

Halina Hotłoś

Analiza uszkodzeń i kosztów naprawy przewodów wodociągowych w okresie zimowym

Podstawowym źródłem informacji niezbędnych przy podejmowaniu optymalnych decyzji w zakresie bieżącej eksploatacji oraz do opracowania i wyboru właściwej strategii odnowy istniejących (w większości zdekapitalizowanych) systemów wodociągowych są wyniki systematycznych i wszechstronnych badań niezawodności tych systemów, obejmujących przyczyny, rodzaj i skutki ich uszkodzeń (w tym ekonomiczne) dla odbiorców wody i środowiska oraz przedsiębiorstw wodociągowych. Bardzo ważne, a jednocześnie bardzo trudne lub niekiedy wręcz niemożliwe, jest określenie przyczyn występowania uszkodzeń przewodów wodociągowych. Związane jest to z losowym charakterem większości uszkodzeń oraz różnorodnością czynników oddziałujących na przewody. Przyczyny awarii mają zazwyczaj związek z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją, przy czym mogą nakładać się na siebie [1]. Zwiększenie niezawodności działania systemu dystrybucji wody, poprzez ograniczenie awaryjności jego elementów, można uzyskać m.in. dzięki przestrzeganiu – w czasie projektowania i budowy – wymagań dotyczących minimalnej głębokości ułożenia przewodów wodociągowych ze względu na przemarzanie gruntu. Jak wykazują doświadczenia, niezachowanie minimalnego przykrycia przewodów jest częstą przyczyną ich awarii w okresie jesienno-zimowym, zwłaszcza na odcinkach sieci o bardzo małej prędkości przepływu wody. W literaturze krajowej [2] wykazano korelacje świadczące o spadku liczby uszkodzeń przewodów wraz ze wzrostem temperatury powietrza. Koresponduje to ze spostrzeżeniami innych badaczy [1,3,4] o wzroście częstości uszkodzeń w okresie jesienno-zimowym, a zwłaszcza przewodów płytko ułożonych.

Obowiązującym obecnie w Polsce aktem prawnym dotyczącym głębokości układania przewodów wodociągowych jest norma PN-97/B-10725 [5]. Według tej normy, w wypadku gdy nie stosuje się izolacji cieplnej oraz innych sposobów zabezpieczenia podłoża i przewodu przed przemarzaniem, głębokość ułożenia przewodu powinna być taka, aby przykrycie (h_n) (mierzone od powierzchni przewodu do rzędnej projektowanego terenu) było większe od głębokości przemarzania gruntu (h_z) o 0,40 m w przypadku rur o średnicy mniejszej niż 1000 mm oraz 0,20 m w przypadku rur o średnicy 1000 mm i większej. Dławice zasuw powinny być natomiast zabezpieczone izolacją cieplną, gdy wierzch dławicy znajduje się powyżej dolnej granicy przemarzania w danej strefie. Polska podzielona jest na

cztery strefy klimatyczne, w których głębokość przemarzania gruntu określono odpowiednio na 0,80 m, 1,00 m, 1,20 m i 1,40 m [6].

Zasadniczy wpływ na głębokość przemarzania gruntu mają wartości ujemnych temperatur powietrza i czas ich trwania, opisywane za pomocą wskaźnika mrozowego (W_m). Wartość tego wskaźnika w danym roku kalendarzowym oblicza się jako sumę bezwzględnych wartości średnich dobowych temperatur powietrza (t_{sr}) mniejszych od 0 °C w okresie zimowym (najczęściej od października do końca kwietnia roku następnego) i określa w stopniodniach. Średnią dobową temperaturę powietrza oblicza się zazwyczaj ze wzoru [7]:

$$t_{sr} = (t_7 + t_{14} + 2t_{21})/4 \quad (1)$$

w którym:

t_7 , t_{14} , t_{21} – temperatura powietrza zmierzona o godz. 7:00, 14:00 i 21:00 na wysokości 2 m nad terenem, °C.

Na podstawie wartości wskaźnika mrozowego i sporządzonych krzywych sum chłodu charakteryzuje się warunki klimatyczne danego obszaru i wnioskuje o intensywności zjawisk mrozowych. Największymi wartościami wskaźnika mrozowego ($W_m \approx 1000$ stopniodni) charakteryzuje się północno-wschodnia część Polski (rejon Suwałk o $h_z = 1,40$ m), natomiast najmniejszymi ($W_m = 500 \div 600$ stopniodni) – zachodnia część kraju (rejon Zielonej Góry, Gorzowa Wielkopolskiego o $h_z = 0,80$ m) [8]. Głębokość przemarzania gruntu zależy także od jego właściwości, takich jak porowatość, wilgotność, ciepło właściwe, pojemność cieplna i przewodność cieplna. Istotny wpływ na głębokość przemarzania gruntu ma ponadto pokrywa śnieżna, której właściwości termoizolacyjne mierzone są na podstawie współczynnika przewodności cieplnej. Wykorzystywane najczęściej w praktyce inżynierskiej w Polsce wzory do obliczania głębokości zamarzania gruntu to wzory empiryczne Owodowa i Dębskiego. Uzależniają one głębokość przemarzania (h_z) od wskaźnika mrozowego, rodzaju gruntu i grubości pokrywy śnieżnej, a we wzorze Dębskiego także od rodzaju terenu (otwarty lub osłonięty) [8]. Dla przykładu, obliczona z wzoru Owodowa, przy wskaźniku mrozowym $W_m = 500$ stopniodni, głębokość przemarzania gruntu gliniastego przy pokrywie śnieżnej o grubości 0 cm, 5 cm i 10 cm wynosi odpowiednio 105 cm, 95 cm i 85 cm, a dla piasku jest w każdym wypadku o 13 cm większa. W wypadku obydwu rodzajów gruntu, wzrost grubości pokrywy śnieżnej o kolejne 5 cm wpływa na zmniejszenie o 10 cm głębokości przenikania mrozu przy $W_m = 500$ stopniodni oraz o 20 cm przy $W_m = 1000$ stopniodni.

W wyniku długotrwałych mrozów mogą ponadto występować wysadziny wilgotnego gruntu spoistego (iły, gliny, pyły, piasek gliniasty, pył piaszczysty), czyli przemieszczenia gruntu pod wpływem zamarzania wody kapilarnej i tworzenia się soczewek lodu, a w konsekwencji – uszkodzenia przewodów. Niejednorodne przenikanie mrozu powoduje często powstawanie wysadzin zmarzlinowych o zróżnicowanych wielkościach, co skutkuje pękaniem rurociągów. Sytuacja taka może mieć miejsce na przykład wtedy, gdy na trasie rurociągu występują obszary osłonięte (przykryte) i nieosłonięte warstwą śniegu, lub gdy następuje zmiana rodzaju gruntu w otoczeniu przewodu. Także nierównomierne rozmarzanie gruntu w okresie wiosennym może powodować uszkodzenie rurociągów.

Uszkodzenia sieci wodociągowej w Niemczech w zimie 1995/1996

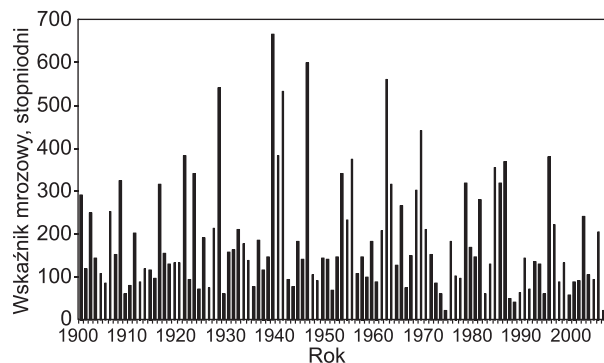
W zimie na przełomie 1995/1996 w Niemczech panowały ekstremalne warunki klimatyczne, gdyż długiemu utrzymywaniu się ujemnych temperatur powietrza towarzyszył brak pokrywy śnieżnej. Podobne warunki miały miejsce w latach 1962/1963, 1939/1940 i 1928/1929, wskutek czego zaliczane są one do srogich zim minionego stulecia. Wprawdzie zimą 1995/1996 wskaźnik mrozowy nie osiągnął tak dużej wartości jak we wcześniejszych okresach (ilustrację stanowią dane na rys. 1 z obserwacji w Poczdamie [7]), to ze względu na zbliżone liczby dni mroźnych (z maksymalną dobową temperaturą $<0^{\circ}\text{C}$) oraz dni zimowych (z średnią dobową temperaturą $<0^{\circ}\text{C}$), za uzasadnione uznano zakwalifikowanie także zimy 1995/1996 do zim stulecia [9]. Właśnie wtedy, jak wynika z pomiarów średnich głębokości przemarzania w grudniu, styczniu i lutym prowadzonych w Poczdamie, wskaźnik ten osiągnął największą wartość od czasu rozpoczęcia pomiarów, tj. od 1894 r. do chwili obecnej i wynosił prawie 43 cm. Zbliżone duże głębokości przemarzania gruntu ($39\div 42$ cm) zaobserwowano w latach 1962/1963, 1939/1940 i 1928/1929, natomiast najmniejsze ($2\div 3$ cm) w latach 1974/1975 i 2006/2007 [7]. Kaprysem natury nazwano sytuację, w której ekstremalne warunki pogodowe zimą 1995/1996 dotknęły głównie części wschodnią i północną Niemiec, czyli tereny nowych landów (była NRD), gdzie jeszcze dotychczas występują duże problemy z eksploatacją niedoinwestowanych przez wieloletnia i będących w złym stanie technicznym systemów wodociągowo-kanalizacyjnych. W konsekwencji, długotrwały okres mrozów (od 26 listopada 1995 r. do 14 marca 1996 r.) i brak pokrywy śnieżnej na wielu obszarach spowodowały bardzo wiele szkód w obrębie przyłączy domowych i sieci wodociągowej rozdzielczej oraz związane z tym koszty.

W Saksonii, Saksonii-Anhalt i Turynгии [10] od listopada 1995 r. do marca 1996 r. wystąpiło nieco ponad 10 tys. pęknięć rurociągów o całkowitej długości prawie 60 km, z których około 2,3% ułożono z niewystarczającym przykryciem w granicach $0,5\div 0,6$ m, a przykrycie pozostałych przewodów wynosiło $1,1\div 1,8$ m. Ponaddwukrotnie większą intensywność uszkodzeń (odniesioną do roku) stwierdzono w wypadku przyłączy domowych ($0,69$ uszk./km·a) niż przewodów rozdzielczych ($0,31$ uszk./km·a). Jako przyczyny wystąpienia awarii uznano w 46% wyjątkowo niekorzystne warunki atmosferyczne, w 23% zbyt płytkie ułożenie przewodów, a w 31% inne czynniki, w tym naturalne zużycie materiału rur (głównie żeliwo i stal) wskutek kilkudziesięcioletniej eksploatacji. Koszty naprawy uszkodzeń

oszacowano na 32 mln marek (średnio ok. 3 tys. marek na jedną naprawę), a koszty poniesione na doraźne zapewnienie dostawy wody na 3,3 mln marek. Zaplanowano ponadto zainwestowanie ok. 50 mln marek w wymianę 290 km przewodów najbardziej zagrożonych awariami w okresie zimowym z powodu zbyt małej głębokości ich ułożenia.

W Meklemburgii-Pomorzu Przednim [10] zamarzło prawie 0,9% długości przewodów rozdzielczych uwzględnionych w analizie (67 km z 7800 km), 3,7% przyłączy domowych (5500 sztuk na 150 tys. sztuk) oraz 3,5% (5300 szt.) wodomierzy domowych. Wskutek tego około 20 tys. mieszkańców było pozbawionych dopływu bieżącej wody i uzależnionych od jej dostaw awaryjnych. Prawie 65% długości zamarzniętych przewodów rozdzielczych i 46% przyłączy domowych było ułożonych z przykryciem mniejszym niż 1,0 m, w tym nawet mniejszym niż 0,6 m. Ale w wypadku jednej trzeciej długości zamarzniętych rurociągów rozdzielczych i połowy długości przyłączy przykrycie wynosiło $1,0\div 1,4$ m. Skutki te nie są zaskakujące, gdyż stwierdzona w zimie 1995/1996 (przez służby meteorologiczne w Rostoku) głębokość zamarzania gruntu wynosiła 1,0 m na terenach niezabudowanych, a nawet $1,4\div 1,8$ m na terenach zabudowanych sztucznie odśnieżanych. Poniesiono znaczne koszty, zwłaszcza odmrażania przewodów.

W Brandenburgii [11] w czasie zimy 1995/1996 nie wykształciła się ciągła pokrywa śnieżna, a średnie dobowe temperatury powietrza były niższe nawet o 15°C od wartości średnich z wielolecia. W okresie mrozów rosła grubość zamarzniętej warstwy gruntu (krótkotrwały wzrost temperatury powietrza $>0^{\circ}\text{C}$ nie hamował tego procesu), osiągając maksymalną wartość w połowie lutego 1996 r. Na podstawie pomiarów prowadzonych w stacji meteorologicznej w Poczdamie stwierdzono, że na terenie bez pokrywy śnieżnej grunt zamarzł nawet do głębokości 1,55 m, zaś w miejscach pokrytych śniegiem o pół metra płycej (do 1,05 m). Wskaźnik mrozowy wynosił 380 stopniodni (rys. 1). Szkody spowodowane mrozem wystąpiły w przewodach wodociągowych o długości 140 km z 8750 km (1,6%) objętych analizą. Uszkodzeniu uległy rurociągi o małych średnicach od 32 mm do 160 mm. Prawie 57% z bezpośrednio zamarzniętych 64 km stanowiły rurociągi o średnicach 32 mm i 100 mm, a tylko 9% rurociągi o średnicach $110\div 160$ mm. Prawie 30% uszkodzonych przewodów ułożonych było z małym przykryciem do 1,0 m, 35% miało przykrycie $1,0\div 1,2$ m, a pozostałe $1,2\div 1,5$ m. Około 30 tys. mieszkańców było pozbawionych dopływu bieżącej wody i uzależnionych od jej dostaw awaryjnych, których koszt wyniósł 3 mln marek. Naprawa uszkodzeń kosztowała 6 mln marek.



Rys. 1. Wartości wskaźnika mrozowego z obserwacji w Poczdamie [7]

Fig. 1. Values of the freezing factor observed in Potsdam [7]

Z doświadczeń eksploatacji sieci wodociągowych we wschodnich landach Niemiec w czasie srogich zim minio-ego stulecia wynika, że [9–11]:

- głębokość przemarzania gruntu zależy w znaczącym stopniu od wartości wskaźnika mrozowego, rodzaju gruntu (w podłożu gliniastym odnotowano wartości h_z o $0,2 \div 0,4$ m mniejsze niż w piaszczystym i żwirowym), grubości i gęstości pokrywy śnieżnej (przy braku śniegu grunt zamarzał nawet o $0,5$ m głębiej niż w miejscu przykrytym śniegiem) oraz lokalnych warunków klimatycznych i terenowych,

- największa zmierzona głębokość przenikania mrozu wyniosła $1,4$ m w podłożu naturalnym bez odśnieżania, $1,6$ m przy odśnieżaniu oraz $1,8$ m w podłożu żwirowym,

- główną przyczyną uszkodzeń i zamarznięcia przewodów wodociągowych było ich płytkie posadowienie, powyżej granicy zamarzania gruntu. W latach 70. XX w. wprowadzono wytyczne dopuszczające płytsze układanie przewodów, pod warunkiem spełnienia wymagań techniczno-termicznych, z uwzględnieniem m.in. temperatury i natężenia przepływu wody w rurociągach. Zmniejszenie strumienia i prędkości przepływu wody w przewodach po 1990 r., wskutek spadku zużycia wody, w znaczący sposób wpłynęły na zwiększenie podatności rurociągów, zwłaszcza małej średnicy, na oddziaływanie mrozu,

- uszkodzeniom ulegały głównie przewody o małych średnicach (mają duże powierzchnie wyziębające w odniesieniu do przekroju) i czasowej stagnacji wody (w godzinach nocnych), czyli przyłącza domowe i przewody rozdzielcze na odcinkach końcowych,

- zalecane w Niemczech minimalne przykrycie rurociągów ze względu na przemarzanie gruntu wynosi od $1,5$ m w przypadku rurociągów o małej średnicy do $1,0$ m w przypadku rurociągów o dużej średnicy,

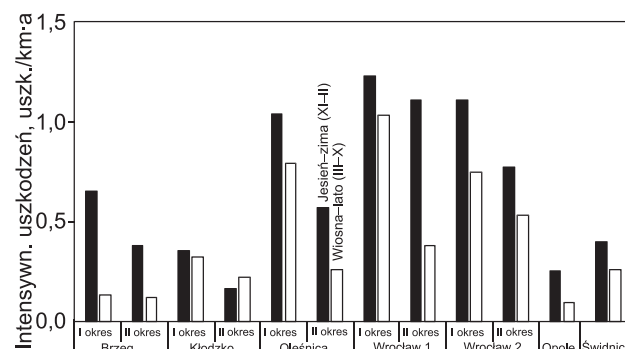
- firmy wodociągowe prowadzą działalność profilaktyczno-informacyjną w zakresie zasad i technik zabezpieczenia instalacji wodociągowych przed mrozem oraz urządzeń odpornych na jego działanie. Zalecają ponadto użytkownikom, aby w okresach mrozu utrzymywali tzw. przepływy przeciwmrozowe (min. $0,5 \text{ dm}^3/\text{min}$) w przewodach narażonych na zamarznięcie, na koszt firm. Stanowi to alternatywę dla naprawy pękniętych rur, których koszty są nieproporcjonalnie większe oraz wpływa na zwiększenie niezawodności dostawy wody do odbiorców.

Omówienie wyników badań

Analizę i uogólnienie wyników badań własnych wpływu wybranych czynników na uszkadzalność i koszty naprawy przewodów wodociągowych zawarto w monografii [1]. Źródłem danych do badań była dokumentacja uzyskana z pięciu przedsiębiorstw wodociągowych (w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy, Wrocławiu i Opolu), dotycząca od kilku do kilkunastoletnich okresów eksploatacji przewodów magistralnych i rozdzielczych (o średnicach $80 \div 1000$ mm i łącznej długości ok. 560 km). Oceny działania sieci wodociągowych dokonano w dwóch okresach ich eksploatacji (z wyjątkiem Opolu) ze względu na wysokość ciśnienia wody, tj. w czasie eksploatacji z nadmiernym ciśnieniem (I okres badań) oraz w okresie obniżonych wahań i wysokości ciśnienia (II okres badań) w wyniku przeprowadzonej modernizacji systemu dystrybucji wody [1].

Analiza uszkodzeń przewodów z obserwacji w wieloleciu

Analizie poddano liczbę, częstość oraz intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych w miesiącach jesienno-zimowych (od listopada do lutego włącznie) oraz wiosenno-letnich (od marca do października). Analizy dokonano przy założeniu strukturalnego podziału przewodów wodociągowych na elementy liniowe, tj. rurociągi oraz elementy nielinowe, czyli armaturę wodociągową (zasuwki i hydranty). Wyniki oceny wartości średnich (w każdym z okresów eksploatacji sieci ze względu na ciśnienie wody) wskaźników uszkodzeń rurociągów z podziałem na rodzaj uszkodzeń (uszkodzenia złączy, pęknięcia i perforacje rur) w okresach jesienno-zimowym i wiosenno-letnim zawarto w tabeli 1, natomiast na rysunku 2 zilustrowano zmiany ogólnej intensywności uszkodzeń rurociągów (odniesionej do roku).



Rys. 2. Ogólna intensywność uszkodzeń sieci rurociągów z uwzględnieniem pory roku

Fig. 2. Overall failure rate for water-pipe networks during the two periods of observation

Analiza uzyskanych wyników badań rurociągów pozwala na następujące uogólnienia:

- we wszystkich systemach wodociągowych (z wyjątkiem Kłodzka) ogólna intensywność uszkodzeń rurociągów w okresie jesienno-zimowym ($\lambda_{(z)}$) była większa niż w okresie wiosenno-letnim ($\lambda_{(l)}$). Średnie wartości (w poszczególnych okresach badań) intensywności uszkodzeń w zimie były w większości $1,2 \div 3,0$ -krotnie, a w Brzegu nawet 5-krotnie większe niż w lecie oraz $1,1 \div 2,2$ -krotnie większe niż w całym okresie badań,

- zwiększona awaryjność w miesiącach zimowych, wskutek przemarzania gruntu w otoczeniu rurociągu i niezawodności zamarznięcia wody w przewodzie, spowodowana była pęknięciami materiału rur. W większości systemów wodociągowych ich udział wynosił $70 \div 100\%$ ogólnej liczby uszkodzeń w okresie zimowym i był o $3 \div 13\%$ większy niż udział pęknięć w awariach z całego okresu obserwacji,

- oszacowano (ze wzoru $(\lambda_{(z)} - \lambda_{(l)})/\lambda_{(z)}$), że przyczyną około $16 \div 80\%$ awarii w miesiącach jesienno-zimowych były niekorzystne warunki atmosferyczne i płytkie ułożenie przewodów. Dokładna ocena nie była możliwa, gdyż w większości wypadków nie było informacji o przyczynach powstałych uszkodzeń.

Oceniając niezawodność działania sieci wodociągowej nie można pomijać armatury przewodów, na którą składają się głównie zasuwki odcinające i hydranty. W większości wypadków uszkodzenia armatury przewodów nie wpływają na niezawodność dostawy wody do odbiorców (naprawa nie wymaga na ogół wyłączenia przepływu wody w rejonie uszkodzenia). Mniejsze są zazwyczaj także jednostkowe

Tabela 1. Liczba i intensywność uszkodzeń rurociągów rozdzielczych i magistralnych w zależności od pory roku w dwóch okresach eksploatacji sieci wodociągowej
Table 1. Rate of failure and number of failure events in distributing pipes and mains related to the seasons of the year over the two periods of observation

Parametr		Brzeg [1]		Kłodzko [1]		Oleśnica [1]	
		I okres	II okres	I okres	II okres	I okres	II okres
Okres badań		1991–VIII 1996	IX 1996–2000	1992–VIII 1997	IX 1997–1999	1981–1992	1993–2000
Liczba uszkodzeń rurociągów (uszk. złączy; pęknięcia rur)	zima (XI–II)	86 (19; 67)	42 (5; 37)	41 (7; 34)	9 (0; 9)	211 (146; 65)	100 (29; 71)
	wiosna, lato (III–X)	37 (6; 31)	26 (11; 15)	78 (12; 66)	23 (4; 19)	319 (241; 78)	91 (42; 49)
	razem (I–XII)	123 (25; 98)	68 (16; 52)	119 (19; 100)	32 (4; 28)	530 (387; 143)	191 (71; 120)
Długość rurociągów (L_{sr}), km		72,608	74,480	63,371	68,242	50,486	65,202
Średnia intensywność uszkodzeń, uszk./km·a	λ_{Z2} (XI–II)	0,65	0,376	0,35	0,16	1,045	0,575
	λ_{I0} (III–X)	0,13	0,123	0,32	0,224	0,79	0,262
	λ (I–XII)	0,30	0,21	0,33	0,20	0,88	0,37
Średnia intensywność pęknięć i perforacji rur, uszk./km·a	$\lambda_{po(z)}$ (XI–II)	0,50	0,33	0,29	0,16	0,322	0,408
	$\lambda_{po(l)}$ (III–X)	0,11	0,07	0,27	0,19	0,193	0,141
	λ_{po} (I–XII)	0,24	0,16	0,28	0,175	0,24	0,23
$\lambda_{Z2}/\lambda_{I0}$		4,86	3,05	1,10	0,70	1,32	2,20
$\lambda_{po(z)}/\lambda_{po(l)}$		4,518	4,662	1,08	0,85	1,67	2,90
$(\lambda_{Z2}-\lambda_{I0})/\lambda_{Z2}$, %		79,4	67,2	9,0	0 (-0,42)	24,4	54,5

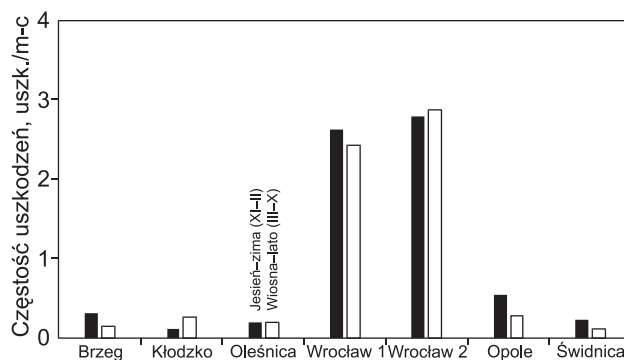
Parametr		Wrocław 1 [1]		Wrocław 2 [1]		Opole [1]	Świdnica [12]
		I okres	II okres	I okres	II okres		
Okres badań		1990–1994 (bez 1992)	1995–VI 1997	1990–1994 (bez 1992)	1995–1998	1996–2001	1990–2000
Liczba uszkodzeń rurociągów (uszk. złączy; pęknięcia rur)	zima (XI–II)	67 (20; 47)	38 (12; 26)	51 (14; 37)	36 (7; 29)	133 (36; 97)	166 (23; 143)
	wiosna, lato (III–X)	112 (34; 78)	26 (14; 12)	69 (28; 41)	50 (13; 37)	95 (13; 82)	220 (45; 175)
	razem (I–XII)	179 (54; 125)	64 (26; 38)	120 (42; 78)	86 (20; 66)	228 (49; 179)	386 (68; 318)
Długość rurociągów (L_{sr}), km		40,811	41,035	34,515	35,184	262,450	114,13
Średnia intensywność uszkodzeń, uszk./km·a	λ_{Z2} (XI–II)	1,23	1,11	1,11	0,77	0,25	0,40
	λ_{I0} (III–X)	1,03	0,38	0,75	0,53	0,09	0,26
	λ (I–XII)	1,10	0,62	0,87	0,61	0,14	0,31
Średnia intensywność pęknięć i perforacji rur, uszk./km·a	$\lambda_{po(z)}$ (XI–II)	0,86	0,76	0,80	0,62	0,185	0,34
	$\lambda_{po(l)}$ (III–X)	0,72	0,175	0,445	0,39	0,078	0,21
	λ_{po} (I–XII)	0,77	0,37	0,57	0,47	0,11	0,25
$\lambda_{Z2}/\lambda_{I0}$		1,20	2,92	1,48	1,44	2,78	1,54
$\lambda_{po(z)}/\lambda_{po(l)}$		1,20	4,333	1,805	1,568	2,37	1,62
$(\lambda_{Z2}-\lambda_{I0})/\lambda_{Z2}$, %		16,4	65,8	32,4	30,6	64,3	35,0

Tabela 2. Liczba i intensywność uszkodzeń armatury przewodów wodociągowych w zależności od pory roku
 Table 2. Rate of failure and number of failure events in fittings related to the seasons of the year

Parametr		Brzeg [1]	Kłodzko [1]	Oleśnica [1]	Wrocław 1 [1]	Wrocław 2 [1]	Opole [1]	Świdnica [12]
Okres badań		1991–2000	1992–1998	1993–2000	1990–1996 (bez 1992)	1990–1998 (bez 1992)	1996–2001	1990–2000
Liczba uszkodzeń armatury (zasuw; hydranty)	zima (XI–II)	12 (5; 7)	3 (2; 1)	6 (3; 3)	63 (41; 22)	89 (33; 56)	13 (2; 11)	10 (8; 2)
	wiosna, lato (III–X)	11 (7; 4)	14 (7; 7)	12 (7; 5)	116 (65; 51)	183 (77; 106)	13 (4; 9)	10 (9; 1)
	razem (I–XII)	23 (12; 11)	17 (9; 8)	18 (10; 8)	179 (106; 73)	272 (110; 162)	26 (6; 20)	20 (17; 3)
Średnia częstość uszkodzeń armatury, uszk./m-c	$c_{a(z)}$ (XI–II)	0,30	0,107	0,1875	2,625	2,781	0,5417	0,227
	$c_{a(l)}$ (III–X)	0,1375	0,250	0,1875	2,417	2,859	0,2708	0,114
	c_a (I–XII)	0,1917	0,202	0,1875	2,486	2,833	0,3611	0,151
$c_{a(z)}/c_{a(l)}$		2,2	0,43	1,0	1,09	0,97	2,00	2,00
Średnia intensywność uszkodzeń zasuw, uszk./a	$\lambda_{Z(z)}$ (XI–II)	–	–	–	0,1102	0,0707	–	–
	$\lambda_{Z(l)}$ (III–X)	–	–	–	0,0874	0,0825	–	–
	λ_Z (I–XII)	–	–	–	0,0950	0,0786	–	–
Średnia intensywność uszkodzeń hydrantów, uszk./a	$\lambda_{H(z)}$ (XI–II)	–	–	–	0,0356	0,0667	–	–
	$\lambda_{H(l)}$ (III–X)	–	–	–	0,0413	0,0631	–	–
	λ_H (I–XII)	–	–	–	0,0394	0,0643	–	–
Średnia intensywność uszkodzeń armatury ogółem, uszk./a	$\lambda_{a(z)}$ (XI–II)	–	–	–	0,064	0,068	–	–
	$\lambda_{a(l)}$ (III–X)	–	–	–	0,058	0,070	–	–
	λ_a (I–XII)	–	–	–	0,060	0,069	–	–

koszty naprawy oraz straty wody w porównaniu z skutkami uszkodzeń rurociągów. Czynniki te nie mogą stanowić jednak uzasadnienia do zaniechania oceny niezawodności armatury, której uszkodzenia – przy dużym udziale w ogólnej liczbie uszkodzeń sieci – w znaczący sposób wpływają na wzrost kosztów jej eksploatacji oraz sieciowych strat wody [1]. Wielu badaczy zajmujących się oceną wskaźników intensywności uszkodzeń przewodów wodociągowych pomija ocenę tego wskaźnika w odniesieniu do armatury albo – co gorsze – odnosi liczbę jej uszkodzeń do długości przewodów. W konsekwencji uzyskane wartości wskaźników nie odzwierciedlają faktycznego stopnia awaryjności przewodów i nie mogą być wykorzystane do oceny i porównań. Powodem jest (najczęściej) brak danych o ogólnej liczbie zainstalowanej armatury, co uniemożliwia poprawne obliczenie wskaźników intensywności jej uszkodzeń. Z tych też względów ocena wartości wskaźników intensywności uszkodzeń armatury była możliwa tylko w odniesieniu do sieci wodociągowej w analizowanych rejonach Wrocławia, a w pozostałych miastach oceniono wyłącznie liczbę uszkodzeń. Średnie (w czasie badań) wartości liczbowe intensywności uszkodzeń zasuw i hydrantów określono z podziałem na uszkodzenia, które podlegały naprawie oraz uszkodzenia, których konsekwencją była wymiana armatury. Wnioski z przeprowadzonych badań armatury wodociągowej (tab. 2, rys. 3) są następujące:

– w odniesieniu do zasuw i hydrantów nie stwierdzono tak jednoznacznego i negatywnego wpływu niskich temperatur powietrza na ich awaryjność, jak to miało miejsce



Rys. 3. Średnia częstość uszkodzeń armatury przewodów wodociągowych

Fig. 3. Average number of failure events in fittings

w wypadku rurociągów. W sieciach wodociągowych w Brzegu, Opolu i Świdnicy średnia częstość uszkodzeń zasuw i hydrantów w okresie jesienno-zimowym ($c_{a(z)}$) była dwukrotnie większa niż w okresie wiosenno-letnim ($c_{a(l)}$), natomiast w pozostałych miastach nie odbiegała od średniej częstości (c_a) uszkodzeń w roku,

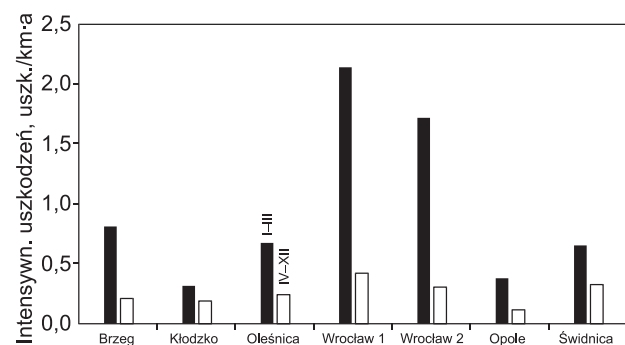
– w obydwu badanych rejonach Wrocławia intensywność uszkodzeń armatury przewodów w okresie zimowym była prawie jednakowa i wynosiła 0,064 uszk./a w rejonie 1 oraz 0,068 uszk./a w rejonie 2. Wartości te odpowiadały średniej intensywności uszkodzeń armatury w lecie (tab. 2), przy czym w rejonie 1 Wrocławia prawie trzykrotnie częściej ulegały uszkodzeniu zasuw (0,1102 uszk./a)

niż hydranty (0,0356 uszk./a), natomiast w rejonie 2 intensywność uszkodzeń zasuw i hydrantów była zbliżona (około 0,07 uszk./a),

– na podstawie oceny liczby uszkodzeń armatury w pozostałych systemach (Brzeg, Kłodzko, Oleśnica, Opole, Świdnica) (tab. 2) widać, że intensywność uszkodzeń zasuw i hydrantów była znacznie mniejsza niż we Wrocławiu. Wynika to z faktu odnotowania dużo mniejszej częstości występowania awarii armatury (uszkodzenia stanowiły 3÷14% ogólnej liczby uszkodzeń przewodów, a we Wrocławiu 40÷57%) w odniesieniu do prawdopodobnie większej ogólnej liczby zabudowanej armatury, ze względu na dłuższą sieć przewodów w tych miastach niż we Wrocławiu.

Analiza uszkodzeń przewodów z obserwacji w 1996 r.

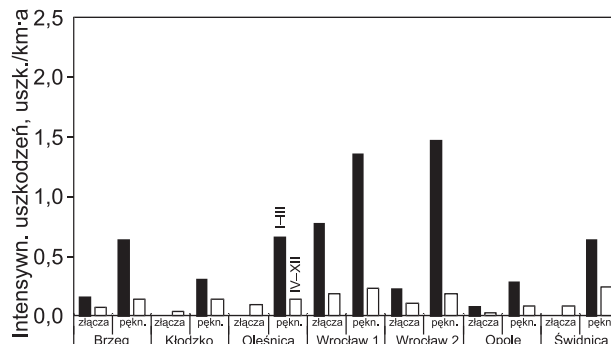
Przedstawione wyniki badań dotyczyły obserwacji prowadzonych w latach 1990–2000. W tym czasie najbardziej niekorzystne warunki atmosferyczne i długotrwałe okresy silnego mrozu panowały jedynie zimą na przełomie lat 1995/1996 (rys. 1), a szczególnie w styczniu i lutym 1996 r. Dokonano zatem analizy i oceny awaryjności przewodów wodociagowych w 1996 r., oddzielnie w okresach od stycznia do marca oraz w pozostałych miesiącach roku. Szczegółowa analiza wykazała, że – podobnie jak we wschodnich landach Niemiec – ekstremalne warunki atmosferyczne i płytkie posadowienie przewodów spowodowały bardzo dużo awarii, głównie wskutek pęknięcia materiału rur, a nawet zamrożenia wody w przewodach. W wielu wypadkach przykrycie uszkodzonych przewodów było mniejsze od 0,6 m, choć minimalnie – ze względu na przemarzanie gruntu – powinno zgodnie z normami [5,6] wynosić 1,2 m na obszarze Brzegu, Kłodzka, Oleśnicy, Świdnicy i Wrocławia oraz 1,4 m w Opolu. Najmniejsze szkody odnotowano w sieci wodociagowej Kłodzka, gdzie średnia intensywność uszkodzeń rurociągów (odniesiona do roku) w styczniu, lutym i marcu była niewiele większa niż w pozostałych miesiącach. Największe szkody – z prawie sześciokrotnie większą awaryjnością – wystąpiły we Wrocławiu, natomiast w pozostałych systemach awaryjność rurociągów zimą była 2÷4-krotnie większa (rys. 4).



Rys. 4. Ogólna intensywność uszkodzeń sieci rurociągów w 1996 r.
Fig. 4. Overall failure rate for water-pipe networks in 1996

Awaryjność rurociągów w czasie srogiej zimy w 1996 r. była dwukrotnie większa niż średnia awaryjność w czasie zim w II okresie badań (okres ten obejmował także 1996 r.) i wynosiła w poszczególnych systemach wodociagowych odpowiednio 0,31÷2,14 uszk./km·a (rys. 4) oraz 0,16÷1,11 uszk./km·a (rys. 2). Najwięcej, bo prawie 65%, awarii zimą 1996 r. wystąpiło na przewodach rozdzielczych o najmniejszych średnicach (80 mm, 100 mm i 125 mm) i w 92% wypadków były to pęknięcia materiału rur. W odniesieniu do całości analizowanych sieci rurociągów (śr. 80÷1000 mm),

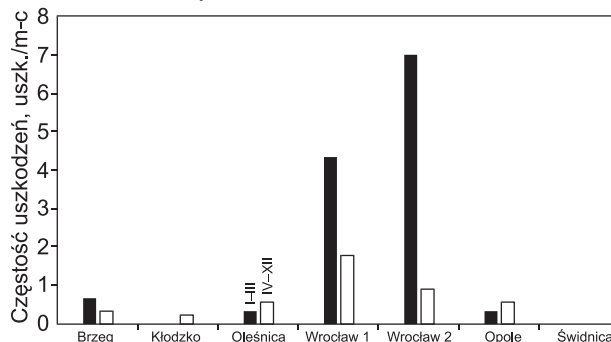
pęknięcia rurociągów stanowiły 64÷100% awarii w okresie zimy (I–III 1996 r.), co ilustrują wykresy na rysunku 5.



Rys. 5. Intensywność uszkodzeń sieci rurociągów w 1996 r. z uwzględnieniem rodzaju uszkodzeń

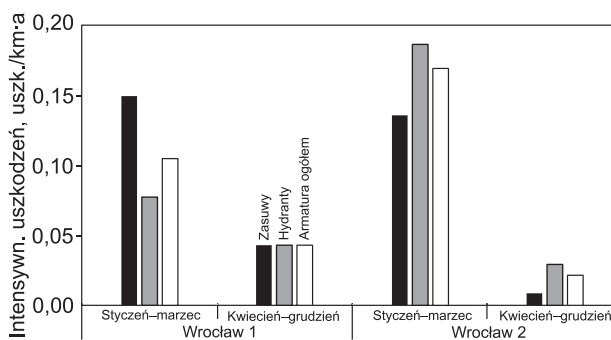
Fig. 5. Failure rate for water-pipe networks in 1996, including type of damage

Sroga zima, panująca od stycznia do marca 1996 r., spowodowała także dużo więcej uszkodzeń armatury przewodów (zasuw i hydrantów), ale tylko w Brzegu i Wrocławiu, gdzie częstość uszkodzeń armatury ogółem (rys. 6) była około dwukrotnie większa niż średnio w uprzednio analizowanych okresach obserwacji (rys. 3, tab. 2). We Wrocławiu, gdzie odnotowano najwięcej uszkodzeń armatury spośród badanych systemów wodociagowych, ekstremalne warunki atmosferyczne na początku 1996 r. jeszcze bardziej pogorszyły sytuację w tym zakresie. Dotyczyło to hydrantów, a zwłaszcza zasuw, których awaryjność od stycznia do marca w sieci rejonu 1 była ponadtrzykrotnie, a w sieci rejonu 2 nawet kilkanaście razy większa niż w pozostałych miesiącach roku. Uszkodzenia armatury w okresie zimy (I–III) występowały częściej w sieci rejonu 2 niż rejonu 1 i przy tym aż ośmiokrotnie częściej niż w pozostałych miesiącach roku. Ilustrują to dane o intensywności uszkodzeń zamieszczone na rysunku 7.



Rys. 6. Częstość uszkodzeń armatury przewodów wodociagowych w 1996 r.

Fig. 6. Number of failure events in fittings observed in 1996



Rys. 7. Intensywność uszkodzeń armatury wodociagowej we Wrocławiu w 1996 r.

Fig. 7. Rate of failure events in fittings observed in Wrocław in 1996

Koszty naprawy uszkodzeń przewodów w 1996 r.

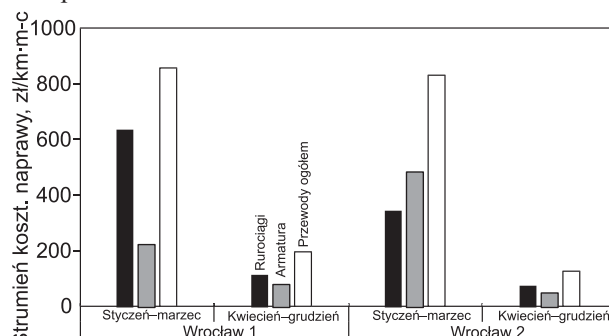
Wymiernym skutkiem uszkodzeń sieci wodociągowej jest m.in. wzrost kosztów eksploatacji związany z koniecznością naprawy uszkodzeń. Jednostkowe koszty naprawy (koszty naprawy jednego uszkodzenia) przewodów zależą od wielu różnorodnych czynników, w tym w największym stopniu od rodzaju przewodów (średnica, materiał, stan techniczny), typu uszkodzonych elementów (rurociąg, armatura), rodzaju uszkodzeń (nieszczelność złącza, pęknięcie lub perforacja rury) i ich wielkości, a także od zagłębienia przewodów. Czynniki te zostały poddane szczegółowej ocenie w pracach własnych [1,13,14] na podstawie analizy danych o kosztach naprawy (dokonywanych systemem zleconym) przewodów magistralnych i rozdzielczych (śr. od 80 mm do 1200 mm) we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. W odniesieniu do rurociągów uzyskano istotne korelacje wzrostu (liniowego) jednostkowych kosztów naprawy zarówno złączy, jak i pęknięć rur wraz ze wzrostem średnicy przewodów, przy czym koszty naprawy pęknięć były zawsze większe od kosztów naprawy złączy rur o określonej średnicy. W wypadku armatury jedynie jednostkowe koszty wymiany zasuw rosły wraz ze wzrostem ich średnicy, natomiast koszty naprawy zasuw oraz koszty naprawy i wymiany hydrantów były stałe w poszczególnych latach badań.

W czasie od 1993 r. do 1999 r. wielokrotnie wzrosły koszty naprawy rurociągów i armatury, głównie wskutek wysokiej inflacji. Na potrzeby prezentowanej pracy dokonano analizy jednostkowych kosztów naprawy uszkodzeń przewodów we Wrocławiu w 1996 r. z uwzględnieniem pory roku. Pozwoliło to, w połączeniu ze znajomością awaryjności przewodów we Wrocławiu (rejon 1 i 2), na ocenę i porównanie całkowitych kosztów naprawy sieci wodociągowej w okresie zimowym (od stycznia do marca) z kosztami poniesionymi w pozostałych miesiącach 1996 r. Szczegółowa analiza danych źródłowych wykazała, że jednostkowe koszty naprawy w okresie zimowym, w porównaniu do średnich kosztów w roku, były większe o 30÷300% w wypadku naprawy rurociągów pękniętych lub zamarzniętych, o 30÷70% w wypadku naprawy złączy rur oraz o 30÷90% w wypadku naprawy lub wymiany zasuw i hydrantów. Większe koszty naprawy zimą spowodowane były zamarznięciem gruntu (nawet do głębokości 1,0 m), niekiedy kilkukrotnym poszukiwaniem miejsca uszkodzenia (dodatkowe wykopy), a także koniecznością skuwania lodu i rozmrażania rurociągów. Do obliczeń całkowitych kosztów naprawy uszkodzeń, które miały miejsce od stycznia do marca 1996 r. w rejonach 1 i 2 we Wrocławiu, przyjęto założenie, że koszt naprawy jednego uszkodzenia (z uwzględnieniem średnicy oraz rodzaju uszkodzeń rurociągów, zasuw i hydrantów) był tylko o 30% większy od średniego kosztu naprawy w roku w przypadku odpowiedniego rodzaju uszkodzenia. Średnie koszty napraw w 1996 r. zamieszczone są w pracach [1,13]. Całkowite koszty naprawy przewodów w 1996 r. wyniosły:

– w sieci rejonu 1: 105 828 zł (78 294 zł – naprawa rurociągów, 27 534 zł – naprawa armatury) w styczniu, lutym i marcu oraz 73 076 zł (42 644 zł – naprawa rurociągów, 30 432 zł – naprawa armatury) w pozostałych dziewięciu miesiącach,

– w sieci rejonu 2: 87 693 zł (36 633 zł – naprawa rurociągów, 51 060 zł – naprawa armatury) w styczniu, lutym i marcu oraz 40 307 zł (24 557 zł – naprawa rurociągów, 15 750 zł – naprawa armatury) w pozostałych dziewięciu miesiącach.

Skalę problemu bardziej oddaje porównanie wartości wskaźnika strumienia kosztów naprawy, czyli kosztów naprawy odniesionych do jednostki długości sieci (1 km) i jednostki czasu (1 miesiąc), co ilustrują wykresy na rysunku 8. Jak można zauważyć, wartości wskaźnika strumienia kosztów naprawy w obydwu analizowanych rejonach sieci były kilkakrotnie (ponad cztero- i sześciokrotnie) większe w pierwszych trzech miesiącach zimowych niż w pozostałych. W zimie koszty wynosiły 860 zł/km·m-c w rejonie 1 Wrocławia i 831 zł/km·m-c w rejonie 2, a w pozostałym okresie odpowiednio 198 zł/km·m-c i 127 zł/km·m-c. Na tak duże dysproporcje w kosztach wpłynęły zwiększona awaryjność rurociągów (głównie bardziej kosztownych pęknięć rur) i armatury oraz kłopotliwa naprawa uszkodzeń w bardzo trudnych warunkach atmosferycznych na początku 1996 r. Należy jeszcze raz podkreślić, że w analizie niezawodności i kosztów eksploatacji sieci wodociągowej nie można pomijać armatury przewodów. Pomimo z reguły mniejszych kosztów naprawy zasuw i hydrantów, w porównaniu z naprawą rurociągów (zwłaszcza dużej średnicy), przy dużym udziale uszkodzeń armatury w ogólnej liczbie uszkodzeń sieci, wpływ kosztów jej napraw może być znaczący. Widać to zwłaszcza na przykładzie sieci rejonu 2 we Wrocławiu (rys. 8), gdzie koszty naprawy armatury (484 zł/km·m-c) w okresie zimowym stanowiły prawie 60% kosztów naprawy wszystkich uszkodzeń przewodów.



Rys. 8. Koszty naprawy przewodów wodociągowych we Wrocławiu w 1996 r.

Fig. 8. Indices of pipe repair costs for the water-pipe network of Wrocław in 1996

Podsumowanie

Doświadczenia z eksploatacji sieci wodociągowej wykazały, że zalecane zarówno w Polsce, jak i we wschodnich landach Niemiec minimalne przykrycie przewodów ze względu na przemarzanie gruntu byłoby w większości wypadków wystarczające nawet w tak skrajnych warunkach klimatycznych jak zimą 1995/1996, ale pod warunkiem zachowania normatywnego przykrycia w czasie budowy przewodów. Nieprzestrzeganie tych zasad na wielu odcinkach sieci, zwłaszcza w warunkach znacznie zmniejszonych strumieni i prędkości przepływu wody w przewodach (wskutek spadku zużycia wody po 1990 r.), wpłynęły na zwiększenie podatności zdekapitalizowanych przewodów na oddziaływanie mrozu, co spowodowało zmniejszenie niezawodności i wzrost kosztów eksploatacji sieci wodociągowych.

LITERATURA

1. H. HOTŁOŚ: Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych. Politechnika Wrocławska, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii

- Ochrony Środowiska, Seria Monografie, nr 49, Oficyna Wydawn. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
2. A. KRÓLIKOWSKI, W. PIĄSTKA: Statystyczna ocena niezawodności pracy sieci wodociągowej w aglomeracji miejsko-przemysłowej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1981, nr 10, ss. 239–241.
 3. M. ROMAN: Niezawodność przewodów sieci wodociągowej w świetle danych z eksploatacji. Mat. konf. „Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych”, PZITS, Kielce 1986, ss. 269–284.
 4. L. DZIENIS, A. KRÓLIKOWSKI: Analiza uszkodzeń miejskich sieci wodociągowych. Mat. konf. „Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych”, PZITS, Kielce 1986, ss. 301–313.
 5. PN-97/B-10725: Wodociągi. Przewody zewnętrzne. Wymagania i badania.
 6. PN-81/B-03020: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
 7. www.klima-potsdam.de.
 8. A. SZPINDOR: Zaopatrzenie w wodę i kanalizacja wsi. Arkady, Warszawa 1992.
 9. H. ROSCHER, L. SAITENMACHER, D. PERDELWITZ: Frostsäden an Hausanschluss- und Versorgungsleitungen im Winter 1995/1996. 1. Teil. *Wasser-Abwasser* 1997, No. 1, S. 1–8.
 10. L. SAITENMACHER, D. PERDELWITZ, H. ROSCHER: Frostsäden an Hausanschluss- und Versorgungsleitungen im Winter 1995/1996. 2. Teil. *Wasser-Abwasser* 1997, No. 1, S. 10–16.
 11. S. BITTNER, A. HEINE: Frostsäden an siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen im Winter 1995/1996 im Land Brandenburg. *Wasser-Abwasser* 1998, No. 13, S. 157–165.
 12. K. BESTECKI: Ocena uszkadzalności przewodów wodociągowych w Świdnicy na podstawie badań eksploatacyjnych. Politechnika Wrocławskiej, Wydział Inżynierii Środowiska, praca dyplomowa, Wrocław 2008 (praca niepublikowana).
 13. H. HOTŁOŚ: Analiza kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych we Wrocławiu. *Ochrona Środowiska* 2005, vol. 27, nr 2, ss. 37–43.
 14. H. HOTŁOŚ: Metodyka i przykłady prognozowania kosztów naprawy przewodów wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2006, vol. 28, nr 1, ss. 49–54.

Hotłoś, H. Analysis of Failure Events and Damage Repair Costs for Water-pipe Networks in the Winter Season. *Ochrona Środowiska* 2009, Vol. 31, No. 2, pp. 41–48.

Abstract: One of the major underlying causes of water pipe failure in the winter season is negligence (during design and construction of the network) in conforming to the regulations that specify the minimal depth for pipe laying. When the pipeline is laid within a freezing soil layer, this will contribute to the occurrence of failure events due to pipe burst or frozen water, which holds true specifically for pipeline segments of a small diameter and very low flow velocity. In this paper observations are reported on the water-pipe networks that are in service in Poland and in the eastern Lands of Germany. They have revealed a very high number of frost-related failure events, as well as heavy financial losses concomitant with pipe failure, particularly during the harsh winter of 1996. In Poland, six water-pipe networks of choice (Brzeg, Kłodzko, Olesnica, Wrocław, Opole and Świdnica) were analyzed for the number of

failure events in distributing pipes and mains in the autumn and winter months (November–February), as well as in the spring and summer months (March–October). Those analyses were based on many years’ observations, with emphasis on the ones made in 1996. In the majority of instances, the rate of failure in the time span of November to February was several times as high as in the other months, and was observed in the water-pipe network rather than fittings. The harsh weather conditions are also to be blamed for the rise in the repair costs for particular types of pipe damage and, more importantly, for the very high costs of the repairs that had to be done in the water-pipe network during the winter months. In-service analysis of the Wrocław water-pipe network has shown that the average monthly costs of damage repair in the time span of January to March 1996 were even six times those observed in the other months of that year.

Keywords: Water distribution system, pipe failure, water-pipe network, repair cost.