

Marcin KŁOS¹, Jacek TOKARCZYK²

¹ Instytut Inżynierii Wody i Ścieków
Politechnika Śląska
² SEEN Technologie

ROZWIĄZANIA TECHNICZNE PROCESU FLOTACJI CIŚNIENIOWEJ W UZDATNIANIU WÓD POWIERZCHNIOWYCH

FULL-SCALE PROCESS SOLUTIONS OF DISSOLVED AIR FLOTATION IN SURFACE WATER TREATMENT

A lot of surface waters taken to treatment cause many technological problems. Most of these problems are caused by difficulties in separation process of postcoagulation suspended solids, due to low density of formed flocs. Consequently, it negatively influences on following stages of treatment, especially rapid filtration. One of the possible solution of the problem is to replace sedimentation by the other separation method. It seems that the best choice is to apply dissolved air flotation (DAF).

In the paper the information concerning the first implementation of DAF installation in potable water treatment in Poland is presented. This system operates in the Zakład Wodociągu Północnego, in one of the biggest WTP of Warsaw. Due to the scale and the sophistication of the technological system of this plant (two staged coagulation, a few variants of reagents dosing) the experience gained during this system exploitation can be useful in making decisions concerning both technological and technical solutions of WTPs which treat raw water of similar quality.

1. Wprowadzenie

Oczyszczanie wód, w których występują intensywne zakwity glonów, często jest bardzo trudne, szczególnie gdy proces ten ma być realizowany w oparciu o koagulację, sedymentację i filtrację. Wynika to głównie z faktu, że powstające w trakcie flokulacji tego typu wód agregaty charakteryzują się na ogół bardzo małą gęstością, zbliżoną do gęstości wody. Podobne trudności napotyka się w przypadku wód o małej mętności lecz dużej zawartości rozpuszczonych związków organicznych. Oznacza to niską skuteczność sedymentacji zawiesin pokoagulacyjnych, a w konsekwencji znaczny wzrost obciążenia filtrów ładunkiem zawiesziny. Niektóre formy planktonu roślinnego jak np. nitkowate formy sinic, drobne okrzemki, złotowiciowce mają zdolność przenikania przez złoża filtracyjne, co w znacznym stopniu pogarsza jakość wody uzdatnionej. Ich

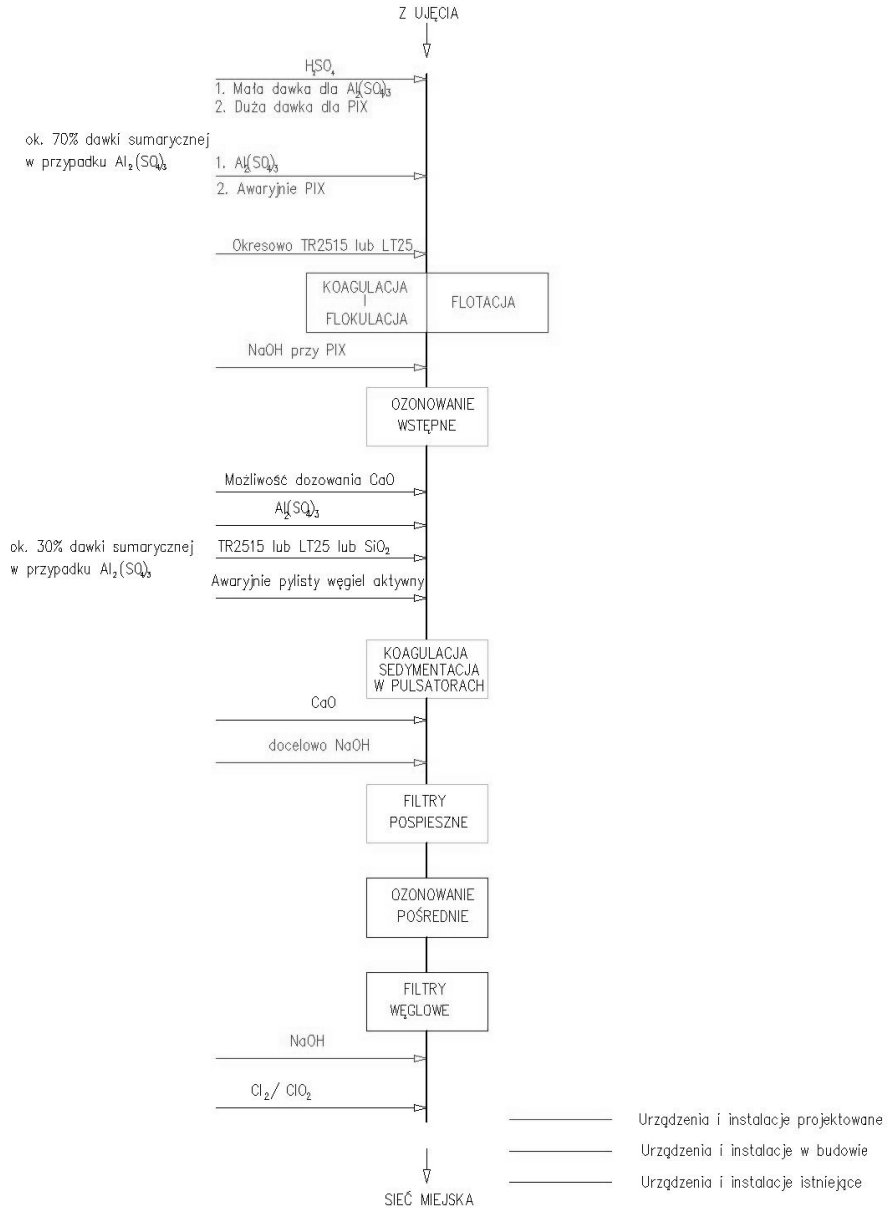
obecność w filtracji zwiększa zapotrzebowanie na związki chloru niezbędne do dezynfekcji i powoduje powstawanie szkodliwych dla zdrowia ludzkiego szeregu związków chlorowcopochodnych. Tworzenie się tych substancji podczas utleniania wody związkami chloru w znacznym stopniu ogranicza możliwość stosowania tego procesu dla poprawy efektów koagulacji. Powoduje to pogorszenie wskaźników fizyczno - chemicznych uzdatnionej wody, często do poziomu uniemożliwiającego wykorzystanie jej dla zaopatrzenia ludności oraz wzrost kosztów eksploatacyjnych (większa częstotliwość płukania filtrów).

Flotacja ciśnieniowa jest jedną z metod flotacji, która wykorzystuje zjawisko tworzenia się trwałego aglomeratu złożonego z fazy rozproszonej (agregaty zawiesin pokoagulacyjnych) oraz pęcherzyków gazu. Pęcherzyki w procesie flotacji ciśnieniowej powstają na skutek dekompresji wody, która wcześniej w saturatorach została nasycona powietrzem atmosferycznym pod zwiększonym ciśnieniem. Powstały w wyniku łączenia się kłaczków i pęcherzyków aglomerat ma gęstość mniejszą od gęstości wody i wynoszony jest na powierzchnię cieczy. Na przebieg flotacji ciśnieniowej ma wpływ wiele parametrów fizyczno - chemicznych. Do podstawowych parametrów technologicznych, projektowych i eksploatacyjnych, procesu uzdatniania wody tą metodą należą:

- ilość wydzielonego powietrza podczas dekompresji wody recykulowanej,
- początkowa zawartość zanieczyszczeń (lub stosunek tej wielkości do ilości wydzielonego powietrza),
- rodzaj i dawki zastosowanych reagentów oraz parametry prowadzenia procesu koagulacji,
- czas flotacji,
- obciążenie hydrauliczne komory flotacji.

W układach flotacji czas separacji zawiesin pokoagulacyjnych jest o wiele krótszy niż w przypadku sedymentacji. Wynosi on w zależności od ilości i typu zanieczyszczeń od 5 do 15 minut. Tak krótki czas w połączeniu z wysokim obciążeniem hydraulicznym typowych komór flotacji, które wynosi $5 - 12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, sprawia, że urządzenia stosowane w procesach flotacji mają mniejsze rozmiary, co w znacznym stopniu zmniejsza koszty inwestycyjne.

Optymalizacja koagulacji dla procesu sedymentacji ma na celu wytworzenie w komorach flokulacji agregatów o dobrych własnościach sorpcyjnych i stosunkowo dużych rozmiarach i masie. Gdy w miejsce sedymentacji stosuje się flotację warunki prowadzenia flokulacji muszą ulec zmianie. Wymagana optymalna wielkość kłaczków dla procesu flotacji jest mniejsza niż w klasycznych układach wykorzystujących proces sedymentacji i wynosi około 30 - 40 μm . Oznacza to, że proces flokulacji należy prowadzić w taki



Rys. 1. Schemat technologiczny oraz zakres modernizacji

Fig. 1. Technological scheme and modernization field

sposób, aby powierzchnię sorpcyjną kłaczków zwiększać nie poprzez wzrost wielkości, a przez to i masy pojedynczych kłaczków, lecz przez zwiększenie ilości mniejszych agregatów w masie uzdatnianej wody. Aby zapewnić prawidłowy przebieg procesu oczyszczania wody metodą flotacji woda wymaga wstępnego przygotowania poprzez prawidłowo przeprowadzony proces flokulacji, którego celem jest:

- neutralizacja ładunku cząstek zanieczyszczeń występujących w oczyszczanej wodzie,
- wytworzenie cząstek zawiesin pokoagulacyjnych o właściwościach hydrofobowych.

W prezentowanym artykule omówiono technologiczne i techniczne rozwiązanie stacji uzdatniania wody przeznaczonej do picia w procesie koagulacji i flotacji ciśnieniowej na przykładzie pierwszej w Polsce inwestycji w Zakładzie Wodociągu Północnego (ZPW) w Warszawie.

2. Uwarunkowania technologiczne projektu

W oparciu o wyniki wieloletnich badań pilotowych prowadzonych na stacji modelowej w ramach Zadania pt „Modernizacja technologii w Zakładzie Wodociągu Północnego – Flotacja ciśnieniowa”, wchodzącego w zakres projektu „Zaopatrzenie w wodę i oczyszczanie ścieków w Warszawie – Faza II” objętego finansowaniem ze środków Funduszu Spójności [4,5,6], sformułowano szereg warunków technologicznych, które powinien spełniać oferowany układ flotacji. Spośród nich najważniejsze to [7]:

1. Jakość wody końcowej, uzdatnionej w Zakładzie Wodociągu Północnego, spełniać będzie wszelkie aktualne wymagania prawa polskiego dotyczące wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.
2. Stacja Flotacji Ciśnieniowej (SFC) stanowić będzie pierwszy stopień uzdatniania wody w układzie koagulacji dwustopniowej. Schemat technologiczny ZPW po rozbudowie przedstawiono na rysunku 1 [8]. Podstawowym reagentem będzie siarczan glinowy, natomiast siarczan żelazowy (PIX) będzie stosowany w przypadku znaczącego pogorszenia jakości wody ujmowanej. Przewidywane na bazie wieloletniej eksploatacji Stacji Uzdatniania Wody i badań technologicznych, zakresy dawek reagentów w zależności od zastosowanego wariantu pracy układu technologicznego oraz jakości wody surowej zamieszczono w tabeli nr 1.

Analiza danych przedstawionych w powyższej tabeli pozwala wnioskować, że docelowy układ uzdatniania może pracować w dowolnej konfiguracji koagulacji objętościowej. Ponieważ z założenia celem flotacji jest usunięcie zawiesiny, zwłaszcza spowodowanej obecnością mikroorganizmów fitoplanktonowych przyjęto, że kryterium skuteczności funkcjonowania instalacji będzie mętność wody opuszczającą komory flotacji (tabela 2.)

Spełnienie tak wysokich wymagań stawianych procesowi flotacji w zakresie skuteczności separacji zawiesiny pokoagulacyjnej oznacza prowadzenie procesu koagulacji według ściśle ustalonych zasad. Jest to szczególnie ważne w okresach niskich temperatur wody surowej, gdy procesy hydrolizy i strącania produktów hydrolizy siarczanu glinu oraz formowania agregatów flotacyjnych są w poważnym stopniu inhibitowane przez ten czynnik.

Tab. 1. Warianty technologiczne pracy układu koagulacji dwustopniowej w układzie technologicznym po rozbudowie ZPW[7]

Tab. 1. Technological operating variants of two-stage coagulation system after modernization WTP "ZPW"

		Warianty pracy układu technologicznego			
		Wariant I Koagulacja jednostopniowa siarczanem glinu w układzie flotacji	Wariant II Koagulacja dwustopniowa siarczanem glinu	Wariant III Koagulacja dwustopniowa z zastosowaniem siarczanu żelazowego w pierwszym stopniu i siarczanu glinu w stopniu drugim	Wariant IV Koagulacja jednostopniowa siarczanem glinu w układzie sedimentacji w pulsatorach
Siarczan glinowy	Łącznie I° i II°	max 160	max 240	max 80	max 240
	II°	nie	20÷80	20÷80	60÷240
	I°	60÷160	40÷160	nie	nie
Siarczan żelazowy	I°	nie	nie	110÷300	nie
Kwas siarkowy		10÷40	10÷40	20÷80	10÷40
Ług sodowy		1° - nie 2° - jest możliwa 3° - tak	1° - nie 2° - jest możliwa 3° - tak	1° - tak 2° - jest możliwa 3° - tak	1° - nie 2° - jest możliwa 3° - tak
Woda wapienna		Możliwość alkalizacji uzdatnianej wody wodą wapienną z istniejącej instalacji lub ługiem sodowym.			
Alkalizacja wody - oznaczenia: 1° - po układzie flotacji; 2° - po pulsatorach ; 3° - przed dezynfekcją , Dawki reagentów w [g/m3]					

Tab. 2. Wymagania efektywność technologiczna stawiana procesowi flotacji ciśnieniowej [7]

Tab. 2. Required technological efficiency of DAF system [7]

Mętność wody [NTU]	
przed flotacją	po flotacji
0 ÷ 10	poniżej 1
11 ÷ 25	poniżej 2
powyżej 25	poniżej 5

Pozostałe inne znaczące dla procesu parametry projektowe i eksploatacyjne sformułowane przez Zamawiającego, są następujące [7]:

- Wymaga się, aby zaprojektowana i wykonana instalacja flotacji ciśnieniowej zapewniała spełnienie założeń w pełnym zakresie wydajności, tj. od 64 800m³/d do 260 000m³/d (brutto).
- Wymaga się, aby stopień recyrkulacji wody uzdatnianej wynosił od 9 do 12%.
- Wymaga się, aby obciążenie jednostkowe linii flotacji wynosiło od 10 do 15 m³/m²/h.
- Wymaga się, aby czas zatrzymania w komorach flokulacji wynosił ok. 10 min. Wykonawca, w oparciu o własną wiedzę i doświadczenie winien zweryfikować czas zatrzymania.
- Wymaga się, aby czas mieszania wynosił odpowiednio; mieszanie szybkie ok. 60 sek. , mieszanie wolne ok. 10 minut. Wykonawca w oparciu o własną wiedzę i doświadczenie winien zweryfikować podane czasy mieszania i dobrać gradienty mieszania dla zapewnienia optymalnych warunków przygotowania zawiesiny po-koagulacyjnej w procesie flotacji.
- Wymaga się, aby sprawność saturatorów była nie mniejsza niż 90%.
- Wymaga się, aby uwodnienie flotatu było mniejsze lub równe 99,5% i było dostosowane do istniejącego systemu hydrotransportu osadów pokoagulacyjnych do Oczyszczalni „Czajka”.
- Wymaga się, aby do usuwania flotatu zastosować metodę hydrauliczną z jednoczesnym automatycznym splukiwaniem osadu ze ścianek komór. Odprowadzenie flotatu do istniejącej instalacji odprowadzania osadów pokoagulacyjnych w Budynku Pulsatorów.

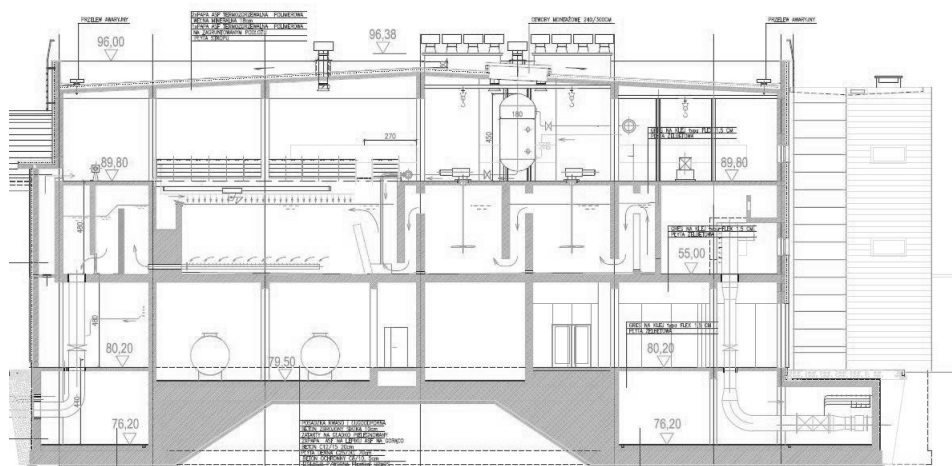
Jak wynika z powyższych uwarunkowań problemem jest usuwanie flotatu oraz jego uwodnienie, gdyż zastosowanie jedynie wspomaganego systemu hydraulicznego wymaga odpowiedniego zaprojektowania kanałów przelewowych oraz ustalenia na etapie rozruchu technologicznego odpowiedniego harmonogramu usuwania flotatu z poszczególnych komór flotacji, uwzględniającego jakość wody surowej oraz wielkości stosowanych dawek koagulantów. Drugi z kluczowych zapisów dotyczy parametrów wolnego mieszania, który to proces jest procesem krytycznym z uwagi na skuteczność separacji zawiesiny pokoagulacyjnej. W praktyce oznaczało to konieczność zapewnienia szerokiego zakresu możliwości regulacji parametrów wolnego mieszania w oparciu o wartość kryterialnej liczby Campa przy praktycznie stałym czasie zatrzymania wody w komorach wolnego mieszania.

3. Przyjęte rozwiązania techniczne i technologiczne układu flotacji ciśnieniowej

Biorąc pod uwagę określone wcześniej wymagania zaproponowano rozwiązanie systemu technologicznego, które składa się z trzech podstawowych elementów:

1. Zespolonych komór szybkiego i wolnego mieszania oraz flotacji ciśnieniowej.
2. Układu saturacji wody recyrkulowanej.
3. Systemu odprowadzania flotatu.

Układ koagulacji objętościowej oraz flotacji został podzielony na 8 identycznych linii technologicznych, zgrupowanych w dwóch blokach. Na rysunku 2 przedstawiono przekrój wysokościowy przez zaprojektowany układ koagulacji i flotacji ciśnieniowej.



Rys.2. Przekrój przez zblokowany układ komór flokulacji i flotacji

Fig. 2. Cross-section of common flocculation and flotation basins

Jako optymalne rozwiązanie przyjęto zastosowanie dwusekcyjnych komór flokulacji z mieszaniem mechanicznym wyposażonych w płynną regulację obrotów mieszadeł. Dywersyfikacja procesu flokulacji na dwie komory pozwala na dostosowanie gradientu mieszania do aktualnej jakości wody oraz dawki koagulantu.

Zblokowanie systemu komór flokulacji i osadników pozwala na zapewnienie odpowiednich warunków transportu wody pomiędzy poszczególnymi sekcjami komór flokulacji oraz pomiędzy komorą wolnego mieszania oraz komorą flotacji. Odpowiednie warunki hydrauliczne przepływu wody zawierającej kłaczkę są krytycznym czynnikiem warunkującym prawidłową ich separację na drodze flotacji.

Jak przedstawiono na rysunku 1 uzdatnianie wody opiera się o dwustopniową koagulację. Skuteczność I stopnia koagulacji, mierzona jako mętność wody opuszczającej komory flotacji, w znaczący sposób będzie wpływać na pracę pulsatorów, realizujących II stopień koagulacji wody. Oznacza to, że zarówno na etapie rozruchu technologicznego układu koagulacji i flotacji, jak i w czasie jego normalnej eksploatacji, wymagane będzie dostosowanie parametrów pracy pulsatorów do nowych warunków. Warunki te zmieniają się w znacznym stopniu, głównie w zakresie obciążenia osadników ładunkiem zawieszin. Pociągnie to za sobą zmianę w charakterze pracy tych urządzeń. Dla niskiego obciążenia zawieszin pulsator będzie pracował głównie na drodze sorpcji związków rozpuszczonych, zachodzącej na powierzchni kłaczków osadu zawieszono. Wiąże się to z koniecznością optymalizacji procesu koagulacji II stopnia wg mechanizmów koagulacji wymiatającej oraz kontrolą parametrów hydraulicznych w celu zabezpieczenia przed zagęszczaniem warstwy osadu lub wynoszeniem zawiesziny z osadników.

Kolejnym elementem wymagającym rozwiązania był układ saturacji wody recykulowanej. Zaproponowane rozwiązanie jest rozwiązaniem pozwalającym w nieskomplikowanym technicznie układzie uzyskać wysokie parametry nasycenia wody podawanej do komór flotacji. Zaprojektowano 2 niezależne pompownie wody recykulowanej – po jednej pompowni dla każdego z dwóch bloków (4 linii komór flotacji w każdym). Pompownia wody recykulowanej dla jednego bloku produkcyjnego składa się z 3 pomp (dwie pracujące plus 1 rezerwowa). Saturatory zostały zaprojektowane w taki sposób, aby ich sprawność wynosiła minimum 90%, co jest zgodne z wymaganiami Zamawiającego. Jednak sama sprawność saturatorów nie jest wystarczającym warunkiem prawidłowej i skutecznej pracy układu recykulacji. Decyduje o tym, oprócz wspomnianej już sprawności poszczególnych saturatorów, rozkład wielkościowy pęcherzyków powstających w trakcie dekompresji wody. Rozwiązanie systemu transportu wody z saturatorów do komory flotacji oraz konstrukcja dysz, za pomocą których wprowadza się nasyconą powietrzem wodę do strefy mieszania winna zapewniać dwie rzeczy. Pierwsza z nich to jak największa strata ciśnienia. To właśnie od wartości różnicy ciśnień zależy wielkość powstających w czasie dekompresji pęcherzyków powietrza. Kolejnym ograniczeniem jest to, że powinien być to proces możliwie jak najszybszy, mający miejsce jedynie na dyszy dekompresyjnej, a nie w przewodzie łączącym system dysz z saturatorami. Idealna konstrukcja dyszy oraz systemu recykulacji zapewnia odpowiedni spadek ciśnienia na dyszy przy jednoczesnym zminimalizowaniu możliwości powstawania mikropęcherzyków, które mogą w konsekwencji prowadzić do destabilizacji warstwy flotatu powstającego na powierzchni komory flotacji, spadku stężenia ilościowego pęcherzyków powietrza, co znacznie obniża kinetykę powstawania agregatów flotacyjnych.

Uzyskanie odpowiedniego końcowego stopnia uwodnienia flotatu jest głównie uwarunkowane sposobem usuwania flotatu. Pozostałe czynniki to jakość wody surowej, rodzaj koagulantu oraz zastosowanie środków wspomagających flokulację, dawki reagentów. Ze względu na wartość stężenia suchej masy osadu we flotacie zaproponowano metodę hydrauliczną. Wprawdzie w przypadku zgarniaczy mechanicznych, poprzez kontrolę szybkości pracy urządzenia, operator systemu jest w stanie ustalić wartość stężenia suchej masy osadu we flotacie na wymaganym poziomie, jednak wartość ta waha się ona od 2 do 5% i jest znacznie wyższa niż w metodzie hydraulicznej. W drugim przypadku możliwe jest uzyskanie stężenia suchej masy osadu na poziomie od 0,4% do ok. 1%. Wadą metody hydraulicznej jest natomiast to, że na etapie rozruchu technologicznego wymagane jest określenie częstotliwości usuwania flotatu w zależności od jakości wody surowej oraz konfiguracji parametrów technologicznych stosowanych w procesie uzdatniania. O stężeniu suchej masy osady we flotacie decyduje również jakości wody, które jest znacznie wyższe niż w przypadku osadów usuwanych z komór osadowych osadników i zmienia się w stosunkowo szerokim zakresie. Dla wód barwnych, o niskiej mętności wynosi ono, przy mechanicznym usuwaniu flotatu, ok. 2%, natomiast w uzdatnianiu wód z zakwitem fitoplanktonu może sięgać 4 – 5%.

4. Podsumowanie

Inwestycja w Zakładzie Wodociągu Północnego jest pierwszą tego typu realizacją w układzie uzdatniania wody do celów pitnych w Polsce na tak dużą skalę. Proces flotacji ciśnieniowej jest bardzo efektywną metodą separacji zawieszin pokoagulacyjnych i pozwoli na poprawę warunków technologicznych, jak i ekonomiki procesu. Analiza

ekonomiczna i technologiczna układu technicznego może dostarczyć wielu danych przydatnych, które mogą zostać wykorzystane przy analizie rozwiązań dla nowych i modernizowanych stacji uzdatniania wody.

Realizowana inwestycja daje możliwość praktycznej oceny skuteczności dwustopniowej koagulacji wody. Ze względów ekonomicznych tego rodzaju technologia ogranicza się do tej pory do stosowania w I stopniu koagulacji objętościowej a koagulacji powierzchniowej w II stopniu. W ZPW oba stopnie to koagulacja objętościowa. Stwarza to odmienne warunki dla usuwania związków organicznych i przygotowania wody przed procesem ozonowania i biofiltracji na węglu aktywnym. Biorąc pod uwagę, że w chwili obecnej główne trendy w uzdatnianiu wody sprowadzają się do uzyskiwania wody stabilnej pod względem chemicznym, jak i mikrobiologicznym, to każda z możliwości poprawy skuteczności usuwania materii organicznej powinna zostać dokładnie przeanalizowana.

Bibliografia

- [1] Edzwald J.K. Principles and applications of dissolved air flotation. *Wat. Sci. Tech.*, 1995, 31 (3-4), 1 - 23
- [2] Haarrhoff J., van Vuuren L. Design parameters for dissolved air flotation in South Africa, *Wat. Sci. Tech.*, 1995, 31 (3-4), 24-42
- [3] Jodłowski A. Badania nad usuwaniem glonów z wody w procesie koagulacji – flotacji ciśnieniowej, *Ochrona Środowiska*, 1994, 54-55, 19 – 23
- [4] Kulesza M., Ozimiński K. Uzdatnianie wody w procesie flotacji ciśnieniowej na stacji pilotowej Wodociągu Północnego, *Ochrona Środowiska*, 1997, 67 (4), 37-40
- [5] Wąsowski J. Kulesza M. Zastosowanie flotacji ciśnieniowej do usprawnienia koagulacji z Zalewu Zegrzyńskiego, *Ochrona Środowiska*, 1999, 75 (4), 57-60
- [6] Sroka M. Badania wpływu wstępnego ozonowania wody z zastosowanie flotacji ciśnieniowej na dawkę ozonu, *Ochrona Środowiska*, 2004, 26 (3), 21-24
- [7] Program Funkcjonalno – Użytkowy. Dokumenty przetargowe - Zadanie pt „Modernizacja technologii w Zakładzie Wodociągu Północnego – Flotacja ciśnieniowa” Projekt - „Zaopatrzenie w wodę i oczyszczanie ścieków w Warszawie – Faza II”
- [8] Projekt techniczny. „Budowa budynku flotacji ciśnieniowej wraz z projektowaną instalacją i towarzyszącym jej uzbrojeniem Zakład Wodociągu Północnego”. Branża – technologia.

