

Marcin Kłós

## Zastosowanie flotacji ciśnieniowej do uzdatniania wód o zmiennej mętności

Wody powierzchniowe często charakteryzują się znaczną zmiennością składu fizyczno-chemicznego, zarówno w skali roku jak i doby, co jest przyczyną wielu problemów technicznych i technologicznych, związanych z koniecznością zapewnienia optymalnych dawek reagentów, dopuszczalnych obciążeń hydraulicznych itp. Trudności te są wyraźnie widoczne przy ujmowaniu wód z rzek i potoków górskich. Wody cieków górskich charakteryzują się przeważnie dobrą jakością, a przekroczenia normatywnych wartości wskaźników fizyczno-chemicznych zdarzają się jedynie okresowo i związane są zwykle z występowaniem opadów atmosferycznych o dużym natężeniu i innymi zjawiskami sezonowymi, jak np. topnienie śniegu. Są one zwykle przyczyną wzrostu mętności wody i ilości powiązanych z nią innych zanieczyszczeń. Jednak te – zazwyczaj krótkie – okresy pogorszenia jakości ujmowanej wody zmuszają do budowy zakładów uzdatniania uwzględniających szeroki zakres zmian wartości niektórych wskaźników jakościowych [1]. Najczęściej stosowaną metodą uzdatniania tego typu wód jest koagulacja. Pozwala ona na usunięcie substancji rozpuszczonych, koloidów i zawiesin, zarówno w okresach gdy wartości wskaźników jakości wody są przekroczone w niewielkim stopniu, jak i w czasie, gdy woda prowadzi bardzo duży ładunek zanieczyszczeń. Efektywność koagulacji uzależniona jest nie tylko od możliwości zapewnienia odpowiedniej konfiguracji parametrów tego procesu (dawka koagulantu, zakres pH, czasy trwania oraz intensywności szybkiego i wolnego mieszania), ale także od skuteczności procesu separacji zawiesin pokoagulacyjnych.

Powszechnie stosowaną metodą do oddzielania powstających podczas flokulacji kłaczków jest sedymentacja, jednak w wypadku wód o niskiej mętności, lecz dużej zawartości rozpuszczonych i koloidalnych związków organicznych, powstające cząstki zawiesin pokoagulacyjnych charakteryzują się małą gęstością, co wymusza bardzo niskie obciążenia hydrauliczne osadników lub konieczność stosowania obciążników kłaczków. Alternatywą tego typu działań jest zastąpienie sedymentacji procesem flotacji ciśnieniowej. Jednak aby móc zastosować tę metodę separacji w uzdatnianiu wód o zmiennej mętności, należy określić wpływ fluktuacji ilości zanieczyszczeń obecnych w ujmowanej wodzie na przebieg flotacji ciśnieniowej i poprzedzającego ją procesu koagulacji.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań nad uzdatnianiem wód górskich o zmiennej jakości w procesie koagulacji i flotacji ciśnieniowej, na przykładzie ujęcia „Wisła-Czarne”. Celem badań było określenie wpływu podwyższonej mętności wody na przebieg tych procesów jednostkowych

oraz określenie możliwości przeciwdziałania spadkowi efektów uzdatniania wody.

### Metodyka badań

Badania przeprowadzono w skali ułamkowo-technicznej równolegle w dwóch przepływowych układach badawczych, tj. w układzie koagulacji i flotacji ciśnieniowej z komorą zespoloną oraz w celach porównawczych – w układzie koagulacji i sedymentacji.

Woda surowa wraz z koagulantem i alkalią służącymi do korekty pH wprowadzona była do dolnej części reaktora, stycznie do obwodu komory, co pozwoliło na nadanie masie uzdatnianej wody ruchu wirowego. Wodę recykulowaną wprowadzono do reaktora powyżej punktu dopływu wody surowej, przeciwpądowo w stosunku do wody wirującej w reaktorze. Powstające aglomeraty kłaczków i pęcherzyków powietrza wznosiły się na powierzchnię reaktora tworząc tzw. flotat, który był odprowadzany hydraulicznie za pomocą koryta zbiorczego. Woda sklarowana przepływała przez przelew zatopiony w kierunku górnej krawędzi komory, skąd była odbierana i kierowana do zbiornika pośredniego, z którego pobrano wodę do filtracji oraz zasilono układ recyrkulacji. W jego skład wchodziły pompa wirowa, sprężarka oraz saturator z wypełnieniem złożonym z kształtek polietylenowych. Układ koagulacji i sedymentacji składał się z wirowej komory flokulacji oraz osadnika pionowego. Na końcu każdego z układów badawczych zainstalowano także ciśnieniowy filtr pospieszny, co miało na celu określenie wpływu zmian w pracy powyższych układów uzdatniania na przebieg procesu filtracji.

W celu uzyskania pełnego obrazu zmian jakości ujmowanej wody surowej oraz prowadzenia kontroli przebiegu procesu oczyszczania zakres analizowanych wskaźników fizyczno-chemicznych podzielono na dwie grupy. Pierwsza z nich obejmowała wskaźniki, których wartość była monitorowana przez cały czas trwania serii pomiarowych. W skład tych oznaczeń wchodziły pH, kwasowość ogólna, zasadowość ogólna, barwa, mętność, utlenialność oraz absorbancja w UV przy długości fali 254 nm [4,5]. Próbkę wody do oznaczeń pobrano w odstępach 30 min, począwszy od 60 min pracy układu. Druga grupa obejmowała wskaźniki jakości wody, które – z uwagi na złożone procedury analityczne – oznaczono jedynie w tych próbkach, w których wartości wskaźników pierwszej grupy wskazywały na wysokie efekty usuwania zanieczyszczeń. Do grupy tej zaliczono pomiary ogólnego węgla organicznego (OWO), rozpuszczonego węgla organicznego (RWO), glinu lub żelaza, w zależności od rodzaju stosowanego koagulantu oraz określenie ilości ubocznych produktów dezynfekcji prowadzonej związkami chloru.

## Dyskusja wyników badań

### Jakość wody surowej

Zbiornik „Wisła-Czarne” powstał na Wiśle w miejscu połączenia Białej Wiselki z Czarną Wiselką i jest najwyższym położonym zbiornikiem zaporowym w Polsce. Podstawową funkcją tego zbiornika jest wyrównanie dużych nierównomierności przepływów oraz zabezpieczenie zasobów wodnych w celu zaopatrzenia w wodę Ustronia, Wisły, Skoczowa oraz okresowo Cieszyna. Jego całkowita pojemność wynosi ponad 5 mln m<sup>3</sup>, a maksymalna powierzchnia zalewu około 40 ha. Przy normalnym poziomie piętrzenia wody i średnim przepływie obu Wisłek równym 0,825 m<sup>3</sup>/s czas retencji wody w zbiorniku wynosi 29 dób. Woda, w zależności od jakości, może być czerpana z trzech poziomów, znajdujących się na wysokościach 5 m, 10 m i 15 m, licząc od dna zbiornika w części przyzaporowej [2].

Badania procesu oczyszczania wody ze zbiornika „Wisła-Czarne” przeprowadzono w latach 1997–2000. W tym okresie w zbiorniku wykonywano prace remontowe, co było powodem dużych dobowych zmian wartości niektórych wskaźników fizyczno-chemicznych wody. Skoki jakości wody surowej nasilały się szczególnie w okresie intensywnych opadów atmosferycznych, z uwagi na zmiany w ilości wody prowadzonej w Białej i Czarnej Wiselce. W tabeli 1 przedstawiono wartości wybranych wskaźników fizyczno-chemicznych wody w trakcie badań. Z uwagi na prowadzone prace remontowe, nie stwierdzono sygnalizowanych wcześniej zaskwitów fitoplanktonu.

Tabela 1. Wybrane wskaźniki fizyczno-chemiczne wody surowej

Wskaźnik, jednostka	Minimum	Maksimum	Średnia
Temperatura, °C	2,4	16,8	–
pH,–	6,70	7,10	6,95
Barwa pozorna, gPt/m <sup>3</sup>	10	80	35
Mętność, NTU	3	70	15
Dwutlenek węgla, gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	13,2	39,6	33,0
Zasadowość ogólna, val/m <sup>3</sup>	0,3	0,4	0,35
Twardość ogólna, gCaCO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>	55	75	65
Utlenialność, gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	1,7	5,6	3,5
Żelazo ogólne, gFe/m <sup>3</sup>	0	0,2	0,15
Glin, gAl/m <sup>3</sup>	0	0,28	0,18
Przewodność elektryczna, μS/cm	68	75	72

Jakość ujmowanej wody oraz dynamika jej zmian była uzależniona głównie od pory roku. Można było wyróżnić dwa charakterystyczne okresy. Pierwszy obejmował miesiące od listopada do marca. Woda ujmowana w tym czasie charakteryzowała się niską temperaturą (2,4+7,5 °C), niską barwą (10+20 gPt/m<sup>3</sup>) i mętnością (3+7 NTU). Zawartość związków organicznych, mierzona jako utlenialność, zawierała się w zakresie 2,0+3,7 gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, a jako ogólny węgiel organiczny w zakresie 1,3+1,9 gC/m<sup>3</sup>. Pomimo niskiej ilości związków organicznych woda charakteryzowała się wysokim potencjałem tworzenia trihalometanów (THM), dlatego też należało poddać ją bardziej skutecznym procesom uzdatniania niż tylko filtracja pospieszna, która w wypadku badanej wody obniżała poziom zanieczyszczeń organicznych jedynie o kilka procent [3].

Drugi charakterystyczny okres zmian jakości wody ujmowanej ze zbiornika obejmował miesiące kwiecień–październik. Zakres oraz dynamika zmian składu fizyczno-chemicznego wody, zwłaszcza w okresach zwiększonych przepływów w Wiśle, były większe niż w okresie jesienno-zimowym. Jednym z powodów tego stanu był brak możliwości retencji i uśrednienia jakości wody w zbiorniku zaporowym.

Przez większy czas badań prowadzonych w tym okresie mętność wody kształtowała się w granicach 9+18 NTU, a barwa pozorna wynosiła 25+35 gPt/m<sup>3</sup>. Zawartość związków organicznych, mierzona jako utlenialność, zawierała się w zakresie 2,0+4,5 gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, a ogólny węgiel organiczny w zakresie 1,40+2,50 gC/m<sup>3</sup>. Potencjał tworzenia THM kształtował się na poziomie porównywalnym z okresem jesienno-zimowym. Temperatura wody uzależniona była od temperatury powietrza i wahała się od 8 °C do 17 °C.

W okresach wzmózonego topnienia śniegu lub intensywnych opadów atmosferycznych wskaźniki fizyczno-chemiczne wody uległy gwałtownemu pogorszeniu. Mętność wzrosła do 50+70 NTU, przy czym większy ładunek zawieszin powodował często również wzrost ilości związków organicznych. Utlenialność wody zwiększyła się do 5,0+5,6 gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Oprócz okresów znacznego pogorszenia jakości wody surowej zdarzały się również dni, w których wartości wskaźników fizyczno-chemicznych były podobne do obserwowanych w okresie jesienno-zimowym.

### Efekty uzdatniania wody

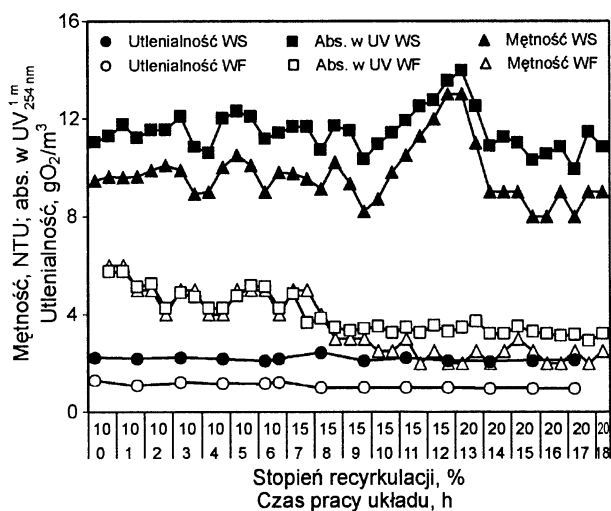
Całość prac badawczych podzielono na dwa etapy. Celem pierwszej części badań było określenie optymalnych warunków i parametrów pracy układów uzdatniania, tj. rodzaju i dawki koagulantu, zakresu pH, przy którym należy prowadzić koagulację oraz parametrów pracy poszczególnych urządzeń. Wyniki badań nad uzdatnianiem wody ze zbiornika zaporowego „Wisła-Czarne” przeprowadzonych w okresie od listopada 1997 r. do marca 1998 r. wykazały, że zastosowanie w tym czasie procesu koagulacji objętościowej było nieefektywne. Najlepsze efekty usuwania zanieczyszczeń umożliwiła koagulacja kontaktowa. Urządzenia układów koagulacji klasycznej lub koagulacji i flotacji ciśnieniowej mogły w tym okresie pełnić jedynie rolę komór reakcji i układu buforowego zabezpieczającego filtry przed nagłym wzrostem ładunku zawieszin w wodzie surowej. Dopiero w okresie od kwietnia do października 1998 r. zastosowanie procesu koagulacji objętościowej znalazło uzasadnienie.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na określenie warunków prowadzenia tego procesu. Jako koagulant wytypowano siarczan glinu (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O), którego dawka optymalna kształtowała się na poziomie 50 g/m<sup>3</sup>. Z powodu małych właściwości buforujących wody surowej pH wody po dodaniu koagulantu obniżyło się do 4,0+4,5. Ponieważ optymalny zakres wartości tego wskaźnika dla koagulacji wynosił 6,7+6,9, oprócz koagulantu należało zastosować alkalia. Dla korekty pH w komorze flokulacji zastosowano węglan sodu w dawce 60+65 gNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>. Wyniki badań nad określeniem optymalnych wartości parametrów pracy układów uzdatniania przedstawiono w tabeli 2 [3].

Efekty pracy układu uzdatniania pracującego z optymalnymi wartościami parametrów eksploatacyjnych w trakcie oczyszczania wody o składzie typowym dla pory letniej 1998 r. przedstawiono na rysunku 1.

Tabela 2. Parametry pracy układów badawczych

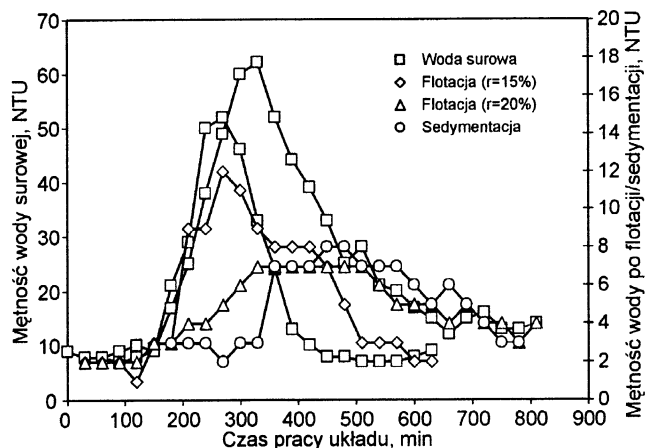
Urządzenie	Parametr, jednostka	Zakres wartości	Wartość optymalna
Układ do koagulacji i sedymentacji			
Komora flokulacji	Czas przetrzymania, min	15÷25	20
Osadnik	Prędkość wznoszenia w strefie klarowania, mm/s	0,18÷0,33	0,22
Układ do koagulacji i flotacji ciśnieniowej			
Komora zespolona (strefa flokulacji)	Czas przetrzymania, min	8÷18	15
Komora zespolona (strefa flotacji)	Czas przetrzymania, min	10÷20	17
	Stopień recyrkulacji, %	10÷25	15
Układ saturacji	Ciśnienie saturacji, kPa	350÷550	475
	Czas saturacji, min	–	>8



Rys. 1. Efekty pracy układu koagulacji i flotacji pracującego z optymalnymi wartościami parametrów eksploatacyjnych (WS – woda surowa, WF – woda po flotacji)

Z zamieszczonych danych widać, że układ koagulacji i flotacji osiągnął maksymalną efektywność dla stopnia recyrkulacji równego 15%. Dalsze zwiększanie ilości powietrza nie wpłynęło znacząco na wartości badanych wskaźników jakości wody. Mętność wody po komorach koagulacji i flotacji ciśnieniowej kształtowała się na poziomie 2,0÷2,5 NTU, a stopień usunięcia związków organicznych, mierzonych jako utlenialność, w granicach 55%, zaś jako absorbancja w UV – 70%. Układ pracował bardzo stabilnie. Po ustaleniu się warunków koagulacji i flotacji w komorze, zmiany mętności wody surowej w zakresie 8÷13 NTU nie wpłynęły na efekty procesów uzdatniania. Uzyskane po komorze koagulacji i flotacji ciśnieniowej efekty usuwania zanieczyszczeń były bardzo zbliżone do rezultatów pracy klasycznego układu koagulacji i sedymentacji.

Z uwagi na to, iż część badań przeprowadzono w czasie remontu zbiornika, podczas intensywnych opadów atmosferycznych woda surowa miała bardzo wysoką mętność. Zmiany jakości wody były bardzo gwałtowane, lecz z reguły krótkotrwałe. Ich dynamika i zakres spowodowały jednak znaczący wpływ na pracę układów uzdatniania. Na rysunku 2 przedstawiono zmiany mętności wody surowej oraz po procesie koagulacji i klarowania w trakcie gwałtownego pogorszenia się jej jakości. Rysunek ten ilustruje dane zebrane podczas dwóch serii badań. W trakcie pierwszej serii testowano układ koagulacji i flotacji ciśnieniowej oraz koagulacji i sedymentacji, natomiast podczas drugiej serii pracował jedynie pierwszy z nich. W obu seriach układy badawcze pracowały z taką samą



Rys. 2. Zmiany mętności wody po procesach koagulacji i separacji

dawką koagulantu i w takim samym zakresie pH (6,7÷6,9). Dawka siarczanu glinu została zwiększona do 70 g/m<sup>3</sup> po około 60 min pracy układów uzdatniania.

W trakcie pierwszej serii badań mętność wody surowej wzrosła do 52 NTU. Zarówno osadnik jak i komora flotacji pracowały w oparciu o optymalne wartości parametrów (tab. 2). Wyniki pomiarów mętności wody po komorze flotacji wykazały jednak, że w wypadku tak mętnej wody surowej zastosowany 15% stopień recyrkulacji nie pozwolił na uzyskanie takich efektów oczyszczania jak procesy koagulacji i sedymentacji. Mętność wody po komorze zespolonej była prawie o połowę wyższa niż wody po osadniku. Pomiar mętności wody potwierdziły także obserwacje pracy filtrów. Przyrost oporów hydraulicznych na filtrze po komorze flotacji był prawie dwukrotnie szybszy niż na filtrze po osadniku.

Z tego względu w drugiej serii badań zwiększono ilość powietrza doprowadzonego do układu koagulacji i flotacji poprzez zmianę stopnia recyrkulacji z 15% do 20%, co dało pozytywne rezultaty (rys. 2). Przebieg zmian mętności wody po procesie separacji zawiesin pokoagulacyjnych był podobny do zmian mętności po osadniku w pierwszej serii. Pomimo iż mętność wody surowej była większa niż w pierwszej serii, dla wyższego stopnia recyrkulacji nie odnotowano gwałtownego jej wzrostu. Kształtowała się ona maksymalnie na poziomie 7 NTU, co pozwoliło na zmniejszenie obciążenia filtru ładunkiem zawiesin. Dynamika przyrostu oporów filtracyjnych była mniejsza niż dla 15% stopnia recyrkulacji i porównywalna z układem koagulacji i sedymentacji. Efekty usuwania zanieczyszczeń organicznych, mierzonych jako utlenialność oraz absorbancja w UV, w obu seriach badań były ściśle skorelowane ze spadkiem mętności wody.

Podczas uzdatniania w układzie koagulacji i sedymentacji problemy sprawiała również woda o bardzo małej mętności, nie przekraczającej 5 NTU. Tworzące się podczas uzdatniania tej wody kłaczkę były bardzo lekkie i usunięcie ich podczas sedymentacji wymagało zmniejszenia obciążenia hydraulicznego osadnika o około 20%, z  $0,79 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  do  $0,63 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ , natomiast w pracy układu z zespoloną komorą flokulacji i flotacji nie zaobserwowano żadnych nieprawidłowości. Powstające podczas flokulacji małe kłaczkę szybko tworzyły dobrze flotujące aglomeraty, co pozwoliło na obniżenie dawki koagulantu z  $50 \text{ g}/\text{m}^3$  do  $40 \text{ g}/\text{m}^3$ . Mętność wody opuszczającej urządzenie dla niższej dawki koagulantu kształtowała się na poziomie 2+3 NTU, przy wysokim stopniu usunięcia związków organicznych.

## Wnioski

◆ Możliwe jest zastosowanie procesu flotacji ciśnieniowej w uzdatnianiu wód o zmiennej, okresowo wysokiej mętności. Skuteczność separacji zawieszin pokoagulacyjnych była zbliżona do efektów uzyskanych w trakcie procesu sedymentacji, przy dużo większych wartościach obciążenia hydraulicznego urządzeń.

◆ Przewaga techniczna i technologiczna procesu flotacji nad sedymentacją była szczególnie widoczna podczas okresów występowania wody o niskiej mętności (poniżej 5 NTU), przy jednoczesnym wysokim stężeniu związków organicznych. Zastosowanie tej metody separacji kłaczkę pozwoliło dodatkowo na obniżenie dawki koagulantu.

◆ Warunkiem prawidłowej pracy układu koagulacji i flotacji podczas nagłych wzrostów mętności wody surowej było szybkie i prawidłowe ustalenie dwóch podstawowych parametrów eksploatacyjnych, tj. stopnia recyrkulacji oraz dawki koagulantu. Wymagało to zastosowania kontroli jakości wody surowej oraz wody po procesie flotacji w systemie *on-line*. W wypadku gwałtownego i silnego pogorszenia jakości wody surowej wszelkie opóźnienia w działaniu mogą spowodować przeciążenie filtrów ładunkiem zanieczyszczeń i pozbawić odbiorców wody o odpowiedniej jakości. Doświadczenia pokazują, że do tego celu można z bardzo dobrym skutkiem wykorzystać pomiary spektrofotometryczne w UV.

## LITERATURA

1. J. PAWEŁEK: Wykorzystanie zapasu wody w celu zabezpieczenia ujęć wodociągowych z rzek i potoków górskich przy stanach podwyższonej mętności i zawieszin. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Rozprawy nr 215, Kraków 1996.
2. S. WRÓBEL i in.: Zakwaszenie Czarnej Wisłki i eutrofizacja zbiornika zaporowego Wisła-Czarne. Centrum Informacji Naukowej, Kraków 1995.
3. J. GUMIŃSKA, M. KŁOS: Uzdatnianie wód górskich o niskiej mineralizacji. Informacja INSTAL, 2000, nr 2, ss. 55–58.
4. M. KŁOS: Zastosowanie pomiarów spektrofotometrycznych w kontroli procesu uzdatniania wody. Mat. konf. „Mikrozanieczyszczenia w środowisku człowieka”, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2001.
5. M. KŁOS: Możliwości zastosowania pomiarów spektrofotometrycznych w nadfiolecie w uzdatnianiu wody. LAB, 2002, nr 5, ss. 12–16.

Kłos, M. Dissolved Air Flotation as Part of the Treatment Train for Water of Varying Turbidity. *Ochrona Środowiska* 2003, Vol. 25, No. 4, pp. 33–36.

**Abstract:** Although most of them carry high-quality water, mountain rivers and reservoirs experience pollution episodes which follow a seasonal pattern (snow melting, heavy rains and storms), so there arises a need to design more advanced treatment plants in those regions. The study described in this paper was carried out on a pilot-plant scale with surface water samples

collected from the water reservoir Wisła-Czarne treated by coagulation and dissolved air flotation. Determined were the basic parameters of the unit processes (type and dosage of reagents, extent of recirculation) with which the highest removal of particular pollutants was achieved. Based on the measured water quality parameters of choice, the fundamentals of a control system for the coagulation and flotation processes were determined.

**Keywords:** Dissolved air flotation, water treatment.