

Andrzej Jodłowski

Wpływ wybranych parametrów technologicznych na usuwanie glonów w procesie flotacji

Trudności w usuwaniu glonów w konwencjonalnych układach technologicznych uzdatniania wody sugerują, że flotacja ciśnieniowa może być bardziej efektywną metodą ich separacji niż sedymentacja [6,7,11]. Glony planktonowe są biokoloidami o ujemnym ładunku powierzchniowym, niewielkich rozmiarach i małej gęstości. Zawiesiny glonów są stabilne w wodzie dzięki elektrostatycznemu odpychaniu wywołanemu podwójną warstwą elektryczną, a także hydrofilowości związanej z adsorpcją cząsteczek wody na powierzchni komórek oraz w wyniku adsorpcji makrocząsteczek pozakomórkowych substancji organicznych. Zatem proces separacji, zastosowany w celu usuwania glonów z wody, musi zostać poprzedzony procesem ich destabilizacji [1,3]. Świadczy o tym m.in. niewielka skuteczność usuwania organizmów fitoplanktonowych podczas filtracji [5]. Efektywność flotacji aglomeratów glonowych zależy od wielu czynników, do których należy zaliczyć m.in. liczebność glonów, dawki koagulantów i środków wspomagających, pH wody, czas flokulacji, intensywność mieszania, stężenie objętościowe pęcherzyków powietrza i ich średnicę, stopień recyrkulacji oraz wysokość komory flotacji.

W niniejszej pracy, na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz w oparciu o wybrane modele matematyczne przebiegu aglomeracji i flotacji, określono wpływ warunków destabilizacji i aglomeracji zawiesin glonów oraz parametrów charakteryzujących działanie komory flotacji na efektywność usuwania fitoplanktonu z wody.

Parametry procesu separacji zawiesin metodą flotacji

Układ urządzeń wykorzystywanych do usuwania wysokodispersyjnych zawiesin i koloidów z wody w procesie flotacji ciśnieniowej obejmuje komorę flokulacji, w której przebiega aglomeracja zawiesin oraz komorę flotacji z wydzieloną strefą filtracji, gdzie następuje przyłączanie zaglomerowanych cząstek do pęcherzyków powietrza, oraz strefa separacji, odpowiedzialną za oddzielenie flotującego osadu od wody.

Efektywność aglomeracji koloidów i wysokodispersyjnych zawiesin można przedstawić w postaci równania opartego na pseudokinetycznej zależności pierwszego rzędu, opisującej prędkość zaniku cząstek pierwotnych (N_0/N_o) [10]:

$$\ln(N_0/N_o) = -(4/\pi) \alpha_o \Phi G t_f \quad (1)$$

Stopień aglomeracji cząstek zależy od liczebności cząstek pierwotnych (N_0), cech chemicznych układu charakteryzowanych przez współczynnik stabilności lub inaczej współczynnik efektywności zderzeń (α_o), warunków transportu masy opisanych przez stężenie objętościowe cząstek (Φ) i gradient prędkości ruchu cieczy (G) oraz od czasu flokulacji (t_f).

W określeniu efektywności flotacji ciśnieniowej jako procesu separacyjnego, wyrażonej stosunkiem N_0/N_{co} , można wykorzystać zależność opartą na teorii prawdopodobieństwa zderzeń cząstek z pojedynczym kolektorem [3,4,9]:

$$\ln(N_0/N_{co}) = -1,5 \alpha_{cp} \eta_{og} \Phi_p (H/d_p) \quad (2)$$

Równanie to uwzględnia parametry charakteryzujące proces przyłączania odpowiednio zaglomerowanych cząstek do pęcherzyków powietrza oraz parametry opisujące sam proces separacyjny. Do pierwszej grupy należą: współczynnik efektywności kolizji cząstek z pęcherzykami powietrza (α_{cp}) i ogólne prawdopodobieństwo depozycji cząstek na powierzchni pęcherzyków powietrza (η_{og}). Działanie komory flotacji charakteryzują: stężenie objętościowe pęcherzyków powietrza (Φ_p), wysokość komory flotacji (H) i średnica pęcherzyków powietrza powstających w wyniku rozprężania recyrkulatu (d_p).

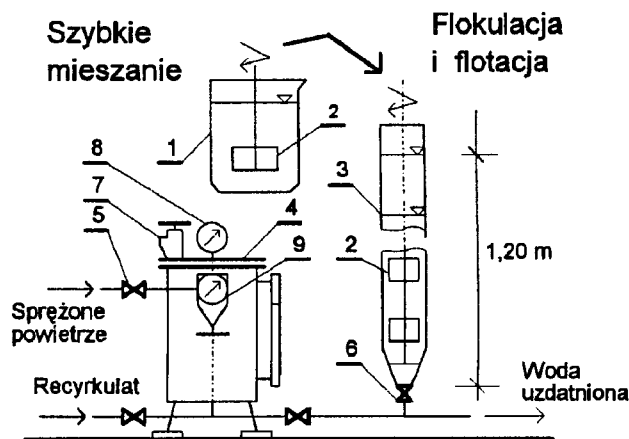
Identyfikacja i określenie roli poszczególnych parametrów zaproponowanych modeli procesów aglomeracji i separacji umożliwiają analizę efektywności usuwania zawiesin glonów z wody podczas flotacji ciśnieniowej.

Metodyka badań

W badaniach wykorzystano zawiesiny zielenic *Chlorophyta*, których hodowlę prowadzono w warunkach laboratoryjnych. Glony namnażano w butlach szklanych o pojemności 20 dm³. Zastosowano pożywkę mineralną Z-8, sprawdzoną podczas wcześniej prowadzonych badań [7]. Hodowlę rozpoczęto inokulując zawartość butli (woda z pożywką) monokulturą glonu *Scenedesmus quadricauda* i równolegle glonami zawartymi w próbach wody pobranej ze Zbiornika Sulejowskiego. Rozwój glonów przebiegał w temperaturze około 20 °C. Źródłem węgla był dwutlenek węgla doprowadzony wraz z powietrzem do medium hodowlanego. Napowietrzanie zapewniało jednocześnie mieszanie zawartości naczyń. Po kilku tygodniach hodowlę prowadzoną w oparciu o materiał pozyskany ze środowiska naturalnego zdominowały zielenice *Ankistrodesmus longissimus* i *Ankistrodesmus falcatus*.

Przed przystąpieniem do badań nad usuwaniem fitoplanktonu z wody pobrano próby zawiesin z naczyń hodowlanych po 7+10 dobach hodowli i rozcieńczono wodą wodociągową

pozbawioną chloru, którą uzyskano w wyniku pozostawienia jej w otwartym naczyniu przez 48 godzin. Stężenie zawieszin glonów doprowadzono do poziomu $8 \cdot 10^4 + 4 \cdot 10^5 \text{ org./cm}^3$. Stopień zanieczyszczenia wody określono dokonując pomiaru liczebności glonów przy użyciu mikroskopu optycznego Biolar i komory Fuscha-Rosenthala. Podatność glonów na koagulację określono na podstawie pomiarów potencjału ζ przy użyciu aparatury firmy Zeta-Meter Inc. Laboratoryjne testy flotacyjne prowadzono przy użyciu układu urządzeń umożliwiających prowadzenie procesu w sposób porcjowy (rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego (1 – komora szybkiego mieszania, 2 – komora flokulacji i flotacji, 3 – mieszadło, 4 – zbiornik saturacji, 5 – zawór odcinający, 6 – zawór trójdrożny, 7 – zawór odpowietrzający, 8 – manometr, 9 – reduktor)

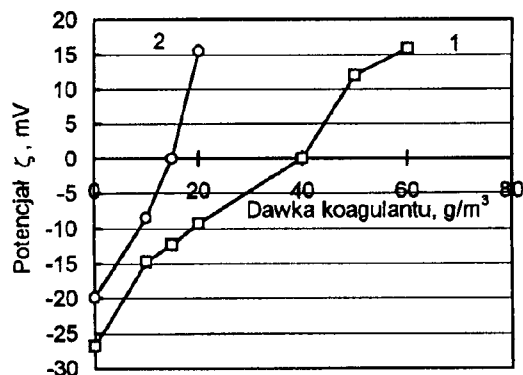
Próbki wody o objętości 1 dm^3 , zawierające zawiesziny glonów, wlane do naczyń spełniających rolę komory szybkiego mieszania, a następnie poddano destabilizacji (koagulacji i korekcie pH lub wstępnemu utlenianiu, koagulacji i korekcie pH), mieszając intensywnie przy użyciu mieszadła laboratoryjnego. Wstępne utlenianie prowadzono dwutlenkiem chloru uzyskanym z reakcji chlorynu sodu i kwasu solnego. Czas utleniania był stały (30 minut), a dawki dwutlenku chloru wynosiły od 0,1 do $0,5 \text{ gClO}_2/\text{m}^3$. Koagulację prowadzono siarczanem glinu przy $\text{pH}=6,5+6,8$. Szybkie mieszanie trwało około 1 minuty (200 obr./min), po czym próbki wody przelano do kolumny stanowiącej jednocześnie komorę flokulacji i flotacji. Komorę tę stanowiła rura szklana o średnicy 40 mm i wysokości 1400 mm, wyposażona w mieszadło wolnoobrotowe z łopatkami umieszczonymi na dwóch poziomach. Wolne mieszanie odbywało się z prędkością 40 obr./min, a jego czas zmieniano podczas badań w granicach od 0 do 15 minut w celu określenia wpływu wielkości aglomeratów na efektywność separacji.

Po zakończeniu wolnego mieszania wprowadzono do dolnej części kolumny wodę nasyconą powietrzem z komory saturacji. Komorę tę stanowił zbiornik ciśnieniowy ze stali nierdzewnej o średnicy 190 mm i wysokości 350 mm. Podczas badań napełniono komorę do połowy wodą wodociagową, a następnie zwiększono ciśnienie, saturując jej zawartość przez 20 minut powietrzem doprowadzonym ze sprężarki. Na ogół stosowano ciśnienie $0,42 \text{ MPa}$. Podczas badań nad wpływem ciśnienia saturacji na efektywność separacji zmieniano jego wartość w granicach $0,30+0,52 \text{ MPa}$. Zastosowano stały stopień recyrkulacji (R) wynoszący 30%, opierając się na wynikach wcześniej przeprowadzonych prac [7]. Próbki wody oczyszczonej pobierano z dolnej części komory po 6+8 minutach separacji.

Przebieg i wyniki badań

Bez wstępnego utleniania

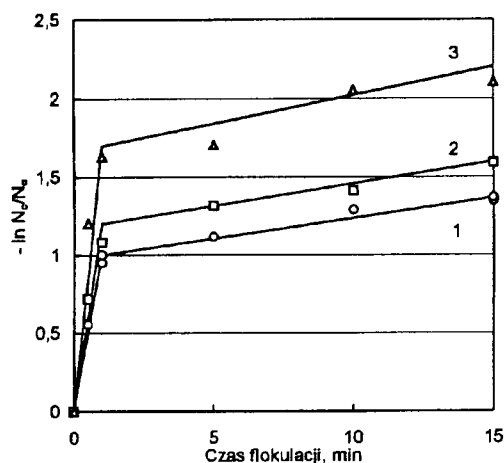
W pierwszej fazie badań określono wartości potencjału elektrokinetycznego zawieszin glonów oraz wpływ koagulantu na ich destabilizację. Doświadczenie przeprowadzono metodą testu porcjowego. Glony w wodzie surowej obdarzone były ujemnym ładunkiem elektrycznym. Komórki *A. falcatus* i *A. longissimus* charakteryzowały się wysokim potencjałem ζ wynoszącym -27 mV . Potencjał ζ cenobiów *S. quadricauda* kształtował się na poziomie -20 mV . Wprowadzenie rosnących dawek siarczanu glinu prowadziło do obniżenia potencjału ζ , osiągnięcia punktu izoelektrycznego i restabilizacji cząstek (rys. 2).



Rys. 2. Wpływ dawek siarczanu glinu na zmiany potencjału elektrokinetycznego (1 – *S. quadricauda*, 2 – mieszanina zielenic *Ankistrodesmus*)

W toku dalszych badań oszacowano wpływ stężenia zawieszin glonów oraz dawek koagulantu i czasu flokulacji na stopień ich aglomeracji. Dobrano wstępnie dawki koagulantu umożliwiające aglomerowanie glonów w zależności od ich zagęszczenia w próbkach wody i prześledzono przebieg ich flokulacji. Doświadczenia prowadzono w próbkach o objętości 1 dm^3 , w jednakowych warunkach hydrodynamicznych. Gradient prędkości wynosił około 10 s^{-1} . W określonych odstępach czasu pobrano ze zlewki próbki wody i przeniesiono je do komory Fuscha-Rosenthala w celu określenia liczebności aglomeratów. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3 w postaci zależności:

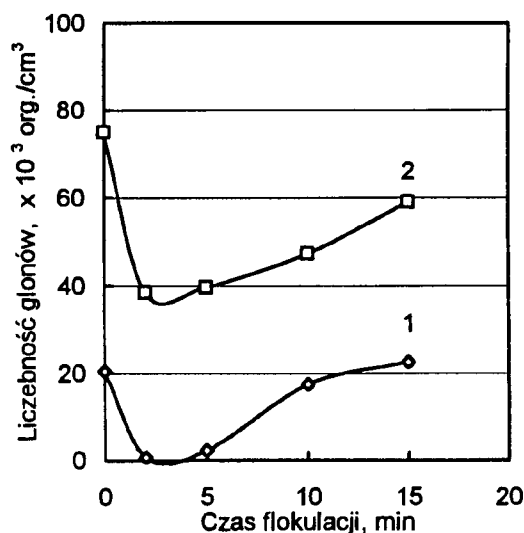
$$\ln(N_e/N_0) = f(t_f) \quad (3)$$



Rys. 3. Kinetyka flokulacji zawieszin glonów *Ankistrodesmus* w zależności od ich stężenia (1 – $1 \cdot 10^5 \text{ org./cm}^3$, $D_k=35 \text{ g/m}^3$, 2 – $2 \cdot 10^5 \text{ org./cm}^3$, $D_k=40 \text{ g/m}^3$, 3 – $4 \cdot 10^5 \text{ org./cm}^3$, $D_k=45 \text{ g/m}^3$)

Stwierdzono, że proces przebiegał dwuetapowo. Zaobserwowano, że najważniejsze były początkowe 2–3 minuty aglomeracji. W tym czasie powstawały wyraźne zespoły organizmów glonowych o niewielkich rozmiarach. W drugiej fazie flokulacji szybkość aglomeracji, a tym samym szybkość zwiększania wielkości aglomeratów, uległa wyraźnemu zmniejszeniu. Zaobserwowano także, że flokulacja przebiegała bardziej efektywnie w wypadku zawiesin o większym stężeniu, czyli przy większych wartościach Φ .

Określenie warunków destabilizacji zawiesin glonów oraz obserwacje dotyczące przebiegu procesu aglomeracji pozwoliły podjąć badania nad wpływem czasu flokulacji (pośrednio wielkości aglomeratów pokoagulacyjnych) na efekty procesu separacji. Oczyszczaniu poddano próbki wody o liczebności glonów $1,3 \cdot 10^5$ org./cm³, w przypadku monokultury glonów *S. quadricauda* i $2 \cdot 10^5$ org./cm³, w przypadku glonów wyhodowanych z wody Zbiornika Sulejowskiego. Dawki koagulantu wynosiły odpowiednio 40 i 50 g/m³. Czas flokulacji zmieniano od 0 do 15 minut. Flotację prowadzono przy stałym ciśnieniu (0,42 MPa). Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 4. Do uzyskania efektywnej flotacji aglomeratów pokoagulacyjnych wystarczyły krótkie czasy flokulacji, około 2–3 minuty, co było zgodne z wynikami wcześniej przeprowadzonych badań na kinetykę flokulacji.

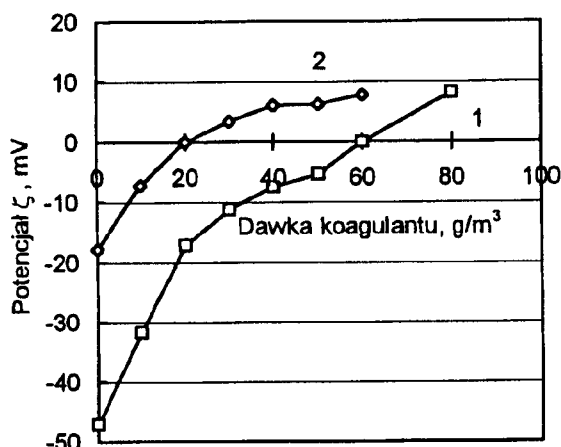


Rys. 4. Wpływ czasu flokulacji na liczebność glonów po flotacji (1 – glony *Scenedesmus*, $D_k=40$ g/m³, 2 – glony *Ankistrodesmus*, $D_k=50$ g/m³)

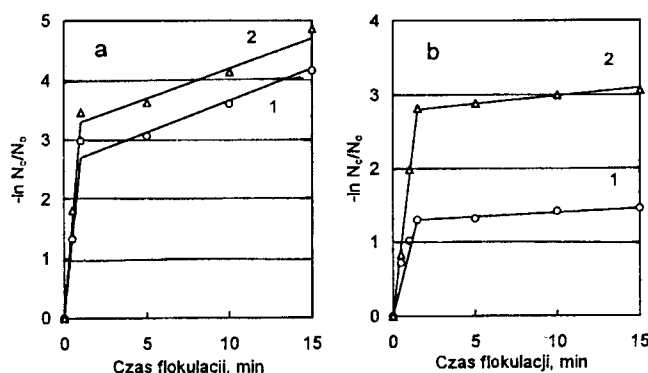
Badania nad wpływem ciśnienia saturacji na efektywność eliminacji zawiesin przeprowadzono zmieniając jego wartość w granicach od 0,30 do 0,52 MPa. Zadowalające wyniki uzyskano przy ciśnieniach powyżej 0,4 MPa, przy czym zwiększenie ciśnienia saturacji powyżej 0,5 MPa nie powodowało wzrostu efektywności procesu.

Ze wstępnym utlenianiem

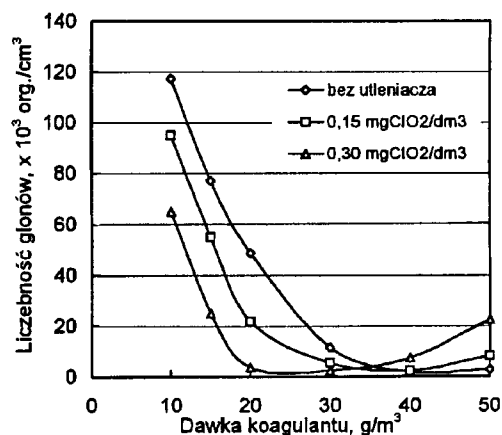
Próby z wykorzystaniem dwutlenku chloru, jako środka ułatwiającego destabilizację, dowiodły możliwości obniżenia potencjału elektrokinetycznego przy mniejszych dawkach koagulantu (rys.5). Zastosowanie wstępnego utleniania wpłynęło także na kinetykę flokulacji, co było szczególnie widoczne w przypadku usuwania glonów pochodzących z hodowli



Rys. 5. Wpływ dawek siarczanu glinu na zmiany potencjału elektrokinetycznego zawiesin glonów *Ankistrodesmus* bez utleniania (1) i po utlenieniu dawką $0,3$ gClO₂/m³ (2)



Rys. 6. Wpływ wstępnego utleniania na przebieg flokulacji zawiesin glonów *Scenedesmus* (a) i *Ankistrodesmus* (b) (1 – bez utleniania, 2 – po utlenieniu dawką $0,3$ gClO₂/m³)



Rys. 7. Wpływ dawek koagulantu na usuwanie glonów *Scenedesmus* z wody po wstępnym utlenieniu dwutlenkiem chloru

mieszanej (rys.6). W wyniku utleniania zawiesin glonów niewielkimi dawkami dwutlenku chloru, przy czasie kontaktu 30 minut, następowała istotna poprawa efektywności ich aglomeracji (rys.7). W wyniku zastosowania koagulacji uzyskano stopień zmniejszenia liczebności cząstek glonów po 5 minutach flokulacji na poziomie 73,1%, natomiast po wprowadzeniu wstępnego utleniania, przy tych samych warunkach prowadzenia aglomeracji, efektywność procesu wzrosła do 94,4%.

Dyskusja wyników

Efektywna separacja organizmów fitoplanktonowych z wykorzystaniem flotacji ciśnieniowej uwarunkowana jest właściwym doбором parametrów technologicznych, obejmujących warunki destabilizacji zawiesin glonów (dawki koagulantu, dawki środków wspomagających, pH), parametry aglomeracji cząstek zawiesin (czas trwania flokulacji, warunki hydrodynamiczne) oraz parametry separacji (ciśnienie saturacji, stopień recyrkulacji). Warunki te zostały ujęte w parametrach równań (1) i (2).

Aglomeracja cząstek, podobnie jak przyłączanie zaglomerowanych cząstek do pęcherzyków powietrza, wymaga destabilizacji zawiesin glonów. Pomiary elektrokinetyczne wykazały, że cząstki glonów obdarzone były znacznym ujemnym ładunkiem elektrycznym. Stabilność cząstek charakteryzowana jest we wzorze (1) współczynnikiem efektywności zderzeń (α_0). Współczynnikiem ten dla cząstek stabilnych jest bliski 0, a dla cząstek całkowicie zdestabilizowanych przyjmuje wartość 1. Tak więc warunki destabilizacji zależne od dawek koagulantu i pH wpływały na wartość α_0 . Badania prowadzono przy pH zapewniającym dobre warunki hydroлізу siarczanu glinu i efektywną destabilizację zawiesin glonów (pH=6,5+6,8) [7]. Także zastosowanie wstępnego utleniania, które miało istotny wpływ na zmiany szybkości procesu, wpływało na wartość tego parametru.

Badania zmian potencjału elektrokinetycznego zawiesin glonów poddanych działaniu dwutlenku chloru dowiodły, że w wyniku utleniania następowało obniżenie ich potencjału ζ , a destabilizacja zachodziła przy mniejszych dawkach koagulantu. Większa wrażliwość na działanie dwutlenku chloru ujawniły wydłużone komórki *Ankistrodesmus falcatus* i *Ankistrodesmus longissimus*, niż uznawane za bardziej odporne na działanie algicydów kolonie *Scenedesmus quadricauda*.

Skuteczne obniżenie stabilności cząstek miało również wpływ na zjawisko przyłączania ich aglomeratów do pęcherzyków powietrza. Miarą efektywności tego etapu przebiegu procesu jest współczynnik α_{cp} występujący w równaniu (2). Flotacja zaglomerowanych cząstek zawiesin przebiegała dobrze, gdy zostały one wcześniej pozbawione ładunku w wyniku destabilizacji. Należy jednak zauważyć, że różne glony w różnym stopniu ulegały koagulacji. Przy takiej samej liczebności glonów ($2 \cdot 10^5$ org./cm³) i takiej samej dawce koagulantu (40 g/m³) obserwowano zróżnicowaną efektywność koagulacji badanych zawiesin glonów. W przypadku monodispersyjnych zawiesin *Scenedesmus quadricauda*, po 15 minutach flokulacji, aglomeracji uległo ponad 98% organizmów. Zaglomerowanie glonów wyhodowanych z próbek wody pobranej ze Zbiornika Sulejowskiego było znacznie trudniejsze. Po tym samym czasie mieszania aglomeracji uległo zaledwie 76,6% organizmów. Problemy ze skuteczną flokulacją cząstek zawiesin miały wpływ na wyniki flotacji. Podczas gdy flotacja zaglomerowanych zawiesin układu monodispersyjnego zapewniła wysoką jakość uzdatnionej wody (około 99% usuniętych glonów), to efekt w drugim wypadku był znacznie gorszy (ok. 80% usuniętych glonów).

Równanie (1) jest zależnością pseudokinetyczną pierwszego rzędu względem liczebności cząstek. W skład współczynnika szybkości procesu wchodzi, oprócz miary stabilności układu, także parametry transportu masy, tj. stężenie objętościowe cząstek (Φ) i gradient prędkości (G), których wartości wpływają na częstość kolizji zdestabilizowanych glonów.

W badaniach określono wpływ liczebności cząstek na efektywność ich aglomeracji. W układach o większej liczebności cząstek, wymagających większych dawek koagulantów, szybkość aglomeracji była większa, niż w wypadku mniejszej liczebności glonów. Badania prowadzono w stałych warunkach hydrodynamicznych, a więc przy stałych wartościach G . Zwiększenie ilości energii wprowadzonej do układu w określonym zakresie prowadziłoby do wzrostu efektywności zderzeń. Jednak przekroczenie pewnej wartości progowej mogłoby wywoływać rozbijanie już utworzonych aglomeratów. Na podstawie wyników badań uznano, że dla $G=10$ s⁻¹ wystąpiły zadowalające efekty aglomeracji badanych zawiesin.

Bardzo ważnym czynnikiem aglomeracji, wpływającym na wyniki procesu flotacji, okazał się czas flokulacji (t_F). Stwierdzono, że efektywna flotacja następowała po flokulacji, której czas wynosił zaledwie 2–3 minuty (rys.4). Jest to podyktowane faktem, że aglomeraty pokoagulacyjne muszą mieć niewielkie wymiary, aby mogły być skutecznie przyłączane do pęcherzyków powietrza. Zjawisko to potwierdza analiza parametrów związanych z działaniem strefy filtracji w komorze flotacji, którymi są współczynnik efektywności kolizji pojedynczego kolektora (η_{og}) i liczebność aglomeratów podlegających flotacji (N_{co}). Współczynnik efektywności kolizji pojedynczego kolektora zależy od zjawiska dyfuzji i zwiększa się wraz ze zmniejszeniem wielkości cząstek <1 μ m. Zależy jednak także od zjawisk przechwytywania cząstek i rośnie wraz ze wzrostem wielkości cząstek >1 μ m. Z fizycznego punktu widzenia η_{og} zależy od temperatury wody, gęstości cząstek–aglomeratów i ich średnicy (d_c) oraz średnicy pęcherzyków powietrza (d_p). Jak wykazała analiza obliczeniowa przeprowadzona w pracy [9], wpływ temperatury i gęstości aglomeratów był niewielki. Stwierdzono natomiast, że w celu uzyskania skutecznej flotacji cząstki muszą mieć wielkość od 10 do 40 μ m. Niezbędne są więc krótkie czasy flokulacji wynoszące od 2 do 5 minut. Aglomeraty o takich wielkościach są również korzystne z uwagi na warunki, jakie panują w komorze flotacji. Duże aglomeraty ulegałyby rozbijaniu z uwagi na znaczne siły ścinające. Innym argumentem przemawiającym za koniecznością wytwarzania niewielkich aglomeratów jest fakt, iż objętość pęcherzyków powietrza, umożliwiających obniżenie ich gęstości do wartości niższej od gęstości wody, może być mniejsza niż w przypadku dużych aglomeratów. W obliczeniach tych wykazano również, że na efektywność flotacji ciśnieniowej ma wpływ wielkość pęcherzyków powietrza (d_p), których wymiary powinny mieścić się w granicach 10+100 μ m (śr. 40+50 μ m). Wielkość pęcherzyków powietrza zależy od ciśnienia saturacji. Podczas prowadzonych badań stwierdzono wręcz, że ciśnienie saturacji wpływało w istotny sposób na efektywność flotacji. Przy ciśnieniu 0,30 MPa uzyskano 96% usuwania zawiesin glonów *Scenedesmus q.*, a przy 0,46 MPa ponad 99,4%. Zwiększenie ciśnienia saturacji ponad 0,5 MPa nie doprowadziło do istotnego zwiększenia efektywności procesu. Podobną zależność zaobserwowano w przypadku mieszanej hodowli glonów *Ankistrodesmus*, chociaż stopień usuwania tych organizmów z wody był nieco niższy (75,6% przy 0,3 MPa i 90,1% przy 0,5 MPa).

Przedstawiony w równaniu (2) model łączy ciśnienie saturacji i stopień recyrkulacji ($R=Q/Q_r$) w jeden parametr – objętość pęcherzyków powietrza Φ_p . Wysokie wartości tego parametru zapewniają dobre warunki kolizji pomiędzy aglomeratami pokoagulacyjnymi i pęcherzykami powietrza.

W badaniach zastosowano stały stopień recyrkulacji wynoszący 30%. Wielokrotnie stwierdzono, że stopień recyrkulacji gwarantujący wysoką efektywność flotacji może wynosić 8+10%, zaś nadmiar zdyspergowanego powietrza nie wpływał ujemnie na wyniki procesu separacji [9].

Wysokość komory flotacji uzależniona jest od czasu flotacji i prędkości ruchu zaglomerowanych cząstek przyłączonych do pęcherzyków powietrza. W praktyce stosuje się komory flotacji o wysokości 1,2+1,5 m. W badaniach zastosowano skalę wysokości komory flotacji 1:1. Z tego względu komora umożliwiła prowadzenie separacji w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Czas flotacji wynosił 5+6 minut. Krótki czas zatrzymania wody w komorze flotacji stanowi jedną z zalet tego procesu separacyjnego [2,3]. W założonych warunkach średnia prędkość wznoszenia pęcherzyków powietrza powinna wynosić około 4 mm/s. Przeprowadzone pomiary prędkości wznoszenia aglomeratów dowiodły, że przy ciśnieniu saturacji 0,42 MPa i zastosowanych warunkach procesu aglomeracji uzyskano wartości w granicach 13+17 mm/s (przy wartości dominującej 14 mm/s).

Podsumowanie

Flotacja ciśnieniowa jest efektywną metodą separacji skoagulowanych zawiesin glonów, przy czym na jej efektywność ma jednak istotny wpływ prawidłowe przygotowanie zawiesin podczas destabilizacji i flokulacji. Dawki koagulantów mogą być niższe od stosowanych w konwencjonalnym uzdatnianiu z wykorzystaniem sedymentacji, z uwagi na potrzebę tworzenia aglomeratów o niewielkich rozmiarach. Ważne jest także zachowanie odpowiedniego pH prowadzenia procesu destabilizacji [8].

Wykazano, że wstępne utlenianie umożliwiło zmniejszenie dawek koagulantu oraz w istotny sposób poprawiło efektywność flotacji, ponieważ zapewniło bardziej skuteczną destabilizację glonów. Glony wykorzystane w badaniach charakteryzowały się zróżnicowaną podatnością na działanie dwutlenku chloru. Większą wrażliwością cechowały się wydłużone komórki *Ankistrodesmus longissimus* i *Ankistrodesmus falcatus*, niż uznawane za bardziej odporne na działanie algicydów kolonie *Scenedesmus quadricauda*. W wypadku zawiesin *Scenedesmus q.* niewielkie dawki dwutlenku chloru pozwoliły na przeprowadzenie procesu separacji przy mniejszych dawkach koagulantu, a w przypadku komórek *Ankistrodesmus longissimus* i *Ankistrodesmus falcatus* nastąpiła zdecydowana poprawa efektywności separacji.

W celu uzyskania dobrego przyłączenia aglomeratów komórek glonów do pęcherzyków powietrza podczas flotacji ciśnieniowej wystarczy doprowadzić je do rozmiarów około 10+30 µm. Wytwarzanie dużych kłaczek jest niepotrzebne, w związku z czym zbędny jest nadmiar koagulantu, a wymagany czas flokulacji zdestabilizowanych zawiesin glonów może wynosić zaledwie od 2 do 3 minut.

Flotacja ciśnieniowa stanowi specyficzne przedłużenie flokulacji zawiesin, podczas której dochodzi do zwiększenia częstotliwości zderzeń pomiędzy uformowanymi mikrokłaczkami a pęcherzykami rozprężanego powietrza. Ciśnienie saturacji i stopień recyrkulacji są parametrami decydującymi o objętości powietrza wprowadzanego do komory flotacji i średnicach powstających pęcherzyków powietrza. Podczas saturacji należy stosować ciśnienia powyżej 0,4 MPa, ponieważ przy niższych ciśnieniach efektywność procesu maleje.

LITERATURA

1. H. BERNHARD, J. CLASEN: Investigations into the flocculation mechanisms of small algal cells. *Journal Water SRT Aqua*, 1994, Vol. 43, No. 5, pp. 222–232.
2. E. A. CASSELL et al.: The effects of bubble size on microflotation. *Water Research*, 1975, Vol. 9, pp. 1017–1024.
3. J. K. EDZWALD: Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation. *Water Sci. Tech.*, 1993, Vol. 27, No. 1, pp. 67–81.
4. J. K. EDZWALD et al.: Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. *Journal AWWA*, 1992, Vol. 84, No. 3, pp. 92–100.
5. G. W. FOESS, J. A. BORCHARDT: Electrokinetic phenomena in the filtration of algal suspensions. *Journal AWWA*, 1969, Vol. 61, No. 7, pp. 333–338.
6. R. A. HYDE et al.: Water clarification by flotation. *Journal AWWA*, 1977, Vol. 69, No. 7, pp. 369–374.
7. A. JODŁOWSKI: Badania nad usuwaniem glonów z wody w procesie koagulacji – flotacji ciśnieniowej. *Ochrona Środowiska*, 1994, nr 3–4(54–55), ss. 19–23.
8. M. KROFTA, L. K. WANG: Potable water treatment by dissolved air flotation and filtration. *Journal AWWA* 1982, Vol. 74 No. 6, pp. 305–310.
9. J. K. MALLEY, J. K. EDZWALD: Concepts for dissolved-air flotation treatment of drinking waters. *Journal Water SRT-Aqua*, 1991, Vol. 40, No. 1, pp. 7–17.
10. C. O'MELIA: Coagulation and flocculation (in: *Physical-Chemical Processes for Water Quality Control* [Ed. W. J. WEBER]). Wiley Interscience, New York 1972.
11. T. ZABEL: The advantages of dissolved-air flotation for water treatment. *Journal AWWA*, 1985, Vol. 77, No. 5, pp. 42–46.

On the Contribution of Technological Parameters to the Removal of Algal Suspensions by Dissolved-Air Flotation (DAF)

The efficiency of algae removal by the DAF technique was related to the parameters of agglomeration and separation. The experiments were run with laboratory-grown green algae cultures. The parameters of agglomeration included oxidant (ClO_2) and coagulant (alum) doses, pH, as well as duration and rate of mixing in the course of flocculation. The parameters of

separation comprised recycle ratio and saturation pressure. Destabilization of particles was necessary to provide favourable conditions for microagglomerate attachment to the collectors (bubbles). Coagulation was a pretreatment step in the DAF process, which aimed at destabilizing algal particles. Alum doses were lower than those used in the conventional process, as there

was no need to produce large-size flocs. Preoxidation with ClO_2 made algal particle destabilization easier and had a beneficial influence on the kinetics of the agglomeration process. Flocculation time was short in order to avoid large floc formation: flocculation periods below 5 minutes provided a good performance of the DAF process. High volume fractions of air bubbles

created favourable conditions for particle-bubble collision. The contribution of the air-bubble volume fraction to the efficiency of the DAF process was investigated by varying the saturator pressure and maintaining a constant recycle ratio. It was found that saturation pressure should exceed 0.4 MPa so as not to deteriorate the efficiency of the process.