

Halina Hotłoś

Analiza strat wody w systemach wodociągowych

Problem strat wody występuje we wszystkich wodociągach na świecie. W Polsce skala problemu uwidoczniła się szczególnie w okresie gospodarki rynkowej. Spadek zużycia wody przez wszystkie grupy odbiorców, przy jednoczesnym wzroście zarejestrowanych strat wody, wymusił na przedsiębiorstwach wodociągowych podejmowanie działań zmierzających do wyeliminowania nadmiernych strat wody. Polegają one m.in. na wdrażaniu systemów kontroli i analizy strat wody oraz programów eksploatacyjnych i modernizacyjnych w celu poprawy stanu technicznego zdekapitalizowanych sieci wodociągowych.

Na całkowite straty wody składają się straty rzeczywiste i pozorne oraz woda zużywana na potrzeby własne systemu wodociągowo-kanalizacyjnego. Przyczyną powstawania rzeczywistych strat wody są przecieki z sieci przewodów i armatury oraz z nieszczelnych instalacji wewnętrznych (poniżej progu rozruchu wodomierzy), przelewy wody ze zbiorników wyrównawczych oraz kradzieże wody. Pozorne straty wody wynikają m.in. z niedokładności i niejednoczesności pomiaru dostawy i zużycia wody i nie stanowią faktycznych wycieków wody z systemu. Całkowite straty wody określa się na podstawie rocznego bilansu (stanowią one różnicę między objętością wody wtłoczonej do sieci wodociągowej i zużyciem wody przez odbiorców), natomiast rzeczywiste straty wody można określić:

– na podstawie rocznego bilansu wody, z różnicy całkowitych strat i zużycia wody na potrzeby własne systemu,

– na podstawie badań terenowych, m.in. przez pomiar i analizę przepływów i poboru wody w godzinach nocnych (1.00+4.00) w wydzielonych obszarach sieci wodociągowej, obejmujących wg [13,16] maksymalnie 20000 mieszkańców (M) lub 30 km sieci wodociągowej, w zależności od gęstości zabudowy.

Straty wody wyrażane są w postaci:

– procentowego udziału w ilości wody wtłoczonej do sieci wodociągowej,

– objętości odniesionej do jednego mieszkańca zaopatrywanego z wodociągu w jednostce czasu ($\text{dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$),

– objętości przypadającej na jednostkę długości sieci wodociągowej (bez przyłączy domowych) w jednostce czasu ($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{km}$, $\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$).

Straty wody stanowią znaczącą część wyprodukowanej wody, a w skrajnych przypadkach mogą osiągnąć 50% i więcej objętości wody wtłaczanej do sieci wodociągowej. Straty dochodzą niekiedy do $100 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$, co w przybliżeniu odpowiada obecnemu poziomowi jednostkowego zużycia wody

w gospodarstwach domowych. Dla ilustracji tego problemu w tabeli 1 zestawiono wskaźniki całkowitych (S_w) i rzeczywistych strat wody (S), tj. bez uwzględnienia potrzeb własnych systemu, w wybranych krajach i miastach świata. Jak można zauważyć, wskaźniki strat wody w Polsce są porównywalne ze wskaźnikami strat stwierdzonymi w Rumunii, na Słowacji, Węgrzech i we wschodnich landach (i miastach) Niemiec, a wyższe niż w zachodnich landach (i miastach) Niemiec i w innych państwach zachodnich.

Ograniczanie strat wody powinno być zatem jednym z najważniejszych zadań przedsiębiorstw wodociągowych, gdyż nie tylko obniża koszty sprzedawanej wody, ale chroni niewielkie dyspozycyjne zasoby wodne. W latach 1997–2001 naturalne zasoby wodne naszego kraju wynosiły średnio $1700+1900 \text{ m}^3/\text{M}\cdot\text{a}$, co według Europejskiej Agencji Środowiska klasyfikuje Polskę do grupy krajów o bardzo małej dostępności do wody. W Europie średni wskaźnik zasobów wodnych jest prawie trzykrotnie, a na świecie ponad czterokrotnie wyższy niż w Polsce.

Przyczyny rzeczywistych strat wody

Rzeczywiste straty wody mają podstawowy wpływ na straty całkowite, choć w ostatnich latach obserwuje się w Polsce wzrost zużycia wody na potrzeby własne systemu (płukanie rurociągów, zbiorników itp.), co wynika z większej obecnie dbałości o jakość wody dostarczanej odbiorcom. Udział strat rzeczywistych i pozornych w całkowitych stratach wody w systemach wodociągowych polskich miast wynosi od około 50% (dla niskich całkowitych strat) do ponad 80% (dla wysokich strat całkowitych) [2–4]. Podobne relacje między rzeczywistymi i całkowitymi stratami stwierdzono w Niemczech, gdzie straty wody w instalacjach wewnętrznych wskutek przecieków mniejszych od progu rozruchu wodomierzy szacuje się na $0,1+0,2 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{km}$ ($2,4+4,8 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$) [8,13,21].

Na rzeczywiste straty wody składają się głównie przecieki z zewnętrznej sieci wodociągowej do gruntu. Według badań niemieckich [12] stanowią one 80+100% rzeczywistych strat wody. Ze względu na duże trudności ilościowego oszacowania przecieków, do analiz i porównań wykorzystuje się wskaźniki strat (S), określone na podstawie rocznych bilansów wody. Wiarygodność tych danych, uzyskiwanych z polskich przedsiębiorstw wodociągowych, znacznie wzrosła w ostatnich latach. Wynika to m.in. z prawie pełnego opomiarowania odbiorców wody oraz stosowania urządzeń pomiarowych o wysokiej dokładności. Zatem straty wody obliczone na podstawie rocznych bilansów mogą, bez popełnienia większego błędu, służyć do oceny przecieków wody z przewodów i armatury sieci wodociągowej, co potwierdzają wyniki badań terenowych [5,6]. Badania terenowe przecieków wody

Tabela 1. Straty wody w sieciach wodocigowych w wybranych krajach i miastach

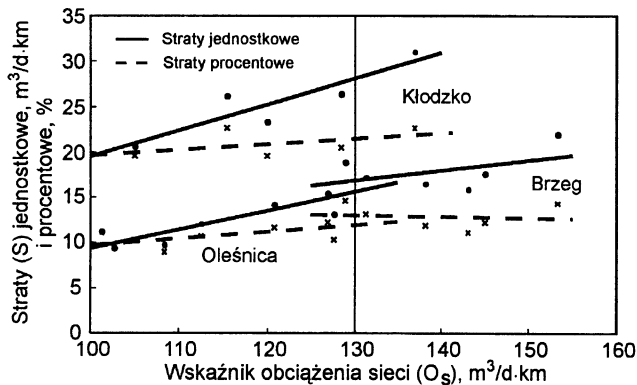
Kraj/miasto	Wskaźniki strat wody S_w i S (w nawiasach)		
	%	$dm^3/M\cdot d$	$m^3/d\cdot km$
Polska (1998) [1]	18,6	47	17,2
Polska – wybrane miasta (1996) [2]	15+30 (10+20)	12+100 (10+70)	8+30 (6+24)
Oleśnica (1993–2000) [3]	14+23 (9+13)	25+51 (17+28)	14+30 (9+17)
Brzeg (1996–2000) [4]	14+17 (11+14,5)	36+48 (30+41)	19+26 (16+22)
Kłodzko (1995–1999) [4]	23,5+28 (19,5+23)	55+77 (46+66)	25+36 (21+31)
Polanica Zdrój (2001) [5]	(36+50)	–	(33,8+38)
Polska południowa (1993) [6]	35+60	–	11+80
Górny Śląsk (1994) [7]	tereny szkód górniczych	śr. 30; maks. 41	–
	poza terenem szkód górniczych	śr. 21; maks. 37	–
Polkowice (1996) (tereny szkód górniczych) [2]	18	22	13
Niemcy	zachodnie landy [8]	8+9	–
	wschodnie landy [9]	20; maks. 40	34
Erfurt (1993–1997) [10]	–	–	44+23
Düren (1994) [8]	–	–	7
Duisburg (1978–1988) [11]	2,8+8,6	–	2,7+9,7
Bonn [12]	ogółem (1974–1992)	–	–
	wybrane rejony	(11; 12,2; 25,8)	–
Stuttgart (1997) [13]	–	–	(3,6)
Finlandia [14]	mniejsze systemy	do 30	–
	duże systemy	15+25	–
	Tampere	15	–
	Helsinki	20	–
Turku	25	–	17
Argentyna – duże miasta [14]	ok. 20	–	do 50
Portugalia [14]	20+40	–	3+10; maks. 60
Wochoy [14]	25	–	–
Holandia [14]	5	–	–
Dania [14]	10	–	–
Tajwan [14]	15+30	–	–
Cypr – Nikozja (1996) [14]	14,5	–	–
Rumunia (1995) [14]	21,6	110	–
Anglia i Walia [15]	24	–	11,8
Zurych [15]	10	–	10,6
Tokio [15]	10	–	10,6
Słowacja – wybrane miasta [15]	20+30	–	16,8+25,2
Węgry – wybrane miasta [15]	do 50	–	–

są jednak niezbędne, gdyż na ich podstawie możliwe jest zlokalizowanie nieszczelności (szczególnie niewielkich, nie ujawniających się na powierzchni) oraz podjęcie działań umożliwiających ich eliminację.

Wskaźnikiem miarodajnym do oceny i porównań stanu technicznego i sposobu eksploatacji sieci wodociagowych jest wskaźnik S , określający straty wody w przeliczeniu na jednostkę długości sieci (bez przyłączy domowych) wyrażony w $m^3/d\cdot km$ (lub $m^3/h\cdot km$). Tak obliczony jednostkowy wskaźnik strat, w przeciwieństwie do procentowego, pozwala na uwzględnienie m.in. odmiennych struktur systemów zaopatrzenia w wodę oraz różnych długości sieci przewodów. Przy ocenie strat jednostkowych (S) należy ponadto uwzględnić wskaźnik obciążenia sieci (O_s , $m^3/d\cdot km$), który określa średnią dobową ilość wody wtłoczonej do sieci, w odniesieniu do jednostki długości przewodów wodociagowych (bez przyłączy domowych). W każdym systemie wodociagowym wartość

wskaźnika S zmienia się m.in. wraz ze zmianą wartości wskaźnika O_s . Jest to bardzo istotne, gdyż od 1989 r. w większości przedsiębiorstw wodociagowych w Polsce obciążenie sieci ulega ciąglemuto obniżaniu wskutek znacznego spadku zużycia i produkcji wody. Obecnie wskaźnik O_s , wg badań własnych, w niektórych miastach kształtuje się na poziomie 50+70% wartości z 1989 r.

Porównywanie stanu technicznego systemów wodociagowych na podstawie procentowych wskaźników strat prowadzi do mylnych wniosków, gdyż dla tej samej wartości jednostkowego wskaźnika S , lecz dla różnych wartości wskaźników O_s , procentowe straty wody będą przyjmowały różne wartości. Jeśli na przykład jednostkowe straty wynoszą $S=20 m^3/d\cdot km$, to w systemie o obciążeniu $O_s=157 m^3/d\cdot km$ (Brzeg) stanowią one około 13%, a w systemie o $O_s=102 m^3/d\cdot km$ (Kłodzko) około 20% objętości wody wtłoczonej do sieci (rys. 1). Z powyższego przykładu wynika ponadto, że miarodajne wnioski



Rys. 1. Zmiany wskaźników strat wody w zależności od wskaźników obciążenia sieci wodociągowych (wg badań własnych)

o wpływie innych czynników na stan techniczny sieci wodociągowych, w oparciu o jednostkowe straty wody, można uzyskać badając sieci o jednakowych lub zbliżonych wskaźnikach obciążenia (O_S).

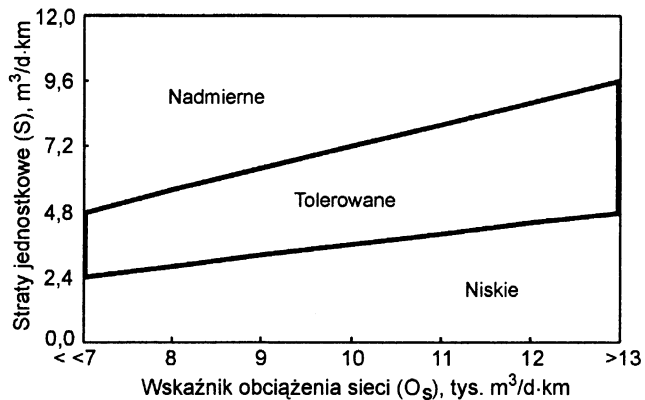
Podstawowymi przyczynami przecieków wody z sieci wodociągowej są niewłaściwy stan techniczny oraz nadmierne ciśnienia występujące w sieci. Miernikiem stanu technicznego sieci jest w tym względzie przede wszystkim jej awaryjność, uwzględniająca nie tylko częstość, ale także rodzaj i czas trwania uszkodzeń. Przecieki wody występują na skutek nieszczelności złączy, uszkodzeń rurociągów, kształtek i armatury. Przyczynami powstawania uszkodzeń (i przecieków wody) są najczęściej:

- osiadanie gruntu, ruchy tektoniczne i inne pochodzenia geologicznego,
- wady materiałowe i konstrukcyjne rur, armatury, złączy itp.,
- nadmierne obciążenie naziomu, zwłaszcza dynamiczne,
- przeciążenie wieloletnią eksploatacją,
- przemarzanie gruntu w otoczeniu rurociągu,
- uderzenia hydrauliczne,
- wysokie ciśnienie w sieci i duże jego zmiany dobowe,
- korozyjność gruntu i wody podziemnej, a także płynącej wewnątrz rurociągów,
- prądy błądzące towarzyszące trakcji elektrycznej,
- eksploatacja górnicza pokładów surowców mineralnych.

Na wysoki poziom strat wody w Polsce wpływają także wieloletnie zaniedbania w modernizacji, remontach i rozbudowie systemów wodociągowych, prowadzące do ich degradacji, a także niedbałe wykonawstwo przy budowie sieci w okresie gospodarki planowej.

Podobnie było m.in. we wschodnich landach Niemiec, gdzie przez dziesiątki lat ograniczano się jedynie do usuwania bieżących awarii, czego skutkiem jest zły stan techniczny sieci wodociągowej i znaczne straty wody. Po zjednoczeniu Niemiec podjęto działania modernizacyjne, dzięki którym częściowo zmniejszono awaryjność, ale i tak jest ona prawie trzykrotnie wyższa niż w landach zachodnich. We wschodnich landach uszkodzalność sieci magistralnej i rozdzielczej wynosi średnio 0,38 uszkodzenia na km w ciągu roku, a przyłączy – 12 uszkodzeń na 1000 przyłączy w ciągu roku, natomiast w zachodnich landach odpowiednio 0,15 uszk./km·a i 4,5 uszk./1000 przył.·a [10]. Wskutek tego we wschodnich landach straty wody są ponadtrzykrotnie wyższe niż w zachodnich (tab. 1) [8,9]. Podobnie sytuacja wygląda w częściach wschodniej i zachodniej Berlina [23].

Strategię obniżania nadmiernych strat wody realizują Niemcy już od dwudziestu lat, opracowując i wprowadzając w życie odpowiednie wytyczne zawierające informacje o metodach kontroli szczelności sieci oraz przyczynach i rozmiarach przecieków. W wytycznych z 1986 r. zawarto na przykład dane o granicznych jednostkowych stratach wody w zależności od rodzaju gruntu ($S=1,2+3,6$ m³/d·km dla gruntów piaszczystych, $S=2,4+6,0$ m³/d·km dla gruntów żwirowych i $S=4,81+4,4$ m³/d·km dla gruntów skalistych spękanych). Oprócz bieżącej aktualizacji opracowywane są nowe zalecenia, uwzględniające również wpływ obciążenia sieci (O_S) (rys. 2). Wprowadzone zostały także instrukcje dotyczące sposobu rejestracji uszkodzeń poszczególnych elementów systemów wodociągowych, z uwzględnieniem przyczyn i rodzaju uszkodzeń. Choć dotychczas nie ustalono granicznych wartości wskaźników awaryjności sieci, to normą w dużych przedsiębiorstwach jest dążenie do osiągnięcia poziomu poniżej 0,1 uszkodzenia na kilometr sieci rurociągów w ciągu roku. Za wartość krytyczną, powyżej której należy podjąć odpowiednie zabiegi renowacyjne, przyjmuje się wskaźnik $\lambda=0,5$ uszk./km·a. Dla przyłączy wodociągowych dopuszcza się wystąpienie czterech uszkodzeń w ciągu roku na 1000 przyłączy, co przy średniej długości przyłączy 12+15 m odpowiada wskaźnikowi około 0,3 uszk./km·a [18,19].



Rys. 2. Propozycja dopuszczalnych strat wody w zależności od obciążenia sieci wodociągowej [16]

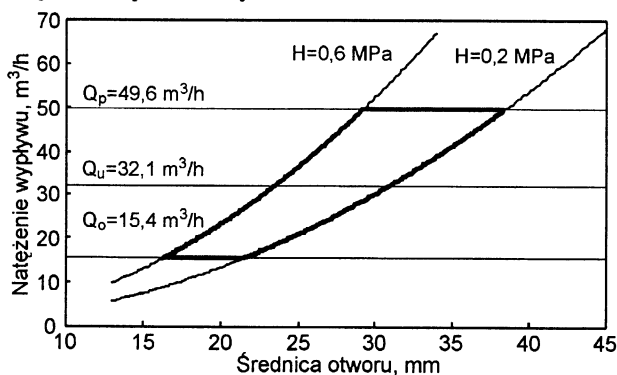
Z doświadczeń niemieckich wynika, że aby uzyskać wymierne efekty w postaci znaczącego obniżenia awaryjności sieci, strat wody i kosztów eksploatacji sieci, konieczna jest odnowa co najmniej 2% długości sieci wodociągowej rocznie we wschodnich landach i 1% w zachodnich [9].

Eksploatowane obecnie w polskich miastach sieci wodociągowe wykonane są w przeważającej większości z rur z żeliwa szarego, bez odpowiednich powłok zabezpieczających. Charakteryzuje je wysoka awaryjność, wynikająca nie tylko z kilkudziesięcioletniej eksploatacji (znaczny udział rurociągów sprzed II Wojny Światowej), ale również z ograniczeń technologicznych, wad materiałowych rur i nieodpowiedniej jakości wykonawstwa przewodów w latach 70. i 80. XX wieku [3,4,22]. Wysoka awaryjność przewodów żeliwnych, wynosząca średnio 0,2+1,0 uszkodzenia na kilometr w ciągu roku, jest główną przyczyną znacznych strat wody wskutek przecieków, gdyż przewody te stanowią od 60% do ponad 90% długości sieci.

Na podstawie braku korelacji między awaryjnością i wiekiem przewodów (w niektórych systemach wodociągowych), wysnuwane są bardzo często wnioski o dobrym stanie technicznym starych przewodów żeliwnych (sprzed 1940 r.).

Przyczyna tego tkwi najczęściej w bardzo złym stanie technicznym przewodów nowszych, wybudowanych w II połowie XX w. (dlatego taka ocena wypada na korzyść rurociągów starych). O tym, że starsze przewody (eksploatowane 60+100 lat) są bardziej zdekaptalizowane, świadczy nie tylko liczba awarii, ale i ich rodzaj, gdyż 70+100% uszkodzeń tych przewodów stanowią pęknięcia i korozja materiału rur [4, 22].

Ponieważ natężenie wypływu wody z pękniętego rurociągu (śr. 50 m³/h wg badań własnych w jednym z miast – rys.3) jest wyższe niż z uszkodzonego złącza (śr. 32 m³/h), to przy dużym udziale pęknięć i długim czasie trwania awarii straty wody mogą być znaczne. Na straty wody wpływają także krócej lub dłużej trwające wycieki przez perforacje (śr. 15 m³/h), spowodowane korozją rur. Przecieki wody z nowszych przewodów występują przeważnie na połączeniach rur. Obniżenie ich awaryjności o 40+80% uzyskano po zmniejszeniu wysokości ciśnienia w sieci i jego zmian w cyklu dobowym. W przypadku starszych rurociągów, ulegających głównie pęknięciom i korozji, spadek uszkodzalności był mniejszy i wynosił 7+45% [22]. Znaczne obniżenie strat wody można zatem uzyskać modernizując stare zdekaptalizowane przewody żeliwne, gdyż stanowią one nawet do 60% długości eksploatowanych sieci.



Rys. 3. Natężenie wypływu wody przez otwór ostrybrzeżny w zależności od średnicy otworu i ciśnienia w sieci

Podstawową przyczyną uszkodzeń i przecieków wody z przewodów stalowych jest korozja materiału rur. W systemach wodociągowych miast przewody stalowe stanowią od kilku do około 20% długości sieci, a ich awaryjność jest z reguły niższa niż przewodów żeliwnych. Szczególnie wysokimi wskaźnikami awaryjności i strat wody charakteryzują się sieci wodociągowe w miastach Górnego Śląska, w których udział rur stalowych wynosi nawet do 80% (śr. 55%), a ich żywotność nie przekracza 10+12 lat [7,24]. Głównym tego powodem jest wpływ działalności górniczej oraz wzmoczonej korozji wywołanej skażeniem wody podziemnej i gruntu wskutek dużej koncentracji przemysłu ciężkiego. Wpływ korozji zewnętrznej powoduje, że awaryjność i straty wody w miastach Górnego Śląska, leżących poza terenem szkód górniczych, są również wyższe niż w innych rejonach Polski (tab. 1).

Korozja materiału rurociągów może być przyczyną znacznych strat wody, gdy przewody ułożone są w gruntach naturalnych, wykazujących właściwości korozyjne [20], do których należą grunty rodzime organiczne (humus, torf, namuły) i grunty nasypane. Z wielu doświadczeń wiadomo, że zdarzają się przypadki zasypywania rurociągów żużlem, co prowadzi do ich korozji.

Znaczne ilości wody traczone są z systemów wodociągowych wskutek występowania tzw. ukrytych awarii, gdy woda nie pojawia się na powierzchni, lecz znajduje ujście w gruncie, np. zwirowom czy skalistym spekanym lub w kanałach ściętkowych, ciepłowniczych, telekomunikacyjnych i in. Objętość wody, która podczas awarii wpłynęła do kanałów z sieci wodociągowej w jednym z miast oszacowano na 600+9000 m³ (dla poszczególnych uszkodzeń wskutek pęknięcia rurociągów o średnicach 100 mm i 150 mm). Powstające w ten sposób straty można znacznie ograniczyć, m.in. dzięki systematycznej kontroli kanałów i powierzchni terenu oraz terenowym pomiarom szczelności rurociągów.

Wpływ ciśnienia w sieci na rzeczywiste straty wody

Podstawową przyczyną występowania rzeczywistych strat wody są przecieki powstające wskutek uszkodzeń złączy, rurociągów, kształtek i armatury sieci wodociągowej. Zarówno uszkodzenia, jak i straty wody powstają w wyniku oddziaływania na sieć wodociągową różnorodnych czynników, których stopień wpływu jest także bardzo zróżnicowany w poszczególnych systemach wodociągowych. Dlatego jedynie na podstawie systematycznych i wieloletnich badań eksploatacyjnych możliwa jest ocena działania sieci i wyodrębnienie podstawowych przyczyn powstawania uszkodzeń i strat wody.

Z badań własnych wynika, że jednym z najistotniejszych czynników (spośród dotychczas wymienionych) wpływających na straty wody jest wysokość ciśnienia panującego w sieci wodociągowej. Ciśnienie i jego zmiany w cyklu dobowym wpływają zarówno na stopień awaryjności, jak i na natężenie wypływu wody z uszkodzonych elementów sieci, bez względu na przyczyny, które te uszkodzenia spowodowały. Natężenie wypływu wody przez otwór o określonej średnicy przy ciśnieniu 0,60 MPa jest o ok. 70% większe niż przy ciśnieniu 0,20 MPa. Przy stałym ciśnieniu natężenie wypływu wody rośnie proporcjonalnie wraz ze wzrostem pola powierzchni powstałego uszkodzenia (rys. 3).

Podjęte przed kilku laty w Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, pod kierunkiem prof. Edwarda Mielcarzewicza, badania wpływu ciśnienia na uszkodzalność przewodów i sieciowe straty wody (*in situ*), a także na koszty eksploatacji nie były (i jak dotąd nie są) prowadzone w innych ośrodkach naukowych w Polsce. Wyniki dotychczasowych badań przeprowadzonych w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy i wybranych rejonach Wrocławia zaprezentowano m.in. w pracach [3,4,22,25,26]. Wykazały one, że ograniczenie maksymalnego ciśnienia w badanych systemach wodociągowych o około 10+40% i jego wahań dobowych wpłynęło na zmniejszenie uszkodzalności przewodów magistralnych i rozdzielczych o około 30+60%, a także na ograniczenie strat wody i kosztów napraw uszkodzeń. Podstawę badań stanowiły dane uzyskane z dwóch wieloletnich okresów eksploatacji sieci, tj. przed i po ograniczeniu nadwyżek ciśnienia (w stosunku do wymaganego ciśnienia eksploatacyjnego) oraz zmniejszeniu jego wahań w ciągu doby. W poszczególnych systemach wodociągowych pozostałe warunki eksploatacji nie uległy istotnej zmianie w czasie badań, co pozwala na stwierdzenie, że to właśnie wysokość ciśnienia miała najistotniejszy wpływ na zmiany wskaźników uszkodzeń i strat wody.

Do zbadania związków ilościowych między wysokością ciśnienia w sieci wodociągowej a uszkodzalnością przewodów i stratami sieciowymi wody wykorzystano wyniki badań w Brzegu, Oleśnicy i Kłodzku. W analizie tej uwzględniono uszkodzalność rurociągów magistralnych i rozdzielczych, z pominięciem uszkodzeń armatury, które stanowiły około 10% ogólnej liczby uszkodzeń. Jednostkowe straty wody (S , $m^3/d \cdot km$) określono na podstawie rocznych bilansów dostawy i zużycia wody, nie uwzględniając zużycia wody na potrzeby własne systemów. Niemożliwe było oszacowanie strat wody w badanych rejonach Wrocławia, dlatego pominięto je w ocenie. Parametry eksploatacyjne sieci wodociągowych w Oleśnicy, Brzegu i Kłodzku zamieszczono w tabeli 2.

Miasta te charakteryzują się średnią liczbą mieszkańców (30+40 tys.) i podobną długością sieci wodociągowej (68+75 km bez przyłączy). W miastach tych na 1 km sieci przypada 440+560 mieszkańców. Sieci wodociągowe charakteryzowały się zbliżonymi wartościami wskaźników obciążenia (O_s), które w czasie badań uległy obniżeniu o 31+48%, i w ostatnim roku obserwacji wynosiły około $100 m^3/d \cdot km$ w Oleśnicy i w Kłodzku oraz około $130 m^3/d \cdot km$ w Brzegu. Badane systemy wodociągowe różniły się wysokością ciśnienia, przy czym najniższe było w Oleśnicy, nieco wyższe w Brzegu, a najwyższe w Kłodzku (tab. 2).

Biorąc pod uwagę średnie wartości ciśnienia maksymalnego ($H_{max \text{ śr}}$) i uszkodzalności rurociągów ($\lambda_{\text{śr}}$) z dwóch okresów eksploatacji sieci, tj. przy nadmiernym i przy obniżonym ciśnieniu stwierdzono, że po zmniejszeniu ciśnienia o około

20% w Oleśnicy, około 10% w Brzegu i około 15% w Kłodzku, nastąpił spadek intensywności uszkodzeń rurociągów w tych miastach odpowiednio o 58%, 30% i 39% (tab. 2).

Korelacje pomiędzy uszkodzalnością przewodów i ciśnieniem w sieci, z uwzględnieniem wartości tych parametrów w poszczególnych latach obserwacji, określono tylko dla Brzegu, dzięki uzyskaniu z przedsiębiorstwa danych o zmianach ciśnienia dobowego w pompowni w latach 1991–2000. Na tej podstawie obliczono średnie roczne wartości ciśnień minimalnego (H_{min}) i maksymalnego (H_{max}). Stwierdzono, że uszkodzalność (λ , uszk./ $km \cdot a$) malała liniowo przy spadku ciśnienia maksymalnego od 0,54 MPa do 0,44 MPa według zależności (poziom istotności 0,1):

$$\lambda = 1,2H_{max} - 0,319 \quad (1)$$

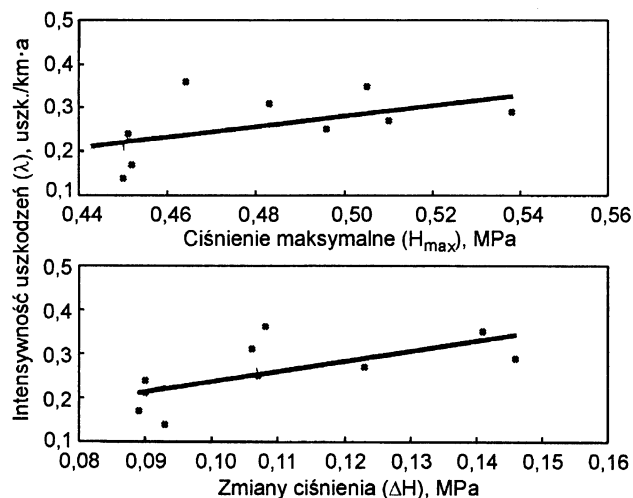
Zmniejszenie dobowych różnic ciśnienia ($\Delta H = H_{max} - H_{min}$) z wartości 0,15 MPa w 1991 r. do 0,09 MPa w 2000 r. (o 40%) miało także bardzo istotny wpływ na zmniejszenie intensywności uszkodzeń rurociągów. Zależność tę opisano funkcją (poziom istotności 0,05):

$$\lambda = 2,282\Delta H + 0,009 \quad (2)$$

Z przeprowadzonych badań i analiz jednoznacznie wynika, że ograniczenie ciśnienia maksymalnego w sieci w Brzegu o ok. 20% i jednocześnie zmniejszenie wahań ciśnienia w cyklu dobowym o ok. 40% spowodowało spadek uszkodzalności rurociągów o ok. 30% w latach 1991–2000 (rys. 4).

Tabela 2. Parametry eksploatacyjne sieci wodociągowych

Parametr, jednostka	Rok obserwacji													
	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	
Oleśnica														
Okres eksploatacji sieci, –	nadmierne ciśnienie (od 1981 r.)						obniżone ciśnienie							
Obciążenie sieci (O_s), $m^3/d \cdot km$	174,2	163,8	150,0	143,2	138,3	131,3	127,7	120,9	127,0	112,5	108,4	102,7	101,2	
Straty wody (S), $m^3/d \cdot km$	5,6	10,1	18,0	14,0	15,1	17,2	13,1	14,2	15,5	12,1	9,7	9,4	11,2	
Straty i zużycie własne (S_w), $m^3/d \cdot km$	7,6	11,1	19,5	26,0	30,2	29,6	21,7	24,9	29,0	18,4	17,1	14,1	15,3	
Intensywność uszkodzeń (λ), uszk./ $km \cdot a$	0,83	0,50	0,91	1,17	0,99	0,53	0,33	0,36	0,35	0,33	0,37	0,37	0,30	
Średnia intens. uszk. ($\lambda_{\text{śr}}$), uszk./ $km \cdot a$	$\lambda_{\text{śr}}=0,88$ ($\lambda_u=0,64$, $\lambda_p=0,24$)					$\lambda_{\text{śr}}=0,37$ ($\lambda_u=0,14$, $\lambda_p=0,23$)								
Ciśnienie maksymalne (H_{max}), MPa	0,50						0,40							
Brzeg														
Okres eksploatacji sieci, –	–			nadmierne ciśnienie					obniżone ciśnienie					
Obciążenie sieci (O_s), $m^3/d \cdot km$	–	–	–	249,7	206,3	197,0	161,6	153,4	153,3	145,0	143,0	138,1	128,9	
Straty wody (S), $m^3/d \cdot km$	–	–	–	22,1	13,1	27,5	19,7	14,0	22,0	17,7	15,9	16,5	18,8	
Straty i zużycie własne (S_w), $m^3/d \cdot km$	–	–	–	27,3	17,3	32,6	22,5	16,7	25,9	19,8	20,2	19,3	21,8	
Intensywność uszkodzeń (λ), uszk./ $km \cdot a$	–	–	–	0,29	0,27	0,25	0,31	0,35	0,36	0,17	0,24	0,14	0,21	
Średnia intens. uszk. ($\lambda_{\text{śr}}$), uszk./ $km \cdot a$	–	–	–	$\lambda_{\text{śr}}=0,30$ ($\lambda_u=0,06$, $\lambda_p=0,24$)					$\lambda_{\text{śr}}=0,21$ ($\lambda_u=0,05$, $\lambda_p=0,16$)					
Ciśnienie maksymalne (H_{max}), MPa	–	–	–	0,538	0,51	0,496	0,483	0,505	0,464	0,452	0,451	0,45	0,443	
Dobowe zmiany ciśnienia (ΔH), MPa	–	–	–	0,146	0,123	0,107	0,106	0,141	0,108	0,089	0,092	0,093	0,09	
Kłodzko														
Okres eksploatacji sieci, –	–			nadmierne ciśnienie						obniżone ciśnienie				–
Obciążenie sieci (O_s), $m^3/d \cdot km$	–	–	–	–	152,0	143,6	137,9	136,9	128,5	120,0	115,4	105,0	–	
Straty wody (S), $m^3/d \cdot km$	–	–	–	–	15,9	15,0	15,2	31,0	26,4	23,4	26,2	20,6	–	
Straty i zużycie własne (S_w), $m^3/d \cdot km$	–	–	–	–	21,2	19,5	29,5	36,1	32,7	29,8	32,4	24,7	–	
Intensywność uszkodzeń (λ), uszk./ $km \cdot a$	–	–	–	–	0,24	0,40	0,42	0,39	0,20	0,30	0,31	0,09	–	
Średnia intens. uszk. ($\lambda_{\text{śr}}$), uszk./ $km \cdot a$	–	–	–	–	$\lambda_{\text{śr}}=0,33$ ($\lambda_u=0,05$, $\lambda_p=0,28$)						0,20 (0,02, 0,18)			
Ciśnienie maksymalne (H_{max}), MPa	–	–	–	–	0,70						≤0,60			



Rys. 4. Zmiany intensywności uszkodzeń rurociągów w zależności od wysokości maksymalnego ciśnienia i od dobowych zmian ciśnienia w sieci wodociągowej Brzegu

Badanie związków ilościowych pomiędzy wysokością ciśnienia i stratami sieciowymi wody przeprowadzono dla Oleśnicy wykorzystując dane z lat 1993–2000, dla Brzegu z lat 1996–2000 i dla Kłodzka z lat 1995–1999. Z analizy wartości jednostkowych strat wody (S) wynika, że zarejestrowane w tych latach wartości odpowiadały stratom rzeczywistym, a wcześniejsze były prawdopodobnie zaniżone, głównie ze względu na niepełne opomiarowanie i ryczałtowy sposób rozliczeń z odbiorcami wody (tab. 2).

Wiarygodne dane o stratach wody pochodzą w przypadku Oleśnicy i Brzegu tylko z okresów eksploatacji przy obniżonym ciśnieniu, natomiast w Kłodzku także z części okresu eksploatacji przy nadmiernym ciśnieniu wody w sieci. Z tego względu nie można było ocenić wpływu zmian wysokości ciśnienia we wszystkich miastach na występujące w nich straty wody. Porównano zatem tylko wskaźniki strat wody występujące w systemach wodociągowych poszczególnych miast, gdyż warunki ich eksploatacji były zbliżone, a zasadnicze różnice dotyczyły jedynie panującego w nich ciśnienia.

Zmiany wskaźników strat wody (jednostkowych i procentowych), w zależności od wskaźników obciążenia sieci, w latach objętych oceną, ilustrują wykresy na rysunku 1. Korelacje między wskaźnikami S i O_s są liniowe (na poziomie istotności 0,05, z wyjątkiem Brzegu, gdzie są umiarkowane). Jak można zauważyć, jednostkowe straty wody malały wraz z obniżaniem się wskaźników obciążenia sieci wodociągowych. Przy jednakowym we wszystkich miastach obciążeniu sieci $O_s=130 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$, najniższe jednostkowe straty stwierdzono w Oleśnicy ($S=15,6 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$), nieco wyższe w Brzegu ($S=16,8 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$), a najwyższe w Kłodzku ($S=28,0 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$). Na tej podstawie można wnioskować, że najistotniejszy wpływ na straty wody miało ciśnienie, które było najniższe w Oleśnicy ($H_{\max}=0,4 \text{ MPa}$), wyższe w Brzegu ($H_{\max}=0,45 \text{ MPa}$), a najwyższe w Kłodzku ($H_{\max}=0,6+0,7 \text{ MPa}$).

Zbadano także korelacje pomiędzy wskaźnikami jednostkowych strat wody i wskaźnikami intensywności uszkodzeń rurociągów, które w każdym z miast okazały się istotne (na poziomie 0,1). Jednostkowe straty wody ($\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$) malały wraz ze spadkiem uszkodzalności ($\text{uszk./km}\cdot\text{a}$) według zależności:

– w Oleśnicy:

$$S = 4,58 + 22,37\lambda \quad (3)$$

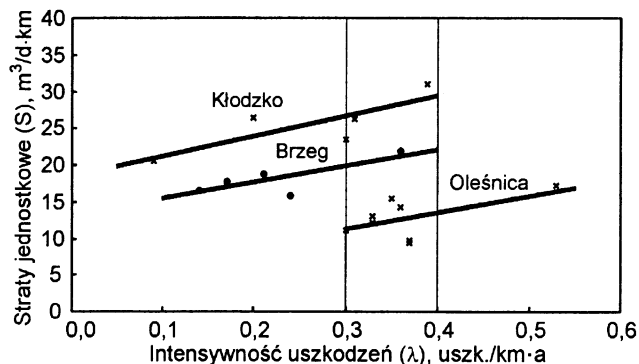
– w Brzegu:

$$S = 13,20 + 22,18\lambda \quad (4)$$

– w Kłodzku:

$$S = 18,55 + 27,02\lambda \quad (5)$$

Z ilustracji powyższych zależności widać, że w analizowanych systemach wodociągowych o zbliżonej uszkodzalności przewodów straty wody były zróżnicowane (rys. 5).



Rys. 5. Zmiany jednostkowych strat wody w zależności od intensywności uszkodzeń rurociągów

Dokonano więc porównania wartości wskaźników strat wody odpowiadających tym samym wskaźnikom uszkodzeń (dla $\lambda=0,3 \text{ uszk./km}\cdot\text{a}$ i $\lambda=0,4 \text{ uszk./km}\cdot\text{a}$) w systemach o odmiennych warunkach ciśnieniowych. Z analizy parametrów zestawionych w tabeli 3, a także wyników dotyczących przeprowadzonych badań i porównań parametrów eksploatacyjnych sieci wodociągowych jednoznacznie wynika, że podstawową przyczyną zwiększonych strat wody było wyższe ciśnienie. Dla przykładu: przy $\lambda=0,3 \text{ uszk./km}\cdot\text{a}$ w Oleśnicy, gdzie panowało najniższe ciśnienie (0,4 MPa) straty wody wynosiły $11,3 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$, zaś w Kłodzku, gdzie ciśnienie było najwyższe (0,6+0,7 MPa) straty wody były ponad 2-krotnie wyższe i wynosiły $26,6 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$.

Tabela 3. Wysokość ciśnienia i jednostkowe straty wody

Miasto	Wskaźniki strat wody (S) $\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}$		Maksymalne ciśnienie wody w sieci (H_{\max}) MPa	Udział pęknięć w ogólnej liczbie uszkodzeń %
	$\lambda=0,3$ uszk./km·a	$\lambda=0,4$ uszk./km·a		
Oleśnica	11,3	13,5	0,40	63
Brzeg	19,8	22,1	0,45	76
Kłodzko	26,6	29,4	0,6+0,7	89

Pewien wpływ na relacje między jednostkowymi stratami wody miał z pewnością także rodzaj uszkodzeń przewodów. We wszystkich systemach wodociągowych przeważały pęknięcia poprzeczne i podłużne rurociągów, w czasie których natężenie wpływu wody jest największe (rys. 3). Ich udział w ogólnej liczbie uszkodzeń był najniższy w Oleśnicy (63%), a najwyższy w Kłodzku (89%).

Przecieki wody można znacznie ograniczyć poprzez skrócenie czasu wypływu wody z uszkodzonych przewodów. W Brzegu czas od zgłoszenia awarii na sieci rozdzielczej do zamknięcia przepływu wody wynosił średnio 1,5+2,5 godz., a w wielu wypadkach 4+6 godz. Niekiedy czas zgłoszenia awarii nie pokrywał się z czasem jej wystąpienia, więc czas wypływu mógł być dłuższy. Brak danych dla pozostałych miast nie pozwolił na ocenę wpływu tego parametru na sieciowe straty wody. Wydaje się on jednak istotny także z tego względu, że znaczne ilości wody są tracone z sieci wodociągowych wskutek występowania awarii ukrytych, nie ujawniających się na powierzchni lub ujawniających się z opóźnieniem w stosunku do momentu wystąpienia uszkodzenia. W konsekwencji czas wycieku wody może być długi i trudny do ustalenia.

Podsumowanie

W trosce o ochronę dyspozycyjnych zasobów wodnych Polski należy prowadzić wszelkie działania zmierzające do ograniczenia wysokich strat wody w systemach dystrybucji, których główną przyczyną są przecieki z sieci przewodów. Należy podkreślić, że spośród wielu czynników największy wpływ na rzeczywiste straty wody ma niewłaściwy stan techniczny sieci przewodów oraz wysokość ciśnienia panującego w sieci i jego wahania w cyklu dobowym. Parametry ciśnienia wpływają zarówno na awaryjność, jak i na natężenie wypływu wody z uszkodzonych elementów, niezależnie od przyczyn wywołujących uszkodzenia.

Szczególną uwagę i środki należy zatem skierować na renowację zdekaptalizowanych sieci wodociągowych oraz na kontrolę i analizę wysokości ciśnienia wody. Z tego względu konieczne jest podejmowanie przedsięwzięć i rozwiązań minimalizujących wysokość ciśnienia i znaczne jego wahania w cyklu dobowym w eksploatowanych i projektowanych systemach wodociągowych.

LITERATURA

1. P. DOHNALIK: *Straty wody w miejskich sieciach wodociągowych*. Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, Bydgoszcz 2000.
2. H. HOTŁOŚ, E. MIELCARZEWICZ: *Dynamika zmian wskaźników zużycia i strat wody w sieciach wodociągowych wybranych miast Polski*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS, Poznań 1998, tom 1, ss. 61–72.
3. H. HOTŁOŚ: *Ograniczenie ciśnienia w sieci wodociągowej jako czynnik zmniejszający uszkodzalność i koszty napraw uszkodzeń przewodów*. GWiTS, 1999, nr 5, ss. 180–184.
4. H. HOTŁOŚ: *Wpływ modernizacji pompowni na parametry eksploatacyjne sieci wodociągowej*. *Ochrona Środowiska*, 2002, nr 4, ss. 27–31.
5. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK, W. CIEŻAK: *Problemy identyfikacji strat wody w sieciach wodociągowych*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę i jakość wód”, PZITS, Poznań–Gdańsk 2002, ss. 897–907.
6. P. DOHNALIK, T. ZAPIÓR: *Rzeczywiste straty wody w systemach wodociągowych regionu południowej Polski*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS, Poznań 1996, tom 1, ss. 509–534.
7. K. KUŚ: *Podstawy kwalifikacji sieci wodociągowej do wymiany*. Mat. konf. „Modernizacja komunalnych wodociągów i kanalizacji – aspekty finansowe, organizacyjne i techniczne”, Warszawa 1996, ss. 119–127.
8. C. MEYER, R. WEHR: *Formelmässige Bestimmung der Verlustmengen in Wasserrohrnetzen als Anteil gemessener minimaler Netzzuflüsse*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1998, Nr. 1, S. 24–31.
9. R. K. HERZ: *Erneuerungsbedarf kommunaler Wasserrohrnetze in den östlichen Bundesländern. Ergebnisse einer Untersuchung*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1999, Nr. 13, S. 54–60.
10. D. SCHMIDT: *Zulässige Schadensrate in Wasserrohrnetzen aus Sicht der Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit am Beispiel des Versorgungsgebietes Erfurt*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1999, Nr. 1, S. 45–50.
11. H. J. IRLE, R. WEHR: *Systematische Reduzierung von Wasserverlusten*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1990, Nr. 5, S. 286–292.
12. R. WEHR, B. SCHNICHEL: *Reduzierung der Wasserverluste durch grossräumige Netzüberprüfung am Beispiel der Wasserversorgung Bonn*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1993, Nr. 6, S. 330–335.
13. W. HOCH: *Zonenmessung zur Ermittlung von Wasserverlusten*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1999, Nr. 13, S. 76–82.
14. *National Reports: Water demand management and conservation including water losses control*. *Water Supply* 2000, Vol. 18, No. 1/2.
15. T. ASKEW, M. KALINOWSKI: *Przecieki wody – praktyczna konieczność?* Mat. konf. „Modernizacja komunalnych wodociągów i kanalizacji – aspekty finansowe, organizacyjne i techniczne”, Warszawa 1996 (suplement).
16. D. WEIMER: *Technische und wirtschaftliche Bewertungskriterien für Wasserverluste*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1999, Nr. 13, S. 83–90.
17. L. M. BUIE: *Accounting for lost water*. *Journal AWWA*, 2000, Vol. 92, No. 7, pp. 67–71.
18. M. BUCKLER, R. SATTLER: *DVGW-Schadenstatistik Wasser, erste Auswertung und Umsetzung*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1999, Nr. 13, S. 48–53.
19. G. KOPISCHKE: *Erneuerungsbedarf öffentlicher Wasserrohrnetze aus Sicht eines Versorgungsunternehmens*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1999, Nr. 13, S. 61–64.
20. H. J. IRLE: *Zusammenhänge von Wasserverlusten, Bodenaggressivität und Schadenshäufigkeit in Rohrnetzen erdverlegter Rohrleitungen aus Stahl*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1984, Nr. 4, S. 163–169.
21. H. SCHIMECZEK: *Permanente Rohrnetzüberwachung (PRÜ). Ein Verfahren zur Früherkennung von Lecks in Wasserrohrnetzen*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1993, Nr. 6, S. 322–325.
22. H. HOTŁOŚ: *Badania eksploatacyjne wpływu wysokości ciśnienia i materiału rur na uszkodzalność sieci wodociągowej*. *GWiTS*, 2002, nr 11, ss. 402–407.
23. L. PAWLOWSKI: *Die Wasserversorgung Berlins. 10 Jahre nach dem Fall der Mauer*. *GWF Wasser-Abwasser*, 1999, Nr. 11, S. 763–768.
24. F. PIECHURSKI: *Przyczyny i ocena awaryjności rozdzielczej sieci wodociągowej*. *Rynek Instalacyjny*, 1999, nr 5, ss. 11–17.
25. H. HOTŁOŚ: *Wpływ czasu eksploatacji i wysokości ciśnienia w sieci wodociągowej wybranego rejonu Wrocławia na uszkodzalność przewodów żeliwnych*. *GWiTS*, 1999, nr 4, ss. 129–132.
26. H. HOTŁOŚ: *Wpływ wysokości ciśnienia na uszkodzalność i koszty napraw sieci wodociągowej*. *Ochrona Środowiska*, 2001, nr 2, ss. 31–34.

Hotłoś, H. Analysis of Water Losses in Water Supply Systems in Poland. *Ochrona Środowiska* 2003, Vol. 25, No. 1, pp. 17–24.

Abstract: The analysis has been based on the author's own observations and on the results reported by other investigators. In Poland, losses in the water supply system account for over 50% of the total volume of the water produced. What contributes to the actual water loss is leakage to the ground due to joint, pipe, fitting and plumbing damage. The main cause of the high failure rate and the resulting water loss is the bad condition of the pipeline and the high water pressure. Many year's investigations into the relationship between the pressure head, failure rate and water loss in pipelines have been carried out for a number of water supply systems in service. The results have revealed that when the pressure head and pressure variations decrease, so do the failure rates and the resulting water losses. In one of

the investigated systems, where the maximum pressure in the pipe network and the daily pressure was reduced by about 20% and 40%, respectively, in the time span of 1991–2000, the rate of failure decreased, thus reducing water loss due to leakage by about 15%. In all of the investigated water-pipe networks, the values of the water loss parameters decreased linearly with the decrease in the pipe damage indicator values. With the same indicators of pipe damage, water loss in the pipe system with a maximal pressure of 0.6 MPa was twice as high as in the system with a 0.4 MPa maximal pressure. The results have substantiated the need of replacing or rehabilitating grey cast-iron pipes (which show the highest failure rate) and minimizing the pressure head in the water-pipe networks which are in service or under design.

Keywords: Water supply system, water losses, pipe damage, pipe failure rate.