

Ocena skuteczności oczyszczania wody w aspekcie usuwania związków żelaza i manganu

Evaluation of water treatment efficiency in terms of iron and manganese compounds removal

Małgorzata Wolska, Małgorzata Kabsch-Korbutowicz, Jacek Wiśniewski^{*)}

Słowa kluczowe: wody podziemne, uzdatnianie, napowietrzanie, filtracja.

Streszczenie

Wody podziemne, stanowiące główne źródło zaopatrzenia ludności w wodę do picia, ze względu na swój skład wymagają często uzdatniania z wykorzystaniem procesów napowietrzania i filtracji. O skuteczności przebiegu tych procesów decyduje wiele parametrów eksploatacyjnych poszczególnych procesów jednostkowych, które powinny być kontrolowane, a w wypadku pogorszenia jakości uzdatnionej wody odpowiednio weryfikowane. W artykule, na podstawie przeprowadzonych badań, pokazano że oceny przebiegu usuwania związków żelaza i manganu podczas uzdatniania wód podziemnych można dokonać na podstawie badań w skali wielkolaboratoryjnej oraz technicznej.

Keywords: groundwater, treatment, aeration, filtration

Abstract

Groundwater, the main source of the drinking water supply, due to its composition, often requires treatment using aeration and filtration processes. The effectiveness of the process is determined by a number of operational parameters of individual unit processes, which should be controlled and, in the case of the treated water quality deterioration, properly verified. In the article, based on the performed studies, it is shown that the evaluation of iron and manganese compounds removal during groundwater treatment can be carried out on the basis of large-laboratory and technical scale studies.

Wody podziemne stanowią około 99% wszystkich wód słodkich występujących w formie ciekłej na Ziemi, a ich zasoby szacuje się na 10-15 mln km³. Wg opublikowanego przez UNESCO w 2022 roku raportu [3] całkowity pobór wód podziemnych na Ziemi w 2017 r. wyniósł 959 km³ i stanowi on obecnie 25% całkowitego poboru wody słodkiej. Zgodnie z opublikowanymi danymi szacuje się, że wody podziemne dostarczają już połowę wody pobieranej do użytku domowego przez ludność świata i ok. 25% wody pobieranej do nawadniania terenów uprawnych, dostarczając wodę na ok. 38% gruntów nawadnianych na świecie. W Polsce wody podziemne stanowią obecnie główne źródło wody dostarczanej odbiorcom siecią wodociągową. W roku 2021 stanowiły one 73% (1,53 km³) wody wykorzystywanej na cele bytowo-gospodarcze, zaś na cele przemysłowe ich udział wynosił ok. 3% (0,21 km³) [6].

Powszechność wykorzystania wód podziemnych na cele bytowo-gospodarcze wynika głównie z ich w miarę równomiernego rozmieszczenia na obszarach zamieszkiwanych przez ludzi, relatywnej łatwości ujmowania, ale przede wszystkim dobrej i na ogół stałej jakości. Skład wód podziemnych kształtują przede wszystkim procesy hydrogeochemiczne zachodzące w gruncie, aczkolwiek wpływ na nie mogą także mieć procesy fizyczne i biologiczne [4]. Do podstawowych domieszek i zanieczyszczeń występujących w wodach podziemnych, uniemożliwiających ich bezpośrednie wykorzystanie do celów bytowo-gospodarczych, zaliczane są związki żelaza i manganu oraz ditlenek węgla i siarkowodór. Pogarszają one zarówno

właściwości organoleptyczne wody, jak i niekorzystnie wpływają na eksploatację sieci wodociągowej. Zawartość związków żelaza waha się w bardzo szerokim przedziale i czasami może osiągać stężenia nawet kilkudziesięciu g/m³. Stężenia związków manganu są niższe i stanowią ok. 10% stężeń obserwowanych dla żelaza. W wodach podziemnych związki żelaza i manganu występują głównie w postaci rozpuszczonych soli Fe(II) i Mn(II), a w przypadku żelaza – połączenia z ligandami organicznymi. Zgodnie z obowiązującymi przepisami, dopuszczalne stężenie żelaza w wodzie, przeznaczonej do spożycia przez ludzi, nie może przekraczać 0,2 g Fe/m³, zaś manganu 0,05 g Mn/m³ [7].

Stąd też w większości zakładów uzdatniających wody podziemne stosowane procesy jednostkowe mają za zadanie usunięcie składników gazowych (głównie przez ich desorpcję) oraz usunięcie związków żelaza i manganu, poprzez ich utlenienie do form trudno rozpuszczalnych, które następnie mogą być odseparowane z wody. Dobór parametrów technologicznych poszczególnych procesów jednostkowych musi być dokonany każdorazowo dla konkretnego źródła wody, dlatego też przed przystąpieniem do projektowania zakładu uzdatniania należy przeprowadzić badania, które powinny obejmować przeprowadzenie dłuższych testów, co najmniej w skali wielkolaboratoryjnej. Jednakże, jak pokazuje praktyka, często w trakcie eksploatacji zakładu uzdatniania wody podziemnej stwierdza się pogorszenie jakości uzdatnionej wody (przekroczenie dopuszczalnych wartości wskaźników określonych w obowiązujących przepi-

^{*)} Małgorzata Wolska, dr hab. inż., Małgorzata Kabsch-Korbutowicz, prof. dr hab. inż., Jacek Wiśniewski, dr hab. inż., Politechnika Wrocławska, Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: malgorzata.wolska@pwr.edu.pl

sach), co często jest konsekwencją zmiany jakości ujmowanej wody [5]. Pogorszenie jakości wód podziemnych, obserwowane w trakcie eksploatacji ujęć, może być konsekwencją wielu czynników, spośród których najistotniejsze to [2]:

- zmiany hydrodynamiczne w systemie wodonośnym,
- przekształcenia naturalnych środowisk hydrogeochemicznych w warunkach eksploatacji,
- ujawnianie się wpływu ognisk zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego na jakość wód.

Stąd też często, podczas eksploatacji zakładu uzdatniania wody podziemnej, pojawia się konieczność zmiany parametrów technologicznych poszczególnych procesów jednostkowych. Podejmowane działania mają na celu: po pierwsze, identyfikację procesów, których niewłaściwe działanie skutkuje brakiem możliwości uzyskania wymaganych końcowych parametrów jakościowych uzdatnionej wody, a w drugiej kolejności – ustalenie nowych parametrów tych procesów. Prace takie mogą być prowadzone zarówno na eksploatowanych w ZUW urządzeniach, jak i z wykorzystaniem instalacji wielkolaboratoryjnych, odwzorowujących poszczególne procesy jednostkowe.

Kolejnym problemem, z którym w ostatnim okresie muszą się mierzyć zakłady uzdatniania wód, są niewystarczające zasoby eksploatowanych źródeł wody, bądź też konieczność zapewnienia alternatywnych źródeł wody dla obecnie pracujących układów. Stąd też często istnieje konieczność ujmowania wód o gorszej, niż dotychczas, jakości. Powoduje to co najmniej potrzebę weryfikacji, czy obecnie eksploatowane urządzenia, przy zmianie źródła zasilania, pociągającej za sobą zmianę składu wody, pozwolą na uzyskanie wody uzdatnionej o wymaganej przepisami jakości, a często także dobór nowych parametrów technologicznych poszczególnych procesów. Dla uzyskania wiarygodnych wyników prace takie powinny być realizowane z wykorzystaniem instalacji wielkolaboratoryjnych.

Metodyka badań

Badania oceny skuteczności oczyszczania wody w aspekcie usuwania związków żelaza i manganu z wód podziemnych prowadzono dla dwóch zakładów uzdatniania wody. W pierwszym (ZUW1) badania prowadzone były w skali technicznej, a próbki wody pobierane były z układu technologicznego. Związane to było z koniecznością oceny przebiegu procesów jednostkowych oczyszczania wody i określenia możliwości ich optymalizacji w zakresie usuwania związków żelaza i manganu. Konieczność przeprowadzenia badań związana była z obserwowanym pogarszaniem się jakości ujmowanej w tym zakładzie wody, zwłaszcza w zakresie zawartości manganu, którego stężenie w oczyszczanej wodzie okresowo przekraczało wartość dopuszczalną. W zakładzie tym eksploatowany był aerator ciśnieniowy



Rys. 1. Filtry ciśnieniowe eksploatowane w ZUW1
Fig. 1. Pressure filters in ZUW1

oraz filtry ciśnieniowe (rys. 1) ze złożem katalitycznym DEFEMAN, a więc wykorzystywany był ciśnieniowy układ oczyszczania wody podziemnej.

Natomiast w drugim zakładzie (ZUW2), celem badań był dobór technologii oczyszczania wody podziemnej dla nowego ujęcia oraz weryfikacja możliwości wykorzystania istniejącego układu oczyszczania wody infiltracyjnej do oczyszczania wody z nowego źródła. Dlatego w tym przypadku badania były prowadzone w mobilnym układzie pilotowym w skali wielkolaboratoryjnej (rys. 2), który miał odwzorować procesy wykorzystywane w istniejącym układzie oraz parametry techniczne stosowane w tych procesach. Pierwotnie założono, że proces napowietrzania w instalacji badawczej realizowany będzie w układzie zamkniętym, jednak ze względu na uzyskane wyniki badań (nieskuteczne odkwaszenie i usuwanie siarkowodoru) zdecydowano o otwarciu zbiornika do napowietrzania, co zapewniło lepszą wymianę gazową i stanowiło odwzorowanie istniejącego układu.



Rys. 2. Instalacja mobilna do napowietrzania i filtracji
Fig. 2. Mobile installation for aeration and filtration

W instalacji mobilnej woda była oczyszczana w otwartym układzie technologicznym, składającym się z aeratora półkowego z wymuszonym przepływem powietrza oraz z filtrów grawitacyjnych ze złożem piaskowym, wpracowanym do usuwania żelaza i manganu (materiał został pobrany z filtra eksploatowanego w zakładzie oczyszczania wody infiltracyjnej, którego technologia była odwzorowywana w badaniach pilotowych).

Różnica zastosowanych układów (ciśnieniowy w ZUW1 i otwarty w ZUW2) wpływała w istotny sposób na przebieg oczyszczania wody. Układy te różniły się również parametrami realizacji poszczególnych procesów (tab. 1).

Tabela 1. Porównanie parametrów pracy procesów napowietrzania i filtracji w ZUW1 i ZUW2

Table 1. Comparison of aeration and filtration process operating parameters at ZUW1 and ZUW2

Zakład	Wydajność ZUW, m ³ /h	Q _{powietrza} , m ³ /h	V _{powietrza} /V _{wody} , m ³ /m ³	Prędkość filtracji, m/h
ZUW1	50	16,2	0,32	8,3÷9,4
ZUW2	0,36	0,18	0,5	4,5

Zastosowane w ZUW1 aeratory ciśnieniowe, w ograniczonym stopniu umożliwiają wymianę gazową z powietrzem, co skutkuje ograniczoną desorpcją ditlenku węgla w tym procesie. Natomiast w ZUW2, ze względu na możliwy kontakt z powietrzem, skuteczność desorpcji jest znacznie większa, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia skuteczności utleniania związków żelaza na tym etapie oczyszczania.

Układy konstrukcyjne tych zakładów różniły się również rodzajem zastosowanych filtrów. Złoże DEFEMAN zastosowane w ZUW1

charakteryzuje się dużą pojemnością na związki żelaza i manganu i jest powszechnie wykorzystywane w układach ciśnieniowych. Dodatkowo zastosowanie tego rodzaju złoża, wiąże się z możliwością zwiększenia obciążenia hydraulicznego powierzchni filtra, co miało miejsce w tym przypadku. Prędkość filtracji była ponad dwukrotnie większa od tej stosowanej w ZUW2.

W obu układach analiza jakości wody dotyczyła: ujmowanej wody, wody po napowietrzaniu i wody po napowietrzaniu i filtracji pospiesznej. Zakres analityczny obejmował: pH, przewodność elektryczna, intensywność barwy, mętność, zasadowość, stężenie żelaza (II), żelaza (III) i żelaza ogólnego oraz manganu i jonu amonowego. We wszystkich próbkach wody określono również stężenie tlenu rozpuszczonego. Wszystkie parametry jakości wody były wykonywane zgodnie z obowiązującymi normami.

Oceny skuteczności i przebiegu procesu napowietrzania dokonano na podstawie zmian zawartości tlenu rozpuszczonego w oczyszczanych wodach oraz zmian pH, świadczących o przebiegu desorpcji ditlenku węgla do powietrza. Dodatkowo czynnikiem świadczącym o poprawności przebiegu napowietrzania była skuteczność utlenienia żelaza (II) do żelaza (III), co również uwzględniono w ocenie pracy procesów technologicznych.

Natomiast ocenę skuteczności procesu filtracji w usuwaniu żelaza i manganu dokonano na podstawie zmian stężeń tych składników oraz zmian stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie.

Wyniki badań

Zakresy i średnie wartości analizowanych parametrów jakości wody w poszczególnych próbkach przedstawiono w tab. 2. Woda

surowa z ZUW1 charakteryzowała się znacznie większą zasadowością niż woda z ZUW2. Oznacza to, że zgodnie z teoretycznymi wytycznymi doboru metody odkwaszania wody (napowietrzania), zostały one poprawnie dobrane i proces odkwaszania powinien przebiegać skutecznie w obu układach. Obie wody surowe charakteryzowały się zbliżonym stężeniem żelaza ogólnego, a w wodzie z ZUW2 stwierdzono większą, o blisko 50 %, zawartość związków manganu, co w istotny sposób utrudnia przebieg usuwania żelaza i manganu w jednostopniowej filtracji.

Dodatkowo należy zauważyć, że w wodzie surowej z ZUW1 stwierdza się obecność większej ilości jonów amonowych, które zgodnie z danymi literaturowymi [1] są usuwane przed związkami manganu, a więc ich obecność w wodzie zmniejsza skuteczność usuwania manganu.

Woda surowa z ZUW1 charakteryzowała się dużą zawartością tlenu rozpuszczonego, co prawdopodobnie wynikało z możliwości wstępnego natlenienia wody podczas jej transportu z ujęcia. Natomiast woda z ZUW2 zawierała niewielkie ilości tlenu rozpuszczonego, a dopiero podczas napowietrzania następowało jej nasycenie tlenem.

Proces napowietrzania przebiegał inaczej w obu układach, mianowicie w przypadku wody z ZUW2 nastąpił znaczny wzrost wartości pH o 1,0÷1,3 jednostki, podczas gdy w wodzie z ZUW1 nie stwierdzono istotnych zmian wartości tego parametru – maksymalne zwiększenie wyniosło 0,1. Niestwierdzenie wzrostu wartości pH wody świadczy o małej skuteczności usuwania ditlenku węgla.

Jednocześnie zaobserwowano, że obie metody napowietrzania zapewniły wzrost zawartości tlenu rozpuszczonego: w wodzie z ZUW2 był on znacznie większy i wyniósł maksymalnie 8 g O₂/m³, natomiast

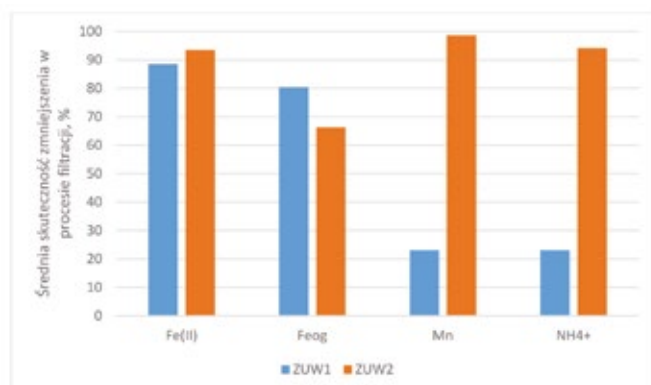
Tabela 2. Zakresy i średnie wartości parametrów jakości wody w obu analizowanych zakładach
Table 2. Ranges and average values of water quality parameters in both water treatment plants

Parametr	Jednostka	Woda surowa			Woda po napowietrzaniu			Woda po napowietrzaniu i filtracji pospiesznej			
		ZUW1									
		min	max	śr	min	max	śr	min	max	śr	
pH	-	7,00	7,50	7,33	7,30	7,50	7,42	7,40	7,50	7,48	
Przewodność elektryczna	μS/cm	465	513	488	465	501	485	468	507	490	
Tlen rozpuszczony	gO ₂ /m ³	3,19	5,30	4,32	4,01	5,80	4,70	3,93	5,10	4,49	
Barwa	gPt/m ³	12,00	28,00	19,67	3,50	11,00	6,37	2,20	4,00	2,80	
Mętność	NTU	1,00	1,90	1,53	2,10	17,00	8,23	0,30	0,70	0,42	
Żelazo (II)	gFe/m ³	1,14	1,28	1,19	1,10	1,42	1,23	0,07	0,24	0,14	
Żelazo (III)	gFe/m ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00	0,45	0,10	
Żelazo ogólne	gFe/m ³	1,14	1,28	1,19	1,12	1,42	1,24	0,08	0,69	0,23	
Mangan	gMn/m ³	0,21	0,26	0,23	0,13	0,25	0,22	0,06	0,22	0,17	
Jon amonowy	gNH ₄ ⁺ /m ³	0,18	0,35	0,27	0,14	0,35	0,23	0,02	0,12	0,06	
Zasadowość ogólna	val/m ³	5,40	5,60	5,53	5,40	5,60	5,50	5,40	5,60	5,52	
					ZUW2						
pH	-	6,7	6,90	6,79	7,9	8	7,9	7,7	7,9	7,8	
Przewodność elektryczna	μS/cm	421	430	427	420	421	420	414	425	418	
Tlen rozpuszczony	gO ₂ /m ³	0,50	1,50	0,88	10,1	10,5	10,3	9,3	10,1	9,7	
Barwa	gPt/m ³	2	11,00	4,50	6,0	3	4,1	1	3	1	
Mętność	NTU	0,06	0,70	0,14	0,4	9	5,98	0,18	7	1,41	
Żelazo (II)	gFe/m ³	1,12	1,42	1,34	0,1	0,06	0,0	0	0,03	0,03	
Żelazo (III)	gFe/m ³	0,00	0,26	0,01	0,87	1,15	1,01	0,05	0,79	0,18	
Żelazo ogólne	gFe/m ³	1,27	1,43	1,34	0,9	1,21	1,0	0,06	0,82	0,19	
Mangan	gMn/m ³	0,39	0,42	0,40	0,4	0,42	0,4	0,005	0,38	0,015	
Jon amonowy	gNH ₄ ⁺ /m ³	0,11	0,14	0,13	0,1	0,13	0,12	0,00	0,00	0,00	
Zasadowość ogólna	val/m ³	3,75	4,15	4,03	4,0	4,1	3,9	3,7	4,1	3,95	

w wodzie z ZUW1 maksymalnie wyniósł $0,6 \text{ g O}_2/\text{m}^3$. Jednocześnie nieznaczny wzrost wartości pH i nieznaczne zwiększenie zawartości tlenu rozpuszczonego w wodzie z ZUW1 świadczy o niewystarczającej skuteczności jej odkwaszania. Konsekwencją tego był nieprawidłowy przebieg procesu usuwania związków żelaza i manganu oraz brak utleniania Fe(II) podczas napowietrzania, który stwierdzono w wodzie z ZUW1, a zmiany stężenia Fe(III) mieściły się w granicach błędów analizy. Natomiast wzrost zawartości Fe(III) podczas napowietrzania wody w ZUW2 mieścił się w zakresie 95-98% i odpowiadał zmniejszeniu zawartości Fe(II). Oznacza to, że w wodzie z ZUW2 utlenianie związków żelaza, zachodziło skutecznie przy udziale tlenu rozpuszczonego wprowadzanego do wody podczas napowietrzania. Natomiast w wodzie z ZUW1, pomimo obecności tlenu rozpuszczonego w wodzie, nie zachodziło utlenianie związków żelaza, co może być związane również z małą skutecznością nasycenia wody tlenem. Brak utleniania związków żelaza jest zatem konsekwencją nieskutecznego odkwaszania wody. Niewystarczające usuwanie agresywnego ditlenku węgla, a w konsekwencji niewielki wzrost wartości pH istotnie zmniejsza szybkość oraz skuteczność przebiegu hydrolizy związków żelaza w wodzie. Ograniczony przebieg hydrolizy z kolei zmniejsza skuteczność utleniania, a w konsekwencji usuwania związków żelaza. Skutkiem tego faktu może być konieczność zwiększenia wysokości złoża filtracyjnego (co spowoduje zwiększenie pojemności złoża na związki żelaza i manganu), tak aby nastąpiło zatrzymanie Fe, NH_4^+ i Mn w złożu filtracyjnym. Może to jednak niejednokrotnie powodować konieczność stosowania filtracji dwustopniowej.

Obniżenie zawartości związków żelaza (II) podczas napowietrzania przyczyniało się do zmniejszenia intensywności barwy wód po napowietrzaniu, które mieściło się w zakresach 37,5÷87,5% oraz 37,0÷72,7 % odpowiednio dla ZUW1 i ZUW2. Procesowi utleniania Fe(II) do Fe(III), który stwierdzono głównie w wodzie z ZUW2, towarzyszył wzrost mętności maksymalnie o 8,9 NTU (75%). W wodzie z ZUW1 również stwierdzono zwiększenie mętności jednak stężenia Fe(II) i Fe(III) nie uległy zmianie.

Woda z ZUW2 poddawana filtracji charakteryzowała się blisko dwukrotnie większym stężeniem tlenu rozpuszczonego niż woda z ZUW1, czego konsekwencją była większa skuteczność utleniania związków żelaza (II) (rys. 3). Natomiast stwierdzono większą skuteczność usuwania żelaza ogólnego (ZUW1) w wodzie z tego układu, co prawdopodobnie związane było z wykorzystaniem w tym zakładzie złoża katalitycznego. Oznacza to, że żelazo w ZUW1 było usuwane na drodze katalitycznego utleniania w złożu filtracyjnym.



Rys. 3. Porównanie średnich skuteczności zmniejszenia wartości parametrów jakości wody w procesie filtracji

Fig. 3. Comparison of the mean efficiency of water quality parameters reduction in the filtration process

Niska skuteczność usuwania manganu i jonu amonowego w procesie filtracji z wody w ZUW1 była spowodowana wykorzystaniem pojemności złoża filtracyjnego przez związki żelaza. Natomiast

z uwagi na utlenienie i częściowe usunięcie związków żelaza podczas napowietrzania wody w ZUW2, eliminacja zarówno jonów amonowych, jak i manganu była znacznie większa.

Podczas filtracji wody w ZUW2 stwierdzono również zmniejszenie zawartości tlenu rozpuszczonego, jednak w ilości mniejszej od stechiometrycznej w utlenianiu żelaza czy manganu, co potwierdza przebieg katalitycznego usuwania tych związków.

Usuwanie związków żelaza i manganu podczas filtracji towarzyszyło zmniejszeniu intensywności barwy i mętności wody, które mieściły się w zakresach: 34,1÷78,0%, 66,8÷98,2% oraz 5,6÷66,7 % (z wyjątkiem jednej próbki w której stwierdzono wzrost intensywności barwy) i 88,7÷97,2% odpowiednio dla ZUW1 i ZUW2.

Podsumowanie

Przeprowadzone w Katedrze Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej badania pozwalają stwierdzić, że:

- napowietrzanie otwarte zapewnia znacznie większą skuteczność odkwaszania wody, niezależnie od zasadowości wody surowej i pozwala na skuteczną eliminację z niej ditlenku węgla oraz usuwanie żelaza i manganu w procesie filtracji,
- nieskuteczna hydroliza związków żelaza podczas napowietrzania, wynikająca z nieskutecznego odkwaszania, przyczynia się do pogorszenia efektów oczyszczania wody w całym układzie technologicznym. Może to pociągać za sobą konieczność zwiększenia wymaganej wysokości złoża filtracyjnych, w celu zwiększenia ich pojemności na związki żelaza i manganu,
- skuteczność usuwania związków manganu podczas filtracji zależy przede wszystkim od przebiegu utleniania i usuwania związków żelaza podczas napowietrzania. Nieprawidłowy przebieg napowietrzania niejednokrotnie skutkuje niewystarczającą skutecznością usuwania manganu, a nie żelaza, ponieważ ono łatwiej ulega utlenianiu niż związki manganu,
- oceny przebiegu usuwania związków żelaza i manganu podczas uzdatniania wód podziemnych można dokonać na podstawie badań w skali wielkolaboratoryjnej oraz technicznej. Natomiast optymalizacji tych procesów można dokonać tylko w badaniach pilotowych, ze względu na możliwość zmiany parametrów pracy poszczególnych urządzeń. ■

LITERATURA

- [1] Dąbrowska Lidia, Karwowska Beata, Rosińska Agata, Sparczyńska Elżbieta, Oczyszczanie wody w procesach hybrydowych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2021. ISBN 978-83-7193-778-1.
- [2] Górski Józef, Ochrona wód podziemnych w Polsce. Adam Mickiewicz University Press, Poznań 2022. ISBN: 978-83-232-4080-8.
- [3] Groundwater: Making the invisible visible. The United Nations World Water Development Report 2022: UNESCO, Paris. ISBN 978-92-3-100507-7.
- [4] Kowal Apolinary L., Wolska Małgorzata, Świdorska-Bróz Maria. Oczyszczanie wody. Tom 1. Zasoby, wymagania, ocena jakości i monitoring. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2022. ISBN: 978-83-01-22141-6.
- [5] Nowak Robert, Imperowicz-Pawlaczyk Anna: Factors affecting groundwater quality in the context of the exploitation of small drinking water intakes. Architecture Civil Engineering Environment, 2017, vol. 10, no. 4, 153-161. DOI: 10.21307/acee-2017-058.
- [6] Ochrona środowiska 2022. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2022. ISSN 0867-3217.
- [7] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz.U. 2017 poz. 2294.