

Jacek Wąsowski, Anna Grabińska-Łoniewska

Wtórne zanieczyszczenie wody w warszawskiej sieci wodociągowej

Wtórne zanieczyszczenie wody podczas jej przepływu z miejsca uzdatniania do odbiorców, objawiające się znacznym pogorszeniem jej jakości, zarówno pod względem fizyczno-chemicznym jak i mikrobiologicznym, stanowi poważny problem dla zdecydowanej większości przedsiębiorstw wodociągowych. Zjawisko to powstaje po wieloletnim użytkowaniu sieci i instalacji wodociągowych, w wyniku odkładania się osadów chemicznych i biologicznych na wewnętrznych powierzchniach rur. Intensywność tego procesu, określanego niekiedy mianem hydraulicznego starzenia się przewodów, uzależniona jest od wielu czynników, z których najistotniejszymi są jakość wody przesyłanej siecią wodociągową oraz materiał, z którego ta sieć jest wykonana. Negatywne skutki, jakie wynikają z kontaktu wody z przewodem wodociągowym, to przede wszystkim z jednej strony korozja oraz odkładanie się osadów w rurach, natomiast z drugiej – przechodzenie do wody produktów korozji oraz mikroorganizmów, stanowiących obrosty biologiczne rury, wraz z ich metabolitami. W konsekwencji tych zjawisk, w wyniku perforacji korozyjnej rur lub zmniejszenia ich przekroju utrudniającego przepływ wody, zachodzi konieczność wymiany przewodów wodociągowych [1-3].

Biorąc pod uwagę potencjalne zagrożenia, jakie wynikają z wtórnego zanieczyszczenia wody w systemie dystrybucyjnym, jak również konsekwencje ekonomiczne związane z kosztami ponoszonymi na wymianę przewodów wodociągowych, podjęto badania nad rozpoznaniem i zwykławianiem tego problemu na przykładzie warszawskiego systemu wodociągowego. Badaniom poddano próbki wody z charakterystycznych punktów sieci wodociągowej na trasie od stacji uzdatniania do odbiorców, oszacowano stopień korozyjności wody oraz stan techniczny próbek przewodów wodociągowych. Przebadano także osady odłożone w instalacjach wodociągowych budynków mieszkalnych.

Charakterystyka systemu dystrybucji wody

Badania nad wtórnym zanieczyszczeniem wody przeprowadzono na fragmencie sieci wodociągowej Warszawy, dostarczającej wodę z Wodociągu Centralnego do dzielnicy Ursynów-Imielin. Rozpatrywana sieć dystrybucji wody składa się z wielu połączonych ze sobą pierścieni. Przewody magistralne w przeważającej części wykonane z rur stalowych o średnicach od 200 do 1.400 mm. Nowe elementy magistrali wybudowano przy użyciu rur żeliwnych o średnicach od 300 do 600 mm. Na terenie osiedla Imielin do rozprowadzania wody do poszczególnych budynków zostały zastosowane rury żeliwne o średnicach od 100 do 200 mm.

Przyłącza wodociągowe do budynków wykonane z rur żeliwnych kielichowych. Instalacje wodociągowe w przeważającej ilości budynków wykonane zostały z rur stalowych ocynkowanych, łączonych na gwint. Od około trzech lat niektóre nowe instalacje na tym osiedlu wykonywane są według technologii Aquatherm z rur polipropylenowych typu 3 (PP-3), łączonych przez zgrzewanie. Do utrzymywania pożądanego ciśnienia wody w budynkach stosowane są hydrofory [4,5]. Najkrótsza odległość od stacji uzdatniania wody do osiedla Imielin wzdłuż przewodów magistralnych wynosi około 11,6 km. Podczas maksymalnego poboru wody, przy założonej prędkości przepływu 1,5 m/s, orientacyjny czas przesyłu wody siecią do odbiorców w tym przypadku wynosi 2,5 godziny.

Metodyka badań

W celu prześledzenia zmian jakości wody podczas jej przepływu do odbiorców, próbki wody do badań pobierano z charakterystycznych punktów systemu wodociągowego, tj. ze stacji uzdatniania wody, hydroforni osiedlowej oraz z instalacji wodociągowych budynków mieszkalnych. Do badań wytypowano trzy budynki, tzn. budynek wyposażony w instalację „nową” (użytkowaną od 8 miesięcy), wykonaną z rur stalowych ocynkowanych, budynek wyposażony w instalację „starą” (użytkowaną od 12 lat), wykonaną również z rur stalowych ocynkowanych oraz budynek wyposażony w instalację wykonaną z rur PP-3, użytkowaną od 3 lat. W budynkach tych próbki wody pobierano na najwyższych kondygnacjach z baterii zainstalowanych na pionach kuchennych (budynki pięciokondygnacyjne).

Próbki wody do badań były pobierane około godziny 6 (po okresie nocnej stagnacji) oraz około godziny 17 (przy wysokim rozbirozie wody). Pobrane próbki wody poddawano analizie fizyczno-chemicznej i biologicznej. Dodatkowo, oprócz próbek wody do badań, pobrano wycinki rur z analizowanych instalacji. Wycinki te posłużyły do określenia ilości i składu osadów wewnątrz-rurowych oraz stopnia, charakteru i skutków korozji wynikającej z kontaktu materiału instalacji wodociągowej z przepływającą wodą.

Dyskusja wyników

Z przeprowadzonych badań wynika, że pogorszenie jakości wody następuje zarówno w sieci jak i w instalacjach wodociągowych (wykonanych ze stali ocynkowanej). O ile jakość wody wprowadzanej do sieci wodociągowej odpowiada obowiązującym w kraju standardom oraz zaleceniom WHO, to woda pobierana przez odbiorców tych standardów i zaleceń nie spełnia, zwłaszcza w odniesieniu do wskaźników bakteriologicznych oraz niektórych parametrów fizyczno-chemicznych, jak barwa, męt-

Tabela 1. Średnie wartości wskaźników fizyczno-chemicznych wody pobieranej w charakterystycznych punktach sieci wodociągowej

Wskaźnik, jednostka	Godzina	Wodociąg Centralny	Hydrofornia osiedlowa	Instalacja ze stali ocynkowanej		Instalacja z PP użytk. 3 lata
				użytk. 8 m-cy	użytk. 12 lat	
Mętność, g/m ³	6	1	2	3	6	2
	17	–	2	3	5	2
Barwa, g/Pt/m ³	6	4	14	18	26	15
	17	–	10	11	12	10
Zapach, –	7	zS (Cl ₂)	bez zapachu			
	17	–				
pH, –	6	7,34	7,50	7,44	7,45	7,50
	17	–	7,58	7,33	7,35	7,56
Żelazo ogólne, gFe/m ³	6	0,05	0,17	0,24	0,56	0,17
	17	–	0,07	0,13	0,26	0,05
Mangan, gMn/m ³	6	nw	nw	nw	nw	nw
	17	–	nw	nw	nw	nw
Cynk, gZn/m ³	6	nw	0,022	3,030	3,044	0,018
	17	–	0,018	1,430	1,232	0,016
Tlen, gO ₂ /m ³	6	4,9	4,8	3,5	3,0	–
	17	–	5,3	4,4	3,2	–
Dwutlenek węgla, gCO ₂ /m ³	6	16,1	14,3	15,9	15,1	–
	17	–	13,8	16,2	15,7	–
Chlor wolny, gCl ₂ /m ³	6	0,52	0,10	0,010	0,012	0,032
	17	–	0,04	0,015	0,014	0,035
Utlenialność, gO ₂ /m ³	6	1,77	2,10	2,66	2,43	2,14
	17	–	2,26	2,80	2,89	2,18
Sucha pozostałość, g/m ³	6	348	357	479	524	383
	17	–	329	445	429	367
Indeks nasycenia I _L [9]	6	–0,4	–0,3	–0,3	–0,3	–
	17	–	–0,3	–0,4	–0,4	–
Indeks S ₁ [10]	6	1,1	1,2	1,1	1,1	–
	17	–	1,2	1,2	1,2	–
Indeks S ₂ [10]	6	112	102	97	124	–
	17	–	101	91	118	–

Tabela 2. Średnie wartości wskaźników bakteriologicznych wody pobieranej w charakterystycznych punktach sieci wodociągowej

Miejsce poboru	Liczba komórek	Wartość wskaźnika	
		godz. 6	godz. 17
Wodociąg Centralny	bakterie psychrofilne (w 1 cm ³)	0	0
	bakterie heterotroficzne żelazowe (w 100 cm ³)	<3	<3
	bakterie redukujące siarczany (w 100 cm ³)	0	0
Hydrofornia osiedlowa	bakterie psychrofilne (w 1 cm ³)	5	8
	bakterie heterotroficzne żelazowe (w 100 cm ³)	30	40
	bakterie redukujące siarczany w (w 100 cm ³)	0	0
Instalacja ze stali ocynkowanej użytkowana 8 miesięcy	bakterie psychrofilne (w 1 cm ³)	67	136
	bakterie heterotroficzne żelazowe (w 100 cm ³)	825	139
	bakterie redukujące siarczany (w 100 cm ³)	0	0
Instalacja ze stali ocynkowanej użytkowana 12 lat	bakterie psychrofilne (w 1 cm ³)	138	301
	bakterie heterotroficzne żelazowe (w 100 cm ³)	1.107	188
	bakterie redukujące siarczany (w 100 cm ³)	0	0
Instalacja z PP użytkowana 3 lata	bakterie psychrofilne (w 1 cm ³)	6	5
	bakterie mezofilne (w 1 cm ³)	0	0
	bakterie z rodz. <i>Enterobacteriaceae</i> (w 1 cm ³)	0	0
	grzyby mikroskopowe (w 1 cm ³)	0	0

ność, żelazo oraz wolny chlor. Odnotować więc można niekorzystne zjawisko wtórnego zanieczyszczenia wody, przy czym stopień tego zanieczyszczenia był zróżnicowany (tab.1, 2).

Stosunkowo niewielkie pogorszenie jakości wody wystąpiło w sieci wodociągowej na odcinku Wodociąg Centralny – hydrofornia osiedlowa. Wzrosły co prawda wartości takich wskaźników zanieczyszczenia wody, jak barwa, mętność, stężenia jonów żelaza i cynku, utlenialność oraz pojawiły się bakterie, w tym heterotroficzne bakterie żelazowe, lecz wzrost wartości tych

wskaźników nie powodował przekroczenia wartości dopuszczalnych dla wody do picia i celów gospodarczych. Zdecydowane pogorszenie jakości wody ujawniło się natomiast w instalacjach wykonanych ze stali ocynkowanej. W tym przypadku poziom wtórnego zanieczyszczenia wody uzależniony był od czasu użytkowania instalacji oraz rozbioru wody. Największe zanieczyszczenie wody miało miejsce w instalacji „starej”, natomiast nieco mniejszym poziomem wtórnego zanieczyszczenia charakteryzowały się próbki wody z instalacji „nowej”. W obydwu przypad-

Tabela 3. Wyniki badań makroskopowych wycinków rur z instalacji zimnej wody wg [11]

Rodzaj instalacji czas eksploatacji	Miejsce poboru próbek średnica	Wygląd powierzchni wewnętrznej rur		Maksymalna szybkość korozji
		z osadem	po usunięciu osadu	
Stal ocynkowana 8 miesięcy	poziom zasilania $d_n=60$ mm	powierzchnia pokryta nierównomiernie osadem o rudobrazowej barwie; największe nawarstwienia osadu występują wzdłuż niewielkiego występu	widoczne rozległe wytrawienia korozyjne w miejscu występowania osadów, powłoka cynkowa na pozostałej powierzchni rury nie uległa całkowitemu zniszczeniu; grubość ścianek zmniejszyła się z 3,80 do 3,35+3,28 mm	0,78 mm/a
Stal ocynkowana 12 lat	poziom zasilania $d_n=50$ mm	powierzchnia pokryta osadem o barwie od jasno- do ciemnorudej, w dolnych warstwach ciemnobrazowej; widoczne bardzo duże nawarstwienia zmniejszające przekrój rury o ponad 50%	cała powierzchnia pokryta rozległymi wytrawieniami korozyjnymi z punktowymi głębokimi wżerami, powłoka cynkowa została całkowicie zniszczona; grubość ścianek zmniejszyła się z 3,45 do 2,40+1,27 mm; przy szwie rury widoczna jest perforacja, która na zewnątrz była zabezpieczona nakładką; w tym miejscu nastąpiła bardzo silna korozja powierzchni zewnętrznej	0,20 mm/a
PP-3, 3 lata	gałązka, $d_n=16$ mm	brak osadów	brak jakichkolwiek zmian, powierzchnia bardzo gładka	0

Tabela 4. Charakterystyka osadów wewnątrzrurowych

Parametr, jednostka	Rodzaj instalacji (czas użytkowania)		
	Stal ocynkowana (8 miesięcy)	Stal ocynkowana (12 lat)	Polipropylen PP-3 (3 lata)
Sucha masa osadu, g/cm ²	0,10	0,87	brak osadów i obrostów
Tlenki żelaza, % sm	77,7	73,9	
Wapń, % sm	8,5	7,9	
Magnez, % sm	0,1	0,3	
Cynk, % sm	4,2	5,9	
Części nierozpuszczalne w HCl, % sm	9,5	12,0	
Liczba bakterii psychrofilnych (z 1 cm ²) w 1 cm ³	5	445	
Liczba bakterii heterotroficznych żelazowych (z 1 cm ²) w 100 cm ³	43	150	
Liczba bakterii redukujących siarczany (z 1 cm ²) w 100 cm ³	0	0	

kach woda, w odniesieniu do większości wskaźników, miała gorszą jakość rano po nocnej stagnacji, w porównaniu z godzinami popołudniowymi, kiedy badane instalacje były odpłukane w wyniku zwiększonych rozbiórów wody. Należy stwierdzić, iż w wodzie pobieranej zarówno z instalacji „nowej” jak i „starej” odnotowano wzrost barwy, mętności, stężenia jonów żelaza i cynku, utlenialności, suchej pozostałości oraz liczby bakterii psychrofilnych i heterotroficznych bakterii żelazowych. Woda z obydwu instalacji nie spełniała standardów jakościowych wody przeznaczonej do picia i celów gospodarczych.

Nie zaobserwowano natomiast występowania wtórnego zanieczyszczenia wody rozprowadzanej instalacją wykonaną z polipropylenu. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż rury z tworzywa sztucznego nie wykazują ujemnego oddziaływania na jakość bakteriologiczną wody oraz na fizyczno-chemiczne właściwości wody, na które ujemnie wpływają procesy korozyjne. Woda dostarczana do odbiorców instalacją z tworzywa sztucznego, w zakresie badanych wskaźników, miała jakość wody sieciowej, tj. wody dopływającej siecią miejską do hydroforni osiedlowej.

Ze względu na to, iż przyczyną wtórnego zanieczyszczania wody w sieci i instalacjach wodociągowych wykonanych ze stali ocynkowanej są na ogół procesy korozji oraz procesy związane z działalnością mikroorganizmów stanowiących obrosty biologiczne przewodów wodociągowych, przeprowadzono dodatkowo badania pozwalające na scharakteryzowanie tych procesów. Z analizy wartości wskaźników korozyjności wody (I_L i S_1) wynika (tab.1), iż woda wykazywała na całej trasie przepływu podwyższoną agresywność (ujemna wartość I_L) z tendencją do stymulowania korozji miejscowej powodującej powstawanie wżerów i przyspieszoną perforację przewodów ($S_1 > 1$). Ta pod-

wyższona agresywność wody była przyczyną korozji elektrochemicznej przewodów wodociągowych. Z przeprowadzonych badań wycinków instalacji wodociągowej wynika, iż szybkość korozji instalacji ze stali ocynkowanej jest przyczyną awarii (tab.3).

Proces korozji elektromechanicznej przewodów wodociągowych wykonanych ze stali jest wspomagany korozją mikrobiologiczną, zachodzącą głównie pod wpływem zróżnicowanej pod względem morfologicznym i fizjologicznym grupy bakterii żelazowych. Bakterie te utleniają jony żelaza do żelazowych, które w postaci wodorotlenków gromadzą się na powierzchni wewnętrznej przewodów wodociągowych. Uznawane są one za tzw. organizmy gradientowe, tzn. rozwijające się w strefie przejściowej pomiędzy biotopami, w których zachodzą procesy utleniania i redukcji [6-8]. Spośród tych bakterii, zarówno w wodzie jak i w osadach wewnątrzrurowych, wykryto obecność bakterii żelazowych głównie z rodziny *Siderocapsaceae*, należących do gatunków *Naumaniella pygmaea* i *Naumaniella elliptica*. Bakterie te mają kształt pałeczek o wymiarach 0,6+0,8 mm × 1,2+1,5 mm, z zaokrąglonymi końcami. Złogi soli żelaza odkładają się w komórkach tych bakterii w postaci jednej lub dwóch ziarnistości, usytuowanych na przeciwległych końcach, albo w postaci płytki wzdłuż ściany komórkowej. Rozwojowi tej grupy bakterii, jak również innych mikroorganizmów wchodzących w skład tzw. obrostów wewnątrzrurowych, sprzyjały substancje organiczne występujące w wodzie, produkty korozji tworzące warstwy osadów na wewnętrznych powierzchniach przewodów oraz zbyt mała ilość środka dezynfekcyjnego w wodzie. Przeprowadzone badania nie wykazały obecności w wodzie oraz osadach wewnątrzrurowych bakterii redukujących siarczany.

Instalacje wodociągowe wykonane z tworzyw sztucznych uznawane są za mniej podatne na rozkład mikrobiologiczny niż przewody stalowe. W przewodach wykonanych z tych materiałów mogą rozwijać się bakterie i grzyby, dla których substratami pokarmowymi mogą być związki chemiczne stosowane przy produkcji tworzyw sztucznych jako zmiękczacze, stabilizatory, wypełniacze lub smary. Podatność tych materiałów na biodegradację zależy od ich masy cząsteczkowej. W procesie rozkładu biorą udział bakterie z rodzajów *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Breribacterium* i *Flavobacterium* oraz grzyby stępkowe z rodzajów *Aspergillus*, *Penicillium*, *Chaetomium*, *Gliocladium*, *Paecilomyces* i *Trichoderma* [12]. Wtórnie, w śluzie wytwarzanym przez bakterie, mogą gromadzić się mikroorganizmy dostające się do systemów dystrybucji wody z przewodu pokarmowego ludzi (bakterie z rodziny *Enterobacteriaceae*) oraz z gleby (bakterie saprofityczne, w tym promieniowce oraz grzyby stępkowe, drożdże i grzyby drożdżopodobne). Przeprowadzone badania mikrobiologiczne wykazały, że instalacje wykonane z polipropylenu PP-3 użytkowane w ciągu 3 lat nie były zasiedlone wyżej wymienionymi grupami mikroorganizmów (tab.2). Nie stwierdzono również występowania jakichkolwiek zmian na wewnętrznej powierzchni rur polipropylenowych (tab.3). Uzyskane wyniki badań potwierdzają wcześniejsze doniesienia w piśmiennictwie technicznym co do małej podatności powierzchni przewodów wykonanych z tworzyw sztucznych na zasiedlanie przez mikroorganizmy [13]. W tabeli 4 zestawiono podstawowy skład osadów wewnętrznych, będący ilustracją hydraulicznego starzenia się przewodów instalacji wodociągowych.

Podsumowanie

System rozprowadzania wody, obok efektywności jej uzdatniania, decyduje o jakości wody dostarczanej odbiorcom. Procesy korozji i obrosty biologiczne w sieciach i instalacjach wodociągowych należy uważać za główne źródło wtórnego zanieczyszczenia wody, jak również przyspieszonego hydraulicznego starzenia się przewodów wodociągowych. Przeprowadzone badania wskazują, iż miejscem, w którym omawiane zjawiska występują najsilniej są instalacje wodociągowe wykonane z tradycyjnego materiału, jakim jest stal ocynkowana. W instalacjach wykonanych ze stali ocynkowanej nawet po krótkim okresie użytkowania, na skutek agresywnych cech wody, następuje drastyczne pogorszenie fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych właściwości wody, łącznie ze zmianami zachodzącymi na wewnętrznej powierzchni przewodów wodociągowych. Poważne ograniczenie tych zjawisk można osiągnąć m.in. przez wykonywanie sieci i instalacji z tworzyw sztucznych. Przeprowadzone

badania wykazały, iż używanie do dystrybucji wody na przykład rur z polipropylenu PP-3 eliminuje zjawisko korozji oraz zapewnia dostarczenie odbiorcom wody bezpiecznej pod względem biologicznym i o lepszej jakości w odniesieniu do wskaźników, na które zazwyczaj ujemnie wpływają procesy korozji elektrochemicznej i mikrobiologicznej. Niezależnie od stosowania w technice instalacyjnej materiałów odpornych na korozję, drogą do rozwiązania analizowanych problemów powinno być:

- uzdatnianie wody z uwzględnieniem jej stabilizacji chemicznej i biologicznej,
- pokrywanie przewodów warstwami ochronnymi,
- regularne płukanie i czyszczenie sieci wodociągowych.

Podejmowanie takich działań jest konieczne, zwłaszcza w sytuacji obowiązku dostarczania odbiorcom wody o jakości zgodnej z europejskimi standardami.

LITERATURA

1. R.M. CLARK et.al: Effect of the distribution system on drinking water quality. Journal WSRT – Aqua, 1993, No. 1, Vol. 42, pp. 30-38.
2. H.F. HANSON et.al.: Deterioration of water quality in distribution systems. AWWA Research Foundation Report, Denver, Co, 1987.
3. M.R. SCHOCK: Internal corrosion and deposition control. Water Quality and Treatment, 4th Edition. McGraw-Hill Inc., New York 1990, pp. 997-1111.
4. Dane z archiwum Zakładu Sieci MPWiK w m.st. Warszawie.
5. Dane z archiwum Spółdzielni Mieszkaniowej „Imielin” w Warszawie.
6. L. SVORCOVA: Iron bacteria of the genus *Siderocapsa* in mineral waters. Zeitschr. Allg. Microbiol., 1975, Vol. 15, pp. 553-557.
7. L. SVORCOVA, K. VARY: Diagnostik der Eisenbakterien der Familie *Siderocapsaceae*. Arch. Hydrobiol., 1979, Vol. 85, S. 423-452.
8. S. WATKINS-BORENSTEIN: Microbiologically influenced corrosion handbook. Woodhead Publ. Ltd, 1994, Cambridge, England.
9. Norma PN-72/C-04609. Wstępna jakościowa ocena korozyjnego działania czynnych wód naturalnych na przewody z żeliwa, stali zwykłej lub ocynkowanej.
10. Norma DIN 50930. Korozja metali. Podatność na korozję materiałów metalowych względem wody.
11. Norma AN-78/H-04610. Metody oceny badań korozyjnych.
12. B. ZYSKA: Mikrobiologiczna korozja materiałów. WNT, Warszawa 1977.
13. B. WICHROWSKA: Zanieczyszczenie wody do picia w przewodach wodociągowych w zależności od ich rodzaju. Informacja „INSTAL”, 1994, nr 4, ss. 7-11.

Recontamination of Water in the Municipal Supply System of the City of Warsaw

With the passing of service time, an encrustation layer begins to grow on the internal walls of the water pipes and mains due to the deposition of chemicals and microorganisms. The intensity of the process depends on two major factors – the quality of the water transported through the pipeline, and the material of which the pipes have been made. The undesirable effects produced by the contact of the flowing water with the pipe interior can be itemized as follows: corrosion, encrustation growth, penetration of corrosion products and metabolites (concomitant with biological growth in the pipes). These phenomena contribute to the recontamination of the treated water, manifesting in a noticeable deterioration of its quality. They also contribute to the appearance of corrosion-induced perforation of the pipes and to the

decrease of their internal diameter. According to the results of our investigations, the deterioration of water quality was particularly high in the mains and plumbings made of zinc-coated iron. Even after a short time of service, there was not only a dramatic deterioration of the physicochemical and bacteriological parameters of the water, but also considerable changes were observed on the internal walls of the pipes. All those adverse effects produced by the aggressiveness of the water supplied were noticeably reduced when plastic pipes had been used. Polypropylene (PP3) pipes eliminated corrosion phenomena and provided the user with water of an upgraded quality with respect to those parameters that are undesirably influenced by electrochemical and microbiological corrosion.