

Zbigniew Siwoń, Jan Cieżak

## Analiza hydraulicznej sprawności systemu dystrybucji wody w Jeleniogórskim Zespole Miejskim

System wodociągowy zaopatrujący w wodę obszar Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego (JZM) jest obecnie zasilany z siedmiu źródeł. Największą wydajność ma Zakład Produkcji Wody „Grabarów”, który został wybudowany w latach przedwojennych, w zasadzie z przeznaczeniem do współpracy ze zbiornikiem wyrównawczym na Wzgórzu Dębowym. Bazuje on na wodach pochodzących z infiltracji brzegowej i sztucznej z Bobru. Ponadto do basenów infiltracyjnych doprowadzana jest woda ze zbiornika retencyjnego oraz z ujęcia wód powierzchniowych na Bobrze. Ujęcie wtórne wód infiltracyjnych na terenie ZPW „Grabarów” stanowi drenaż poziomy oraz studnie wiercone. Średniodobowa wydajność tego ujęcia wynosiła w 1997 r. 18,7 tys. m<sup>3</sup>/d. Drugim zasadniczym źródłem zasilania systemu wodociągowego JZM jest pompownia w zakładzie wodociągowym przy ul. Nadbrzeżnej, która obecnie tłoczy do sieci wodociągowej część ogólnej ilości wody czerpanej z ujęć w Podgórzynie oraz dodatkowo wodę pobieraną z dwóch ujęć na Kamiennej, a także wodę ujmowaną na terenie byłego zakładu „Jelchem”.

(z przewagą średnic 80 mm i 100 mm) oraz z rur stalowych o średnicach nominalnych od 100 mm do 500 mm, przy czym przewody stalowe, eksploatowane dłużej niż 20 lat, występują przede wszystkim w rozdzielczej sieci wodociągowej na obszarze Sobieszowa i Cieplic. W systemie dystrybucji wody nie ma obecnie wyraźnie wyodrębnionego układu przewodów magistralnych, co jest jedną z przyczyn niekorzystnego rozkładu ciśnień w sieci i względnie dużych spadków hydraulicznych wzdłuż głównych kierunków przepływu wody. Obecnie zasuwana na przewodzie o średnicy 200 mm w ul. Wolności jest stale zamknięta, co sprawia, że sieć wodociągowa na obszarze JZM jest podzielona na dwie odrębne strefy. Pierwsza z nich, obejmująca Jelenią Górę i część Jeżowa Sudeckiego, jest zasilana z ZPW „Grabarów” i ZW przy ul. Nadbrzeżnej oraz ze zbiornika na Wzgórzu Dębowym. Woda do Cieplic i Sobieszowa dostarczana jest z pozostałych zakładów wodociągowych, w tym część wody czerpanej z ujęć w Podgórzynie. Z siecią wodociągową współpracuje 12 pompowni hydroforowych, podwyższających ciśnienia w instalacjach wewnętrznych

Tabela 1. Zestawienie średnich dobowych wydajności ujęć wody w latach 1992-1997

Źródło wody	Ujęcie	Produkcja wody, m <sup>3</sup> /d					
		1992	1993	1994	1995	1996	1997
Produkcja ujęć własnych	ZPW „Grabarów”	18359	18490	18039	16282	17815	18708
	ZW „Podgórzyń”	6833	5895	5689	5417	5362	5134
	ZW „Górzyniec”	3968	4025	5715	4844	4045	3965
	Ujęcie „Leśniczówka” (Jagniątków)	1329	1043	1370	1426	1157	1154
	ZW przy ul. Ceglanej	600	327	452	1203	1710	1685
Zakup wody	Ujęcie w Karpaczu	1314	2715	2842	2702	1315	1453
	Ujęcie w byłych zakładach „Jelchem”	–	–	–	–	–	2312
Razem		32403	32495	34107	31874	31404	34411

Woda do sieci wodociągowej na terenie Jeleniej Góry dostarczana jest obecnie z ZPW „Grabarów”, ZW przy ul. Nadbrzeżnej oraz z ujęć drenażowych w rejonie Karpacza (zakup wody). Odbiorców w Cieplicach i w Sobieszowie zaopatrują w wodę zakłady wodociągowe w Podgórzynie, Górzyncu i Jagniątkowie (ujęcie „Leśniczówka”), wykorzystujące zasoby rzeki Podgórnej i potoków górskich, a także zakład wodociągowy przy ul. Ceglanej w Cieplicach, bazujący na wodach podziemnych, ujmowanych za pomocą studni wierconych. Średniodobowe wydajności źródeł zasilania Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego w latach 1992-1997 zestawiono w tabeli 1.

Sieć wodociągowa na obszarze JZM jest zbudowana głównie z rur żeliwnych o średnicach od 80 mm do 350 mm

wysokich budynków. Obecnie w skład systemu dystrybucji wody na obszarze JZM wchodzi trzy sieciowe (terenowe) zbiorniki wyrównawcze, zlokalizowane:

- na Wzgórzu Kościuszki: zbiornik o pojemności użytkowej 1900 m<sup>3</sup>,
- na Wzgórzu Dębowym: dwukomorowy zbiornik o całkowitej pojemności 3000 m<sup>3</sup>,
- przy ul. Widok (na Wzgórzu Strzeleckim) w Cieplicach: zbiornik końcowy o pojemności użytkowej 2000 m<sup>3</sup>.

Ponadto eksploatowane są trzy zbiorniki dolne, tj. na terenie ujęcia w Podgórzynie (200 m<sup>3</sup>), na terenie ZW w Górzyncu (200 m<sup>3</sup>) i przy ul. Ceglanej w Cieplicach (400 m<sup>3</sup>).

Sieć wodociągowa na obszarze Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego, szczególnie przewody z rur żeliwnych, została w znacznej części wybudowana w okresie przedwojennym. Strukturę jej wieku zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Struktura czasu eksploatacji oraz zakresu średnic żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej na terenie Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego, czynnych w czasie realizacji pomiarów terenowych

Wiek przewodów lata	Łączna długość przewodów m		Średnica nominalna mm	Łączna długość przewodów m	
	przewody żeliwne	przewody stalowe		przewody żeliwne	przewody stalowe
0+10	1745	22335	80+150	69495	30525
11+20	16025	37555	175+250	13715	14675
21+50	11660	310	275+300	7615	18005
>50	61395	10345	>300	–	7340
Razem	90825	70545	–	90825	70545

## Metodyka badań i pomiarów

Do wyznaczenia wartości parametrów charakteryzujących hydrauliczne oporności poszczególnych odcinków sieci wodociągowej i układu przesyłu wody wykorzystano:

- wyniki terenowych pomiarów hydraulicznej oporności 15 czynnych żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej (do wnętrza rurociągu poprzez nawiert wprowadzono cylindryczną trójtorową sondę piętrzącą, umożliwiającą pomiar prędkości przepływu strumienia wody oraz sondę, którą mierzono wewnętrzną średnicę rury w płaszczyznach poziomej i pionowej, zmniejszoną w stosunku do średnicy rury nowej na skutek inkrustacji z osadów) [1],

- wyniki własnych pomiarów terenowych hydraulicznej oporności przewodów przesyłowych [3,4],

- własne rezultaty tarowania parametrów modelu przepływów w systemie dystrybucji wody na terenie JZM, zrealizowanego w 1998 r.

Umowne zastępcze chropowatości piaskowe ( $k_{to} > 1,5$  mm) dla rur żeliwnych i stalowych zostały w niniejszym artykule odniesione do średnicy przewodu nowego ( $D_o$ ), a nie do jego rzeczywistej średnicy ( $D$ ). Zostały one obliczone z przekształconego wzoru Prandtla-Karmana (ślusznego dla strefy rur chropowatych ruchu burzliwego) przy założeniu, że wysokość strat hydraulicznych ( $\Delta h$ ) jest taka sama w rurociągu o średnicy  $D_o$  i chropowatości ścianki  $k_{to}$ , jak w rurociągu o średnicy rzeczywistej ( $D$ ) i chropowatości ścianki  $k_t$ , przy prędkości przepływu równej 0,7 m/s [3,5]. W warunkach przepływów w strefie ruchu burzliwego o stałej chropowatości hydraulicznej założenie to nie powoduje błędów przy obliczaniu strat hydraulicznych spowodowanych oporami liniowymi, a równocześnie jest wygodne w późniejszych zastosowaniach praktycznych modelu. W średniej – dla konkretnego odcinka sieci wodociągowej – obliczeniowej wartości  $k_{to}$  zostało uwzględnione zarówno zmniejszenie czynnego przekroju przewodu wskutek osadów odłożonych na jego ściankach, jak i straty hydrauliczne spowodowane oporami miejscowymi (występują one zawsze, również w sieciach prawidłowo eksploatowanych, ze sprawną armaturą) [3,5]. Z tych względów wartości parametrów charakteryzujących hydrauliczne oporności piętnastu badanych przewodów, podane w pracy [1], zostały odpowiednio przetworzone w celu wyznaczenia odpowiadających im wartości umownych (sprowadzonych do wewnętrznej średnicy przewodu nowego) zastępczych chropowatości ( $k_{to}$ ).

Komputerowy model przepływów w systemie dystrybucji wody na obszarze JZM został przez autorów niniejszego artykułu skonstruowany i wdrożony do bieżącej praktyki eksploatacyjnej w 1998 r. Iteracyjny czterostopowy proces tarowania jego parametrów został zrealizowany według własnej

metodyki opisanej w pracach [6,7]. Podlegały mu umowne zastępcze chropowatości ( $k_{to}$ ) ścianek wszystkich magistralnych i rozdzielczych przewodów sieci wodociągowej i układu przesyłowego, współczynniki wszystkich oporów miejscowych na sieci oraz węzłowe i odcinkowe rozbiory wody. W zbiorach danych sterujących procesem tarowania zostały między innymi ujęte wyniki poprzednio wymienionych terenowych pomiarów hydraulicznej oporności wybranych przewodów żeliwnych i stalowych.

## Wyniki badań i analiz

Syntetycznie ujęte rezultaty pomiarów terenowych oraz procesu tarowania parametru  $k_{to}$  żeliwnych i stalowych przewodów systemu dystrybucji wody zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Syntetyczne zestawienie wyników pomiarów terenowych i tarowania umownej zastępczej chropowatości piaskowej ( $k_{to}$ ) ścianek przewodów systemu dystrybucji wody na obszarze JZM

Zakres wartości $k_{to}$ mm	Łączna długość przewodów sieci wodociągowej m	
	przewody stalowe	przewody żeliwne
<3,0	45780	31070
3,1+10,0	14115	59755
10,1+20,0	–	–
20,1+40,0	310	–
>40,0	10340	–
Razem	70545	90825

Wskazują one na bardzo duże zróżnicowanie rzeczywistych oporności hydraulicznych przewodów tej samej sieci wodociągowej, a także na wysokie wartości chropowatości ( $k_{to} > 10$  mm) ścianek dużej liczby rurociągów stalowych. Zbiory wartości umownej (sprowadzonej do wewnętrznej średnicy przewodu nowego) zastępczej chropowatości ścianek przewodów sieci wodociągowej, wyznaczone według opisanej metodyki oddzielnie dla rur żeliwnych i stalowych, poddano analizie statystycznej. Zbadano równoczesny wpływ na hydrauliczną oporność rurociągu takich parametrów, jak czas jego eksploatacji ( $t$ ), średnica nominalna ( $D_o$ ) oraz maksymalna w skali doby prędkości przepływu ( $v$ ).

### Przewody z rur żeliwnych

Analizie statystycznej poddano wyniki badań przewodów magistralnych i rozdzielczych o średnicach od 80 do 300 mm i czasie eksploatacji od 1 roku do 84 lat. Parametrem statystycznie istotnie wpływającym na proces wzrostu umownej chropowatości ścianek rurociągów ( $k_{to}$ ) okazał się czas ich eksploatacji ( $t$ ). Wpływ pozostałych analizowanych czynników, tj. średnicy nominalnej ( $D_o$ ) oraz maksymalnej w czasie doby prędkości przepływu wody ( $v$ ), nie był statystycznie uchwytany. Zależność  $k_{to}(t)$  najlepiej opisywała następująca formuła empiryczna:

$$k_{to} = k_o + \alpha t = 0,30 + 0,0505t \quad (1)$$

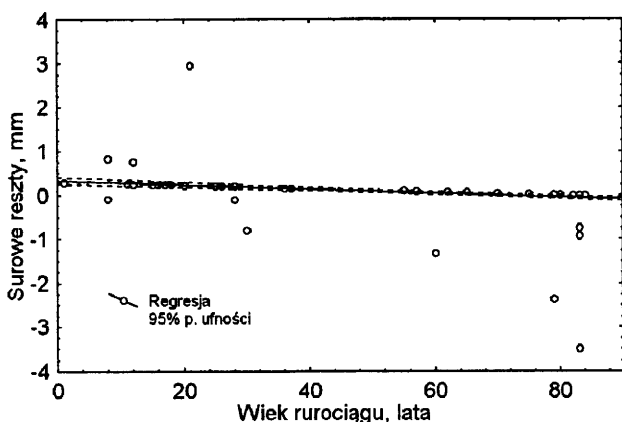
w której:

$k_{to}$  – umowna (sprowadzona) zastępcza chropowatość piaskowa ścianki przewodu żeliwnego eksploatowanego przez  $t$  lat, obliczona w odniesieniu do średnicy wewnętrznej przewodu nowego, mm

$k_o$  – zastępcza chropowatość ścianki nowego przewodu żeliwnego ( $k_o = 0,3$  mm)

$\alpha$  – średni roczny przyrost chropowatości  $k_{to}$ , mm/a

Zależność ta była istotna na poziomie ufności wyższym niż 0,9999 (współczynnik korelacji 0,995). Błąd standardowy estymacji  $k_{t0}$  wynosił 0,34 mm. Wykres reszt równania (1) zamieszczono na rysunku 1.



Rys. 1. Wykres surowych reszt równania (1)

Przytoczone rezultaty analiz wskazują, że w warunkach systemu wodociągowego Jeleniej Góry intensywność procesu wzrostu hydraulicznej oporności przewodów żeliwnych w czasie ich wieloletniej eksploatacji okazała się relatywnie mała (średni roczny przyrost chropowatości  $k_{t0}$  wynosił około 0,051 mm).

Dla przykładu można podać, że przewody eksploatowane przez 60+70 lat charakteryzowały się około 2-krotnie wyższą opornością hydrauliczną niż rurociągi nowe, zatem straciły zaledwie około 30% początkowej przepływności (przepustowości).

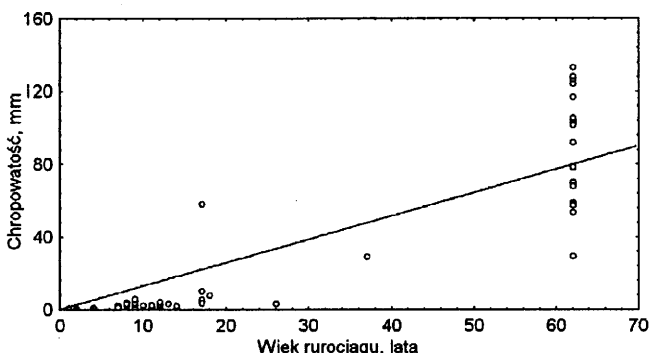
**Przewody z rur stalowych**

Analizie statystycznej poddano wyniki badań przewodów magistralnych i rozdzielczych o średnicach od 100 mm do 500 mm i czasie eksploatacji od 1 roku do 62 lat. Podobnie jak w wypadku przewodów z rur żeliwnych, parametrem statystycznie istotnie wpływającym na proces wzrostu umownej chropowatości ścianek rurociągów ( $k_{t0}$ ) okazał się czas ich eksploatacji ( $t$ ). Zależność  $k_{t0}(t)$  najlepiej opisywała następująca formuła empiryczna:

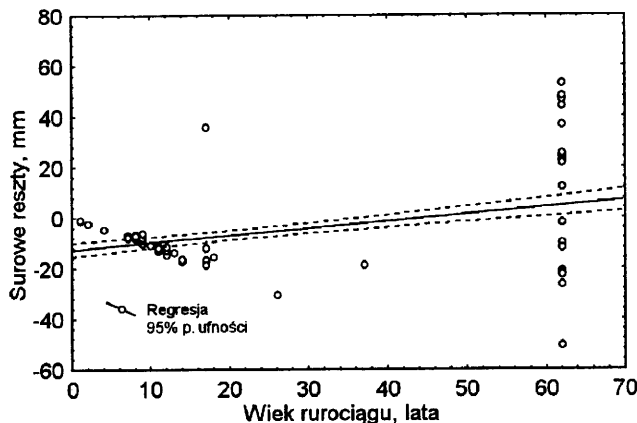
$$k_{t0} = 0,15 + 1,284t \quad (2)$$

Była ona istotna na poziomie ufności wyższym niż 0,9999 (współczynnik korelacji 0,926). Błąd standardowy estymacji  $k_{t0}$  wynosił 16,5 mm.

Wykres funkcji opisanej równaniem (2) zamieszczono na rysunku 2, natomiast wykresy reszt równania (2) na rysunku 3.



Rys. 2. Wykres funkcji  $k_{t0}(t)$  dla stalowych przewodów sieci wodociągowej na obszarze Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego



Rys. 3. Wykres surowych reszt równania (2)

Ujawniły się na nich bardzo duże rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń według wzoru (2) i wartościami empirycznymi  $k_{t0}$ , dotyczącymi różnych przewodów o tym samym wieku. Hydrauliczne oporności poszczególnych odcinków sieci wodociągowej z rur stalowych były znacznie zróżnicowane, przy czym istotny wpływ na stan hydraulicznej sprawności przewodów miał nie tylko wiek przewodu, lecz również jego umiejscowienie w sieci wodociągowej i rola, jaką w niej spełniał. Najwyższymi opornościami charakteryzowały się stalowe przewody rozdzielcze na obszarze Sobieszowa, eksploatowane przez ponad 60 lat.

Rezultaty badań wykazały zatem, że w warunkach systemu wodociągowego Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego intensywność procesu wzrostu hydraulicznej oporności przewodów stalowych w czasie ich wieloletniej eksploatacji okazała się kilkakrotnie wyższa, niż rurociągów żeliwnych, tzn. średnie roczne przyrosty chropowatości  $k_{t0}$  wynosiły odpowiednio 0,051 mm/a i 1,28 mm/a.

**Dyskusja i podsumowanie**

Zaprezentowane w artykule wyniki badań i analiz procesu hydraulicznego starzenia się żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej na obszarze Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego wykazały, że parametrem statystycznie istotnie wpływającym na proces wzrostu umownej zastępczej chropowatości ścianek rurociągów ( $k_{t0}$ ) okazał się czas ich eksploatacji ( $t$ ), natomiast wpływ pozostałych analizowanych czynników (średnica nominalna oraz maksymalna w ciągu doby prędkość przepływu wody) nie był statystycznie uchwytany.

W literaturze brak jest jak dotychczas informacji, potwierdzonych wynikami pomiarów, na temat różnic pomiędzy intensywnościami procesu hydraulicznego starzenia się przewodów z rur żeliwnych i stalowych. W praktyce zazwyczaj przyjmuje się, że intensywności te są zbliżone. Wyniki badań zaprezentowane w niniejszym artykule wykazały, że nie zawsze jest to słuszne. W warunkach systemu wodociągowego Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego intensywność procesu wzrostu hydraulicznej oporności przewodów stalowych w czasie ich wieloletniej eksploatacji okazała się kilkakrotnie wyższa niż w wypadku rurociągów żeliwnych. Dla przykładu, 40-letni rurociąg stalowy o średnicy 200 mm charakteryzował się ponad 5-krotnie wyższą opornością hydrauliczną niż rurociąg nowy, a zatem stracił około 56% początkowej przepustowości. Równocześnie spadki przepustowości rurociągów żeliwnych o zbliżonym wieku i średnicy nie przekroczyły 25%.

Przyczyną tych różnic były fizyczno-chemiczne właściwości wody czerpanej z wielu źródeł. Równocześnie występowały bardzo duże rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń według formuł empirycznych i wartościami rzeczywistymi umownej zastępczej chropowatości ( $k_{to}$ ), dotyczącymi różnych przewodów o tym samym wieku.

Do opisu dynamiki procesu hydraulicznego starzenia się przewodów w konkretnych systemach wodociągowych, a w szczególności do określenia obecnych i prognozowania przyszłych oporności hydraulicznych poszczególnych przewodów i sprawności całych sieci wodociągowych, stosowane są często formuły empiryczne znane z doniesień literaturowych. Wyniki badań i analiz zaprezentowane w niniejszym artykule, a także doświadczenia autorów wynikające z rezultatów własnych badań systemów dystrybucji wody w wielu miastach (Jeleniogórski Zespół Miejski, Kłodzko, Polanica Zdrój, Szczytna, Brzeg, Wrocław, Kielce i Piotrków Trybunalski) wykazały, że zakresy praktycznej przydatności tych formuł empirycznych były ograniczone w zasadzie wyłącznie do wypadków, gdy fizyczno-chemiczny skład wody tłoczony do sieci wodociągowej był w czasie jej eksploatacji względnie stały oraz gdy wiek rurociągu był znaczny [3,4,8–10].

Włączenie w pewnych okresach dodatkowych źródeł zasilania systemu wodociągowego (ujęcia, pompy, zbiorniki) powodowało często prawie skokową zmianę parametrów hydraulicznych niektórych przewodów sieci wodociągowej [3,5,8], co sprawiało, że rezultaty obliczeń hydraulicznej oporności eksploatowanych przewodów wodociągowych według różnych formuł empirycznych, nawet ujmujących wpływ chemicznych właściwości wody, były często bardzo rozbieżne z wynikami badań w konkretnych systemach wodociągowych. Wynika to ze złożoności procesu hydraulicznego starzenia się przewodów wodociągowych w czasie ich wieloletniej eksploatacji i wpływu wielu różnorodnych czynników nie uwzględnionych w formułach empirycznych.

Wiele obserwacji, w tym przytoczone w niniejszym artykule, dowodzi, że niejednokrotnie odcinki rurociągów wykonane z jednakożnego materiału oraz o takim samym wieku i średnicy charakteryzują się – w zależności między innymi od umiejscowienia w sieci wodociągowej i roli jaką w niej spełniają oraz od prędkości przepływu wody – istotnie odmienną opornością hydrauliczną [3,8–10]. Stanu tego nie odzwierciedla żadna z formuł empirycznych znanych z doniesień literaturowych. Z tych względów mechaniczne 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. Przebieg i intensywność procesu wzrostu hydraulicznej oporności przewodów wodociągowych w czasie ich eksploatacji mogą być w różnych

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 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.

## LITERATURA

1. Z. SIWOŃ, S. BOGACZEWICZ, J. CIEŻAK, H. PEŁKA, A. KOTOWSKI: Studia nad racjonalną modernizacją i rozbudową systemu zaopatrzenia w wodę Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego. Etap I. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, raport SPR nr 16, Wrocław 1991.
2. Z. SIWOŃ, S. BOGACZEWICZ, J. CIEŻAK: Studia nad modernizacją i rozbudową systemu zaopatrzenia w wodę Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego. Etap II. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, raport SPR nr 27, Wrocław 1992.
3. Z. SIWOŃ: Wybrane problemy modelowania przepływów w układach dystrybucji wody. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1997, nr 6, ss. 218–222.
4. 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. 321–328.
5. Z. SIWOŃ: Wybrane problemy praktycznych zastosowań komputerowych modeli sieci wodociągowych. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS, Poznań 1996, ss. 558–569.
6. Z. SIWOŃ: Hydraulic analysis of water distribution systems. Environment Protection Engineering, 1998, Vol. 24, No. 3–4, pp. 5–14.
7. Z. SIWOŃ: Tarowanie parametrów modeli przepływów w systemach dystrybucji wody. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1999, nr 2, ss. 42–46.
8. Z. SIWOŃ: Zagadnienia racjonalnej eksploatacji sieci wodociągowych. Mat. konf. „Współczesne problemy zaopatrzenia w wodę i unieszkodliwiania ścieków”, Lwów 1996, ss. 177–190.
9. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK: Model przepływów w systemie dystrybucji wody na terenie Polanicy Zdroju. Ochrona Środowiska, 1998, nr 2(69), ss. 7–10.
10. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK, S. BOGACZEWICZ: Analiza procesu hydraulicznego starzenia się żeliwnych i stalowych przewodów sieci wodociągowej we Wrocławiu. Ochrona Środowiska, 1998, nr 4(71), ss. 21–26.

## Analysis of the Hydraulic Efficiency of the Water Supply Network for the City of Jelenia Góra

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

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