

Jacek Wąsowski, Dariusz Kowalski, Beata Kowalska, Marian Kwietniewski, Małgorzata Zawilska

Badania zmian jakości wody w przewodach wodociągowych z wykładziną cementową

Zeliwo sferoidalne, jak większość wyrobów metalowych kontaktujących się z wodą, ulega korozji chemicznej i biologicznej [1,2], co jest przyczyną wzrostu oporności przewodów wodociągowych [3]. Aby zapobiegać tym niekorzystnym zjawiskom stosuje się różnego rodzaju powłoki ochronne, zarówno na wewnętrznych, jak i na zewnętrznych powierzchniach rur. Najbardziej popularne wykładziny wewnętrzne wykonywane są z zaprawy cementowej. W przypadku wody przeznaczonej do spożycia wykonuje się zazwyczaj wykładzinę z cementu portlandzkiego lub cementu glinowego, stosowanego w przypadku kontaktu z wodą o większej agresywności ($\text{pH}=4,5\div 10$). Zewnętrzna powierzchnia rur może być pokrywana powłokami cynkowymi, cynkowo-aluminiowymi, a także zabezpieczana lakierem bitumicznym lub tworzywami epoksydowymi [4–6].

Głównym składnikiem cementu jest klinkier portlandzki, którego udział w zależności od rodzaju cementu wynosi od 95% (cement portlandzki bez dodatków) do 15% (cement hutniczy). Klinkier portlandzki jest produktem spiekania w temperaturze ok. 1450°C , mieszaniny surowców składających się z wapieni i glinokrzemianów. Głównymi pierwiastkami wchodzącymi w skład cementu są krzem, wapń, glin, żelazo i siarka. Oprócz nich mogą w jego skład wchodzić wapń, potas, tytan, magnez, mangan i fosfor. Podczas procesu spalania w piecach obrotowych część metali ciężkich zawartych w paliwach gromadzi się w klinkierze. W ostatnich latach w piecach tych spala się także różnego rodzaju odpady, takie jak zużyte oleje czy opony samochodowe, które mogą zawierać znacznie większe ilości metali ciężkich niż surowce naturalne.

Przedostające się do wody pierwiastki wchodzące w skład głównych składników powłoki cementowej nie powodują w większości przypadków zmiany jakości zdrowotnej wody, wpływają natomiast na jej właściwości organoleptyczne, takie jak smak, zapach czy mętność. Wymywane zanieczyszczenia mechaniczne (piasek) mogą powodować niszczenie armatury i elementów sieci i instalacji wodociągowych [7–9]. Badania uszkodzeń nowych powłok cementowych pod wpływem działania wody o różnej agresywności pokazały, że wody agresywne o małej zasadowości mogą powodować znaczący wzrost pH (z 7 do 12 po tygodniu prowadzenia testu), zasadowości i zawartości

wapnia w wodzie będącej w kontakcie z powłoką cementową, przy czym zastosowanie powłoki bitumicznej na warstwie cementowej w znacznym stopniu ograniczało rozpuszczanie składników cementu [10]. W pracy [11] podano wartości wskaźników jakości wody, zalecane w celu uniknięcia rozpuszczania materiałów bazujących na cemencie, włączając w to azbestocement, rury cementowe oraz powłoki cementowe: $\text{pH}>7$, zasadowość $>15\text{ gCaCO}_3/\text{m}^3$, wapń $>10\text{ gCa}/\text{m}^3$, siarczan $<200\text{ gSO}_4^{2-}/\text{m}^3$, agresywny dwutlenek węgla $<5\text{ gCO}_2/\text{m}^3$.

Z wykładziny cementowej przenikają do wody pierwiastki śladowe, takie jak chrom, ołów, cynk, nikiel, arsen, kadm, wanad czy miedź [12]. Badania wymywania pierwiastków śladowych z cementu wykazały, że stosowanie odpadów do wypalania klinkieru powoduje niewielki wzrost zawartości tych pierwiastków w cemencie [13]. Uzyskane zależności nie były jednak jednoznaczne, gdyż zależały od wielu czynników, m.in. od metodyki testów rozpuszczalności. W pracy [14] przedstawiono charakterystykę wymywania metali z zaprawy cementowej, jako funkcję pH oraz czasu kontaktu cementu z wodą. Na podstawie uzyskanych zależności zaobserwowano, że najmniejsze wymywanie metali do wody występowało przy jej obojętnym pH. Autorzy pracy [15] zaobserwowali zwiększoną ilość chromu, arsenu, baru i kadmu wymywanych z powłoki cementowej, rejestrując ich ilości powyżej wartości dopuszczalnych w wodzie przeznaczonej do picia. Inne badania wykazały zależność wymywania metali ciężkich z zaprawy z cementu portlandzkiego od temperatury i czasu prowadzenia eksperymentu, przy zastosowaniu nowej – niezwykle czulej – metody, pozwalającej określać bardzo małe ilości tych pierwiastków [16]. Zastosowanie powłok cementowych może prowadzić także do przenikania do wody glinu, którego zawartość w powłoce zależy od rodzaju cementu. W ciągu dwóch miesięcy badań przeprowadzonych na rurociągu stalowym z wykładziną cementową zaobserwowano wzrost zawartości glinu z $0,005\text{ gAl}/\text{m}^3$ do $0,690\text{ gAl}/\text{m}^3$. Pierwiastek ten oddziałuje na zdrowie człowieka, jest szczególnie niebezpieczny dla zdrowia pacjentów poddawanych dializie nerek [17]. Ponieważ wymywanie glinu z cementu portlandzkiego następuje w obecności wody o małej zasadowości, dlatego zaleca się, aby powłoki wewnętrzne wykonane na miejscu ze zwykłego cementu portlandzkiego nie były stosowane w przypadku wody o zasadowości mniejszej niż $55\text{ gCaCO}_3/\text{m}^3$ oraz aby powłoki wewnętrzne wykonane fabrycznie z cementu nie były stosowane w przypadku wody o zasadowości mniejszej niż $25\text{ gCaCO}_3/\text{m}^3$ [18]. Zaleca się także ograniczenie stosowania wykładziny z cementu glinowego w rurociągach stosowanych do przesyłania wody przeznaczonej

Dr inż. J. Wąsowski, prof. dr hab. inż. M. Kwietniewski, mgr inż. M. Zawilska: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, jacek.wasowski@is.pw.edu.pl

Dr inż. D. Kowalski, dr hab. inż. B. Kowalska: Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Wodociągów i Kanalizacji, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, d.kowalski@wis.pol.lublin.pl

do spożycia ze względu na znacznie większą ilość glinu wymywanego z tego rodzaju cementu, w porównaniu z cementem portlandzkim [4, 7].

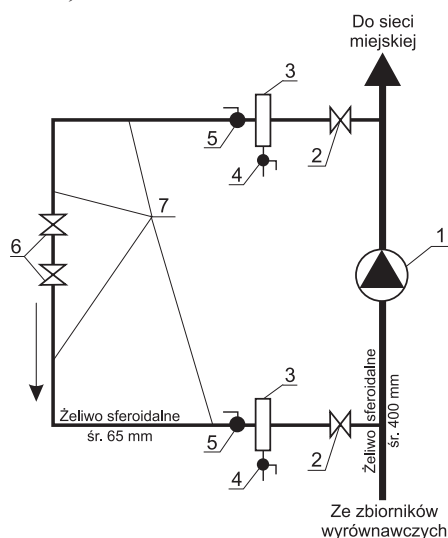
W literaturze brakuje wyczerpujących informacji dotyczących wpływu wykładziny cementowej przewodów wodociągowych na jakość transportowanej wody. Na wzajemne oddziaływanie wody i wykładziny cementowej wpływa bowiem wiele czynników, wśród których istotną rolę odgrywa nie tylko skład i rodzaj wykładziny, ale również właściwości kontaktującej się z nią wody. Także metody laboratoryjne różnią się między sobą i często nie odzwierciedlają warunków rzeczywistych panujących w sieci wodociągowej. W niniejszym artykule zaprezentowano odpowiednio zaprogramowane badania przeprowadzone w instalacji doświadczalnej, których podstawowym celem było ustalenie wpływu powłoki cementowej pokrywającej wewnętrzną powierzchnię przewodu wodociągowego wykonanego z żeliwa sferoidalnego na jakość wody w aspekcie jej zmian fizyczno-chemicznych.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono w instalacji modelowej zbudowanej w pompowni głównej zasilającej w wodę sieć wodociągową miasta, której schemat podano na rysunku 1. Woda pobierana była z ujęć kredowych, przy użyciu ośmiu studni głębinowych o głębokości 55÷70 m. Ujmowana woda spełniała wymagania Rozporządzenia Ministra Zdrowia [18, 19] i poza okresowym chlorowaniem nie wymagała oczyszczania. W skład instalacji badawczej wchodziły przewody wykonane z żeliwa sferoidalnego o łącznej długości 80 m i średnicy wewnętrznej 65 mm. Pojemność instalacji wynosiła 250 dm³.

Badania przeprowadzono w trzech seriach:

- seria I: wielotygodniowa stagnacja wody w instalacji; czas trwania serii do ustabilizowania jakości wody w instalacji; pobór próbek wody do badań odbywał się co 7 d,
- seria II: wielogodzinna stagnacja wody w instalacji; pobór próbek wody z instalacji odbywał się po 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 16 h i 32 h,



Rys. 1. Schemat układu badawczego

(1 – zespół pomp II stopnia, 2 – zasawa, 3 – zestaw kształtek, 4 – króciec do poboru próbek, 5 – zawór kulowy, 6 – zasawa kołnierzowa, 7 – przewód badawczy o dł. 80 m)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up
(1 = pumping station; 2 = valve; 3 = set of fittings;
4 = sampling pipe; 5 = ball valve; 6 = flanged valve;
7 = model pipe of 80 m length)

– seria III: przepływ wody przez instalację z prędkością 0,1 m/s; próbki wody pobrano na doprowadzeniu i odprowadzeniu wody z instalacji z uwzględnieniem czasu retencji wody w rurociągu.

Instalacja badawcza była dezynfekowana chlorem i płukana przed każdą serią badawczą. Przed rozpoczęciem każdej serii badań pobrano próbkę wody w celu ustalenia warunków początkowych. Analizy fizyczno-chemiczne próbek wody, określające zmiany jej jakości, wykonano zgodnie z obowiązującymi metodykami analitycznymi. Pomiar zawartości pierwiastków śladowych w wodzie oraz w powłoce cementowej przeprowadzono przy użyciu spektrometru emisyjnego ze wzbudzeniem plazmowym (ICP-OES) JY238 Ultrace (Jobin Yvon-Horriba, Francja) [20].

Wyniki badań

Jakość wody zasilającej instalację

Na podstawie uzyskanych wyników (tab. 1) można stwierdzić, że instalacja badawcza w czasie prowadzenia eksperymentów zasilana była wodą o zmiennej jakości, wynikającej z użytkowania różnych studni ujęcia. Szczególnie wyraźna była zmienność zawartości dwutlenku węgla oraz suchej pozostałości – wskaźników istotnych z punktu widzenia właściwości korozyjnych wody. Woda zasilająca charakteryzowała się praktycznie obojętnym pH (od 6,90 do 7,53), bardzo małą intensywnością barwy (1 gPt/m³) i mętnością (0,45÷0,89 NTU; jednorazowo 1,04 NTU), a także umiarkowanym zasoleniem (sucha pozostałość 358÷542 g/m³). Zawartość związków żelaza nie przekraczała 0,1 gFe/m³ (jednorazowo 0,24 gFe/m³), a manganu 0,021 gMn/m³. Zawartość substancji organicznych można uznać za nieznaczną (utlenialność 0,8÷1,8 gO₂/m³; jednorazowo 4,6 gO₂/m³).

Odnosząc jakość wody zasilającej instalację do wymagań stawianych wodzie przeznaczonej do spożycia [18, 19] należy stwierdzić, że woda podziemna w zakresie analizowanych wskaźników fizyczno-chemicznych nie budziła zastrzeżeń.

Orientacyjny wpływ wody na powłokę cementową umożliwia określenie wskaźników Ryznara i Langeliera, a także wskaźnika zaproponowanego przez AWWA (American Water Works Association) [21]. Dodatkowo mogą być określone inne wskaźniki dotyczące jakości wody, umożliwiające ocenę jej wpływu na wykładzinę cementową. W celu oceny właściwości wody zasilającej instalację badawczą w aspekcie jej stabilności chemicznej oraz agresywności w odniesieniu do typowych metali, z których wykonane są sieci i instalacje wodociągowe, określono wartości wskaźników proponowanych w normie PN-EN 12502 [22–25], dotyczącej wpływu wody na materiały metalowe. Na podstawie analizy wartości wskaźników określających stan chemicznej stabilności wody (tab. 2) można stwierdzić, że chociaż jakość wody była zmienna, to jednak stanowiła ona niewielkie zagrożenie materiałów cementowych i metalowych. Tylko pojedyncze wyniki świadczyły o pewnym ryzyku wystąpienia korozji. Wyjątkiem był indeks Ryznara, którego wartości wskazywały na agresywność wody.

Wielotygodniowa stagnacja wody w instalacji

Pierwsza seria badawcza zakładała stagnację wody w instalacji, aż do ustabilizowania jej właściwości. W tej serii badawczej próbki wody pobrano w odstępach tygodniowych przez 8 kolejnych tygodni. W tabeli 3 podano wartości

Tabela 1. Jakość wody zasilającej instalację badawczą
Table 1. Quality of the water feeding the experimental set-up

Wskaźnik, jednostka	2 XII 2009	9 XII 2009	13 V 2010	18 X 2010	17 XI 2010	Wartość dopuszczalna [18]
Temperatura, °C	10,5	10,8	12,4	11,0	10,2	–
Barwa, gPt/m ³	1	1	1	1	1	15
Mętność, NTU	0,48	0,45	1,04	0,89	0,55	1
pH	7,06	7,18	6,90	7,53	7,11	6,5÷9,5
Zasadowość ogólna, val/m ³	5,9	5,7	5,4	6,3	6,2	–
Twardość ogólna, gCaCO ₃ /m ³	370	365	340	390	410	60÷500
Wapń, gCa/m ³	122	119	113	104	122	–
Żelazo ogólne, gFe/m ³	0,08	0,07	0,24	0,10	0,07	0,2
Mangan, gMn/m ³	0,018	0,015	0,021	nw.	nw.	0,05
Chlorki, gCl ⁻ /m ³	17,8	18,2	21,3	32,0	39,0	250
Siarczany, gSO ₄ ²⁻ /m ³	72	71	60	86	82	250
Utlenialność, gO ₂ /m ³	1,2	1,3	4,6	1,8	0,8	5
Azot amonowy, gNH ₄ ⁺ /m ³	0,005	0,008	0,013	0,090	0,141	0,5
Azotany, gNO ₃ ⁻ /m ³	11,3	9,7	12,0	15,8	9,2	50
CO ₂ wolny, gCO ₂ /m ³	9,2	9,4	50,6	50,6	35,2	–
CO ₂ agresywny, gCO ₂ /m ³	nw.	nw.	nw.	nw.	nw.	–
Tlen rozpuszczony, gO ₂ /m ³	7,8	8,1	7,7	6,7	5,3	–
Sucha pozostałość, g/m ³	389	358	542	494	521	–

Tabela 2. Wskaźniki agresywności wody zasilającej instalację badawczą
Table 2. Corrosion indicators of the water feeding the experimental set-up

Wskaźnik	2 XII 2009	9 XII 2009	13 V 2010	18 X 2010	17 XI 2010	Małe ryzyko korozji	
Langeliera ($I_L = pH - pH_s$)	-0,04	0,08	-0,40	0,23	-0,09	0	
Ryznara ($I_R = 2pH_s - pH$)	7,14	7,02	7,70	7,07	7,29	6,25÷6,75	
AWWA ($I_{AWWA} = pH + \log([A][H])$)	12,1	12,2	11,9	12,5	12,2	>12	
Korozyjność materiałów metalowych							
Miedź	$S_1 = [HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$	8,1	8,1	9,0	5,8	7,6	>1,5
Materiał żelazny cynkowany	$S_2 = ([Cl^-] + [NO_3^-] + 2[SO_4^{2-}])/[HCO_3^-]$	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	<0,5
	$S_3 = ([Cl^-] + 2[SO_4^{2-}])/[NO_3^-]$	11,0	12,7	9,6	10,6	18,2	>3
Stal odporna na korozję	chlorki, mol/m ³	0,5	0,5	0,6	0,9	1,1	<1,5
Żeliwo	tlen rozpuszczony, gO ₂ /m ³	7,8	8,1	7,7	6,7	5,3	>3
	pH	7,1	7,2	6,9	7,5	7,1	>7
	zasadowość ogólna, mol/m ³	6,1	6,0	5,7	5,2	6,1	>2
	wapń, mol/m ³	3,1	3,0	2,8	2,6	3,1	>1

A – zasadowość ogólna, gCaCO₃/m³
H – twardość wapniowa, gCaCO₃/m³

podstawowych wskaźników stabilności wody w kolejnych tygodniach jej stagnacji w instalacji badawczej.

Uzyskane wyniki badań wskazują na to, że podczas wielotygodniowej stagnacji reakcja wody z powłoką cementową miała miejsce w ciągu pierwszych 5 tygodni. W tym czasie odnotowano przede wszystkim stopniowy wzrost pH wody (z 7,06 do 8,11), czemu towarzyszył zanik dwutlenku węgla oraz wzrost mętności wody, zawartości

chlorków i siarczanów. W mniejszym stopniu odnotowano w tym przedziale czasu zwiększenie zasadowości i twardości wody. Wartości wskaźnika Langeliera wskazywały, że woda wprowadzona do instalacji stopniowo traciła właściwości agresywne. Takie zmiany jakości wody świadczyły o jej stopniowym nasyceniu składnikami powłoki cementowej i nabieraniem zdolności do wytrącania węgla wapnia. Analizy jakości wody stagnującej w instalacji

Tabela 3. Agresywność wody podczas wielotygodniowej stagnacji w instalacji badawczej (seria I)

Table 3. Corrosive properties of the water during many weeks' stagnation in the experimental set-up (series I)

Czas, tyg.	I_L	I_R	I_{AWWA}
0	-0,04	7,14	12,09
1	0,08	7,02	12,20
2	0,31	7,04	12,67
4	0,54	6,71	12,89
5	0,81	6,49	13,13
6	0,81	6,64	13,21
7	0,92	6,48	13,39
8	0,76	6,74	13,15
Woda stabilna	0	6,25÷6,75	>12

w dłuższym czasie badań potwierdziły tę tendencję, na co szczególnie wskazywało zmniejszenie mętności wody, zawartości wapnia oraz suchej pozostałości. Jakość wody w całym czasie badań odpowiadała wymaganiom stawianym wodzie przeznaczonej do spożycia, a wartości wskaźnika AWWA wskazywały, że woda mogła się bezpiecznie kontaktować z materiałami cementowymi.

Wielogodzinna stagnacja wody w instalacji

Druga seria badań polegała na wielogodzinnej stagnacji wody w instalacji (1÷32 h). Przeprowadzono ją na próbie wody po ok. 11 miesiącach eksploatacji instalacji badawczej. Celem tych badań było ukazanie zmian jakości wody w czasie krótkiego, spotykanego w praktyce wodociągowej, kontaktu wody z powłoką cementową pokrywającą wewnętrzną powierzchnię instalacji. W tabeli 4 zestawiono wartości wskaźników charakteryzujących stopień agresywności wody.

Tabela 4. Agresywność wody podczas wielogodzinnej stagnacji w instalacji badawczej (seria II)

Table 4. Corrosive properties of the water during many hours' stagnation in the experimental set-up (series II)

Czas, h	I_L	I_R	I_{AWWA}
0	0,33	6,87	12,64
1	0,32	6,88	12,64
2	0,41	6,69	12,56
4	0,47	6,63	12,64
8	0,48	6,62	12,68
16	0,48	6,62	12,71
32	0,56	6,49	12,73
Woda stabilna	0	6,25÷6,75	>12

Przeprowadzone analizy wykazały zmiany jakości wody w czasie jej wydłużonego kontaktu z wykładziną cementową. Zmiany te zachodziły w bardzo wolnym tempie i związane były z przechodzeniem z powłoki cementowej do wody składników cementu, głównie wapnia (obecność glinu utrzymywała się na bardzo niskim i ustabilizowanym poziomie). Reakcja wody z cementem prowadziła do nieznacznego wzrostu mętności wody i pH oraz stopniowego zmniejszania obecności dwutlenku węgla. Zmianom wartości wskaźników fizyczno-chemicznych towarzyszyły

zmiany wartości wskaźników stabilności wody. Wzrost wartości wskaźnika Langeliera i zmniejszenie wartości wskaźnika Ryznara świadczyły o zwiększeniu zdolności wody do wytrącania węglanu wapnia, a zwiększenie wartości wskaźnika AWWA o możliwości bezpiecznego używania zastosowanej powłoki do kontaktu z badaną wodą.

Przepływ wody przez instalację

Trzecia seria badawcza została przeprowadzona w warunkach dynamicznych, tj. przy przepływie wody przez instalację z prędkością 0,1 m/s. Prędkość ta występuje powszechnie w przewymiarowanych obecnie sieciach wodociągowych. Przy poborze próbek wody uwzględniono 13-minutowy kontakt wody z wykładziną cementową. Wyniki analiz wody zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Jakość wody przepływającej przez instalację badawczą z prędkością 0,1 m/s (seria III)

Table 5. Quality of the water flowing through the experimental set-up at the velocity of 0.1 m/s (series III)

Wskaźnik, jednostka	Dopływ	Odpływ
Temperatura, °C	11,0	11,2
Barwa, gPt/m ³	1	1
Mętność, NTU	0,89	0,93
pH	7,53	7,58
Zasadowość ogólna, val/m ³	6,3	6,4
Twardość ogólna, gCaCO ₃ /m ³	390	410
Wapń, gCa/m ³	104	114
Żelazo ogólne, gFe/m ³	0,10	0,055
Mangan, gMn/m ³	0	0
Chlorki, gCl ⁻ /m ³	32,0	39,0
Siarczany, gSO ₄ ²⁻ /m ³	86	86
Utlenialność, gO ₂ /m ³	1,84	1,12
Azot amonowy, gNH ₄ ⁺ /m ³	0,09	0,09
Azotany, gNO ₃ ⁻ /m ³	15,8	15,8
Dwutlenek węgla (wolny), gCO ₂ /m ³	50,6	39,6
Tlen rozpuszczony, gO ₂ /m ³	6,70	6,93
Sucha pozostałość, g/m ³	494	519
Wskaźnik Langeliera (I_L)	0,23	0,38
Wskaźnik Ryznara (I_R)	7,07	6,82
Wskaźnik AWWA (I_{AWWA})	12,64	12,67

Z porównania jakości wody zasilającej instalację z jakością wody odpływającej wynika, że nawet przy tak krótkim czasie kontaktu wody z wykładziną cementową w warunkach przepływowych miała miejsce reakcja wody z wykładziną cementową. Należy podkreślić, że zmiana jakości wody była niewielka, ale świadczyła o przechodzeniu podstawowych składników cementu do wody, co miało wpływ na wzrost mętności, pH, twardości i suchej pozostałości oraz zmniejszenie zawartości dwutlenku węgla w wodzie. Wartości wskaźników charakteryzujących stabilność wody wskazywały na to, że woda w czasie kontaktu z wykładziną cementową wzmacniała swoją skłonność do wytrącania węglanu wapnia.

Zawartość pierwiastków śladowych w wodzie

Zgodnie z wynikami analizy próbki powłoki cementowej pokrywającej wewnętrzną powierzchnię rurociągu instalacji badawczej, wykonanymi za pomocą spektrometru emisyjnego ze wzbudzeniem plazmowym (ICP-OES), stwierdzono, że zawiera ona – poza głównymi składnikami cementu (potas, sód, magnez, wapń, cynk, glin) – wiele pierwiastków śladowych, takich jak żelazo, mangan, bar, chrom, ołów, nikiel i kobalt. Przeprowadzone analizy wody niechlorowanej i chlorowanej kontaktującej się z powłoką cementową w początkowej fazie pracy instalacji (badania wstępne) pozwoliły sformułować ogólne stwierdzenie, że większość pierwiastków śladowych występujących w cementzie była w nim skutecznie unieruchomiona i nie przechodziły one w znaczącej ilości do wody. Przy czym należy podkreślić, że wymywanie pierwiastków śladowych z cementu przebiegało intensywniej w przypadku wody poddawanej chlorowaniu [26].

W badaniach podjęto analizę zjawiska przechodzenia do wody pierwiastków śladowych po dłuższym czasie eksploatacji instalacji. W tym celu po 8-miesięcznej eksploatacji instalacji przeprowadzono ponowne badanie pierwiastków śladowych w wodzie. Analizie poddano próbkę wody zasilającej instalację oraz wody stagnującej w instalacji przez 32 h. Wyniki badań zestawiono w tabeli 6. Większość pierwiastków śladowych (również tych wykrywalnych w wodzie w początkowej fazie pracy instalacji) występowała w ilości poniżej poziomu detekcji spektroskopu, natomiast spośród pierwiastków wykrytych w stagnującej wodzie (sód, magnez, żelazo i bar) odnotowano nieznaczny wzrost ich ilości w porównaniu z wodą zasilającą instalację. Nieco większy wzrost, bo około 19%, odnotowano jedynie w przypadku boru oraz galu (ok. 12%). Duży, bo 3-krotny, wzrost stwierdzono w przypadku cynku, przy czym jego końcową zawartość w wodzie stagnującej ($0,027 \text{ g/m}^3$) można uznać nadal za nieznaczną. Należy podkreślić, że zawartość cynku w wodzie nie jest ograniczona przepisami polskimi, amerykańskimi oraz międzynarodowymi. Wszystkie końcowe stężenia oznaczonych pierwiastków w wodzie po jej kontakcie z powłoką były znacznie poniżej wartości dopuszczalnych w wodzie przeznaczonej do spożycia, określonych przez odpowiednie przepisy prawne.

Tabela 6. Zawartość pierwiastków po 32h stagnacji wody w rurze z powłoką cementową (po 8-miesięcznej eksploatacji instalacji)

Table 6. Concentrations of trace elements in the water after 32-hour stagnation in the cement-lined pipe (after 8 months in service)

Pierwiastek jednostka	Woda z ujęcia	Woda po 32h stagnacji	Przyrost %	Wartość dopuszcz.
Bor, mgB/m ³	18,1	21,6	19	1000 [18, 19]
Sód, gNa/m ³	9,9	10,8	9	–
Magnez, gMg/m ³	17,7	17,8	1	125 [18, 19]
Żelazo ogólne, mgFe/m ³	366,4	399,6	9	200 [18, 19]
Cynk, gZn/m ³	8,5	26,9	217	–
Gal, mgGa/m ³	1,9	2,1	12	–
Bar, mgBa/m ³	21,7	22,6	4	700 [29]

Stwierdzony niewielki wzrost zawartości pierwiastków w wodzie może wynikać z kilku powodów. Pierwszym jest dobre unieruchomienie pierwiastków śladowych w strukturze cementu (ich obecność została stwierdzona, więc należy wykluczyć możliwość ich niskiej zawartości). Istnieją badania [27,28], które dowiodły, że z prawidłowo pielęgnowanego cementu wypłukiwane są niewielkie ilości niebezpiecznych pierwiastków, nawet jeśli zawierał domieszkę popiołów ze spalonych odpadów szpitalnych. Problem składu i pielęgnacji cementu przeznaczonego do kontaktu z wodą wymaga więc szczególnej uwagi. Drugim powodem niewielkiego wzrostu ilości metali w wodzie może być fakt, że badana wykładzina cementowa pozostawała w stałym kontakcie z wodą już od dłuższego czasu (8 miesięcy), a zatem pierwiastki śladowe zawarte w cementzie zostały wypłukane już wcześniej, co sugerują badania wstępne [26]. Wskazuje to na potrzebę nie tylko pielęgnacji zaprawy w przewodach wodociągowych, ale też odpowiedniego płukania tych przewodów w początkowym czasie ich eksploatacji.

Podsumowanie

W badaniach wpływu wykładziny cementowej na jakość wody odnotowano wzrost wartości takich wskaźników, jak mętność, pH, zasadowość, twardość, chlorki, siarczany i sucha pozostałość, a zmniejszenie w wodzie zawartości dwutlenku węgla. Wartości wskaźników charakteryzujących stabilność wody wskazywały na to, że woda wprowadzana do instalacji stopniowo traciła właściwości agresywne i w coraz większym stopniu nabierała zdolność do wytrącania węglanu wapnia. Świadczyło to o przechodzeniu do wody składników cementu, z którego wykonana była wykładzina. Zmiany te odnotowywano narastająco w czasie do 5 pierwszych tygodni kontaktu wody z wykładziną cementową. Przy krótszym czasie kontaktu (do 32 h), zmiany jakości wody dotyczyły przede wszystkim wzrostu mętności i twardości wody oraz niewielkiego wzrostu pH. Zjawisko oddziaływania wody z wykładziną cementową odnotowano również w trakcie przepływu wody przez instalację z prędkością 0,1 m/s, przy czym zmiany jakości wody w tym przypadku były niewielkie. Niemniej świadczyły również o wymywaniu składników z cementu do wody, wzmacniając skłonność wody do wytrącania węglanu wapnia.

Przeprowadzone analizy próbek wody niechlorowanej i chlorowanej będącej w kontakcie z wykładziną cementową w początkowym czasie pracy instalacji nie wykazały przenikania do wody znaczących ilości pierwiastków śladowych (przy czym wymywanie pierwiastków śladowych z cementu przebiegało intensywniej przez wodę poddaną chlorowaniu). Spośród pierwiastków wykrytych w stagnującej wodzie, największy ich procentowy przyrost odnotowano w przypadku cynku, a następnie boru i galu, natomiast przyrost sodu, żelaza, baru i magnezu w wodzie był znikomy. Należy podkreślić, że zawartości wszystkich oznaczonych pierwiastków w wodzie po kontakcie z wykładziną cementową były dużo mniejsze od wartości dopuszczalnych w wodzie przeznaczonej do spożycia. Stwierdzone niewielkie ilości pierwiastków w wodzie wynikały z ich dobrego unieruchomienia w strukturze cementu oraz prawdopodobnie z ich wcześniejszego wypłukania z wykładziny.

Praca naukowa została sfinansowana ze środków przeznaczonych na naukę w latach 2008–2010, jako projekt badawczy nr NN 523 4942 34.

LITERATURA

- J. NAWROCKI, J. ŚWIETLIK: Analiza zjawiska korozji w sieciach wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 27–40.
- B. KOŁWZAN: Analiza zjawiska biofilmu – warunki jego powstawania i funkcjonowania. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 3–14.
- A. KOTOWSKI: Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 27–32.
- M. KWIETNIEWSKI, M. TŁOCZEK, L. WYSOCKI [red.]: Zasady doboru rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych do budowy przewodów wodociągowych. Izba Gospodarcza Wodociągi Polskie, Bydgoszcz 2011.
- PN-EN 545:2010. Rury, kształtki i wyposażenie z żeliwa sferoidalnego oraz ich złączka do rurociągów wodnych. Wymagania i metody badań.
- K. KUŚ, G. ŚCIERANKA: Wpływ materiału i parametrów eksploatacyjnych sieci wodociągowej na jakość wody na przykładzie Chorzowsko-Świętochłowickiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Chorzowie. *Ochrona Środowiska* 2005, vol. 27, nr 4, ss. 31–33.
- A. NEVILLE: Effect of cement paste on drinking water. *Materials and Structures* 2001, Vol. 34, pp. 367–372.
- M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ, M. WOLSKA: Korozyjność wody wodociągowej a zjawiska zachodzące w systemie dystrybucji. *Gaz, Woda, Technika Sanitarna* 2003, nr 1, ss. 10–15.
- M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ: Czynniki współdecydujące o potencjale powstawania i rozwoju biofilmu w systemach dystrybucji wody. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 3, ss. 7–13.
- B.D. DOUGLAS, D.T. MERRILL: Control of Water Quality Deterioration Caused by Corrosion of Cement-mortar Pipe Linings. AWWA Research Foundation, Denver 1991.
- E.A. VIK, T. HEDBERG: Corrosion and corrosion control in drinking water systems. In: Proc. of Corrosion Workshop and Seminar in Oslo, Norway, 1991.
- B. KOWALSKA, D. KOWALSKI, M. KWIETNIEWSKI, K. MISZTA-KRUK, J. CHUDZICKI: Badania zawartości jonów metali ciężkich w wodzie kontaktującej się z wykładziną cementową rur wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 41–45.
- M. ACHTERNBOSCH, K.-R. BRÄUTIGAM, N. HARTLIEB, C. KUPSCH, U. RICHERS, P. STEMMERMANN: Heavy Metals in Cement and Concrete Resulting from the Co-incineration of Wastes in Cement Kilns with Regard to the Legitimacy of Waste Utilisation. Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 2003.
- H.A. van der SLOOT: Comparison of the characteristic leaching behavior of cements using standard (EN 196-1) cement mortar and an assessment on their long-term environmental behavior in construction products during service life and recycling. *Cement and Concrete Research* 2000, Vol. 30, No. 7, pp. 1079–1096.
- Q. GUO, J.P. TOOMULURI, J.O. ECKERT: Leachability of regulated metals from cement-mortar linings. *Journal American Water Works Association* 1998, Vol.90, No 3, pp. 62–73.
- E. MOUDILOU, M. BELLOTTO, C. DEFOSSE, I. SERCLERAT, P. BAILLIF P.J.C. TOURAY: A dynamic leaching method for the assessment of trace metals released from hydraulic binders. *Waste Management* 2002, Vol. 22, pp. 153–157.
- H. BEREND, T. TROUWBORST: Cement-mortar pipes as a source of aluminum. *Journal American Water Works Association* 1999, Vol. 91, No. 7, pp. 91–100.
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. nr 61, poz. 417).
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 20 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. nr 72, poz. 466).
- N. le CORRE: Analysis of the major elements in cement by ICP. Materiały firmy Jobin Yvon.
- Permeation and Leaching. AWWA, U.S. EPA 2002.
- PN-EN 12502-2:2006. Ochrona materiałów metalowych przed korozją. Wytyczne do oceny ryzyka wystąpienia korozji w systemach rozprzewadzenia i magazynowania wody. Część 2: Czynniki oddziałujące na miedź i stopy miedzi.
- PN-EN 12502-3:2006. Ochrona materiałów metalowych przed korozją. Wytyczne do oceny ryzyka wystąpienia korozji w systemach rozprzewadzenia i magazynowania wody. Część 3: Czynniki oddziałujące na materiały żelazne cynkowane zanurzeniowo.
- PN-EN 12502-4:2006. Ochrona materiałów metalowych przed korozją. Wytyczne do oceny ryzyka wystąpienia korozji w systemach rozprzewadzenia i magazynowania wody. Część 4: Czynniki oddziałujące na stale odporne na korozję.
- PN-EN 12502-5:2006. Ochrona materiałów metalowych przed korozją. Wytyczne do oceny ryzyka wystąpienia korozji w systemach rozprzewadzenia i magazynowania wody. Część 5: Czynniki oddziałujące na żeliwo oraz stale niestopowe i niskostopowe.
- B. KOWALSKA, D. KOWALSKI, M. KWIETNIEWSKI, A. MUSZ, J. WĄSOWSKI: Ocena wpływu wykładziny cementowej w rurociągach żeliwnych na jakość przesyłanej wody – badania wstępne. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 4, ss. 13–17.
- C. GENAZZINI, G. GIACCIO, A. RONCO, R. ZERBINO: Cement-based materials as containment systems for ash from hospital waste incineration. *Waste Management* 2005, Vol. 25, No. 6, pp. 649–654.
- Z. GIERGIECZNY, A. KRÓL: Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Cd, Zn, Mn) in the mineral additions containing concrete composites. *Journal of Hazardous Materials* 2008, Vol. 160, pp. 255–274.
- Guidelines for Drinking-water Quality. 3rd ed., WHO, Geneva 2008.

Wasowski, J., Kowalski, D., Kowalska, B., Kwietniewski, M., Zawilska, M. **Water Quality Variations in Cement-lined Water-pipe Networks.** *Ochrona Środowiska* 2012, Vol. 34, No. 1, pp. 53–58.

Abstract: Experiments performed in a model pipe system fed with underground water demonstrated that tap water exposed to cement-lining gradually lost its corrosive properties and continued to develop its potential for calcium carbonate precipitation. This was an indication that cement components were released from the lining into the water residing in the pipes. Apart from its main com-

ponents (calcium, magnesium and aluminum), the water contained small quantities of trace elements (zinc, barium, chromium, lead, nickel and cobalt). The study produced the following findings: leaching of elements from the cement lining was enhanced upon exposure to chlorinated water, and the final concentration values of all the elements detected in the water after contact with the cement lining were much lower than those permissible for drinking water.

Keywords: Tap water, water-pipe network, cement lining, chemical stability, water contamination.