

Zbigniew Siwoń, Jan Cieżak, Stanisław Bogaczewicz

## Analiza procesu hydraulicznego starzenia się żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej we Wrocławiu

Wzrost hydraulicznej oporności żeliwnych i stalowych przewodów wodociągowych w czasie ich eksploatacji jest zjawiskiem powszechnie znanym. Nie zawsze jest ono jednak właściwie oceniane i uwzględniane, zarówno w projektach modernizacji i rozbudowy czynnych systemów dystrybucji wody, jak i w ich bieżącej eksploatacji. Ponieważ przewody z rur żeliwnych i stalowych bez specjalnej wykładziny wewnętrznej stanowią zwykle 70+90% ogólnej długości sieci wodociągowych, problem ich hydraulicznego starzenia się jest pod względem technicznym i ekonomicznym niezwykle ważny. Od wielu lat jest on przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych w świecie, a także troski użytkowników systemów zaopatrzenia w wodę. Wzrost oporności hydraulicznej przewodów w sieci wodociągowej wiąże się bowiem z koniecznością zwiększenia wysokości tłoczenia wody przez pompownie lub budowy rurociągów odciążających albo też odpowiednio częstego czyszczenia przewodów, a zwłaszcza ich renowacji przywracającej im początkową sprawność. Z tego względu racjonalne projektowanie i eksploatacja systemów dystrybucji wody musi się opierać na znajomości stanu hydraulicznej sprawności systemu i przewidywania jego zmian w czasie.

Intensywność procesu hydraulicznego starzenia się przewodów zależy od wielu różnorodnych czynników, przy czym niektóre z nich (np. jakość wody) mogą ulegać istotnym zmianom w czasie wieloletniej eksploatacji. Do opisu dynamiki tego procesu w konkretnych systemach wodociągowych, a w szczególności do określania obecnych i prognozowania przyszłych oporności hydraulicznych poszczególnych przewodów i sprawności całych sieci wodociągowych, stosowane są często formuły empiryczne znane z doniesień literaturowych. Oporności hydrauliczne przewodów są charakteryzowane za pomocą różnych parametrów, tj. zastępczej chropowatości piaskowej ścianki rurociągu ( $k_t$ ) po czasie jego eksploatacji ( $t$ ), umownej zastępczej chropowatości ( $k_{t0}$ ) odniesionej do wewnętrznej średnicy ( $D_0$ ) nowego przewodu, współczynnika wzrostu oporności ( $\delta_t = C_t/C_0$ ) lub współczynnika spadku przepływności ( $\eta_t = M_t/M_0$ ), współczynnika liniowych oporów tarcia ( $\lambda_t$ ) i współczynnika  $C_H$  we wzorze Hazena–Wiliamsa oraz – jako parametrów dodatkowych – grubości warstwy inkrustacji ( $S_t$ ) i rzeczywistej średnicy wewnętrznej ( $D_t$ ). Zmienną niezależną w formułach empirycznych jest najczęściej czas eksploatacji przewodu ( $t$ ). Niektórzy autorzy uwzględnili dodatkowo wpływ jakości wody, charakteryzowanej najczęściej za pomocą współczynnika jej stabilności ( $I_{st}$ ), oraz wpływ wewnętrznej średnicy rurociągu ( $D_t$ ).

Doświadczenia autorów niniejszego artykułu, wynikające z rezultatów własnych badań systemów dystrybucji wody w wielu miastach (w okresie od 1992 r. w Jeleniogórskim Zespole Miejskim, Kłodzku, Polanicy Zdroju, Szczytnej, Brzegu, Wrocławiu, Kielcach i Piotrkowie Trybunalskim) [1–4] wskazują, że zakresy praktycznej przydatności formuł empirycznych są nader ograniczone, w zasadzie wyłącznie do przypadków, gdy fizyczno-chemiczny skład wody tłoczony do sieci wodociągowej był w czasie jej eksploatacji względnie stały oraz gdy wiek rurociągu jest znaczny. Włączenie w pewnych okresach dodatkowych źródeł zasilania systemu wodociągowego (np. ujęć, pompowni lub zbiorników) powoduje często prawie skokową zmianę parametrów hydraulicznych niektórych przewodów sieci wodociągowej. Sprawia to, że rezultaty obliczeń hydraulicznej oporności eksploatowanych przewodów wodociągowych według różnych formuł empirycznych, nawet ujmujących wpływ chemicznych właściwości wody, są często w wysokim stopniu rozbieżne z wynikami badań w konkretnych systemach wodociągowych. Wynika to ze złożoności procesu hydraulicznego starzenia się przewodów wodociągowych w czasie ich eksploatacji i wpływu wielu różnorodnych czynników nie uwzględnionych w formułach empirycznych.

Ponadto wiele obserwacji dowodzi, że niejednokrotnie odcinki rurociągów wykonane z jednakowego materiału oraz o takim samym wieku i średnicy charakteryzują się – w zależności m.in. od umiejscowienia w sieci wodociągowej i roli jaką w niej spełniają oraz od prędkości przepływu wody – istotnie odmienną opornością hydrauliczną [1–3]. Stanu tego nie odzwierciedla żadna z formuł empirycznych znanych z doniesień literaturowych. Z tych względów proste adaptowanie formuł empirycznych dla dowolnych systemów wodociągowych jest niewskazane, bowiem mogłoby prowadzić do znacznych błędów w ocenie hydraulicznej oporności przewodów wodociągowych, a także hydraulicznej sprawności całej sieci. Wskazują na to między innymi wyniki przeprowadzonych przez autorów kompleksowych badań (w tym badań terenowych) wielu systemów dystrybucji wody. Przykładem mogą być rezultaty analiz wyników własnych badań hydraulicznej oporności przewodów sieci wodociągowej na terenie Kłodzka, Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego, Polanicy Zdroju, Szczytnej, Brzegu, Łodzi, Wrocławia i Kielc, zaprezentowane w licznych publikacjach [1–8]. Dowodzą one jednoznacznie, że przebieg i intensywność procesu wzrostu hydraulicznej oporności przewodów wodociągowych w czasie ich eksploatacji mogą być w różnych obiektach (systemach wodociągowych) istotnie odmienne, nawet przy zbliżonych właściwościach fizyczno-chemicznych wody. Z tego względu, jak również z uwagi na ważność problemu z technicznego

i ekonomicznego punktu widzenia, konieczne jest zdaniem autorów dokonywanie oceny hydraulicznej oporności eksploatowanych przewodów żeliwnych i stalowych w konkretnym systemie dystrybucji wody, na podstawie rezultatów odpowiednio zaprogramowanych i zrealizowanych badań, w tym pomiarów terenowych, komputerowych badań modelowych oraz analiz statystycznych właściwie przetworzonych rezultatów badań.

Istotne znaczenie, między innymi z punktu widzenia kosztów energii zużywanej na pompowanie wody, ma proces hydraulicznego starzenia się żeliwnych oraz stalowych przewodów tłocznych, przesyłowych i tranzytowych, o znacznej długości. W dostępnej literaturze nie ma jak dotychczas wiarygodnych, tj. potwierdzonych wynikami badań, opisów tego procesu. Zazwyczaj przyjmuje się, że jego intensywność jest równa lub mniejsza od intensywności procesu hydraulicznego starzenia się przewodów sieci wodociągowych. Uzasadniane jest to faktem, że zwykle w tych przewodach występują względnie duże prędkości przepływu wody, zatem utrudnione są warunki do odkładania się osadów w ich wnętrzach. Analiza wyników zrealizowanych przez autorów pomiarów terenowych i badań przedstawiona w pracy [6] dowodzi, że stwierdzenie to nie jest prawdziwe i może być przyczyną błędnych rezultatów obliczeń hydraulicznych w praktyce projektowej i eksploatacyjnej.

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań i analiz procesu hydraulicznego starzenia się żeliwnych i stalowych przewodów systemu dystrybucji wody na obszarze Wrocławia.

### System dystrybucji wody na obszarze Wrocławia oraz metodyka badań i analiz

System dystrybucji wody na terenie Wrocławia można podzielić na trzy rejon, tj. centralny, zasilany w wodę z Zakładów Produkcji Wody „Na Grobli” i „Mokry Dwór”, południowy, będący w przeważającej części w zasięgu oddziaływania ZPW „Mokry Dwór” oraz zachodni, do którego tłoczona jest woda z pompowni strefowej przy ul. Bystrzyckiej i z ZPW „Leśnica”. W niniejszym artykule pominięto sieci wodociągowe na obszarach Leśnicy, Psiego Pola, Zakrzowa i Pawłowic, gdyż przez długi czas były one zasilane z własnych źródeł wód podziemnych, zatem proces hydraulicznego starzenia się przewodów przebiegał odmiennie, niż w pozostałych rejonach sieci.

Przewody sieci wodociągowej na obszarze Wrocławia zbudowane są głównie z rur żeliwnych i stalowych o średnicach od 250 mm do 1200 mm, z wyraźną przewagą rur żeliwnych. W znacznej części zostały one wykonane w okresie przedwojennym. Strukturę wieku (czasu eksploatacji) i zakresy średnic przewodów w poszczególnych rejonach systemu zestawiono w tabeli 1.

Oporności hydrauliczne eksploatowanych żeliwnych i stalowych przewodów systemu dystrybucji wody na terenie Wrocławia zostały w niniejszym artykule scharakteryzowane za pomocą umownych zastępczych chropowatości piaskowych ( $k_{10}$ ), odniesionych do średnicy nowego przewodu ( $D_0$ ), a nie do jego rzeczywistej średnicy ( $D_t$ ). Wartości  $k_{10}$  określono na podstawie przekształconego wzoru Prandtla-Karmana, słusznego dla strefy rur chropowatych ruchu burzliwego. Założono przy tym, że wysokość strat hydraulicznych ( $h_f$ ) jest taka sama w odcinku sieci o danej długości ( $l$ ),

Tabela 1. Struktura wieku i zakresy średnic przewodów żeliwnych i stalowych sieci wodociągowej we Wrocławiu

Zakres średnic mm	Łączna długość, m		
	Rejon południowy	Rejon centralny	Rejon zachodni
<150	5500	3670	990
175+250	39123	42570	3820
275+450	21615	41030	16690
500+1400	44460	59210	7615
Suma	110696	146880	29115
Przedział wieku lata	Rejon południowy	Rejon centralny	Rejon zachodni
<10	10710	12725	3660
11+20	30616	26055	25165
21+50	26753	52225	–
>50	42617	55875	290
Suma	110696	146880	29115

dane w tabeli dotyczą przewodów magistralnych oraz wybranych przewodów rozdzielczych spełniających w sieci ważniejszą rolę

średnicy ( $D_0$ ) i chropowatości ścianki ( $k_{10}$ ), jak w rurociągu o średnicy rzeczywistej ( $D_t$ ) i chropowatości ścianki ( $k_t$ ) przy prędkości przepływu równej 0,7 m/s [1,3].

W warunkach przepływów w strefie rur chropowatych ruchu burzliwego ( $k_{10} > 1,5$  mm), które występowały we wszystkich żeliwnych i stalowych przewodach analizowanej sieci wodociągowej oraz wszystkich cyklach pomiarowych, przyjęcie tego założenia jest dopuszczalne. Nie powoduje ono bowiem błędów przy obliczaniu strat hydraulicznych spowodowanych oporami liniowymi, a równocześnie jest wygodne w późniejszych zastosowaniach praktycznych modelu (nie są wówczas wymagane dane o rzeczywistej średnicy wewnętrznej ( $D_t$ ) rurociągu). W średniej dla konkretnego odcinka sieci wodociągowej obliczeniowej wartości  $k_{10}$  jest bowiem uwzględnione zarówno zmniejszenie czynnego przekroju przewodu wskutek obecności osadów odłożonych na jego ściankach, jak i straty hydrauliczne spowodowane oporami miejscowymi (występują one zawsze, również w sieciach prawidłowo eksploatowanych, ze sprawną armaturą) [1,3].

Należy przy tym podkreślić, że między innymi z wymienionych powodów podane w niniejszym artykule obliczeniowe wartości umownej zastępczej chropowatości ( $k_{10}$ ) w żadnym wypadku nie mogą być interpretowane jako rzeczywiste wysokości nierówności na wewnętrznych powierzchniach ścian rurociągów.

W badaniach zaprezentowanych w dalszej części pracy zostały wykorzystane:

- wyniki własnych pomiarów terenowych i analiz symulacyjnych działania systemu dystrybucji wody we Wrocławiu przedstawionych w raportach [9] wykonanych przez autorów w latach 1994+1996 na zlecenie MPWiK sp. z o.o. we Wrocławiu i w publikacjach [1,2,4], a także wyniki dodatkowych i uzupełniających własnych pomiarów hydraulicznej oporności wybranych odcinków przewodów przesyłowych i magistralnych przedstawione w opracowaniu [10],

- wyniki pomiarów hydraulicznej oporności 10 wybranych przewodów sieci wodociągowej we Wrocławiu zamieszczone między innymi w pracy [11]; zostały one odpowiednio przetworzone w celu wyznaczenia porównywalnych wartości parametru  $k_{10}$ ,

- rezultaty tarowania parametrów modelu przepływów w systemie dystrybucji wody na terenie Wrocławia.

Iteracyjny czteroetapowy proces tarowania parametrów modelu przepływów w systemie dystrybucji wody na terenie Wrocławia został zrealizowany według własnej metodyki opisanej w pracy [7]. Podlegały mu umowne zastępcze chropowatości ( $k_{to}$ ) ścianek wszystkich przewodów magistralnych i wybranych przewodów rozdzielczych oraz przewodów układu przesyłowego, współczynniki wszystkich oporów miejscowych na sieci oraz węzłowe i odcinkowe rozbiory wody. W zbiorach danych sterujących procesem tarowania zostały między innymi ujęte rezultaty poprzednio wymienionych terenowych pomiarów hydraulicznej oporności wybranych przewodów żeliwnych i stalowych.

W wyniku pomiarów terenowych i realizacji procesu tarowania parametrów modelu uzyskano zbiory wartości umownej (sprowadzonej) zastępczej chropowatości ( $k_{to}$ ) ścianek żeliwnych i stalowych przewodów analizowanej sieci wodociągowej. W wartościach  $k_{to}$  ujęte były nie tylko hydrauliczne opory liniowe, lecz również opory miejscowe (lokalne), które występują zawsze, także w prawidłowo eksploatowanych układach dystrybucji wody. Są one spowodowane obecnością kształtek i armatury przewodów, a ich udział w ogólnych stratach hydraulicznych zależy między innymi od stopnia inkrustacji wewnątrz przewodów odłożonymi osadami. Uwzględnione zostały rezultaty procesu tarowania po wyeliminowaniu nadmiernych oporów miejscowych na sieci, spowodowanych częściowo przymkniętymi zasuwami, niesprawną armaturą, zapowietrzeniem niektórych odcinków itp. Syntetycznie ujęte wyniki tarowania parametru  $k_{to}$  dla żeliwnych i stalowych przewodów analizowanych rejonów systemu dystrybucji wody zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników tarowania umownej zastępczej chropowatości ścianek żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej we Wrocławiu

Zakres wartości $k_{to}$ mm	Łączna długość, m					
	Rejon południowy		Rejon centralny		Rejon zachodni	
	m	%	m	%	m	%
<0,3	2580	2,3	6655	4,53	900	3,09
3,1+10,0	20275	18,3	20445	13,92	12635	43,40
10,1+20,0	25290	22,9	48325	32,90	15290	52,52
20,1+40,0	23710	21,4	45655	31,08	290	0,99
>40,0	38841	35,1	25800	17,57	-	-
Suma	110696	100	146880	100	29115	100

dane w tabeli dotyczą przewodów magistralnych oraz wybranych przewodów rozdzielczych spienających w sieci ważniejszą rolę

Wskazują one na bardzo duże zróżnicowanie oporności hydraulicznych przewodów tej samej sieci wodociągowej, a także na wysokie wartości chropowatości ( $k_{to} > 10$  mm) ścianek dużej liczby rurociągów, tj. przeważających części sieci.

### Analiza statystyczna wyników badań

Zbiory wartości umownej (sprowadzonej do wewnętrznej średnicy przewodu nowego) zastępczej chropowatości ( $k_{to}$ ) ścianek żeliwnych i stalowych przewodów wodociągowych, wyznaczone według opisanej metodyki oddzielnie dla każdego rejonu systemu dystrybucji wody, a także łącznie dla wszystkich przewodów sieci wodociągowej na terenie Wrocławia, poddano analizie statystycznej. Zbadano równocześnie wpływ na hydrauliczną oporność rurociągów takich parametrów jak czas ich eksploatacji ( $t$ ), średnice nominalne ( $D_o$ ) oraz maksymalne w skali doby prędkości przepływu wody ( $v$ ).

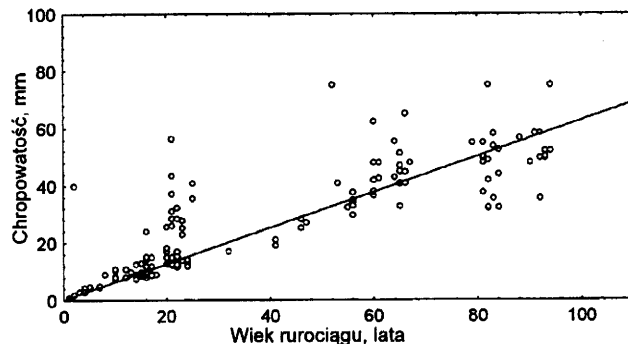
### Południowy rejon sieci wodociągowej

Analizie poddano wyniki badań żeliwnych i stalowych przewodów magistralnych o średnicach od 150 do 1200 mm i wieku (czasie eksploatacji) od 5 do 93 lat, na obszarze położonym w przeważającej większości praktycznie stale w zasięgu oddziaływania ZPW „Mokry Dwór”. Jedynym istotnym parametrem wpływającym na proces wzrostu umownej chropowatości ( $k_{to}$ ) ścianki rurociągu okazał się czas jego eksploatacji ( $t$ ). Wpływ pozostałych analizowanych czynników, tj. średnicy przewodu oraz prędkości przepływu w nim wody nie był statystycznie uchwytany. Zależność  $k_{to}(t)$  najlepiej opisywała formuła empiryczna:

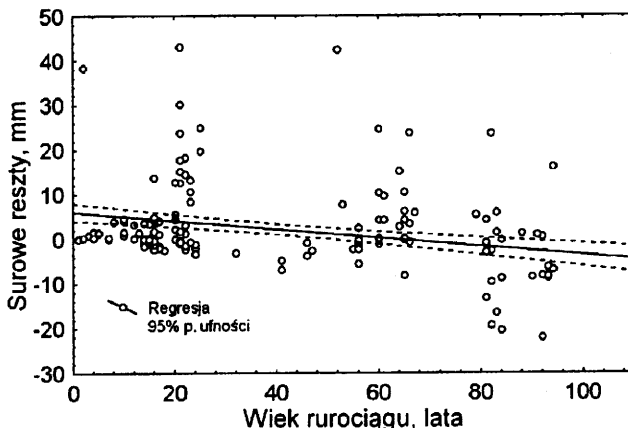
$$k_{to} = k_o + \alpha t = 0,3 + 0,625t \quad (1)$$

w której  $k_o$  oznacza zastępczą chropowatość ścianki przewodu nowego, a współczynnik kierunkowy  $\alpha$  jest średnim rocznym przyrostem chropowatości  $k_{to}$ .

Formuła (1) jest istotna na poziomie ufności wyższym niż 0,9999 (współczynnik korelacji  $r=0,956$ ). Błąd standardowy estymacji  $k_{to}$  wynosił 9,77 mm. Wykres funkcji opisanej równaniem (1) oraz punkty obrazujące wyniki badań zamieszczono na rysunku 1, a wykresy reszt równania (1) na rysunku 2.



Fys. 1. Wykres funkcji  $k_{to}(t)$  dla przewodów sieci wodociągowej w południowych rejonach Wrocławia



Fys. 2. Wykres surowych reszt równania (1)

Ujawniły się na nich bardzo duże rozbieżności między wynikami obliczeń wg wzoru (1) a wartościami empirycznymi  $k_{to}$  dotyczącymi różnych przewodów o tym samym wieku. Dla przykładu można podać, że odcinki dwóch rurociągów magistralnych o średnicy 1200 mm (tzw. magistrale północna i południowa), zbudowane w latach 1973+1979, charakteryzowały się rocznym przyrostem umownej chropowatości  $k_{to}$  w zakresie od 1,42 mm/a do 2,92 mm/a, podczas gdy dla innych przewodów sieci magistralnej średnia wartość tego parametru kształtowała się na poziomie około 0,6 mm/a.

Jedną z zasadniczych przyczyn tak dużych różnic między hydraulicznymi opornościami przewodów magistralnych o zbliżonym wieku było włączenie do eksploatacji na początku lat 70. nowego źródła zasilania systemu wodociągowego Wrocławia, tj. ZPW „Mokry Dwór”, o obecnej wydajności w godzinach dziennych 1400+1650 dm<sup>3</sup>/s. Spowodowało to zmianę kierunków przepływu wody w sieci oraz częściowe wypłukiwanie i przemieszczanie się osadów odłożonych we wnętrzach przewodów.

Ponadto, wskutek nieprawidłowego w pierwszym okresie sposobu eksploatacji zakładu uzdatniania wody nastąpiło nagromadzenie, a także transport osadów w rurociągach przesyłowych oraz w niektórych przewodach magistralnych. W rezultacie rurociągi o podobnym wieku i średnicy charakteryzowały się niekiedy zasadniczo odmienną opornością hydrauliczną, zależnie między innymi od ich lokalizacji, odległości od ZPW „Mokry Dwór” oraz roli, jaką spełniają w sieci wodociągowej.

### Centralny rejon sieci wodociągowej

Centralny rejon sieci wodociągowej obejmuje śródmieście Wrocławia oraz dzielnice przyległe. Obszar ten jest ograniczony ulicami Rakowiecką, Na Niskich Łąkach, Swobodną, Robotniczą, Strzegomską, Na Ostatnim Groszu, Kominiarską, Sułowską, Redycką, Kowalską, Swojczycką oraz Odrą i w przeważającej większości położony jest stale w zasięgu oddziaływania ZPW „Na Grobli”. W analizowanym układzie sieci wodociągowej zostały ujęte przewody żeliwne i stalowe o średnicach nominalnych 125+1400 mm i łącznej długości 148510 m.

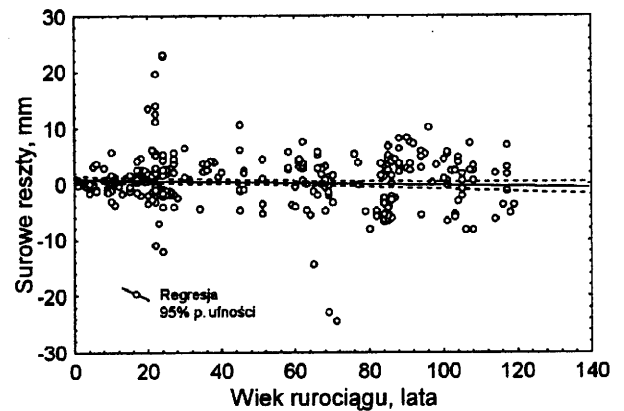
Analizie statystycznej poddano wyniki badań przewodów magistralnych i rozdzielczych o wieku (czasie eksploatacji) 1+108 lat. Pominięto przy tym te przewody żeliwne i stalowe, które w ostatnich latach zostały poddane czyszczeniu i renowacji poprzez pokrycie wewnętrznych powierzchni wykładziną cementową (łącznie 34 odcinki o średnicach 125+300 mm) oraz czyszczeniu metodą hydropneumatyczną (3 odcinki o średnicach 175 i 225 mm).

Rezultaty analiz statystycznych wykazały, że podobnie jak w wypadku sieci wodociągowej w rejonie południowym, jedynym istotnym parametrem wpływającym na proces wzrostu umownych chropowatości ścianek rurociągów ( $k_{to}$ ) okazał się czas jego eksploatacji ( $t$ ). Wpływ pozostałych analizowanych czynników był statystycznie nieuchwytny. Zależność  $k_{to}(t)$  opisywała formuła empiryczna:

$$k_{to} = 0,3 + 0,511t \quad (2)$$

istotna na poziomie ufności wyższym niż 0,9999 (współczynnik korelacji  $r=0,989$ ). Błąd standardowy estymacji  $k_{to}$  wynosił 4,26 mm. Wykres reszt równania (2) zamieszczono na rysunku 3.

Uwagę zwraca mniejszy rozrzut wyników badań wokół prostej regresji i w konsekwencji mniejszy błąd estymacji, niż dla sieci wodociągowej w rejonie południowym. Wynikało to prawdopodobnie z faktu, że centralne dzielnice Wrocławia były i są nadal praktycznie stale położone w zasięgu oddziaływania ZPW „Na Grobli”, w którym jest uzdatniania w większości woda pochodząca z procesu infiltracji. Z tego względu włączenie na początku lat 70. nowego Zakładu Produkcji Wody „Mokry Dwór” miało mniejszy wpływ na jakość wody i warunki hydrauliczne w sieci na obszarze centralnych dzielnic miasta niż w rejonach południowych.



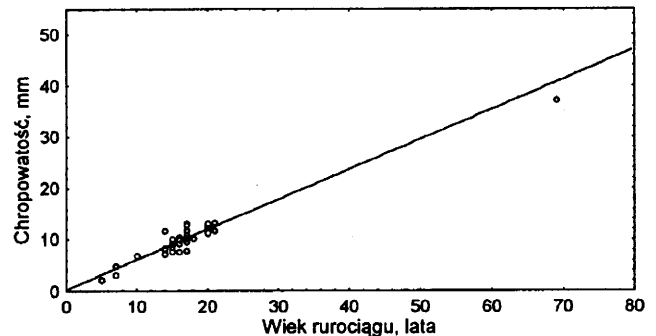
Rys. 3. Wykres surowych reszt równania (2)

### Zachodni rejon sieci wodociągowej

Analizie poddano rezultaty badań i analiz dotyczących żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej zasilanej wyłącznie z jednego źródła, tj. pompowni strefowej przy ul. Bystrzyckiej. Średnice rurociągów wynosiły od 150 do 1000 mm, a ich wiek mieścił się w przedziale od 5 do 21 lat. Zależność  $k_{to}(t)$  opisywała następująca formuła:

$$k_{to} = 0,3 + 0,586t \quad (3)$$

istotna na poziomie ufności wyższym niż 0,9999 (współczynnik korelacji  $r=0,992$ ). Błąd standardowy estymacji  $k_{to}$  wynosił 1,37 mm. Wykres funkcji opisanej równaniem (3) oraz punkty obrazujące wyniki badań zamieszczono na rysunku 4.



Rys. 4. Wykres funkcji  $k_{to}(t)$  dla przewodów sieci wodociągowej w zachodnich rejonach Wrocławia

Dla żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej na obszarze zachodnich dzielnic Wrocławia uzyskano najmniejsze bezwzględne różnice między wynikami obliczeń według formuły empirycznej i wartościami rzeczywistymi. Wynikało to prawdopodobnie z następujących przyczyn:

- przewody były eksploatowane przez okres krótszy niż 21 lat,
- sieć wodociągowa na obszarze zachodnich dzielnic Wrocławia (w tzw. strefie wysokiego ciśnienia) była zasilana wyłącznie z jednego źródła, tj. pompowni strefowej przy ul. Bystrzyckiej włączonej do magistrali o średnicy 1200 mm (magistrala południowa), którą jest tłoczona – poprzez sieć na obszarze południowych dzielnic miasta – woda z ZPW „Mokry Dwór”. W tych warunkach osady wytrącone z wody odkładały się przede wszystkim we wnętrzach przewodów przesyłowych o średnicy 1200 mm oraz w magistralach i w sieci wodociągowej w rejonach południowych, a także w zbiorniku czerpalnym pompowni przy ul. Bystrzyckiej. Spowodowało to, że intensywność procesu wzrostu hydraulicznej oporności rurociągów w czasie ich eksploatacji była i jest w obrębie strefy wysokiego ciśnienia mniejsza niż w pozostałych rejonach.

W wypadku, gdy analizie zostały poddane zbiory wszystkich wartości umownej zastępczej chropowatości ścianek żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej (z pominięciem podziału na rejonu zasilane z oddzielnych źródeł) uzyskano zależność:

$$k_{10} = 0,3 + 0,543t \quad (4)$$

istotną na poziomie ufności wyższym niż 0,9999 (współczynnik korelacji  $r=0,973$ ). Błąd standardowy estymacji  $k_{10}$  wynosił wówczas 6,79 mm.

Efektywność opisu procesu hydraulicznego starzenia się przewodów za pomocą zależności (4) była mniejsza niż przy wykorzystaniu równań sformułowanych oddzielnie dla każdego rejonu sieci, położonego w przeważającej części stale w zasięgu oddziaływania tylko jednego źródła zasilania.

## Podsumowanie i wnioski

Proces wzrostu hydraulicznej oporności przewodów wodociągowych w czasie ich eksploatacji jest zjawiskiem ciągłym, rozpoczynającym się w chwili uruchomienia rurociągu. Problem ten jest niezwykle ważny pod względem technicznym i ekonomicznym, stąd od wielu lat jest przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych w świecie i troski użytkowników systemów zaopatrzenia w wodę. Wiąże się on bowiem z koniecznością zwiększenia wysokości tłoczenia wody przez pompownie lub budowy przewodów odciążających, albo odpowiednio częstego czyszczenia rurociągów, a zwłaszcza ich renowacji przywracającej im początkową sprawność. Z tego względu racjonalne projektowanie i eksploatacja systemów dystrybucji wody musi się opierać na znajomości stanów hydraulicznej sprawności oraz przewidywania ich zmian w czasie. Zaprezentowane rezultaty badań pozwalają na sprecyzowanie następujących wniosków:

♦ W warunkach systemu dystrybucji wody we Wrocławiu jedynym parametrem istotnie wpływającym na proces wzrostu umownej chropowatości ( $k_{10}$ ) ścianek przewodów żeliwnych i stalowych okazał się czas ich eksploatacji ( $t$ ). Wpływ pozostałych analizowanych czynników, tj. średnicy przewodu oraz maksymalnej w skali doby prędkości przepływu wody, nie był statystycznie uchwytany. Z doświadczeń autorów w badaniach procesu hydraulicznego starzenia się eksploatowanych przewodów wodociągowych w wielu systemach wodociągowych wynika, że wpływ ten był zależny od specyficznych właściwości konkretnego systemu, w tym jego struktury, liczby i lokalizacji źródeł zasilania, a także od zmian warunków pracy w całym okresie eksploatacji sieci wodociągowej.

♦ Pomimo wysokiego poziomu istotności wszystkich użytych formuł empirycznych wartości wariancji i odchyłeń standardowych były duże. W rezultacie występowały znaczne rozbieżności pomiędzy obliczonymi i empirycznymi wartościami  $k_{10}$ . Zmniejszenie tych rozbieżności uzyskano poprzez oddzielne analizowanie trzech rejonów sieci wodociągowej (południowego, centralnego i zachodniego), z których każdy był w całości lub w przeważającej części położony stale w zasięgu oddziaływania tylko jednego źródła zasilania (zakładu produkcji wody lub pompowni).

♦ Jedną z zasadniczych przyczyn znacznych różnic pomiędzy hydraulicznymi opornościami żeliwnych i stalowych

przewodów o zbliżonym wieku było włączenie do eksploatacji na początku lat 70. nowego źródła zasilania systemu wodociągowego Wrocławia, tj. ZPW „Mokry Dwór”, o obecnej wydajności w godzinach dziennych  $1400+1650 \text{ dm}^3/\text{s}$ . Spowodowało to zmianę kierunków przepływu wody w sieci oraz częściowe wypłukiwanie i przemieszczanie się osadów odłożonych we wnętrzach przewodów. Ponadto, wskutek nieprawidłowego w pierwszym okresie sposobu eksploatacji zakładu uzdatniania wody nastąpiło nagromadzenie, a także transport osadów w rurociągach przesyłowych oraz w niektórych przewodach magistralnych. W rezultacie rurociągi o podobnym wieku i średnicy charakteryzowały się niekiedy zasadniczo odmienną opornością hydrauliczną, zależnie między innymi od ich lokalizacji, odległości od ZPW „Mokry Dwór”, jakości wody w źródle zasilania oraz roli, jaką spełniają w sieci wodociągowej.

## LITERATURA

1. Z. SIWOŃ: Wybrane problemy modelowania przepływów w układach dystrybucji wody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1997, nr 6, ss. 218–222.
2. Z. SIWOŃ, S. BOGACZEWICZ, J. CIEŻAK: Analiza procesu wzrostu hydraulicznej oporności eksploatowanych przewodów wodociągowych. *Mat. konf. „Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi”*, PZITS, Poznań 1996, ss. 535–547.
3. Z. SIWOŃ: Wybrane problemy praktycznych zastosowań komputerowych modeli sieci wodociągowych. *Mat. konf. „Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi”*, PZITS, Poznań 1996, ss. 558–569.
4. Z. SIWOŃ: Zagadnienia racjonalnej eksploatacji sieci wodociągowych. *Mat. konf. „Współczesne problemy zaopatrzenia w wodę i unieszkodliwiania ścieków”*, Lwów 1996, s. 177–190.
5. Z. SIWOŃ, A. IŻYKOWSKI: Zmiana hydraulicznej sprawności rurociągów tranzytowych w czasie ich eksploatacji. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1984, nr 3, ss. 81–84.
6. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK, S. BOGACZEWICZ: Analiza hydraulicznej oporności eksploatowanych przewodów tłocznych i przesyłowych. *Mat. konf. „Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi”*, PZITS, Poznań 1998, ss. 321–?
7. Z. SIWOŃ: Hydraulic analysis of water distribution systems. *Environment Protection Engineering*, 1998, Vol. 24, No. 3–4, pp. 5–14.
8. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK: Model przepływów w systemie dystrybucji wody na terenie Polanicy Zdroju. *Ochrona Środowiska*, 1998, nr 2(69), ss. 7–10.
9. Z. SIWOŃ, S. BOGACZEWICZ, J. CIEŻAK: Badania układu przesyłu dystrybucji wody na terenie Wrocławia. Część I. Badania rurociągów przesyłowych oraz magistralnej sieci wodociągowej w południowych i zachodnich rejonach Wrocławia. Część II. Badania sieci wodociągowej na terenie Leśnicy, Psiego Pola, Zakrzowa, Pawłowic i zachodnich rejonów Wrocławia. Część III. Badania sieci wodociągowej na terenie śródmieścia Wrocławia. *Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr.*, seria SPR, nr 72, 73 i 95, Wrocław 1994, 1995 i 1996.
10. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK: Badania i analiza hydraulicznej oporności żeliwnych i stalowych przewodów czynnej sieci wodociągowej na terenie Wrocławia. *Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr.*, seria SPR, nr 30, Wrocław 1998.
11. H. PEŁKA: Wpływ właściwości chemicznych wody na oporność hydrauliczną przewodów wodociągowych. *Ochrona Środowiska*, 1985, nr 2–3(24–25), ss. 19–24.

## **On the Increase of Hydraulic Resistance in Cast Iron and Steel Pipes of the Water Supply Network for the City of Wrocław**

*The values of the parameters describing the real wall roughness of cast-iron and steel pipes in service were determined by in-situ measurements and computer-aided modelling of the water-pipe network of Wrocław. The data sets obtained were*

*subject to statistical analysis to quantify the effect of service time, pipe diameter and maximum flow velocity during 24 hours on the specific wall roughness values.*