

Marian Kulbik

## Ocena skuteczności płukania przewymiarowanych sieci wodociągowych metodą ukierunkowanego przepływu na podstawie jakości popłuczyn

Płukanie sieci wodociągowej – jako podstawowa czynność eksploatacyjna – ma na celu przede wszystkim usunięcie zgromadzonych w niej osadów luźnych i słabo związanych ze ściankami rurociągów. W ten sposób eliminuje się możliwość przemieszczania osadów w sieci wodociągowej, ponieważ w sprzyjających warunkach hydraulicznych mogą one trafić przez instalacje do punktów czerpalnych u odbiorców wody. Tradycyjny sposób płukania sieci stosowany jest w 90% przedsiębiorstw wodociągowych w Polsce, pomimo jego wielu ograniczeń i niewielkiej skuteczności [1,2]. Udoskonalenie płukania sieci wodociągowej może przyczynić się do ograniczenia skutków wtórnego zanieczyszczenia wody podczas jej dystrybucji, zwłaszcza w przewymiarowanych sieciach wodociągowych.

Wyniki badań autora wskazują, że poprawę skuteczności tradycyjnego sposobu płukania sieci można osiągnąć przez zaplanowane i kontrolowane upusty wody w warunkach jej ukierunkowanego przepływu. Niezbędnym narzędziem służącym do przygotowania kompleksowego programu płukania sieci wodociągowej jest komputerowy model symulacyjny. Jego pilne opracowanie i wdrożenie jest niezbędne do poprawy skuteczności działań eksploatacyjnych i inwestycyjnych w przedsiębiorstwach wodociągowych [3,4].

### Metoda ukierunkowanego przepływu wody

Metoda ukierunkowanego przepływu polega na wykorzystaniu zależności między prędkością przepływu a jakością transportowanej wody, na którą wpływa skala przewymiarowania rurociągów, a także ich stan techniczny i sanitarny. Siłą sprawczą płukania ukierunkowanego są naprężenia ścinające, powstające w warstwie przyściennej na granicy powierzchni osadu i przepływającej wody. Przyczyną ich powstania jest kilkukrotny wzrost prędkości przepływu wody w wybranym rurociągu lub wyodrębnionej części sieci w stosunku do normalnych warunków jej eksploatacji. Burzliwy przepływ wody z zalecaną prędkością zbliżoną do 1,8 m/s [5] powoduje uruchomienie zalegających osadów luźnych (półpłynnych), a niekiedy nawet kolejnych warstw odłożonych na ściankach przewodów, zwłaszcza słabo związanych z podłożem. Intensywność procesu wypłukiwania zalegających zanieczyszczeń zależy od rodzaju osadów oraz sił spójności (kohezji), będących między innymi funkcją czasu ich zalegania (wieku).

Mieszanie wody i uwolnionych osadów usuwa się z sieci do kanalizacji przez optymalnie rozmieszczone punkty jej upustu (komory spustowe i/lub hydranty). Hydranty wykorzystuje się z konieczności, ze względu na ich ograniczoną wydajność, głównie w wypadku płukania sieci rozgałęziowej.

Czas trwania procesu erozji osadów podczas płukania ukierunkowanego zależy od wielu czynników, stąd jest on trudny do jednoznacznego określenia metodami analitycznymi. Jednak można przewidywać, że jego zakończenie nastąpi wówczas, gdy zostaną osiągnięte nowe warunki równowagi hydraulicznej w przewodach lub wystąpi wyczerpanie zasobów przez uruchomienie wszystkich zalegających osadów. Z doświadczenia autora wynika, że najczęściej praktycznym sygnałem do zakończenia płukania przez służby eksploatacyjne jest osiągnięcie co najmniej dwu- lub trzykrotnej wymiany wody w płukanej sieci. Niekiedy zdarza się jednak, że odpływ zanieczyszczeń następuje także podczas piątej i następnych wymian. Z tego powodu w oszacowaniu minimalnego czasu płukania sieci pomocne są wyniki symulacji komputerowej, ponieważ na ich podstawie można ocenić zasięg obszarowy zastosowanego wymuszenia, a także ustalić możliwą do osiągnięcia prędkość przepływu w przewodach w danych warunkach hydraulicznych. Szczegółowy opis planowania i uwarunkowania realizacji płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu zamieszczono w pracy [6].

### Charakterystyka strukturalno-materiałowo-hydrauliczna układu wodociągowego

Struktura sieci wodociągowej w Biłgoraju jest mieszana – pierścieniowo-rozgałęziowa (rys 1.). Głównym jej elementem jest żeliwna magistrała o średnicy 300 mm i długości 5,5 km, biegnąca od ujęcia do południowych rejonów miasta, wybudowana odcinkami w latach 1981–1986. Podobny (południkowy) przebieg ma drugi najstarszy rurociąg zasilający o średnicy 200 mm i długości 2,2 km ułożony od ujęcia, głównie wzdłuż ul. T. Kościuszki. Jego część północną o długości 1,7 km wykonano z rur żeliwnych w 1962 r., natomiast odcinek południowy z rur azbestowo-cementowych dobudowano w 1970 r. Oba ciągi zasilające tworzą pierścień okalający około 85% obszaru miasta. We wnętrzu tego pierścienia rozbudowano gęstą sieć rozdzielczą połączoną w kilkudziesięciu miejscach z rurociągami zasilającymi. O intensywności rozbudowy sieci rozdzielczej świadczy techniczny wskaźnik jej długości, wynoszący 2,86 m na mieszkańca. Taka struktura sieci jest czynnikiem sprzyjającym stagnacji wody, a w konsekwencji – gromadzeniu się osadów w rurociągach.



Rys. 1. Schemat strukturalny układu wodociągowego w Biłgoraju

Podstawowym materiałem zastosowanym do budowy sieci wodociągowej w Biłgoraju jest żeliwo. Z rur żeliwnych w zakresie średnic od 100 mm do 300 mm wykonano 41,3% analizowanej sieci. Drugą grupę materiałową stanowią przewody z rur PVC o średnicy od 90 mm do 225 mm. Ich łączna długość wynosi 21,286 km, co stanowi 31,8% całkowitej długości rurociągów. Istotną część sieci przewodów o średnicy od 80 mm do 200 mm (18 km – 26,9%) wykonano w latach 1962–1980 z rur azbestowo-cementowych.

Przeciętny czas eksploatacji wszystkich przewodów wynosi około 26 lat. Najstarsza część sieci wodociągowej jest eksploatowana od 1962 r. Z tego okresu pochodzi 28,7% rurociągów istniejącej sieci. Ponad połowa struktury sieci wodociągowej, tj. 53,1% sieci przewodów, powstało w ostatnim ćwierćwieczu.

Z punktu widzenia problemu hydraulicznego starzenia się przewodów przedstawiona charakterystyka materiałowa i wiekowa sieci wodociągowej w Biłgoraju jest korzystna, szczególnie ze względu na dominujący udział rur z PVC i azbestowo-cementowych (58,7%). Niemniej jednak z wieloletnich obserwacji i badań systemów wodociągowych prowadzonych przez autora [7] wynika, że rozdzielnicy stan techniczny i sanitarny i sieci rozdzielczej może znacznie odbiegać od przewidywań opartych tylko o wiek rur. W kształtowaniu sprawności hydraulicznej przewymiarowanych rurociągów istotniejsze znaczenie ma wiele innych czynników eksploatacyjnych, jak na przykład prędkość i czas przetrzymania wody w sieci [7].

Wyniki symulacji przepływu wody wykonane przez autora [7] wskazują, że średnia prędkość w sieci wodociągowej

Tabela 1. Statystyczna ocena próbek popłuczyn zależnie od krotności wymiany wody (1, 2, 3)

Parametr	Żelazo ogólne gFe/m <sup>3</sup>			Mętność FNU*			Sucha pozostałość g/m <sup>3</sup>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Wartość maksymalna	8,0	7,8	3,1	166,0	93,2	38	429	384	268
Wartość minimalna	1,4	0,3	0,1	8,6	1,7	1,0	115	82	58
Wartość średnia	4,8	1,9	0,9	53,5	11,0	6,1	277	179	159
Odchylenie standardowe	2,1	1,6	0,7	41,0	15,0	7,0	81	54	54
Liczba próbek (wymiana)	34 (1)			36 (2)			32 (3)		

\*Jednostka formazynowa (FNU – formazin nephelometric unit)

w Biłgoraju wynosi 0,12 m/s w godzinie maksymalnego poboru wody. Szczegółowa analiza rozkładu prędkości pokazuje ponadto, że w 85,3% długości rurociągów prędkość przepływu jest mniejsza niż 0,3 m/s, w tym w 32,5% nie przekracza nawet 0,01 m/s.

W analizowanym układzie wodociągowym ustalono średni czas przetrzymania wody w sieci, który wyniósł 38 godz. podczas 96-godzinnej symulacji. Z obszarowego rozkładu czasu przetrzymania wody wynika, że praktycznie przez całą dobę występuje stagnacja wody w 28,4% węzłów sieci rozgałęzieniowej, położonych głównie na obrzeżach miasta. Podobnie niekorzystne warunki występują także nocą w całej sieci, ponieważ minimalny pobór wody w mieście wynosił tylko 45 m<sup>3</sup>/h.

Wartości parametrów pracy sieci wodociągowej (prędkość przepływu wody, czas przetrzymania) dobrze charakteryzują skalę przewymiarowania przewodów. Opisane warunki eksploatacji sieci w Biłgoraju sprzyjają odkładaniu się osadów i rozwojowi życia biologicznego we wszystkich przewodach, niezależnie od rodzaju materiału. Część zgromadzonych osadów słabo związanych z podłożem jest okresowo uruchamiana i rozprzestrzeniana w całej sieci w sprzyjających sytuacjach eksploatacyjnych, powodując niekorzystne zmiany jakości wody, szczególnie jej podwyższoną mętność i intensywność barwy.

### Metodyka poboru próbek popłuczyn i ocena ich reprezentatywności

Program kompleksowego płukania sieci wodociągowej w Biłgoraju zrealizowano od 22 maja do 19 lipca 2006 r. W ciągu 21 dób wykonano 20 wariantów płukania, dodatkowo podzielonych na wersje i etapy, co stanowiło łącznie 89 niezależnych realizacji. Poboru 254 próbek dokonano na wpływie popłuczyn z pięciu punktów zrzutu (rys. 1). Podczas każdej realizacji procesu płukania pobrano od 2 do 6 próbek popłuczyn z różną częstością, zależnie od czasu trwania płukania.

Cechą charakterystyczną popłuczyn jest ich zróżnicowanie jakościowe. Wartości liczbowe wskaźników jakości popłuczyn podczas płukania zmieniały się (zmniejszały) w następującym zakresie:

- żelazo ogólne: 8,0±0,1 gFe/m<sup>3</sup>,
- sucha pozostałość: 429±35 g/m<sup>3</sup>,
- mętność: 166±0,7 FNU.

Próbki o największej zawartości związków żelaza i największej mętności pochodzą z płukania sieci podczas pierwszej wymiany wody. W tym wypadku zawartość związków żelaza zmieniała się w zakresie 8,0÷1,4 gFe/m<sup>3</sup>, a mętność w przedziale

166÷8,6 FNU. W próbkach pobranych podczas drugiej wymiany wody zmienność zawartości związków żelaza była jeszcze większa, w przedziale 7,8±0,3 gFe/m<sup>3</sup>. W kolejnych dwóch wymianach wody zawartość związków żelaza w próbkach była mniejsza od 2 gFe/m<sup>3</sup>, a w piątej nawet od 1 gFe/m<sup>3</sup>. Z kolei przedział zmienności mętności wody podczas drugiej i trzeciej wymiany był porównywalny z jednoczesną dominacją wartości poniżej 20 FNU. W kolejnych wymianach, tj. czwartej i piątej, była zachowana tendencja spadkowa mętności, do poniżej 10 FNU. Zawartość suchej pozostałości w próbkach popłuczyn kształtowała się na stosunkowo niskim, podobnym poziomie w kolejnych wymianach z nielicznymi wyjątkami. Powtarzalny zakres zmienności tego wskaźnika we wszystkich wymianach wody wynosił od 260 do 100 g/m<sup>3</sup>.

### Wpływ krotności wymiany wody na jakość popłuczyn

Po uporządkowaniu materiału empirycznego poddano ocenie tylko 102 próbki popłuczyn z trzech pierwszych (najbardziej skutecznych) wymian wody, co stanowiło 40,2% ich łącznej liczby. Spostrzeżenie to uzasadnia konieczność posługiwania się uśrednionymi wartościami w bilansowaniu i ocenie jakości popłuczyn. Wyniki oceny wpływu krotności wymiany wody na jakość popłuczyn zamieszczono w tabeli 1.

Największy stopień zmniejszenia wartości średniej wystąpił między pierwszą i drugą wymianą wody, odpowiednio 79,3% w przypadku mętności, 61,5% – żelaza i 35,2% – suchej pozostałości. Najbardziej stabilna była zawartość suchej pozostałości, ponieważ podczas trzeciej wymiany wody stanowiła nadal 57% początkowej wartości średniej (pierwsza wymiana), podczas gdy w przypadku pozostałych dwóch wskaźników (żelazo i mętność), wielkości te wynosiły odpowiednio 19,1% i 11,5%. Proporcje te mogą świadczyć o nagłym wyczerpywaniu się masy zanieczyszczeń w płukanym rurociągu.

Odchylenie standardowe, jako miara statystyczna, pokazuje znaczny rozrzut wyników w stosunku do wartości średniej. Największe wartości odchylenia standardowego uzyskano w przypadku mętności i zawartości żelaza podczas pierwszej wymiany wody, natomiast mniejszy rozrzut zawartości suchej pozostałości w stosunku do dwóch poprzednich wskaźników był konsekwencją jej ograniczonej zmienności podczas płukania.

Z ustaleń tych wynika, że najbardziej skuteczne płukanie rurociągu następuje podczas pierwszej wymiany wody, ponieważ wartości wszystkich wskaźników jakości popłuczyn są zdecydowanie największe. Znaczny rozrzut mętności i zawartości związków żelaza podczas drugiej i trzeciej wymiany wody jest zapewne skutkiem wielokrotnego płukania tych samych odcinków sieci pierścieniowej i/lub dodatkowego

uruchamiania osadów w rurociągach dopływowych wskutek oddziaływania wymuszenia poza rejonem płukania. Te lokalne uwarunkowania mogą być przyczyną zróżnicowania intensywności i czasu wypłukiwania osadów w poszczególnych realizacjach procesu płukania rurociągów. Na przykład, w trakcie realizacji wariantu 1-2A podczas dziewiątej wymiany wody pobrano próbkę, która zawierała żelazo ogólne w ilości  $8,0 \text{ gFe/m}^3$ , przy mętności 36,3 FNU, natomiast podczas płukania odgałęzień intensywne wypłukiwanie żelaza i podwyższona mętność utrzymywały się podczas drugiej, trzeciej, a nawet czwartej i piątej wymiany wody. Na przykład, podczas płukania rurociągu z PVC o średnicy 110/90 mm (ulożonego w ul. Tarnogrodzkiej i Motorowej – rys. 1), według wariantu 11A, próbka pobrana podczas piątej wymiany wody zawierała żelazo w ilości  $1,65 \text{ gFe/m}^3$ , przy mętności 55 FNU.

### Kryteria i ocena skuteczności płukania rurociągów

Wypłukiwanie zanieczyszczeń z sieci wodociągowej jest procesem dynamicznym, zależnym od wielu czynników zmiennych w czasie i przestrzeni. Z tego powodu ocenę skuteczności płukania dokonano zarówno na podstawie jakości popłuczyn, jak i obliczonych wskaźników sprawności hydraulicznej wybranych rurociągów. W oparciu o wyniki badań laboratoryjnych określono ładunek i całkowitą masę usuniętych zanieczyszczeń w 89 niezależnych realizacjach płukania rurociągu, a także podczas pierwszej, najbardziej skutecznej, wymiany wody w uprzednio wybranych rurociągach. Dodatkowo wyznaczono wartość wskaźnika jednostkowego ( $W_p$ ), określającego ładunek wypłukiwanych zanieczyszczeń w stosunku do powierzchni ścian płukanych rurociągów.

### Ocena ogólna na podstawie ładunku i masy wypłukanych zanieczyszczeń

Ładunek wypłukanych zanieczyszczeń obliczono jako iloczyn ich zawartości w odpływie popłuczyn o pomierzonym natężeniu przepływu, natomiast masę wypłukanych zanieczyszczeń stanowił iloczyn obliczonego ładunku i czasu płukania. Aby wyeliminować wpływ niesystematycznego poboru próbek na wynik obliczeń, przyjęto jako podstawę bilansowania (tab. 2) średnią zawartość zanieczyszczeń ustaloną oddzielnie w próbkach pobranych w pięciu pierwszych wymianach wody. W obliczeniach bilansowych uwzględniono ponadto następujące parametry płukania:

- średnia wydajność zrzutu i/lub hydrantów:  $22,17 \text{ dm}^3/\text{s}$  ( $79,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ),
- czas 1-krotnej wymiany wody w całej sieci: 14,78 godz.,
- czas płukania sieci: 73,9 godz., przy założeniu pięciu wymian wody w każdej z 89 realizacji płukania.

Tabela 2. Ładunek i masa suchej pozostałości oraz związków żelaza wypłukanych z rurociągu w kolejnych wymianach wody

Krotność wymiany wody	Uśredniona zawartość		Ładunek		Masa	
	Żelazo ogólne $\text{gFe/m}^3$	Sucha pozostałość $\text{g/m}^3$	Żelazo ogólne $\text{gFe/s}$	Sucha pozostałość $\text{g/s}$	Żelazo ogólne $\text{kgFe}$	Sucha pozostałość $\text{kg}$
1	4,81	277	0,107	6,14	27,24	1568,6
2	1,85	179	0,041	3,97	10,48	1013,6
3	0,92	159	0,020	3,53	5,21	900,4
4	0,71	169	0,016	3,75	4,02	957,0
5	0,51	167	0,011	3,70	2,89	945,7
Średnia	1,76	190,2	0,039	4,22	–	–
Suma	–	–	–	–	49,84	5385,3

Zastosowany sposób bilansowania wypłukanych zanieczyszczeń niestety nie eliminuje wpływu rozrzutu wyników w poszczególnych wymianach wody na ostateczny wynik. Rozwiązanie tego problemu jest jednak niemożliwe na podstawie ograniczonego materiału doświadczalnego, ponieważ wymagałoby ustalenia zależności pomiędzy jakością popłuczyn a parametrami płukanego rurociągu (średnica, materiał, wiek, czas przetrzymania wody, prędkość przepływu itd.).

Wynik obliczeń zawarty w tabeli 2 wskazuje, że masa wypłukanych związków żelaza wyniosła około 50 kg, a suchej pozostałości ponad 5 ton. W bilansie zanieczyszczeń należy uwzględnić ładunek związków żelaza i suchej pozostałości w postaci domieszek, które znajdują się w wodzie wtłaczanej do sieci. Jak ustalono, przeciętna zawartość związków żelaza wyniosła  $0,19 \text{ gFe/m}^3$ , a suchej pozostałości  $99 \text{ g/m}^3$ . W oparciu o te dane obliczono, że masa domieszek znajdujących się w  $7875 \text{ m}^3$  wody zużytej do płukania stanowiła odpowiednio 1,6 kg związków żelaza oraz 780 kg suchej pozostałości. Ostatecznie można przyjąć z dużym prawdopodobieństwem, że wykonanie kompleksowego programu płukania sieci wodociągowej w Biłgoraju umożliwiło usunięcie osadów, które zawierały co najmniej 4,6 tony substancji stałych (rozpuszczonych i zawieszonych), w tym około 48 kg związków żelaza ogólnego.

### Ocena przebiegu płukania wybranych rurociągów podczas pierwszej wymiany wody

Z uwagi na niesystematyczny pobór próbek, określono skuteczność płukania wybranych rurociągów tylko podczas pierwszej wymiany wody, zamiast całego czasu realizacji danego wariantu. W tabeli 3 przedstawiono charakterystykę wybranych rurociągów i podstawowe parametry ich płukania. W tabeli 4 zamieszczono materiał doświadczalny, który charakteryzuje początkowy stan zanieczyszczenia płukanych rurociągów. Istotną zmienność zawartości związków żelaza, suchej pozostałości i mętności wskazuje, że wypłukiwanie zanieczyszczeń z wybranych rurociągów przebiegało odmiennie już w początkowej fazie procesu. Równocześnie ustalono, że stopień zanieczyszczenia rurociągów zależał od ich lokalizacji i funkcji pełnionej w układzie wodociagowym. Z tego względu wprowadzono ich podział na trzy grupy, tj. magistrale, sieć rozdzielczą i sieć rozgałęziową. W poszczególnych grupach można zauważyć następującą prawidłowość:

- zawartość związków żelaza w płukanych rurociągach żeliwnych i z PVC była zbliżona,
- zawartość suchej pozostałości była największa w rurociągach żeliwnych sieci rozdzielczej,
- mętność była zdecydowanie największa w próbkach pobranych podczas płukania odgałęzień wykonanych z rur PVC.

Tabela 3. Charakterystyka i parametry płukania wybranych rurociągów

Wariant płukania	Średnica przewodu mm	Długość odcinka m	Materiał	Czas płukania min	Krotność wymiany wody	Czas jednorazowej wymiany min	Prędkość przepływu m/s	Objętość wody m <sup>3</sup>
magistrala								
6	300	1850	żeliwo	107	4,1	26,1	1,18	413
6A	300	1485	żeliwo	75	3,4	22,3	1,11	439
6B	300	1055	żeliwo	40	2,8	14,5	1,21	311
5	200	1202	AC	131	7,1	18,6	1,63	445
5B	200	1202	AC	120	5,2	23,3	1,43	406
sieć rozgałęzieniowa								
11C	110	580	PVC	31	4,5	6,9	1,79	23
11A	90	650	PVC	67	8,6	7,8	1,39	48
11	90	610	PVC	45	3,8	11,8	1,55	21
14A	110	400	PVC	25	3,2	7,9	1,30	19
18C	90	535	PVC	26	5,7	4,5	1,19	21
sieć rozdzielcza								
9D	200	599	żeliwo	50	5,9	8,5	1,36	116
8C-I	100	545	żeliwo	59	5,4	10,9	1,39	36
8C-II	100	905	żeliwo	86	6,1	14,1	1,03	43
1-2A	100	490	żeliwo	131	12,7	10,4	1,40	178
1-1A	110	275	PVC	27	7,0	3,9	1,87	25

Tabela 4. Jakość popłuczyn podczas pierwszej wymiany wody w wybranych rurociągach

Wariant płukania	Zawartość		Mętność FNU	Ładunek		Masa		Wskaźnik W <sub>p</sub>	
	żelazo ogólne gFe/m <sup>3</sup>	sucha pozostałość g/m <sup>3</sup>		żelazo ogólne gFe/s	sucha pozostałość g/s	żelazo ogólne kgFe	sucha pozostałość kg	żelazo ogólne mgFe/m <sup>2</sup> s	sucha pozostałość mg/m <sup>2</sup> s
magistrala									
6	6,3	220	24,0	0,353	12,31	0,55	19,3	0,199	6,96
6A	2,2	226	17,4	0,171	17,59	0,23	23,5	0,121	12,39
6B	2,5	222	13,4	0,189	16,92	0,16	14,7	0,187	16,78
5	2,3	146	10,9	0,130	8,27	0,15	9,2	0,174	11,06
5B	0,6	158	2,8	0,034	8,91	0,05	12,5	0,045	11,92
sieć rozgałęzieniowa									
11C	3,2	217	15,5	0,035	2,38	0,02	0,1	0,194	13,13
11A	6,3	374	135,5	0,071	4,21	0,03	2,0	0,427	25,37
11	6,1	217	151,8	0,044	1,55	0,03	1,1	0,279	9,94
14A	6,3	117	38,1	0,077	1,43	0,04	0,7	0,615	11,41
18C	5,6	234	166,0	0,075	3,15	0,02	0,9	0,551	23,04
sieć rozdzielcza									
9D	4,8	355	38,2	0,186	13,73	0,10	7,0	0,485	35,85
8C-I	6,3	402	35,8	0,064	4,09	0,04	2,7	0,363	23,19
8C-II	7,7	311	55,3	0,048	1,92	0,04	1,6	0,163	6,56
1-2A	8,0	228	36,3	0,181	5,16	0,11	3,2	1,143	32,58
1-1A	6,9	422	28,0	0,106	6,51	0,03	1,5	1,197	73,22

Najmniejsza zawartość zanieczyszczeń wypłukanych z magistral może wynikać z faktu, że wskaźnik ten jest funkcją masy i objętości, która zwiększa się wraz ze średnicą rurociągu. Ponadto warto zauważyć, że sieć wodociągowa stanowi rodzaj zbiornika o znacznej przewodzie powierzchni ścian nad objętością. W wypadku magistrali o średnicy 300 mm stosunek jej objętości do powierzchni ścian jest trzykrotnie większy niż rurociągu o średnicy 100 mm. Z tego powodu zawartość wypłukiwanych zanieczyszczeń może być porównywana jedynie w przypadku rurociągów o tej samej średnicy. Z kolei ładunek i masa wypłukanych zanieczyszczeń są wskaźnikami zależnymi od czasu płukania rurociągu o danej długości z określoną prędkością. Wartości tych parametrów analizowane w przypadku wybranych rurociągów były istotnie zróżnicowane (tab. 3). Aby móc porównywać skuteczność płukania rurociągów o różnej geometrii i charakterystyce materiałowo-hydraulicznej, przyjęto wskaźnik  $W_p$ , który określa jednostkowy ładunek wypłukanych zanieczyszczeń z powierzchni  $1 \text{ m}^2$  rurociągu w ciągu 1 s (tab. 4).

Wartości wskaźnika  $W_p$  pokazują wyraźne różnice w ładunku wypłukanej suchej pozostałości i związków żelaza z wybranych rurociągów, co może świadczyć zarówno o obszarowym zróżnicowaniu masy osadów odłożonych na ich ściankach, jak i niejednakowej skuteczności płukania. Z tego powodu interpretację wartości wskaźnika  $W_p$  należy przeprowadzić niezależnie w każdym wariancie, z uwzględnieniem jego uwarunkowań realizacyjnych. W tym celu potrzebne są dodatkowe informacje. Na magistrali o średnicy 300 mm zlokalizowane są trzy komory spustowe (1, 2, 3), które były wykorzystywane podczas dziesięciu dni poprzedzających jej właściwe płukanie (rys. 1). W tym czasie magistralą odbywał się odpływ popłuczyn, szczególnie często w jej środkowej części, z przeciętną prędkością około 0,7 m/s. Fakt ten uzasadnia mniejsze wartości wskaźnika  $W_p$  uzyskane podczas realizacji wariantu 6A w środkowej części magistrali o średnicy 300 mm w stosunku do dwóch pozostałych. Z kolei wersja 5B stanowi praktycznie kontynuację płukania rurociągu o średnicy 200 mm w ul. Krzeszowskiej według wariantu 5. Zapewne z tego powodu ładunek wypłukanych związków żelaza był najmniejszy. Podobnie warianty 8C-II i 1-2A były kontynuacją w części płukanej sieci według wariantów 8C-I i 1-1A. Ponadto w sieci pierścieniowej nie można wykluczyć obecności zanieczyszczeń wypłukanych z sąsiednich rurociągów, którymi odbywa się dopływ wody do rejonu płukania. Właśnie taka sytuacja mogła mieć miejsce podczas płukania w wariantach 1-1A i 1-2A, stąd odnotowano najwyższe wartości wskaźnika  $W_p$ .

### Ocena skuteczności płukania na podstawie sprawności hydraulicznej wybranych rurociągów

Wskazane trudności interpretacyjne sprawiły, że dodatkowo oceniono skuteczność płukania rurociągu w oparciu o dane hydrauliczne (ciśnienie, natężenie przepływu). Za pomocą modelu symulacyjnego dokonano najpierw odwzorowania warunków hydraulicznych panujących w sieci podczas jej płukania, a następnie oceny sprawności hydraulicznej konkretnych przewodów przed i po płukaniu. W tym celu obliczono wartości współczynników zmienności następujących wskaźników: oporności właściwej ( $C$ ), modułu przepływu ( $M$ ) i stopnia zmniejszenia chropowatości rur ( $\chi$ ). Ich wartości w przypadku wybranych przewodów (tab. 5) wskazują, że:

– największy stopień zmniejszenia oporności właściwej ( $\delta=C_i/C_o$ ) oraz wzrost sprawności hydraulicznej ( $\eta=M_i/M_o$ )

odnotowano w przewodach żeliwnych sieci rozdzielczej, a najmniejszy w przypadku magistrali,

– wartości wskaźników  $\delta$  i  $\eta$  były zależne od rodzaju materiału, ponieważ stopień zmniejszenia oporności właściwej był większy o 31,6% w przypadku rur żeliwnych aniżeli z PVC,

– stopień zmniejszenia chropowatości rur ( $\chi$ ) był największy w sieci rozdzielczej z żeliwa (66%), nieco mniejszy w sieci rozgałęzieniowej z PVC (56,2%), a zdecydowanie najmniejszy w magistralach (24,9%).

Z ustaleń tych wynika, że skuteczność płukania większości sieci rozdzielczej i rozgałęzieniowej była zadowalająca, zarówno w przypadku rurociągów żeliwnych, jak i z PVC. Nieskuteczne natomiast okazało się płukanie magistrali o średnicy 300 mm ze względu na niezadowalający stopień zmniejszenia chropowatości rur ( $\chi$ ), chociaż masa wypłukanych związków żelaza stanowiła aż 23% masy usuniętej podczas 21 dni płukania całej sieci. W tej sytuacji nie można wykluczyć udziału oporów miejscowych (np. częściowo przymknięta zasuwa) w wartości umownego zastępczego współczynnika chropowatości ( $k$ ) przed i po płukaniu.

Z kolei w ocenie skuteczności płukania rurociągu o średnicy 200 mm według wariantów 5 i 5B należy uwzględnić fakt, że była to trzecia realizacja płukania w ciągu 16 miesięcy. Łącznie wskutek trzykrotnego płukania rurociągu usunięto 432,9 kg zanieczyszczeń, w tym 3,4 kg związków żelaza. Podczas ostatniej realizacji wypłukano 35,3% masy zanieczyszczeń, w tym 26,3% związków żelaza. Ponadto o skuteczności płukania rurociągu o średnicy 200 mm świadczyło obliczone zmniejszenie uśrednionych wartości wskaźnika  $W_p$  z 0,179  $\text{mgFe/m}^2\text{s}$  do 0,052  $\text{mgFe/m}^2\text{s}$ , odpowiednio podczas realizacji wariantów 5 i 5B w lutym i marcu 2005 r. Powtórne płukanie tego samego rurociągu w czerwcu 2006 r. według wariantów 5 i 5B spowodowało zmianę wartości wskaźnika  $W_p$  z 0,083  $\text{mgFe/m}^2\text{s}$  do 0,024  $\text{mgFe/m}^2\text{s}$ . Powyższe ustalenia dowodzą nie tylko zmniejszenia ładunku wypłukiwanych związków żelaza w każdej realizacji o 71%, lecz także odtworzenia jego zasobów o 25% w stosunku do stanu początkowego w czasie 15 miesięcy eksploatacji między pierwszym i drugim płukaniem rurociągu.

### Podsumowanie

Eksperymentalne wdrożenie metody ukierunkowanego przepływu miało miejsce dziesięć lat wcześniej w Łęborku [6], natomiast zastosowanie tej metody do płukania całej sieci wodociągowej odbyło się po raz pierwszy w Polsce w Biłgoraju. Poprawa skuteczności płukania sieci wodociągowej metodą ukierunkowanego przepływu w stosunku do tradycyjnego sposobu wynika z faktu, że wielowariantowy kompleksowy program płukania sieci jest każdorazowo zaplanowany za pomocą symulacji komputerowej. Na podstawie obliczeń hydraulicznych ustala się najkorzystniejszą lokalizację i wydajność hydrantów lub zrzutu, równocześnie wskazuje zasuwy do zamknięcia, a także określa minimalny czas płukania oraz wartość optymalnej prędkości możliwej do osiągnięcia przy danej wysokości ciśnienia dynamicznego w płukanych rurociągach. Znajomość parametrów procesu płukania rurociągów wpływa na poprawę skuteczności poprzez eliminację przypadkowości w jego przebiegu.

Tabela 5. Sprawność hydrauliczna wybranych rurociągów przed i po płukaniu sieci wodociągowej

Wariant płukania	Średnica przewodu mm	Długość odcinka m	Material	Początek płukania		Koniec płukania		Zmniejszenie oporności $\delta=C_i/C_o$	Zwiększenie sprawności $\eta=M_i/M_o$	Zmniejszenie chropowatości $\chi=k_i/k_o$
				$k_o$	$C_o$	$k_i$	$C_i$			
magistrala										
6	300	1850	żeliwo	14,2	2,2	10,8	1,9	0,885	1,062	0,761
6A	300	1485	żeliwo	9,7	1,9	6,3	1,6	0,833	1,095	0,649
6B	300	1055	żeliwo	13,0	2,1	9,1	1,8	0,861	1,077	0,700
5	200	1202	AC	1,0	8,3	0,8	7,7	0,925	1,039	0,780
5B	200	1202	AC	0,8	7,6	0,6	7,3	0,960	1,020	0,867
sieć rozgałęziowa										
11C	110	580	PVC	1,0	318,2	0,4	233,3	0,733	1,168	0,400
11A	90	650	PVC	1,0	937,1	0,5	740,4	0,790	1,125	0,500
11	90	610	PVC	0,9	907,7	0,4	702,9	0,774	1,136	0,444
14A	110	400	PVC	1,6	383,0	0,8	304,7	0,796	1,121	0,500
18C	90	535	PVC	2,3	1168,1	0,8	780,3	0,668	1,224	0,348
sieć rozdzielcza										
9D	200	599	żeliwo	15,1	20,5	6,6	13,9	0,681	1,212	0,346
8C-I	100	545	żeliwo	2,6	380,7	0,9	255,3	0,671	1,221	0,250
8C-II	100	905	żeliwo	3,2	412,9	0,8	249,2	0,604	1,287	0,324
1-2A	100	490	żeliwo	3,7	439,3	1,2	285,0	0,649	1,242	0,333
1-1A	110	275	PVC	1,2	347,8	0,4	250,2	0,719	1,179	0,437

$k$  – umowny zastępczy współczynnik chropowatości, mm

$C$  – oporność właściwa,  $s^2/m^6$

$M=\sqrt{1/C}$  – moduł przepływu (przepływność jednostkowa właściwa),  $m^3/s$

Wyniki przeprowadzonych analiz potwierdzają korzystny rezultat kompleksowego płukania sieci wodociągowej w Biłgoraju, chociaż zebrany materiał empiryczny nie odzwierciedla w pełni początkowego stanu zanieczyszczenia rurociągów. Spośród 254 próbek popłuczyn jedynie 59% pobrano podczas pierwszych pięciu wymian wody w płukanych rurociągach. Z tego względu należy stwierdzić, że dobra jakość większości próbek popłuczyn obrazuje stan sieci po płukaniu, a nie początkowy stopień jej zanieczyszczenia.

Aby ograniczyć wpływ niesystematycznego poboru próbek na wynik obliczeń bilansowych, ustalono najpierw relację pomiędzy jakością popłuczyn a krotnością wymiany wody w płukanych rurociągach, która następnie stanowiła podstawę do oszacowania ładunku i masy wypłukiwanych zanieczyszczeń. Z ustaleń wynika, że relację tę opisuje następująca prawidłowość: największe wartości trzech analizowanych wskaźników (zawartość związków żelaza, suchej pozostałości i mętność) odnotowano podczas pierwszej wymiany wody, wraz z tendencją malejącą w kolejnych cyklach płukania. Na podstawie obliczonych średnich wartości wskaźników oszacowano, że kompleksowe płukanie sieci wodociągowej w Biłgoraju spowodowało usunięcie 4,6 tony substancji stałych (rozpuszczonych i zawieszonych), w tym około 48 kg związków żelaza ogólnego. W rzeczywistości masa wypłukanych zanieczyszczeń była zapewne jeszcze większa, ponieważ zastosowana metoda opiera się na wartościach uśrednionych w kolejnych wymianach wody. Z tego powodu nie eliminuje się znaczącego wpływu rozrzutu wyników w poszczególnych wymianach wody na ostateczny rezultat płukania.

Pozytywną ocenę przeprowadzonego płukania sieci wodociągowej w Biłgoraju potwierdzają następujące wskaźniki:

- zwiększenie sprawności hydraulicznej wybranych przewodów z PVC o 15,9%, a z żeliwa o 24,2%,
- większy o 31,6% stopień zmniejszenia oporności właściwej rur żeliwnych aniżeli z PVC,
- zmniejszenie chropowatości rur żeliwnych o 66%, a z PVC o 56,2%.

Najlepszym świadectwem skuteczności płukania zakończonego w lipcu 2006 r. jest fakt, że w ciągu następnych 10 miesięcy nie odnotowano skarg mieszkańców na jakość dostarczanej wody, pomimo niekorzystnych warunków eksploatacyjnych wywołanych znacznym przewymiarowaniem sieci.

## LITERATURA

1. M.M. SOZAŃSKI [red.]: Wodociągi i kanalizacja w Polsce. Tradycja i współczesność. Praca zbiorowa. Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, Poznań–Bydgoszcz 2002.
2. D. KOWALSKI, M. KWIETNIEWSKI, A. MUSZ, M.K. WIDOMSKI: Charakterystyka wybranych metod płukania i czyszczenia przewodów wodociągowych. Ochrona Środowiska, 2008, vol. 30, nr 1, ss. 27–30.
3. M. KULBIK: Wdrożeniowe przykłady zastosowania modeli symulacyjnych w branży wodociągowej. Informacja INSTAL, 1998, nr 12, ss. 36–43.
4. M. KULBIK: Przykłady zastosowań symulacyjnych modeli systemów dystrybucji wody w praktyce inżynierskiej. Inżynieria Morska i Geotechnika, 1997, nr 4, ss. 207–215.
5. E.N. ANTOUN, J.E. DYKSEN, D.J. HILTEBRAND: Unidirectional flushing: A powerful tool. Journal AWWA, 1999. Vol. 91, No. 7, pp. 62–71.

6. M. KULBIK: Skuteczność płukania przewymiarowanych sieci wodociągowych metodą ukierunkowanego przepływu. *INSTAL*, 2006, nr 10, ss. 52–57.

7. M. KULBIK: Badania terenowe i symulacja komputerowa miejskich systemów wodociągowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Monografia nr 49, Gdańsk 2004.

**Kulbik, M. Assessing the Efficiency of Unidirectional Flushing of Oversized Water-Pipe Networks in Terms of Washings Quality. *Ochrona Środowiska* 2008, Vol. 30, No. 1, pp. 31–38.**

**Abstract:** Relevant investigations were conducted within the Bilgoraj water distribution system (77 km in length) in 2006. The unidirectional flushing method used for the purpose of the study consisted in the execution of flushing scenarios established by computer simulations. A set of 254 washings samples collected in the course of water-pipe flushing was analyzed for turbidity, total solids and iron compounds. The results showed that the variability in the quality of washings was primarily due to the number of water exchange cycles in the course of flushing. The values of the parameters examined, which were found to be the highest in the first cycle of water exchange, showed a downward trend in subsequent cycles. Flushing efficiency was assessed using a multi-criterion method which involved

simulation-based mapping of the course of flushing, assessments being also conducted of the hydraulic condition before and after flushing of the pipes chosen. The criterion adopted for quantitative assessments included the load of pollutants passing to the sewer system *via* the discharge pipe, as well as the mass of iron compounds and total solids removed. As can be inferred from the balance, the mass of total solids removed exceeded 5 tons (including approx. 50 kg of iron compounds). The increase in the hydraulic efficiency of the pipes was found to depend on their function in the water distribution system, their diameter and the material they were made of. The highest values were obtained with the flushing of distribution network pipes made of cast iron. The lowest values were those of solids removal from the water main.

**Keywords:** Water-pipe network flushing, washings quality, site investigations, operational diagnosis, computer simulation.