

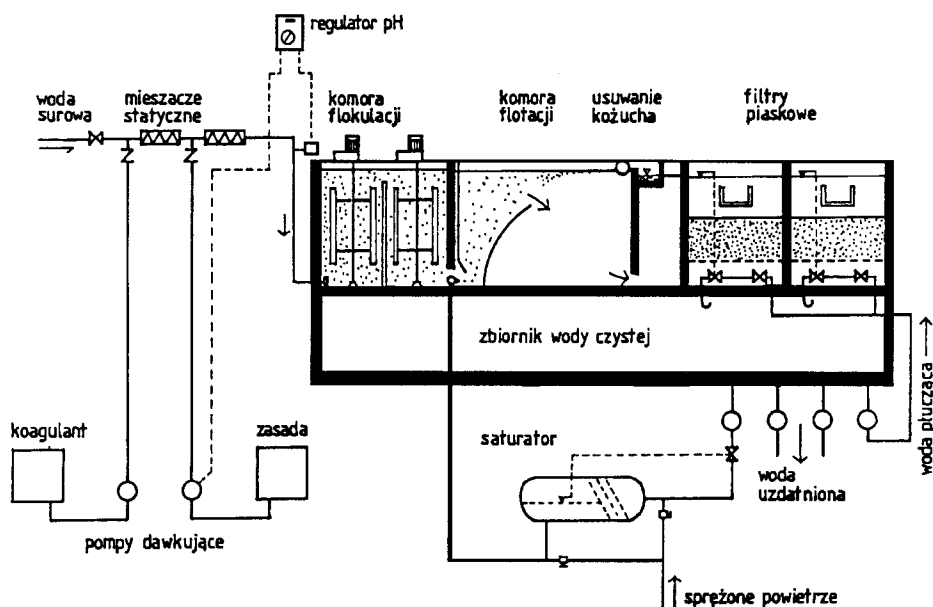
Andrzej Jodłowski

Badania nad usuwaniem glonów z wody w procesie koagulacji – flotacji ciśnieniowej

Obserwowana od wielu lat tendencja do ciągłego pogarszania się jakości wód ujmowanych z rzek i zbiorników zaporowych sprawia, iż zanieczyszczenia powstające w wyniku działalności gospodarczej powodują coraz większe trudności w prawidłowej realizacji procesów uzdatniania wody. Związki biogenne wprowadzone do wód wraz ze ściekami i spływające z terenów rolniczych potęgują eutrofizację tych wód. Uciążliwym zanieczyszczeniem stają się również organizmy fitoplanktonowe. Aglomeraty pokoagulacyjne powstające podczas oczyszczania wód zawierających glony, a także wód o niskiej mętności i podwyższonej barwie, charakteryzują się niewielką gęstością i wymagają długiego czasu sedimentacji [1–3]. Dodatkowym czynnikiem utrudniającym separację zawieszin glonowych jest tlen powstający podczas fotosyntezy, który powoduje autoflotację organizmów zaglomerowanych w procesie koagulacji [4].

o wymiarach od 20 do 100 μm (przeciętnie około 40 μm), co uzyskuje się w wyniku obniżenia ciśnienia w strumieniu wody (nasyconej wstępnie powietrzem pod ciśnieniem do poziomu ciśnienia atmosferycznego). Stosowane są obecnie trzy podstawowe odmiany tego procesu: flotacja ciśnieniowa z pełnym przepływem, flotacja ciśnieniowa z rozdziałem wody oraz flotacja ciśnieniowa z przepływem recykulowanym [5]. Podczas usuwania aglomeratów pokoagulacyjnych o niewielkiej wytrzymałości mechanicznej najczęściej stosuje się flotację z recykulacją.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat zblokowanego układu do uzdatniania wody z wykorzystaniem flotacji ciśnieniowej z przepływem recykulowanym, proponowanego przez holenderską firmę Werkspoor Water BV [6]. Woda surowa kierowana jest po wprowadzeniu koagulantu i środków wspomagających do komory flokulacji, a następnie flotacji. Część oczyszczonej wody podlega



Rys. 1. Schemat zblokowanej instalacji do uzdatniania wody z wykorzystaniem flotacji ciśnieniowej

W warunkach, w których sedimentacja jest kłopotliwa i nie daje zadowalających efektów, znacznie bardziej korzystnym procesem technologicznym może okazać się flotacja, a zwłaszcza flotacja ciśnieniowa. Podczas tego procesu do oczyszczanej wody wprowadzane jest powietrze w postaci zdyspergowanych pęcherzyków

recykulacji, a następnie sprężaniu i saturacji powietrzem. Woda ta jest następnie wprowadzana do komory flotacji pod ciśnieniem przez dyszę rozprężającą i mieszana z wodą poddaną koagulacji. Układ ma tę zaletę w stosunku do dwóch pozostałych, że dysze odpowiedzialne za uwalnianie powietrza nie ulegają blokowaniu przez zawiesiny, co zdarza się podczas uwalniania wody saturowanej wraz z zawieszinami [5]. Kubatura komory flotacji musi jednak w tym przypadku uwzględniać zwiększony przepływ wynikający z recykulacji. Pęcherzyki powietrza wbudowywane są w strukturę

aglomeratów i unoszą je ku powierzchni, tworząc kożuch. Stężenie zawieszin w powstającym kożuchu jest znacznie większe niż w osadzie z klarowników i uważa się, że może on być bezpośrednio odwadniany z użyciem pras bez konieczności uprzedniego zagęszczenia. Końcowa efektywność usuwania wysoko dyspersyjnych zawieszin z wody w procesie koagulacji – flotacji ciśnieniowej zależy w głównej mierze od prawidłowości przeprowadzenia ich destabilizacji i aglomeracji. Ważnym więc zagadnieniem pozostaje także w tej metodzie dobór warunków prowadzenia procesu koagulacji. Istotnym parametrem procesu jest także ilość wprowadzonego powietrza. Należy zwrócić uwagę, że podstawowy parametr stosowany w oczyszczaniu ścieków i zagęszczaniu osadów metodą flotacyjną, za jaki uważa się stosunek objętości wprowadzonego powietrza do stężenia zawieszin, nie jest możliwy do wykorzystania podczas analizy zagadnień związanych z uzdatnianiem wody. Wynika to ze względnie niewielkiego stężenia zawieszin w wodzie surowej [7]. Ważną rolę odgrywa natomiast stopień recyrkulacji (R) informujący pośrednio o ilości powietrza wprowadzanego do komory flotacji.

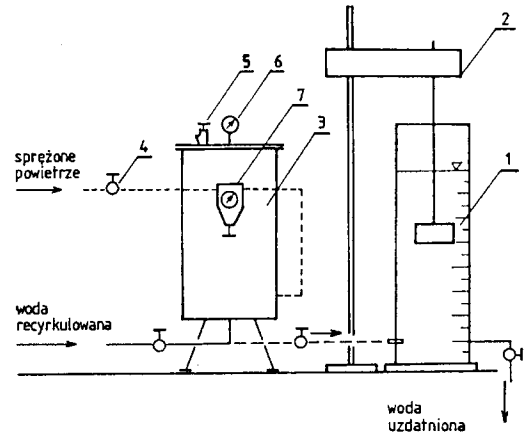
Celem niniejszej pracy było określenie wpływu wybranych parametrów technologicznych na efektywność usuwania zawieszin glonowych z wody metodą koagulacji – flotacji ciśnieniowej. Badania przeprowadzono w skali laboratoryjnej, w zakresie umożliwiającym ocenę czasu przebiegu procesu oraz roli pH, dawek siarczanu glinu i środków utleniających oraz stopnia recyrkulacji.

Metodyka badań

Wodę zanieczyszczoną zawiesziną glonową przygotowywano w warunkach laboratoryjnych. W badaniach wykorzystano zielenicę *Selenastrum capricornutum*, której komórki o wymiarach 6÷7 µm tworzyły monodispersyjną zawiesinę. Glony hodowano w butlach szklanych o pojemności 20 dm³ przy naturalnym oświetleniu w temperaturze pokojowej (20±22 °C). Odpowiednią ilość składników pożywkowych wprowadzano w postaci zestawu soli nieorganicznych o składzie przedstawionym w tabeli 1.

Zawartość naczyń hodowlanych mieszano z użyciem sprężonego powietrza, doprowadzając w ten sposób dwutlenek węgla. Próbkę pobraną z naczyń hodowlanych rozcieńczano wodą wodociągową pozbawioną chloru w celu uzyskania odpowiedniego zagęsz-

czenia glonów. Liczebność glonów w wodzie stanowiącej przedmiot badań wahała się w granicach 545÷816 tys.org./cm³. Absorbancja mierzona przy długości fali 750 nm wynosiła od 4,1 do 4,6 m⁻¹. Liczebność glonów określano w komorze Fuscha-Rozenthala przy użyciu mikroskopu optycznego typu Biolar. Badania nad usuwaniem zanieczyszczeń z wody przeprowadzono metodą porcjową przy użyciu aparatury modelowej, której schemat przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego (1 – komora reakcyjna, 2 – mieszadło, 3 – zbiornik saturacji, 4 – zawór odcinający, 5 – zawór odpowietrzający, 6 – manometr, 7 – reduktor)

Komorę wstępnego utleniania, flokulacji i flotacji stanowił zbiornik ze szkła organicznego o średnicy 150 mm i wysokości 50 cm. Odpowiednie warunki mieszania zapewniało mieszadło łopate ML-5 o płynnej regulacji obrotów. Czas szybkiego mieszania podczas koagulacji ustalono na 3 minuty (200 obr./min), choć był on często dłuższy ze względu na konieczność prowadzenia korekty odczynu. Wolne mieszanie przebiegało przez 15 minut przy prędkości obrotowej około 40 obr./min. W procesie koagulacji wykorzystano 1-procentowy roztwór siarczanu glinu. Część prób przeprowadzono stosując wstępne utlenianie. Zastosowano podchloryn sodu w postaci roztworu o stężeniu 490 gCl₂/m³, 0,1-procentowy nadmanganian potasu i wodny roztwór nadtlenku wodoru (50 cm³ 30-procentowego H₂O₂ w 1 dm³). Utlenianie przebiegało w komorze wykorzystywanej następnie do koagulacji i flotacji domieszek wody. Po wprowadzeniu utleniaczy zawartość komory mieszano z intensywnością 100 obr./min. Czas reakcji był stały i wynosił 20 minut. Proces flotacji prowadzono w układzie z recyrkulacją wody. W warunkach laboratoryjnych jako recykulatu użyto wody wodociągowej pozbawionej chloru. Wodę tę saturowano w specjalnie do tego celu wykonanym zbiorniku ciśnieniowym ze stali nierdzewnej o średnicy 190 mm i wysokości 35 cm. Zbiornik ten napełniono wodą do 3/4 wysokości, po czym wprowadzano sprężone powietrze. Ciśnienie zapewniała sprężarka typu 3JW60 z reduktorem zainstalowanym na wejściu do zbiornika saturacyjnego. Maksymalne ciśnienie możliwe do uzyskania w tym układzie wynosiło 0,3÷0,4 MPa. We wszystkich przeprowadzonych próbach przyjęto ciśnienie saturacji wynoszące 0,35 MPa. Czas saturacji w zbiorniku ciśnieniowym wynosił 10 minut. Do komory flotacji wprowadzano wodę saturowaną w ilości od 0,25 do 1,0 dm³. Pozwalało to na symulowanie stopnia recyrkulacji od 5 do 20 %. Jako stopień recyrkulacji (R) przyjęto stosunek objętości wody nasyconej powietrzem wprowadzanej do komory reakcyjnej do objętości wody poddawanej oczyszczaniu. Objętość wprowadzanego recykulatu odczytywano na skali umieszczonej na ścianie komory. Czas trwa-

Tabela 1. Skład pożywki stosowanej do hodowli glonów

Składnik	Ilość
NaNO ₃	476,0 g/m ³
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	59,0 g/m ³
MgSO ₄ · 7H ₂ O	25,0 g/m ³
NaHCO ₃	84,0 g/m ³
KH ₂ PO ₄	24,2 g/m ³
FeEDTA	10,0 dm ³ /m ³
Mikroelementy:	10,0 dm ³ /m ³
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0,9 g/m ³
KBr	1,2 g/m ³
KJ	0,8 g/m ³
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	2,9 g/m ³
Co(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	1,5 g/m ³
CuSO ₄ · 5H ₂ O	1,3 g/m ³
NiSO ₄ (NH ₄) ₂ SO ₄ · 6H ₂ O	2,0 g/m ³
KAl(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	4,7 g/m ³
Cr(NO ₃) ₃ · 9H ₂ O	0,4 g/m ³
H ₃ BO ₃	31,0 g/m ³

nia flotacji liczone od momentu zakończenia wprowadzania wody nasyconej powietrzem. Na podstawie obserwacji przebiegu rozdziału faz stwierdzono, że efekt oddzielenia kożucha od wody uzyskiwano po 6 minutach. Po tym czasie nie zachodziło już wznoszenie zawiesin i pęcherzyków powietrza. Wodę sklarowaną w objętości $0,5 \text{ dm}^3$ pobierano przy dnie komory, a następnie poddawano analizie. Efekty uzyskane podczas flotacji porównano z wynikami sedymentacji, którą prowadzono w komorze o takich samych wymiarach, jakie miała komora flotacyjna. Wodę sklarowaną w objętości $2,5 \text{ dm}^3$ odlewarowywano i poddawano analizie.

Ocenę efektywności obu procesów oparto na określaniu liczebności komórek *Selenastrum capricornutum* oraz pomiarach absorbancji wody przy 420 i 750 nm w próbach wody surowej i oczyszczonej. A_{420} związana jest z określaniem mętności wody, a A_{750} jest dodatkowo skorelowana z zawartością chlorofilu „a”.

Przebieg i wyniki badań

Badania rozpoczęto od oceny wpływu dawki siarczanu glinu i pH na efektywność usuwania komórek glonów *Selenastrum capricornutum* z wody. Liczebność komórek glonów stanowiących zanieczyszczenie wody będącej przedmiotem badań wynosiła $545\text{--}597 \text{ tys.org./cm}^3$. Zastosowano dawki koagulantu (D) w granicach $10\text{--}80 \text{ g/m}^3$. Proces prowadzono utrzymując stały odczyn (pH= $7,0\pm 0,1$) i stały stopień recyrkulacji (R) wynoszący 10 %.

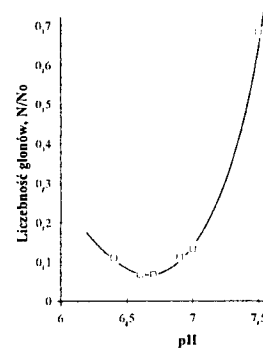
Tabela 2. Wpływ koagulacji siarczanem glinu na efektywność usuwania glonów *Selenastrum capricornutum* podczas flotacji przy pH=7,0 i stopniu recyrkulacji R=10%; początkowa liczebność glonów $545\text{--}597 \text{ tys.org./cm}^3$

Dawka g/m^3	Liczba glonów tys.org./cm^3	Stopień usunięcia %	A_{420} m^{-1}	A_{750} m^{-1}
0	540	9,5	5,20	3,90
10	531	11,1	5,00	3,30
20	412	24,4	4,56	3,10
30	54	90,1	1,10	0,58
40	45	91,7	0,60	0,36
60	56	89,7	1,20	0,70
80	63	89,4	1,80	0,80

Wyniki przedstawione w tabeli 2 dowodzą, że efekt oczyszczania zależał bezpośrednio od właściwego przebiegu koagulacji. Flotacja bez koagulacji umożliwiła zmniejszenie liczebności glonów zaledwie o 9,5 %. Radykalną zmianę efektywności procesu przyniosło dopiero zastosowanie koagulacji. Jako wynik przeprowadzonej koagulacji obserwowano powstawanie wyraźnych aglomeratów, które po wprowadzeniu wody saturowanej łączyły się z pęcherzykami powietrza i przechodziły do tworzącego się kożucha. Najlepsze wyniki uzyskano przy $D=40 \text{ g/m}^3$, kiedy to stopień usunięcia glonów wyniósł niemal 92 %.

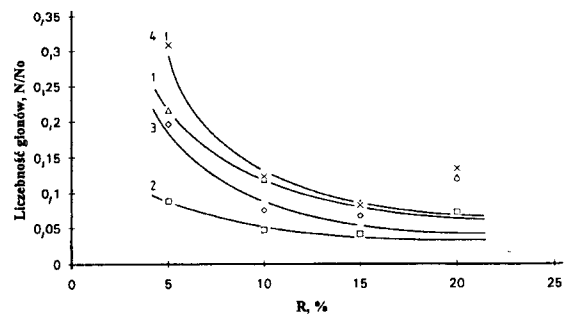
Podczas badań nad określeniem wpływu pH na efektywność procesu zachowano stałą dawkę koagulantu ($D=30 \text{ g/m}^3$) oraz stały stopień recyrkulacji (R=15 %). Odczyn wody zmieniano w zakresie od pH=6,4 do pH=7,5. Uzyskane wyniki (rys.3) wskazują na wyraźną zależność efektywności procesu od odczynu wody.

Przy pH=7,5 uzyskano zaledwie 31,8 % zmniejszenia liczebności glonów, podczas gdy przy pH=6,6 efektywność procesu wzrosła do 93,4 %. Potwierdzają to wyniki badań, w których, przy zastosowaniu siarczanu glinu i polielektrolitów jako środków wspomagających, najlepsze efekty koagulacji glonów uzyskano przy pH<6,0 [7]. Następnie określono wpływ stopnia recyrkulacji (R) na efektywność flotacji zaglomerowanych komórek glonów. Wartość R zmieniano w zakresie od 5 do 20 %. Liczebność komórek *Selenastrum capricornutum* podczas tego etapu badań wahała się od 553 do $742 \text{ tys.org./cm}^3$. Przeprowadzono cztery serie badawcze stosując dawki siarczanu glinu w zakresie od 30 do 60 g/m^3 . Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Wpływ pH na usuwanie glonów w procesie koagulacji i flotacji ciśnieniowej (początkowe stężenie glonów $645 \text{ tys. kom./cm}^3$, $D=30 \text{ g/m}^3$, R=15%)

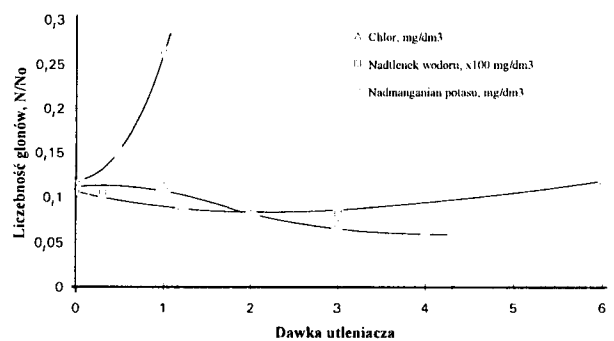
Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ stopnia recyrkulacji na usuwanie glonów przy różnych dawkach siarczanu glinu (1 – 30 g/m^3 , 2 – 40 g/m^3 , 3 – 50 g/m^3 , 4 – 60 g/m^3)

Stwierdzono, że uzyskanie wysokiego efektu oczyszczania wody uzależnione było od wprowadzenia odpowiedniej objętości wody nasyconej powietrzem. Flotacja przy niewielkim stopniu recyrkulacji (R=5 %) umożliwiła uzyskanie zmniejszenia liczebności glonów w granicach od 69,2 do 91,2 %, przy czym najwyższy efekt uzyskano przy $D=40 \text{ g/m}^3$. Najlepsze efekty odnotowano przy analogicznej dawce koagulantu i stopniu recyrkulacji R=15 %, kiedy to stopień usunięcia glonów wyniósł 95,3 %.

Badania dotyczące zwiększenia efektywności procesu separacji zawiesin glonowych poprzez wykorzystanie wstępnego utleniania przeprowadzono stosując $D=30 \text{ g/m}^3$ i R=15 %. Liczebność glonów wynosiła: $816 \text{ tys.org./cm}^3$ podczas badań nad wykorzystaniem

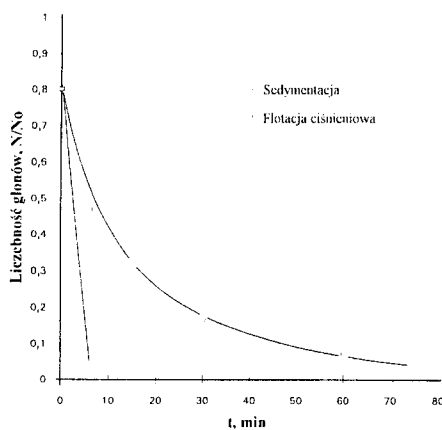


Rys. 5. Wpływ wstępnego utleniania na usuwanie glonów w procesie koagulacji i flotacji ciśnieniowej ($D=30 \text{ g/m}^3$, R=15 %)

chloru, $656 \text{ tys.org./cm}^3$ podczas badań z nadtlenkiem wodoru i $600 \text{ tys.org./cm}^3$ w badaniach z nadmanganianem potasu. Stwierdzono korzystny wpływ podchlorynu sodu i nadtlenku wodoru na efekt separacji glonów, natomiast jego pogorszenie nastąpiło po zastosowaniu nadmanganianu potasu.

Z rysunku 5 wynika, że dawki NaOCl w granicach $3,0\text{--}4,0 \text{ g/m}^3$ umożliwiły poprawę efektywności usuwania glonów z 89 do 94 %, natomiast stosując H_2O_2 (300 g/m^3) uzyskano niewielką poprawę separacji zawiesin glonowych (z 89,5 do 91,8 %). Zwiększanie dawek nadtlenku wodoru powodowało nawet pogarszanie jakości oczyszczonej wody, a negatywny wpływ KMnO_4 na przebieg separacji glonów wynikał prawdopodobnie ze zbyt krótkiego czasu kontaktu utleniacza z domieszkami wody.

Przeprowadzono także serię doświadczeń nad określeniem wpływu czasu sedymentacji na efektywność usuwania zawiesin glonowych poddanych koagulacji, co umożliwiło porównanie uzyskanych wyników z efektami obserwowanymi podczas flotacji. Wodę zawierającą glony o stężeniu $653 \text{ tys.org./cm}^3$ poddano koagulacji stosując dawkę siarczynu glinu $D=40 \text{ g/m}^3$, a następnie śledzono liczebność glonów w słupie cieczy o analogicznej wysokości jak w przypadku flotacji. Po 6 minutach klarowania stwierdzono jedynie 53 % zmniejszenia liczebności glonów. Porównywalną efektywność procesu sedymentacji z efektami uzyskiwanymi po 6 minutach flotacji zaobserwowano dopiero po ponad 70 minutach klarowania (rys.6).



Rys. 6. Stopień usuwania glonów w procesie flotacji ciśnieniowej po koagulacji oraz sedymentacji po koagulacji w zależności od czasu trwania procesu (początkowe stężenie glonów $653 \text{ tys.org./cm}^3$, $D=40 \text{ g/m}^3$, $\text{pH}=7$, $R=15\%$)

Dyskusja wyników

Flotacja ciśnieniowa jest procesem uzależnionym bezpośrednio i pośrednio od wielu czynników wpływających na jej efektywność. Największe znaczenie mają właściwości usuwanych zanieczyszczeń, ilość i rodzaj wprowadzanych środków chemicznych oraz przyjęty układ urządzeń i ich parametry technologiczne.

Niewielka gęstość i wiele właściwości morfologicznych glonów przeciwdziała ich aglomeracji i osiadowaniu. Komórki glonów tworzą w wodzie stabilne zawiesiny, co wynika z ładunku elektrycznego zgromadzonego na ich powierzchni, a także hydrofilowości oraz adsorpcji substancji wielkocząsteczkowych wydzielanych przez nie przyżyciowo [9]. W pracy [10] podano, że gęstość okrzymek *Asterionella* wynosi $1,13 \text{ g/cm}^3$, *Cyclotella praeterissima* – $1,19 \text{ g/cm}^3$, a zielenicy *Chlorella vulgaris* – $1,09 \text{ g/cm}^3$. W pracy [6] przyjęto, że gęstość komórek *Cyclotella sp.* wynosi $1,14 \text{ g/cm}^3$, a komórek *Chlorella vulgaris* – $1,07 \text{ g/cm}^3$. Można więc założyć, że

przeciętna gęstość glonów wynosi około $1,1 \text{ g/cm}^3$. Po koagulacji przy użyciu siarczynu glinu aglomeraty zawierające komórki glonów i cząstki wodorotlenku glinu mają mniejszą gęstość niż zdypergowane glony, ponieważ gęstość kłaczków $\text{Al}(\text{OH})_3$ wynosi około $1,01 \text{ g/cm}^3$.

Zasadniczy wpływ na proces separacji glonów mają czynniki decydujące o przebiegu koagulacji, a więc pH wody i dawka koagulantu. Zastosowanie flotacji bez koagulacji pozwoliło na usunięcie zanieczyszczeń glonowych zaledwie w 10 %. Stwierdzono więc, że skuteczne prowadzenie procesu separacyjnego wymaga zastosowania destabilizacji i flokulacji. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły informacje literaturowe wskazujące, że efektywność flotacji uzależniona jest od właściwego przebiegu koagulacji [5,11]. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika także, że możliwa jest znaczna poprawa efektywności procesu separacji glonów (w przypadku wód zawierających fitoplankton) w wyniku niewielkiej korekty pH. Potwierdzają to rezultaty badań opisane w pracy [12], z których wynika, że zastosowanie kombinacji odpowiedniej dawki siarczynu glinu i polielektrolitu anionowego oraz korekta pH dają możliwość uzyskania aglomeratów wystarczająco odpornych na ścinanie, co pozwala na ich efektywną separację podczas flotacji ciśnieniowej.

W badaniach zastosowano czas flokulacji $t=15 \text{ min}$, który umożliwił uzyskanie zadowalającego stopnia aglomeracji glonów. Według badań omówionych w pracy [13] czas flokulacji może być krótszy niż w przypadku prowadzenia procesu w sposób konwencjonalny. Jest to związane z faktem, że w celu prowadzenia efektywnej flotacji niezbędne jest uzyskanie niewielkich aglomeratów. Z badań tych wynika, że komory flokulacji powinny być projektowane tak, aby gwarantowały uzyskanie kłaczków o wymiarach od 10 do $30 \mu\text{m}$, co oznacza czas zatrzymania od 8 do 16 minut.

Stopień recyrkulacji wpływał w zasadniczy sposób na efektywność flotacji. Przy wartości $R=5\%$ obserwowano niezadowalające efekty usuwania zawiesin. Wynikało to z faktu, że zbyt niski stopień recyrkulacji powodował wprowadzenie niewystarczającej ilości powietrza niezbędnego do połączenia z aglomeratami utworzonymi w wyniku destabilizacji i flokulacji domieszki wody. Zwiększenie stopnia recyrkulacji, a co za tym idzie ilości wprowadzonego powietrza, wpłynęło na poprawienie efektywności procesu. Najlepsze efekty flotacji uzyskano dla $R=15\%$, natomiast dalsze zwiększanie stopnia recyrkulacji prowadziło do pogorszenia efektywności flotacji. Według wyników doświadczeń opisanych w pracy [5], zwiększenie ilości powietrza wprowadzanego do komory nie powinno jednak w zasadniczy sposób wpływać na obniżenie jakości uzdatnionej wody. Spadek efektywności separacji przy $R=20\%$, jaki uzyskano podczas badań, był prawdopodobnie spowodowany nieuniknionym (w warunkach prowadzenia doświadczeń) spadkiem ciśnienia w saturatorze, wynikającym z odprowadzenia znacznej objętości wody nasyconej. Z objętości wody saturowanej wynoszącej $7,5 \text{ dm}^3$ odprowadzono do komory flotacji $1,0 \text{ dm}^3$, czyli ponad 13 %. Spadek ciśnienia spowodował zmniejszenie liczebności i wzrost wielkości pęcherzyków powietrza, co mogło wywołać obniżenie ich zdolności do wiązania się z aglomeratami zanieczyszczeń. Nastąpił także wzrost prędkości wznoszenia pęcherzyków [14]. Należy także zaznaczyć, że wprowadzenie wody nasyconej odbywało się punktowo i przy wyższych stopniach recyrkulacji mogło dochodzić do zaburzeń hydraulicznych w komorze flotacji.

Analizując uzyskane wyniki badań można zauważyć, że efektywność flotacji zależała zarówno od dawki koagulantu jak i od stopnia recyrkulacji. W pracy [11] podano, że czynnikiem mającym największy wpływ na koszty prowadzenia procesu flotacji jest ilość

stosowanej wody nasyconej. Z tego punktu widzenia, przy wyborze parametrów technologicznych, ważniejsza wydaje się być możliwość ograniczenia stopnia recyrkulacji, niż ewentualność zmniejszenia zużycia środków chemicznych.

Przeprowadzone badania wykazały zauważalną poprawę efektywności procesu koagulacji – flotacji ciśnieniowej po zastosowaniu wstępnego utleniania. Wstępne chlorowanie przy użyciu podchlorynu sodu poprawiło stopień usuwania glonów o 5%. Potwierdzono więc wyniki doświadczeń opisane w pracy [2], z której wynika, że podczas uzdatniania wody pobieranej z Tamizy w okresie zakwitów okrzemek (od 30 tys. do 150 tys. org./cm³) zastosowanie wstępnego chlorowania (dawka 5 gCl₂/m³) umożliwiło poprawę efektywności flotacji w granicach od 8 do 12%. Uzyskano więc zbliżony stopień intensyfikacji procesu, a różnica mogła zostać spowodowana większą liczebnością komórek glonów i znacznie większą odpornością monokulturowej zawiesiny zielenic zastosowanej podczas badań na działanie chloru niż fitoplanktonu w wodzie naturalnej.

Ze względu na trudny do przewidzenia wpływ różnych utleniaczy na intensyfikację procesu oczyszczania wody metodą koagulacji – flotacji ciśnieniowej, konieczne jest prowadzenie prób technologicznych dla każdego rodzaju uzdatnianej wody. Należy także pamiętać o niebezpieczeństwie tworzenia THM-ów, w przypadku wprowadzania chloru podczas wstępnego utleniania [15]. Wobec tego interesującą alternatywą byłoby zastosowanie wstępnego ozonowania. W pracy [16] stwierdzono, że wykorzystując wstępne ozonowanie, koagulację i flotację ciśnieniową można uzyskać mniejsze zużycie koagulantu, wyższą jakość wody i mniejszą objętość osadu niż w układzie uzdatniania wody z wstępnym chlorowaniem.

Wnioski

◆ Wielokrotnie obserwowane trudności w usuwaniu glonów w konwencjonalnych układach technologicznych uzdatniania wody prowadzą do wniosku, że flotacja ciśnieniowa może stanowić alternatywną metodę separacyjną w stosunku do sedymentacji zaglomerowanych zawiesin glonowych.

◆ Efektywne przeprowadzenie procesu separacji w układzie koagulacji – flotacji ciśnieniowej uwarunkowane było właściwym doбором parametrów technologicznych, tj. warunków destabilizacji zawiesin koloidalnych (dawki koagulantu, dawki środków wspomagających, pH), stopnia recyrkulacji i ciśnienia. Zastosowane podczas badań warunki (D=40 g/m³, pH=7, R=10% i p=0,35 MPa) pozwoliły na usuwanie komórek *Selenastrum capricornutum* ze skutecznością 96%.

◆ Zaobserwowano korzystny wpływ wstępnego utleniania na efektywność koagulacji i flotacji, przy czym spośród przebadanych utleniaczy najlepsze wyniki uzyskano po zastosowaniu podchlorynu sodu. Przy początkowej liczebności glonów w przedziale

600÷800 tys. org./cm³ i dawce 4 gCl₂/m³ uzyskano wzrost efektywności usuwania glonów z wody o 5%.

◆ Flotacja ciśnieniowa może stanowić efektywną alternatywę w stosunku do sedymentacji pokoagulacyjnej, czy też dla klarowników z zawieszonym osadem, z uwagi na krótki czas zatrzymania uzdatnianej wody, a co za tym idzie – niewielką kubaturę urządzeń. Minimalizacja kosztów oczyszczania wody w procesie koagulacji – flotacji ciśnieniowej wiąże się głównie z określeniem niezbędного stopnia recyrkulacji.

LITERATURA

1. W.F. BARE et al.: Algae removal using dissolved air flotation. Journal WPCF, 1975, Vol. 47, No. 1, pp. 153-169.
2. R.A. HYDE et al.: Water clarification by flotation. Journal AWWA, 1977, Vol. 69, No. 7, pp. 369-374.
3. T. ZABEL: The advantages of dissolved - air flotation for water treatment. Journal AWWA, 1985, Vol. 57, No. 5, pp. 42-46.
4. A. JODŁOWSKI: Usuwanie fitoplanktonu z wody w procesie utleniania i koagulacji. Ochrona Środowiska, 1991, nr 1(42), ss. 49-52.
5. T.F. ZABEL, J.D. MELBURNE: Flotation. Developments in Water Treatment, Part 1, Lewis W.M. (Ed.). Applied Science Publishers Ltd., London 1980.
6. Flotatie. Materiały informacyjne firmy Werkspoor Water BV.
7. J.K. EDZWALD: Algae, bubbles, coagulants and dissolved air flotation. Wat.Sci.Techn., 1993, Vol. 27, No. 10, pp.67-81.
8. M. McGARRY: Algal flocculation with aluminum sulfate and polyelectrolytes. Journal WPCF, 1970, Vol. 42, No. 5, pp. R191-R201.
9. G.W. FOESS, J.A. BORCHARDT: Elektrokinetic phenomena in the filtration of algal suspensions. Journal AWWA, 1969, Vol. 61, No. 7, pp. 333-338.
10. C. S. REYNOLDS: The Ecology of Freshwater Phytoplankton. Cambridge University Press, 1984.
11. J.A. KITCHENER, R.J. GOCHIN: The mechanism of dissolved air flotation for potable water: basic analysis and a proposal. Water Research, 1981, Vol.15, pp. 585-589.
12. M. KROFTA, L.K. WANG: Potable water treatment by dissolved air flotation and filtration. Journal AWWA, 1982, Vol. 74, No. 6, pp.305-310.
13. J.K. EDZWALD et al.: Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. Journal AWWA, 1992, Vol. 84, No. 3, pp. 92-100.
14. E.A. CASSELL et al.: The effects of bubble size on microflotation. Water Research, 1975, Vol. 9, pp. 1017-1024.
15. A. JODŁOWSKI: Wpływ koagulacji na stężenie chloroformu powstającego podczas chlorowania zawiesin glonowych. Ochrona Środowiska, 1993, nr 4(51), ss. 31-34.
16. Y. RICHARD et al.: Influence of preozonation on clarification by flotation for drinking water treatment. Ozon: Sci. Engng., 1983, Vol. 5, pp. 3-20.

Algae Removal by the Coagulation – Dissolved Air Flotation Method

*Effective phytoplankton removal (green algae *Selenastrum capricornutum*) during water treatment was demonstrated, using the coagulation – dissolved air flotation (DAF) method. Investigations were conducted under laboratory conditions with varying water pH, oxidant and coagulant doses, and recycle*

ratio. The study involved sodium hypochlorate, hydrogen peroxide and potassium permanganate as primary oxidants and alum as the flocculating agent. DAF preceded by destabilization and flocculation provided a high degree of algae removal at a short retention time.