

Yurii RYBACHUK, Andrzej JODŁOWSKI

Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa,
Architektury i Inżynierii Środowiska
al. Politechniki 6, 90-924 Łódź
e-mail: andrzej.jodlowski@p.lodz.pl

Model matematyczny procesu koagulacji/flotacji ciśnieniowej (DAF) oparty na prawie zachowania pędu

Mathematical Model of the Coagulation/Dissolved Air Flotation (DAF) Process Based on the Conservation of Momentum

The launch of new pressure flotation installations (DAF) and the optimization of existing installations of this type requires a number of laboratory and pilot plant tests. Such studies are expensive and labor-intensive. Using the principles of computer modelling it would be possible to minimize both costs and time of conducting research. This paper presents a proposal to use the developed mathematical model of the DAF process based on the law of conservation of momentum (impulse) and the Navier-Stokes equation. The model allows to describe the kinetic relations between the water stream, air bubbles and aggregates arising as a result of coagulation of surface water pollution. The model takes into account the exchange of impulses between different phases as a result of laminar and turbulent flow. The developed model was used to prepare a simulation computer program. In order to check the applicability of the model, laboratory tests were carried out under static conditions, the results of which demonstrated the suitability of the model for analyzing the effectiveness of solid phase removal from water in the coagulation/dissolved air flotation process used in surface water treatment.

Keywords: surface water treatment, coagulation/flocculation, dissolved air flotation, computer modelling

Wstęp

Flotacja ciśnieniowa (ang. *Dissolved Air Flotation* - DAF) pozwala oddzielić cząstki fazy stałej od fazy ciekłej dzięki wykorzystaniu zjawiska powstawania pęcherzyków powietrza w obszarze styku dwóch faz. Początkowe zastosowanie procesu DAF odnotowano w przemyśle przetwórstwa minerałów. Później proces DAF był stosowany w oczyszczaniu ścieków i uzdatnianiu wody. Szczególne zalety tego procesu stwierdzono w oczyszczaniu wód powierzchniowych o niskiej mętności zanieczyszczonej organizmami fitoplanktonowymi lub substancjami humusowymi, zwłaszcza w okresach niskiej temperatury, kiedy obserwuje się niską skuteczność procesu sedymentacji [1-3]. Pierwsze aplikacje metody DAF do oczyszczania wód powierzchniowych miały miejsce w Skandynawii w latach 60.

ubiegłego wieku. Od tamtego czasu popularność DAF zaczęła rosnąć. Tę tendencję można wytłumaczyć istotnymi zaletami, a głównie możliwością stosowania znacznych obciążeń hydraulicznych, nawet $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, co pozwala na budowę instalacji zajmujących niewiele miejsca.

Należy zauważyć, że mechanizm separacji stosowany w DAF jest stosunkowo trudny do opisu z teoretycznego punktu widzenia. Mechanizm usuwania fazy stałej (domieszek wód powierzchniowych poddanych uprzedniej koagulacji) opiera się na interakcji pomiędzy kłaczkami (agregatami) i pęcherzykami powietrza pojawiającymi się w strefie kontaktu w wyniku nagłego spadku ciśnienia cieczy nasyconej powietrzem. Tego rodzaju interakcja jest bardzo dynamiczna. Co prawda, istnieją modele matematyczne pozwalające opisać proces interakcji i separacji w takich systemach, ale pomimo wielu zalet, posiadają one również słabe strony.

Głównym celem tego artykułu jest zaproponowanie modelu matematycznego, który pozwala symulować proces DAF. Wykorzystując podstawowe zależności matematyczne, zaproponowano algorytmy umożliwiające opracowanie programu komputerowego, który pozwala przeprowadzać symulacje DAF, a także umożliwia uzyskanie wyników w czasie rzeczywistym. W celu sprawdzenia wiarygodności proponowanych modeli przeprowadzono badania laboratoryjne. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem symulacji komputerowej porównano z wynikami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych oraz przedstawiono wyniki tego porównania.

1. Część teoretyczna

Do najważniejszych modeli matematycznych pozwalających na opisanie zjawisk przebiegających w procesie DAF można zaliczyć „single collector collision” (SCC) [4, 5] oraz „koagulację heterogeniczną” (HC) [6].

Model SCC zakłada, że oddziaływanie pęcherzyków i cząstek stałych polega na działaniu sił pomiędzy pęcherzykami powietrza i agregatami (kłaczkami) oraz adhezji pęcherzyków na powierzchni kłaczek. Takie formy interakcji opierają się na analizie sił i przypadków adhezji jednego pęcherzyka z jednym agregatem. Rozszerzenie takiej analizy do analizy procesu przebiegającego w określonej objętości cieczy pozwala na opisanie liczby cząstek usuniętych z wody w wyniku flotacji. Model ten może być stosowany w przypadku, gdy powierzchnia pęcherzyków jest duża, zjawisko wychwytywania pęcherzyków na powierzchni agregatów jest bardzo znaczące, a reżim przepływu systemu wielofazowego jest laminarny. Model SCC jest bardziej odpowiedni w przypadku opisu procesu w pionowych kolumnach flotacyjnych lub w przypadku klasycznej instalacji i jej zastosowania do opisu procesów zachodzących w strefie separacji. W przypadku przepływu turbulentnego, co często obserwuje się w strefie kontaktu, lepiej jest zastosować model HC uwzględniający ładunki elektryczne agregatów i pęcherzyków. Pęcherzyki powietrza mają ujemny ładunek elektryczny, zaś agregaty mają obojętny ładunek elektryczny, w wyniku czego dochodzi do ich połączenia.

Pomimo że zastosowanie wymienionych modeli pozwala określić skuteczność procesu DAF na podstawie wartości przyjętych parametrów, to modele te nie są

idealne. Na przykład nie uwzględniają one możliwości niszczenia kłaczków poprzez oddziaływanie agregatów i pęcherzyków, co prowadzi do zmniejszenia prawdopodobieństwa oddziaływania pęcherzyków i kłaczków. Również nie opisano interakcji między pęcherzykami (wymiana pędu między pęcherzykami w wyniku ich zderzeń) i wpływu takich zjawisk na układ. Również te modele opierają się na przyleganiu pęcherzyków do powierzchni kłaczków i dalszym ich powstawaniu w reaktorze. Takie podejście nie jest wystarczająco dokładne. Obserwuje się nie tylko zjawisko adhezji pęcherzyków i kłaczków, ale także zjawisko oderwania pęcherzyków od agregatów oraz wymiany pędu pomiędzy pęcherzykami, co powoduje, że proces ten jest złożony i dynamiczny.

Analizując system flotacji, można łatwo zauważyć, że składa się on z trzech faz, a mianowicie: wody, powietrza i fazy stałej (kłaczek). Wymienione fazy aktywnie współdziałają między sobą. Przykładem takiej interakcji są siły między kłaczkami i pęcherzykami powietrza, zderzenia między pęcherzykami, opór wody podczas wznoszenia się kłaczków i pęcherzyków. W wyniku takiej interakcji zachodzi wymiana pędu między fazami.

Aby określić wymianę pędu między fazami, można wykorzystać równania Naviera-Stokesa. W przypadku takiego układu konieczne jest ich rozwiązanie dla każdej fazy:

– dla fazy wodnej:

$$\frac{\partial U_w}{\partial t} + \frac{\partial U U_w}{\partial x} + \frac{\partial U V_w}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial t}{\text{Re}} \Delta U_w \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} + \frac{\partial U V_w}{\partial x} + \frac{\partial V V_w}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial t}{\text{Re}} \Delta V_w \quad (2)$$

– dla powietrza:

$$\frac{\partial U_p}{\partial t} + \frac{\partial U U_p}{\partial x} + \frac{\partial U V_p}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial t}{\text{Re}} \Delta U_p + F_{wp}^x - F_{op}^x \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_p}{\partial t} + \frac{\partial U U_p}{\partial x} + \frac{\partial U V_p}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial t}{\text{Re}} \Delta V_p + F_{wp}^y - F_{op}^y \quad (4)$$

– dla fazy stałej:

$$\frac{\partial U_c}{\partial x} = v_{sed}^x + \frac{\partial U_a}{\partial x} \quad (\text{jeśli zachodzi zderzenie, jeśli nie, to } \frac{\partial U_c}{\partial x} = 0) \quad (5)$$

$$\frac{\partial U_c}{\partial y} = v_{sed}^y + \frac{\partial V_a}{\partial y} \quad (\text{jeśli zachodzi zderzenie, jeśli nie, to } \frac{\partial U_c}{\partial y} = 0) \quad (6)$$

– równanie ciągłości:

$$\frac{1}{\delta} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial U_w}{\partial x} + \frac{\partial V_w}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

W równaniach (1)-(7) Re jest liczbą Reynoldsa, F_{wp}^x , F_{op}^x , F_{wp}^y , F_{op}^y oznaczają siły wyporu i oporu wzdłuż osi x i y , N , a v_{sed}^x i v_{sed}^y określają prędkość sedimentacji wzdłuż osi x i y , m/s. Siłę wyporu można wyrazić zgodnie z równaniem:

$$F_{wp} = V_p (\rho_w - \rho_p) g \quad (8)$$

w którym V_p to objętość pęcherzyka, m^3 , ρ_w i ρ_p oznaczają gęstość wody i powietrza, kg/m^3 , a g to przyspieszenie ziemskie, m/s^2 . Siłę oporu opisuje równanie:

$$F_{op} = \xi S \frac{v_{wzn}^2}{2} \rho_w \quad (9)$$

w którym v_{wzn} oznacza prędkość wznoszenia pęcherzyka, m/s; S oznacza powierzchnię kontaktu pęcherzyka, m^2 ; a ξ to współczynnik oporu środowiska wodnego uwzględniający liczbę Froude'a Fr i opisany wzorem:

$$\xi = \frac{8}{3} \frac{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_w}\right)}{Fr} \quad (10)$$

Wobec tego w systemie równań Naviera-Stokesa uwzględniona jest wymiana pędu między wodą i powietrzem, a w prostszej postaci prędkość wznoszenia agregatów w kolejnym punkcie generowanej w ramach obliczeń siatki komory flotacji. Przypadek skutecznego oddziaływania pęcherzyków z agregatem opisany jest prawdopodobieństwem zderzenia (równanie (6)) i randomizacji. W przypadku gdy wzrost agregatów nie występuje w aktualnym punkcie siatki, prędkość agregatów jest równa szybkości sedimentacji:

$$v_{sed} = \frac{d^2 (\rho_a - \rho_w)}{18\mu} \quad (11)$$

Na podstawie rozwiązanego układu równań Naviera-Stokesa dla danej siatki i wybranych parametrów procesu DAF uzyskano rozkład prędkości dla każdej fazy. Znajac wartość prędkości agregatów wzdłuż osi x i y (v_a^x i v_a^y), można określić kierunek wektora prędkości agregatów v_a :

$$v_a = \sqrt{v_a^x + v_a^y} \quad (12)$$

Wektor prędkości agregatów v_a skierowany w dół (sedymentacja) występuje w przypadku, gdy $v_a^x < 0$ i $v_a^y < 0$ lub $v_a^x > 0$ i $v_a^y < 0$. W tym przypadku stężenie zanieczyszczeń nie wzrasta, co oznacza, że zjawisko ich usuwania w tym obszarze nie występuje.

Znając liczbę punktów siatki, w których prędkość skierowana jest ku górze $N_{agr}^{gór}$, a także ogólną liczbę punktów siatki N_{PS} , możliwe jest obliczenie skuteczności usuwania agregatów z wody:

$$E = \frac{N_{agr}^{gór}}{N_{PS}} \quad (13)$$

Drugą funkcją modelu jest sprawdzanie przypadku niszczenia agregatów, która zależy od pędu pęcherzyków działającego na agregat. Pęd pęcherzyków F_{pp} jest równy:

$$F_{pp} = F_{wp} - F_{res} \quad (14)$$

Jeśli $F_{pp} > F_a$, to następuje zniszczenie agregatów i zmniejsza się powierzchnia kontaktu, przy czym F_a to wytrzymałość agregatu, którą można określić za pomocą badania z użyciem mikroskopu atomowego lub modelu matematycznego pozwalającego na określenie takiego parametru, wyrażana w N).

Jak już wspomniano wcześniej, mechanizm oczyszczania z wykorzystaniem procesu DAF opiera się na wznoszeniu ku powierzchni cieczy kłaczków dzięki przyłączonym pęcherzykom powietrza. Z tego wynika, że proces oczyszczania zależy od dwóch innych procesów (koagulacji/flokulacji i saturacji wody powietrzem), a wyniki tych procesów są uzyskiwane przy użyciu wybranych parametrów. Skuteczność oczyszczania metodą DAF zależy zatem od parametrów geometrycznych agregatów kłaczków i ich wytrzymałości, które można określić za pomocą mikroskopii atomowej [7] lub modelowania za pomocą modeli umożliwiających symulację procesu flokulacji i uzyskanie takich informacji [8].

Skuteczność uzdatniania wody zależy również od wielkości pęcherzyków powstających w strefie kontaktu. Wielkość pęcherzyków zależy z kolei od ciśnienia zastosowanego podczas nasycania wody powietrzem. Należy zauważyć, że liczba pęcherzyków jest również bardzo ważna w tym przypadku, ponieważ ma ona wpływ na efektywność ich oddziaływania z kłaczkami. Liczba pęcherzyków może być określona za pomocą stopnia recyrkulacji R , który określa objętość nasyconej wody wprowadzanej do reaktora [9, 10]:

$$R = \frac{100Q_s}{Q_w} \quad (15)$$

We wzorze (15) Q_s oznacza natężenie przepływu strumienia wody saturowanej, a Q_w natężenie dopływu wody z komory flokulacji zawierającej agregaty domieszki wody po koagulacji do komory flotacji.

Z reguły używa się wartości R w zakresie 5÷20%. Znając natężenie przepływu wody nasyconej powietrzem, możliwe jest określenie liczby pęcherzyków generowanych w komorze flotacji zgodnie z definiowanym krokiem czasowym:

$$N_p = \frac{V_{\text{pow}}}{V_p} \quad (16)$$

gdzie V_{pow} to objętość rozpuszczonego powietrza, m^3 , a V_p to objętość jednego pęcherzyka o promieniu R_b , m^3 :

$$R_b = \frac{2\sigma}{P_s - P_n} \quad (17)$$

gdzie σ to napięcie powierzchniowe wody, kg/s^2 ; P_s oznacza ciśnienie w saturatorze, Pa , a P_n ciśnienie w punkcie wprowadzenia powietrza do komory flotacji, Pa .

Ponieważ proponowana metoda symulacji procesu DAF opiera się głównie na prawie wymiany pędu, konieczne jest określenie prawdopodobieństwa zderzeń kłaczków (agregatów) z pęcherzykami powietrza (P_{zd}):

$$P_{zd} = 1 - \frac{S_a N_a}{S_p N_p} \quad (18)$$

gdzie S_a to powierzchnia kontaktu kłaczków, m^2 ; N_a to liczba kłaczków w jednostce objętości wody; S_p określa powierzchnię kontaktu pęcherzyków; a N_p oznacza liczbę pęcherzyków w jednostce objętości cieczy.

Wartości S_a i N_a można zdefiniować za pomocą analizy mikroskopowej lub modelu matematycznego.

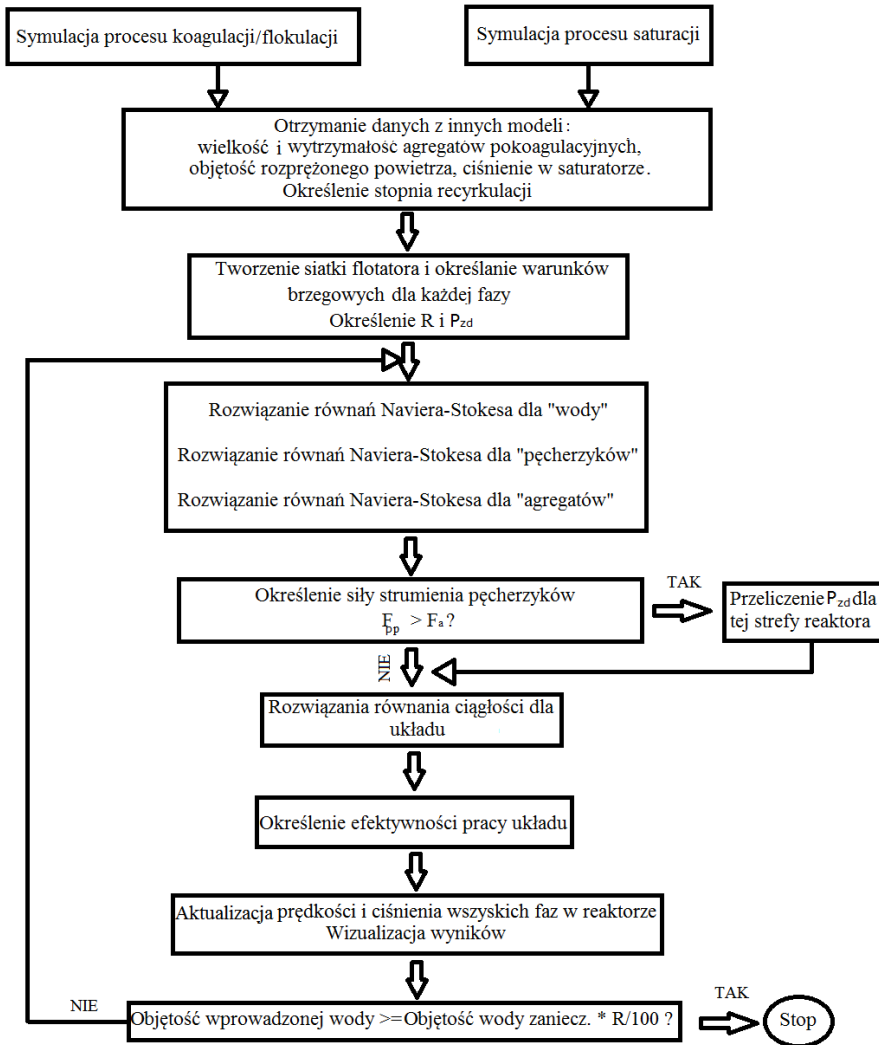
Należy również zauważyć, że wartość P_{zd} jest lepsza do określenia dla wybranej objętości wody, a nie dla całej objętości komory flokulacji, ponieważ stężenie tych faz podczas procesu obróbki można zmienić.

2. Metodyka badań

2.1. Komputerowa symulacja procesu

Biorąc pod uwagę opisane powyżej zależności, algorytm działania modelu przedstawiono na schemacie z rysunku 1 (model statycznego reaktora flotacyjnego). Algorytm zawiera dwie gałęzie. Pierwszą z nich jest określenie rozmiarów i wytrzymałości agregatów oraz objętości gazu rozpuszczonego podczas saturacji. Określenie rozmiarów i wytrzymałości agregatów przeprowadzono za pomocą modelowania matematycznego [8]. Drugą gałęzią jest dystrybucja gazu, którą można określić zgodnie z prawem Henry'ego. Parametry te są niezbędne, aby wyznaczyć prawdopodobieństwo zderzeń między agregatami i pęcherzykami. Wytrzymałość agregatów jest z kolei niezbędna dla określenia przypadków niszczenia. Następnym

ważnym krokiem w tym algorytmie jest określenie kształtu siatki flotatora. Siatka została użyta do rozwiązywania równań Naviera-Stokesa w celu wyznaczenia rozkładu prędkości faz wynikowych. Należy również zauważyć, że algorytm przedstawiony na rysunku 1 ma charakter cykliczny i jego działanie zatrzymuje się po osiągnięciu określonego stopnia recyrkulacji. Dzieje się tak ze względu na statyczny charakter instalacji laboratoryjnej, która została wykorzystana w celu potwierdzenia możliwości stosowania modelu matematycznego.



Rys. 1. Algorytm symulacji DAF (stacyjny reaktor flotacyjny)

Fig. 1. DAF simulation algorithm (static installation)

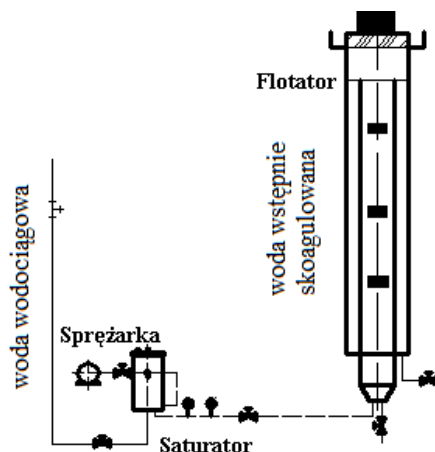
Proponowane zależności i algorytmy matematyczne przetłumaczono na program komputerowy. Do napisania programu wykorzystano język programowania C++

i framework Qt. Do wizualizacji wyników symulacji została wykorzystana biblioteka OpenGL. Wszystkie symulacje przeprowadzono z użyciem procesora Intel Core i7-4650U 1,7÷2,3 GHz (2 rdzenie, 4 wątki) i karty graficznej NVIDIA GeForce 840M. Technologia wielowątkowa nie została użyta do napisania tej części programu.

2.2. Badania laboratoryjne

W celu sprawdzenia wykonalności proponowanych metod przeprowadzono badania laboratoryjne. Wodę do badań przygotowano z wody wodociągowej zanieczyszczonej ekstraktem kwasów humusowych w dawce $13,6 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, co pozwoliło uzyskać barwę wody $69 \text{ mg Pt}/\text{dm}^3$ i mętność 12 NTU, pH wody wynosiło $7,0 \pm 0,1$. Koagulację prowadzono z zastosowaniem siarczanu glinu ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$).

Konfigurację instalacji zastosowanej w badaniach przedstawiono na rysunku 2. Funkcję komory flokulacji i jednocześnie komory flotacji pełniła przezroczysta rura ze szkła organicznego o średnicy 0,8 m i wysokości 2,0 m. Proces mieszania realizowany był z wykorzystaniem mieszadła wykonanego ze stali nierdzewnej napędzanego przez silnik elektryczny umieszczony w górnej części konstrukcji. Po koagulacji/flokulacji oraz saturacji wody przeprowadzono flotację z wykorzystaniem stopnia recyrkulacji (R) w zakresie od 5 do 20% objętości oczyszczanej wody. Zastosowano ciśnienie saturacji od 0,45 do 0,60 MPa.



Rys. 2. Schemat stanowiska wykorzystywanego podczas badań

Fig. 2. Scheme of installation used in laboratory studies

Zbiornik saturatora wykonano ze stali nierdzewnej. Był to zbiornik cylindryczny o średnicy 0,19 m i wysokości 0,35 m. Nasylenie wody przeprowadzono za pomocą sprężarki AMICO 50/2500SF o efektywnej wydajności $0,115 \text{ m}^3/\text{min}$ i maksymalnym ciśnieniu 0,8 MPa. Doświadczenia laboratoryjne prowadzono w temperaturze $20 \pm 22^\circ\text{C}$.

Po przeprowadzeniu oczyszczania wody dokonano oceny jej jakości z wykorzystaniem spektrofotometru Hitachi U-2001 w celu oznaczania barwy wody i mętnościomierza Hach 2100N do oznaczania mętności wody.

3. Wyniki badań i dyskusja

Jako przykład badań laboratoryjnych wybrano przebieg symulacji laboratoryjnej, w której operowano parametrami, takimi jak: dawka koagulantu wynosząca 50 mg Al/dm³; gradient prędkości mieszania 50 obr/min; czas flokulacji 8 min; ciśnienie saturacji wody 0,55 MPa i stopień recyrkulacji (R) wynoszący 15%. W wyniku zastosowania tych parametrów uzyskano wodę oczyszczoną charakteryzującą zmniejszeniem barwy o 85,96% i zmniejszeniem mętności o 68,08%. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań obrazujące skuteczność usuwania substancji powodujących barwę uzdatnianej wody. Wyniki te uzyskano, przyjmując optymalną wartość kontrolowanych parametrów procesu stosowanych w poprzednich seriach badań.

Tabela 1. Wpływ różnych parametrów operacyjnych na skuteczność usuwania barwy, %

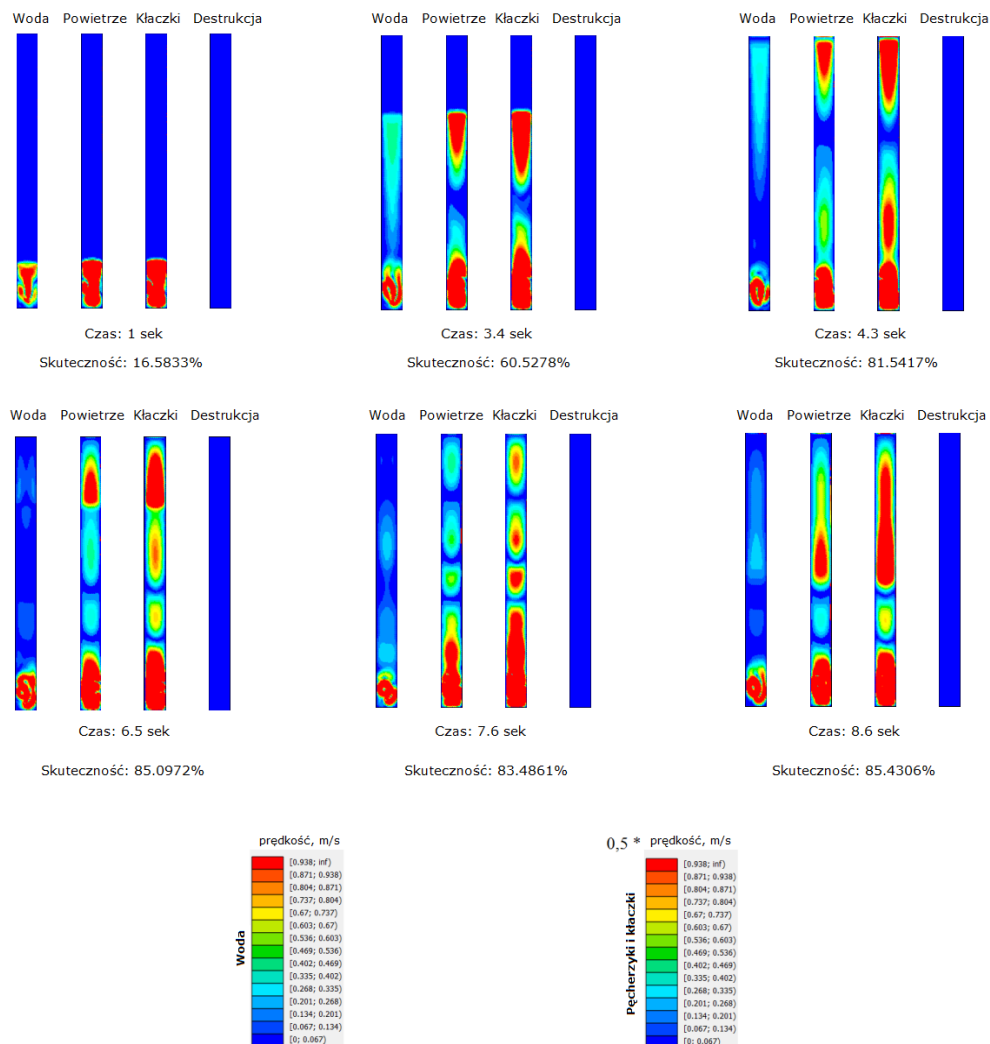
Table 1. Different parameters effect on water color removal, %

Wartość zastosowanego parametru procesowego		Badania laboratoryjne	Symulacja komputerowa
Dawka koagulantu mg Al/dm ³	20	87,1	84,1
	30	87,5	86,2
	40	90,8	87,1
	50	90,9	87,8
	60	89,0	80,5
Prędkość obrotowa mieszadła podczas flokulacji obr/min	20	90,8	85,0
	30	89,5	85,9
	40	89,0	87,1
	50	89,9	86,3
	60	88,6	86,4
Czas flokulacji min	5	89,9	87,8
	8	90,3	86,4
	10	99,9	85,0
	12	87,7	85,2
	14	86,1	84,3
Stopień recyrkulacji (R) %	5	36,5	44,4
	10	70,0	70,1
	15	85,9	82,9
	20	91,1	87,7
Ciśnienie saturacji MPa	0,45	87,7	83,1
	0,50	90,3	85,2
	0,55	91,1	87,5
	0,60	90,2	87,1

W badaniach zastosowano optymalną dawkę koagulantu, czas flokulacji wynoszący 5 minut i prędkość obrotową mieszadła 40 obr/min. Dawkę koagulantu określono na 50 mg Al/dm³ i w związku z tym następnym parametrem operacyjnym podany w tabeli 1, czyli prędkość obrotową mieszadła, określono przy dawce koagulantu wynoszącej 50 mg Al/dm³ (i tak dalej). W tabeli 1 podano również wszystkie ważne parametry operacyjne procesu DAF. Możliwość stosowania różnych parametrów

chemicznych i fizycznych podczas symulacji procesu koagulacja/flotacja ciśnieniowa dowodzi elastyczności proponowanego modelu.

Optymalne parametry pracy uzyskane podczas badań laboratoryjnych wykorzystano do komputerowej symulacji procesu. Ten model można stosować przy analizie laminarnych oraz turbulentnych stref komory flotacji. Wyniki tej symulacji komputerowej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Rozkład prędkości faz i skuteczność oczyszczania

Fig. 3. Treatment efficiency and phase velocity distribution

Proponowany model obejmujący analizę przypadków niszczenia agregatów podczas ich interakcji z pęcherzykami powietrza pokazał również, że przy zastosowaniu określonych parametrów nie następuje niszczenie agregatów. Tego rodzaju niszczenia agregatów nie obserwowano również podczas badań laboratoryjnych.

Ponadto należy podkreślić, że opracowany program komputerowy pozwala na wizualizację uzyskanych wyników symulacji w czasie rzeczywistym. Taka opcja pozwala obserwować, jak zmienia się skuteczność oczyszczania podczas procesu flotacji (rys. 3).

W początkowej fazie symulacji czyli w wyniku pojawienia się rozpuszczonego powietrza w kolumnie flotacyjnej stwierdzano niewielką skuteczność oczyszczania, co wiązało się z tym, że w dużej części siatki dyskretyzacji występowała sedymentacja. Wraz z upływem czasu następował wzrost skuteczności oczyszczania wynoszący nawet 80÷88%. Następnie układ osiągał warunki ustalone i dochodziło do stabilizacji faz w reaktorze, a stwierdzona skuteczność oczyszczania wynosiła 77÷87%. Takie zjawiska wykazały dynamikę i odchylenie skuteczności oczyszczania uzyskane przy użyciu zdefiniowanych parametrów operacyjnych, co często można zaobserwować w warunkach rzeczywistych. Taka dynamika skuteczności oczyszczania wyjaśnia warunki turbulencji w komorze flotacji. W niektórych obszarach komory flotacji pojawiają się niepożądane efekty wirowe i ważne staje się równanie (13), które uwzględnia takie zjawiska. Zaproponowany model uwzględnia również przypadki niszczenia agregatów podczas ich zderzeń z pęcherzykami powietrza. Jednak zjawisko niszczenia agregatów nie występuje w kolumnie, co zaobserwowano podczas symulacji komputerowej procesu, z uwagi na niewielką masę pęcherzyków. Niszczenia agregatów nie obserwowano również podczas badań laboratoryjnych.

Wyniki uzyskane podczas realizacji zaproponowanego modelu porównano z wynikami otrzymanymi przy użyciu modelu „zderzeń pojedynczego kolektora” (SCC) [5, 6] i modelu „koagulacji heterogenicznej” (HC) [7, 8]. Instalacja wykorzystywana do weryfikacji proponowanego modelu miała charakter statyczny, ponieważ łączyła strefy kontaktu i separacji. W odniesieniu do tego porównania wymienionych i proponowanych modeli przeprowadzono analizę strefy kontaktu. Autorzy prac [5, 6] przedstawili sprawność strefy kontaktu przy różnych wartościach zmiennych parametrów agregatów (takich jak wielkość i gęstość) oraz różnych parametrach fizycznych (takich jak temperatura otoczenia i skład pęcherzyków powietrza w wyniku zastosowania różnego ciśnienia saturacji). Wartość skuteczności usuwania zanieczyszczeń w strefie kontaktu przy wielkości kłaczków 10 μm mieściła się w zakresie 80÷85% i wzrosła do 95% wraz ze wzrostem wielkości kłaczków do 100 μm . Średnia wielkość kłaczków uwzględniona w naszych badaniach laboratoryjnych i symulacjach komputerowych mieściła się w zakresie 30÷40 μm . W odniesieniu do wyników przedstawionych w tabeli 2 średnia skuteczność oczyszczania mieściła się w zakresie 80÷87%. W modelu HC wyniki modelowania są reprezentowane przez skuteczność usuwania przy różnych wartościach stopnia recyrkulacji.

Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych i badań laboratoryjnych porównano z wynikami uzyskanymi w efekcie zastosowania modelu HC [7, 8] w czasie do 8 sekund symulacji (ze względu na statyczny charakter instalacji zastosowanej w badaniach laboratoryjnych i symulacjach komputerowych). W pierwszej sekundzie symulacji przy podobnym stopniu recyrkulacji skuteczność oczyszczania

nia według modelu HC wynosiła 18%, a według proponowanego modelu wynosiła 16,6% (rys. 3). W czwartym i późniejszych sekundach wydajność usuwania w modelu HC osiągnęła maksimum, które mieści się w zakresie 80÷90%. W proponowanym modelu wydajność oczyszczania na sekundę czwartą i później oscyluje w przedziale 81÷86%. Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, że istnieje różnica między wynikami uzyskiwanymi przy zastosowaniu analizowanych modeli, jednak różnica ta nie jest duża. Należy zauważyć, że równanie (13) koryguje skuteczność oczyszczania, uwzględniając kierunek ruchu fazy stałej w modelowaniu CFD. W związku z tym nie wszystkie przypadki interakcji pęcherzyków i agregatów prowadzą do eliminacji zanieczyszczeń z wody.

Wnioski

1. Proponowany model symulacyjny flotacji ciśnieniowej powietrzem jest układem hybrydowym opracowanym na podstawie koncepcji zachowania pędu podczas zderzeń pomiędzy pęcherzykami powietrza i agregatami powstałymi w wyniku uprzedniej koagulacji oraz prędkości między fazami wyrażanej z wykorzystaniem równań Naviera-Stokesa.
2. Parametry procesu zostały przetestowane, a zaproponowany model matematyczny wykazał wystarczająco dokładne wyniki w przewidywaniu skuteczności oczyszczania w różnych warunkach.
3. Proponowany model symulacyjny charakteryzuje się dużą elastycznością, ponieważ uwzględnia główne parametry mające wpływ na skuteczność flotacji ciśnieniowej, w tym przede wszystkim na parametry dotyczące koagulacji/flokulacji, saturacji i stopnia recyrkulacji.
4. Skuteczność usuwania barwy wody uzyskana w oparciu o model symulacyjny była zbliżona do stopnia usuwania substancji humusowych powodujących barwę wody, jaki uzyskano podczas badań laboratoryjnych, gdy zastosowano te same parametry koagulacji/flokulacji, saturacji i flotacji ciśnieniowej.
5. Wyniki uzyskane w trakcie symulacji komputerowej i wyniki badań laboratoryjnych dowodzą, że proponowany model matematyczny można wykorzystać do symulowania procesu koagulacji i flotacji ciśnieniowej oraz przewidywania jego skuteczności w oczyszczaniu barwnych wód powierzchniowych.

Literatura

- [1] Crossley I., Valade M., A review of the technological developments of dissolved air flotation, *J. Wat. Supply Res. Techn. - AQUA* 2006, 55, 7, 8, 479-491.
- [2] Feke D., Schowalter W., The influence of Brownian diffusion on binary flow-induced collision rates in colloidal dispersion, *J. Coll. Inter. Sci.* 1985, 106, 1, 203-214.
- [3] Heinanen J., Jokela P., Ala-Peijari T., Use of dissolved air flotation in potable water treatment in Finland, *Wat. Sci. Tech.* 1995, 31, 3-4, 225-238.
- [4] Edzwald J., Principles and applications of dissolved air flotation, *Wat. Sci. Tech.* 1995, 31, 3-4, 1-23.

- [5] Edzwald J., Dissolved air flotation and me, *Wat. Res.* 2010, 44, 2077-2106.
- [6] Fukushi K., Tambo N., Matsui Y., A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment, *Wat. Sci. Tech.* 1995, 31, 3-4, 37-47.
- [7] Leito F., Bueno C., Da Róz A., Ziemath E., Oliviera Jr. O., Theoretical models for surface forces and adhesion and their measurement using atomic force microscopy, *Int. J. Mol. Sci.* 2012, 13, 12773-12856.
- [8] Rybachuk Y., Jodłowski A., Computer simulation of the aggregates formation during flocculation process, *E3S Web of Conferences*, 2018, 44, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184400154>
- [9] Haarhoff J., Steinbach S., A model for the prediction of the air composition in pressure saturators, *Wat. Res.* 1996, 30, 12, 3074-3082.
- [10] Haarhoff J., Steinbach S., A comprehensive method for measuring the air transfer efficiency of pressure saturators, *Wat. Res.* 1997, 31, 5, 981-990.

Lodz University of Technology, Faculty of Civil Engineering,
Architecture and Environmental Engineering
al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, Poland
e-mail: andrzej.jodlowski@p.lodz.pl

Streszczenie

Uruchomienie nowych instalacji flotacji ciśnieniowej (DAF) i optymalizacja już istniejących instalacji tego rodzaju wymaga przeprowadzenia szeregu badań laboratoryjnych i pilotowych. Takie badania są kosztowne i pracochłonne. Wykorzystując zasady modelowania matematycznego, można zminimalizować zarówno koszty, jak i czas prowadzenia badań. W niniejszej pracy przedstawiono propozycję wykorzystania opracowanego modelu matematycznego procesu DAF w oparciu o prawo zachowania pędu (impulsu) i równania Naviera-Stokesa. Model pozwala opisać relacje kinetyczne pomiędzy strumieniem wody, pęcherzykami powietrza i agregatami powstającymi w wyniku koagulacji zanieczyszczeń wód powierzchniowych. Model uwzględnia wymianę impulsów między różnymi fazami w wyniku przepływu laminarnego i turbulentnego. Opracowany model posłużył do przygotowania symulacyjnego programu komputerowego. W celu sprawdzenia aplikacyjności modelu przeprowadzono testy laboratoryjne w warunkach statycznych, których wyniki wykazały przydatność modelu do analizy skuteczności usuwania fazy stałej z wody w procesie koagulacja/flotacja ciśnieniowa wykorzystywanym w uzdatnianiu wód powierzchniowych.

Słowa kluczowe: uzdatnianie wód powierzchniowych, koagulacja/flokulacja, flotacja ciśnieniowa, modelowanie komputerowe