

Jacek Wąsowski, Marek Kulesza

## Zastosowanie flotacji ciśnieniowej do usprawnienia koagulacji wody z Zalewu Zegrzyńskiego

Flotacja ciśnieniowa polega na wynoszeniu na powierzchnię cieczy zawartych w niej ciał stałych (zawiesiny) lub ciekłych (oleje, tłuszcze itp.) przy pomocy pęcherzyków gazu (najczęściej powietrze) o średnicy 10+100 µm. W procesie tym wykorzystuje się zjawisko tworzenia trwałych aglomeratów typu czynnik fazy rozproszonej-pęcherzyk gazu, o pozornym ciężarze właściwym mniejszym od ciężaru właściwego cieczy. W efekcie następuje wynoszenie powstałych aglomeratów na powierzchnię zwierciadła cieczy, jak to ma miejsce w wypadku flotacji samoistnej. Podstawowym warunkiem dobrego przebiegu flotacji jest mała zwilżalność czynnika fazy rozproszonej przez ciecz. Efektywność procesu można poprawić stosując koagulanty lub flokulanty [1]. Pęcherzyki gazu do flotacji ciśnieniowej w praktyce otrzymuje się najczęściej przez gwałtowne rozprężenie wody nasyconej wcześniej powietrzem, pod ciśnieniem znacznie wyższym od ciśnienia atmosferycznego.

Dotychczasowe badania oraz praktyka ostatnich lat wykazały, że proces flotacji znajduje coraz szersze zastosowanie w technologii uzdatniania wody, zwłaszcza dla wód silnie zeutrofizowanych zawierających glony, oraz do oczyszczania ścieków i zagęszczania osadów ściekowych. W wielu publikacjach podkreśla się, iż flotacja ciśnieniowa jest metodą łączącą wysoki stopień usuwania zanieczyszczeń z równoczesnym – znacznym – skróceniem czasu trwania procesu (np. w porównaniu z sedymentacją). Przeprowadzone badania dowodzą również, że wybór optymalnego układu i parametrów procesu dla każdego rodzaju oczyszczanej cieczy możliwy jest jedynie na podstawie doświadczalnych badań technologicznych.

W Zakładzie Wodociągu Północnego od wielu lat prowadzone są badania mające na celu znalezienie lepszych metod usuwania zanieczyszczeń organicznych w procesie uzdatniania wody. W efekcie tych badań wprowadzono wiele zmian w technologii, z których najważniejsze to wyeliminowanie wstępnego chlorowania i wprowadzenie wstępnego ozonowania, stosowanie dwóch różnych koagulantów (glinowy i żelazowy), budowa nowoczesnych filtrów węglowych łącznie z komorami i instalacją do ozonowania wtórnego oraz podjęcie decyzji o wprowadzeniu flotacji ciśnieniowej do procesu uzdatniania wody. W układzie technologicznym Wodociągu Północnego w Wieliszewie stosuje się ozonowanie wstępne wody surowej. Lepszym rozwiązaniem jest ozonowanie wody wstępnie oczyszczonej, pozbawionej znacznej części związków organicznych, będących prekursorami wielu szkodliwych produktów ozonowania. Wstępne oczyszczenie wody pozwoli również na zmniejszenie dawek ozonu, niezbędnych w procesie wstępnego utleniania wody, a zatem przyczyni się do zmniejszenia kosztów procesu ozonowania.

Prowadzone od 1994 r. badania procesu flotacji ciśnieniowej miały na celu dalszą poprawę skuteczności uzdatniania tak trudnej wody, jaką jest woda ujmowana z Zalewu Zegrzyńskiego. Wstępne badania procesu flotacji ciśnieniowej rozpoczęto na stacji pilotowej Zakładu Wodociągu Północnego w maju 1994 r., przy wykorzystaniu niewielkiej (1 m<sup>3</sup>/h) stacji flotacji, wypożyczonej z wodociągów w Turku w Finlandii. Próby te trwały do końca 1994 r. i wypadły pomyślnie. W niespełna pięć miesięcy później rozpoczęto badania przy użyciu nowo zbudowanej we współpracy ze szwedzką firmą PURAC nowoczesnej stacji flotacji o wydajności 5+15 m<sup>3</sup>/h. Stacja ta została wyposażona w dwie oddzielne linie badawcze. Dla obu linii zaprojektowano jeden wspólny saturator. Do sterowania pracą tego urządzenia zastosowano mikroprocesorowy układ automatyki. Każdą linię badawczą wyposażono w trójdzielną komorę flokulacji z pionowymi mieszadłami ramowymi o płynnej regulacji prędkości obrotowej oraz komory flotacji z mechanicznym zgarniaczem osadu poflotacyjnego.

Wyniki badań wykonanych w latach 1994 i 1995 wykazały pozytywny wpływ flotacji ciśnieniowej, poprzedzonej koagulacją, na usuwanie zanieczyszczeń organicznych z wody ujmowanej z Zalewu Zegrzyńskiego, wyrażający się obniżeniem utleniałości o 60+75%, absorbancji w UV (254 nm) o 60+71% oraz zawartości fitoplanktonu o 92+98%. Najlepsze efekty uzyskano w wypadku prowadzenia procesu w ściśle określonym, optymalnym pH wody, które wynosiło 6,2 dla siarczanu glinu oraz 5,8 dla siarczanu żelaza (PIX) [2].

Przedmiotem niniejszego artykułu są wyniki badań technologicznych prowadzonych przez kolejne dwa lata, które miały na celu sprawdzenie efektów zastosowania wstępnej koagulacji i flotacji ciśnieniowej oraz określenie przydatności tego procesu włączonego w obecny układ technologiczny Wodociągu Północnego. Badania te stanowią jeden z elementów programu zmierzającego do optymalizacji i intensyfikacji przebiegu koagulacji domieszek wody z Zalewu Zegrzyńskiego w aspekcie nowych, ostrzejszych, wymagań jakościowych stawianych wodzie przeznaczonyj do picia. Również w celu poprawy jakości wody trwa obecnie rozbudowa układu technologicznego Wodociągu Północnego o ozonowanie i sorpcję na granulowanym węglu aktywnym.

### Zakres i sposób prowadzenia badań

Badania technologiczne wykonane w latach 1996 i 1997 dotyczyły procesu koagulacji prowadzonej w układzie dwustopniowym, przy zastosowaniu stacji flotacji w I<sup>o</sup> oraz pulsatora w II<sup>o</sup>. Zakres badań obejmował określenie wpływu na osiągnięte efekty koagulacji wody wielkości dawek stosowanych koagulantów, zmian w proporcjach dawek koagulantów

wprowadzanych do wody w I<sup>o</sup> i II<sup>o</sup> oraz zmian układu technologicznego, polegających na włączaniu lub wyłączaniu stacji flotacji (I<sup>o</sup>) bądź pulsatora (II<sup>o</sup>).

Badania prowadzono w warunkach przepływowych na stacji pilotowej Wodociągu Północnego. W przyjętym układzie badawczym woda ujmowana z Zalewu Zegrzyńskiego kierowana była do zbiornika o stałym poziomie, a następnie poddawano ją szybkiemu mieszaniu z koagulantem w mieszaczu statycznym, wolnemu mieszaniu w komorach flokulacji, oddzieleniu od zawiesin w komorze flotacji ciśnieniowej, ozonowaniu, powtórnemu szybkiemu mieszaniu z koagulantem w zbiorniku z mieszadłem mechanicznym, klarowaniu w pulsatorze, filtracji w pospiesznych filtrach piaskowych oraz adsorpcji w filtrach z granulowanym węglem aktywnym.

W czasie prowadzenia badań instalacja pilotowa pracowała przy następujących parametrach technologicznych:

- przepływ wody: 6 m<sup>3</sup>/h,
- stacja flotacji ciśnieniowej (I<sup>o</sup>):
  - komora flokulacji (3 sekcje, czas przetrzymania wody w sekcji t=18,4 min, prędkość liniowa mieszadeł w poszczególnych sekcjach v=0,5 m/s, 0,4 m/s i 0,4 m/s),
  - komora flotacji (obciążenie hydrauliczne v<sub>h</sub>=6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> h, stopień recyrkulacji R=10 %),
  - saturator (ciśnienie nasycania recyrkulatu p<sub>n</sub>=5 barów, czas nasycania recyrkulatu powietrzem t<sub>n</sub>=1 min),
  - ozonowanie (czas kontaktu t<sub>k</sub>=6 min, dawka ozonu D=1,20+1,87 gO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>),
  - pulsator (II<sup>o</sup>): (prędkość unoszenia wody v<sub>u</sub>=0,7 mm/s, czas zatrzymania t<sub>z</sub>=2,2 h),
  - filtry pospieszne piaskowe (3 filtry połączone równolegle, złożo filtracyjne: warstwa podtrzymująca h<sub>wp</sub>=0,4 m, żwir o d=2+20 mm; złożo filtracyjne właściwe h<sub>f</sub>=1,4 m, piasek kwarcowy o d=0,7+0,9 mm, prędkość filtracji v<sub>f</sub>=4,5 m/h),
  - filtry z granulowanym węglem aktywnym (2 filtry połączone równolegle, wypełnione różnymi gatunkami węgla aktywnego; wysokość złoża węglowych h<sub>w</sub>=2,0 m, czas kontaktu wody z węglem t<sub>k</sub>=15 min, prędkość filtracji v<sub>fw</sub>=8,0 m/h).

Zgodnie z przyjętym programem w badaniach procesu koagulacji zmieniano: dawki koagulantu (80+180 g/m<sup>3</sup> dla Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> techn., 145+240 g/m<sup>3</sup> dla PIX i 110+240 g/m<sup>3</sup> dla obu koagulantów podawanych łącznie) oraz proporcje tych dawek wprowadzanych w obu stopniach koagulacji (rozdział dawki koagulantu w % na I<sup>o</sup> – flotator (F) i II<sup>o</sup> – pulsator (P) wynosił: F/P=0/100, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50, 70/30, 75/25, 85/15 i 100/0). Zmieniano też sam układ koagulacji.

W celu dokonania oceny skuteczności zastosowanego zabiegu technologicznego wykonywano analizy fizyczno-chemiczne i biologiczne próbek wody pobieranych po każdej z operacji jednostkowych.

## Wyniki badań

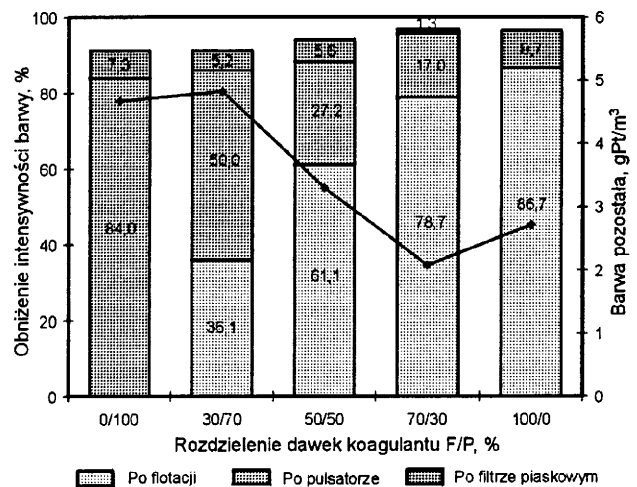
Na podstawie analiz fizyczno-chemicznych i biologicznych wody z Zalewu Zegrzyńskiego – zasilającej stację pilotową – stwierdzono, iż woda charakteryzowała się znacznym zanieczyszczeniem i zmienną jakością, uwarunkowaną przede wszystkim okresami hydrologicznymi. Najwyższy poziom zanieczyszczenia wody związkami organicznymi oraz fitoplanktonem odnotowano w okresie kwiecień–czerwiec, natomiast najniższy w okresie styczeń–marzec. Intensywny rozwój

fitoplanktonu po raz wtóry wystąpił w okresie wrzesień–październik. Fitoplankton w znacznym stopniu wpływał na kształtowanie jakości wody oraz przebieg jej uzdatniania w procesie koagulacji. Z punktu widzenia uwarunkowań związanych z klasami czystości, wodę z Zalewu Zegrzyńskiego w zakresie większości badanych wskaźników można było zaliczyć do I i II klasy czystości, natomiast jedynie ze względu na podwyższoną zawartość w wodzie azotu azotynowego i liczbę bakterii *coli* typu fekalnego – do III klasy czystości.

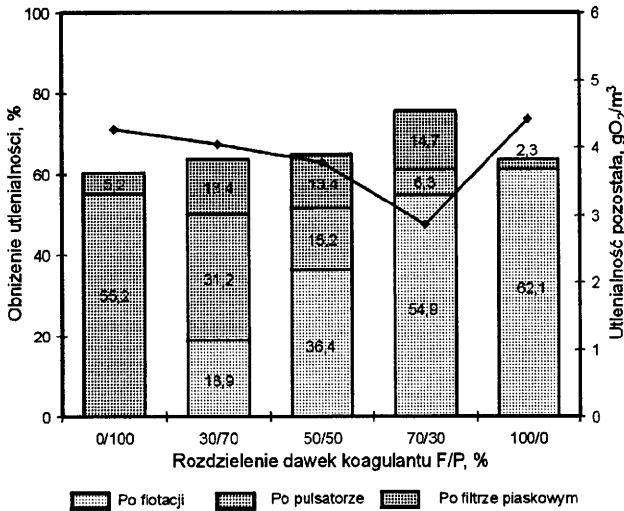
W celu dokonania oceny efektów koagulacji wody prowadzonej w układach jedno- i dwustopniowym posłużono się wynikami analiz takich wskaźników, jak barwa wody, utlenialność, absorbancja w UV (254 nm), OWO oraz zawartość fitoplanktonu. Dodatkowo w prowadzonych rozważaniach wzięto pod uwagę stężenia w wodzie uzdatnionej jonów glinu i żelaza oraz wartości PTHM<sub>24h</sub>.

Dla potrzeb interpretacji wyników badań oraz sformułowania wniosków określono uśredniony efekt koagulacji (uzyskany przy zastosowaniu optymalnej dawki użytego koagulantu), wyrażony obniżeniem wartości rozpatrywanego wskaźnika w poszczególnych operacjach jednostkowych. Obliczono także procentowy udział zastosowanej operacji jednostkowej w efekcie całkowitym, dla każdego z badanych układów koagulacji. Prześlędzono także wartości wskaźników jakości wody uzdatnionej.

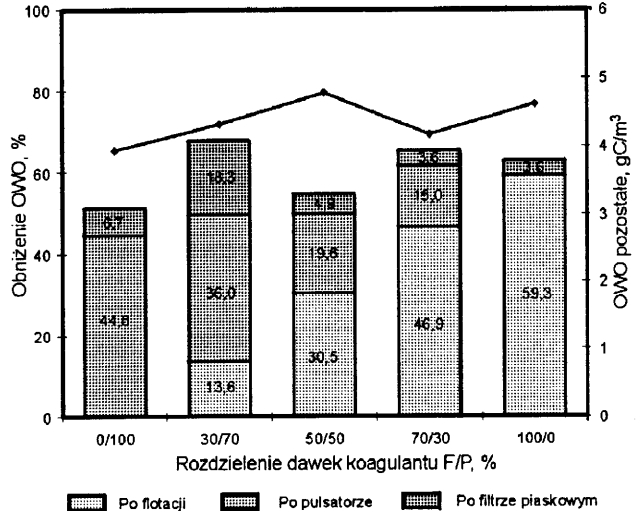
Szczegółowa analiza interpretowanych w powyższy sposób wyników badań pozwoliła stwierdzić, iż koagulowanie wody z Zalewu Zegrzyńskiego w układzie dwustopniowym (z flotacją ciśnieniową), przy odpowiednio do jej jakości dobranej dawce koagulantu, prowadziło do lepszego uzdatnienia wody, niż w układzie jednostopniowym (z samym pulsatorem). Przy uwzględnionych w badaniach proporcjach rozdziału dawki koagulantu na poszczególne stopnie koagulacji, uzyskiwano w każdym przypadku, dla każdego z koagulantów, właściwy przebieg procesu, tj. skuteczną destabilizację koloidów i flokulację zawiesin, a następnie oddzielenie tych zawiesin od wody w operacjach flotacji ciśnieniowej, klarowania w pulsatorze oraz filtracji pospiesznej na filtrach piaskowych. Stopień efektywności tych operacji jednostkowych był różny dla różnych koagulantów. Na rysunkach 1–6 przedstawiono określone w powyższy sposób efekty uzdatniania wody, przy prowadzeniu koagulacji za pomocą koagulantu bardziej efektywnego, tj. siarczanu glinu [3]. W tabeli 1 podano efekty uzdatniania wody z wykorzystaniem flotacji ciśnieniowej, w zależności od rodzaju stosowanego koagulantu [3].



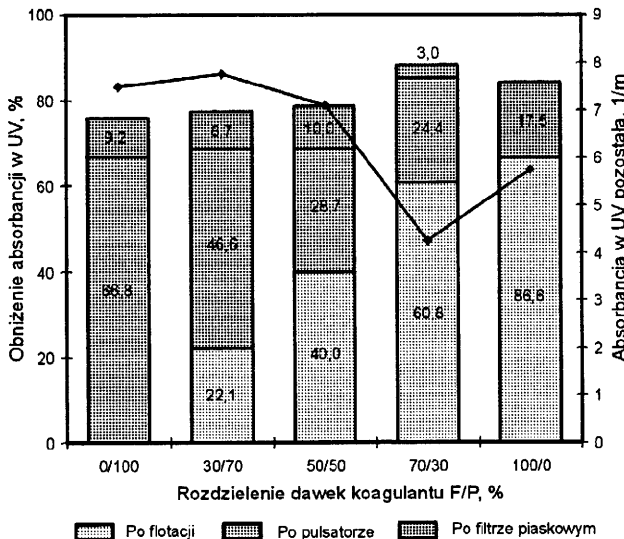
Rys. 1. Średnie efekty obniżania intensywności barwy wody (dawki technicznego siarczanu glinu 100-180 g/m<sup>3</sup>)



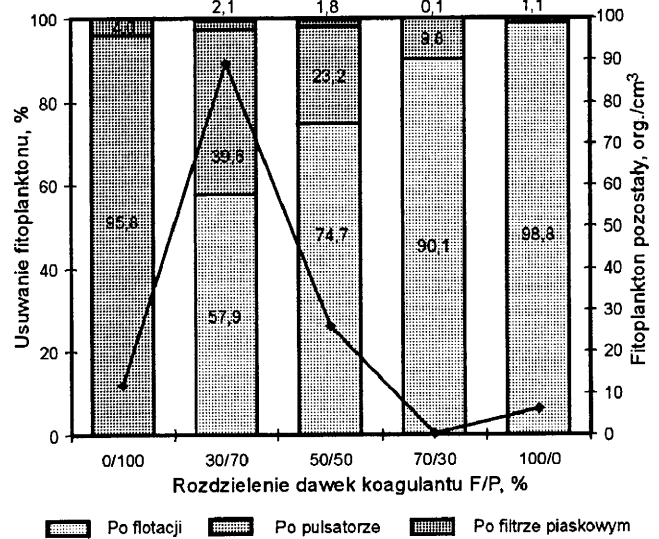
Rys. 2. Średnie efekty obniżenia utlenialności wody (dawki technicznego siarczanu glinu 100+180 g/m<sup>3</sup>)



Rys. 4. Średnie efekty obniżenia stężenia OWO (dawki technicznego siarczanu glinu 100+180 g/m<sup>3</sup>)



Rys. 3. Średnie efekty obniżenia absorpcji w UV (dawki technicznego siarczanu glinu 100+180 g/m<sup>3</sup>)



Rys. 5. Średnie efekty usuwania fitoplanktonu z wody (dawki technicznego siarczanu glinu 100+180 g/m<sup>3</sup>)

Tabela 1. Efekty uzdatniania wody z Zalewu Zegrzyńskiego z wykorzystaniem flotacji ciśnieniowej, w zależności od koagulantu

Obniżenie wartości wskaźnika, %	Siarczan glinu	PIX	Koagulant mieszany
Barwa	91,3+97,0	91,0+94,5	86,3+93,2
Utlenialność	60,4+75,9	59,5+76,1	54,9+59,4
Absorbancja w UV (254 nm)	76,0+88,2	69,1+80,1	65,8+78,8
OWO	51,5+67,9	44,3+63,1	45,2+50,1
Fitoplankton	99,0+100,0	100	100

Przy wyborze optymalnego wariantu koagulacji wody kierowano się kryterium zminimalizowania obciążenia filtrów piaskowych, ładunkiem zanieczyszczeń pozostałych po procesie koagulacji oraz uzyskaniem jak najlepszej jakości wody przed procesem sorpcji. Wyniki tak przeprowadzonej analizy dla optymalnych warunków prowadzenia procesu koagulacji zebrano w tabeli 2. W tabeli tej przedstawiono również efekty uzdatniania wody w układzie koagulacji jednostopniowej, prowadzonej tylko w pulsatorze [3]. Uzyskane rezultaty

Tabela 2. Efekty uzdatniania wody z Zalewu Zegrzyńskiego w optymalnych warunkach koagulacji dwustopniowej oraz jednostopniowej w pulsatorze, w zależności od rodzaju stosowanego koagulantu (F – flotator, P – pulsator)

Obniżenie wartości wskaźnika, %	Siarczan glinu		PIX	
	F/P=70/30 (optimum)	F/P=0/100	F/P=40/60 (optimum)	F/P=0/100
Barwa	97,0	91,3	94,5	91,0
Utlenialność	75,9	60,4	71,6	59,5
Absorbancja w UV	88,2	76	80,1	69,1
OWO	65,5	51,4	63,1	44,3
Fitoplankton	100	99,8	100	100
Żelazo pozostałe, gFe/m <sup>3</sup>	0,001	0,004	0,002	0,013
Glin pozostały, gAl/m <sup>3</sup>	0,008	0,012	–	–
PTTHM <sub>24h</sub> , mg/m <sup>3</sup>	25,8	–	18,9	–

wskazują na korzyści technologiczne, wynikające z optymalizacji procesu koagulacji wody przez prowadzenie jej w układzie dwustopniowym, zwłaszcza przy użyciu siarczanu glinu i rozdzieleniu optymalnej dawki tego koagulantu na pierwszy i drugi stopień koagulacji w proporcji procentowej 70/30.

## Wnioski

◆ Jakość wody ujmowanej z Zalewu Zegrzyńskiego kształtowana jest często przez organizmy fitoplanktonowe, co sugeruje zasadność stosowania flotacji ciśnieniowej jako efektywnego procesu klarowania wody, ze względu na specyficzne właściwości tworzących się wówczas aglomeratów pokoagulacyjnych.

◆ Wprowadzenie flotacji ciśnieniowej do uzdatniania wody z Zalewu Zegrzyńskiego należy uznać za celowe z uwagi na stwierdzony wzrost efektywności uzdatniania wody, w tym skuteczne usuwanie planktonu, a także wysoką sprawność techniczną tego procesu, wynikającą ze stosunkowo krótkiego czasu uzdatniania wody, w porównaniu z koagulacją w pulsatorze, oraz możliwością szybkiego wpracowania urządzeń po ich włączeniu do pracy.

◆ Zastosowanie dwustopniowego układu koagulacji z flotacją ciśnieniową w I<sup>o</sup> i pulsatorem w II<sup>o</sup> (przy podziale dawki koagulantu w stosunku procentowym 70/30) powinno zapewnić najkorzystniejsze warunki pracy pospiesznych filtrów

piaskowych oraz najlepszą jakość wody kierowanej na filtry z granulowanym węglem aktywnym.

◆ Zastosowanie flotacji ciśnieniowej w I<sup>o</sup> koagulacji, przed procesem ozonowania, pozwoli na znaczne ograniczenie ilości powstających produktów ubocznych ozonowania oraz korzystnie wpłynie na obniżenie niezbędnej dla procesu dawki ozonu.

◆ Niezbędna jest kontynuacja badań, zwłaszcza dotyczących optymalizacji parametrów technologicznych flotacji ciśnieniowej, jak również pomiarów właściwości osadu zawieszonego w pulsatorze.

## LITERATURA

1. A. L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ: Oczyszczanie wody. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Wrocław 1996.
2. M. KULESZA, K. OZIMIŃSKI: Uzdatnianie wody w procesie flotacji ciśnieniowej na stacji pilotowej Wodociągu Północnego. Ochrona Środowiska, 1997, nr 4(67), ss. 37–40.
3. J. WĄSOWSKI, M. KĘDZIERSKA: Opracowanie wyników badań nad optymalizacją procesu koagulacji przy zastosowaniu flotacji ciśnieniowej i uzdatnianiu wody w pulsatorze na stacji pilotowej Wodociągu Północnego w Wieliszewie koło Warszawy. Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996 i 1997 (prace nie publikowane).

## Optimization of Lacustrine Water Treatment by Including Dissolved Air Flotation into the Treatment Train

*The technological studies reported in this paper were carried out at the pilot station of the Northern Water Treatment Plant in Wieliszew near Warsaw in the time span of 1996–1997. Water for municipal supply is taken in from the nearby lake Zalew Zegrzyński. The primary objective of the study was to investigate how the inclusion of dissolved air flotation into the treatment train might upgrade the efficiency of coagulation and, consequently, of the treatment process. Thus, coagulation was carried out in a two-stage (I<sup>o</sup> and II<sup>o</sup>) system involving dissolved air*

*flotation and a pulsator, respectively. Another objective was to choose the most effective flocculant type and dose from the three items tested: Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, and mixed coagulant. The best treatment effects were obtained when use was made of a two-stage coagulation process with DAF in I<sup>o</sup>, at the following proportion of the optimum flocculant dose: 70% at I<sup>o</sup> and 30% at II<sup>o</sup>. The process designed via the above route provided favourable conditions for the operation of rapid sand filters and yielded water of good quality before adsorption on GAC beds.*