

Stanisław ZDANOWICZ, Elżbieta SKONECKA

*Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji
w m. st. Warszawie Spółka Akcyjna
Zakład Wodociągu Centralnego
Warszawa*

ROLA FILTRÓW POWOLNYCH W DOCELOWYM UKŁADZIE TECHNOLOGICZNYM UZDATNIANIA WODY ZAKŁADU WODOCIAĞU CENTRALNEGO W WARSZAWIE

THE ROLE OF THE SLOW FILTERS IN THE FUTURE WATER TREATMENT TECHNOLOGY AT THE WARSAW CENTRAL WATERWORKS

Lindley's slow filters which were constructed in Warsaw at the turn of the 19th and 20th centuries are used to water treatment nowadays. Their technological function has been modified with deterioration of the quality of the raw water in the Vistula and in accordance with the requirements concerning the potable water quality. Obtainment of the high quality and biological stability of the treated water introduced into the water-pipe network is the main purpose of the currently realized modernization of the technological system at the Warsaw Central Waterworks. The existing water treatment train will be extended by intermediate ozonation and rapid GAC filtration processes. This paper presents the water treatment effects that have been achieved in the pilot study of these processes. On the basis of them there is a possibility of forecasting of the water quality in the technical conditions, after modernization of the treatment technology. The chlorine dioxide demand was assumed as the most important criterion for evaluation of the efficiency of the tested processes. The existing slow filters as the final element of the future water treatment train before disinfection will be contribute to the improvement in the biological stability of the water, that is very important to supply to consumers the product of the required quality.

1. Wprowadzenie

Zakład Wodociągu Centralnego (ZWC) jest największym i zarazem najstarszym z trzech wodociągów zaopatrujących Warszawę w wodę. Obecnie pokrywa ponad 50% zapotrzebowania miasta. Jego geneza sięga końca XIX wieku. Dostarcza wodę mieszkańcom stolicy od 3 lipca 1886 r., gdy został uruchomiony system wodociągowy realizowany według projektu i pod nadzorem znakomitych inżynierów angielskich - Willia-

ma Lindleya (ojca) i Williama Heerleina Lindleya (syna). Podstawowe elementy tego systemu stanowiły Stacja Pomp Rzecznych oraz odległa o 4 km i położona 37 m powyżej ujęcia Stacja Filtrów. Pierwotny układ uzdatniania wody wiślanej oparty był na filtracji powolnej. Od 1894 r. został on rozszerzony o wstępną sedymentację w krytych osadnikach. W latach 1883–1926 wybudowano 6 grup filtrów powolnych o łącznej powierzchni 82 236 m². Każda grupa tworzyła kompleks 6-ciu urządzeń. W latach 20-tych Stacja Filtrów borykała się z niedostatkami wydajności filtrów powolnych, spowodowanym pogarszaniem się jakości ujmowanej wody i rosnącym zapotrzebowaniem miasta. Podjęto decyzję o budowie na Stacji Pomp Rzecznych otwartego Osadnika Czerniakowskiego o powierzchni 17,8 ha, który oddano do użytku w 1928 r. Znaczny wzrost wydajności filtrów powolnych uzyskano po wprowadzeniu wstępnego filtracji pospiesznej. Nowoczesny Zakład Filtrów Pospiesznych (ZFP) uruchomiono w 1933 r.

Obiekty Stacji Filtrów z przełomu XIX i XX wieku zostały uznane za zabytkowe. Wykonywane były z materiałów najwyższej jakości, przez najlepszych rzemieślników. Większość z nich zachowała się w doskonałym stanie. Dotyczy to w szczególności filtrów powolnych, które pracują do dnia dzisiejszego i stanowią ważny element obecnego układu uzdatniania wody w Wodociągu Centralnym. W okresie dotychczasowej eksploatacji urządzenia te poddawano pewnym modyfikacjom technologicznym dla poprawy ich efektywności, w związku ze zwiększaniem wymagań stawianych wodzie pitnej. Filtry powolne zostaną również wykorzystane w docelowym układzie uzdatniania ZWC, a ich funkcją będzie biostabilizacja wody po sprzężonym procesie ozonowania i filtracji węglowej, wprowadzanym w ramach aktualnie realizowanej modernizacji.

2. Działania w kierunku poprawy efektywności uzdatniania wody w Zakładzie Wodociągu Centralnego

Woda wiślana na wysokości ujęcia ZWC kwalifikuje się do wód bardzo zanieczyszczonych, wymagających wysokosprawnego uzdatniania fizycznego i chemicznego. Jej jakość podlega sezonowym zmianom. Duży wpływ na skład wody mają okresowe zjawiska ekstremalne (fale powodziowe, susze) i czynniki antropogeniczne.

Modernizacja Zakładu trwa od wielu lat. Optymalizacja technologii i jej wzbogacanie w kolejne procesy wynika z degradacji środowiska, wieloletnich specjalistycznych badań wpływu jakości wody na zdrowie, postępu w dziedzinie analityki, nowelizowanych wymagań stawianych wodzie przeznaczonej do spożycia.

Powojenny rozwój Warszawy i związany z tym wzrost zapotrzebowania na wodę spowodował konieczność radykalnej rozbudowy układu uzdatniania. W 1972 r. uruchomiono II ciąg technologiczny, zbudowany na licencji firmy Degremont, oparty o chemiczne oczyszczanie wody metodą koagulacji z sedymentacją w pulsatorach i jej filtrację w zespole nowych filtrów pospiesznych. Pracował on równolegle z I ciągiem - układem filtrów pospiesznych ZFP i filtrów powolnych. Do procesu koagulacji stosowano siarczany glinu, wspomagany okresowo dozowaniem krzemionki aktywowanej.

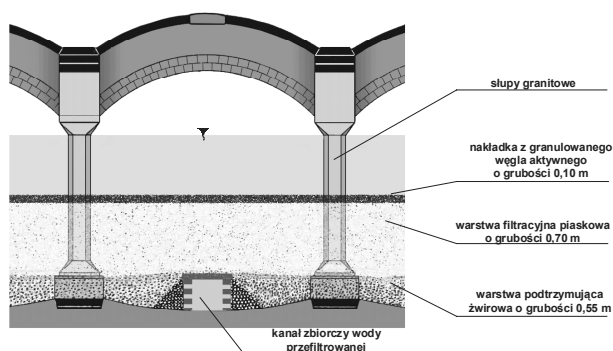
Rosnące wymagania co do jakości produkowanej wody wymuszały wprowadzenie poważnych zmian w technologii. Zakładano zwiększenie skuteczności usuwania planktonu, zanieczyszczeń organicznych, związków azotowych, manganu, fenoli, mikrozanieczyszczeń, a także poprawę własności organoleptycznych wody. W pierwszej kolejności uzupełniono technologię II ciągu o wstępne chlorowanie sezonowe, sorpcję na pylistym

węgla aktywnym (PWA) stosowaną doraźnie, wstępne okresowe utlenianie nadmanganianem potasu. Wykonano instalację wapna do stabilizacji wody po koagulacji.

W latach 90-tych podjęto działania dotyczące poprawy jakości wody ujmowanej dla potrzeb I ciągu technologicznego, bazującego na filtrach powolnych, poprzez zmianę jego surowca z wody powierzchniowej na infiltracyjną. W ramach tego zadania wykonano w 1990 r. „przerzut” wody z ujęcia zasadniczego „Gruba Kaśka” Wodociągu Praskiego oraz wybudowano cztery ujęcia poddenne brzegowe PU-1÷PU-4, oddawane sukcesywnie do eksploatacji w latach 1993÷2000. Umożliwiło to przejście na całkowite zasilanie I ciągu wodą infiltracyjną od 1997 r. oraz pozwoliło na zwiększanie jej udziału w surowcu II ciągu. W latach 1995÷1998 przeprowadzono kompleksową modernizację filtrów pospiesznych ZFP. Do układu uzdatniania I ciągu od 1999 r. włączono proces napowietrzania wody infiltracyjnej, zastosowany przed sedimentacją poprzedzającą filtry ZFP. Wpłynęło to na wzrost efektywności usuwania żelaza i manganu, ale głównym celem napowietrzania było zwiększenie stopnia nasycenia tlenem wody kierowanej na filtry powolne. W latach 1995÷2001 dokonano sukcesywnej konwersji złożeń 35-ciu filtrów powolnych poprzez ułożenie w nich 10-centymetrowej warstwy granulowanego węgla aktywnego (GWA), co wzbogaciło technologię o procesy sorpcji, a także zintensyfikowało pracę biologiczną filtrów. Do modyfikacji złożeń użyto węgla rekomendowanych do uzdatniania wody, uznanych producentów. Zastosowano dwa sposoby ułożenia GWA - w postaci przekładki między warstwami piasku (zgodnie z technologią „GAC Sandwich”) oraz w formie nakładki na powierzchni złoża piaskowego (rys. 1). Jeden z filtrów dla celów porównawczych pozostawiono jako tradycyjny piaskowy.

Rys. 1. Przekrój filtra powolnego z nakładką GWA

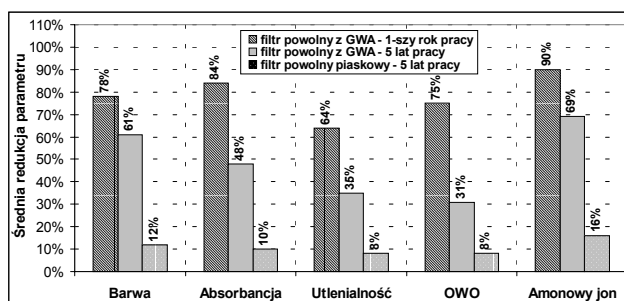
Fig. 1. The section of the slow filter with the top GAC layer



Znaczna poprawa efektów oczyszczania wody na filtrach powolnych z warstwą GWA (rys. 2) spowodowała wyraźne obniżenie zapotrzebowania na dezynfektant. W 1998 r. rozpoczęto wdrażanie dwutlenku chloru do dezynfekcji końcowej wody. Skuteczność filtrów powolnych z nakładką okazała się nieco wyższa od osiągniętej dla filtrów z przekładką GWA tego samego gatunku. Jako zaletę nakładek uznano również prostszy sposób ich wykonywania oraz łatwiejsze wydobywanie zużytego węgla do regeneracji. Doświadczenia z eksploatacji filtrów powolnych w warunkach zasilania i ciągu wodą infiltracyjną wykazały, że nie wymagają one konwencjonalnego czyszczenia przez usuwanie wierzchniej warstwy zanieczyszczeń. Wymienione aspekty zadecydowały, że technologię nakładki GWA przyjęto jako podstawową metodę modyfikacji złóż filtrów powolnych poddawanych konwersji po roku 1998. W taki sposób układano również zregenerowany węgiel w filtrach, gdzie pierwotnie pracował jako przekładka.

Rys. 2. Efektywność wybranego filtra powolnego z warstwą GWA w okresie 5-ciu lat eksploatacji (19.XI.1997÷18.XI.2002) oraz filtra powolnego piaskowego

Fig. 2. The effectiveness of the chosen slow filter with the GAC layer within the five-year operation period (19.XI.1997÷18.XI.2002) versus the sand slow filter



U progu XXI wieku w Wodociągu Centralnym istniały zatem dwa niezależne ciągi produkcji wody, zróżnicowane pod względem technologii i jakości uzdatnianego surowca. Wodę po każdym z nich poddawano indywidualnie dezynfekcji z użyciem dwutlenku chloru i chloru. Połączenie wody następowało dopiero w zbiornikach wody czystej.

Za podstawowy cel dalszej modernizacji układu uzdatniania w ZWC uznano zwiększenie stopnia oczyszczania wody do poziomu umożliwiającego stosowanie do dezynfekcji końcowej wyłącznie dwutlenku chloru, w dawkach nie przekraczających $0,4 \text{ g/m}^3$. Założenie takich warunków dezynfekcji przyjęto dla minimalizacji ilości szkodliwych, ubocznych produktów tego procesu, mogących niekorzystnie wpływać na zdrowie konsumentów. Efektem uzdatniania powinno być również uzyskanie wody o wysokiej stabilności biologicznej, dla ograniczenia zjawisk jej wtórnego zanieczyszczenia w systemie dystrybucyjnym i zapewnienia odpowiedniej jakości produktu u odbiorcy.

Wstępne założenia modernizacyjne przewidywały utrzymanie w ZWC dwóch odrębnych ciągów produkcji wody i następujący zakres zmian w ich technologii:

- I ciąg, zasilany wodą infiltracyjną z ujęć poddennych, stanowić miał główną linię uzdatniania. Planowano, że jego układ technologiczny zostanie rozszerzony o proces ozonowania pośredniego włączony przed filtrami powolnymi z warstwą GWA.

- II ciąg, zasilany mieszaniną wody infiltracyjnej i powierzchniowej z Osadnika Czerniakowskiego, miał pełnić funkcję uzupełniającą linii uzdatniania. Zakładano ograniczenie zdolności produkcyjnych tego ciągu. Jego układ technologiczny bazujący na koagulacji, planowano zoptymalizować pod kątem wyeliminowania chloru jako utleniacza wstępnego oraz rozszerzyć o końcowe procesy oczyszczania - ozonowanie pośrednie i pospieszną filtrację na złożach GWA.

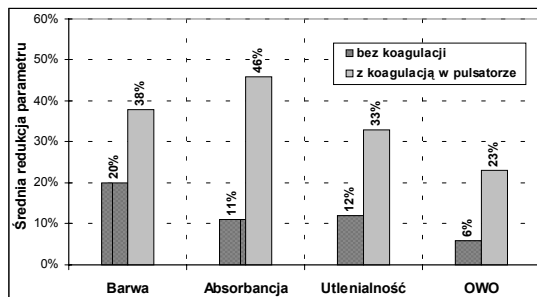
W celu ustalenia właściwego schematu przyszłego układu uzdatniania wody w ZWC, podjęto decyzję o realizacji badań pilotowych na Stacji Modelowej, które rozpoczęto w 1999 r. Wielokierunkowe badania technologiczne, w ramach których przetestowano skuteczność różnych sekwencji procesów uzdatniania, zarówno dla surowca I jak i II ciągu, doprowadziły do zmiany pierwotnie zakładanego wariantu modernizacji.

Badania wykonane dla surowca II ciągu, gdy przeważała w nim woda powierzchniowa, wykazały potrzebę rozbudowy tego ciągu o nowe procesy wstępne: koagulację z flotacją ciśnieniową i ozonowanie wstępne oraz procesy końcowe: ozonowanie pośrednie i pospieszną filtrację węglową. Znaczna poprawa jakości wody z Osadnika Czerniakowskiego, uzyskana dzięki zwiększaniu w nim udziału wody infiltracyjnej (nawet do 100%), pozwoliła na zaniechanie od 2000 r. stosowania wstępnego chlorowania. W badaniach ustalono, że przy takim surowcu można będzie uprościć modernizację II ciągu, ograniczając ją do rozszerzenia układu uzdatniania o procesy końcowe.

Badania dla wody infiltracyjnej [1] stanowiącej surowiec I ciągu dowiodły, że planowany sposób modernizacji tego ciągu, polegający na włączeniu ozonowania przed filtrami powolnymi, nie zapewniłby osiągnięcia oczekiwanych efektów jej uzdatniania. W sezonie letnim wymagane dawki ozonu pokrywające zapotrzebowanie były bardzo wysokie (nawet powyżej 5 g/m^3). W wodzie po ozonowaniu notowano wówczas duży wzrost stężenia formaldehydu (do $112 \text{ }\mu\text{g/l}$) i jonu amonowego (do $0,58 \text{ mg/l}$). Obciążenie filtrów powolnych w okresie ciepłym nadmiernym ładunkiem związków organicznych łatwo biodegradowalnych i azotu amonowego zagrażałoby deficytem tlenowym i niepełną nityfikacją (problem azotynów). Ponadto stosowanie tak wysokich dawek ozonu byłoby niedopuszczalne ze względu na niebezpieczeństwo powstawania ponadnormatywnych ilości bromianów - produktu ubocznego ozonowania wody zawierającej bromki. Limitowanie dawek ozonu, konieczne w tym przypadku, dawałoby z kolei możliwość tworzenia pośrednich produktów niepełnego utleniania, które mogą być mniej podatne na usuwanie, a niekiedy bardziej szkodliwe dla organizmów żywych niż substancje macierzyste [2]. Badania wykazały dobrą podatność wody infiltracyjnej na koagulację siarczanem glinu w pulsatorze. Zastosowanie tego procesu przed filtracją pospieszną piaskową, spowodowało znaczny wzrost efektywności oczyszczania wody przed etapem jej ozonowania (rys. 3), co skutkowało dużym spadkiem zapotrzebowania na ozon (pełne dawki O_3 wynosiły $0,9\pm 1,5 \text{ g/m}^3$). Z uwagi na niską mętność surowca niezbędne było wspomaganie koagulacji krzemionką aktywowaną, dozowaną przez cały rok. W warunkach niskich temperatur wody wskazanym zabiegiem technologicznym było zmniejszenie prędkości wznoszenia w pulsatorze do ok. $0,50 \text{ mm/s}$.

Rys. 3. *Efektywność uzdatniania wody infiltracyjnej na etapie filtracji pospiesznej piaskowej w układzie badawczym bez oraz ze stosowaniem koagulacji*

Fig. 3. *The effectiveness of the infiltration water treatment processes: rapid sand filtration only versus coagulation + rapid sand filtration – the pilot study results*

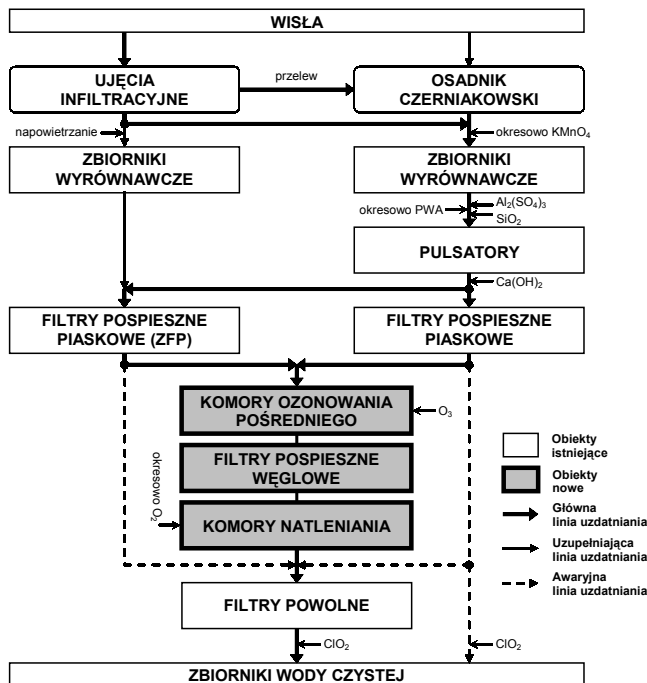


Rezultaty badań nad uzdatnianiem wody infiltracyjnej miały przełomowe znaczenie dla podjęcia ostatecznych decyzji o sposobie modernizacji technologii w ZWC, wskazując, że w przyszłym układzie koagulacja powinna być traktowana jako proces o kluczowym znaczeniu. Od 2003 r. dwa niezależne dotychczas ciągi technologiczne Zakładu zostały połączone funkcjonalnie w jeden system, w którym do filtrów powolnych oprócz wody infiltracyjnej po filtracji pospiesznej (na filtrach ZFP) kieruje się również wodę po koagulacji i filtracji pospiesznej (na filtrach Degremont i ZFP). Taką praktykę rozpoczęto stosować w celu poprawy jakości wody zasilającej filtry powolne.

Po przeanalizowaniu wniosków z badań pilotowych, prognozowanych wielkości zapotrzebowania na wodę, zdolności technologicznych i hydraulicznych istniejących urządzeń oraz możliwości ich wzajemnego współdziałania, stanu technicznego infrastruktury produkcyjnej, a także biorąc pod uwagę doświadczenia eksploatacyjne, technolodzy Zakładu Wodociągu Centralnego zaproponowali rozwiązanie docelowego układu uzdatniania według schematu na rys. 4. Rozwiązanie to zostało przyjęte do realizacji.

Rys. 4. Docelowy schemat technologiczny uzdatniania wody w ZWC po modernizacji

Fig. 4. The diagram of the future water treatment technology at the Central Waterworks



Uznano, że podstawowym surowcem Zakładu powinna być woda infiltracyjna. Do jej uzdatniania należy powiązać dotychczasowe procesy stosowane w I i II ciągu oraz wprowadzić dodatkowo przed filtrami powolnymi procesy ozonowania pośredniego i filtracji pospiesznej na złożach granulowanego węgla aktywnego. W nowym układzie technologicznym filtry pospieszne węglowe poprzedzone ozonowaniem przejmą ciężar usuwania zanieczyszczeń organicznych z wody, pozostałych po procesach koagulacji i filtracji pospiesznej. Filtry powolne pracować będą jako końcowe urządzenia uzdatniające przed dezynfekcją, a ich zadaniem będzie przede wszystkim biostabilizacja wody. Dla uzupełniania tlenu zużytego w procesach biologicznych zachodzących w pospiesznych filtrach z GWA przewidziano okresowe natlenianie wody przed filtrami powolnymi.

W docelowym układzie technologicznym będą dwie linie produkcyjne – główna, bazująca na koagulacji i filtracji pospiesznej piaskowej (na filtrach Degremont i ZFP) oraz uzupełniająca, oparta na napowietrzaniu, sedymentacji i filtracji pospiesznej piaskowej (na filtrach ZFP). Ilościowy rozdział wody infiltracyjnej na obie linie zależeć będzie od jakości surowca, temperatury wody i wielkości produkcji Zakładu. Pozostawia się również możliwość ujmowania i uzdatniania wody powierzchniowej w linii głównej. Po filtracji pospiesznej piaskowej całość wody kierowana będzie do wspólnego ciągu, obejmującego ozonowanie pośrednie, filtrację pospieszną węglową, natlenienie, filtrację powolną na złożach piaskowych z warstwą GWA, dezynfekcję ClO_2 .

Maksymalna wydajność Zakładu, po modernizacji układu uzdatniania, została ustalona na 300 tys. m³/d (maksymalna przepustowość hydrauliczna 350 tys. m³/d). W przypadku wystąpienia sytuacji wyjątkowych, wymagających zwiększenia wydajności ponad przepustowość hydrauliczną nowo projektowanych obiektów, przewiduje się możliwość awaryjnego „rozpięcia” układu na dwa równoległe ciągi technologiczne o łącznej zdolności produkcyjnej 530 tys. m³/d.

Zadanie inwestycyjne pod nazwą „Modernizacja technologii w Zakładzie Wodociągu Centralnego – ozonowanie pośrednie i filtracja na węglu aktywnym” współfinansowane jest z Funduszu Spójności Unii Europejskiej. Środki unijne pokrywają 62% kosztu modernizacji określonego na sumę ok. 60 mln €. Realizację inwestycji rozpoczęto w 2007 r., a jej zakończenie planowane jest w 2010 r. Nowy wielofunkcyjny budynek, w którym zlokalizowany będzie kompleks urządzeń technologicznych objętych inwestycją, powstanie w miejscu VII grupy filtrów powolnych, wybudowanej w latach 1958÷60 i nie eksploatowanej ze względu na zły stan techniczny.

3. Wykorzystanie filtrów powolnych w docelowym układzie uzdatniania wody Zakładu Wodociągu Centralnego

3.1. Jakość wody po sprzężonym procesie „O₃+GWA” na podstawie badań modelowych

Sprężony proces ozonowania pośredniego i pospiesznej filtracji węglowej, chociaż uznawany jest za jeden z najbardziej efektywnych pod względem usuwania rozpuszczonej materii organicznej, ma jednak również pewne wady, które są szczególnie istotne w aspekcie konieczności zapewnienia wysokiego stopnia stabilności biologicznej wody uzdatnionej wprowadzanej do sieci wodociągowej. Podkreślane jest to w literaturze fachowej [3] i znalazło potwierdzenie w badaniach na Stacji Modelowej ZWC.

W tabeli 1 zestawiono rezultaty II-go cyklu badań procesu „O₃+GWA”, obejmujące 3-letni okres pracy złóż węglowych, włączonych do eksploatacji we wrześniu 2004 r. Wyodrębniono również wyniki uzyskane w pierwszym półroczu, przy dominacji sorpcyjnego trybu usuwania zanieczyszczeń przez złoża, co wykazał test EMS (Eberhardta, Madsena i Sontheimera). Zastępczy współczynnik aktywności biomasy ($S=\Delta$ utlenialność / Δ tlen rozpuszczony) osiągał w tym okresie wartości wyższe od 1. W fazie przewagi sorpcyjnego charakteru pracy złóż GWA wystąpiły największe różnice między testowanymi gatunkami węgla pod względem efektywności uzdatniania wody.

Tab. 1. Wyniki uzdatniania wody w układzie pilotowym „O₃+GWA”Tab. 1. The results of the water treatment in the pilot line “O₃+GAC”

Parametr	Miara	Okres pracy GWA	Woda dopt. WD	Woda po O ₃ KO	Woda po filtrach z GWA			
					FW1	FW2	FW3	FW4
Z-ClO ₂ [mg ClO ₂ /l]	średnia	0,5 roku	0,77	-	0,37	0,36	0,39	0,44
	wartość	3 lata	0,67	-	0,31	0,31	0,32	0,32
	zakres	3 lata	0,44÷0,93	-	0,17÷0,45	0,20÷0,48	0,19÷0,51	0,19÷0,53
	średnia	0,5 roku	-	-	52%	53%	49%	43%
	redukcja	3 lata	-	-	53%	54%	52%	52%
Absorbancja UV ²⁵⁴ [m ⁻¹]	średnia	0,5 roku	5,6	-	2,0	1,8	1,9	2,4
	wartość	3 lata	5,7	-	2,6	2,6	2,6	2,7
	zakres	3 lata	3,8÷7,7	-	0,3÷5,3	0,2÷5,2	0,3÷5,3	0,2÷5,5
	średnia	0,5 roku	-	-	66%	69%	66%	58%
	redukcja	3 lata	-	-	54%	55%	54%	52%
Utlenialność [mg O ₂ /l]	średnia	0,5 roku	3,11	-	2,00	1,96	1,99	2,06
	wartość	3 lata	2,83	-	2,09	2,09	2,10	2,11
	zakres	3 lata	2,00÷4,10	-	1,10÷2,80	0,90÷2,80	1,00÷2,70	1,10÷2,80
	średnia	0,5 roku	-	-	36%	37%	36%	34%
	redukcja	3 lata	-	-	26%	26%	25%	25%
OWO [mg C/l]	średnia	0,5 roku	2,89	-	1,64	1,50	1,67	1,96
	wartość	3 lata	2,80	-	2,19	2,14	2,17	2,29
	zakres	3 lata	1,85÷3,87	-	0,23÷3,14	0,27÷3,15	0,29÷3,37	0,32÷3,40
	średnia	0,5 roku	-	-	45%	50%	44%	34%
	redukcja	3 lata	-	-	22%	24%	22%	19%
Barwa [mg Pt/l]	średnia	0,5 roku	5,5	-	3,7	3,7	3,7	3,7
	wartość	3 lata	5,4	-	4,0	4,0	4,0	4,0
	zakres	3 lata	4÷7	-	2÷5	2÷5	2÷5	2÷5
	średnia	0,5 roku	-	-	33%	33%	32%	32%
	redukcja	3 lata	-	-	25%	25%	25%	25%
Formaldehyd [µg CH ₂ O/l]	średnia	0,5 roku	2,5	26,0	4,1	4,1	3,9	4,7
	wartość	3 lata	3,5	32,5	6,6	6,7	6,6	6,8
	zakres	3 lata	1÷11	13÷54	0÷13	0÷12	0÷12	0÷15
	średnia	0,5 roku	-	-1175%	-96%	-92%	-70%	-84%
	redukcja	3 lata	-	-1044%	-128%	-132%	-126%	-130%
Amonowy jon [mg NH ₄ ⁺ /l]	średnia	0,5 roku	0,08	0,15	0,06	0,06	0,06	0,08
	wartość	3 lata	0,06	0,13	0,05	0,05	0,05	0,05
	zakres	3 lata	0,02÷0,35	0,02÷0,35	0,00÷0,31	0,00÷0,30	0,00÷0,31	0,00÷0,30
	średnia	0,5 roku	-	-218%	40%	46%	43%	-12%
	redukcja	3 lata	-	-198%	24%	28%	20%	5%

Uwaga: średnie redukcje parametrów odniesione do wody zasilającej układ badawczy (WD)

Do układu badawczego kierowana była woda po II ciągu technologicznym ZWC (po koagulacji, stabilizacji wapnem i filtracji pospiesznej piaskowej), dla którego surowiec stanowiła mieszanina wody infiltracyjnej pochodzącej bezpośrednio z ujęć poddennych oraz wody pobieranej z Osadnika Czerniakowskiego, zasilanego w przewodzie wodą infiltracyjną. W omawianym cyklu badań testowane są jednocześnie, w równolegle pracujących filtrach modelowych (FW1+FW4), cztery gatunki granulowanych węgla aktywnych o dobrych właściwościach sorpcyjnych, w tym węgle formowane i ziarniste. Od początku ich eksploatacji utrzymywano w instalacji pilotowej stałe, optymalne parametry technologiczne procesów ozonowania i filtracji węglowej, ustalone na podstawie wcześniejszych badań i stanowiące wytyczne do projektowania nowej inwestycji w ZWC. Ozonowanie pośrednie wody prowadzono z 10-minutowym czasem utleniania i zastosowaniem dawek O_3 zgodnych z zapotrzebowaniem (stężenie ozonu resztkowego w wodzie po reaktorze ozonowania na poziomie $0,10 \pm 0,05$ mg/l), natomiast filtrację węglową z 24-minutowym czasem kontaktu na złożach GWA. Zarówno charakter wody poddawanej badaniom jak i parametry procesów w urządzeniach modelowych odwzorują możliwie najwierniej warunki zakładane w skali technicznej, po realizacji inwestycji „ O_3 +GWA”. Dlatego też można przyjąć, że uzyskane w badaniach wyniki stanowią miarodajny statystycznie zbiór danych pomiarowych, na podstawie których można prognozować efekty technologiczne po modernizacji układu uzdatniania w ZWC.

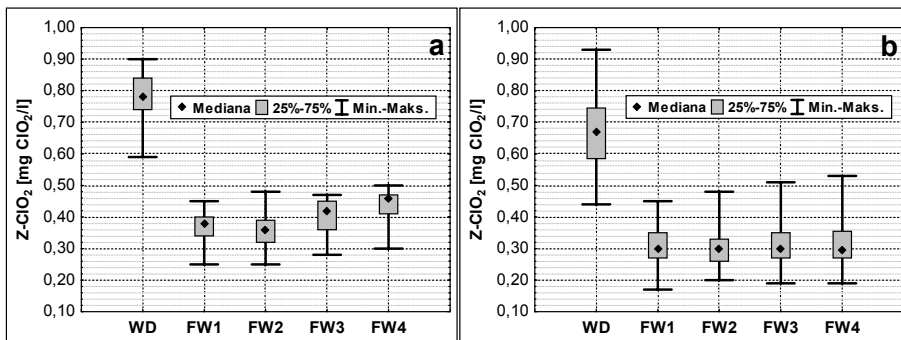
Parametry fizyko-chemiczne jakości wody po modelowych filtrach węglowych spełniają wymagania obowiązującego Rozporządzenia stawiane wodzie przeznaczonej do spożycia. Jednak zakończenie układu uzdatniania na procesie „ O_3 +GWA” nie zagwarantowałoby celów obecnej modernizacji, tj. zakładanego obniżenia dawek dezynfekcyjnych dwutlenku chloru i osiągnięcia wody o wysokiej stabilności biologicznej.

3.1.1. Zapotrzebowanie wody na dwutlenek chloru ($Z-ClO_2$)

Jako podstawowe kryterium technologiczne oceny skuteczności badanych procesów uzdatniania przyjęto wielkość zapotrzebowania na dwutlenek chloru wody po modelowych filtrach węglowych, która zgodnie z przyjętymi założeniami nie powinna przekraczać $0,40$ mg ClO_2 /l. Analiza wyników tego parametru wskazuje jednak, że warunek ten nie zawsze był dotrzymywany i występują istotne różnice między poszczególnymi gatunkami GWA, obserwowane zwłaszcza w okresie przewagi sorpcyjnego trybu pracy złóż (rys. 5a). W przypadku jednego z testowanych węgli (FW4) zanotowano w pierwszym półroczu jego pracy aż 77% wyników $Z-ClO_2$ przekraczających wartość kryterialną. Dla żadnego z badanych GWA nie uzyskano jednak 100% pomiarów $\leq 0,40$ mg/l. Biorąc pod uwagę rezultaty z całego 3-letniego okresu eksploatacji węgla (rys. 5b) można stwierdzić, że różnice skuteczności testowanych GWA w odniesieniu do obniżania zapotrzebowania na ClO_2 uległy zatarciu.

Rys. 5. Zmiany zapotrzebowania na ClO_2 w układzie pilotowym „ O_3 +GWA” – wyniki z pierwszego półroczu (a) i 3 lat (b) eksploatacji GWA

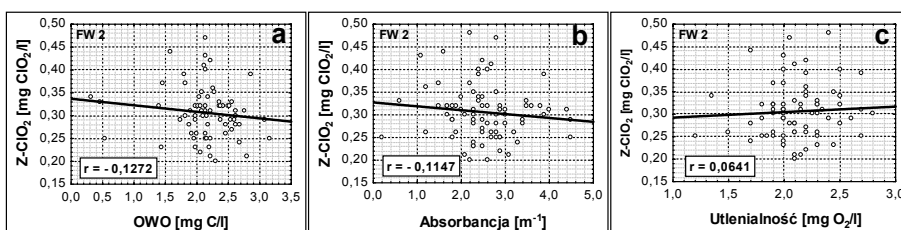
Fig. 5. The changes of the ClO_2 demand in the pilot line “ O_3 +GAC” – the results within the first half year (a) and three-year (b) GAC operation period



Należy podkreślić, że w okresie przewagi adsorpcji, mimo najwyższej efektywności usuwania zanieczyszczeń organicznych, notowano największe wartości Z-ClO_2 w wodzie po filtrach węglowych. Odwrotna sytuacja miała miejsce w fazie przewagi trybu biologicznego. Analiza statystyczna wyników z 3-letniego okresu pracy złóż wykazała, że między zapotrzebowaniem na dwutlenek chloru i parametrami zanieczyszczeń organicznych wyrażonych jako ogólny węgiel organiczny (OWO), absorbancja i utlenialność nie ma korelacji (współczynnik korelacji liniowej Pearsona bliski zeru). Obrazują to wykresy rozrzutu (rys. 6) sporządzone dla wybranego filtra (FW2). Dla pozostałych filtrów mają one bardzo zbliżony charakter. Dlatego też Z-ClO_2 potraktowano jako niezależny od globalnych wskaźników zanieczyszczeń organicznych parametr przy ocenie uzyskiwanych efektów uzdatniania wody.

Rys. 6. Zależność między zapotrzebowaniem na ClO_2 a OWO (a), absorbancją (b), utlenialnością (c) w wodzie po wybranym filtrze modelowym z GWA – wyniki z trzech lat eksploatacji

Fig. 6. The relationship between the ClO_2 demand and TOC (a), absorbance UV^{254} (b), $\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$ (c) in the water after the chosen model GAC filter – the results within the three-year operation period



3.1.2. Związki generujące niestabilność biologiczną wody na przykładzie formaldehydu i azotu amonowego

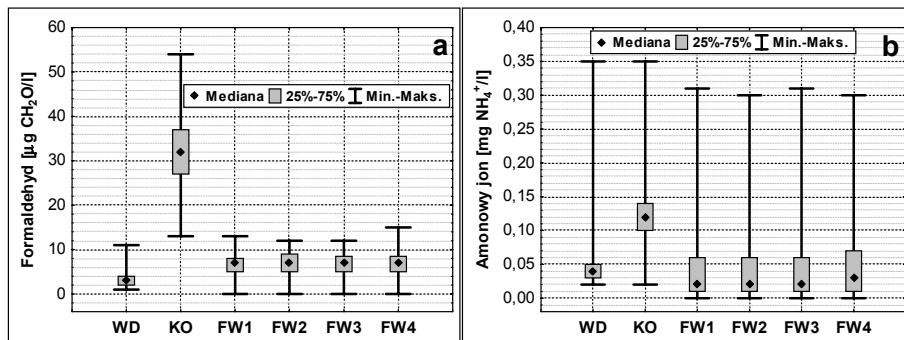
W badaniach z grupy związków odpowiedzialnych za obniżanie stabilności biologicznej wody rozpatrywany był formaldehyd jako przedstawiciel biodegradowalnych zanieczyszczeń organicznych oraz azot amonowy. Obecność tych substancji w wodzie wprowadzanej do sieci wodociągowej może być przyczyną wtórnego rozwoju mikroorganizmów. Substraty te utleniane są na drodze biochemicznej, co prowadzi do ubytku tlenu rozpuszczonego w wodzie. Największa ilość tlenu zużywana jest w procesie nitryfikacji. Do utlenienia 1 mg azotu amonowego do azotanów potrzeba 4,57 mg tlenu.

W procesie ozonowania następuje transformacja materii organicznej powodująca znaczny wzrost stężenia biodegradowalnego rozpuszczonego węgla organicznego (BRWO) w wodzie. Filtracja pospieszna na złożach GWA nie zapewnia całkowitej eliminacji BRWO, a w efekcie filtrat nie jest stabilny biologicznie [3]. Wynikiem utleniania przez ozon jest przyrost niskocząsteczkowych związków organicznych, takich jak kwasy karboksylowe, keto- i aldokwasy oraz aldehydy [4]. Są one podatne na rozkład biochemiczny i mogą być usuwane przez mikroorganizmy zasiedlające złoża węglowe. W badaniach zagadnienie biodegradowalnych produktów ozonowania analizowano na przykładzie formaldehydu. Po modelowym reaktorze utleniania (KO) notowano nawet ok. 40-krotny wzrost tego związku. Złoża GWA nie redukowały wystarczająco skutecznie zwiększonego ładunku formaldehydu, a w konsekwencji jego stężenie w wodzie odpływającej z filtrów było wyższe niż przed ozonowaniem (rys. 7a).

W badaniach stwierdzono również, że w wyniku ozonowania wzrasta zawartość azotu amonowego w wodzie (rys. 7b), średnio o ok. 200%. Zwiększenie stężenia może być następstwem reakcji utleniacza z częścią organicznych związków azotowych. Do grupy wysoce reaktywnych z ozonem domieszek należą aminy i ich pochodne. Działanie ozonu na niektóre aminy organiczne polega na rozrywaniu w nich wiązania C-N, z wytworzeniem nieorganicznych form azotu (NH_4^+ , NO_3^-) i utlenionych związków organicznych (aldehydów, kwasów karboksylowych) [5]. W efekcie procesu nitryfikacji na złożach pospiesznych filtrów węglowych następowało zmniejszenie stężenia jonu amonowego jedynie do poziomu nieznacznie niższego w porównaniu z wodą przed ozonowaniem. Notowane były również częste przypadki, gdy stężenie tego związku przekraczało jego wartość w wodzie dopływającej.

Rys. 7. Zmiany stężenia formaldehydu (a) i jonu amonowego (b) w układzie pilotowym „O₃+GWA” – wyniki z trzech lat pracy GWA

Fig. 7. The changes of the formaldehyde (a) and ammonia ion (b) concentrations in the pilot line “O₃+GAC” – the results within the three-year GAC operation period



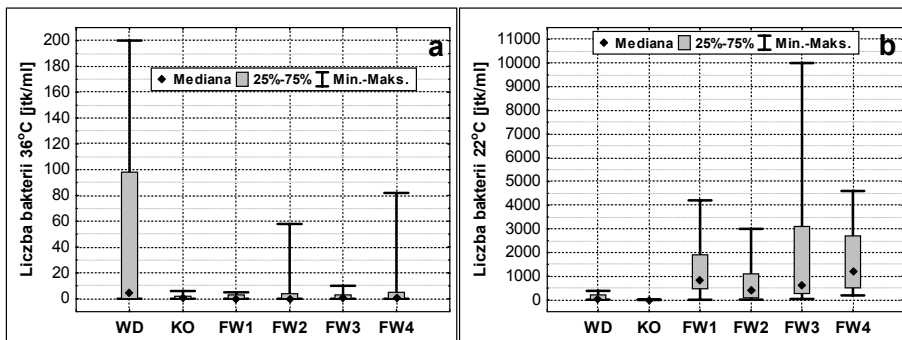
3.1.3. Zanieczyszczenie bakteriologiczne wody

Rozwój mikroorganizmów w złożach GWA jest bardzo korzystny z punktu widzenia możliwości wydłużenia czasu eksploatacji węgla, ale powoduje podwyższenie poziomu zanieczyszczenia bakteriologicznego wody odpływającej z pospiesznych filtrów węglowych. Zmiany ogólnej liczby bakterii mezofilnych (36°C) oraz psychrofilnych (22°C) w wodzie po ozonowaniu i filtrach węglowych pokazano na rys. 8a i 8b. Są to wyniki uzyskane w trzecim roku pracy złoż, przy dominacji w nich biologicznego trybu usuwania zanieczyszczeń. Oznaczenia bakterii wykonywane były dla próbek wody pobieranych w końcowej fazie filtracyjnego cyklu, bezpośrednio przed płukaniem filtrów. Wyniki badań wykazały, że w wyniku ozonowania i pospiesznej filtracji węglowej następuje redukcja bakterii mezofilnych, ale negatywną stroną tych procesów jest bardzo wysoki przyrost bakterii psychrofilnych w wodzie po złożach GWA. Ozon jako silny utleniacz skutecznie eliminował bakterie 22°C, ale ich liczebność w wodzie po filtrach węglowych drastycznie wzrastała, osiągając poziom nawet o 3 rzędy wielkości wyższy w stosunku do wody przed ozonowaniem. Należy zaznaczyć, że występują bardzo duże różnice w jakości mikrobiologicznej wody dla poszczególnych gatunków GWA.

Przeprowadzono również badania bakteriologiczne wody z pierwszej 60-minutowej fazy pracy złoż po płukaniu. Wykazały one, że notowana w tym przedziale czasowym liczba bakterii 22°C w filtracji jest znacznie wyższa niż oznaczana bezpośrednio przed płukaniem. Prowadzi to do wniosku, że zastosowanie spustu pierwszego filtratu do kanalizacji nie rozwiąże problemu podwyższonego poziomu bakterii w wodzie po operacji płukania i w tym aspekcie nie ma uzasadnienia technologicznego.

Rys. 8. Zmiany ogólnej liczby bakterii 36°C (a) i 22°C (b) w układzie pilotowym „O₃+GWA” – wyniki z trzeciego roku eksploatacji GWA

Fig. 8. The changes of the number of bacteria 36°C (a) and 22°C (b) in the pilot line “O₃+GAC” – the results within the third year GAC operation period



3.2. Funkcja filtrów powolnych po rozszerzeniu technologii o proces „O₃+GWA”

Na podstawie rezultatów badań modelowych należy stwierdzić, że sprzężony proces ozonowania pośredniego i pospiesznej filtracji węglowej nie zapewni oczyszczenia wody do poziomu warunkującego jej stabilność biologiczną. Taką funkcję w docelowym układzie uzdatniania Zakładu Wodociągu Centralnego pełnić będą filtry powolne. Woda jest stabilna biologicznie wówczas, gdy nie podtrzymuje wzrostu mikroorganizmów, a więc jest pozbawiona nieorganicznych i organicznych substratów pokarmowych. Zapewnienie tej cechy wodzie wprowadzanej do sieci wodociągowej istotnie zmniejsza potencjał wtórnego rozwoju drobnoustrojów w systemie dystrybucji [6]. Podstawowym zadaniem filtrów powolnych w układzie technologicznym po modernizacji będzie doczyszczanie wody z pozostałych po procesie „O₃+GWA” rozkładalnych biochemicznie rozpuszczonych substancji organicznych, nityfikacja związków azotowych oraz zatrzymywanie mikroorganizmów przedostających się do odpływu ze złóż pospiesznych filtrów węglowych. Wykorzystanie filtrów powolnych jako reaktorów biologicznych do realizacji biostabilizacji wody wydaje się rozwiązaniem idealnym. W docelowym układzie uzdatniania urządzenia te będą miały stworzone odpowiednie warunki do prawidłowego przebiegu procesów biologicznych, dzięki znacznemu obciążeniu z materii organicznej usuwanej na filtrach pospiesznych z GWA oraz poprzez zapewnienie możliwości natleniania zasilającej je wody.

Filtry powolne z pozostawioną warstwą węgla aktywnego przyczynią się także do dalszego obniżania zapotrzebowania wody na dwutlenek chloru, co zagwarantuje, że dawki tego dezynfektanta nie będą przekraczać 0,4 g/m³. Ponadto wydłużenie czasu kontaktu wody z biologicznie pracującym GWA, jak pokazują najnowsze badania naukowe [7], powinno wpłynąć na zmniejszenie potencjału tworzenia biodegradowalnych produktów dezynfekcji wody dwutlenkiem chloru.

4. Podsumowanie

Fasadę zabytkowego budynku Zakładu Filtrów Pospiesznych na terenie Stacji Filtrów zdobią dwie alegoryczne płaskorzeźby: „Pragnienie” i „Czystość”. Oddają one w pełni znaczenie, jakie woda ma dla człowieka. Jednocześnie przypominają, że misją przedsiębiorstwa wodociągowego powinno być zapewnienie odbiorcy zdrowej i smacznej wody o wysokim standardzie jakościowym, zgodnym z obowiązującymi normami. Niezawodnemu wypełnianiu takiej misji służyć ma obecnie realizowana modernizacja technologii w naszym Zakładzie. Po zakończeniu inwestycji, w Wodociągu Centralnym będzie istniał kompleksowy i elastyczny układ uzdatniania wody, stanowiący system kolejnych, funkcjonalnie zdefiniowanych barier dla skutecznej eliminacji zanieczyszczeń, nawet w przypadku wystąpienia zdarzeń o charakterze incydentalnym, powodujących gwałtowne pogorszenie lub nietypową zmianę jakości ujmowanego surowca.

Istotnym elementem tego systemu będą Lindleyowskie filtry powolne, z których najstarsze liczą obecnie ponad 120 lat. Okazały się one urządzeniami ponadczasowymi. W docelowym układzie technologicznym stanowiąc będą ważny, poprzedzający proces dezynfekcji, etap uzdatniania zatrzymujący zanieczyszczenia decydujące o poziomie stabilności biologicznej wody. Uzyskanie wysokiego stopnia biostabilności wody jest konieczne dla ograniczenia zjawisk jej wtórnego zanieczyszczenia w systemie dystrybucyjnym i zapewnienia odpowiedniej jakości produktu u odbiorcy.

Bibliografia

- [1] Kulągowska R., Skonecka E.: Zastosowanie koagulacji i ozonowania wody infiltracyjnej przed filtracją powolną jako skuteczna metoda poprawy jakości wody uzdatnionej w Wodociągu Centralnym w świetle badań modelowych, *Materiały II Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody”*, Szczyrk, 2003, 191-202
- [2] Kowal A.L., Świderska-Bróz M.: *Oczyszczanie wody*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław, 1996
- [3] Świderska-Bróz M.: Aktualne problemy w oczyszczaniu wody, *Materiały Seminarium Naukowo-Technicznego „Wszechstronność zastosowań chemikaliów na obiektach gospodarki wodno-ściekowej. Nowe aplikacje 2005-6”*, Szczecin-Berlin, 2006, 137-148
- [4] Nawrocki J.: Uboczne produkty dezynfekcji, *Instal* 4/5, 2006
- [5] Nawrocki J., Biłozor S.: *Uzdatnianie wody. Procesy chemiczne i biologiczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Poznań, 2000
- [6] Świderska-Bróz M.: Skutki braku stabilności biologicznej wody wodociągowej, *Ochrona Środowiska* 4/2003
- [7] Raczyk-Stanisławiak U., Ciemieniecka E., Świetlik J., Nawrocki J.: Usuwanie prekursorów biodegradowalnych substancji organicznych w procesie biofiltracji, *Ochrona Środowiska* 3/2007

