniemożliwia jednak przenoszenie wyników eksperymentu na skalę techniczną, gdyż jak wynika z równania kinetyki flokulacji, azybkość tworzenia kłaczków uzależniona jest od dyssypacji energii [96]. Zatem wyznaczony gradient prędkości jest wartością uśrednioną i nie określa dokładnie rozkładu energii mieszania w każdym punkcie komory flokulacji. Stąd też, aby porównać warunki hydrauliczne, niezbędne jest powiązanie gradientu prędkości z bezwymiarowymi kryteriami podobieństwa, tj. liczbą mocy - P., liczbą Reynoldsa - Re i liczbę Froude'a - Fr wg zależności [96]:

(23)

 $P_{o}(\overline{G}) = f(Re, Fr)$

Dobre wymieszanie wody w trakcie flokulacji może znacznie skrócić czas procesu w porównaniu do stanu bez mieszania, np. o 93-98% w zakresie temperatur od 3 do 18°C [63]. Jest to jeden z istotnych czynników decydujących o szybkości aglomeracji częstek kłaczkowatych, obok składu jonowego wody, mętności, zesadowości, temperatury, rodzaju i dawek reagentów oraz czasu flokulacji. Zwiększanie szybkości obrotowej mieszadła mechanicznego umieszczonego w naczyniu z wodą powoduje wzrost gradientu prędkości mieszania. Z badań przeprowadzonych przez Campa [20] oraz wzoru (16) wynika, że przy stałej szybkości obrotowej wirnika mieszadła i niezmiennym kształcie naczynia, gradient prędkości mieszania rośnie w miarę zwiększenia temperatury cieczy. Przy niskich temperaturach i małych gradientach poprawa efektu flokulacji możliwa jest między innymi na drodze mechanicznej, tzn. przez wzrost prędkości obrotów mieszadła. Ponadto na efektywność procesu koegulacji wody w obniżonych temperaturach ma wpływ dawka koegulantu i flokulantu oraz pł wody. W niskich temperaturach wody zdolność destabilizacyjna koagulantów obniża się, a liczba zderzeń cząstek kłaczkowatych maleje.

Miarą zdolności destabilizacyjnych koagulantów jest potencjał elektrokinetyczny [61, 62, 93]. Badania wpływu odczynu wody na zmianę potencjału elektrokinetycznego wykazały, że dla każdej temperatury wody istnieje optymalny odczyn procesu koagulacji, w którym potencjał § osiąga najniższę wartość, zaś największe obniżenia potencjału § następuje przy najwyższej temperaturze (a nejmniejsze - przy najniższej) [61, 93]. Zmniejszona zdolność destabilizacyjna koagulantu jest przyczyną znacznych trudności w prowadzeniu koagulacji w obniżonych temperaturach wody. Wymaga to wyższych dawek koagulantu lub destabilizacji domieszek wody polielektrolitami. Zmiana potencjału § wywołana polielektrolitami kationowymi przebiega podobnie jak w przypadku siarczanu glinowego (przy mniejszych dawkach).

Polielektrolity niejonowe nie zmieniają wartości potencjału Š, anionowe - zwiększają ją, zaś kationowe obniżają [93]. Te same badania określiły również wpływ potencjału Š na początek kłaczkowania w zależności od gradientu prędkości ruchu cieczy. Wynika z tego, że przy niskich wartościach potencjału Š kłaczkowanie zachodzi już po czasie około i minuty i nie zależy od gradientu prędkości (są to okresy lata, kiedy temperatura wody jest wyższa, a koagulacja mało wrażliwa na zmiany intensywności mieszania). Przy wyższych wartościach potencjału Š pojawienie się kłaczków zależy od intensywności mieszania, czemu towarzyszy zwiększony gradient prędkości i skrócony czas flokulacji. Stan ten dotyczy warunków zimowych, kiedy gradient prędkości ruchu cieczy jest mniejszy (koloidy są bardziej stabilne), a mieszanie mechaniczne poprawia skuteczność koagulacji.

Na uwagę zasługują wyniki badań [110, 111], gdzie w klarownikach o jednostajnym natężeniu przepływu zastosowano miaszadło mechaniczne. Prędkość obwodowa łopatek mieszadła wynosiła 0,6-0,7 m/s przy zawiesinie w wodzie surowej 150-300 mg/dm³ oraz 0,4-0,5 m/s przy zawartości zawiesiny 20-50 mg/dm³. W okresach niskich temperatur wody stosowano górne wartości podanych prędkości. Badania przeprowadzono w przedziale temperatur 0,1-21°C. Uzyskano następujące wyniki: zwiększone stężenie osadu zawieszonego, 1,5-2,0 krotnie wyższy afekt klarowania i większą wydajność klerownika o 25-30%. Szczególnie interesujące są wyniki pracy tych klarowników w okresie zimowym, kiedy temperatura wody surowej spadała do 0,1°C. Prędkość wznoszenie wody w strefie klarowania, przy której osad utrzymywał się w stanie warstwy zawieszonej, wynosiła wówczas około 1,0 mm/s. Takich efektów nie udało się uzyskać na pozostałych klarownikach pracujących bez mieszadła.

Wynika stęd, że zneczny wpływ na przebieg procesu kosgulacji w osadnikach kontaktowych wywiera mieszania mechaniczne. Jest ono czynnikiem zwiększającym liczbę zderzeń częstek kłaczkowatych poprzez odpowiednio utrzynywany gradient prędkości i zdolność destabilizacyjną kosgulantów -

- 29 -

zwłaszcza w okrasach obniż temperatur wody. Wędrówka częstek kłaczkowatych na skutek mieszania i recyrkulacji osadu zwiększa ich zagęszczenia i stężenie oraz sprzyja całkowitemu wykorzystaniu dodawanych reagentów, przez co koszty eksploatacyjne tych urządzeń są mniejsze. Nagłe zmiany składu wody surowej wyrównywane są przez nadmiar chemicznie aktywnego osadu. Przewaga osadników kontaktowych z mieszaniem i recyrkulacją osadu nad pozostałymi grupami tych urządzeń jest znaczna. Istnieje bowiem możliwość dostosowywania intensywności mieszania i krotności cyrkulacji do składu wody surowej, a zwłaszcza do temperatury, co w naszej strefie klimatycznej ma ogromne znaczenie. Urządzenia te są eksploatacyjnie elastyczniejsze, technologicznie i hydraulicznie sprawniejsze, bardziej oszczędne w zużyciu reagentów w porównaniu z osadnikami kontaktowymi zarówno o jednostajnym natężeniu przepływu, jak i o przepływie pulsacyjnym.

1.6. Charakterystyka natężenia przepływu wody przez warstwę zawieszonego osadu

Obciażenie warstwy zewieszonego osadu jednostajnym lub zmiennym natężeniem przepływu wody związane jest z odmiennością konstrukcyjną poszczeoólnych osadników kontaktowych. W wypadku osadników kontaktowych o jednostajnym przepływie, natężenie przepływu wody utrzymuje wartość stałą w dłużezym czasie, a charakterystyka Q = f(t) przebiega w postaci linii poziomej. Zmienne natężenie przepływu wody związane jest z zastąpieniem przepływu stałego przepływem całkowicie lub częściowo przerywanym. wystepuje to w osadnikach kontaktowych o przepływie pulsacyjnym lub falutacya. W urządzeniach tych cykle przepływów przedzielają okresy stagnacji lub przepływu stałego o mniejszym natężeniu. W pulsatorze nagłe zrzuty wody, trwające około 5 sekund, przedzielane są przerwami od 20 do 40 sekund, co aprzyja zachowaniu jednorodnej struktury warstwy zawieszonego ceadu. Występuje wówczes zjawisko fluidyzacji osadu, a następnie jago sedymentacji. Średnia prędkość wznoszenia wody zależy od wielkości i cięzaru właściwego częstek osadu, ich stężenia i lapkości wody, a regulowana jest czasem stagnacji i przepływu.

W osadniku kontaktowym o falującym przepływie, woda przepływa w sposób ciągły w ilości 50 do 90% przez warstwę zawieszonego osadu, natomiast pozostała jej część gromadzone jest w urządzeniu zrzutowym, skąd wpływając w ustalonych odstępach czasu powoduje okresowe zwiększenie fali przepływu [7, 38].

1.7. <u>Modelowanie przepływów i ocena efektów technologicznych</u> akcelatorów i pulsatorów

Większość zjawisk i procesów przebiegających w akcelatorach i pulsatorach jest zbyt złożona, aby mogła być analizowana tylko w sposób teoretyczny. Stąd też wynika potrzeba prowadzenia badań doświadczalnych metoda tzw. eksperymentu czynnego (gdy badacz dokonuje celowych zmian poszczególnych elementów konstrukcji modelu, parametrów jego pracy, wpływa na przebieg realizowanego procesu itp.) oraz eksperymentu biernego na urządzeniach w skali technicznej, nie naruszając warunków ich eksploatacji. Metoda eksperymentu biernego wymaga dłuższego okresu obserwacji, uniemożliwia dokonywania zasadniczych zmian w konstrukcji czy parametrach zachodzącego procesu. Niemniej jednak jest ona potrzebna przy ustalaniu wielkości. błedu badań metoda eksperymentu czynnego, sprawdzaniu poprawności przyjetych metod kontroli warunków jednoznaczności oraz dostarczania niektórych danych do modernizacji istniejących i projektowania nowych urządzeń. Zaleta metody według eksperymentu czynnego jest zwłaszcza jej niski koszt i duża możliwość kombinacji umożliwiających wszechstronne poznania wzajemnego wpływu poszczególnych czynników na efekt pracy urządzenia. Powoduje to, że metoda ta jest popularna i często stosowana.

W przypadku trudności w analizowaniu poszczególnych zjawiek można (przy dobrej znajomości matematyki) użyć modeli analogowych, np. symulacji numerycznej niektórych procesów, w celu lepszego i szybszego ich poznania.

Aktualny stan wiedzy uniemożliwia zbudowanie jednego modalu ekcelatora czy pulsatora do prowadzenia badań warunków hydraulicznych przepływu wody i chemizmu zachodzacego procesu. Model do badań hydraulicznych wymaga oprócz podobieństwa geometrycznego, uwzględniania podobieństwa sił bezwładności, lepkości, ciężkości i napiecia powierzchniowago. Wiązałoby się to z użyciem specjalnego medium, pozwalającego na uzyskanie równości odpowiednich liczb kryterialnych. Ze względu na nierealność takiego medium, należy tak uprościć opis modelu zjawiska, aby nie naruszyć zasad pełnego modelowania, wprowadzając tzw. modelowanie przybliżone. Model nie musi odtwarzać każdego drobnego detalu, wystarczy, że oddaje najważniejsze cechy danego zjawiska trudnego do rozwiązania przy pomocy samych rozważań teoretycznych. Największą trudność sprawia tutaj modelowanie częstek kłaczkowatych w poszczególnych fazach procesu, tj. koagulacji, flokulacji i sedymentacji, zachowując ich wymiary, kształt, gęstość i aktywność powierzchniowę. Istotnę rolę odgrywa tutaj charakter powiązań kinetyki flokulacji, adsorpcji i desorpcji z transportem pędu i masy w poszczególnych przestrzeniach mieszania tych urządzeń. Jest to problem trudny do opisania matematycznego nawet przy zastosowaniu odpowiadnich liczb kryterialnych. Zasadnicza trudność wynika z:

 braku dostatecznie dokładnej teorii zjawisk hydromechanicznych, która uwzględniałaby wszystkie czynniki wpływające na efekty i kinetykę flokulacji oraz na wielkość powierzchni właściwej kłaczków osadu, niskiej energii aktywacji procesu adsorpcji fizycznej i niewielkiej wytrzymałości struktury kłaczków, przez co równowaga sorpcyjna między zmieniającą się w czasie powierzchnię kłaczków i roztworem wodnym ma charakter odwracalny [126].

Zastępienie w modelu osadu rzeczywistego piaskiem, pyłem skalnym czy odpowiednio rozdrobnionymi częstkami mas plastycznych [34] mija się więc z celem. Z dużym uproszczeniem umożliwia to jedynie spełnienie podobieństwa warunków hydrodynamicznych przepływu, bez uwzględnienia między innymi tek istotnego oddziaływania międzyfazowago.

Nie jest więc możliwe zbudowanie takiego modelu akcelatora czy pulsatora, w którym zostałoby zachowane podobieństwo wszystkich zachodzących w tych urzędzeniach zjawisk. Praktycznie więc realizuje się oddzielne badania modelowe warunków hydrodynamicznych przepływu wody według zasad podobieństwa geometrycznego i mechanicznego oraz bada oddzielnie poszczagólne procesy jednostkowe. Wadą tego rodzaju modelowania cząstkowego jest ustalenia wpływu pojedynczego czynnika lub kilku czynników na przebieg danego zjawiska. Brak natomiast syntezy wszystkich wzajemnie na siebie oddziałujących procesów i zjawiek. Potwierdzenie wpływu sumy czynników na afekt końcowy oczyszczania wody jest możliwe dopiero na urządzeniu w skali półtechnicznej lub technicznej.

W pracy tej, pomyślanej jako studium możliwości wykorzystania badań modelowych dle lepszego poznania zjawisk i procesów zachodzących w akcelatorach 1 pulsatorach, proponuje się, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1 1 2, oddzielne modelowanie przepływów i procesów technologicznych. Duże znaczenie przywiązuje się do kształtu urządzenia w charakterystycznych jago przekrojach jako czynnika determinującego warunki hydrodynamiczne przepływu wody. Proponuje się badania jakościowe na modelach płaskich w kanale hydraulicznym w celu kształtowania przepływów możliwych przypadków rozwięzań konstrukcyjnych doprowadzenia i odbioru wody względem etrefy klarowania i osadu zawieszonego (rozdz. 4.4.2 i 4.4.3). Ten etap badań umożliwia wybór najlepszego rozwiązania do dalszych badań na modelach przestrzennych z określeniem efektów hydraulicznych, np.; poprzez pomiar wykorzystania czynnej objętości urzędzenia, współczynnika nierównomierności rozkładu prędkości [75], a nawet modelowaniu matematycznym ruchu cząstek na tle wcześniej rozpoznanego pola prędkości za pomocą anemometru laserowego (rozdz. 4.4.4). W ten sposób modelowanie fizykalne dostarcza pełnych informacji o wpływie kształtu i warunków hydrodynamicznych przepływu wody na efekt hydrauliczny pracy urządzenia. Oddzielna ocena efektów technologicznych (rozdz. 5) z uwzględnieniem poszczególnych procesów jednostkowych i modeli matematycznych opisujących te procesy, dostarcza niezbędnych informacji do końcowych badań sprawdzających na modelu odmiany "T" (technologicznym) wytypowanym z badań hydraulicznych (mode) odmieny "H") do badeń technologicznych (rys. 1), Taka droga po-



Rys. 1. Schemat modelowania przepływów i ocene skuteczności technologicznej akcelatorów i pulsatorów Fig. 1. Scheme of flow modelling und estimation of technological efficiency of accelerators and pulsators G.



Rys. 2. Program badań z zastosowaniem maszyny cyfrowej do modelowania przepływów w pulsatorze

Fig. 2. Program of testings with application of a computer for flow modelling in a pulsator

stępowania sprzyja optymalizacji przebiegu procesu klarowania wody bardziej złożonych konstrukcji osadników kontaktowych, jakimi są akcelatory i pulsatory. 2. CHARAKTERYSTYKA PRZEMYSŁOWYCH AKCELATORÓW I PULSATORÓW

2.1. <u>Osadniki kontaktowa z zawieszonym osadem</u> stosowane w praktyce

Pierwsze osadniki kontaktowa z zawieszonym osadem opatentowane zostały w Anglii i USA w 1892 roku, a zastosowano je w procesach zmiękczania wody przez strącanie [63]. W 1929 roku opracowano konstrukcję klarownika do oczyszczania wody dla celów komunalnych w ZSRR. W roku 1934 powstały w USA osadniki kontaktowe typu akcelator (firma Infilco) i precipitator (firma Permutit). Od tego okresu, a szczególnie od roku 1940 datuje się masowy rozwój konstrukcji osadników kontaktowych [8, 14-18, 23, 39, 66, 97, 116, 117, 135, 147]. Do wiodących w tej dziedzinie należą takie firmy jak: Bran Lübbe, Degremont, Dorr-Oliver, Grewer, Infilco, Lurgi, Paterson, Permutit itp.

Osadniki kontaktowe zastępiły w niektórych przypadkach urządzenie klasyczne, tj. komory szybkiego i wolnego mieszania oraz osadniki. Lepsze efekty końcowe uzdatnianej wody w osadnikach kontaktowych otrzymuje się w urządzeniach o ponad dwukrotnie zmniejszonej retencji. W ten sposób zastosowanie osadników kontaktowych obniża nakłady inwestycyjne. Tradycyjne metody i urządzenia do uzdatniania wody nie gwarantuję w wielu przypadkach spełnienia wymagań jakościowych i ekonomicznych. Efekty pracy osadników kontaktowych, przy znacznym ograniczeniu zużycia reagentów, sprzyjaja wydłużeniu okresu pracy filtrów, zmniejszaniu zużycia wody do ich płukania, a w przypadku wód dla celów przemysłowych nawat rezygnacji z filtracji wody. Urządzenia te nadaję się do uzdatniania wód zawierających zawiesiny, związki barwne, zanieczyszczenia organiczne. Mogą służyć do odżelaziania, odmanganiania, odkwaszania, odkrzemiania, odoliwiania wody, a nieraz do usuwania związków o nieprzyjemnym smaku i zapachu. Niektóre z nich stosuje sie do dekarbonizacji wody oraz do oczyszczania ścieków przemysłowych i komunalnych.

Osadniki kontaktowa różnią się między sobą konstrukcją, a zwłaszcza sposobem doprowadzenia i odbioru wody względem warstwy zawieszonego osadu. Każdorazowo konstrukcja danego urządzenia wymaga dostosowania do warunków, w jakich ma ono pracować. Dotyczy to szczególnie składu uzdatnianej wody, jego zmienności w czasie oraz wahań temperatury. Z tych to względów akcelatory, jako mniej wrażliwe na niską temperaturę, budowane są w różnych strefach klimatycznych. Prędkość wznoszenia wody w strefie sedymentacji jest tutaj wyższa niż np. w klarownikach radzieckich czy pulsatorach i wynosi 1,0-1,2 mm/s (przy użyciu siarczanu glinowego. Pulsatory buduje się najczęściej w krajach o klimacie łagodniejszym, gdzie temperatury zimowe utrzymują się znacznie powyżej 0°C, (np.: Francja, Maroko, Tunis, Argentyna, Gabon itd.). Czułość pulsatorów na niską temperaturę wody nie pozwala na uzyskanie większych prędkości wznoszenia niż 0,8 mm/s (przy użyciu siarczanu glinowego). Wynika stąd większe zapotrzebowanie na powierzchnię terenu pod ich zabudowę oraz ryzyko okresowego ograniczenia wydajności całej stacji wodociągowej.

Coraz częściej na większych stacjach wodociągowych uzdatniejących wody powierzchniowa buduje się osadniki kontaktowe o przepływie zbliżonym do poziomego lub stosuje się dodatkowe wypełnienia (pakiety płytowe lub przewodowe) [55, 98, 107, 108, 116, 117, 143, 148]. Do czynników, które zadecydowały o budowie tych urządzeń, należy zaliczyć większe bezpieczeństwo i stabilność pracy dzięki mniejszej ich wrażliwości na zmiany obciążenia hydraulicznego, e w przypadku zastosowania pakietów – wyrównanie liczby Reynoldse w przekroju czynnym urządzenia i sprowadzenie przepływu do ruchu laminarnego, wyeliminowanie dwóch przeciwnie skierowanych ruchów pionowych cząstek kłaczkowatych, uśrednienie stężenia osadu zawieszonego w przekroju urządzenia, a w konsekwencji zwiększenie prędkości wznoszenia wody w strefie sedymentacji, a przez to i wydajności końcowej [107, 116, 117]. Stoeowanie pakietów zalecane jest dla wszystkich typów i konstrukcji osadników kontaktowych.

Z wielu konstrukcji urządzeń o przepływie zbliżonym do poziomego, proponowanych przez różne firmy zagraniczne, najczęściej spotyka się takie osadniki kontektowe, jak: akcelator, accentrifloc, hydrotritor i recyrkulator.

W kraju najbardziej rozpowszechniły się osadniki kontaktowa zbliżone konstrukcyjnie do akcelatora firmy Inflico oraz pulsatory o przerywanym i falujęcym natężeniu przepływu [6, 7, 15, 16, 38, 58]. Ponadto stosowane sę takie osadniki kontaktowe, jak: reaktor KSU, komora wielofunkcyjna typu "Płock", komora wielofunkcyjna wg patentu ZAM-u, komora wielofunkcyjna wg koncepcji IMZ Gliwice, osadnik szczelinowy typu K, kontaktowy osadnik korytarzowy itp. [9, 10, 38, 56, 63].

2.2. <u>Wpływ jakości wykonawstwa i poziomu eksploatacyjnego</u> <u>na sprawność hydrauliczna i efekt technologiczny</u> <u>ekcelatorów i pulsatorów</u>

2.2.1. Akcelatory

Akcelatory są szeroko stosowane w układach urządzeń do przygotowania wody na potrzeby energetyczne, rzadziej można je spotkać na stacjach uzdatniania wody dla celów komunalnych. Pomimo dość długiego już okresu stosowania akcelatorów w krajowej energetyce, występują w ich eksploetacji pew-
		Śradnica mm														
Lp.	Rodzaj niesprawności	10	000			10	50	0		17000 21000				00	24000	
		Obiekt														
		1	2		3	4 !	5 (6	7 8	3	9 1	10	1	1 1	2 13	14
1	Przecieki mis betonowych i przejść rurociągów oraz uszkodzenia powłok ochronnych		+	+											3	
2	Niewłaściwe ustawienie dysz rozprowadzających	-	_	+					+	+	+		-	+	-	
3	Różna szerokość szcze- lin recyrkulacyjnych	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+.	+	+	+
4	Niedokładności w usta- wieniu wirnika pompy recyrkulacyjnej	-	-	-	8		-		-	+	•		-	-	-	-
5	Złe wypoziomowanie rynien zbiorczych	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+		-		-	
6	Zatykanie się rurocią- gów spustowych osadu	-	-	+	-	-	_	-		-	_			+	-	=
7	Zatykanie się próbopo- bierników	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
8	Brak możliwości sterowa- nia spustem osadu w spo- sób ciągły	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+					*
9	Awarie przekładni napę- dowych wirników i brak zabezpieczeń przed prze- ciekami olejów		-	-	_	1				+	+		-			-
10	Awarie pomp dozujących i zatykanie się ruro- ciągów chemikaliów	+	+	+	+	+	+	+		+	+		+	+		+
11	Awarie mieszadeł śmiłgo- wych w zbiornikach reagentów				-		+			-			-		-	-
12	Uszkodzenia przenośników ślimakowych w układach dozowania wapna			-										+	_	
13	Brak odpowiednich pomia- rów ilości dozowanych reagentów	+	+	4	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+

Zestawienie najczęściej występujących niesprawności akcelatorów

Objaśnienia: + stwierdzono występowanie niesprawności,

- brak danych lub niezastosowanie danego rozwiązania.

ne trudności, których przycz sięgają nierzadko poziomu projektowania i wykonawstwa. Czynnikiem do. kowym jest stale pogarszająca się jakość wody surowej. W przypadku elektrowni i elektrociepłowni w akcelatorach uzdatniane są najczęściej wody powierzchniowe i dołowe. Końcowy efekt uzdatniania tych wód uzależniony jest od ich podatności na dekarbonizację i koagulację. Okresowe pogarszanie się jakości wody w dopływie do akcelatorów występuje najczęściej w następstwie wpływu warunków atmosferycznych, głównie w czasie opadów i roztopów. Powodują one występowanie pewnych trudności technologicznych, nie zawsze łatwych do opanowania w eksploatacji. Nie mniej grożne w skutkach są usterki, awarie oraz nieprawidłowości eksploatacyjne, a czasem i projektowe, będące często przyczyną opóźnień w przekazywaniu nowych jednostek, przerw w pracy poszczególnych akcelatorów albo stałego lub okresowego obniżenia ich wydajności, a często i jakości uzdatnianej wody.

Opierając się na materiałach rozruchowych, gwarancyjnych i częściowo eksploatacyjnych [79], poddano ocenie pracę akcelatorów o średnicach od 10 000 do 24000 mm, zainstalowanych w 14 polskich elektrowniach i elektrociepłowniach, uwzględniając niesprawności zestawione w tab. 1. Tabela ta ułatwi omówienie poszczególnych usterek, awarii oraz nieprawidłowości eksploatacyjnych, a czasem i projektowach (rozdz. 2.5).

2.2.2. Pulsatory

Eksploatowane w kraju pulsatory znalazły zastosowanie zwłaszcza na stacjąch uzdatniania wody dla celów komunalnych. Mimo wieloletniego stosowania tych urządzeń na kilku stacjąch uzdatniania wody, występują w ich eksploatacji pewne trudności, których przyczyny sięgają nieraz etapu projektowania i wykonawstwa oraz dotyczą poziomu eksploatacyjnego. Czynnikiem dodatkowym jest stale pogarszająca się jakość wód powierzchniowych na skutek zanieczyszczenia ich różnego rodzaju ściekami oraz środkami chemicznymi z nawożenia pól uprawnych i ochrony roślin. Trudności technologiczne, nie zawaze łatwe do opanowania przez służby eksploatacyjne, wynikaję ponadto z warunków klimatycznych, jakie mamy w Polsce, zwłaszcza okresów zimowych, ze znacznie obniżoną temperaturą wody surowej. Grożne w skutkach sę również usterki, awarie oraz nieprawidłowości eksploatacyjne i projektowe, będące częstę przyczynę przerw w pracy poszczególnych pulsatorów, albo stałego lub okresowego obniżenia ich wydajności, a nawet jakości uzdatnianej wody.

W tym celu poddano analizie osiemnaście pulsatorów pracujących na trzech stacjach uzdatniania wody [84] (tzn. wszystkie pracujące zgodnie z przeznaczeniem pulsatory w kreju), w Polece centralnej oraz na południu kraju, zestawiając tabelarycznie charakterystyczne niesprawności (tab. 2). Umożliwi to omówienie poszczególnych usterek, awarii oraz nieprawidłowości eksploatacyjnych i projektowych (rozdz. 2.5). Zestawienie najczęściej występujących niesprawności pulsatorów

1		Stacja uzdatniania wody																	
			-	4-		-8-							"C"						
Lp.	Rodzej niesprawności	Pojomność jednostkowa m ³																	
		8232					5150									345	6		
	and the second			1		Numer pulsators													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	114	15	16	17	18
11	Przecieki konstrukcji betonowych i przejść rurociągów	÷.,	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		-	-	-	-	-	-
2	Zetykanie się dranażu dolnego na dopływie wody	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+ -	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Wyrywanie i pękanie drenazu dolnego na dopływie wody	-	-	-	-	+	+	4	+	4	+	+	•	-	-			-	~
4	Niewlaściwa wypozionowanie koryt przelewowych	-	-		-	+	+	+-	+	+	+	+		-		-		-	-
. 5	Obniżanie projuktowej wydajności	+	6	+		-	-	-	-	-	-	-	1 -	+	+	+	+	+	+
6	Awaris elementów automatyki, pomiarów i eterowania	+		4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7	Brak tzw. obejšć pulsatorów	-	-	-	I	+	+	+	+	+		+	÷+	-		-	-	-	-
	Brak możliwości sterowania opróżnianiem komór osadowych w sposób cięgły		+	+	. + .	+			+	4				+	+	+	+	+	+
9	Awarie zesuw spusiowych oesdu		-	-	-	-	-	-	-		-	-	j	+	+	+	+	+	+
10	Awarie zaworów wotylkowych komór próżniowo-zrzutowych	-		-	-	-		-		-	-	-	-	+	+	+		+	+
2.2	Amerië pomp prôzniowych	~	-		-	+	+	+	+	+ 3	+ 1	+	. +	-	-	-	- 3	- 1	-
12	Brak pomisrów ilości dozowanych reagentów	+	+	+	+		-	-		-	-	-	-	+		+	+	+	+
13	Amaria posp dozujących i zatykanie się rurocięgów chunikaliów	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+ }	+ -	+
14	Niawystarczająca wydajność pomp dozujących chemikalia	+	+	+		-	-	-	-	-	-	-	-	- 1	-	-	- 3	- 1	-
15	Uszkódzenie powłak ochronnych zbiorników zarobowych reagentów	+	+	+	+		-	-	-	+ ;	-	-	-	+	+	+	+ -	+	+
16	Skorodowania i wyziana mieszadał w zbiornikach reagentów	+	+	+	+		+	+ 1		+ :	+	+	+	-	-	- 1	- }	- 3	-
17	Niewżeściwy cięg megazynowania i rozdrabniania kosgulanta	3		•	-	-		+ :		+ F	+	+	+	+	+	+	+ ;	+ 1	+
18	Uezkodzenia rurociągów na skutek drgań instalacji do koagulacji wody	-	-	-	-	-	-	-	-	- 1		-	-	+		+	+		
19	Blędnie zaprojektowany cięg węgle aktywnego	+	+	+	+	-			- 1			12.5	-		- 1	-	-	-	-

Objeśnienie: • stwierdzono występowanie niesprawności,

- nie elwierdzona wyetępowania miesprawności lub niezestaeowano danego rozwiązania

- 39

2.3. Wpływ jakości wody na efekt technologiczny

Ocenę efektów technologicznych akcelatorów oparto na układach tych urządzeń szeroko stosowanych w kraju do przygotowania wody na potrzeby energetyczne. W energetyce urządzenia te służą najczęściej do przygotowania wody chłodzącej dla obiegów zamkniętych lub demineralizacji, rzadziej można je spodkać na stacjach uzdatniania wody dla celów komunalnych.

Poddano ocenie 21 akcelatorów o średnicach od 10 000 do 24 000 mm, pracujących na potrzeby 12 elektrowni i elektrociepłowni. Uwzględniono: rodzaj wód, ich jakość i ekuteczność działania, zmiany wydajności poazczególnych jednostek w czasie, krotność cyrkulacji wawnętrznej oraz usuwanie osadów [77]. Akcelatory te zasilane są w 9 przypadkach wodami powierzchniowymi, w 2 przypadkach kopalnianymi i w 1 przypadku głębinowymi. Spotyka się również mieszaninę tych wód.

Jakość wód w dopływie charakteryzuje się następująco:

- zawiesina oznaczona wagowo od O do 30 mg/dm³, przeciętnie około 13 mg/dm³ (jedynie w dwóch przypadkach osięga wartość 175 mg/dm³),
- zasadowość całkowita od 1,8 do 5,5 mval/dm³, przeciętnie około 3,6 mval/dm³,
- twertość ogólna od 3,1 do 8,7 mval/dm³, przeciętnie około 5,7 mval/dm³,
- stężenie żelaza od 0,31 do 4,2 mg Fe/dm³, przeciętnie około 1,4 mg Fe/dm³,
- stężenie manganu od 0 do 0,5 mg Mn/dm³, przeciętnie około 0,2 mg Mn/dm³,
- utlenialność od 2 do 10,9 mg 0₂/dm³, przeciętnie około 7 mg 0₂/dm³,
 (jedynie w dwóch przypadkach przekracza 11,5 mg 0₂/dm³) [128].

Optymalne dawki koagulanta dla poszczególnych rodzajów wód i akcelatorów wahaję się od 7,5 do 45 mg FeSO₄ . 7 H₂O/dm³ - przeciętnie około 23 mg/dm³. Natomiast dawki wapna w postaci CaO wynoszę od 42 do 134 mg/dm³ - przeciętnie około 80 mg/dm³.

Stężenie dozowanego roztworu mleka wapiennego wała się najczęściej od O,5 do 3,0%. Stosowanie stężeń większych od 3% prowadzi do częstego zatykania się rurociągów, pomp dozujących, koszy ssawnych i wymaga uciążliwego czyszczenia układów dozowania. Korzystniejsze jest stosowanie niższych stężeń, jeżeli nie ma ograniczeń wydajności zespołów pomp dozujących, przepustowości rurociągów i pojemności dozowników. Wymagana jest bezwzględna ciągłość dozowania roztworu mleka wapiennego.

Stężenie dozowanego eiarczanu żelazawego wynosi zwykle od 3 do 10%, nejczęściej zaś od 5 do 7%. Największe trudności w eksploatacji sprawiają układy z dozowaniem stężonego FeSO₄ . 7 H₂O bezpośrednio ze zbiorników, w których reagent ten przechowywany jest na mokro. Występujące tutaj znaczne wahanie stężenie koagulante sę przyczynę zatykanie się koszty i i pomp dozujących. Niebezpieczne sę również przerwy w dozowaniu kosgulante, przekraczające okres 30 minut. Powodują one zaburzenie w strefie klerowanie i sprzyjeje obniżeniu efektu technologicznego. Skład wód w odpływie z wyżej wymienionych urzędzeń przedstawie się następująco:

- zawiesina od 4 do 20 mg CaCOz/dm³, przeciętnie około 13 mg CaCOz/dm³,
- zasadowość wobec fenoloftaleiny; przeciętnie około 0,5 mval/dm³.
- zasadowość całkowita, przeciętnie około 0,85 mval/dm³
- twardość ogólna, przeciętnie około 3,3 mval/dm³,
- stężenie żelaza od 0,12 do 0,62 mg Fe/dm⁵, przeciętnie około 0,38 mg Fe/dm³,
- stężenie manganu, zero,
- utlenialność od 1,8 do 10,6 mg O_2/dm^3 , przeciętnie około 4,3 mg O_2/dm^3 [128].

Skuteczność oczyszczania wody za pomocą 12 grup akcelatorów różnych pod względem wielkości poszczególnych jednostek, składu wody i jej rodzaju przedstawiono wykreślnie na rys. 3-8. Wynika stąd, że skład wód w od-



Rys. 3. Zawiesina w wodzie surowej D – woda dołowa, G – głębinowa, P – powierzchniowa, M – mieszanka Fig. 3. Settling in raw water D – pit water, G – abyssel water, P – superficiel water, M – mixture



Rys. 4. Zzwiesina w odpływia z akcelatorów D – woda dołowa, G – głębinowa, P – powierzchniowa, M – mieszanka Fig. 4. Sattling in outlet from accelerators D – pit water, G – abyseal water, P – superficial water, M – mixture

41 -



Rys. 5. Zasadowość ogólna Z_m i twardość całkowita T_c ; Z_m i T_c w wodzie eurowej, Z'_m i T'_c – w odpływie z akcelatorów **Fig. 5. General alkalinity** Z_m and total hardness T_c ; Z_m and T_c in raw water, Z'_m and T'_c – in outlet from accelerators



Rys. 6. Stężenie żelaza i manganu w wodzie surowej F1g. 6. Concentration of iron and manganese in raw water



Rys. 7. Steženie želaza i manganu w odpływie z akcelatorów Fig. 7. Concentration of iron and manganese in outlet form accelerators





Efekt technologiczny działania ekcelatorów uwarunkowany jest wieloma czynnikami, między innymi wielkością znian wydajności poszczególnych jednostek w czasie.Zmiany te są uzależnione od zapotrzebowania na wodę uzdatnioną i wahają się w dość szerokich granicach, tj. od 14 do 125% wydajności projektowej. Są to zmiany umożliwiające jeszcze poprawną pracę tych urządzeń i np. wielkość zawiesiny w odpływie mniejszą od 20 mg CaCO₃/dm³. Szczegółowo zagadnienie to przedstawiono na rys. 9. Z danych eksploatacyjnych wynika, że szybkość zmian wydajności akcela-



Rys. 9. Zakresy dopuszczalnych znian w wydajności akcelatorów

Rys. 9. Ranges of admissible changes in accelerators capacity

pływie odpowiada zalaceniom normy dla tego rodzaju przemysłu, z wyjątkiem zawiesiny, którą w koniecznych przypadkach należy usunąć w procesie filtracji na filtrach pospiesznych.

Z analizy prac wyżej wymienionych skcelatorów można wnioskować, że występująca różnorodność wód i ich skład nie wpływa ujemnie na skuteczność uzdatniania. Nie można natomiast (porównując skład wód przed i po akcelatorach) uogólnić żadnego wniosku dotyczącego wpływu gabarytów urządzeń na poprawność ich pracy.

tora na godzinę, nie powodująca większych zaburzeń, może się zawierać w granicach od 7 do 17% godzinowaj wydajności projektowaj. Grożne są w skutkach również niekontrolowane zmiany ciśnienia w rurociągach zasilających, będące przyczynę natychmiastowych zaburzeń w pracy akcelatorów.

Przeprowadzona analiza pracy 21 akcelatorów wykazała, że pomimo różnego rodzaju i składu wód w dopływie do tych urządzeń, ich jakości w odpływie odpowiada zaleceniom normy w przemyśle

- 43 -

energetycznym. Wyjątek stanowi zawiesina, która w koniecznych przypadkach usuwana jest na filtrach pospiesznych. Efekt technologiczny uzdatniania wody, przy założeniu optymalnych warunków hydrodynamicznych przepływu oraz prawidłowo dobranej technologii, jest duży. Na jego wynik bezpośrednio oddziałuję zaburzenia w dozowaniu reagentów, zby: szybkie zmiany przepływu i ciśnienia w rurocięgach doprowadzających wodę, brak możliwości regulacji obrotów wirnika-mieszadła w niektórych typach akcelatorów, a nieraz i sposób odprowadzania osadów. Praca akcelatorów możliwa jest w dość szerokim zakresie wydajności w stosunku do wydajności projektowej. Chwilowa zmiany składu wody surowej łagodzone są przez nadmiar chemicznie aktywnego osadu, przez co nie zawsze jest konieczne proporcjonalne dozowanie środków chemicznych. Nie stwierdzono również znacznego obniżenia efektu technologicznego uzdatnianej wody, mimo spadku jej temperatury.

Ocenę efektów technologicznych pulsatorów oparto na układach tych urzędzeń stosowanych na Wodocięgu Centralnym w Warszawie, Wodocięgu Sulejów – Kalinko koło Łodzi oraz na Wodocięgu Go – Cza II w Goczałkowicach [12, 46, 76, 146].

Pulaatory pracujące na Wodociągu Warszawskim zasilane są z rzeki Wisły, której woda charakteryzuje się podwyższoną mętnością, barwą, zawartością związków żelaza i manganu oraz utlenialnością i ChZT. Woda poddana jest wstępnemu chlorowaniu, działaniu siarczanu glinu, poliskryloamidu, krzemionki aktywnej i węgla pylistego. Charakterystyczne wskaźniki jakości tej wody przed i po pulsatorach przedstawiono w tab. 3. Wynika z niej, że we wszystkich z analizowanych serii badań następuje skuteczne obniżenie podstawowych zanieczyszczeń wody. Stwierdzono równiaż wysoki procent redukcji organizmów planktonowych bez względu na ich ilość w wodzie surowej. Zawiesina w odpływie wahała się od 5 do 24 mg/dm³, zaś mętność od 1 do 4 mg SiO₂/dm³. Badania [12] obejmowały okres wiosny, lata i zimy. Zmianie ulegały dawki reagentów, natomiast prędkość wznoszenia wody w strefie klarowanie była stała.

Wcześniejsze wyniki wstępnej eksploatacji tych pulsatorów [46] są bardziej pesymistyczne. Jakość wody w odpływie nie różniła się zasadniczo od składu wody surowej. Dopracowania wymagała technologia uzdatniania wody. Zwiększone zużycie koagulantu występowało w okresie zimowym przy niskiej temperaturze wody, jak również w okresie letnim przy wzroście planktonu w wodzie eurowej. Zużycie krzemionki aktywnej zdecydowanie zwiększyło się, kiedy temperatura wody zbliżała się do zera. Na przykład przy średniej temperaturze wody surowej +0,5°C dawka wahała się od 6 do 9 g/m³, podczas gdy przy temperaturze nieco wyższej, bo wynoszącej +1°C, dawka obniżyła się do 5, a nawet do 4 g/m³ [46]. W okresach, w których temperatura wody była bliske +1°C, praca pulsatorów była możliwa przy prędkości wznoszenia w strefie klarowania wynoszącej zaledwie 0,58 mm/s, co odpowiadało około 60% wydajności nominalnej tych urządzeń [20]. Stwierdzono również dużę czułość osadu zawieszonego na zmiany wydajności, co szczególnie uwydatniało się przy niskich temperaturach wody.

Mejece pobaru wody	Tempera- tura (°C)	W _{WZN} (ae/t)	Mętność ag SiO ₂ / da ³	Barwa ^O Pt	Żelazo mg Fe/ dm ³	Mangan mg Mn/dm ³	Utlenial- ność mg O ₂ /dm ³	ChZT mg O ₂ /dm ³	рH	Zasado- wość sval/ds ³	Związki kancero- genna mg/dm ³	Liozba organizeów planktonowych w ce ³ wody
Przed pulsatorem	- 10,5-12		12-15	20-32 0,3-0,4 0		0,05	9,8-11,8	15,8-18,5	7,6-7,7	3,2	857,6	7710-94500
Po pulsetorze		0,74	0-2	8-12	0.0	0,05	4,5-5,2	6,5-8,0	6,7-6,8	2,4-2,6	757,8	3900-6500
Przed polestores			30-35	24-30	0,6-0,85	0,20-0,22	9,6-10,2	-	7,8-8,0	2,4		
Po pulsatorza	19-20	0,74	0-1	5-8	0-0,05	0-0,05	3,3-4,2		6,5	1,5		•
Przed pulestoren			5	35-38	0,1-0,2	0,05-0,08	5,8-6,4	16,8-19,2	7,3-7,4	2,8=3,0	-	828-1000
Pe pulestorze	2,2-3,5	0,74	1	5-12	0,0	0,0	3,6-4,2	12,2-17,5	6,7	2,4-2,7		0-60

Charakteryatyczne wskaźniki jakości wody przed i po puleatorza na Wodocięgu Centralnym w Warazawa [12]

- 45 -

Tabala 4

tilejsce poboru wody	Tenpa- rature ⁰ C	Wwzn sia/a	Hętność agS10 ₂ /da ³	Barwe ^O Pt	Żelazo mgfe/dm ³	Hangan ngMn/da ³	Utlenielność mg0 ₂ /dm ³	chzT ¤g0 ₂ /da ³	рH	Zazadowość avel/da ³	Liczba ørganizaów planktonowych w ca ³ wody	
Przed pulsatored			10-15	15-23	0,3-0,4	0,05-0,1	6,4-7,0	16,8-19,5	7,4	2,8	15100-18700	
Po pulsatorza	13	0,97	0-2	5	0-0,05	0,05-0,1	3,8-4,2	12,5-14,6	6,3-6,5	2,0-2,7	60-1800	
Frzed pulsetorem			8-10	25-30	0,2-0,25	0,05	6,7-8,5	38-62	7,5-7,8	2,7	3600-6000	
Po puleatorze	14,0-13,7	0,03	0-2	7-8	0,00	0,00	4,3-4,4	20,3-30,5	6,9-7,0	2,3-2,4	30-600	
Przed pulsetorem			6-8	27-35	0,4	0,00	7,1-9,8	14,3-15,5	7,2-7,5	2,4-2,5	840-1100	
Po Fulsatorza	4-0+4,5	0307	2-4	8-18	0-0,05	0,00	3,6-4,5	12,3-13,3	6,9-7,0	2,0-2,1	30-90	

Cherekterystyczne wskeiniki jekości wody przed i po pulestorze na Wodocięgu Bulejów-Kelinko [12]

- 46 -

Drobny i mało spoisty osad w okresach obniżonej temperatury wody wymagał wydłużenia czasów pulsacji. Próby zwiększenia prędkości wznoszenia wody w strefie klarowania do 0,9 mm/s przy temperaturze wody +0,5⁰C nie powiodły się. Nastąpił zanik osadu zawieszonego i gwałtowne pogorszenie jakości wody.

Pulsatory pracujące na Wodociągu Sulejów-Kalinko zasilane są wodami z Zalewu Sulejowskiego na rzece Pilicy. Ujmowaną wodę cechuje niska mętność, niewielka zawartość żelaza i manganu oraz podwyższona barwa i ChZT. Jako reagenty stosowany jest siarczan glinu, poliakryloamid, krzemionka aktywna i wapno. Charakterystyczne wskaźniki jakości tej wody przed i po pulsatorach przedstawiono w tab. 4. Wynika z niej, że uzyskane efakty uzdatniania wody są poprawne. Obniżenie mętności nastąpiło w granicach od O do 4 mg SiO₂/dm³, barwy od 5 do 18^OPt, zmniejszyła się ilość żelaza i manganu, ChZT i planktonu. Wyjątek stanowi trzecia seria badań w okresie zimowym przy temperaturze wody od 4 do 4,5^oC, kiedy to nastąpiło pogorszenie warunków koagulacji i zwiększenie zawiesiny w odpływie z pulsatorów do 63 mg/dm³ [12]. Można zatem oczekiwać znacznie gorszych efektów technologicznych uzyskiwanych na tych urządzeniach w okresach jeszcze niższych temperatur wody.

Podobne problemy eksploatacyjne do dwóch wyżej przytoczonych przykładów notowane są również na Wodociągu Go – Cza II w Goczałkowicach, gdzie zastosowano pulsatory do uzdatniania mieszaniny wód pochodzących ze zbiornika na rzece Małej Wiśle w Goczałkowicach i ze zbiornika na rzece Sole w Czańcu. Mimo iż woda poddawana jest wstępnemu chlorowaniu, działaniu siarczanu glinu, gigtaru lub krzemionki aktywnej, węgla pylistego oraz wapna, nie udało się uzyskać większej prędkości wznoszenia wody w strefie klarowania niż 0,7 mm/s, która gwarantowałaby dobrą pracę warstwy zawieszonego osadu i właściwy efekt technologiczny [144]. Okazało się, że warstwa zawieszonego osadu jest bardzo czuła na zmianę temperatury wody oraz prędkości przepływu. Na przykład gwałtowne obniżenie temperatury wody w okresie jesiennym na skutek dopływu przechłodzonej wody z Czańca było przyczyną wypłynięcia osadu z pulsatorów, powodując jego epłynięcie na filtry [146].

2.4. Ekonomika osadników kontaktowych

Koszty uzdatniania wód powierzchniowych oparte na układach z osadnikami kontaktowymi są mniejsze, niż w przypadku stosowania tradycyjnych klasycznych rozwiązań. Brak, niestety, danych o kosztach inwestycji układów z różnymi osadnikami kontaktowymi o zbliżonej sprawności i wydajności. Różny kształt tego samego urządzenia może mieć wpływ na koszt jego budowy i eksploatacji. Wielkość kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, uznano obok efektów technologicznych, za jeden z najważniejszych czynników decydujących o wyborze urządzeń. Badaniami ekonomicznymi objęto pulsatory i akcelatory, zakładając, że pracują one w tych samych warunkach (jednakowy skład wody surowej, jej ilość, rodzaj i dawki reagentów, te same prędkości wznoszenia wody w strefie klarowania, czasy zatrzymania, rzędne zwierciadeł wody, rodzaj gruntu itd.). Celem podjętych badań [81, 82] było określenie różnic w kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych związenych z budowę i eksploatacją pulsatorów o przekroju poziomym w kształcie prostokąta i koła (zwanych dalej prostokątnymi i kołowymi) oraz akcelatorów.

W celu uzyskania niezbędnych informacji zaprojektowano dla wydajności 100 000 m³/d w wariancie I pulsatory prostokątne, w wariancie II pulsatory kołowe, w wariancie III akcelatory oraz sporządzono część kosztorysową dla wszystkich wariantów. Porównując nakłady inwestycyjne stwierdzono, że najtańsze są akcelatory, a następnie pulsatory kołowe, zaś najdroższe okazały się pulsatory prostokątne. Nakłady inwestycyjne dla poszczególnych wariantów wyrażone w procentach, przy założeniu 100% dla wariantu najdroższego (wariant I) wynoszą: wariant III – 66,90%, wariant II – 79,12%. Zestosowanie akcelatorów pozwala na zmniejszenie nie tylko nakładów inwestycyjnych, als i kosztów remontów kapitalnych i bieżących o 33,10% w stosunku do wariantu najdroższego, tj. z pulsatorami prostokątnymi. Podobnie zapotrzebowanie mocy dla akcelatorów jest mniejsze o 13,92% w stosunku do pulsatorów kołowych oraz o 6,73% w stosunku do pulsatorów prostokątnych. Na drugim miejscu po akcelatorach znalazły się pulsatory kołowe, dla których nakłady inwestycyjne są o 20,88% mniejsze od najdroższych w danej grupie – pulsatorów prostokątnych. Najdroższymi pod względem kosztów budowy i eksploatacji okazały się pulsatory prostokątne.

Otrzymanych wyników nie można uogólniać w szerokim zakresie możliwych wydajności pulsatorów i akcelatorów bez przeprowadzenia odpowiednich badań ekonomicznych.

W badaniach ekonomicznych pulsatorów i akcelatorów założono te same czasy zatrzymania prędkości wznoszenia wody oraz jednakowe zużycie reagentów. Mimo tych niekorzystnych dla akcelatora założeń, jego przewaga pod względem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych okazała się bezsporna. W rzeczywistości prędkość wznoszenia wody w akcelatorach (przy uzdatnianiu wody dla celów komunalnych) jest co najmniej o 30% wyższa w porównaniu z pulsatorami. Powoduje to osiągnięcie większych wydajności, jak również dodatkowe zmniejszanie nakładów inwestycyjnych ponad uprzednio wykazane (mniejsza kubatura urządzeń i zapotrzebowanie terenu). Nie udało się natomiast uzyskać danych dotyczących zużycia reagentów przez pulsatory i akcelatory pracujące w tych samych warunkach. Koszty wynikające ze zużycia reagentów powinny być w przypadku akcelatorów mniejsze, dzięki cyrkulacji kontaktowej osadu, co powoduje maksymalna wykorzystanie dozowanych chemikalii.

- 48 -

2.5. Ocena pracy akcelatorów i pulsatorów w Polsce

Ocenie tej poddano akcelatory pracujące na potrzeby energetyczno-przemysłowe (El. Dolna Odra, Huta Katowice, EC. Będzin, EC. Kraków, EC. Skawina, ZK. Zdzieszowice, EC. Bydgoszcz, EC. Gorzów Wielkopolski, El. Jaworzno III, El. Łaziska, El. Siersza, El. Stalowa Wola, EC. Płock, FCP. Świecie) i dla celów komunalnych (Olkusz, Tuchów, Zielona Góra).

W przypadku pulsatorów analizą objęto wszystkie urządzenia pracujące zgodnie z przeznaczeniem w Warszawie, Sulejowie i Goczałkowicach.

Wieloletnia eksploatacja akcelatorów i pulsatorów w Polsce, przy uwzględnieniu jakości wykonawstwa i pozionu eksploatacyjnego, składu uzdatnianej wody, jego zmienności w czasie, wahań obciężenia hydraulicznego i temperatury, kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, pozwala na następujące uogólnienia:

- akcelatory stosowane są szeroko w układach urządzeń do przygotowania wody na potrzeby energetyczne, rzadziej zaś do uzdatniania wód dla celów komunalnych. Zasilane są wodami powierzchniowymi, kopalnianymi i głębinowymi lub ich mieszaniną. Pulsatory natomiast służą do uzdatniania wód powierzchniowych przewidzianych dla celów komunalnych,
- złożoność konstrukcyjna akcelatorów i pulsatorów praz ich wrażliwość na wszelkiego rodzaju niesprawności powodują, że urządzenia te wymagają starannego wykonawstwa i fachowej obsługi. Wśród usterek wykonawczych i trudności eksploatacyjnych w przypadku akcelatorów dominuja: przecieki mis betonowych i przejść rurociągów, uszkodzenia wewnętrznych powłok ochronnych, niewłaściwe ustawienie dysz w pierścieniu rozprowadzającym na dopływie wody, różne wymiary szczalin recyrkulacyjnych oraz nieprawidłowe wypoziomowanie rynian zbiorczych. Poważną przyczyną zakłóceń w pracy tych urządzeń są awarie pomp dozujących chemikalia (zanieczyszczenie mleka wapiennego częściami stałymi) i zatykanie się rurociągów służących do ich transportu oraz brak właściwej aparatury i urządzań do pomiaru ilości dozowanych reagentów, W przypadku pulsatorów dominują: przecieki mis betonowych i przejść rurociągów, wyrywanie, pekanie i zatykanie drenażu oraz niewłaściwe wypoziomowanie koryt przelewowych. Trudności dotyczące dozowania i pomiaru ilości wprowadzanych reagentów są podobne, jak w przypadku akcelatorów. Problemem natomiast pozostaje czyszczenie drenażu dolnego,
- wpływ zmian obciążenia hydraulicznogo na efekt technologiczny akcalatorów (pracujących w energetyce), umożliwiający poprawną ich pracę, waha się w dość szerokich granicach, tj. od 14 do 125% wydajności projektowej. Szybkość tych zmian nie powodująca większych zaburzen, może się zawierać w granicach od 7 do 17% godzinowej wydajności projektowej. Umożliwia to dobrą pracę akcelatorów mimo zmienności obciążeń wynikających np. z pracy urządzeń przemysłowych lub zmienności przepływów w rzekach górskich (Tuchów). Pulsatory natomiast wymagają stałego obciąże-

nia hydraulicznego ze względu na utrzymywanie osadu w stanie zawieszonym,

- przerwy w dozowaniu reagentów dochodzące do 30 minut nie powodują obniżenia efektu technologicznego pracy akcelatorów i są łagodzone przez nadmiar chemicznie aktywnego osadu. Dla pulsatorów przerwy takie są niedopuszczalne,
- proces uzdatniania wody za pomocą akcelatorów wymaga zachowania odpowiedniego stężenia zawiesin we wstępnej i wtórnej komorze reakcji.
 Zakres zmian stężeń ustalony w okresie pomiarów rozruchowych nie zmusza zazwyczaj do korekty w późniejszym okresie eksploatacji.
- do dekarbonizacji w akcelatorach etosuje się wapno palone lub hydratyzowane. Ze względu na hamujący wpływ na proces dekarbonizacji wapnem koloidów organicznych i związków wielocząsteczkowych o charakterze koloidów ochronnych silnie stabilizujących krystalizację węglanu wapnia, w zdecydowanej większości przypadków stosuje się dekarbonizację łącznie z koegulacją siarczanem żelazawym. Wyjątek stanowi El. Bełchatów, gdzie proces dekarbonizacji realizowany jest wyłącznie za pomocą mleka wapiennego. W pozostałych akcelatorach i pulsatorach uzdatniających wodę dla celów gospodarczych, proces koegulacji realizowany jest za pomocą starczanu glinu (jedynie akcelatory w Olkuszu – siarczan żelazawy),
- rezygnacja z możliwości regulacji obrotów wirnika mieszadża w niektórych typach akcelatorów zwiększa trwałość i niezawodność stosowanych przekładni, jednak nie sprzyja optymalizacji procesu technologicznego, szczególnie w przypadku zmian wydajności czy parametrów fizyczno-chemicznych wody.
- okres wpracowania warstwy osadu w pulsatorach dochodzi zimę do 1 tygodnia, zaś latem do 2 dni (np. Wodocięg Centralny w Warszawie), w przypadku akcelatorów czas ten wynosi odpowiednio 1 dzień i około 6 godzin (np. Tuchów) oraz około 6 i 4 godzin w Zielonej Górze,
- wysoka jakość wód uzdatnianych za pomocą akcelatorów umożliwia w niektórych przypadkach rezygnację ze stosowania procesu filtracji (np. przy uzdatnianiu wód dla celów przemysłowych),
- czas zatrzymania wody w akcelatorach jest w warunkach krajowych około pół godziny krótszy od podobnego czasu w pulsatorach (akcelatory 1,5-2,0 godzin, pulsatory zaś 2,0-2,5 godzin),
- wybór i zastosowanie akcelatorów na wodociągu w Olkuszu są w pałni trafne i uzasadnione. Woda dołowa z kopalni rud cynku i ołowiu, którą zasilane są te urządzenia, charakteryzuje się dużą zmiennością zawartości zawiesin w postaci polidysparsyjnej zawiesiny siarczków cynku i ołowiu. Woda ta dobrze poddaje się koagulacji siarczanem żelazawym, zapewniającym wysoką efektywność procesu,
- dobra wyniki pracy osiągają również akcelatory w Zielonej Górze, uzdatniające mieszaninę wód powierzchniowych i podziemnych. Woda poddawana jest tu wstępnemu chlorowaniu i koagulacji siarczanem glinu, zaś zmiana obciążenia hydraulicznego dochodzi do 25%,

- stosowane w energetyce akcelatory stalowe małych średnic wymagają pracy w pomieszczeniach ogrzewanych lub odpowiedniej izolacji i podgrzewania wody surowej w okresie zimy. Podgrzewanie wody jest korzystne w procesie jej zmiękczania i korekty pH przy użyciu wapna. W przeciwnym razie wydłuża się czas reakcji. Praktycznie podgrzewanie stosuje się jedynie w El. Łagisza,
- dobra praca pulsatorów możliwa jest przy ich obciążeniu drobną koloidalną zawiesiną, której stężenie w dopływie zawiera się w granicach od 60 do 250 mg/dm³. Drobna koloidalna zawiesina jest natomiast wynoszona z akcelatorów i wymaga stosowania odpowiednich obciążników. Praktycznie nie istnieje dla akcelatorów górna granica obciążenia zawiesiną (lub mętnością), co ma korzystne znaczenie przy uzdatnianiu wód mieszanych lub pochodzących z rzek i potoków charakteryzujących się dużę zmiennością zanieczyszczeń. Wymaga to jednak odpowiedniego zautomatyzowania czynności kontrolno-pomiarowych i obsługowych,
- czułość pulsatorów na niską temperaturę wody nie pozwala na uzyskanie w strefie klarowania większych prędkości wznoszenia niż 0,6-0,7 mm/s. Odpowiednie prędkości dla akcelatorów wynoszą 0,7-1,0 mm/s przy uzdatnianiu wód dla celów komunalnych i 1,0-1,4 mm/s przy dekarbonizacji z koagulacją. Zwiększa to w przypadku pulsatorów powierzchnię terenu pod ich zabudowę oraz ryzyko okresowego ograniczenia wydajności całej stacji wodociągowej,
- praca pulsatorów w warunkach zimowych (kiedy temperatura wody zbliża się do 0°C) jest poważnie utrudniona. Wydajność tych urządzań obniża się nieraz od 40 do 50% mimo stosowania specjalnych zabiegów chemicznych i wydłużenia czasów pulsacji. Nie zanotowano natomiast tak dalece poważnych zakłóceń w pracy akcelatorów,
- nie udało się uzyskać danych dotyczących efektów technologicznych redukcji zanieczyszczeń w stosunku do wody surowej oraz zużycia reagentów przez akcelatory i pulsatory pracujące w tych samych warunkach,
- przeprowadzone badania ekonomiczne kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych akcelatorów i pulsatorów (dla jednej wydajności i niekorzystnych dla akcelatorów założeń - równości czasów zatrzymania i prędkości wznoszenia oraz jednakowego zużycia reagentów) wykazały, żo koszty wynikające z budowy i eksploatacji akcelatorów sę mniejszo.

Z przeprowadzonej analizy pracy akcelatorów i pulsatorów w Polsce wynika, że pulsatory, mimo stosowania złożonych zabiegów technologicznych związanych z potrzebą dozowania kilku reagantów (koszt materiałów, urządzeń i eksploatacji), z trudem osiągają zamierzone efekty, są bardziej wrażliwe na zniany temperatury wody oraz wydajności. Maksymalna prędkość wznoszenia wody w strefie klarowania rzadko przekracza 0,7 mm/s, co jest prędkością zbyt małą jak na rodzaj i ilość stosowanych środków chemicznych. Najtrudniejszy dla eksploatacji pulsatorów jest okres zimy, kiedy temperatura wody zbliża się do 0⁰C. Korzyścią technologiczną związaną z stosowaniem pulsatorów jest zapewnienie mimo wszystko skutecznej koagulacji najdrobniejszej zawiesiny w okresach zimowych, kiedy to w przypadku koagulacji klasycznej dawki reagentów byłyby znacznie większe. W porównaniu z klasycznymi komorami flokulacji i osadnikami poziomymi, pulsatory osiągają znacznie mniejsze rozmiary. Przykładem może być stacja uzdatniania wody w Goczałkowicach, qdzie zastosowanie pulsatorów okazało się wysoce efektywne.

Wadą pulsatorów jest potrzeba ciągłego dawkowania reagentów, nawet kiedy niezachodzi konieczność koagulacji wody, w celu utrzymania warstwy zewieszonego osadu.

Akcelatory natomiast są mniej wrażliwe na zmiany obciążeń hydraulicznych, składu wody i temperatury. Pompa – mieszadło, w którą są wyposażone, umożliwia dostosowanie intensywności mieszania i krotności cyrkulacji osadu stosownej do składu wody i jej temperatury. Ponadto wędrówka cząstek kłaczkowatych na skutek mieszania i cyrkulacji osadu sprzyja mniejszemu zużyciu reagentów. W porównywalnych przypadkach powierzchnia terenu pod zabudowę akcelatorów jest mniejsza. Akcelatory są zatem sksploatacyjnie elastyczniejsze, technologicznie i hydraulicznie sprawniejsze i oszczędniejsze zarówno inwestycyjnie, jak i eksploatacyjnie. Ich wadą natomiast jest wynoszenie do odpływu drobnych zawiesin koloidalnych w wyniku przenoszenia zaburzeń związanych z cyrkulacją osadu na strefę klarowania. 3. FIZYKALNE MODELOWANIE AKCELATORÓW I PULSATORÓW

3,1. Wprowadzenie

Technologia chemicznego oczyszczania wód powierzchniowych opiera sie w znacznej mierze na wykorzystaniu osadników kontaktowych do koaqulacji i klarowania wody, które stanowię często rozwiązania patentowe wielu firm zagranicznych. Rozwiązania te niejednokrotnie trudno jest dostosować do krajowych warunków oczyszczania wody, ponieważ firmy zagraniczne projektują zwykle tego rodzaju urządzenia na podstawie własnych długoletnich doświadczeń, których wyraźnie brak w warunkach krajowych. Duża liczba rozwiązań konstrukcyjnych tych urządzeń utrudnia ich projektowanie i eksploatację tylko na podstawie danych z piśmiennictwa bez przeprowadzenia doświadczalnych badań modelowych dotyczących zagadnień hydromechaniki i chemizmu oczyszczanej wody. Rozwój techniki i technologii znacznie wyprzedził obecny stan badań podstawowych w tej dziedzinie zaniedbując przede wszystkim sprawy modelowania procesów elementarnych oraz podobieństwa hydromechanicznego zjawisk zachodzących w tych urządzenia. Zatem konieczne jest osobne modelowanie zjawisk hydromechanicznych, aby zastąpić kosztowne i czasochłonne badania ruchowe.

Wśród czynników decydujących o jakości oczyszczanej wody w urządzeniach do koagulacii i klarowania podstawowe znacznie ma optymalny kształt kon-<mark>strukcji urządzenia oraz umiejętny dobór</mark> technologii oczyszczania. Kształt i warunki hydrodynamiczne przepływu wody w urządzeniu warunkują przebieg realizowanego w nim procesu. Powszechnie znane są wyniki zastosowania zarówno w osadnikach konwencjonalnych, jak i kontaktowych elementów płytowych lub przewodowych umożliwiających wyrównanie i zmniejszenie liczby Re w przekroju strefy sedymentacji [107, 108, 117]. Te stosunkowo proste zmieny w konstrukcji istniejących urządzeń umożliwiają znaczne zwiększenie obciążenie hydraulicznego, a tym samym pozwalają uzyskać większe wydajności urządzeń przy lepszym niejednokrotnie efakcie technologicznym. Uzyskanie wysokiej skuteczności hydraulicznej i technologicznej osadników kontaktowych wymaga przede wszystkim optymalizacji kształtu i parametrów ich pracy już na etapie badań przedprojektowych. Badania modelowe całych urzadzeń lub wybranych elementów ich konstrukcji – bliżej nie znanych projektantowi, gwarantują lepsze efekty ich pracy oraz podnoszą poziom prac projektowych.

W bedaniach keztałtu urzędzenia i warunków hydrodynamicznych przepływu wody potrzebny jest model zbudowany według zased teorii podobieństwa hydromechanicznego, zaś w badaniach technologicznych z punktu widzenia chemizmu oczyszczanej wody. Przy obscnym stanie wiedzy trudno jest zbudować jeden zmniejszony model, w którym można byłoby realizować badania dotyczące sedymentacji, reakcji chemicznych, tworzenia się kłaczków i właściwości hydraulicznych. Dlatego zachodzi konieczność prowadzenia badań w sposób etapowy. W najmniejszej skali można oddzielnie modelować poszczególne oparacje jednostkowe niezbędne zarówno dla hydrauliki, jak też chemizmu samego procesu. Następnie, powiększając stopniowo skalę doświadczeń i eliminując przypadki negatywne, można sprawdzać proces w sposób kompleksowy.

Odpowiednie modelowanie konstrukcji i geometrii urządzeń może dostarczyć informacji trudnych do uzyskania drogę badań na istniejących obiektach. Praktyczny cel wykorzystania modelowania fizykalnego może być osięgnięty tylko przy ścieżej współpracy badacza i projektanta oraz włączeniu we właściwym czesie badań modelowych do cyklu projektowania obiektów. Dotyczy to w szczególności urządzeń bardzo dużych i kosztownych, nie eprewdzonych w warunkach krajowych. Wobec braku badań modelowych elementów konstrukcyjnych oraz parametrów pracy urządzeń projektuje się je na tzw. wyczucie lub przez naśladowanie rozwiązań i zaleceń firm zagranicznych, korzystając z firmówek.

Należy również podkreślić fakt, ża wielu spośród potrzebnych informacji nie można uzyskać na drodze pomiarów i obserwacji istniejących urządzeń w określonym już konstrukcyjnie układzie. Badania ruchowe na obiektech naturalnych są potrzebne w technice modelowania do sprawdzenia poprawności przyjętych metod, kontroli warunków jednoznaczności oraz oceny wielkości bżędu badań modelowych.

3.2. Ogólne zesady fizykalnego modelowania

Podejmując badanim modelowa należy ściśle określić warunki konieczne i wysterczejąca do modelowania fizykalnego. Należy zatem zapewnić warunki jednoznaczności dla modelu i jego naturalnego wzorca, wyrażejąca się poprzez:

- podobieństwo geometryczne modelu i obiektu, w którym przebiega proces,
- równość liczbową określających kryteriów podobieństwa, przy czym należy uzyskać równość liczb kryterialnych w dowolnej parze odpowiadających sobie przekrojów modelu i obiektu naturalnego,
- podobieństwo fizykalnych parametrów ciał w odpowiadających sobie punktach modelu i wzorca,
- podobieństwo granicznych i czasowych warunków przebiegu procesu (w przypadku badań hydraulicznych z użyciem czystej wody wodociągowej, np. podobieństwo ruchu cieczy na dopżywie i odpżywie, podobieństwo pól prędkości i temperatury).

Równania opisujące przebieg zjawisk i procesów, zarówno w obiekcie naturalnym, jak i w modelu są jednakowe. Różnią się natomiast wielkości fizyczne dla modelu z odpowiadającymi sobie wielkościami obiektu naturalnego. Wzajemne zależności między tymi wielkościami opisują skale modelowania.

W przypadkach, kiedy nie można spełnić wszystkich warunków modelowania pełnego, wykorzystuje się zdolność samomodelowania zjawisk, prowadząc badania zgodnie z zasadami modelowania przybliżonego.

3.3. Kryteria podobieństwa dla modelowania przepływów i procesów w układach wielofazowych

3.3.1. Analiza dotyczczasowych prac z zakresu modelowania osadników kontaktowych

Z analizy zasad fizykalnego modelowania przepływów w osadnikach kontaktowych metodą iloczynów bezwymiarowych [105] wynika potrzeba spełnienia podobieństwa geometrycznego i mechanicznego. Kryteriami, które należy uwzględniać są [35, 43, 70, 86, 99, 105, 121, 129, 149]:

- kryterium Reynoldsa

 $Re = \frac{W \cdot 1}{\hat{\nabla}} = idem$

- kryterium Froude'a

 $Fr = \frac{q - 1}{w^2} = idem$

- kryterium Eulera

$$Eu = \frac{\Delta p}{p \cdot w^2} = idem$$

- oraz w niektórych przypadkach kryterium jednoczesności

$$H_{a} = \frac{W_{a} t}{1} = idem$$
(27)

Fizykalne znaczenie wymienionych kryteriów znane jest w literaturze [35, 43, 70, 103, 105, 129, 149]. Kryteria te określają parametry strumienie czystej wody bez udziału cząstek kłaczkowatych i podobieństwa procesów fizykochemicznych oczyszczania wody.

Pierwsze próby matematycznego opisania procesów oczyszczania wody w warstwie zawieszonego osadu w postaci tzw. kryterialnych liczb klarowa-

- 55 -

(24)

(25)

(26)

nie zostały podjęte przez Kurgajewa, Minca i Czernową [70, 103]. Podane uogólnione kryteria podobieństwa przedstawiają wielkości wymiarowa np. w zapisie:

$$Y_{1} = \frac{C_{wo} \cdot u \cdot 1}{W_{w} \cdot d} e = 1 \quad Y_{2} = \frac{C_{wo} \cdot 1}{W_{w}}$$
 (28)

z których wynika, że zachowanie podobieństwa procesu związane jest z przestrzeganiem odpowiednich zależności zwłaszcza między stężeniem częstek kłaczkowatych w warstwie zawieszonego osadu (C_{WC}), jej wysokościę (1) 1 prędkością przepływu (W_P). Podobieństwo procesów zachowane jest w tym przypadku tylko dla wody o jednakowej jakości, oczyszczanej w różnych warunkach.

Z czasem podobieństwo procesu zaczęto uogólniać z kryterium Campa (rozdz, 1.5, wzór (15)):

C. = G . t

W obiekcie naturalnym mamy do czynienia z układami dwu- i wielofazowymi, jak woda - częstka kłaczkowata. Ciało stałe występuje tutaj jako faza rozproszona i nieciągła w różnych rozdrobnieniach. Należałoby zatem ustalić również kryteria podobieństwa dla rozproszonej fazy stałej. Jest to zadanie trudne ze względu na niestały przebieg procesu koagulacji. Brak również metody obliczenia funkcji rozkładu dyskretnej fazy stałej w strumieniu. Do określenia przebiegu zjawisk w takich układach niezbędne jest stosowanie eksperymentu, tym bardziej, że charakter powiązań kinetyki flokulacji, adsorpcji i desorpcji jest ściśle uzależniony od transportu masy i pędu.

W osadnikach kontaktowych cięgłym zmianom ulegają nie tylko wymiary kłaczków i ich kaztałt, ale również ich aktywność powierzchniowa. Wynika etęd konieczność uwzględnienia podobieństwa chemicznego dotyczęcego modelowania aktywności powierzchniowej częstek kłaczkowatych [127]. Częstki te w modelu powinny być większe niż w urządzeniu technicznym o tyle razy, ile wynika to z liniowego współczynnika skali. Aktywność jednostkowa maey kłaczków osadu, która decyduje o szybkości reakcji [126] może być zapisana w postaci:

dla reakcji pierwszego rzędu

$$\frac{d_{k2}^2 \cdot A_{k2}}{D_c \cdot f}$$

- dla reakcji drugiego rzędu

$$a_j^{II} = \frac{d_{k2}^2 + A_{k2} + C_R}{D_R + T}$$

(29)

(30)

Oprócz tego procesom flokulacji i adsorpcji towarzyszę pewne efekty cieplne wyrażone przez ciepło właściwe i przewodnictwo cieplne.

Zachowanie podobieństwa dotyczącego chemicznej i cieplnej części problematyki jest jednak trudne z punktu widzenia praktycznego, gdyż wiele z parametrów tego procesu jest funkcją czasu jego trwania.

Zatem przy modelowaniu przepływów i procesów w układach wielofazowych uwzględnić należy podobieństwo geometryczne, kinematyczne, dynamiczne, cieplne i chemiczne, a znane z literatury bezwymiarowa liczby kryterialne przenoszenia ilości ruchu uzupełnić liczbami kryterialnymi przepływu masy i podobieństwa chemicznego. Zasadnicza trudność istnieje w równoczesnym spełnieniu tych podobieństw oraz sformułowaniu na tej podstawie ogólnego równania kryterialnego. Przybliżoną ocenę efektów zmiany skali można uzyskać wprowadzając podjęcie tzw. obszaru, ze wskazaniem dominującego czynnika jako decydującego o efektach procesu.

Efekty te zależę, poza czynnikami dynamicznymi, od zjawisk powierzchniowych w rozdziale faz - woda, powierzchnia kłaczka. Przy opisie tych zjawisk trzeba jednak wiedzieć, jak rozbija się energia wewnętrzna oraz znać równania fizyczne energii powierzchniowej. Funkcja ta przyjmuje każdorazowo inną postać w zależności od np.: składu wody, rodzaju i dawki reagentów itd., nie jest więc obiektywna, gdy tymczasem równania bilansów (w szczególności energii - rozdz. 3.3.2), które posłużyły w tej pracy do budowania kryteriów, sę obiektywna.

3.3.2. Matematyczny opis przepływów w warstwie zawieszonego osadu

Podstawowym problemem matematycznego modelowania przepływów dwu- i wielofazowych ośrodków ciągłych jest zbudowanie zamkniętego układu równań ruchu rozpatrywanej mieszaniny, przy uwzględnieniu właściwości fizykochemicznych każdej z faz. W porównaniu z zagadnieniami jednofazowymi matematyczny opis mieszanin rzeczywistych komplikuje się na skutek istnienia oddziaływań międzyfazowych (szczególnie takich, jak wymiana pędu i energii na granicy międzyfazowej, ruchy chaotyczne, oscylacje, zderzenia cząstek itp.), w związku z czym ilość efektów, które trzeba uwzględnić znacznie się rozszerza.

Opis przepływów w warstwie zawieszonej oparto na teorii mieszanin, tj. stosunkowo nowym działe hydromechaniki, zapoczątkowanym przez Truesdella w początku lat sześćdziesiątych. Obecnie teoria ta znajduje się w pełnym rozwoju. Znane są podstawy teoretyczne – aksjomatyka i termodynamika tych przepływów – Wilmańskiego [145].

Założono, że zadanie jest jednowymiarowe (ruch w warstwie osadu pionowy), przepływ jest izotermiczny oraz lepki, lecz taki, aby dyssypacja energii wewnętrznej w tym przepływie była pomijalna. Podobnie stężenie koagulantu w wodzie w odpływie z urządzenie jest znikome i zostało pominięte. W celu wyznaczenia bilaneu masy dla mieszaniny w charakterystycznych strefach przepływu w osadnikach kontaktowych z zawieszonym osadem założono trzy obszary przepływu, jak na rys. 10.



OZNACZENIA

- O -cząstka wody
- —cząstka zanieczyszczeń
- 🛛 --- cząstka koogulantú

—cząstka klaczkowata cieżka

⊙—cząstka kłaczkowata lekka

IIII-obszary przeptywu

Rys. 10. Charakterystyczne obszary przepływu mieszaniny dla osadników kontaktowych z zawieszonym osadem

Fig. 10. Characteristic areas of mixture flow for contact settling tanks with suspended settling

Założone obszary I, II, III zawierają:

obszar I – cząstki wody, zanieczyszczeń i koagulantu, obszar II – cząstki wody, cząstki kłaczkowate ciężkie i lekkie, obszar III – cząstki wody i cząstki kłaczkowate lekkie.

Obszar I opisuje strefę mieszania, II - strefę osadu zawieszonego, III - strefe klarowania.

Podział na obszary I, II, III jest umowny, gdyż w każdym obszarze urzędzenia będą się znajdowały wszystkie składniki mieszaniny – krańcowo



Rys. 11. Bilans masy dla mieszaniny w obszarach I, II, III Fig. 11. Balance of mass for the mixture in areas I, II, III w ilościach śladowych. Umożliwia to wydzielenie z procesu oczyszczania poszczególnych faz technologicznych.

Bilans masy dla mieszaniny w wyżej wymienionych obszarach można przedstawić jak na rys. 11.

Przepływ określonej wyżej mieszaniny z punktu widzenia hydromechaniki opisuje się równaniami bilansów, które sę niezależne od własności fizycznych składników mieszaniny, równań fizycznych (które tu nie sę analizowane) i warunków brzegowo-poczętkowych.

Jeżeli przyjmiemy, że granice obszarów I, II, III maję charakter umowny, to możemy wypisać równania bilansów masy dla mieszaniny zawierającej częstki: wody, zanieczyszczeń, koagulantu i kłaczków. Maję one postać:

- dla cząstek wody:

$$\frac{d}{dt} \int_{V} \rho^{0} dV = \int_{V} R^{0} dV$$
(31)

stąd

$$\frac{\partial \rho^{o}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left(\rho^{o} V_{k}^{o} \right) = R^{o}; \quad R^{o} > 0$$
(32)

 dla częstek zanieczyszczeń (tzn. też wody towarzyszącej zanieczyszczeniom)

$$\frac{d}{dt} \int_{V} P^{1} dV = \int_{V} R^{1} dV$$
(33)

stad

$$\frac{\partial \rho^{1}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left(\rho^{1} v_{k}^{1} \right) = R^{1}; \qquad R^{1} < 0$$
(34)

- dla cząstek kłaczkowatych ciężkich

$$\frac{d}{dt} \int_{V} \rho^2 dv = \int_{V} R^2 dv$$
(35)

stąd

$$\frac{\partial \rho^2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho^2 v_k^2 \right) = R^2; \quad R^2 > 0$$
(35)

- dla czastek kłaczkowatych lekkich

$$\frac{d}{dt} \int_{V} \rho^{3} dv = \int_{V} R^{3} dv$$
(37)

stąd

$$\frac{\partial \rho^3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho^3 v_k^3 \right) = R^3 , \quad R^3 > 0$$
(38)

- 59 -

- dla cząstek koagulantu

$$\frac{d}{dt} \int_{V} p^{4} dv = \int_{V} R^{4} dv$$
(39)

stąd

$$\frac{\partial \rho^4}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho^4 v_k^4 \right) = R^4; \qquad R^4 < 0 \tag{40}$$

Ostatecznie po zsumowaniu stronami równań bilansów (31)-(40) uzyskujemy:

$$R^{1} + R^{4} = R^{0} + R^{2} + R^{3}$$
(41)

gdzie:

- R⁰ ilość masy wody, która przechodzi w cząstki kłaczkowate w jednostce objętości i w jednostce czasu,
- R¹ ilość masy zanieczyszczeń w wodzie surowej, która przechodzi w częstki kłaczkowate w jednostce objętości i w jednostce czasu,
- R² 1lość masy zanieczyszczeń z wody surowej przechwycona przez częstki kłaczkowate ciężkie w jednostce objętości i w jednostce czasu,
- R³ ilość masy zanieczyszczeń z wody surowej przechwycona przez cząstki kłaczkowate lekkie w jednostce objętości i w jednostce czasu,
- R⁴ ilość masy koagulantu wprowadzonego do wody, która przechodzi w cząstki kłaczkowate w jednostce objętości i w jednostce czasu,
- $\rho^0 v_k^0$, $\rho^1 v_k^1$, $\rho^2 v_k^2$, $\rho^3 v_k^3$, $\rho^4 v_k^4$ strumienie: wody, zanieczyszczeń, częstek kłaczkowatych ciężkich, częstek kłaczkowatych lekkich i częstek koagulantu.
- Wartości: R⁰, R¹, R², R³, R⁴ należy przyjąć z doświadczenia. Zatem bilane masy dla całości mieszaniny można zapisać następująco:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p^{0} + p^{1} + p^{2} + p^{3} + p^{4}) + \frac{\partial}{\partial x_{k}}(p^{0}V_{k}^{0} + p^{1}V_{k}^{1} + p^{2}V_{k}^{2} + p^{3}V_{k}^{3} + p^{4}V_{k}^{4}) = \mathbb{R}^{0} + \mathbb{R}^{1} + \mathbb{R}^{2} + \mathbb{R}^{3} + \mathbb{R}^{4}$$

(42)

stąd

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho V_k \right) = 0 \tag{43}$$

Czyli równanie zachowanie masy dla całej mieszaniny przyjmie postać

$$\frac{d}{dt} \int_{V} p \, dV = 0 \tag{44}$$

Natomiast bilans pędu dla składników mieszaniny można przedstawić za pomocą relacji:

- dla cząstek wody

$$\frac{d}{dt} \int_{V} \rho^{o} v_{k}^{o} dV = \int_{V} \rho^{o} F_{k}^{o} dV + \int_{V} \rho^{o} \frac{d}{k} dV + \int_{A} \rho_{1}^{o} dA$$
(45)

- dla cząstek zanieczyszczeń

$$\frac{d}{dt} \int_{V} \rho^{1} v_{k}^{1} dV = \int_{V} \rho^{1} F_{k}^{1} dV + \int_{V} \phi_{k}^{1} dV + \int_{A} F_{1}^{1} dA$$
(45)

- dla cząstek kłaczkowatych ciężkich

$$\frac{d}{dt} \int_{V} \rho^2 v_k^2 dv = \int_{V} \rho^2 F_k^2 dv + \int_{V} \phi_k^2 dv + \int_{A} P_1^2 dA$$
(47)

- dla cząstek kłaczkowatych lekkich

$$\frac{d}{dt} \int_{V} \rho^{3} v_{k}^{3} dv = \int_{V} \rho^{3} F_{k}^{3} dv + \int_{V} \phi_{k}^{3} dv + \int_{A} P_{1}^{3} dA$$
(48)

- dla częstek koegulantu

$$\frac{d}{dt} \int_{V} \varphi^{4} v_{k}^{4} dv = \int_{V} \varphi^{4} F_{k}^{4} dv + \int_{V} \varphi^{4}_{k} dv + \int_{A} \varphi^{4}_{1} dA$$
(49)

Z kolej założona, że cząstki kłaczkowate lekkie wynoszone do odpływu mają prędkość równe częstkom wody, tj.

 $v_k^3 \cong v_k^0$

(50)

natomiast straty pedu określone są ralacjami

ø	ok	>	0			¢ 2 k	>	0
ø	1 k	<	0			ϕ_k^3	>	0
Ø	4	<	0	1.	1	1		

Oznacza te, że:

- pi < O = prędkość cząstek zanieczyszczeń maleje (zanieczyszczenia oddają pęd cząstkom kłaczkowatym),
 </pre>
- \$\$\phi_k^2 > 0 prędkość cząstek kłaczkowatych ciężkich rośnie (zyskują pęd
 od wody, zanieczyszczeń i kosgulantu),
- $\phi_k^3 > 0 = prędkość częstek kłaczkowatych lekkich rośnie (zyskują pęd do wody, zanieczyszczeń i koagulantu).$

Sted bilene pedu dla całej mieszaniny można zapisać jako:

$$\sum_{\alpha c} \frac{d}{dt} \int_{V} \rho^{\alpha c} v_{k}^{\alpha c} dv = \sum_{\alpha c} \int_{V} (s^{\alpha c} F_{k}^{\alpha c} + F_{k}^{\alpha c}) dv + \sum_{\alpha c} \int_{A} P_{1}^{\alpha c} dA =$$
$$= \sum_{\alpha c} \int_{V} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho^{\alpha c} v_{k}^{\alpha c}) + \frac{\partial}{\partial x_{1}} (\rho^{\alpha c} v_{k}^{\alpha c} v_{1}^{\alpha c}) \right] dv =$$
$$= \int_{V} \left[\rho \frac{dw_{k}}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_{1}} (\rho^{\alpha c} u_{1}^{\alpha c} u_{k}^{\alpha c}) \right] dv$$

Zeé bilans pedu lokalnie:

$$\rho \frac{\partial W_{i}}{\partial t} = \rho F_{i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_{j}} - \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_{j}} (\rho^{\alpha} u_{i}^{\alpha} u_{j}^{\alpha})$$

Bilans energii dla całości mieszaniny

$$\sum_{\alpha \in \mathcal{A}} \frac{d}{dt} \int_{V} p^{\alpha} (u^{\alpha t} + \kappa^{\alpha t}) dv = \sum_{\alpha \in \mathcal{A}} \int_{V} p^{\alpha t} F_{1}^{\alpha t} v_{1}^{\alpha t} dv + \sum_{\alpha \in \mathcal{A}} \int_{A} F_{1}^{\alpha t} v_{1}^{\alpha t} dA$$

(53)

(51)

(52)

stad

$$\mathcal{P}\frac{d}{dt}(U + K) = \mathcal{P}F_{i}W_{i} + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\mathcal{P}W_{j}) + \sum_{\alpha \in \mathcal{P}} \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\mathcal{P}^{\alpha c} \cdot u_{j}^{\alpha c})$$
(54)

Założono, że:

F¹₁ = F²₁ = ... = Fⁿ₁ - ciężary jednostki masy każdego składnika są takie same,
U¹ = U² = ... = Uⁿ - energia wewnętrzna jednostki masy każdego składni-ka jest taka sama,
K¹ = K² = ... = Kⁿ - energia kinetyczna jednostki masy każdego składni-ka jest identyczna.

Ostatecznie problem opisuje następujący komplet bilansów:

- masy

$$\frac{\partial \rho^{\alpha}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{k}} (\rho^{\alpha} V_{k}^{\alpha}) = R^{\alpha}$$
(55)

lub

$$P \frac{de^{\alpha c}}{d\tau} + \frac{\partial}{\partial x_k} (P^{\alpha c} u_k^{\alpha c}) = R^{\alpha c}$$
(56)

- pędu

$$P\frac{dW_{i}}{dt} = PF_{i} + \frac{\partial P}{\partial x_{i}} - \sum_{Qt} \left[\frac{\partial}{\partial x_{i}} (P^{Qt} u_{i}^{Qt} y_{j}^{Qt}) \right]$$

gdzie:

$$\frac{\partial x_1}{\partial \phi_{\alpha}}(b_{\alpha}, \eta_{\alpha}, \eta_{\alpha}) = n_{\alpha}^2 \frac{\partial b_{\alpha} \eta_{\alpha}}{\partial b_{\alpha} \eta_{\alpha}} + b_{\alpha} \eta_{\alpha}^2 \frac{\partial x_1}{\partial \eta_{\alpha}}$$

X1

W przypadku przepływu jednokierunkowego w warstwie zawieszonego osadu w przyjętym układzie współrzędnych x₁, x₂, x₃, prędkości W₁ = 0, W₂ = 0, oraz u₁^{oc} = u₂^{oc} = 0 zatem

$$\rho \frac{dW_3}{dt} = \rho F_3 + \frac{\partial \rho}{\partial x_3} =$$

 $-\sum_{\alpha}^{\alpha} \left(n_{\alpha}^{2} \frac{9 x^{2}}{9 b_{\alpha} n_{\alpha}^{2}} + b_{\alpha} n_{\alpha}^{2} \frac{9 x^{2}}{9 n_{\alpha}^{2}}\right)$

(58)

(57)

- energii

$$\rho \frac{d}{dt} (\mathbf{U} + \mathbf{K}) = \rho F_3 \mathbf{W}_3 + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_3} (p \mathbf{W}_3) + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_3} (\frac{p \alpha}{\rho \alpha} \rho^{\alpha} \mathbf{u}_3^{\alpha})$$

- oraz warunków zgodności dla strumieni.

Oprócz równań bilansów spełnione muszę być równania zgodności strumieni, tzn. wypływ składnika ∞ (strumień j_1^{∞}) z obszaru I do II musi być równy przepływowi w obszarze, jak na rys. 12.



Rys. 12. Schemat przepływu strumieni $j_1^{\alpha c}$ Fig. 12. Scheme of stream flow $j_1^{\alpha c}$

Stęd warunki zgodności na granicy między obszarem I i II można zapisać jako:

$$\mathbf{J}_{\mathbf{i}}^{(\mathbf{o})^{\mathbf{I}}} \bigg|_{\mathbf{A}_{\mathbf{i}}} = \mathbf{j}^{(\mathbf{o})^{\mathbf{II}}} \bigg|_{\mathbf{A}_{\mathbf{i}}} : \mathbf{J}_{\mathbf{i}}^{(\mathbf{i})^{\mathbf{I}}} \bigg|_{\mathbf{A}_{\mathbf{i}}} = \mathbf{j}_{\mathbf{i}}^{(\mathbf{i})^{\mathbf{II}}} \bigg|_{\mathbf{A}_{\mathbf{i}}} : \mathbf{j}_{\mathbf{i}}^{(\mathbf{i})^{\mathbf{I}}} \bigg|_{\mathbf{A}_{\mathbf{i}}} = \mathbf{j}_{\mathbf{i}}^{(\mathbf{i})^{\mathbf{II}}} \bigg|_{\mathbf{A}_{\mathbf{i}}}$$

orez na granicy między obszarem II i III

$$\mathbf{j_{i}^{(0)}}^{\text{II}} \Big|_{A_{2}} = \mathbf{j_{i}^{(0)}}^{\text{III}} \Big|_{A_{2}} \mathbf{j_{i}^{(1)}}^{\text{III}} \Big|_{A_{2}} = 0; \quad \mathbf{j_{i}^{(2)}}^{\text{III}} \Big|_{A_{2}} = 0$$

$$\mathbf{j_{i}^{(3)}}^{\text{III}} \Big|_{A_{2}} = \mathbf{j_{i}^{(3)}}^{\text{III}} \Big|_{A_{2}} \mathbf{j_{i}^{(4)}}^{\text{II}} \Big|_{A_{2}} = 0$$

Oznacza to równość strumieni ne granicy obszaru I i II oraz II i III. Granicę tę wyznacze odpowiednio powierzchnia 🗛 i 🗛. Zatem do modelowania przepływów należy używać następujących równań wyjściowych:

$$\begin{split} \rho \left(\frac{\partial c^{0}}{\partial t} + W_{3} \frac{\partial c^{0}}{\partial x_{3}} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{0} u_{3}^{0}) = R^{0} \quad (60) \\ \rho \left(\frac{\partial c^{1}}{\partial t} + W_{3} \frac{\partial c^{1}}{\partial x_{3}} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{1} u_{3}^{1}) = R^{1} \quad (61) \\ \rho \left(\frac{\partial c^{2}}{\partial t} + W_{3} \frac{\partial c^{2}}{\partial x_{3}} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{2} u_{3}^{2}) = R^{2} \quad (62) \\ \rho \left(\frac{\partial c^{3}}{\partial t} + W_{3} \frac{\partial c^{3}}{\partial x_{3}} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{3} u_{3}^{3}) = R^{3} \quad (63) \\ \rho \left(\frac{\partial c^{4}}{\partial t} + W_{3} \frac{\partial c^{4}}{\partial x_{3}} \right) &+ \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{4} u_{3}^{4}) = R^{4} \quad (64) \end{split}$$

$$R^{1} + R^{4} = R^{0} + R^{2} + R^{3}$$

oraz

$$P\left(\frac{\partial W_{3}}{\partial F} + W_{3} \frac{\partial W_{3}}{\partial x_{3}}\right) = PF_{3} + \frac{\partial P}{\partial x_{3}} = -\sum_{\alpha c} \left[u_{3}^{\alpha c} \frac{\partial (\rho^{\alpha c} u_{3}^{\alpha c})}{\partial x_{3}} + \rho^{\alpha c} u_{3}^{\alpha c} \frac{\partial u_{3}^{\alpha c}}{\partial x_{3}} \right]$$
(65)

Przy powolnych przepływach (obszar II i III), składnik konwakcyjny przy pochodnych czasowych $\frac{d}{dt}$ można pominąć, uzyskując następujące zależ-ności:

$$\frac{dv_{1}^{\alpha c}}{dt} = \frac{\partial v_{1}^{\alpha c}}{\partial t} + v_{k}^{\alpha c} \frac{\partial v_{1}^{\alpha c}}{\partial x_{k}} \longrightarrow \frac{\partial v_{1}^{\alpha c}}{\partial t}$$

$$\frac{dp^{\alpha c}}{dt} = \frac{\partial p^{\alpha c}}{\partial t} + v_{k}^{\alpha c} \frac{\partial p^{\alpha c}}{\partial x_{k}} \longrightarrow \frac{\partial p^{\alpha c}}{\partial t}$$

$$(67)$$

$$d(U + K) = \partial(U + K) \longrightarrow \partial(U + K) \longrightarrow \partial(U + K)$$

$$(66)$$

$$\frac{d(U + K)}{dt} = \frac{\partial(U + K)}{\partial t} + V_k \frac{\partial(U + K)}{\partial x_k} - \frac{\partial}{\partial t} (U + K)$$
(68)

Zatem podane wcześniej równania (60), (61), (62), (63) 1 (64) ulegną uproszczeniu do następujących postaci:

$$\rho \frac{\partial c^{0}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{0} u_{3}^{0}) = R^{0}$$
(69)

$$\rho \frac{\partial c^{1}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{1} u_{3}^{1}) = R^{1}$$
(70)

$$\rho \frac{\partial c^{2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{2} u_{3}^{2}) = R^{2}$$
(71)

$$\rho \frac{\partial c^{3}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{3} u_{3}^{3}) = R^{3}$$
(72)

$$\rho \frac{\partial c^{4}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{4} u_{3}^{4}) = R^{4}$$
(73)

$$R^{1} + R^{4} = R^{0} + R^{2} + R^{3}$$
(41)

oraz

$$\rho \frac{\partial W_3}{\partial t} = \rho F_3 + \frac{\partial \rho}{\partial x_3} - \sum_{\infty} \left[u_3^{\infty} \frac{\partial (\rho^{\infty} u_3^{\infty})}{\partial x_3} + \rho^{\infty} u_3^{\infty} \frac{\partial u_3^{\infty}}{\partial x_3} \right]$$
(74)

Dle wyprowadzenia kryteriów podobieństwa do modelowania przepływów w poezczególnych obszarach niezbędne są jeszcze lokalne bilanse masy, pędu i energii.

Lokalne bilanse dla obszaru I można zapisać jako:

- bilanse masy:

$$\rho \frac{\partial c^{o}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{o} u_{3}^{o}) = R^{o}$$
(75)

$$P \frac{\partial c^1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho^1 u_3^1) = R^1$$
(76)

$$p \frac{\partial c^4}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_3} (p^4 u_3^4) = R^4$$

(77)

gdzie:

$$\rho = \rho^{0} + \rho^{1} + \rho^{4}$$

 $R^{0} = 0; R^{1} = 0; R^{4} = 0$

- bilans pędu

$$\rho \frac{\partial W_3}{\partial t} = \rho F_3 + \frac{\partial \rho}{\partial x_3}$$
(78)

w którym prędkość średnia w obszarze I ma postać

$$W_{i} = \frac{1}{Q} (\rho^{o} V_{i}^{0} + \rho^{1} V_{i}^{1} + \rho^{4} V_{i}^{4})$$

- bilans energii

$$\rho(\ddot{\mathbf{U}} + \dot{\mathbf{K}}) = \rho F_3 \cdot W_3 + \frac{\partial}{\partial x_3} (pW_3) + \sum_{\alpha c = 0, 1, 4} (\frac{p^{\alpha c}}{p \alpha} \rho^{\alpha c} \mathbf{u}_3^{\alpha c})$$
(79)

Należy również uwzględnić uprzednio podane warunki zgodności strumieni na granicy między obszarem I i II.

Lokalne bilanse dla obazaru II

- bilans masy

$$\rho \frac{\partial C^{0}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{0} u_{3}^{0}) = R^{0}$$
(80)

$$\rho \frac{\partial c^1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho^1 u_3^1) = R^1$$
(81)

$$\rho \frac{\partial c^2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho^2 u_3^2) = R^2$$
(82)

$$\rho \frac{\partial c^3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho^3 u_3^3) = R^3$$
(83)

$$\rho \frac{\partial c^4}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho^4 u_3^4) = R^4$$
(84)

gdzie:
$$\rho = \rho^{\circ} + \rho^{1} + \rho^{2} + \rho^{3} + \rho^{4}$$

 $R^{\circ} > 0; \quad R^{1} < 0; \quad R^{2} > 0; \quad R^{3} > 0; \quad R^{4} < 0$

Po zsumowaniu stronami bilansów masy dla obszaru II uzyskujemy

$$R^1 + R^4 = R^0 + R^2 + R^3$$

- bilans pędu

$$\rho \frac{\partial W_3}{\partial t} = \rho F_3 + \frac{\partial p}{\partial x_3}$$
(85)

oraz

$$\rho W_3 = \rho^0 V_3^0 + \rho^1 N_3^1 - \rho^2 V_3^2 + \rho^3 V_3^3 - \rho^4 V_3^4 \cong 0$$
(86)

wynika stąd, że prędkość średnia 𝒫𝗤₃ ≌ O, tzn. woda czysta płynie w górę stosunkowo szybko, a cząstki kłaczkowate ciężkie opadają powoli - bilans energii

$$\rho(\dot{U} + \dot{K}) = \rho F_3 W_3 + \frac{\partial}{\partial x_3} (pW_3) + \sum_{\alpha c = 0, 1, 2, 3, 4} (\frac{p^{\alpha c}}{p^{\alpha c}} p^{\alpha c} u_3^{\alpha c})$$
(87)

Podany układ bilansów masy należy uzupełnić warunkami zgodności strumieni na granicy między obszarem II i III.

Lokalne bilanse dla obezaru III

- bilans masy

$$\rho \frac{\partial c^{\circ}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho^{\circ} u_{3}^{\circ}) = R^{\circ}$$
(88)

$$\mathcal{P}\frac{\partial \mathcal{C}^{3}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{3}}(\mathcal{P}^{3}u_{3}^{3}) = R^{3}$$
(89)

gdzie: $P = P^{0} + P^{3}$ $R^{0} = 0; \quad R^{3} = 0$

- bilans pędu

$$\rho \frac{\partial W_3}{\partial t} = \rho F_3 + \frac{\partial p}{\partial x_3}$$
(90)

oraz

$$\rho u_3 = \rho^0 u_3^0 = \rho^3 u_3^3 \tag{91}$$

- 69 -

- bilans energii

$$\rho(\dot{u} + \dot{\kappa}) = \rho F_3 W_3 + \frac{\partial}{\partial x_3} (\rho W_3) + \sum_{\alpha c = 0, 3} (\frac{\rho^{\alpha c}}{\rho^{\alpha c}} \rho^{\alpha c} u_3^{\alpha c})$$
(92)

Matematyczny opis przepływów w warstwie zawieszonego osadu umożliwił uzyskanie równań różniczkowych bilansów masy, pędu i energii stanowiących podstawę do wyznaczenia kryteriów podobieństwa, co zostało przedstawione w rozdz. 3.3.3.

3.3.3. Kryteria podobieństwa modelowania przepływów w warstwie zawieszonego osadu

Otrzymane w rozdz. 3.3.2 równania różniczkowe lokalnych bilansów masy, pędu i energii dla poszczególnych obszarów, tj. I, II i III (rys. 10), posłużyły do określenia szukanych kryteriów podobieństwa, umożliwiających modelowanie przepływów w warstwie zawieszonego osadu. Kryteria podobieństwa wynikające z kolejnych równań różniczkowych, przedstawiają się następująco:

- z równania (75) po wprowadzeniu skal zmiennych zadania uzyskujemy:

$$s \rho \frac{c^{\circ}}{S_{t}} \left(\rho \frac{\partial c^{\circ}}{\partial t} \right) + s \rho^{\circ} \frac{u^{\circ}}{S_{1}} \frac{\partial}{\partial x_{3}} \left(\rho^{\circ} u_{3}^{\circ} \right) = 0$$
(93)

stąd

$$S_{\varphi} \frac{S_{\varphi}^{\circ}}{S_{t}} = S_{\varphi} \frac{S_{u}^{\circ}}{S_{1}}$$

wprowadzając

$$c^{\circ} = \frac{\rho^{\circ}}{\rho} - s_{c^{\circ}} = \frac{s_{\rho^{\circ}}}{s_{\rho}}$$

otrzymano w wyniku znanych przekształceń relację

$$\frac{S_t \cdot S_u^{o}}{S_1} = 1$$
(94)

Natomiast z równań (76) i (77) otrzymano analogiczne zależności:

$$\frac{S_t \cdot S_{u^1}}{S_1} = 1$$
(95)

oraz

$$\frac{S_{t} \cdot S_{u}^{4}}{S_{1}} = 1$$
(96)

W obszarze I S = S = S u^0 u^1 u^4

Rozważania te nie dotyczą np. przypadku ze źródłami, co wynika z równań lokalnych bilansów masy dla obszaru II (równanie (80), (81), (82), (83) i (84)) istotnie zachodzi

$$s_{\rho} \frac{s_{c}^{\circ}}{s_{t}} \left(\rho \frac{\partial c^{\circ}}{\partial t} \right) + s_{\rho \circ} \frac{s_{u}^{\circ}}{s_{1}} \frac{\partial}{\partial x_{3}} \left(\rho^{\circ} u_{3}^{\circ} \right) = s_{R^{\circ}} R^{\circ}$$
(97)

stąd

$$S_{\varphi} \frac{S_{\varphi}}{S_{t}} = S_{\varphi} \frac{S_{\varphi}}{S_{1}} = S_{\varphi}$$

Zatem dla obszaru II możemy zapisać:

$$\frac{S_{Q} = S_{c^{0}}}{S_{t} = S_{R^{0}}} = 1$$
(98)

$$\frac{S_{p} \cdot S_{c^{2}}}{S_{t} \cdot S_{R^{2}}} = 1$$



oraz





(101)

(99)

(100)



$$\frac{S_{p3} * S_{3}}{S_{1} * R_{3}} = 1$$

(103)

gdzie:

S ,S ,S ,S ,S - to skale źródeł masy między modelem a obiektem rzeczywistym.

Skale te pozwalają określić w obszarze II, ile wytworzyło się czystej wody (S) oraz ile przybyło cząstek kłaczkowatych ciężkich (S 2) i lek-R kich (S 3).

Ta sama grupa równań różniczkowych dla obszaru III wyznacza następujące skale podobieństwa:

$$\frac{S_t \cdot S_u \circ}{S_1} = 1$$
(104)

oraz

$$\frac{S_{t} \cdot S_{u}}{S_{1}} = 1$$
(105)

 z równania (78), którego zapis powtarza się dla każdego z trzech przyjętych obszarów otrzymano:

$$S_{\rho} \frac{S_{W}}{S_{t}} \left(\rho \frac{\partial W_{3}}{\partial t} \right) = S_{\rho} \cdot S_{F} \left(\rho \cdot F_{3} \right) + \frac{S_{p}}{S_{1}} \left(\frac{\partial p}{\partial x_{3}} \right)$$
(106)

stąd

$$S_{g} \frac{S_{W}}{S_{t}} = S_{g} \cdot S_{F} = \frac{S_{p}}{S_{1}} = const$$

zatem

$$\frac{S_{W}}{S_{t} \cdot S_{F}} = 1$$
(107)

1

$$\frac{S_{p} \cdot S_{W} \cdot S_{1}}{S_{p} \cdot S_{t}} = 1$$
(108)

Z kolei wyznaczono skale prodkości średniej całej mieszaniny (S $_{\rm H}$) oraz dla poszczególnych składników (S $_{\rm H}$) wychodząc z zależności:

$$\rho^{\gamma} = \sum_{\alpha=0}^{4} \rho^{\alpha} \mu^{\alpha}$$
(109)

stąd

$$s_{\rho} \cdot s_{W} \cdot (\rho \cdot W) = \sum_{\alpha} s_{\rho}^{\alpha} \cdot s_{u}^{\alpha} \cdot (\rho^{\alpha} \cdot u^{\alpha})$$

oraz

$$\rho^{H} = \sum_{\infty} \frac{s_{\rho}^{\infty} \cdot s_{\omega}}{s_{\rho} \cdot s_{W}} (\rho^{\infty}, u^{\infty})$$

zatem dla każdego 🕫 zachodzi zależność:

$$\frac{S_{\rho}^{\alpha} \cdot S_{\mu}}{S_{\rho} \cdot S_{\mu}} = 1$$
(110)

J ten sposób można wyznaczyć skale prędkości średniej całej mieszaniny, jak również skale prędkości poszczególnych składników tej mieszaniny i zapisać:

$$S_{ij} = \frac{S_{\rho}^{\infty} \cdot S_{j}}{S_{\rho}}$$

oraz

$$S_{\mu} = \frac{S_{\rho} + S_{\mu}}{S_{\rho} O^{2}}$$
(112)

(111)

Wystarczy zatem np. znać gęstość mieszaniny i gęstość danego składnika oraz prędkość średnią całej mieszaniny, aby wyznaczyć prędkość tego składnika.
- z równania (79) otrzymano

$$s_{\rho} \frac{S_{u}}{S_{t}} (\rho \dot{\upsilon}) + s_{\rho} \frac{S_{K}}{S_{t}} (\rho \dot{\kappa}) = s_{\rho} S_{F} S_{U} (\rho F_{3} W_{3}) +$$

$$+ \frac{S_{\rho} S_{W}}{S_{1}} \left[\frac{\partial}{\partial x_{3}} (\rho W_{3}) \right] + \sum_{i=0,1,4} \left[\frac{S_{\rho} c}{S_{\rho} c_{1}} S_{j} c_{i} \frac{\partial}{\partial x_{3}} (\frac{\rho}{\rho} c_{i} j_{3} c_{i}) \right] \qquad (113)$$

stąd

$$S_{\rho} \frac{S_{u}}{S_{t}} = S_{\rho} \frac{S_{K}}{S_{t}} = S_{\rho}S_{F}S_{W} = \frac{S_{p}S_{W}}{S_{1}} = \frac{S_{p}S_{W}}{S_{p}S_{T}} = const$$

a zatem między innymi możemy zapisać, ze:

$$S_{\rho}S_{F}S_{W} = \frac{S_{p}S_{W}}{S_{1}} \longrightarrow \frac{S_{\rho}S_{F}S_{1}}{S_{p}} = 1$$
(114)

lub

$$S_{p}S_{F}S_{W} = \frac{S_{p}\alpha S_{1}}{S_{p}\alpha S_{1}} \longrightarrow \frac{S_{p}S_{p}\alpha S_{F}S_{W}S_{1}}{S_{p}\alpha S_{1}} = 1$$
(115)

Z ostatniej založności (115) wynika np., że jeżeli znamy Sp. Sp. $S_{\rm pr}$, S $_{\rm pr}$, S}

Z koleı

$$\frac{S_p S_{W}}{S_1} = \frac{S_p S_1 \alpha}{S_p \alpha S_1} - \frac{S_p \cdot S_W \cdot S_p \alpha}{S_p \alpha S_j \alpha} = 1$$

uwzględniając, że p = $\sum_{\infty} p^{\infty}$, a stąd $S_p(p) = \sum_{\infty} S_p(p^{\infty})$ wynika, że $\frac{S_p^{\infty}}{S_p} = 1$

- 73 -

Kryteria podobieństwa do modelowania przepływów w charakterystycznych obszarach osadników kontaktowych (z równań bilansów)

Charakterystyka obszaru przepływu								
I strefa mieszania (∞= 0,1,4)	II strefa osadu zawieszonego (∝ = 0,2,3)	III strefa klarowania (cc= 0,3)						
$K_1 = \frac{t \cdot u^{\infty}}{1} = idem$	$K_1 = \frac{t \cdot u^{\infty}}{1} = idem$	$K_1 = \frac{t \cdot u^{\alpha}}{1} = idem$						
$K_2 = \frac{p^{\infty} u^{\infty}}{p \cdot W} = idem$	$K_2 = \frac{p^{\infty} \cdot u}{p \cdot W} = idem$	$K_2 = \frac{\rho^{\alpha} \cdot u^{\alpha}}{\rho \cdot W} = idem$						
$K_3 = \frac{p^{OC} \cdot u^{OC}}{p \cdot W} = idem$	$K_3 = \frac{p^{\infty} \cdot u^{\infty}}{p \cdot W} = idem$	$K_3 = \frac{p^{0.2} \cdot u^{0.2}}{p \cdot W} = 1 \text{dem}$						
$K_{\hat{q}} = \frac{W \cdot u^{OC}}{g \cdot 1} = 1 \text{dem}$	$K_4 = \frac{W \cdot u^{0C}}{g \cdot 1} = idem$	$K_4 = \frac{W \cdot u^{OC}}{g \cdot 1} = idem$						
$K_5 = \frac{p \cdot q \cdot 1}{p} = idem$	$K_5 = \frac{p \cdot g \cdot 1}{p} = idem$	$K_5 = \frac{p \cdot g \cdot l}{p} = idem$						
$K_6 = \frac{p \cdot g \cdot 1}{p^{\alpha}} \frac{w}{u^{\alpha}} =$	$K_6 = \frac{p \cdot q \cdot 1}{p^{\alpha}} \frac{W}{u^{\alpha}} =$	$K_6 = \frac{Q \cdot g \cdot 1}{p^{\infty}} \frac{W}{u^{\infty}} =$						
= idem	= idem	= idem						
$K_7 = \frac{p}{W \circ u^{\infty} \circ \rho} = idem$	$K_7 = \frac{p}{W \cdot u^{\infty} \cdot p} \approx idem$	$K_7 = \frac{p}{W \cdot u^{\infty} \cdot \rho} = idem$						
$K_8 = \frac{p}{(u^{\infty})^2} \cdot p$ = idem	$K_8 = \frac{p}{(u^{\infty})^2 \cdot p} = idem$	$K_8 = \frac{p}{(u^{\infty})^2} = 1 \text{ dem}$						
$K_9 = \frac{\rho^{\alpha_*} g \cdot 1}{\rho \cdot w^2} = idem$	$K_g = \frac{\rho^{\infty} g \cdot 1}{\rho \cdot W^2} = idem$	$K_9 = \frac{\rho^{\infty} \cdot g \cdot 1}{\rho \cdot w^2} = idem$						
$K_{10} = \frac{p^{0^*} p}{(p)^2 \cdot w^2} = idem$	$K_{10} = \frac{p^{\alpha} \cdot p}{(p)^2 \cdot w^2} = idem$	$K_{10} \frac{\mathcal{P}^{\infty} \cdot \mathbf{p}}{(\mathcal{Q})^2 \cdot \mathbf{w}^2} = idem$						
	$K_{11} = \frac{\rho^{\infty}}{t \cdot R^{\infty}} = idem$							
	$K_{12} = \frac{P^{\alpha} u^{\alpha}}{1 \cdot R^{\alpha}} = idem$							

zatem ostatnia zależność ulegnie uproszczeniu do postaci:

Zapis ten umożliwia np. wyliczenie skali strumienia danego składnika, jak np. S $_{2}$ = S $_{\rm W}$. S $_{O3}$.

Kojarwąć ze sobą poszczególne wzory od (94) do (116) (w ramach stref), sformułowano ostateczne postaci liczb kryterialnych umożliwiających modelowanie przepływów w charakterystycznych strefach osadników kontaktowych (tab. 5).

Z punktu widzenia fizyki omawiane zagadnienie przepżywu opisują: równania bilansów, równania fizyczne (związek między ciśnieniem a lepkością oraz niędzy strunieniem nasy a stężeniem – prawo Ficka) oraz warunki początkowe i brzegowe. Dotychczas analizowano bilanse i wynikające z nich kryteria podobieństwa, które są niezależne od fizycznych właściwości materiału. Z tego powodu wśród wyprowadzonych kryteriów nie ma kryterium Re, które jest konsekwencją praw przepływu płynów lepkich i powinno być tu uwzględnione, gdyż analizuje się przepływy lepkie. Oczywiście w trakcie modelowania należy korzystać z kryteriów podobieństwa wynikających zarówno z równań bilansów, jak i równań fizycznych.

3.4. Modelowanie przybliżone

Chcąc spełnić wszystkie wymagania wynikające z warunków jednoznaczności i zapewnić pełne podobieństwo modelowanych zjawisk, należałoby użyć specjalnego medium pozwalającego na osiągnięcie równości wymienionych kryteriów. Realność takiego medium jest jednak dalece wątpliwa. Nalezy zatem tak uprościć opis modelu zjawiska, aby nie naruszyć zasad pełnego modelowania, wykorzystując tżw. pozorną stabilność ruchu burzliwego i związaną z nią zdolność samomodelowania. W przypadku modelowania za pomocą czystej wody wodociągowej nie udaje się zachować równości niektórych z wymienionych kryteriów (np. równoczesnego spełnienia Re i Fr). Wynika stąd konieczność stosowania modelowania przybliżonego. Nie trudno się przekonać, że liczba Re^M w modelu jest w tym przypadku wielokrotnie mniejsza od liczby Re[†] w naturze. Zachowanie warunku podobieństwa Re = idem nie jest jednak konieczne w przypadku, kiedy wyeliminuje się zależność charakteru ruchu od liczby Re. Wówczas można skorzystać ze zdolności samomodelowania, wyrażającej się zanikiem zależności przebiegu zjawiska od kryterium określającego proces wtedy, gdy kryterium to przekracza określoną wartość [99, 129]. Zatem w modelu wystarczy utrzymać ruch cieczy w granicach intensywnej i ustabilizowanej burzliwości, zachowując podobieństwo

(116)

granicznych warunków na wejściu i wyjściu, a badania prowadzić w obszarze Re > Re_{kr}*

W przypadku osadników kontaktowych, gdzie koncentracja fazy stałej nie oddziałuje w sposób zasadniczy na warunki przepływu, wpływ udziału tej fazy jest często pomijany, a badania prowadzone są przy użyciu czystej wody.

3.5. Skale modelowania

W zagadnieniach modelowania fizykalnego można wyróżnić trzy podstawowe wielkości fizyczne, a mianowicie: długość, masę i czas. Na tej podstawie można określić trzy skale modelowania, przyporzędkowując każdemu równaniu fizykalnemu równanie wymiarowe [99, 105]. Postać takiego równania zależy od obranego układu wielkości podstawowych:

$$[x] = [m]^{L} [k_{q}]^{M} [S]^{T}$$
(117)

Stąd skala modelowania dowolnej wielkości fizycznej będzie równa:

$$S_{x} = S_{1}^{L} S_{m}^{M} S_{t}^{T}$$
(118)

Ustalenie skal modelowych dla wszystkich interesujących parametrów umożliwia przeliczenie wyników badań modelowych na warunki obiektu naturalnego. W celu obliczenia skal modelowania dla wielkości fizycznych występujących w badanym procesie konieczne jest wcześniejsze dokonanie wyboru wielkości podstawowych, których skale można przyjąć. Najczęściej wybiera się takie wielkości fizyczne, które dają się dokładnie określić lub mają prawie stałą wartość np. przyspieszenie ziemskie, a równocześnie są najbardziej charakterystyczne dla badanego zjawiska i wymiarowo niezależne. Można zatem przyjąć trzy niezależne skale: skalę liniową (S₁), skalę przyspieszenia ziemskiego (S₂) i skalę gęstości (S_p).

Skala liniowa określa stošunek wymiaru modelu do analogicznego wymiaru obiektu naturalnego:

$$S_1 = \frac{1''}{1'}$$
 (119)

Przy użyciu w modelu czystej wody wodociągowej o gęstości równej gęstości wody w obiekcie naturalnym, skala gęstości S $_{\rm p}$ = 1. Podobnie skala przy-spieszenia ziemskiego S $_{\rm q}$ = 1.

Przy tych założeniach skala masy S_m jest równa:

$$S_m = S_1^3 \cdot S_P = S_1^3$$

Natomiast skala czasów z uwzględnieniem skali przyspieszenia ziemskiego

 $s_g = \frac{s_1}{s_t^2};$

stąd

$$s_t^2 = s_1 \cdot s_g^{-1}$$

zatem

$$S_t = S_1^{0,5} \cdot S_g^{-0,5} = S_1^{0,5}$$

Na tej podstawie skalę dowolnej wielkości można opisać następującym równaniem:

$$s_x = s_1^L \cdot s_1^{3M} \cdot s_1^{1/2T} = s_1^{L+3M+0,5T}$$
 (120)

gdzie: L, M, T oznaczają wykładniki potęgowe odpowiednio przy jednostce długości, masy i czasu.

Równanie to umożliwia obliczenie skal pozostałych wielkości fizycznych wchodzących do modelowania, pod warunkiem zachowania pełnego podobieństwa. Np. skalę objętościowego natężenia przepływu i skalę prędkości można obliczyć nastepujaco:

- objętościowe natężenie przepływu, którego wymiarem jest m³/s daje:

L = 3, M = 0, T = -1, stąd skala objętości przepływu

$$S_{Q} = S_{1}^{3+0-0,5} = S_{1}^{2,5}$$

- predkość, której wymiarem jest m/s daje:

L = 1, M = 0, T = -1, stąd skala prędkości

$$S_w = S_1^{1+0-0,5} = S_1^{0,5}$$

W podobny sposób obliczono pozostałe skale modelowania wielkości fizycznych uwzględnianych przy modelowaniu przepływów w osadnikach kontaktowych (tab. 6). Skale modelowania przepływów w osadnikach kontaktowych

Lp.	wielkość modelowana	Ozna- czenie	Jen- nostka	Skale modelowania przy zachowaniu podobieństwa	
				pełnego	przybli- żonego
1	2	3	4	5	6
1	Długość	L	m	SL	SL
2	wysekość i głębokość	н	n	SL	SL
3	Powierzchnia	A	m ²	s ² L	s ²
4	Objętość	V	m ³	sL3	sL3
5	∛spółczynnik lepkości dynamicznej	'n	kg m.s	s ^{1,5}	1
6	Współczynnik lepkości kinetycznej	\$	m ² s	s ^{1,5}	1
7	Gęstość	ş	kg m ³	1	1
8	Prędkość	17	m s	_{SL} 0,5	s ^{0,5}
9	Objętościowa natężenie przepływu	Q		s ^{2,5}	s ^{2,5}
10	Czas	т	S	s ^{0,5}	s ^{0,5}
11	Wysokość ciśnienia	hp	N 2 10	SL	. s ₁
12	Współczynnik oporu	R	N m	1	1
13	Chropowatość bezwzględna ścian	k	m	SL	SL
14	Przyspieszenie ziemskie	g	<u>n</u> 2 s	1	1

3.6. Dokładność badań modelowych

W zakresie dokładności modelowania należy rozpatrzyć błędy klasycznego przybliżonego modelowania w stosunku do modelowania pełnego. Przez klasyczne modelowanie przybliżone rozumie się tutaj modelowanie fizykalne z zachowaniem warunków samomodelowania. Przy określaniu liczby Eu w modelu, błędy względne metody klasycznego modelowania przybliżonego kompensują się [113]:

$$S_{EU} = \frac{S_{\Delta p}}{S_{p} \cdot S_{w}^{2}} = \frac{S_{1}}{1 \cdot (S_{1}^{0.5})^{2}} = \frac{S_{1}}{S_{1}} = 1$$
(121)

Zatem modelowanie przybliżone nie wnosi odstępstwa do charakterystyki hydraulicznej, a otrzymane wyniki można przenieść na obiekt naturalny za pomocą skal modelowania przybliżonego.

Innego rodzaju odstępstwa są spowodwane błędami wynikającymi z niezachowania geometrycznego podobieństwa chropowatości powierzchni ścianek oraz elementów przyściennych, jak również istnienia trudności w odwzorowaniu niektórych połączeń konstrukcyjnych na skutek zastosowania uszczelek, śrub, nitów itp. Błędy wynikające z wymienionych odstępstw można ocenić przez porównanie wyników badań modelowych w stosunku do obiektów naturalnych. Ze względu na brak dostępu do tego typu urządzeń przemysłowych nie udało się określić wielkości tych odstępstw, co w rezultacie uniemożliwia określenie całkowitego błędu badań modelowych rzutujących na niepewność wyników. Błąd ten, w przypadku tego rodzaju badań, zależy od przyjętej skali liniowej, wierności geometrycznego odwzorowania konstrukcji urzędzenia i chropowatości ścianek, dokładności przyrzędów pomiarowych i zastosowanej metodyki prmiarów. Miarą tego błędu jest rozbieżność kryteriów Eu w modelu i obiekcie naturalnym.

Modelując przepływy w strefie klarowania osadników kontaktowych, mamy do czynienia z układem dwufazowym. Poczynione założenia upraszczające w odniesieniu do fazy stałej (rozdz. 4.1.2) wnoszą pewien błąd, którego wielkość jest trudna do określenia bez badań porównawczych na obiekcie naturalnym.

4. MODELOWANIE PRZEPŁYWÓW W AKCELATORACH I PULSATORACH

4.1. Metody badawcze

Metody badawcze zmierzające w kierunku modelowania przepływów w akcelatorach i pulsatorach nie różnię się zasadniczo od metod stosowanych w badaniach osadników czy komór flokulacji. Praktycznie badania modelowe ~ przedprojektowe mogę być prowadzone na stanowiskach badawczych dwóch rodzajów, tj. w kanale hydraulicznym i w przestrzennych modelach wodnych [45, 73, 78, 99, 112, 129]. Zastosowanie kanału hydraulicznego umożliwia obserwacje płaskich ruchów czynnika roboczego, co nie pozbawia je pewnego błędu wynikającego z możliwości obserwacji ruchu dwuwymiarowego. Wykorzystanie kanału hydraulicznego pozwala jednak na dokonywanie prostych, szybkich i tanich (w stosunku do badań na obiekcie w skali technicznej) zmian elementów konstrukcji modelu. Etap ten umożliwia wybór najlepszego rozwiazania wzajemnego układu poszczególnych elementów konstrukcji badanego urządzenia w celu przejścia do badań na modelu przestrzennym, gdzie można obserwować zwolniony ruch czynnika roboczego, barwiąc np. wodę odpowiednim znacznikiem oraz mierzyć predkości przepływu strug wody. Model przestrzenny wymaga jednak stosowania stałości kryterium Froude'a, co stwarza poważne przeszkody przy modelowaniu i realizacji badań. Bardzo małe prędkości przepływu występujące w akcelatorach i pulsatorach zostają w modelu zmniejszone $s_1^{0,5}$ razy. Zmniejszenie modelu utrudnia ponadto zachowanie warunku samomodelowania, tj. Re > Re_{ke}, oraz zwiększa błąd pomiaru zbyt małych prędkości przepływu wody. Wynika stąd potrzeba budowania stosunkowo dużych modeli zarówno akcelatorów, jak i pulsatorów.

Oprócz modelowania osadników kontaktowych i pionowych z uwzględnieniem prawa ciążenia, któremu odpowiada równość Fr" = Fr', stosuje się również metodę modelowania [86, 129] polegającą na odtworzeniu swobodnej powierzchni ustalonego bezciśnieniowego strumienia w postaci sztywnej granicy. Próby takiego modelowania z pominięciem prawa ciążenia, lecz zachowaniem równości Rë = Ré, przeprowadził np. Awierkijew [129]. W badaniach tych swobodna powierzchnia zwierciadła wody została zastąpiona szkłem, a kształty strumienia określono kształtem sztywnej granicy. Metoda ta umożliwia budowanie bardzo małych modeli urządzeń przy zachowaniu znacznych prędkości przepływu wody. Podstawowym utrudnieniem jest tu jednak pomiar prędkości przepływu strug wody w modelu pod ciśnieniem.

Badania prowadzone na obiektach naturalnych w warunkach eksploatacyjnych nie dają oczekiwanych efektów ze względu na wielkość urządzeń i trudności techniczne związane zarówno ze zmianą parametrów eksploatacyjnych, jak i elementów solidnej – zazwyczaj żelbetonowej lub stalowej konstrukcji. Przeciążenie tych urządzeń jest poważnym utrudnieniem w uzyskaniu zgody na okresowe ich wyłączenie lub zanieczyszczenie wody w wyniku badań.

Zarówno w przestrzennych modelach wodnych, jak i w obiektach naturalnych do oceny efektu hydraulicznego przyjętych rozwiązań stosuje się pomiar rzeczywistego czasu przepływu wody, który w porównaniu z czasem teoretycznym umożliwia obliczenie tzw. sprawności hydraulicznej urządzenia, która jest miarą wykorzystania jego czynnej objętości 31, 59, 60, 71, 73, 104, 108]. W badaniach tych używa się znaczników w postaci barwników soli nieorganicznych i izotopów promieniotwórczych [17, 31, 59, 60, 71. 73, 85, 88, 133, 140 . Dodany na dopływie do badanego urządzenia znacznik nie może zmieniać warunków hydrodynamicznych przepływu, jak również nie może ulegać stopniowemu zanikowi na skutek zachodzących reakcji chemicznych, działania światła, sorpoji, sedymentacji czy utleniania. Stosowany znacznik musi być ponadto łatwo rozpuszczalny w wodzie, tani, możliwie prosty do wykrycia przy niedużych stężeniach w odpływie, bezpieczny w uzvciu, a przede wszystkim nie może wpływać ujemnie na jakość wody (w przypadku badań na obiektach naturalnych) i zdrowie ludzi wykonujących oznaczenia. Dużą dokładność oznaczeń zapewnia metoda polegająca na zastosowaniu izotopów promieniotwórczych. Sposób ten jednak, aczkolwiek bardze interesujący, wymaga dysponowania oupowiednią aparaturą pomiarową i przeszkolonym w tym kierunku personelem. Oprócz izotopów promieniotwórczych w badaniach hydraulicznych eksploatowanych urząd≵eń do oczyszczania wod∨ stosowany jest jako znacznik jon litu [17]. Zastosowanie go ma te zalete, że mała ilość wprowadzonego odczynnika może być szybko i łatwo oznaczona, gdyż wody naturalne nie zawierają jego związków. Jon litu nie wykazuje właściwości sorpcyjnych, nie powoduje zasadniczych zmian ciężaru właściwego, jak również nie jest szkodliwy dla zdrowia. Zalety te świadczą o jego dużej przydatności w badaniach hydraulicznych pracujących urządzen do oczyszczania wody. Oprócz izotopów promieniotwórczych i soli litu, szczególnie przydatne w tego rodzaju badaniach okazały się znaczniki fluorescencyjne [60, 85]. Znaczniki te cachuje dobra rozpuszczalność, niski koszt, ogólna dostępność, wystarczająca stabilność, znikoma dyfuzja, intensywna barwa oraz łatwość oznaczeń. Zestosowanie barwnych znaczników umożliwia obserwację poszczególnych strug wody oraz wstępne określenie ich drogi i kierunku. Zaleta ta ma dodatkowe istotne znaczenie w przypadku prowadzenia badań modelowych z koniecznością wizualnej analizy zachodzących zjawisk.

Omówienie metod dawkowania znacznika w badaniach urządzeń do oczyszczenia wody lub ścieków oraz sposobów obliczania czasu przepływu pominięto ze względu na szerokie naświetlenie tego zagadnienia w literaturze [17, 31, 59, 60, 104, 132]. Oprócz możliwości określania sprawności hydraulicznej w modelach przestrzennych i w obiektach naturalnych, stosowany jest pomiar gradientu prędkości mieszania oraz pomiar prędkości przepływu wody w charakterystycznych przekrojach. umożliwiający np. obliczanie współczynnika nierównomierności rozkładu prędkości [75, 90].

4.1.1. Analiza dotychczasowych metod badawczych

Metody badawcze nad modelowaniem przepływów w akcelatorach i pulsatorach dotyczę w większości przypadków poznania i ulepszania istniejących konstrukcji tych urzędzeń w celu zapewnienia optymalnych warunków hydraulicznych przepływu wody. Dostarczają one niezbędnych informacji do projektowania i eksploatacji tych urzędzeń. Większość badań dotyczy materiału jakościowego obejmującego warunki przepływu wody w urzędzeniu z wykorzystaniem techniki wizualizacji przepływu. Inne pośrednie metody umożliwiaję obliczanie sprawności hydraulicznej, współczynnika nierównomierności rozkładu prędkości, gradientu prędkości mieszania itp. Wszystkie te metody sę przydatne, wzajemnie uzupełniające się i pozwalaję w dostateczny sposób opisać hydraulicznę stronę pracy urządzenia.

Dotychczasowe metody badań uniemożliwiają jednak wyznaczanie składowych prędkości cząstek wody oraz fazy stałej i prędkości wypadkowych, jak również modelowania ruchu częstek na tle wcześniej rozpoznanego przepływu wody.

4.1.2. Eksperymentalno-matematyczna metoda badań

W celu zmniejszenia ilości cząstek kłaczkowatych wynoszonych do odpływu z osadników kontaktowych konieczna okazała się dokładna znajomość rozkładu prędkości cząstek wody w strefie klarowania, by na tle znanego z ekaperymentų pola predkości można było dokonać opisu matematycznego ruchu kłaczków. Wprowadzono więc dotychczas nie stosowaną w badaniach osadników kontaktowych metodę badawczą (rozdz. 4.2) z wykorzystaniem anemometru laserowego do pomieru rozkładu prędkości cząstek wody w fizykalnym dwuwymiarowym modelu pulsatora. Umożliwiło to rozwiązanie równań ruchu układu 2fazowego za pomocą metody numerycznej oraz ETO poprzez poczynienie pewnych uproszczeń, np.: że w układzie woda - cząstka kłaczkowata nie zachodzą zmiany w fazach, zwłaszcza zmiany stężenia i rozdrobnienia fazy stałej, a kłaczki mają określona średnicę i gęstość. Ponadto założono, że ruch kłaczków nie wpływe na zmianę profilu przepływu czystej wody. a charakter opływu cząstek kłaczkowatych przez cząstki wody będzie laminarny lub przejściowy (rozdz. 1.4), częstki kłaczkowate będą równomiernie odrywane od powierzchni warstwy zawieszonego osadu, a wektór prędkości nie będzie pulsował. Przyjęto zatem, że rozpatruje się ruch pojedynczych cząstek w ośrodku wodnym. Potrzebny do obliczeń matematycznych rozkład prędkości cząstek wody w strefie klarowania otrzymano z pomiarów anemometrem laserowym w "plastrowym" modelu pulsatora.

- 82 -

Powyższe założenia znajdują uzasadnienie w literaturze przedmiotu zarówno w badaniach empirycznych, jak i pracach teoretycznych [28, 33, 87, 106, 119], tym bardziej że badania dotyczą strefy klarowania, dla której można założyć, że na skutek starzenia się w miarę upływu czasu, od warstwy osadu zawieszonego odrywają się jedynie kłaczki nie podlegające powtórnej aglomeracji, a ich średni rozmiar i gęstość pozostaję stałe.

Dla przyjętych założeń równanie dynamiki fazy stałej uwzględniając siłę oporu hydrodynamicznego oraz oddziaływanie zewnętrznych sił objętościowych ma postać:

$$\frac{\pi d_z^3}{6} \rho_z \frac{d \bar{\nabla}_z}{dt} = 3\pi \mu_L d_z (\bar{\nabla}_L - \bar{\nabla}_z) + \bar{f}_B \qquad (122)$$

Równanie to dla jednostkowej masy fazy stałej przyjmuje postać:

$$\frac{d\bar{v}_z}{dt} = \frac{18\mu_L}{\rho_z d_z^2} \left(\bar{v}_L - \bar{v}_z \right) + \bar{f}_B$$
(123)

Siła oporu hydrodynamicznego występująca w powyższym równaniu opisana jest wzorem Stokesa, stęd równanie jest słuszne dla laminarnego charakteru opływu częstki stałej.

Zatem możemy zapisać, że:

$$3\pi_{\ell}\mu_{L}d_{z}(\bar{v}_{L}-\bar{v}_{z}) = \frac{24}{Re_{z}}\frac{1}{2}\rho_{z}A_{z}(\bar{v}_{L}-\bar{v}_{z})\left|\bar{v}_{L}-\bar{v}_{z}\right|$$
(124)

gdzie:

$$\operatorname{Re}_{z} = \frac{(\overline{v}_{L} - \overline{v}_{z})d_{z}\rho_{L}}{\mathcal{U}_{1}} \quad \text{i} \quad \operatorname{A}_{z} = \frac{1}{4} \, \pi \, d_{z}^{2}$$

zaś współczynnik oporu czołowego

$$\lambda = \frac{24}{\text{Re}_z}$$

Wzór ten obowiązuje dla opływu laminarnego, tzn. gdy Re_z < 2. Dla przypadku, gdy Re_z < 1000, a więc dla charakteru przejściowego opływu, można zastosować współczynnik oporu wyrażony następująco [119]:

$$\lambda = \frac{24}{Re_z} k$$

gdzie:

- 83 -

Równanie dynamiki fazy stałej ma więc postać:

$$\frac{d\bar{v}_z}{dt} = \frac{18\mu_L}{\rho_z d_z^2} k(\bar{v}_L - \bar{v}_z) + \bar{t}_B$$
(125)

Oznaczając

$$\frac{\rho_z d_z^2}{18 \mu_k} = 2$$

posiadające wymiar czasu i fizykalnie interpretowane jako charakterystyczny czas przesunięcia cząstki, równanie ruchu można zapisać jako:

$$\frac{d\overline{v}_z}{dt} + \frac{1}{\widetilde{c}}\overline{v}_z - (\frac{1}{\widetilde{c}}\overline{v}_L + \overline{f}_B) = 0$$
(126)

Powyższe równanie wektorowe jest równoważne dwom równaniom skalarowym:

$$\frac{d V_{zx}}{dt} = \frac{1}{\mathcal{E}} (V_{zx} - V_{Lx}) - g$$

$$\frac{d V_{zy}}{dt} = \frac{1}{\mathcal{E}} (V_{zy} - V_{Ly})$$
(127)

Rozwiązanie tego układu równań możliwe jest pod warunkiem znajomości pola prędkości cieczy \bar{V}_L . Badania modelowe, podczas których dokonano pomiarów prędkości anemometrem laserowym, dostarczyły informacji o składowych pionowych (w kierunku osi x) prędkości przepływu cieczy. Składowe poziome można obliczyć za pomocą równania ciągłości przepływu:

$$d_{i}v \cdot \bar{V}_{L} = 0 \tag{128}$$

Łatwo zauważyć, że układ równań ruchu fazy stałej (127) ma rozwiązanie analityczne. Jest to wygodne z punktu widzenia obliczeń numerycznych, ponieważ unikamy podwójnego całkowania numerycznego, które to operacje zawsze wnosza pewien błąd.

Kolejne całkowania prowadzę do następujących wzorów na składowe prędkości oraz trajektorię cząstek fazy stałej.

$$V_{ZX} = V_{ZX_0} \exp\left(-\frac{t}{\tilde{c}}\right) + \left(V_{LX} + g\right)\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tilde{c}}\right)\right)$$
$$V_{ZY} = V_{ZY_0} \exp\left(-\frac{t}{\tilde{c}}\right) + V_{LY}(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tilde{c}}\right))$$

(129)

$$x_{z} = \tilde{c}(V_{zx_{0}} - V_{Lx} - \tilde{c}_{g})(1 - \exp(-(\frac{t}{\tilde{c}})) + (V_{Lx} + \tilde{c}_{g})t + x_{z_{0}}$$

$$y_{z} = \tilde{c}(V_{zy_{0}} - V_{Ly})(1 - \exp(-(\frac{t}{\tilde{c}})) + V_{Ly}t + y_{z_{0}}$$

$$(130)$$

gdzie:

Vzx₀ V v - wartości początkowe składowych prędkości fazy stałej, xz₀ Y v - wartości początkowe trajektorii fazy stałej.

Pomiary prędkości częstek cieczy dostarczyły informacji o rozkładzie składowych prędkości w węzłach przyjętej siatki pomiarowej. Dokonując liniowej interpolacji tych składowych w czterech sęsiednich węzłach uzyskano wartość prędkości przyjętę jako stałą w danej komórce siatki.

Procedura numerycznego poszukiwania trajektorii cząstek fazy stałej przebiegała wg schematu:

$$\begin{array}{c} x_{i+1} = x_i + \Delta x \\ y_{i+1} = y_i + \Delta y \end{array}$$
 (131)

gdzie:

$$\Delta x = \vec{v} (V_{ZX_0} - V_{LX} - \vec{v}_g)(1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\vec{v}})) + (V_{LX} + \vec{v}_g) \Delta t$$

$$\Delta y = \vec{v} (V_{ZY_0} - V_{LY})(1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\vec{v}})) + V_{LY} \Delta t$$
(132)

Oznacza to przyjęcie założenia, że równania ruchu cząstki oraz ich całki obowiązują jedynie w pewnym małym przedziałe czasu $\triangle t$, mniejszym niż czas przepływu cząstki przez komórkę kontrolną. Dla kolejnych kroków iteracyjnych zmieniano wartości początkowe V_{zx_0} i V_{zy_0} , biorąc obliczone w poprzednim kroku wartości V_{zx} i V_{zy^*} Obliczenia trajektorii prowadzone były do momentu, kiedy cząstka osiągała kontur obliczeniowy wyznaczony przez skrajne punkty siatki pomiarowej.

4.2. Program badań

Zasadniczym praktycznym zadaniem podjętych badań było poznanie i ulepszenie konstrukcji akcelatorów i pulsatorów dla ograniczenia do minimum ilości cząstek kłaczkowatych wynoszonych do odpływu. Zasadność tego zagadnienia wynika z możliwości stosowania obliczeniowych obciążeń hydraulicznych osadników kontaktowych, a ograniczenie ilości zawiesin wynoszonych do odpływu zmniejsza obciążenie filtrów oraz ilość wody zużywanej do ich płukania przy wydłużonym filtrocyklu. Zagadnienia tego nie można rozwiązać na drodze obliczeniowej, lecz poprzez odpowiednio zaplanowane i zrealizowane badania.

Przyczyny nadmiernego wynoszenia cząstek kłaczkowatych do odpływu mogą być natury hydraulicznej i technologicznej. Hydrauliczne, to np.: niewyrównany profil prędkości wznoszenia wody w strefie klarowania (wady projektowe, wykonawcze i eksploatacyjne) oraz nadmierna zmienność obciążenia hydraulicznego (rozdz. 2.2), zaś technologiczne - to najczęściej niewłaściwie ustalony proces technologiczny w stosunku do składu wody surowej, zwłaszcza zaś do jej temperatury. Optymalne hydraulicznie warunki przepływu wody w strefie klarowania, tj. wyrównany profil prędkości wznoszenia wody w wyniku prawidłowo zaprojektowanego, wykonanego i eksploatowanego systemu doprowadzenia i odbioru wody przy właściwie prowadzonej technoloqii procesu jej uzdatniania, ograniczeją ilość drobnych cząstek kłaczkowatych wynoszonych do odpływu. Problem ten szczególnie uwidacznia się w pulsatorach, gdzie zbyt długie przewody drenażu rurowego dolnego nie gwarantuja równomiernego rozdziału wody w dopływie do strefy osadu zawieszonego. Obszary o zmniejszonym wydatku powodują z czasem miejscowe zamulanie i powstawanie stref martwych oraz wzrost prędkości wznoszenia wody w innych miejscach, a przez to nadmierną ucieczkę cząstek kłaczkowatych do odpływu (rozdz, 2,2 i 2,3). Również system odbioru wody z strefy klarowania ma wpływ na unoszenie drobnych czastek do odpływu.

Badaniami modelowymi objęto zarówno akcelatory, jak i pulsatory, skupiając się szczególnie nad wpływem konstrukcji dopływu i odbioru wody względem strefy klarowania i osadu zawieszonego na warunki przepływu wody (rozdz. 4.4.1, 4.4.2 i 4.4.3).

Badania modelowe akcelatora dotyczyły wpływu prędkości dopływu wody do strefy sedymentacji, krotności recyrkulacji i prędkości wznoszenia wody w strefie klarowania na sprawność hydrauliczną. Dokonano również pomiarów prędkości wznoszenia wody w strefie klarowania w celu obliczenia współczynnika nierównomierności rozkładu prędkości.

Badania modelowe pulsatora podzielono na dwa etapy. Na pierwszym etapie przeprowadzono badania jakościowe na modelach płaskich, obserwując wpływ konstrukcji drenażu dolnego, kształtu zewnętrznego kieszeni osadowych i sposobu odbioru wody na równomierność przepływu strug wody w strefie klarowania i osadu zawieszonego w warunkach przepływu stałego i puleacji. Na drugim etapie przeprowadzono matematyczną analizę ruchu częstek o założonych średnicach na tle uzyskanego z eksperymentu pola prędkości strug wody, otrzymanego z pomiarów anemometrem laserowym. Przyrządu tego użyto również do pomiaru składowej pionowej prędkości w celu obliczenia wapółczynnika nierównomierności rozkładu prędkości w strefie klarowania (rozdz. 4.4.4).

Badania przeprowadzono na wycinku pulsatora, tzw. modelu plastrowym, skupiając się głównie na strefie klarowania. Częstość siatki pomiarowej uzyskano z badań wstępnych współczynników nierównomierności rozkładu prędkości. Ustalono rozstaw punktów pomiarowych w modelu co 5 mm w pięciu poziomach, tj.: 5, 25, 45, 75 i 105 mm nad komorą osadową (rys. 13). Tory cząstek kłaczkowatych obliczono dla zmierzonego pola prędkości cząstek wody i spotykanych w praktyce średnic kłaczków, tj.: 10 µm, 30 µm, 500 µm i 3 mm oraz prędkości pulsacji: 0,5 mm/s, 1 mm/s, 3 mm/s i 10 mm/s. Przyjęty zakres średnic i prędkości wystarczająco dokładnie symuluje zjawisko odrywania się pojedynczych cząstek kłaczkowatych od powierzchni warstwy zawieszonego osadu. Kąt wyrzutu częstek w fazie pulsacji z górnej powierzchni warstwy zawieszonego osadu, jako najbardziej sprzyjający ich wynoszeniu do odpływu, założono 90⁰. zaś gęstość cząstek 1004,0 kg/m³ i 1030,0 kg/m³.



Rys. 13. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na tle schematu konstrukcyjnego przekroju pulsatora

Fig. 13. Distribution of measuring points against a background of structural scheme of pulsator's section

4.3. Stanowiska doświadczalne

4.3.1. Stanowisko do badań modelowych akcelatora

Model akcelatora zaprojektowano według zasad podobieństwa geometrycznego (rozdz. 3) przyjmując skalę modelową zmniejszenia wymiarów liniowych S₁ = 0,4. Badania prowadzono na czystej wodzie wodociągowej bez modelowania zawiesiny. Dopływ wody do modelu odbywał się poprzez zbiornik wyrównawczo-odpowietrzający 4, zawór 6 i rotametr 7 (rys. 14). Badania prowadzono w obszarze liczb Re > Re_{kr}, a granicę samomodelowania, powyżej której zależność Eu = f(Re) przyjmuje wartość stałą, wyznaczono doświadczalnie (Re_{tr} = 2100). Ograniczona ilość wody w miejscu prowadzenia badań (max. 0,5 l/s) przesądziła o wykonaniu wycinka modelu, odpowiadajacego w rzucie poziomym 1/4 powierzchni przekroju akcelatora. W celu umożliwienia pełnej obserwacji przebiegu strug wody w okresie badań, ściany zewnętrzne modelu wykonano ze szkła organicznego (rys. 15). W miejsce klasycznej pompy o osi pionowej umieszczonej symetrycznie wewnątrz akcelatora, zastosowano pompę recyrkulacyjną znajdującą się na zewnątrz modelu. Woda pod stałym ciśnieniem doprowadzana była do komory reakcji (rys. 14). gdzie również kierowano całą objętość wody recyrkulacyjnej za pomocą pompy 10. Regulacji natężenia przepływu wody recyrkulowanej dokonywano według zamierzonych przepływów obliczeniowych zeworem 12, w zależności od wskazań telerotametrów 13. Prędkość dopływu wody do strefy sedymentacji regulowano w zależności od planowanych parametrów pracy modelu za pomocą ruchomej blaszanej przegrody sprzężonej z prętami niwelacyjnymi. Powierzchnię czynną szczeliny ustalono metoda obliczeniowa w zależności od natężenia przepływu wody oraz interesującego zakresu prędkości. Obliczeniową prędkość dopływu wody do strefy sedymentacji sprawdzano za pomocą czujnika prędkościomierza termistorowego i korygowano w zależności od jego wskazań.

Do pomiaru prędkości wznoszenia wody w strefie sdeymentacji użyto czujników prędkościomierza termistorowego typu TPW-III.

Przy pomiarach rzeczywistego czasu przepływu wody w badanym modelu akcelatora posłużono się roztworem rodaminy B, który był dawkowany w sposób ciągły za pomocą pompy dozującej 16 do środkowej strefy komory reakcji. Metoda ta umożliwia otrzymanie wykresu stałej fali przepływu i w sposób pośredni pozwalała obliczyć sprawność hydrauliczną urządzenia.

4.3.2. Stanowisko do badań modelowych pulsatora

Etap pierwszy badań modelowych pulsatora został przeprowadzony w kanale hydraulicznym (rys. 16), którego część pomiarowa miała długość 2500 mm i szerokość 500 mm. Głębokość części pomiarowej oraz prędkość przepływu były regulowane. Nad częścią pomiarową wanny zamocowano aparat fotograficzny umożliwiający rejestrowanie poszczególnych faz przepływu strug wody. Jako wskaźnika użyto proszku refleksyjnego (pyłu aluminiowego), który



Rys. 14. Schemat instalacji pomiarowej do badań modelowych akcelatora Fig. 14. Scheme of measuring system for model testings of accelerator

68



Rys. 15. Stanowisko doświadczalne do badań modelowych akcelatora Fig. 15. Test stand for accelerator model testings



Rys. 16. Stanowisko doświadczalne do modelowania przepływów w kanale hydraulicznym Fig. 16. Test stand for flow modelling in hydraulic channel

umożliwiał dobrą obserwację zachowania się strug wody w badanej płaszczyźnie oraz ich fotografowanie. W badaniach przestrzegano zachowania jednakowego czasu naświetlania oraz identycznej grubości ziaren pyłu aluminiowego. Stanowisko to umożliwiało obserwacje ruchu wody w układzie dwuwymiarowym.

Na drugim etapie badań zastosowano jedną z najnowszych metod określania prędkości przepływu cieczy i gazów, wykorzystującą zmimę częstotliwości światła rozproszonego na poruszających się częstkach, tj. anemometrią laserową (dopplerowską). Działanie anemometru laserowego zależy w dużym stopniu od zdolności rozpraszania światła przez częsteczki posiewu wprowadzane do badanego przepływu. Wynika stąd, że mierzy on nie prędkość przepływającego ośrodka, lecz częstek posiewu. Zatem prędkości częstek posiewu i płynu powinny być jednakowe. Częstki te powinny mieć na tyle małe rozmiary, aby nadążały za zmianami prędkości ośrodka, lecz nie za małe, aby uzyskać odpowiednie natężenie światła rozproszonego. Zaleca się, aby w przypadku posiewu z częstek ciekłych ich średnice nie przekraczały 50 jum [109].

Badania przeprowadzono przy użyciu anemometru laserowego typu DISA 55-L LDA na stanowisku doświadczalnym przedstawionym na rys. 17. Model wycinkowy pulsatora 9 zasilany był wodą wodociągową przewodem 1 poprzez zbiornik wyrównawczo-odpowietrzający 2 z przelewem 3, zawór regulacyjny 7 i rotametr 8. Na wypływie ze zbiornika 2 do przewodu 6 dozowany był roztwór mleka spożywczego za pomocą pompy dozującej 4 zasilanej z naczynia 5.



- 1 doprowadzenie wody
- 2 zbiornik wyrównawczo-odpowietrzający
- 3 przelew
- 4 pompa dozująca
- 5 naczynie z posiewem
- 6 przewód zasilajacy
- 7 zawor regulacyjny
- 8 rotametr
- 9 badany wycinek pulsatora
- 10 ramka
- 11 śruba regulacyjna
- 12 anemometr laserowy /układ optyczny z fotopowielaczem/
- 13 urządzenie kontrolno-pomiarowe 14 stół
- 15 odprowadzenie wody

Rys. 17. Schemat stanowiska doświadczalnego do badań modelowych pulsatora za pomoca anemometru laserowego

Fig. 17. Scheme of test stand for pulsator model testings by means of laser anemometer

Zamocowanie modelu do ramy 10 poprzez śrubę regulacyjną 11 umożliwiało zmianę jego położenia w kierunku pionowym. Anemometr laserowy 12 spoczywający na stole 14 wyposażony był w koordynator X-Y, umożliwiający przemieszczanie całego zestawu optyki w płaszczyźnie poziomej w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach.

Model pulsatora wykonano w skali 1:20 jako wycinkowy – plastrowy (dwuwymiarowy) o grubości 20 mm. W celu umożliwienia bezpośrednich obserwacji przepływu strug wody w modelu oraz uniknięcia rozproszenia wiązki promieni laserowych, ścianę przednią i tylną plastra wykonano ze szkła, zaś ściany boczne i inne elementy konstrukcyjne ze stali i mosiądzu (rys. 18).



Rys. 18. Model pulsatora do badań przepływów za pomocą anemometru laserowego

Fig. 18. Pulsator's model for flow testings by means of laser anemometer Pozostałe wymiary plastra, tj. jego długość wynosiła 300 mm, zaś wysokość 275 mm. Przyjęta grubość modelu 20 mm, właściwa ze względu na możliwości pomiarowe anemometru laserowego [100, 112], odpowiada w rzeczywistości szerokości 40 cm. Jest to wycinek przestrzenny fragmentu plastra. W celu uniknięcia ujemnego oddziaływania chropowatości ścian modelu na przepływ strug wody, układ optyczny anemometru laserowego ustawiono tak, aby przecięcie wiązki promieni nastąpiło w połowie grubości plastra.

Rozwiązanie to było możliwe do przyjęcia, ponieważ wpływ chropowatości ścian osadników kontaktowych na warunki hydrodynamiczne przepływu jest znikomy ze względu na małe prędkości wznoszenia strug wody i obniżone tarcie przyścienne w porów-

naniu z innymi siłami. Jednakże ze względu na to, że prędkości w modelu są większe niż w obiekcie naturalnym, a poprzeczny gradient prędkości jest dużo większy i warstwa przyścienna cieńsza – chropowatość ścianek modelu powinna być mniejsza niż w prototypie. Stąd też zastosowanie ścianek szklanych o dużej gładkości materiału spełnia wymagania tego rodzaju badań.

Laser wraz z układem optycznym, fotopowielaczem i zestawem urządzeń kontrolno-pomiarowych, służących do przetwarzania sygnału dopplerowskiego i odczytu, przedstawiono na rys. 19.



Rys. 19. Stanowisko doświadczalne do badań przepływów za pomocą anemometru laserowego Fig. 19. Test stand for flow testings by means of laser anemometer

4.4. Wyniki badań własnych i ich dyskusja

4.4.1. Modelowanie strug wody w strefie sedymentacji akcelatora

Badania przeprowadzono w przedziale prędkości rzeczywistych dopływu wody do strefy sedymentacji w zakresie $W_d = 79-790$ mm/s, prędkości wznoszenia $W_w = 0,46-1,83$ mm/s i krotności cyrkulacji k_r = 1 - 5 [72,74, 80, 138]. Dokonano pomiarów sprawności hydraulicznej i prędkości wznoszenia wody w strefie sedymentacji (w 5 poziomach w celu wyznaczenia współczynników nierównomierności rozkładu prędkości). Ponadto oprócz obserwacji przebiegu strug barwionej wody, wykonano wiele charakterystycznych fotografii.

Przeprowadzone badania modelowe nad rozdziałem strug wody w strefie sedymentacji wykazały, że woda wypływając z komory reakcji do komory sedymentacji powoduje prawie równoległy przebieg strug w stosunku do stożkowej części komory mieszania. Strugi te uderzając o zewnętrzną, stożkową powierzchnię akcelatora ulegają nieuporządkowanemu rozdzieleniu na dwie części - recyrkulowaną i unoszoną w kierunku koryt zbiorczych. W konsekwencji takiego rozdziału strug część wody unoszona w kierunku koryt zbiorczych przemieszcza się ze znaczną prędkością (w stosunku do wody znajdującej się w komorze sedymentacji) wzdłuż ścian zewnętrznych w formie rozszerzającego się wachlarza w stronę osi urządzenia. Następnie część strug wachlarza przyjmuje postać pierścienia skierowanego w dół, zaś pozostałe wypełniają komorę sedymentacji w postaci wirów. Wielkość niepożądanych zaburzeń w komorze sedymentacji wzrastała w miarę zwiększania krotności recyrkulacji wody i prędkości dopływu do strefy sedymentacji. Brak równomierności w przepływie wody w strefie sedymentacji wpływał ujemnie na sprawność hydraulicznę całego urządzenia.

Zasadę rozwiązania oparto na rozdzieleniu w komorze sedymentacji części wody recyrkulowanej od części unoszonej w kierunku koryt zbiorczych, mając na uwadze: skuteczność działania, prostotę konstrukcji, łatwość wykonania i zamontowania. Techniczną realizację rozwiązania przeprowadzono drogą kolejnych prób, wprowadzając kilka różnych konstrukcji ekranów kierująco-rozdzielających strugi wody w strefie sedymentacji, dokonując niezbędnych pomiarów porównawczych i obserwacji. Narzucone wymagania spełnił ekran oznaczony symbolem "K" (rys. 20). Dla przykładu załaczono fotogra-



OZNACZENIA:

a,,Q₂,b₄, b₂-wysokości szczelin A₁, A₂-powierzchnia przekroju Krekran kierująco rozdzielający W₁, W₂-prędkości przepływu

Rys. 20. Kształt i położenie ekranu kierująco-rozdzielającego Fig. 20. Shape and position of controlling-distributing screen

fie przedstawiające rozdział strug wody w strefie sedymentacji, prezentując stan istniejący badanego urządzenia oraz przy zastosowaniu ekranu "K". Zarówno fotografię "a" jak i "b" wykonano po tym samym czasie (rys. 21). Załączone fotografie dotyczą przypadku najbardziej niekorzystnych warunków pracy, bowiem zarówno duża prędkość dopływu wody do strefy sedymentacji, jak również duża krotność recyrkulacji są czynnikami, które obniżają sprawność hydrauliczną. Porównując zachowanie się strug wody na załączonych fotografiach (rys. 21), zauważa się duże opóźnienie w szybkości rozprzestrzeniania barwnika w obecności ekranu "K". Wynika to z faktu znacznego wyhamowania energii dopływającej wody do strefy sedymentacji i jej rozdziału na część recyrkulowaną i część unoszoną w kierunku koryt zbiorczych.

Przeprowadzone pomiary sprawności hydraulicznej, prędkości wznoszenia w strefie sedymentacji, łącznie z bezpośrednimi obserwacjami przebiegu strug barwionej wody, dostarczyły niezbędnych danych do charakterystyki hydraulicznej badanego urządzenia. Badania wykazały, że dla przyjętej konstrukcji akcelatora w analizowanym zakresie prędkości wznoszenia, pręd-



Rys. 21. Przemieszczania się strug barwionej wody w strefie sedymentacji po jednakowym czasie a - dla stanu istniejącego; b - przy zastosowaniu ekranu Fig. 21. Displacements of coloured water streams in sedimentation zone after equal time

a - for the present state; b - with application of a screen

kości dopływu wody do strefy sedymentacji i krotności recyrkulacji istnieje możliwość otrzymania $v_h = 45-79\%$. Sprawność ta obniża się w miarę zwiększania prędkości dopływu wody do strefy sedymentacji i krotności recyrkulacji. Zastosowanie ekranu kierująco-rozdzielającego sprzyja podwyższeniu sprawności hydraulicznej tego urządzenia w całym przedziale badanych prędkości i krotności recyrkulacji i w tych samych warunkach pozwala uzyskać $v_h = 69-94\%$. Obecność ekranu wykazała również znaczne obniżenie współczynnika nierównomierności rozkładu prędkości.

4.4.2. Modelowanie kształtu komór osadowych pulsatora

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu kształtu zewnętrznego komór osadowych pulsatora na rozdział strug wody w strefie klarowania i osadu zawieszonego w zależności od sposobu odbioru wody w warunkach przepływu stałego, pulsacji i spustu osadu.

Badaniami objęto dwa typy komór osadowych

o ściankach zewnętrznych prostych i nachylonych u podstewy pod kętem
 S = 60, 70, 80 i 90 stopni (rys. 22),



a – ściana prosta b – ściana łamana «,β– kąty nachylenia ścian.

Rys. 22. Kształt badanych komór osadowych Fig. 22. Shape of the examined sedimentation chambers - o ściankach zewnętrznych łamanych w połowie wysokości pod kątem β = 45, 60 i 80 stopni (rys. 22).

Wpływ kształtu zewnętrznego komór osadowych na rozdział strug wody w strefie klarowania i osadu zawieszonego badano dla trzech różnych odbiorów wody względem komór osadowych (rys. 23):



1 przelew krawądziowy/zewnętrzny/ 2- - " - /wewnętrzny/ 3- --- Thomsona /poprzeczny/

- Rys. 23. Schematyczny przekrój poprzeczny badanego pulsatora
- Fig. 23. Schematic cross-section of the examined pulsator

- przelewu krawędziowego (zewnętrznego),
- przelewu krawędziowego (wewnętrznego),
- przelewu Thomsona (poprzecznego).

Badania prowadzono w warunkach przepływu stałego i w okresie pulsacji oraz przy opróżnianiu komór osadowych, wykorzystując do tego celu kanał hydrauliczny, w którym wymodelowano wycinek pulsatora. Do badań wykorzystano czystą wodę wodociągową bez modelowania zawiesiny. Wszystkie obserwacje przepływu przeprowadzono na wycinku pulsatora wykonanym w skali 1:4, przy prędkości

przepływu wody pozwalającej na utrzymanie $Re > Re_{kr}$ (Re = 8900 = 13800).

Zastosowanie kanału hydraulicznego umożliwiło dokonywanie prostych, szybkich i tanich (w stosunku do badań na obiekcie technicznym) zmian kształtu badanych komór osadowych przy różnych sposobach odbioru wody. Wadą tego rodzaju badań była jednak możliwość obserwacji tylko dwuwymiarowego ruchu czynnika roboczego. Jako wskażnika użyto proszku refleksyjnego (pyłu aluminiowego), który umożliwiał dobrą obserwację zachowania się strug wody w badanej płaszczyźnie oraz fotografowanie poszczególnych faz przepływu. Dla przykładu zamieszczono fotografie (rys. 24) odzwierciedlajęce warunki przepływu wody w badanej płaszczyźnie pulsatora.

Za podstawę do interpretacji zachowania się strug wody w strefie klarowania i w strefie osadu zawieszonego przyjęto możliwie najbardziej wyrównany wizualnie przepływ, gwarantujący największę stabilność hydrauliczną urządzenia. Kryterium to posłużyło do oceny wpływu kształtu komór osadowych na warunki przepływu wody w badanej części pulsatora przez określenie procentu powierzchni pól martwych i wirów. W badanych przypadkach powierzchnia tych pól stanowiła sumę powierzchni części martwej i wirów powstałych wskutek nakierowania wody przez ściankę komory osadowej oraz w wyniku odbioru wody.



Rys. 24. Przykład modelowania przepływu wody w pulsatorze za pomocą kanału hydraulicznego

Fig. 24. Example of water flow modelling in the gulsator by means of hydraulic channel



Rys. 25. Wpływ kąta nachylenia ściany prostej komory osadowej na wielkość pól martwych i wirów powstających w strefie klarowania i osadu zawieszonego w warunkach przepływu stałego

Fig. 25. Influence of angle of inclimation of sedimentation chamber straight wall on dead fields' magnitude and vortices occurring in clarifying zone and suspended settling in conditions of permanent flow Do rejestracji zjawisk zachodzęcych w czasie przepływu wody w badanym przekroju pulsatora wykorzystano technikę fotograficzną. Na podstawie wykonanych w trakcie badań zdjęć fotograficznych określono procentowy udział pól martwych i wirów w zależności od kąta nachylenia ściany komory osadowej (rys. 25).

Z analizy przebiegu otrzymanych krzywych wynika, że w przypadku ściany prostej komory osadowej najbardziej niekorzystne warunki przepływu występuję przy zastosowaniu przelewu krawędziowego (wewnętrznego). Wielkość pól martwych i wirów waha się w tym przypadku w granicach 30-38% i rośnie w miarę zmniejszania kęta nachylenia ściany komory osadowej. Z przebiegu tej krzywej wynika, że kęt nachylenia ściany zewnętrznej komory osadowej ma mniejsze znaczenie, a decydujący jest sposób odbioru wody. Najlepsze warunki przepływu zapewnia odbiór poprzeczny, który przy tych samych kętach nachylenia ściany komory osadowej pozwala na uzyskanie największej stabilności (udział pól martwych i wirów oszacowano na około 12-21%). Przelew krawędziowy (zewnętrzny), jak wynika z rys. 25, daje w tych samych warunkach wartości pośrednie (13-34% to pola martwe i wiry). Duże nachylenie krzywej przy tego rodzaju przelewie świadczy o znacznym wpływie kształtu, a przede wszystkim kęta nachylenia ściany komory osadowej na warunki przepływu wody. Powyższe wyniki otrzymano w okresie przepływu stałego.

Porównując komorę osadową o ściankach łamanych z komorę o ściankach prostych w tych samych warunkach hydraulicznych otrzymano dla jednakowych kątów nachylenia mniejszy udział pól martwych i wirów w przypadku komory o ściankach łamanych. Przy kątach nachylenia mniejszych od 60° pola martwe i wiry powstają jednak bardzo szybko. Jeżeli założymy jednakowe kąty nachylenia ścian, to objętość komory o ściankach łamanych jest mniejsza od objętości, jakę ma komora o ściankach prostych. Jeśli przyjmiemy równe objętości obu rozpatrywanych komór osadowych, to wielkość pól martwych i wirów w komorach o ściankach łamanych jest każdorazowo większa. Często jednak dolna część komory w ściankach łamanych jest wykorzystywana na tunel doprowadzający wodę do drenażu dolnego, wtedy jej objętość osadowa zmniejsza się.

W badaniach nad wpływem pulsacji na zachowanie się strug wody w strefie klarowania i osadu zawieszonego (bez względu na kształt zewnętrznych komór osadowych i sposób odbioru wody) stwierdzono, że uniemożliwia ona tworzenie się dużych wirów i obszarów martwych, a sprzyja powstawaniu bardzo drobnych zawirowań, które – jak można przypuszczać – powoduję w rzeczywistości lepsze wymieszanie i kontakt kłaczków oraz wyrównanie i zmianę koncentracji osadu. Zdecydowany wpływ pulsacji był widoczny w strefie osadu zawieszonego.

Przy opróżnianiu komór osadowych zauważono, że przy ilości odprowadzanego osadu (Q_0) większej od ilości wody doprowadzanej do pulsatora (Q_d) na krawędziach komory osadowej tworzę się wiry powodujące zaburzenia w strefie wody sklarowanej, co może być przyczyną przedostawania się drob-

nych kłaczków do odpływu. W pozostałych przypadkach, kiedy $Q_0 < Q_d$, wpływ tej fazy pracy (bez względu na kształt zewnętrzny komór osadowych i sposób odbioru wody) na wielkość zaburzeń w całej badanej strefie był znikomy.

Próba zastosowania płyt płasko-równoległych z deflektorami w strefie osadu zawieszonego dała oczekiwane efekty w postaci zdecydowanej poprawy warunków hydraulicznych w całym badanym przekroju pulsatora. W strefie osadu zawieszonego tworzą się wówczas formy wirowe, posiadające 2-, 3-krotnie większą prędkość. Powoduje to, że znajdujący się tam w rzeczywistości osad ma lepszą spójność oraz poprawia się kontakt wody dopływającej z osadem. Zauważono również znaczne wyrównanie strug w strefie wody sklarowanej.



a -przepływ stały bez płyt płasko-równoległych

b -pulsacja bez płyt płasko-równoległych

c - przepływ stały w obecności płyt płasko-równoległych

d - pulsacja w obecności płyt płasko-równoległych

Rys. 26. Wpływ przepływu stałego i pulsacji na wielkość pól martwych i wirów powstających w strefie klarowania bez i w obecności płyt płasko-rów-noległych przy kącie nachylenia ściany prostej komory osadowej $\mathcal{C}=80^\circ$

a - przepływ stały bez płyt płasko-równoległych, b - pulsacja bez płyt płasko-równoległych, c - przepływ stały w obecności płyt płasko-równoległych, d - pulsacja w obecności płyt płasko-równoległych

Fig. 26. Influence of permanent flow and pulsation of magnitude of dead fields and vortices occurring in clarifying zone without and with flat-paraliel plates at the angle of inclination of sedimentation chamber straight wall $cc = 80^{\circ}$

a - permanent flow without flat-parallel plates, b - pulsation without flat-parallel plates, c - permanent flow in presence of flat-parallel plattes, d - pulsation in presence of flat-parallel plates W celu lepszego zobrazowania wpływu pulsacji sporządzono wykres (rys. 26) przedstawiający udział pól martwych i wirów przy kącie nachylenia wynoszącym 80⁰ prostej ściany zewnętrznej komory osadowej z przelewem krawędziowym zewnętrznym i wewnętrznym oraz poprzecznym w okresie przepływu stałego i pulsacji bez i w obecności płyt płasko-równoległych z deflektorami. Ocenie poddano samą strefę klarowania, przyjmując jej pole w badanym przekroju za 100. Z wykresu (rys. 26) wynika, że obecność płyt płaskorównoległych zdecydowanie poprawia warunki przepływu wody w strefie klarowania dla przelewu krawędziowego zewnętrznego i wewnętrznego w okresie przepływu stałego oraz pulsacji. Jedynie przy odbiorze poprzecznym wody i prawie identycznym zachowaniu się strug w strefie klarowania nie stwierdzono żadnego wpływu płyt płasko-równoległych.

Przeprowadzone badania nad modelowaniem kształtu komór osadowych pulsatora wykazały, co następuje:

- na warunki hydrauliczne przepływu wody w strefie klarowania i osadu zawieszonego duży wpływ wywierają kształt zewnętrzny komór osadowych i sposób odbioru wody. Najlepszym z badanych okazał się kształt zewnętrzny komory osadowej wyprofilowany w postaci ściany prostej nachylonej u podstawy pod kątem 70-90° i poprzecznym względem niej odbiorze wody,
- pulsacja uniemożliwia powstawanie dużych wirów i pól martwych bez względu na kształt zewnętrzny przebadanych komór osadowych i sposób odbioru wody, a sprzyja tworzeniu bardzo dorbnych zawirowań, korzystnych dla pracy pulsatora,
- odpływ osadu z komór osadowych nie może przekraczać ilości wody doprowadzanej do pulsatora ($\rm Q_{o} < \rm Q_{d}$),
- obecność płyt płasko~równoległych z deflektorami w strefie osadu zawieszonego w zdecydowany sposób poprawia warunki hydrauliczne przepływu wody w całej strefie sedymentacji, zarówno w okresie przepływu stałego, jak i w okresie pulsacji.

4.4.3. Analiza modelowa wpływu konstrukcji drenażu na warunki przepływu wody w pulsatorze

Istotnym elementem rozwiązań konstrukcyjnych pulsatora jest sposób doprowadzenia i odbioru wody względem strefy klarowania i osadu zawieszonego. Prawidłowe rozwiązanie tego fragmentu urządzenia decyduje o wielkości pól martwych i nie zamierzonych wirów, których występowanie oddziałuje ujemnie na wynik końcowy oczyszczania wody. W rozwiązaniach konstrukcyjnych pulsatorów zarówno krajowych, jak i zagranicznych doprowadzenie wody do strefy osadu zawieszonego następuje poprzez drenaż rurowy lub płytowy. Zadaniem drenażu jest przede wszystkim równomierne rozprowadzenie wody w przekroju poprzecznym i podłużnym urządzenia, a następnie, po zmniejszeniu prędkości wypływu na daszkach wyrównujących, skierowanie jej do strefy osadu zawieszonego. W tzw. superpulsatorze zrezygnowano z daszków wyrównujących, wprowadzając do strefy osadu zawieszonego zespół płyt płasko-równoległych o nachyleniu 60 stopni [116, 117]. W celu lepszego wymieszania przymocowano do płyt płasko-równoległych deflektory. Rozwiązanie to spowodowało wyrównanie i zmniejszenie liczby Re w przekroju strefy osadu zawieszonego oraz umożliwiło utrzymanie jednakowego stężenia osadu. W konsekwencji zwiększona została prędkość wznoszenia wody, a tym samym wzrosło obciążenie hydrauliczne pulsatora.

Z rozwiązań krajowych na uwagę zasługuje drenaż płytowy wprowadzony w miejsce tradycyjnego drenażu rurowego. Istotę tego rozwiązania stanowi zespół płyt żelbetowych o wymiarach 84 x 216 cm i grubości 20 cm, zamocowanych na słupkach podporowych [114]. Każda płyta ma 24 gniazda wykonane w kształcie odwróconego ostrosłupa o podstawie 22 x 22 cm, zakończonego u wierzchołka krótkim przewodem rurowym.

Istotnym elementem konstrukcyjnym występującym w strefie klarowania jest układ koryt przelewowych lub rur perforowanych służących do odbioru wody. Rozwiązanie konstrukcyjne tych elementów powinno gwarantować dużą równomierność odbioru wody, aby wyeliminować strefy martwe i wiry.

Badania konstrukcji drenażu pulsatora są kontynuacją wcześniej prezentowanych badań kształtu komór osadowych.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu drenażu płytowego konstrukcji krajowej [114] i rurowego na warunki przepływu wody w strefie klarowania i osadu zawieszonego w zależności od sposobu odbioru wody w fazie przepływu stałego i pulsacji.

Badaniom poddano drenaż płytowy i rurowy, zmieniając konstrukcję odbioru wody ze strefy klarowania dla sześciu przypadków (rys. 27):

- poprzecznego z przelewem pilastym (A),
- poprzecznego z przelewem Thomsona (B),
- wewnętrznego z przelewem krawędziowym (C),
- zewnętrznego z przelewem krawędziowym (D),
- obustronnego z przelewem krawędziowym (E),
- poprzecznego rurowego, zatopionego (F).

www.badany wycinek pulsatora



A - przelew pilasty, B - przelew Thomsona , C,D,E - przelewy krawędziowe , F - przelew rurowy.

Rys. 27. Schematyczny przekrój poprzeczny pulsatora Fig. 27. Schematic pulsator's corss-section

W przypadku drenażu rurowego otworki były skierowane pod kątem 45⁰ względem poziomu w kierunku płyty dennej i rozmieszczone mijankowo. Badania przeprowadzono dla drenażu rurowego bez i z daszkami wyrównawczymi w obecności i bez płyt płasko-równoległych z deflektorami w strefie osadu zawieszonego. Kąt nachylenia płyt płasko-równoległych wynosił 60°. Pozostałe elementy konstrukcyjne przyjętego do badań wycinka pulsatora oraz przepływy nie zmieniły się.

Badania wykonano przy użyciu czystej wody wodociągowej bez modelowania zawiesiny wykorzystując do tego celu kanał hydrauliczny, w którym umieszczono model danego wycinka pulsatora. Jako wskaźnika użyto proszku refleksyjnego (pyłu aluminiowego), który umożliwiał dobrą obserwację zachowania sie strug wody w badanej płaszczyźnie oraz fotografowanie poszczególnych faz przepływu. W badaniach przestrzegano zachowania jednakowego czasu naświetlania oraz identycznej grubości ziaren pyłu aluminiowego. Wszystkie obserwacje przepływu przeprowadzono na wycinku pulsatora wykonanym w skali 1:6, przy prędkości przepływu wody pozwalającej na utrzymanie wartości Re > Re_{kr} (rozdz. 3). Za podstawę do interpretacji zachowania się struy, wody w obu strefach przyjęto możliwie najbardziej wyrównany wizualnie przepływ, gwarantujący największą stabilność hydrauliczną urządzenia. Udział 🙀l martwych i wirów został określony oddzielnie dla strefy klarowania oraž dla strefy osadu zawieszonego (rys. 28). Z wykresu tego wynika, że w strefie osadu zawieszonego obecność płyt płasko-równoległych z deflektorami zarówno dla drenażu płytowego, jak i dla drenażu rurowego (bez dasz-



□ przepływ słały] bez płyt płasko- zzzprzepływ słały] w obecności płyt płasko-⊡⊐ pulsacja J-rownoległych zakcelatoram

Rys. 28. Wpływ drenażu płytowego i rurowego na udział pól martwych i wirów w strefie klarowania i osadu zawieszonego

Fig. 28. Influence of plate and pipe drainage on participation of dead fields and vortices in clarifying zone and suspended settling

ków) zwiększa procent zawirowań, co sprzyja lepszemu wymieszaniu i uniemożliwia tworzenie się dużych wirów. W okresie przepływu stałego bez płyt płasko-równoległych z deflektorami udział pól martwych i wirów w tej strefie we wszystkich analizowanych przypadkach (A – F) wahał się w granicach 10-15%. W obecności płyt w tych samych warunkach przepływu, udział pól martwych i wirów zwiększył się (do 20-25%), bez względu na rodzaj drenażu i sposób odbioru wody. Spowodowanie pulsacji zwiększyło powierzchnię zawirowań, która dla układu bez płyt płasko-równoległych z deflektorami wynosiła 15–20%, z udziałem zaś tych płyt 25–34%. Zaobserwowano, że pulsacja sprzyja powstawaniu bardzo drobnych zawirowań. Oceniając ponadto zjawisko występowania pól martwych i wirów w strefie osadu zawieszonego w okresie przepływu stałego i pulsacji bez płyt płasko-równoległych z deflektorami, można stwierdzić, że zarówno drenaż płytowy, jak i drenaż rurowy (bez daszków) nie różnią się zasadniczo między sobą. Jedynie w obecności płyt w strefie osadu zawieszonego i pulsacji drenaż płytowy sprzyja powstawaniu większych zawirowań, w okresie zaś bez pulsacji otrzymane wyniki (dla obu drenaży) są bardzo zbliżone (rys. 28). Stwierdzono również, że sposób odbioru wody nie ma większego wpływu na wielkość zaburzeń powstających w strefie osadu zawieszonego. Wynika stąd, że rozwiązanie konstrukcyjne drenażu płytowego nie ustępuje tradycyjnym drenażom rurowym (porównując otrzymane wyniki dla strefy osadu zawieszonego).

Jak już wspomniano, obecność drobnych zawirowań w strefie osadu zawieszonego jest zjawiskiem korzystnym, natomiast w strefie klarowania bardzo niepożądanym. Dlatego też celowo rozdzielono te dwie strefy i poddano niezależnej ocenie.

Z porównania udziału pól martwych i wirów w strefie klarowania dla drenażu płytowego oraz rurowego bez daszków (rys. 28) jednoznacznie wynika ujemny wpływ drenażu płytowego bez względu na sposób odbioru wody zarówno w okresie przepływu stałego, jak i w okresie pulsacji. Dla przepływu stałego i drenażu płytowego bez płyt płasko-równoległych z deflektorami udział pól martwych i wirów w tej strefie (dla wszystkich analizowanych przypadków) wahał się 6-10%, dla drenażu rurowego zaś (bez daszków) 1-6% (z wyjętkiem przypadku F - 10%). W tych samych warunkach w okresie pulsacji udział pól martwych i wirów zwiększył się i wyniósł odpowiednio dla drenażu płytowego 10-15%, dla drenażu zaś rurowego 1-11%. Obecność płyt płaskorównoległych z deflektorami w strefie osadu zawieszonego oddziałuje pozytywnie na strefę klarowania, a udział pól martwych i wirów, szczególnie w czasie pulsacji jest w wielu przypadkach mniejszy lub równy w porównaniu z pulsacją bez płyt płasko-równoległych (np. przypadki B, C, D, E, F; rys. 28).

Z porównania drenażu płytowego z drenażem rurowym (bez daszków) w obecności płyt płasko-równoległych z deflektorami wynika, że w okresie bez pulsacji udział pól martwych i wirów stanowi 6-17,5% (strefy klarowania) dla drenażu płytowego, dla drenażu rurowego zaś 3-10%. Odpowiednio w okresie pulsacji wartości te wynoszą 7,5-15% (dla drenażu płytowegoę i 2-7% (dla drenażu rurowego).

Z otrzymanych wyników widać (rys. 28), jak duży wpływ na warunki przepływu w strefie klarowania ma sposób odbioru wody. Najkorzystniejsze hydraulicznie warunki przepływu wody w tej strefie zapewnia poprzeczny odbiór wody z przelewem pilastym lub Thomsona (A i B, rys. 28). Podobne warunki odbioru wody powinien zapewnić przelew poprzeczny rurowy (F). Jednak, jak wykazały obserwacje, obecność koryta zbiorczego w środkowej części strefy klarowania zwiększa wielkość niepożądanych pól martwych i wirów. Dobre wyniki otrzymano również dla odbioru bocznego obustronnego z przelewem krawędziowym (E), najgorsze zaś dla odbioru wewnętrznego i zewnętrznego z przelewem krawędziowym (C, D). Należy jednak zaznaczyć, że przeprowadzone pomiary dotyczyły wycinka (plastra) pulsatora, a przelewy: pilasty, Thomsona i rurowy (A, B, F) znajdowały się w płaszczyźnie tego wycinka. Niemniej jednak można na tej podstawie sformułować wnioski dotyczące porównania poszczególnych drenaży pracujących w tych samych warunkach.

Badania porównawcze wykazały, że drenaż płytowy w każdym przypadku (A – F) zwiększa liczbę pól martwych i wirów w strefie klarowania, co może być przyczyną wynoszenia osadu do odpływu i pogorszenia jakości oczyszczanej wody. Drenaż płytowy wymaga udoskonaleń konstrukcyjnych zmierzających w kierunku ograniczenia rozprzestrzeniania się pól martwych i wirów do strefy klarowania.

Przebadano również drenaż rurowy z daszkami dla dwóch przypadków odbioru wody, tj. poprzecznego z przelewem Thomsona i poprzecznego rurowego w warunkach przepływu stałego i.pulsacji, bez i w obecności płyt płasko-równoległych z deflektorami (rys. 29). Stwierdzono, że obecność daszków powoduje intensywne i dobre wymieszanie oraz nie sprzyja powstawaniu stref martwych i wirów w dolnej części pulsatora. Sam dreanź rurowy powoduje wiekszy udział wirów w strefie osadu zawieszonego aniżeli drenaż rurowy z daszkami, przy zbliżonych efektach w strefie klarowania (np. rys. 29, B). Nie jest to jednak reguła, a uogólnienie takiego stwierdzenia jest przedwczesne. W większości przypadków drenaż rurowy z daszkami daje wyniki gorsze lub zbliżone do drenażu rurowego, lecz lepsze od drenażu płytowego (rys. 29). Wprowadzenie płyt płasko-równoległych z deflektorami do strefy osadu zawieszonego w obecności daszków wyrównujących powoduje, że zasilanie wodą przestrzeni między poszczególnymi płytami nie jest jednakowe, dlatego też obecność daszków w tym przypadku jest niepożądana. Potwierdza to rozwiązanie zastosowane w tzw. superpulsatorze przez firmę Degremont [116], gdzie w strefie osadu zawieszonego znajduje się jedynie drenaż rurowy i pakiet płyt płasko-równoległych z deflektorami.

Przeprowadzone badania modelowe nad wpływem konstrukcji drenażu płytowego i rurowego na warunki przepływu wody w strefie klarowania i osadu zawieszonego w pulsatorze dla różnych odbiorów wody wykazały, że:



- 105 -

Rys. 29. Wpływ drenażu płytowego, rurowego i rurowego z daszkami na udział pól martwych i wirów w strefie klarowania i osadu zawieszonego

Fig. 29. Influence of plate, pipe and pipe with roofs drainage on participation of dead field and vortices in clarifying zone and suspended settling zone

- w strefie osadu zawieszonego w okresie przepływu stałego i pulsacji bez płyt płasko-równoległych z deflektorami drenaze te nie różnią się zasadniczo między sobą; w obecności płyt płasko-równoległych i pulsacji drenaż płytowy sprzyja powstawaniu większych zawirowań, w okresie bez pulsacji otrzymane wyniki są dla obu drenaży zbliżone,
- sposób odbioru wody ma niewielki wpływ na warunki przepływu w strefie osadu zawieszonego,
- obecność płyt płasko-równoległych z deflektorami w strefie osadu zawieszonego wpływa korzystnie na warunki przepływu wody w strefie klarowania zmniejszając w niej udział pól martwych i wirów,
- duży wpływ na warunki przepływu wody w strefie klarowania ma rodzaj drenażu i sposób odbioru wody,
- drenaż płytowy sprzyja rozprzestrzenianiu się większej liczby pól martwych i wirów do strefy klarowania aniżeli drenaż rurowy,
- drenaž rurowy z daszkami pozwala na uzyskanie zbliżonych lub nieco gorszych wyników w atosunku do drenażu rurowego,
- zastosowanie płyt płasko-równoległych z deflektorami w strefie osadu zawieszonego nie wymaga instalowania daszków wyrównujących.

Pomiary przeprowadzono na modelu plastrowym, który stanowił geometrycznie odwzorowany wycinek pulsatora przyjętego do badań wstępnych w kanale hydraulicznym (rozdz. 4.4.2 i 4.4.3). Układ ciśnieniowy modelu, tj. z pominięciem prawa ciążenia [86, 129], stworzył dogodne warunki do pomiaru prędkości przepływu strug wody za pomocą anemometru laserowego. Modelowanie z zachowaniem reguły Re["] = Re['] pozwoliło na uzyskanie znacznie większych prędkości od spotykanych w obiektach technicznych. Pomiary wykonano dla przepływu gwarantującego zachowanie warunków samomodelowania (R = = 5600-16800).

Założono, że pulsator jest osadnikiem kontaktowym o falującym przepływie, któremu odpowiada średnia prędkość wznoszenia wody w strefie klarowania w obiekcie naturalnym $W_p = 0,74$ mm/s.

Przy uwzględnieniu zależności [38]:

 $Q_1 = 0,67 Q$ $Q_2 = 2,32 Q$

minimalna prędkość wznoszenia wody w strefie klarowania wynosiła ^Wp min⁼ = 0,50 mm/s, zaś maksymalna W_{p max} = 2,23 mm/s.

Badania rozpoczęto od wizualizacji poszczególnych faz przepływu, dla kilku wartości Q, celem stwierdzenia zachowania podobieństwa pól prędkości dla strony prawej i lewej (w stosunku do komory osadowej) i dokładności wykonania modelu (zwłaszcza drenażu dolnego i górnego) oraz szczelin w daszkach wyrównawczych – rys. 30. Poszczególne przypadki różniły się jedynie czasem, po jakim następowało analogiczne przemieszczanie się strug wody. Obserwacje te świadczyły o wiarygodności i poprawności wykonania modelu i były wskazane przed przystępieniem do pomiarów anomometrem laserowym. Jako znacznika użyto roztwór rodaminy B (podobnie jak w badaniach akcelatora).

Po ustaleniu rozstawu punktów pomiarowych przystąpiono do pomiarów składowych pionowych prędkości ruchu wody. (Tabele pomiarowe znajdują się w Archiwum Instytutu Inżynierii i Technologii Wody, Scieków i Odpadów Politechniki Śląskiej). Pomiarów składowych poziomych zaniechano, gdyż wyznaczono je później obliczeniowo z równania ciągłości przepływu, omijając w ten sposób błąd pomiaru, który mógł nastąpić w wyniku trudności ponownego znalezienia idealnie tego samego punktu pomiarowego. Otrzymane wyniki posłużyły do sporządzenie wykresu składowych pionowych prędkości (rys. 31), obliczenia współczynników nierównomierności rozkładu prędkości dla poszczególnych poziomów pomiarowych oraz wykreślenia trajektorii ruchu kłaczków na tle ruchu cząstek wody.



Rys. 30. Kolejne fazy przemieszczanie znacznika w badanym pulsatorze Fig. 30. Successive phases of marker's displacement in the examined pulsator



Rys. 31. Wykresy składowych pionowych prędkości modelowych dla strefy klarowania badanego pulsatora

Fig. 31. Diagrams of vertical components of model velocities for clarifying zone of the examined pulsator

Współczynnik nierównomierności rozkładu prędkości wyznaczono z zależnosci [90] :

$$M_{k} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_{p_{i}}^{2} \cdot \Delta^{A} c_{i}}{W_{p_{jr}}^{2} \cdot A_{c}}$$
(133)

Dla założonych pięciu poziomów pomiarowych uzyskano następujące warto-ści współczynnika $\mathbb{M}_{\mathbf{k}}$:

108 -
- poziom 1 - M_k = 1,89 - poziom 2 - M_k = 2,01 - poziom 3 - M_k = 1,76 - poziom 4 - M, = 1,59

- poziom 4 ^Mk = 1,59 k
- $poziom 5 M_k = 1,33$

co graficznie przedstawiono na rys. 32. Wynika stąd, że w miarę przyrostu wysokości strefy klarowania zmniejsza się wielkość zaburzeń, przepływ staje się bardziej stabilny, a współczynnik M_k spada poniżej 1,3 w miejscu odbioru wody (uwzględniając odległość poziomu 5 od drenażu górnego).





Modelowanie matematyczne ruchu cząstek fazy stałej o średnicy zastępprzeprowadzono dla części "A" (rys. 33) ze względu na symetrię czej d_ badanego modelu pulsatora oraz wcześniej stwierdzone podobieństwo pól predkości dla obu części "A" i "B" względem komory osadowej. Przyjęto współrzędne początkowe cząstek odrywanych od powierzchni warstwy zawieszonego osadu jak na rys. 33. Otrzymane wydruki z maszyny cyfrowej umożliwiły wykreślenie trajektorii cząstek, które oderwane od powierzchni warstwy zawieszonego osadu zostały wyniesione do odpływu (rys. 34-39) oraz tych, które mimo oderwania opadły na powierzchnię warstwy - rys. 41 i 42. (Wydruki z maszyny cyfrowej znajdują się w Archiwum Instytutu Inżynierii i Technologii Wody, Ścieków i Odpadów Politechniki Śląskiej). Cząstki, które przy założonej średnicy, gęstości i prędkości początkowej nie oderwały się od warstwy zawieszonego osadu, zestawiono razem z innymi przyjętymi do badań jako wyniki symulacji numerycznej w tab. 7. Interesujacy okazał się moment poszukiwania czastki granicznej, która przy zada-



A, B-części umowne badanego pulsatora

Rys. 33. Współrzędne początkowe cząstek odrywanych od powierzchni warstwy zawieszonego osadu

Fig. 33. Initial coordinates of particles separated from the surface of suspended settling layer

nych paramatrach hydrodynamicznych przepływu wody została oderwana od warstwy zawieszonego osadu i po uniesieniu do strefy klarowania opadła. Ilustruje to rys. 40, przedstawiający trajektorie cząstek o średnicy zastępczej d_z = 20, 30 i 40 μ m oraz gęstości $\rho_o = 1030,00 \text{ kg/m}^3$, które odrywają się od warstwy osadu z prędkością początkową V = 10 mm/s z tego samego punktu określonego współrzędnymi x₃ = 0 i y₃ = 1,284 m. Cząstka o d_z = 20 μ m zostaje wymiesiona do odpływu, o d_z = 30 μ m udarza o ściankę urządzenia, zaś o $d_z = 40 \,\mu$ m opada. Kolejne trajektorie częstek (rys. 41) o d_z = 30 μ m, ρ_0 = 1030,00 kg/m³ i V_{zx} = 10 mm/s świadczę, że do odpływu zostają uniesione tylko cząstki oderwana w punktach o współrzędnych: $x_A = 0$; $y_A = 1,712$ m ± $x_5 = 0$; $y_5 = 2,140$ m. Zwiększenie średnicy cząstek do $d_z = 35 \,\mu$ m daje już jednoznaczny obraz ich zachowania się w strefie klarowania. W punktach o współrzędnych x₁ = 0; y₁ = 0,428 m i x₂ = 0; y₂ = 0,856 m cząstki nie odrywają się od warstwy zawieszonego osadu, zaś dla pozostałych punktów po oderwaniu opadają (rys. 42).



- Rys. 34. Trajektorie cząstek o średnicy zastępczej d $_z$ = 10 µm, gęstości ρ_o = 1004,00 kg/m³ i prędkości poczętkowej V $_{zx}$ = 0,5 mm/s
- Fig. 34. Trajectories of particles with substitute diameter $d_z = 10 \,\mu$ m, density $\rho_o = 1004,00 \,\text{kg/m}^3$ and initial velocity $V_{zx} = 0,5 \,\text{mm/s}$



Rys. 35. Trajektorie cząstek o średnicy zastępczej $d_z = 10 \mu$ m, gęstości $\rho_0 = 1004.00 \text{ kg/m}^3$ i prędkości początkowej $V_{zx} = 1 \text{ mm/s}$ Fig. 35. Trajectories of particles with substitute diameter $d_z = 10 \mu$ m, density $\rho_0 = 1004,00 \text{ kg/m}^3$ and initial velocity $V_{zx} = 1 \text{ mm/s}$



Rys. 36. Trajektorie cząstek o średnicy zastępczej d $_z$ = 10 μ m, gęstości ρ_0 = 1004.00 kg/m³ i prędkości początkowej V $_{zx}$ = 3 mm/s

Fig. 36. Trajectories of particles with substitute diameter $d_z = 10 \,\mu$ m, density $\rho_o = 1004,00 \,\text{kg/m}^3$ and initial velocity $V_{zx} \approx 3 \,\text{mm/s}$

- 113 -



Rys. 37. Trajectorie cząstek o średnicy zastępczej $d_z = 10 \mu$ m, gęstości $\rho_0 = 1030,00 \text{ kg/m}^3$ i prędkości początkowej $V_{zx} = 0,5 \text{ mm/s}$ Fig. 37. Trajectories of particles with substitute diameter $d_z = 10 \mu$ m, density $\rho_0 = 1030 \text{ kg/m}^3$ and initial velocity $V_{zx} = 05 \text{ mm/s}$



Rys. 38. Trajektorie cząstek o średnicy zastępczej d $_{\rm Z}$ = 10 μ m, gęstości $\rho_{\rm o}$ = 1030,00 kg/m 3 i prędkości początkowej v $_{\rm ZX}$ = 1 mm/s

Fig. 38. Trajectories of particles with substitute diameter d = 10 μ m, density ρ_{0} = 1030,00 kg/m³ and initial velocity V_{zx} = 1 mm/s



- Rys. 39. Trajektorie cząstek o średnicy zastępczej d $_z$ = 10 µm, gęstości ρ_o = 1030,00 kg/m³ i prędkości początkowej V $_{zx}$ = 3 mm/s
- Fig. 39. Trajectories of particles with substitute diameter $d_z = 10 \,\mu$ m, density $\rho_0 = 1030,00$ kg/m³ and initial velocity V_{zx} = 3 mm/s



Rys. 40. Trajektorie cząstek o średnicy zastępczej d_z = 20, 30 i 40 μ m, gęstości $\rho_0 = 1030,00 \text{ kg/m}^3$ i prędkości początkowej V_{zx} = 10 mm/s Fig. 40. Trajectories of particles with substitute diameter d_z = 20, 30. 40 μ m, density $\rho_0 = 1030,00 \text{ kg/m}^3$ and initial velocity V_{zx} = 10 mm/s



- Rys. 41. Trajektorie cząstek o srednicy zastępczej d_z = 30 μ m, gęstości $\rho_0 = 1030,00 \text{ kg/m}^3$ i prędkości początkowej V_{zx} = 10 mm/s Fig. 41. Trajectories of particles with substitute diameter d_z = 30 μ m, density $\rho_0 = 1030,00 \text{ kg/m}^3$ and initial velocity V_{zx} = 10 mm/s



Rys. 42. Trajektorie cząstek o średnicy zastępczej $d_z = 35 \,\mu$ m, gęstości $\rho_o = 1030,00 \text{ kg/m}^3$ i prędkości początkowej $V_{zx} = 10 \text{ mm/s}$ Fig. 42. Trajectories of particles with substitute diameter $d_z = 35 \,\mu$ m, density $\rho_o = 1030,00 \text{ kg/m}^3$ and initial velocity $V_{zx} = 10 \text{ mm/s}$

Tabela 7

yniki symulacji numerycznych trajektorii cząstek fazy stałej

	grant a construction of the second se							-	the second secon
	crecnica Tastep- cza	Gęstość cząstki gz kg/m ³	Pręd- kość począt- kowa V zx mm/s	Współrzędne początkowe: x = 0					
1.0.				y ₁ = 0,428 m	y ₂ = 0,856 m	Y ₃ = 1,284 ™	Y ₄ = 1,712 m	Y ₅ = 2,140 m	Uwagi
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10 ju m	1004,00	0,5	î	t	Î	î	Î	rys. 34
2	10 jum	1004,00	1	Î	1	t	Î Î	Î	rys. 35
3	10 /Lm	1004,00	3	1	↑	1	Î	t	rys. 36
4	10 Um	1030,00	0,5	1	Ť	1	Ť	î	rys. 37
5	10 µm	1030,00	1	Î	Î î .	1	1	Î	rys, 38
Fi.	10 Ju m	1030,00	3	1	Î	1	1	Î	rys. 39
7	500 jum	1004,00	0,5	Ļ	ļ	Ļ	Ļ	Ļ	
8	500 jum	1004,00	1	Ļ	Ļ	↓ ↓	Ļ	Ļ	
9	500 µm	1004,00	3	↓	Ļ	Ļ	Ļ	Ļ	
10	500 ju m	1030,00	0,5	Ļ	Ļ	Ļ	Ļ	Ļ	
11	500 µm	1030,00	1	Ļ	Ļ		Ļ	Ļ	
12	500 µm	1030,00	3	1		1	Ļ	Ļ	-
13	.3 mm	1004,00	0,5	Ļ	Ļ	Ļ	ļ	Ţ	
14	3 mm	1004,00	1	↓.	ļ		Ļ	ļ	
15	3 mm	1004,00	3	1	L	Ļ		Ļ	
10	3 mm	1030,00	0,5	Ļ			1	Ļ	
17	3 mm	1030,00	1	Ļ	Ļ	Ļ		Ļ	
18	3 mm	1030,00	3	Ļ	1	↓ ↓	Ļ	↓ .	
19	30 µm	1030,00	10	. ^	\wedge	\wedge	Î	Î	rys. 41
20	35,µm	1030,00	10	Ļ	↓	\sim	\wedge	\sim	rys. 42

blasnienia:

* - cząstki wynoszone do odpływu

I - cząstki, które nie uległy oderwaniu od warstwy zawieszonego osadu

/ cząstki, które oderwały się od warstwy tawieszonego osadu i opadły

Analiza wyników symulacji numerycznych trajektorii cząstek fazy stałej wskazuje, ze proponowany model matematyczny jest dobrym przyblizeniem rzeczywistych przepływów zachodzących w strefie klarowania osadników kontaktowych, stanowiąc jednocześnie efektywną metodę poszukiwania perametrów kinematycznych ruchu.

Modelowanie matematyczne tego rodzaju zjawiska stwarza pewne trudności wynikające z rzędu wielkości poszczególnych parametrów oraz warunków brzegowych. Łatwo zauważyć, że gęstość cząstek fazy stałej jest tylko nieznacznie większa od gęstości fazy nośnej – wody (ten sam rzad wielkości). Efekt tych ograniczeń można zaobserwować analizując wydruki wyników obliczeń. Np. na skutek niskiej prędkości początkowej tylko cząstki mniejsze (lżejsze) do około 30 µm są transportowane w strumieniu 2-fazowym poprzez strefę klarowania do odpływu. Cząstki większe (cięzsze), powyzej 50 µm, w ogóle nie uczestniczą w ruchu, pozostając w strefie zawieszonego osadu. Przyczyną jest zbyt mała prędkość początkowa inicjująca ruch tych cząstek.

Warto również zwrócić uwagę na fakt, ze częstki mniejsze już po kilkudziesięciu sekundach przestają się poruszac ruchem względnym i są unoszone ze strumieniem fazy ciekłej. Wskazuje na to ich prędkość względna obliczona w trakcie realizacji programu/, która już po kilku iteracjach jest o co najmniej rząd wielkości mniejsza od prędkości fazy nośnej.

Szczegółowe poszukiwania pozwoliły na stwierdzenie, że dla pewnych parametrów ruchu istnieje zbiór cząstek fazy stałej, które wyrzucone z określoną prędkością początkową poruszają się ruchem względnym w płynącej wodzie, jednakże nie osiągają części odpływowej urządzenia i opadają z powrotem do strefy osadu (lub uderzają o ścianki). Ten rodzaj ruchu dotyczy bardzo wąskiego przedziału średnic zastępczych cząstek, tj.: 30-40 µm przy gęstości 1030,00 kg/m³ i dużej (jak na parametry eksperymentu) prędkości początkowej, wynoszącej 10 mm/s. Niższe prędkości początkowe nie są wystarczające do zainicjowania ruchu cząstek.

Przegląd wyników symulacji numerycznej wskazuje, że przyjęty model matematyczny daje dobre wyniki tak jakościowe, jak i ilościowe, pomimo ewidentnych niedostatków w postaci przyjętych założeń upraszczających (w odniesieniu do przepływów rzeczywistych), takich chociażby, jak założenie kulistego kształtu cząstek, pominięcie zjawiska koagulacji w strefie klarowania, wymiany masy między fazami itp. Uwzględnienie wymienionych przykładowo zjawisk i czynników jest praktycznie niemożliwe na drodze teoretycznej i jest osiągalne jedynie na drodze eksperymentu.

Uzyskane kryteria podobieństwa (rozdz. 3.3.3) umożliwiają pełniejsze i dokładniejsze modelowanie zjawisk przepływów w osadnikach kontaktowych. gdyż uwzględniają bardzo istotne różnice kinetyki przepływów poszczególnych składników mieszaniny. Podejście takie w klasycznym ujęciu jest oczywiście niemożliwe. Z drugiejstrony uzyskano pewną nową ilość kryteriów podobieństwa, które także czynią modelowanie bardziej złożonym. między innymi nie wszystkie z nowych kryteriów mogą być uwzględnione. Z sytuacją tą mamy do czynienia i w tej pracy. Tym niemniej pojęcie prędkości średniej i ciśnienia "p" nalezy utożsamiać z prędkościa i ciśnieniem w badaniach laboratoryjnych przedstawionych w rozdz. 4.1.2 i 4.4.4. Można stąd wyciągnąc wniosek, że kryteria gęstości i prędkości, z których korzystano w badaniach z zastosowaniem lasera, muszą spełniać ograniczenia:

a)
$$p = \sum_{\infty} p^{\infty}$$
, co po wprowadzeniu skal mozna zapisać jako
 $S_p p = \sum_{\infty} S_p^{\infty}$, $p^{\infty} \longrightarrow \frac{S_p}{\sum_{\alpha} S_p^{\infty}} = 1$

skad skala gestosci

$$S_{p} = S_{p^{0}} + S_{p^{1}} + \cdots + S_{p^{4}}$$
 (134)

h $\rho^{N_{\mathbf{k}}} = \sum_{\mathbf{x}} \rho^{\mathbf{x}} \sqrt{\mathbf{k}}$; co po wprowadzeniu skal można zapisac jako

$$s_{\rho} \cdot s_{w_{k}} \cdot \rho \cdot w_{k} = \sum_{\alpha} s_{\rho} \alpha \cdot s_{v_{k}} \cdot \rho^{\alpha} v_{k}^{\alpha} - \frac{s_{\rho} \cdot s_{w_{k}}}{\sum_{\alpha} s_{\rho} \alpha \cdot s_{v_{k}}} = 1$$

oraz

$$S_{\rho} \cdot S_{W_{k}} = S_{\rho} \cdot S_{V_{k}} + S_{\rho} \cdot S_{V_{k}} + \cdots S_{\rho} + S_{V_{k}}$$
(135)

Nożna stąd co najmniej wyciągnąć praktyczny wyniosek, że skale gęstosci i prędkości muszą spełniać równania (134) i (135). W tym zakresie wyniki badan teoretycznych są wykorzystane w badaniach doświadczalny. Tym niemniej po udoskonaleniu stanowiska badawczego i technik obserwacji można w przyszłosci pomyślec o całkowitym spełnieniu kryteriów podobieństwa wynikających z teorii mieszanin.

4.5. Mozliwości praktycznego wykorzystania wyników badań

Wyniki badan oraz zastosowana metodyka umożliwiają prowadzenie prac nad optymalizacją warunków hydrodynamicznych przepływu wody w osadnikach kontaktowych. Ułatwi to właściwy dobór i projektowanie systemu doprowadzenia wody do strefy osadu zawieszonego i jej odbioru ze strefy klarowania przy uwzględnieniu kształtu urządzenia, kształtu zewnetrznego kieszeni osadowych oraz innych przeszkód na drodze przepływu strug wody, np. konstrukcji nośnej elementów wsporczych znajdujących się wewnątrz, zwłaszcza dużych osadników kontaktowych. Postępowanie takie umożliwi osiągnięcię projektowych wydajności tych tak bardzo czułych urządzeń przy lepszej jakości wody w odpływie i mniejszym obciążeniu filtrów zawiesiną. Przyczyni się to również do obniżenia kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych stacji uzdatniania wody stosujących osadniki kontaktowe, bowiem nakłady inwestycyjne i bieżące na jednostkę produkcji, tj. 1 m³ wody, są proporcjonalne do sprawności stosowanych urządzeń.

Na uwagę zasługują zwłaszcza: matematyczne modelowanie ruchu cząstek w strefie klarowania na tle wcześniej rozpoznanego z eksperymentu pola prędkości czystej wody dla danej konstrukcji osadnika kontaktowego celem optymalizacji jego kształtu oraz ekran kierująco-rozdzielający strugi wody w akcelatorze. Przedstawiona metodyka badań umożliwia określenie wielkości i gęstości cząstek, które przy zadanej prędkości wznoszenia wody w strefie klarowania zostaną uniesione do odpływu, obniżając efekt pracy urządzenia. Metodyka ta może być również wykorzystana w badaniach nad poszukiwaniem nowych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń do uzdatniania wody lub oczyszczania ścieków, zwłaszcza na ich ostatnim etapie dotyczącym optymalizacji przepływów.

4.6. Propozycje wdrożeniowe

W wyniku przeprowadzonych badań własnych i uzyskanych rezultatów oraz zasadności podjęcia tematu popartej analizę pracy akcelatorów i pulsatorów w Polsce, w celu intensyfikacji pracy tych urządzeń na drodze hydraulicznej (możliwość zwiększenia wydajności) oraz podniesienia poziomu prac badawczych i projektowych proponuje się następujące wdrożenia:

1. Ekran kierująco-rozdzielający strugi wody w akcelatorze (Patent PRL nr 172816) ograniczający wynoszenie do odpływu drobnych zawiesin koloidalnych w wyniku przenoszenia zaburzeń związanych z cyrkulacją osadu na strefę klarowania. Ekran ten, bez względu na krotność cyrkulacji wewnętrznej osadu, powoduje, że wielkość zaburzeń w strefie klarowania jest powodowana tylko ilością wody kierowanej do odpływu, a nie jak było dotychczas, całą objętością osadu recyrkulowanego. Ekran kierująco-rozdzielający jest prosty konstrukcyjnie, łatwy do wykonania i zamontowania w pracujących akcelatorach.

2. Metodyka badań modelowych, umożliwiająca optymalizację warunków hydraulicznych przepływu wody w osadnikach klasycznych i kontaktowych z wykorzystaniem kanału hydraulicznego, modeli przestrzennych, anemometrii laserowej i maszyny cyfrowej. Metoda ta pozwala na uzyskanie najlepszego kształtu wewnętrznego urządzenia, dla którego następnie można przeprowadzić symulację numeryczną ruchu cząstek fazy nośnej i cząstek kłaczkowatych oraz wyznaczyć ich trajektorie, a przez to określić ich średnice zastępcze i gęstość cząstek, które zostaną zatrzymane w warstwie osadu lub uniesione do odpływu ~ czyli przewidywać również efekty technologiczne. Zastosowanie nowej metody badań za pomocą anemometru lasarowego umożliwia ponadto pomiar składowych prędkości ruchu wody w dowolnej interesującej nas płaszczyźnie osadnika.

Metodyka ta ogranicza uproszczenia i niepewność założeń do obliczeń matematycznych do minimum, na jakie pozwala obecny stan wiedzy i możliwości eksperymentowania w kraju.

5. OCENA EFEKTOW TECHNOLOGICZNYCH OSADNIKOW KONTAKTOWYCH

5.1. Technologiczne aspekty modelowania osadników kontaktowych

Stosowane w badaniach modelowych osadniki kontaktowe stanowią często urządzenia geometrycznie podobne do istniejących obiektów w skali technicznej, bądź też przewiduje się ich zastosowanie dla zwiększenia efektywności działania stacji uzdatniania wody. Trudno jest zbudować jeden zmniejszony model do badań hydrodynamicznych przepływu wody z zachowaniem identycznych w stosunku do warunków technicznych krzywych przepływu oraz podobieństwa geometrycznego i mechanicznego, spełniając jednocześnie wymagania technologiczne realizowanego w nim procesu, tj.: koagulacji, flo~ kulacji, sedymentacji i klarowania wody. Spełnienie wymagań podobieństwa hydromechanicznego i chemicznego równocześnie wymagałoby zachowania podobieństwa geometrycznego kłaczków osadu i modelowania ich aktywności powierzchnioweł. Wówczas aktywność powierzchniowa kłaczków w modelu powinna być większa niż w urządzeniu technicznym o liczbę razy określoną liniowym współczynnikiem skali. Podstawowe parametry procesu nie mają wartości stałej, lecz zmieniają się np. w zależności od prędkości przepływu i temperatury wody surowej. Złożoność tych zagadnień zmusza do oddzielnego – etapowego prowadzenia badań modelowych tak hydraulicznych, jak i technologicznych. Stad modele technologiczne do wstępnych badań cząstkowych odbiegają zazwyczaj pod względem kształtu i wyglądu od urządzeń technicznych, nie zachowując w stosunku do nich nawet podobieństwa geometrycznego. Istotne jest tutaj zachowanie podobieństwa przebiegu procesów fizykochemicznych w skali doświadczalnej i w skali technicznej. Model do pełnych badań technologicznych musi natomiast spełniać wszystkie kryteria podobieństwa hydraulicznego.

5.2. Matematyczny opis efektu usuwania zawiesin

Efekt usuwania zanieczyszczeń w osadnikach kontaktowych wyraża się najczęściej zdolnością tych urządzeń do redukcji zawiesin lub mętności. Ze względu na pośredni charakter pomiaru mętności, który nie zawsze dostarcza pełnych informacji, np. Tate i Trussell [130] proponują przy ocenie skuteczności i optymalizacji procesów urządzeń do oczyszczania wody stosowanie techniki zliczania cząstek.

Proces flokulacji w osadnikach kontaktowych związany jest z hydrodynamicznymi i technologicznymi warunkami pracy tych urządzeń, z których wynika powiązanie koagulacji powierzchniowej z objętościową [65]. Stąd też właściwe wydaje się łączne porównywanie efektów uzyskiwanych w wyniku jednego i drugiego procesu przy uwzględnieniu zarówno parametrów fizycznych, jak i chemicznych charakteryzujących oba te procesy.

Bez względu na rodzaj uzdatnianej wody, metodę koagulacji i typ osadnika kontaktowego efekt usuwania miarodajnego wskaźnika jest więc funkcją parametrów chemicznych i fizycznych, tj.: stężenia początkowego tego wskaźnika, rodzaju i dawki reagentów, odczynu wody i jej temperatury, potencjału elektrokinetycznego i gradientu prędkości mieszania.

Można zapisać, że

 $E = f(C_{p}, D_{p}, pH, T, \S, G)$ (136)

Znaczenie poszczególnych parametrów występujących we wzorze (136) omówiono wcześniej (rozdz. 1.5).

Do oceny ilościowej efektywności procesu koagulacji stosuje się wiele metod i wzorów matematycznych uzależniających efekt redukcji domieszek np. w zależności od:

- stężenia początkowego miarodajnego wskaźnika i dawki koagulantu [94, 96, 126 :

$$E_j = f(C_p, D_j)$$
(137)

lub w postaci wykładniczej

$$\frac{C_p - C_k}{D_j} = A_o - C_p^n \tag{138}$$

Model ten umożliwia określenie skutecznej dawki koagulantów(przy optymalnym odczynie procesu koagulacji) w przedziale stężeń < C_p, C_k > dla n ≠ 1 według wzoru:

$$D = \frac{1}{A_{o}(n-1)C_{k}^{n-1}} \left[1 - \left(\frac{C_{k}}{C_{p}}\right)^{n-1} \right]$$
(139)

lub dla n = 1

$$D = \frac{1}{A_0} \ln \frac{C_p}{C_k}$$

(140)

- 127 -

- stężenia początkowego, dawki koagulantu i parametrów flokulacji [3]:

$$\frac{C}{C_p} = -5,94 + 2,38 t - 0,012\omega^2 + 1,72\omega - 0,0085 t . D - - 0,015 t\omega + 3,9 D^{0,5} - 0,018 D^2$$
(141)

W celu uzyskania niezbędnych parametrów występujących we wzorze (141) konieczne są badania w skali technicznej. Testowe badania laboratoryjne nie są w stanie oddać złożoności procesów, z jakimi mamy do czynienia w osadnikach kontaktowych przy ocenie efektów technologicznych. Wynika to z faktu prowadzenia badań nad koagulacją i sedymentacją w tzw. koagulatorach [13, 64], których konstrukcja nie jest w stanie odwzorować rzeczywistych warunków kinetyki flokulacji i sedymentacji. Łączny efekt pracy osadników kontaktowych jest funkcją tworzenia i rozpadu cząstek kłaczkowatych, co w najbardziej ogólny sposób ujmuje zależność:

W większości urządzeń modelowych, w jakich wykonuje się pomiary laboratoryjne procesu koagulacji, zasadniczą wadą jest brak przepływu wody, a przez to odmienny niż w skali technicznej sposób i czas dozowania reagentów oraz przebieg kinetyki flokulacji i sedymentacji. Pomocny może się tutaj okazać model przepływowy wielokomorowy Argamana [4] umożliwiający modelowanie efektów technologicznych komór flokulacji, stanowiący pewną analogię do osadników kontaktowych. Przeprowadzone na tym modelu badania dowiodły słuszności sformułowanego równania, że dla m komór reaktora stosunek stężenia zawiesin dopływających C_p do wypływających z m-tej komory - C_m da się opisać następującą zależnością:

$$\frac{C_{p}}{C_{m}} = \frac{(1 + K_{A} G \frac{t}{m})^{m}}{1 + K_{B} G^{2} \frac{t}{m} \sum_{i=1}^{m-1} (1 + K_{A} G \frac{t}{m})^{i}}$$
(142)

Stałe K_A i K_B można wyznaczyć za pomocą aparatury badawczej stanowiącej pojedynczy reaktor przedziałowy, według wzoru:

$$\frac{C_{p}^{1}}{C_{1}^{1+1}} = \frac{1 + K_{A} G \frac{t}{m}}{1 + K_{B} G^{2} \frac{t}{m}}$$
(143)

Uzyskane wyniki prac eksperymentalnych umożliwiły z dużym przybliżeniem określenie stałych do wzorów teoretycznych, na podstawie których przewidziano działanie prototypu. W przypadku osadników kontaktowych o jednostajnym natężeniu przepływu Kastalskij i Minc [44] podają równanie opisujące efekt usuwania zawiesin według relacji:

$$\frac{C_k}{C_p} = e^{\frac{b \cdot C_{wo}}{W_p}} \cdot 1$$

Parametr b zależny od fizykochemicznych właściwości wody i zawiesin, np. dla wód mętnych, wynosi około 0,4, zaś dla koagulowanych mało mętnych barwnych wód około 0,8 (wyznaczany doświadczalnie).

(144)

Wynika stąd, że określenie efektu usuwania zawiesin w osadnikach kontaktowych o jednostajnym natężeniu przepływu jest o wiele łatwiejsze aniżeli w przypadku urządzeń z wewnętrzną cyrkulacją osadu, gdzie konstrukcja i parametry eksploatacyjne mieszadła wpływają na stopień wykorzystania energii wprowadzonej do układu. W tym celu potrzebny jest dokładny model urządzenia uwzględniającego warunki hydrodynamiczne przepływu wody i parametry realizowanego w nim procesu.

Znana jest również i stosowana praktycznie metoda [26] przewidywania pracy urządzeń flokulujących, umożliwiająca określanie takich parametrów, jak: współczynnik dyfuzji i wykorzystania pojemności, określanie funkcji rozkładu przestrzennego kłaczków w zależności od ich wielkości hydraulicznych oraz obliczanie parametrów powstałych i osadzonych cząstek kłaczkowatych. Metoda ta wymaga badań hydraulicznych na modelu urządzenia oraz obliczeń w następującej kolejności:

- określenie parametrów hydraulicznych modelu,
- badanie procesów flokulacji przy zadanym gradiencie prędkości i określenie funkcji rozkładu przestrzennego kłaczków,
- obliczanie parametrów procesu osadzania kłaczków.

Z przytoczonych przykładów wynika, że zagadnienie planowania efektów technologicznych osadników kontaktowych jest nadal otwarte i wymaga badań poszukiwawczych nad uproszczonym modelem do badań technologicznych, umożliwiającym modelowanie podstawowych parametrów procesu i ocenę efektów technologicznych. Podobnie, badanie procesu techniką pozorowania na maszynach cyfrowych wymaga matematycznego opisu wielkości fizycznych w postaci funkcyjnej przebiegu procesu z podaniem zmiennych decyzyjnych i parametrów procesu.

6. WNIOSKI

6.1. Wnicski o charakterze poznawczym

 W pracy dokonano matematycznego opisu przepływów w warstwie zawiewieszonego osadu, wyznaczając równania różniczkowe bilansów masy. pęcu i energii.

 Wyznaczono kryteria podobieństwa umożliwiające modelowanie przepływów w warstwie zawieszonego osadu.

3. Wypracoweno metodykę badań modelowych umożliwiającą poprawę warunków hydraulicznych przepływu wody w osadnikach klasycznych i kontaktowych z wykorzystaniem kanału hydraulicznego, modeli przestrzennych, snemometrii laserowej i maszyny cyfrowej. Połączenie problematyki aksperymentu w postaci fizykalnego modelowania i pomiaru pola prędkości z matematycznym obliczaniem toru cząstki ogranicza uproszczenia i niepewność założeń do obliczeń matematycznych do minimum, na jakie pozwala obecny stan wiedzy i możliwości eksperymentowania w kreju. Ułatwi to dobór i projektowanie tej grupy urządzeń oraz podniesie poziom prac badawczych i projektowych.

6,2. Wnioski o charakterze utylitarnym

1. W wyniku badań modelowych akcelatore nad rozdziałem strug wody w strefie sedymentacji wypracowano kształt ekranu kierująco-rozdzielającego (Patent PRL nr 172816), ograniczający wynoszenie do odpływu drobnych zawiesin w wyniku przenoszenia zaburzeń związanych z cyrkulacją osadu na strefę klarowania. Wielkość zaburzeń w tej strefie w wyniku cyrkulacji osadu powodowana jest wówczas tylko ilościę wody kierowanej do odpływu, a nie, jak było dotychczas, całą objętościę osadu recyrkulowanego. Sprawność hydrauliczna badanego akcelatora wzrasta (w przyjętym do badar zakresie) z 2 = 47-79% do 2 = 69-94%.

2. Badania modelowe akcelatora wykazały spadek sprawności hydraulicznej urządzenia przy wzroście prędkości dopływu wody do strefy sedvmentacji i krotności recyrkulacji osadu.

3. Badania pulsatora w kanale hydraulicznym wykazły:

 duży wpływ kształtu zewnętrznego kieszeni osadowych na warunki hydrauliczne przepływu wody w strefie klarowania i osadu zawieszonego. Najlepszym z badanych okazał się kształt zewnętrzny kieszeni osadowej wyprofilowany w postaci ściany nachylonej pod kątem 70-90⁰ u podstawy,

- pulsacja uniemożliwia powstawanie dużych wirów i pól martwych, a sprzyja tworzeniu bardzo drobnych zawirowań, korzystnych dla pracy pulsatora,
- znaczący wpływ na warunki przepływu wody w strefie klarowania ma rodzaj drenażu i sposób odbioru wody (drenaż płytowy sprzyja rozprzestrzenianiu się większej liczby pól martwych i wirów do strefy klarowania aniżeli drenaż rurowy).

4. Na podstawie pomiarów pół prędkości anemometrem laserowym na modelu wycinkowym pulsatora po symulacji numerycznej z użyciem maszyny cyfrowej wyznaczono trajektorie ruchu cząstek, ich średnice zastępcze i gęstość cząstek, które zostaną zatrzymane w warstwie zawieszonego osadu lub uniesione do odpływu. Wynika stąd np., że przy prędkości początkowej od 0,5 do 10 mm/s i gęstości $P_z = 1030 \text{ kg/m}^3$ tylko cząstki mniejsze, tj. do około 30 µm, są transportowane w strumieniu 2-fazowym poprzez strefę klarowania do odpływu. Cząstki większe (cięższe), powyżej 50 µm, w ogóle nie uczestniczą w ruchu, pozostając w warstwie zawieszonego osadu. Istnieje natomiast zbiór cząstek, które oderwane od warstwy osadu poruszają się ruchem względnym w płynącej wodzie, jednak nie osiągają części odpływowej urządzenia i opadają z powrotem do strefy osadu.

5. Akcelatory nadają się do oczyszczania wód trudnych, o zmiennym w czasie składzie wody surowej, temperaturze i obciążeniu hydraulicznym. W stosunku do pulsatorów są eksploatacyjnie elastyczniejsze, technologicznie i hydraulicznie sprawniejsze i oszczędniejsze zarówno inwestycyjnie, jak i eksploatacyjnie. Wadą akcelatorów jest wynoszenie do odpływu naj-drobniejszych zawiesin na skutek przenoszenia zaburzeń związanych z cyrkulacja osadu na strefę klarowania.

6.3. Kierunki dalszych badań

Jako kierunki dalszych badań wymienić należy:

 Badania nad optymalizacją kształtu oraz warunków hydrodynamicznych przepływu wody w akcelatorach i pulsatorach z wykorzystaniem anemometrii laserowej.

 Prowadzenie prac w kierunku optymalizacji procesów uzdatniania wody w osadnikach kontaktowych.

LITERATURA

- Abramow N.N.: Wodosnabżenije. Izdatielstwo Literatury po stroitielstwu, Moskwa 1967.
- [2] Aitken M.E.: Reflections on Sedimentation Theory and Practice. Effluent Water Treatment Journal I, II. 4, 5, 1967.
- [3] Al-Layla N.A., Middlebrooks E.I.: Optimum Values for Operational Variables in Turbidity Removal, Water and Sewage Works, 8, 1974.
- [4] Argaman Y.A.: Pilot ~ Plant Studies of Flocculation. JAWWA 12, 1971.
- [5] Aulich J., Rogala R.: Charakterystyka pracy pulsatora typu lewarowego w klarownikach z zawieszonym osadem, GWiTS, 3, 1970.
- Badziak M.: Badania nad koagulacją wody w klarownikach o nierównomiernym natężeniu przepływu. Łódź 1970 (maszynopis).
- [7] Badziak M.: Metoda klarowania wody zastosowana w wodociągu Sulejów Łódź. Mat. Konf. "POLWOD-78", Łódź 2978.
- Bernard J.: Les traitements tertiaires des eaux usees. Techniques et Sciences Municipales 4, 1972.
- [9] Biprotosp: Praca badawcza nad urządzeniami do oczyszczania ścieków dla potrzeb typizacji. Komory dwufunkcyjne. Gliwice 1965.
- Biuro Projektów Przemysłu Naftowego: Akcelatory badania modelowe do części mechanicznej, Kraków 1962.
- [11] Bluwsztein M.M.: Powyszenije effiektiwnosti raboty oczistnych soorużenij wodoprowoda. Izdatielstwo Litieratury po stroitielstwu, Moskwa 1977.
- [12] Błażejewski M., Grzybek J.: Badania nad optymalizacją procesu koagulacji w urządzeniach z zawieszonym osadem. IKS, Poznań 1976, maszynopis.
- [13] Błażejewski M., Grzybek J., Jakubowski P.: Określenie warunków hydraulicznych koagulacji wybranych wód powierzchniowych. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1980.
- [14] Braun W., Zappernick V.: Wasseraufberitungsversuche mit dem Schlammkontaktverfahren. Wasserwirtschaft - Wassertechnik, t. 12, 6, 1962.
- [15] Brzuchański E.: Akcelatory. Projekt wstępny typizacji. Materiały dydaktyczne III Politechniki Krakowskiej, Kraków 1974.
- [16] Brzuchański E.: Akcelatory do uzdatniania wody. Mat. konf. "Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", Poznań 1976.
- [17] Bulkai L.: A viztisztitrasban alkalmazott deritok technologiai vizsgalataval nyert tapasztalatok, Vizügyj Közlemenyek "VITUKI", Budapest 1971.
- [18] Burdych J.: Vyzkum pomeru proudeni ve vtoku do kruhove usazovaci nadrze. Vodni hospodarstvi, 1, 1962.
- [19] Camp T.R.: American Society of Cyvil Engineers 9, 1953.
- [20] Camp T.R.: Floc Volume Concentration, JAWWA, 6, 1968.
- [21] Christ W.: Die Wasserreinigung nach dem Schlammkontaktverfahren. Wasser - Wirtschaft - Technik, t. 10, 3, 1960.
- [22] Cywiński B. i inni: Oczyszczanie ścieków miejskich. Arkady, Warszawa 1972.

- [24] Dolejs P.: Effects of Temperature, Coagulant Dosage and Rapid Mixing on Particle - Sice Distribution Envir. Prot. Eng., 1, 1983.
- [25] Edeline F.: Representation du comportement des boues activées en sédimentation et fluidisation. La Tribune de Cebedeau, 244, 1964.
- [26] Epsztejn S.I., Muzykina Z.S., Zasławskij W.M.: Prognozirowanije raboty otstojnych soorużenii s predwaritielnoj flokulacei wzwesi. Wodosnabżenije i Sanitarnaja Tiechnika, 1, 1983.
- [27] Fischer G.: Beitrag zum Schwebefilterverfahrens eine Wirkungsweise bei der Enteisung von Grundwasser. Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 4, 1967.
- [28] Fuks N.A.: Mechanika aerozolej. Izd. Akademii Nauk SSSR, Moskwa 1955.
- [29] Geisenheiner A., Wyrwich M., Hoffmann A.: Verbesserte Betriebskontrolle von Sedimentationsanlagen durch Nutzung faseroptischer Sensoren. Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 2, 1984.
- [30] Girardot P.L.: Les nouvelles instalations de traitemant d'eau potable de la bankieue parisierme. La technique de l'eau et de l'assainissement, 250, 1967.
- [31] Glinicki Z., Roman M.: O metodzie badań zbiorników przepływowych przy pomocy wskaźników. GWiTS, 3, 1960.
- [32] Glinicki Z.: Teoria działania klarowników z zawieszonym osadem jej powstawanie i rozwój w ZSRR. GWITS, 10, 1967.
- [33] Gorbis E.Z.: Tiepłoobmen i gidromiechanika dispersnych skwoznych potokow. Energija, Moskwa 1970.
- [34] Gould B.W.: Podobnost pri modelach pre ryskum sedimentacie. Vodohospodarsky Casopis, t. 16, 4, 1968.
- [35] Gould B.W.: Physical Models and Pilot Operation in Treatment Plant Design. Effluent Water Treatment Journal, t. 21, 2, 1981.
- [36] Grochulska-Segal E.M., Kowal A.L., Sozański M.M.: Modelowanie hydrauliki pulsatorów dla oceny wstępnego klarowania wody. Mat. konf. "Metody fizykochemiczne oczyszczania wody i ścieków", Lublin 1979.
- [37] Harris H.S., Kaufman W.I., Krone R.B.: Orthokinetic Flocculation in Water Purification. Journal of the Sanitary Engineering of Civil Engineers, ASCE, 12, 1966.
- [38] Heidrich Zb., Roman M., Tabernacki J., Zakrzewski J.: Urządzenia do uzdatniania wody. Zasady projektowania i przykłady obliczeń. Arkady, Warszawa 1980.
- [39] Hrabalek A.: Praktyczne wykorzystanie właściwości kłaczkowatej zawiesiny w chemicznym procesie uzdatniania wody. GWiTS, 10, 1971.
- [40] Hudson H.E.: Physical Aspects of Flocculation, JAWWA, 7, 1965.
- [41] Ide T., Kataoka K.: A New Development in Sludge Blanket Clarifiers. Water Services, t. 84, 1012, 1980.
- [42] Jarmoliński A., Schuck H.: Wyniki badań nad uzdatnianiem wody przemysłowej przy zastosowaniu akcelatorów. Gospodarka Wodno-Sciekowa 2, 1968.
- [43] Johnstone R.E., Thring M.W.: Instalacje doświadczalne, modele i metody powiększania skali, Warszawa 1960.
- [44] Kastalskij A.A., Minc D.M.: Podgotowka wody dla pitiewogo i promyszlennogo wodosnabżenija. Gosudarstwiennoje Izdatielstwo "Wysszaja Szkoła". Moskwa 1962.
- [45] Kawula J., Kuś K., Motowidło J.: Badania modelowe kształtu komór osadowych pulsatora. Archiwum Ochrony Środowiska PAN, Ossolineum 2, 1980.

- [45] Kiepal A.J., Nawrocka E., Wolf M.: Wstępna eksploatacja pulsatorów w latach 1971-1972 na Wodociągu Centralnym w MPWiK w Warszawie. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1973.
- [47] Kiepal A.J.: Zasadnicze zmiany technologiczne w osadnikach. GWiTS, 1, 1978.
- [48] Kittner H.: Die Anwendung des Schlammkontaktverfahrens zur Wasseraufbereitung in der Deutschen Demokr. Republik. Wasser – Wirtschaft – Technik, t. 10, 3, 1960.
- [49] Klaczko W.A.: Erfahrungen beim Bau und Betrieb von Schlammkontaktanlagen zur Wasseraufbereitung in der USSR. Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 3, 1960.
- [50] Klaczko W.A., Lebiediewa N.S., Jeryszew J.P.: Ułuczszenije raboty oswietlitielej. Wodosnabżenije i Sanitarnaja Tiechnika, 11, 1970.
- [51] Klaczko W.A., Apielcin I.E.: Oczistka prirodnych wod. Izdatielstwo Litieratury po stroitielstwu, Moskwa 1971.
- [52] Klute R., Hahn H.H.: Laboruntersuchungen uber den Einflus der Art des Energieeintrages auf der Flockungs – Vorgang, Vom Wasser, 43, 1974.
- [53] Kłosowski J.: Oczyszczanie wody za pomocą pulsatorów. Przegląd Informacyjny. Wodociągi i Kanalizacja, IGK, Warszawa, 2, 1967.
- [54] Knoppert P.L., Oskam G., Vreedenburgh E.G.: An overview of European water treatment practice. JAWWA 11, 1980.
- [55] Kobozjew I.S.: Tonkostojnyje moduli na oczistnoj stancji. Żyliszczno-Komunalnoje Choziajstwo, 3, 1980.
- [56] Koskowski R.: Szczelinowy osadnik z zawieszonym osadem. Gospodarka Wodna, 11/12, 1973.
- [57] Kostrzewa E., Błażejewski M.: Badania nad modelem pulsatora. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1971.
- [58] Kostrzewa E., Maruniewicz A.: Akcelatory w procesie uzdatniania wody. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1980.
- [59] Kowal A.A.: Ustalenie pojemności czynnej osadnika za pomocą znaczonej fali przepływu. GWiTS, 10, 1960.
- [60] Kowal A.L.: Badania nad możliwością równomiernego rozdziału wody w poprzecznym przekroju osadnika o przepływie poziomym w celu usprawnienia jego pracy. Archiwum Hydrotechniki, VIII, 1961.
- [61] Kowal A.L., Mackiewicz J.: The Effect of Water Temperature on the Course of Alum Coagulation of Colloidal Particles in Water, Environment Protection Engineering, 1, 1975.
- [62] Kowal A.L., Maćkiewicz J., Sozański M.M.: Pomiary potencjału elektrokinetycznego w technologii koagulacji wody. GWiTS, 1, 1975.
- [63] Kowal A.L.: Technologia wody, Arkady, Warszawa 1977.
- [64] Kowal A.L., Sozański M.M.: Podstawy doświadczalne systemów oczyszczania wód: sedymentacja, koagulacja, filtracja. Zeszyty Naukowe Polit. Wrocł., Inżynieria Sanitarna, 1977.
- [65] Kowal A.L., Mackiewicz J.: Technological aspects of sludge blanket coagulation. Environment Protection Engineering, 1-4, 1982.
- [66] Koziorowski B.: Nowe kierunki oczyszczania wody we Francji, Gospodarka Wodna, 7, 1961.
- [67] Kożynow W.F.: Oczistka pitiewoji tiechniczeskoj wody. Izdatielstwo Litieratury po stroitielstwu, Moskwa 1971.
- [68] Kucharski J., Moniuszko A.: Oczyszczanie ścieków przemysłowych metodą koagulacji. WNT, Warszawa 1967.
- [69] Kulskij Ł.A.: Tieorieticzeskoje osnowy i tiechnołogia kondicyjonirowanija wody. Naukowa Dumka, Kijów 1971.

- [71] Kuś K.: Wpływ systemów zasilania klarowników na ich sprawność hydrauliczną. Zeszyty Naukowe Polit. Śl., Inżynieria Sanitarna 19, 1976.
- [72] Kuś K.: Ekran kierująco-rozdzielający strugi wody w akcelatorze. Patent PRL 172816.
- [73] Kuś K.: Badania modelowe nad określeniem sprawności hydraulicznej klarowników. Zeszyty Naukowe Polit. Sl. Inżynieria Sanitarna 21, 1979.
- [74] Kuś K., Umiński J.: Optymalizacja kształtu i parametrów pracy urządzeń do koagulacji i klarowania wody. Mat. konf. "Problemy optymalizacji systemów wodociągowo-kanalizacyjnych", Łódź 1980.
- [75] Kuś K.: Charakterystyka i pomiar prędkości pozornej w klarownikach. Zeszyty Naukowe Polit. Śl. Inżynieria Sanitarna, 22, 1981.
- [76] Kuś K. i inni: Ustalenie optymalnych typów i technologii uzdatniania wody pitnej oraz wybór odpowiedniej aparatury i urządzeń w zależności od istniejących i przewidywanych źródeż zaopatrzenia. PR-7, temat 05.01.18, Polit. Śl., t. VII, Gliwice 1981.
- [77] Kuś K., Litwinowicz A.: Wpływ jakości wody i niektórych parametrów pracy akcelatorów na skuteczność ich działania. GWiTS, 11-12, 1982.
- [78] Kuś K., Mazurek E., Piechurski F.: Wpływ konstrukcji drenażu na warunki przepływu wody w pulsatorze. Archiwum Ochrony Srodowiska PAN, Ossolineum, 1-4, 1982.
- [79] Kuś K., Litwinowicz A.: Wpływ wykonawstwa i eksploatacji na pracę akcelatorów. GWiTS, t, 1983.
- [80] Kuś K., Umiński J.: Badania, studia i opracowanie zaleceń do wytycznych projektowania i eksploatacji akcelatorów. PR-7, temat 05.07.09, Polit. Śl., Gliwice 1985.
- [81] Kuś K., Matuszczak Z.: Badania ekonomiczne pulsatorów i akcelatorów pracujących w tych samych warunkach. Zeszyty Naukowe Polit. Śl., Inżynieria Środowiska, 25, 1985.
- [82] Kuś K., Matuszczak Z.: Analiza kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych pulsatorów i akcelatorów. Mat. konf. "Intensyfikacja zaopatrzenia w wodę miast i osiedli", Wisła 1985.
- [83] Kuś K.: Wpływ gradientu prędkości na pracę osadników kontaktowych. Ochrona Środowiska, Wrocław 463/2, 1985.
- [84] Kuś K., Kozubowski K.: Wpływ wykonawstwa i eksploatacji na pracę pulsatorów. GWiTS, w druku.
- [85] Lachert E., Królikowski W.: Zastosowanie znaczników do badań sprawności hydraulicznej urządzeń do oczyszczania ścieków. Gospodarka Wodna 4, 1972.
- [86] Lates M.: Etude hydraulique experimentale d'un modele sous pression pour decanteur vertical pour eaux residuaires. La Tribune du Cebedeau, 242, 1964.
- [87] Landau L., Lifszyc E.: Mechanika ośrodków ciągłych. PWN, Warszawa 1958.
- [88] Leistungssteigerungen von Rohrwasseraufbereitungsbecken durch Anwendung des Schlammkontaktverfahrens. Rundschau aus Wissenschaft und Praxis. Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 3, 1960.
- [89] Leviel R.L.: Rozważania na temat sposobów oczyszczania wód powierzchniowych. Sympozjum Polsko-Francuskie Gospodarki Wodnej. IGK, Warszawa 1964.
- [90] Lutyński I.: Elektrostatyczne odpylanie gazów, WNT, Warszawa 1965.

-

[91] Mackrele S. i inni: Beobachtungsergsergebnisse an einer halbetechnischen Versuchsanlage zur Wasseraufbereitung nach dem Flokenwirbelschichtverfahren. Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 11, 1957.

- [93] Mackiewicz J.: Rola potencjału elektrokinetycznego w wybranych procesach oczyszczania wody. Archiwum Ochrony Srodowiska, PAN, Ossolineum, 2, 1980.
- [94] Mackiewicz J., Sozański M.M.: Modeling of the Effects of the Coagulation Process. Environment Protection Engineering, 1, 1980.
- [95] Mackiewicz J., Sozański M.M.: Podstawy inżynierii procesowej i systemowej w oczyszczaniu wód. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1980.
- [96] Mackiewicz J., Sozański M.M.: Matematyczna interpretacja wyników badań efektywności procesu koagulacji, Archiwum Ochrony Srodowiska, PAN, Ossolineum, 1, 1984.
- [97] Márkus G.: Wasseraufbereitungsanlage "Melyeterv" Das Gas und Wasserfach, 115, 1974.
- [98] Meins W.: Flockenbildung in Rohrstrecken. GWF Gas Wasserfach, t. 121, 2, 1980.
- [99] Mierzwiński S., Nawrocki W., Pałasz J., Piotrowski J.: Zastosowanie fizykalnego modelowania w pracach nad zmniejszeniem uciążliwości źródeł pylenia. Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej, Ogrzewanie i Wentylacja, 6, Arkady, Warszawa 1976.
- [100] Mierzwiński S., Pałasz J., Baranowski A., Turyk D.: Badania ruchu ziaren pyłu w części konwekcyjnej komory paleniskowej kotła flui~ dalnego w aspekcie doboru jej kształtu. Problem resortowy RI.5, Polit. Sl., Gliwice 1984.
- [102] Miller D.G.: Sedimentation. Areview of published work. Water and Water Engineering. February 1964.
- [103] Minc D.M.: Tieoreticzeskije osnowy tiechnologii oczystki wody. Izdatielstwo Litieratury po stroitelstwu, Moskwa1964.
- [104] Muszkalay L., Vagas I.: Modification of the Tracer Measuring Method in Settling Basins. Sewage and Industry, Wastes 9, 1958.
- [105] Müller L.: Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli, PWN, Warszawa 1983.
- [106] Nigmatulin R.I.: Osnowy miechaniki geterogennych sred. Nauka, Moskwa 1978.
- [107] Olszewski W.: Osadniki wielostrumieniowe. Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej, Wodociągi i Kanalizacja, 5, 1975.
- [108] Olszewski W.: Badania charakterystyki hydraulicznej i efektu działania modelowego osadnika wielostrumieniowego. Archiwum Ochrony Środowiska, PAN, Ossolineum 2, 1980.
- [109] Orzechowski Z.: Rozpylanie cieczy. WNT, Warszawa 1976.
- [110] Paciukow A.I.: Issledowanije raboty oswietlitiela s miechaniczeskoj mieszałkoj, Wodosnabżenije i Sanitarnaja Tiechnika, 4, 1977.
- [111] Paciukow A.I.: Oswietlitel s miechaniczeskoj mieszałkoj. Wodosnabżenije i Sanitarnaja Tiechnika, 4, 1980.
- [112] Pałasz J.: Kształtowanie przepływów gazów w piecach przemysłowych z uwagi na zmniejszenie ilości unoszonego pyłu, Polit. Śl., Gliwice 1978 (maszynopis).
- [113] Piotrowski J.: Zagadnienia modelowania okapowych ujęć gazów odlotowych z elektrycznych pieców łukowych. Polit. Sl., Gliwice 1973 (maszynopis).
- [114] Pląskowski Z., Roman M.: Konstrukcje budowlane stacji uzdatniania wody, Arkady, Warszawa 1979.

- [115] Popp P., Walther H.J., Böhler E.: Die physikalisch-chemischen Grundlagen der Wasserbehandlung durch Flockung. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, t. 23, 2, 1973.
- [116] Prospekty firmy Degremont: The Superpulsator, The Pulsator, 1980.
- [117] Richard Y.: La decantation lamellaire et ses nouveaux développements. Techniques et sciences municipales - L'eau, 3, 1974.
- [118] Rohlich G.A., Murphy K.L.: Flocculation. Water and Sewage Works, October 1961.
- [119] Rozenbaum R.B., Todes O.M.: Dwiżenije teł w psewdooziżennom słoje. Izd. Leningradskowo Uniw., Leningrad 1980.
- [120] Rybicki S.: Wyniki eksploatacyjne działania akcelatorów uzdatniających wodę rzeczną o zmiennej zawartości zawiesin. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1980.
- [121] Siedow L.I.: Analiza wymiarowa i teoria podobieństwa w mechanice. WNT, Warszawa 1968.
- [122] Sieradzon J.: Technologiczne aspekty modelowania urządzeń do wstępnego uzdatniania wody. IGK, Przegląd Informacyjny Wodociągi i Kanalizacja 4, 1973.
- [123] Sieradzon J.: Technologiczne aspekty szybkiego mieszania w akcelatorach GWiTS, 4, 1977.
- [124] Sieradzon J.: Uzdatnianie wód powierzchniowych w akcelatorach w warunkach zimowych. GWiTS, 4, 1978.
- [125] Sieradzon J.: Urządzenia i stacje doświadczalne pilotujące działanie osadników i klarowników. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1980.
- [126] Sozański M.M.: Tematyka i metody badań współczesnej technologii wody. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1980.
- [127] Sozański M.M.: Problematyka badawcza w projektowaniu i eksploatacji zakładów uzdatniania wody. Mat. konf. "Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi", Poznań 1984.
 - [128] Sprawozdania z prac wstępnych i rozruchowych oraz pomiarów gwarancyjnych i eksploatacyjnych instalacji do dekarbonizacji, koagulacji i demineralizacji wody z lat 1971-1981. Energopomiar, Gliwice (maszynopisy).
 - [129] Szyfrin S.M.: Sowriemiennyje sposoby miechaniczeskoj oczistki stocznych wod, Gosstrojizdat, Leningrad - Moskwa 1956.
 - [130] Tate C.H., Trussell R.R.: The Use of Particole Counting in Developing Plant Design Criteria. JAWWA, 12, 1978.
 - [131] Tesarik I. i inni: Die hydrodynamischen Grundlagen der Wasseraufbereitung nach dem Flockenwirbelschichtverfahren. Wasserwirtschaft--Wassertechnik, 11, 1958.
 - [132] Tesarik I.: Die hydrodynamische Theorie Wirkelschichten. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 4, 1959.
 - [133] Tesarik I.: Geschwindigkeiten in Flockenwirbelschichten und Aufenthaltszeiten in Schlammkontaktanlagen. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 6, 1963.
 - [134] Tesarik I., Vostrgil J.: Recherches surletraitement des eaux dans un decanteur a voille de boue a l'aide de polycoagulants. La Tribune de Cebedeau, tj. 21, 290, 1968.
 - [135] Treanor A.I.: Removal of Organic Matter by Floc Colloids onto Sludge Particles. Water treatment feature, October 1975.
 - [136] Troskolański A.T.: Hydromechanika. WNT, Warszawa 1967.
 - [137] Umiński J.: Wpływ niektórych typów mieszadeł i reaktorów na wyniki wolnego mieszania w procesie koagulacji zanieczyszczeń wody w świetle wybranych kryteriów, Polit. Śl., Gliwice 1977 (maszynopis).

- [138] Umiński J., Kuś K.: Niektóre zagednienia badań nad hydrauliką urządzeń wielofunkcyjnych do koagulacji i klarowania wody. Mat. I konf. nauk. "Metody hydraulicznego obliczania sieci i urządzeń wodociągowych", Poznań 1979.
- [139] Umiński J.: Wpływ niektórych typów mieszadeł i reaktorów na wyniki wolnego mieszania w procesie koagulacji zanieczyszczeń wody. Archiwum Ochrony Środowiska, PAN, Ossolineum, 2, 1980.
- [140] Umiński J., Kuś K. i inni: Badania sprawności hydraulicznej akcelatora w skali technicznej. Mat. konf. "Intensyfikacja zaopatrzenia w wodę miast i osiedli", Wisła 1981.
- [141] Vrale L., Jorden R.M.: Rapid Mixing in Water Treatment, JAWWA, 1, 1971.
- [142] Walker J.D.: High-Energy Floculation Units, JAWWA, 11, 1968.
- [143] Willis R.M.: Tubular settlers a technical revier JAWVA, 8, 1978.
- [144] Weicer J.I., Minc D.M.: Wysokomolekularnyje flokulanty w procesach oczistki wody. Stroizdat, Moskwa 1975.
- 145 Wilmański K.: Termodynamika fenomenologiczna, PWN, Warszawa 1974.
- [146] Winohradnik J.: Zastosowanie pulsatorów w technologii uzdatniania wody na SUW w Goczałkowicach. Materiały konferencyjne, Wisła 1981.
- [147] Wyness D.K.: The Helical Flow Reactor Clarifier: An Innovation in Water Treatment. JAWWA 10, 1979.
- [148] Yao K.M.: Theoretical Study of High rate Sedimentation, Journal Water Pollution Control, 42, 2, 1970.
- [149] Zierep J.: Kryteria podobieństwa i zasady modelowania w mechanice płynów. PWN, Warszawa 1978.

MODELOWANIE PRZEPŁYWÓW W OSADNIKACH KONTAKTOWYCH DO UZDATNIANIA WODY

Streszczenie

W pracy przeanalizowano, matematycznie opisano oraz przedyskutowano zjawiska i procesy zachodzące w akcelatorach i pulsatorach celem określenia podstaw modelowania przepływów i oceny efektów technologicznych tych urządzeń. Praca ta pomyślana została przede wszystkim jako studium możliwości wykorzystania badań modelowych w kierunku poznania i ulepszenia ich konstrukcji dla ograniczenia do minimum ilości cząstek kłaczkowatych wynoszących do odpływu.

Dokonano matematycznego opisu przepływów w warstwie zawieszonego osadu, wyznaczając równania różniczkowe lokalnych bilansów masy, pędu i energii oraz wyprowadzono na ich podstawie odpowiednie kryteria podobieństwa.

Zaproponowano metodykę badań osadników kontaktowych łączącą problematykę eksperymentu w postaci fizykalnego modelowania i pomiaru pola prędkości z matematycznym obliczaniem toru cząstki. Przedstawiono przykład takich badań na modelu pulsatora, dokonując pomiaru pól prędkości anomometrem laserowym, wyznaczając trajektorię ruchu cząstek oraz współczynniki nierównomierności rozkładu prędkości. Metoda ta ogranicza uproszczenia i niepewność obliczeń matematycznych do minimum, na jakie pozwala obecny stan wiedzy i możliwości eksperymentowania w kraju.

Przedstawionp metody, kierunki i przykłady badań własnych akcelatorów i pulsatorów celem dostarczenia niezbędnych danych do ich projektowania z punktu widzenia kształtu i warunków hydrodynamicznych przepływu wody. Zasadność podjęcia tej tematyki poparto analizą dotychczasowych prac z zakresu modelowania osadników kontaktowych i oceną wpływu jakości wykonawstwa i poziomu eksploatacyjnego oraz występujących uszkodzeń na sprawność hydrauliczną i efekt technologiczny pracy tych urządzeń.

Opisano powiązania hydrauliczno-technologiczne rzutujące na efekt technologiczny pracy osadników kontaktowych.

Wnioski końcowe zredagowano w trzech grupach tematycznych, tj.: poznawczej, utylitarnej i kierunków dalszych badań.

моделирование течений в контактных осветлителях обрабатывакцих воду

Резюме

Проведено анализ, математическое описание, а также обсуждение явлений и процессов проходящих в осветлителях типа "акселейтор" и "пульсатор" с целью определения основ моделирования течений и оценки технологических эффектов этих установок.

Работа представляет собой обсуждение возможностей модельных исследований для улучшения конструкции осветлителей, для ограничения количества хлопьев выношеных в отводе.

В математическом описании течений в зоне взвешенного осадка определено дифференциальное уравнение местных балансов массы, количество движения и энергии. Были введены соответствующие критерии подобия.

В работе предлагается методика исследований контактных осветлителей связывающая проблемы опыта в качестве физического моделирования и измерения поля скоростей с математическим расчётом траектории хлопьев. Представлен пример таких исследований на модели осветлителя типа "пульсатор". Расчёты пслей скорости были проведены с помощью лазерного анемометра, была также определена траектория движения хлопьев и коэффициенты неравенства распределения скоростей. Этот приём ограничивает упродения и ненадёжность математического расчёта до минимума.

Представлены методы и примеры собственных исследований осветлителей с целью определения данных для их проектирования с точки зрения формы и гидродинамических условий течения воды.

Необходимость решения этих проблем обуславляется анализом существующих до сих пор работ о моделировании контактных осветлителей и оценкой влияния качества производства, эксплуатационного уровня, а также выступающих повреждений на гидравлический к.п.д. и технологический эффект работы этих установок.

В работе обсуждаются гидравлико-технологические взаимосвязи, влияющие на технологический эффект контактных осветлителей.

Заключительные выводы разделено на три тематические группы: познавательные, утилитарные и направления будущих исследований.

FLOW MODELLING IN CONTACT SETTLING TANKS FOR WATER TREATMENT

Summary

Analysis, mathematical description of and discussion on phenomena and processes ocurring in accelerators and pulsators have been carried out to define the basis of flow modelling and estimation of technological effects of these devices. The thesis is supposed to be as, first of all, a study on possibilities of model testings' application towards their better construction, and for limiting the number of flocculent particles floating towards the outlet.

Flows in the layer of suspended settlings have been mathematically described with formulating a differential equation of local balances of mass, momentum and energy and suitable probability criteria have been derivated on the basis of the balances.

Methodology of contact settling tanks' testings which connects physical modelling and measuring velocity field with mathematical calculation of particle trajectory has been put forward. Such testings have been presented on the example of a pulsator making measurements of velocity fields by means of laser anemometer, calculating a trajectory of particles movement and coefficients of non-uniformity of velocity distribuion. This method limits simplification and uncertainty of mathematical calculations to minimum which is allowed by present state of knowledge and possibilities of experiments in Poland.

Methods, directions and examples of own testings of accelerators and pulsators have been presented to give necessary data for their designing from the point of view of the shape and hydrodynamic conditions of water flow. They are supported by the analysis of previous research of contact settling tanks' modelling and by estimation of influence of performance quality, exploitation level and occuring damages on hydraulic efficiency and technological effect of work of these devices.

Hydraulic-technological connections influencing technological effect of contact settling tanks performance have been described.

Final conclusions are divided into three groups, i.e.: cognitive group, utilitarian group and group of further research directions.