

Halina Hotłoś

Analiza kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych we Wrocławiu

Znajomość i możliwość prognozowania kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych jest w praktyce przydatna m.in. do:

- planowania, z kilkuletnim wyprzedzeniem, środków finansowych na naprawę sieci,
- podejmowania optymalnych decyzji w zakresie eksploatacji i modernizacji sieci wodociągowej, z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego,
- oszacowania kosztów osiągnięcia wymaganego poziomu niezawodności systemu dystrybucji wody.

Zakres i metodyka badań

W większości polskich miast naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych dokonywane są przez własne brygady przedsiębiorstw wodociągowych. Koszty prowadzonych w ten sposób napraw są najczęściej trudne do określenia. W niniejszej pracy wykorzystano dane dotyczące Wrocławia [1], gdzie, ze względu na długą sieć przewodów, MPWiK sp. z o. o. zleca część napraw uszkodzeń specjalistycznym firmom. Na podstawie udostępnionych przez przedsiębiorstwo kosztorysów powykonawczych, sporządzonych przez firmy dokonujące napraw, określono koszty robocizny oraz ilość i rodzaj użytych do naprawy materiałów, które zapewnił zleceniodawca. Po uwzględnieniu kosztów materiałów możliwe było obliczenie całkowitych kosztów naprawy uszkodzeń, z podziałem na średnice i rodzaj uszkodzeń rurociągów i armatury.

Badania obejmowały koszty naprawy (systemem zleconym) przewodów magistralnych i rozdzielczych (średnice od 80 mm do 1200 mm) we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. Częściowe wyniki badań i analiz zostały przedstawione m.in. w pracach [2–8]. Celem niniejszej pracy, w której wykorzystano ogółem 600 danych o kosztach naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych, było zbadanie:

- korelacji między kosztem naprawy a rodzajem uszkodzenia, średnicą i głębokością ułożenia rurociągów,
- korelacji między kosztem naprawy a rodzajem uszkodzenia armatury (zasuw i hydrantów) sieci wodociągowej,
- tendencji zmian kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń rurociągów i armatury w czasie badań, z uwzględnieniem zmiany wskaźników cen (tj. inflacji).

Wyniki badań i analiz wykorzystano następnie do oceny wpływu wysokości ciśnienia na wartości wskaźników intensywności uszkodzeń rurociągów i armatury oraz wartości

wskaźników kosztów naprawy sieci w wybranych systemach wodociągowych, a także do opracowania metodyki prognozowania wartości wskaźników kosztów naprawy sieci wodociągowych, z kilkuletnim wyprzedzeniem. Zagadnienie to będzie przedmiotem oddzielnej publikacji.

Koszty naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej

Na ogólny koszt naprawy uszkodzenia składał się koszt zastosowanych materiałów i sprzętu oraz koszt robocizny (prace przygotowawcze – zamontowanie i demontaż oznakowania drogowego oraz zabezpieczenia miejsca prowadzenia prac itp., rozbiórka i odtworzenie nawierzchni, wykonanie wykopu, zasypanie wykopu wraz z zagęszczeniem, odwodnienie wykopu, oświetlenie miejsca robót, niekiedy skuwanie lodu, naprawa lub wymiana uszkodzonego elementu, płukanie i odpowietrzenie rurociągu). Koszt naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej zależy od wielu różnorodnych czynników, takich jak:

- rodzaj przewodów (średnica, materiał, stan techniczny),
- typ uszkodzonych elementów,
- rodzaj i wielkość uszkodzeń,
- zagłębienie przewodów, warunki gruntowe i wodne,
- rodzaj pokrycia terenu,
- czas i miejsce awarii,
- sposób organizacji naprawy itp.

Na koszty naprawy uszkodzeń przewodów wpływają także wskaźniki wzrostu (inflacja) lub spadku (deflacja) cen. Na potrzeby analizy wskaźniki cen w latach 1991–2003 (tab. 1) przyjęto według danych GUS [9].

Tabela 1. Wskaźniki cen produkcji budowlano-montażowej [9]

Rok	Wskaźnik cen, %
1991	147,4
1992	117,2
1993	124,6
1994	119,7
1995	121,9
1996	119,2
1997	114,2
1998	112,9
1999	108,6
2000	107,9
2001	103,8
2002	101,2
2003	98,9

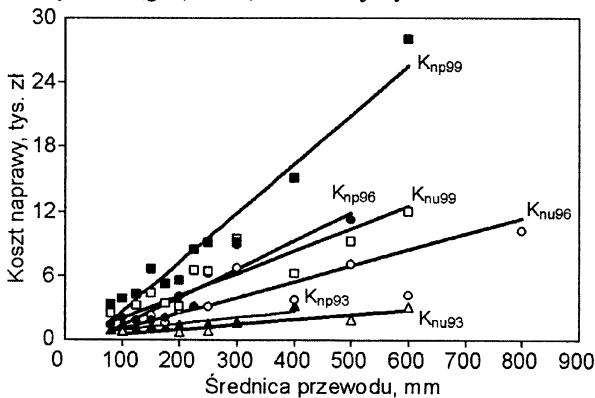
rok poprzedni = 100%

Koszty naprawy uszkodzeń rurociągów

Na podstawie danych z obserwacji obliczono średnie, w poszczególnych latach badań (1993, 1996, 1999), jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń (tj. koszty naprawy jednego uszkodzenia), z uwzględnieniem średnicy rurociągów oraz rodzaju ich uszkodzeń. Wyróżniono dwa elementy kosztów:

- koszt naprawy uszkodzenia złącza (K_{nu}),
- koszt naprawy pęknięcia (poprzecznego, podłużnego) lub perforacji wywołanej korozją materiału rur (K_{np}).

Analizowane przypadki uszkodzeń złączy dotyczyły wyłącznie połączonych kielichowych rurociągów żeliwnych, zaś przypadki pęknięć lub perforacji dotyczyły w 91% rurociągów żeliwnych, a w 9% rurociągów ze stali, PVC i azbestocementu. Zbadano i stwierdzono korelacje (na poziomie istotności α) pomiędzy kosztami naprawy (dla powyższych rodzajów uszkodzeń) a średnicą przewodów. W każdym analizowanym roku koszt naprawy (K_n , zł) wzrastał liniowo wraz ze wzrostem średnicy rurociągu (d , mm), co ilustruje rysunek 1.



Rys. 1. Średnie jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów (K_{nu} , K_{np}) z obserwacji we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r.

Średni jednostkowy koszt naprawy uszkodzenia złącza kielichowego przewodów żeliwnych (K_{nu}) rósł wraz ze wzrostem średnicy, niezależnie od głębokości ułożenia, według zależności:

– w 1993 r.:

$$K_{nu} = 4,4985d + 95,33$$

$$d = 100 \div 600 \text{ mm } (\alpha < 0,01) \quad (1)$$

– w 1996 r.:

$$K_{nu} = 14,76d - 438,512$$

$$d = 80 \div 1200 \text{ mm } (\alpha < 0,001) \quad (2)$$

– w 1999 r.:

$$K_{nu} = 20,76764d$$

$$d = 80 \div 600 \text{ mm } (\alpha < 0,001) \quad (3)$$

Dla wspólnego (w trzech latach badań) zakresu średnic przewodów, koszty naprawy złączy rurociągów o średnicy 500 mm były 4÷7-krotnie wyższe od kosztów naprawy rurociągów o średnicy 100 mm. Koszt materiałów użytych przy usuwaniu uszkodzeń złączy, tj. głównie doszczelniaczy połączeń kielichowych, wynosił średnio 5÷14% całkowitych kosztów naprawy złączy w 1996 r. i 1999 r. Największy udział w ogólnych kosztach stanowiły koszty wykopów, które rosły wraz ze wzrostem średnicy przewodów i stanowiły od 20% do ponad 80% tych kosztów. Ocena wpływu głębokości ułożenia przewodów (h) na koszty naprawy złączy (K_{nu}) w 1993 r. i w 1999 r. nie była możliwa, ze względu na zbyt małą liczbę

obserwacji uwzględniających głębokość ułożenia przewodu. Jedynie analiza danych z 1996 r. wykazała, że średnie koszty naprawy złączy rurociągów ułożonych na głębokości większej od 2 m p.p.t. ($K_{nu,h>2}$) były wyższe od kosztów naprawy dla głębokości do 2 m ($K_{nu,h\leq 2}$). Dla rurociągów o średnicach 80÷800 mm stwierdzono, że $K_{nu,h>2} = (1,0 \div 1,6) K_{nu,h\leq 2}$.

W czasie prowadzonych badań stwierdzono znaczący wzrost kosztów naprawy uszkodzeń złączy rur. Szczegółowa analiza wykazała, że głównym tego powodem były wysokie wskaźniki cen produkcji (tj. inflacja), zwłaszcza w pierwszej połowie lat 90. Do oceny wpływu wskaźników wzrostu cen na wzrost kosztów naprawy złączy przewodów wykorzystano dane o kosztach naprawy uzyskane z obserwacji (zależności (1)–(3)) (rys. 1) oraz dane o wskaźnikach cen według GUS (tab. 1). Na tej podstawie obliczono wartości kosztów naprawy złączy z uwzględnieniem (potrąceniem) wskaźników wzrostu cen, które odniesiono do poprzedniego roku badań. Uzyskane w ten sposób wartości kosztów w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. były odpowiednio 2,15-, 1,74- i 1,40-krotnie mniejsze od kosztów wynikających z obserwacji i rosły liniowo wraz ze wzrostem średnicy przewodów według następujących zależności ($R=1$):

– w 1993 r.:

$$K_{nu} = 2,09054d + 44,12$$

$$d = 100 \div 600 \text{ mm} \quad (4)$$

– w 1996 r.:

$$K_{nu} = 8,483d - 252,439$$

$$d = 80 \div 1200 \text{ mm} \quad (5)$$

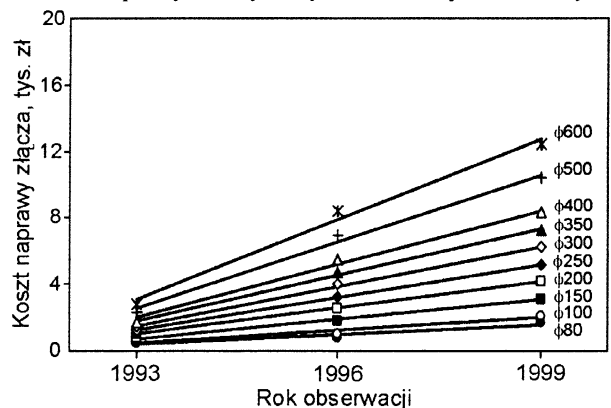
– w 1999 r.:

$$K_{nu} = 14,833d$$

$$d = 80 \div 600 \text{ mm} \quad (6)$$

Wskaźniki wzrostu kosztów naprawy złączy, z uwzględnieniem średnicy przewodów, oraz udział inflacji w przyroście kosztów obliczono w oparciu o wartości wyznaczone z zależności funkcyjnych opisujących zmiany kosztów w czasie badań. Koszty naprawy rurociągów, zarówno z obserwacji (rys. 2), jak i po potrąceniu inflacji, rosły liniowo w czasie badań.

Stwierdzono, że w latach 1993–1999 średni wskaźnik wzrostu kosztów naprawy uszkodzeń złączy (niezależnie od średnicy przewodów) wyniósł 4,27 i był prawie dwukrotnie wyższy od wskaźnika wzrostu cen produkcji wynoszącego 2,44. Wzrost kosztów naprawy złączy w tym okresie spowodowany był



Rys. 2. Jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń złączy (K_{nu}) w zależności od średnicy rurociągów w czasie obserwacji

w ok. 70% wzrostem cen produkcji, a w ok. 30% – prawdopodobnie większym wzrostem kosztów materiałów i usług związanych z naprawą elementów sieci wodociągowej, niż uwzględnianym przez GUS wzrostem „cen reprezentantów robót realizowanych przez dobrane w sposób celowy podmioty gospodarcze zaliczane do sekcji Budownictwo” [9].

Średni jednostkowy koszt naprawy pęknięcia lub perforacji (K_{np}) rósł wraz ze wzrostem średnicy rurociągów (d), niezależnie od głębokości ich ułożenia, według zależności:

– w 1993 r.:

$$K_{np} = 5,5792d + 413,11$$

$$d = 80+400 \text{ mm } (\alpha < 0,01) \quad (7)$$

– w 1996 r.:

$$K_{np} = 26,11d - 1247,90$$

$$d = 80+500 \text{ mm } (\alpha < 0,001) \quad (8)$$

– w 1999 r.:

$$K_{np} = 45,689d - 1868,4$$

$$d = 80+600 \text{ mm } (\alpha < 0,001) \quad (9)$$

Dla wspólnego (w trzech latach badań) zakresu średnic przewodów, koszty naprawy (K_{np}) rurociągów o średnicy 400 mm były wielokrotnie wyższe od kosztów naprawy rurociągów o średnicy 80 mm i wynosiły (rys. 1):

– w 1993 r.:

$$K_{np400} = 3,1K_{np80} \quad (10)$$

– w 1996 r.:

$$K_{np400} = 10,9K_{np80} \quad (11)$$

– w 1999 r.:

$$K_{np400} = 9,2K_{np80} \quad (12)$$

Koszt materiałów użytych do naprawy pęknięć poprzecznych czy wżerów korozyjnych rur, tj. nasuwek naprawczych, wynosił średnio 5+15% kosztów całkowitych w 1996 r. i 3+7% w 1999 r. W wypadku pęknięć podłużnych, których naprawa polegała na wymianie uszkodzonego odcinka rury i założeniu dwóch nasuwek, koszt materiałów był wyższy i stanowił średnio 25+40% całkowitych kosztów (K_{np}) w 1996 r. oraz 7+35% w 1999 r. Koszt wykopów stanowił 20+60% kosztów całkowitych.

Powyzsza analiza dotyczyła kosztów naprawy wszystkich uszkodzeń wskutek pęknięć i perforacji przewodów, niezależnie od głębokości ich ułożenia. Teoretycznie, wraz ze wzrostem głębokości ułożenia koszt naprawy przewodu o określonej średnicy jest wyższy, gdyż rosną koszty wykopów, które mają decydujący wpływ na koszty ogólne. Potwierdziły to częściowo dane z obserwacji w 1999 r. [6], z których wynika, że w wypadku większości średnic rurociągów koszty naprawy pęknięć były wyższe dla głębokości ułożenia przewodów $h > 2$ m p.p.t. niż dla $h \leq 2$ m p.p.t. Nie uzyskano jednak istotnych korelacji między kosztami i głębokością ułożenia przewodów, gdyż nie dysponowano odpowiednią liczbą obserwacji – po uwzględnieniu średnicy, rodzaju uszkodzenia i zagłębienia przewodów, a także w niektórych wypadkach koszty naprawy były wyższe przy mniejszym zagłębieniu. Dotyczyło

to uszkodzeń, których usunięcie wymagało dodatkowych kosztów związanych np. z kilkakrotnym poszukiwaniem miejsca uszkodzenia, czy też zamrożeniem gruntu. Na koszt naprawy rurociągów ma także wpływ rodzaj pęknięcia (poprzeczne, podłużne). Z powodów wymienionych wyżej, istotne zależności stwierdzono jedynie dla obserwacji z 1999 r.:

– koszt naprawy pęknięcia poprzecznego lub perforacji:

$$K_{np} = 2163 + 15,32d$$

$$d = 80+300 \text{ mm } (\alpha \approx 0,05) \quad (13)$$

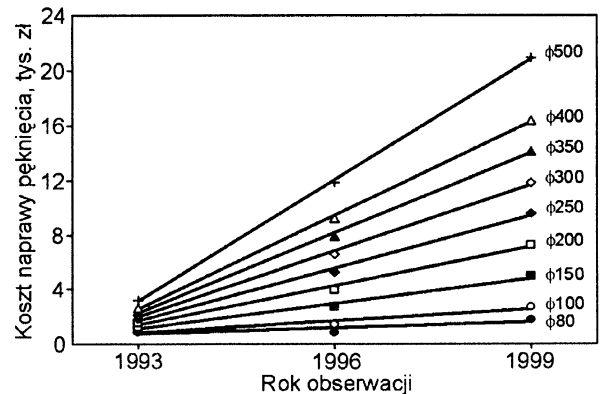
– koszt naprawy pęknięcia podłużnego:

$$K_{np} = 1808 + 37,2967d$$

$$d = 80+300 \text{ mm } (\alpha \approx 0,05) \quad (14)$$

Porównując wartości obliczone z powyższych wzorów można stwierdzić, że niezależnie od głębokości ułożenia przewodów, koszty naprawy pęknięć podłużnych rurociągów o średnicach 80+300 mm były 1,4+2-krotnie wyższe od kosztów naprawy pęknięć poprzecznych (lub perforacji) rur, głównie wskutek konieczności wykonania większego wykopu.

W okresie objętym badaniami wielokrotnie wzrosły koszty naprawy pęknięć rurociągów, niezależnie od głębokości ich ułożenia oraz rodzaju pęknięcia (rys. 3), przy czym decydujący wpływ miała tu inflacja.



Rys. 3. Jednostkowe koszty naprawy pęknięć lub perforacji (K_{np}) w zależności od średnicy rurociągów w czasie obserwacji

Obliczone w każdym roku obserwacji koszty naprawy (K_{np}), uwzględniające wskaźniki wzrostu cen (odniesione do poprzedniego roku badań), były znacznie niższe od uzyskanych z obserwacji i rosły liniowo wraz ze wzrostem średnicy (d) według zależności ($R=1$):

– w 1993 r.:

$$K_{np} = 2,5932d + 191,63$$

$$d = 80+400 \text{ mm} \quad (15)$$

– w 1996 r.:

$$K_{np} = 15,004d - 717,38$$

$$d = 80+500 \text{ mm} \quad (16)$$

– w 1999 r.:

$$K_{np} = 32,64d - 1334,83$$

$$d = 80+600 \text{ mm} \quad (17)$$

Z analizy zmian kosztów uzyskanych z obserwacji w latach 1993–1999 oraz obliczonych z uwzględnieniem inflacji wynika, że:

– wskaźnik wzrostu kosztów naprawy pęknięć rurociągów o średnicy 400 mm wynosił 6,4 i był prawie 3-krotnie wyższy do wskaźnika wzrostu kosztów naprawy rurociągów o średnicy 80 mm, wynoszącego 2,3,

– wskaźniki wzrostu kosztów naprawy pęknięć rurociągów były prawie w każdym wypadku wyższe od wskaźnika wzrostu cen według GUS, który w latach 1993–1999 wynosił 2,44,

– przyrost kosztów naprawy pęknięć rurociągów w badanym okresie spowodowany był w 98% dla rur o średnicy 80 mm i w 60% dla rur o średnicy 400 mm wzrostem wskaźników cen, czyli inflacją,

– analizując zmiany struktury udziału inflacji oraz innych czynników we wzroście kosztów naprawy w latach 1993–1996 i 1996–1999 można zauważyć wzrost udziału inflacji (pomimo spadku jej wskaźników) w przyroście kosztów naprawy analizowanych uszkodzeń.

Podsumowując analizę kosztów naprawy rurociągów należy stwierdzić, że zależały one przede wszystkim od rodzaju uszkodzenia, średnicy i zagłębienia przewodów oraz od wskaźników wzrostu cen. Średnie koszty naprawy pęknięć rurociągów we Wrocławiu były wyższe od kosztów naprawy uszkodzeń złączy i dla przewodów o średnicach 100÷500 mm wynosiły $K_{np}=(1,3\div 2,0)K_{nu}$.

Koszty naprawy uszkodzeń armatury

W wypadku uszkodzeń armatury wyróżniono dwa elementy kosztów:

- koszt naprawy (K_{ZN}) i wymiany (K_{ZW}) zasuw,
- koszt naprawy (K_{HN}) i wymiany (K_{HW}) hydrantu.

Koszt naprawy zasuw (K_{ZN}) o średnicach 80÷400 mm w poszczególnych latach badań w niewielkim stopniu zależał od ich średnicy (brak istotnej zależności) i wynosił średnio 430 zł, 1400 zł i 3000 zł, odpowiednio w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. Wzrost (7-krotny) kosztów naprawy zasuw w czasie badań był wyższy od wzrostu wskaźników cen (2,44), a udział inflacji w przyroście kosztów naprawy stanowił 56%. Koszt materiałów użytych do naprawy zasuw stanowił do 10% całkowitych kosztów (K_{ZN}).

Koszt wymiany zasuw (K_{ZW}) w poszczególnych latach obserwacji rósł wraz ze wzrostem średnicy następująco (rys. 4):

– w 1993 r.:

$$K_{ZW} = \exp(5,94861 + 0,00728d) \\ d = 80\div 250 \text{ mm } (\alpha < 0,01) \quad (18)$$

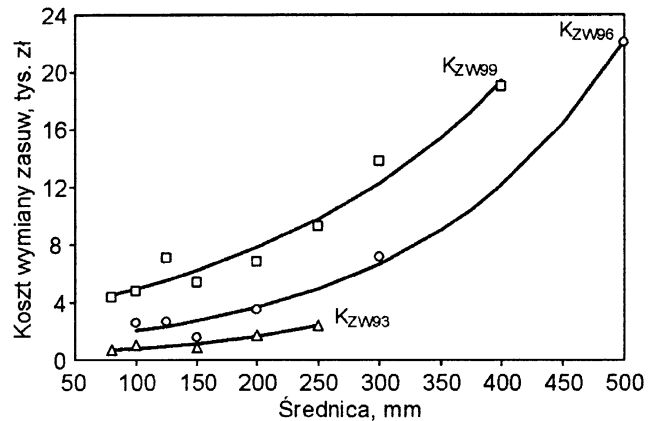
– w 1996 r.:

$$K_{ZW} = \exp(7,00609 + 0,005997d) \\ d = 100\div 500 \text{ mm } (\alpha < 0,001) \quad (19)$$

– w 1999 r.:

$$K_{ZW} = \exp(8,05338 + 0,004545d) \\ d = 80\div 400 \text{ mm } (\alpha < 0,001) \quad (20)$$

Koszt wymiany zasuw o średnicy 250 mm był 2÷3,5-krotnie wyższy od kosztu dla średnicy 80 mm. Po uwzględnieniu wskaźników wzrostu cen (2,15, 1,74, 1,40 odpowiednio w 1993 r., 1996 r. i 1999 r.), koszty wymiany były niższe i rosły wykładniczo wraz ze wzrostem średnicy zasuw według zależności ($R \approx 1$):



Rys. 4. Średnie jednostkowe koszty wymiany zasuw (K_{ZW}) z obserwacji we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r.

– w 1993 r.:

$$K_{ZW} = \exp(5,182831 + 0,00728d) \\ d = 80\div 250 \text{ mm} \quad (21)$$

– w 1996 r.:

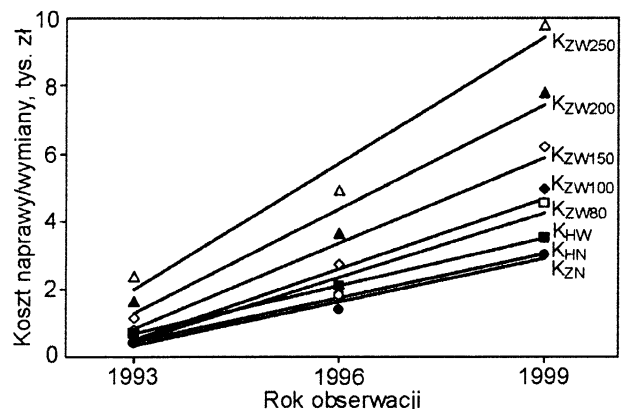
$$K_{ZW} = \exp(6,452219 + 0,005997d) \\ d = 100\div 500 \text{ mm} \quad (22)$$

– w 1999 r.:

$$K_{ZW} = \exp(7,716912 + 0,004545d) \\ d = 80\div 400 \text{ mm} \quad (23)$$

Wskaźniki wzrostu kosztów wymiany zasuw o średnicach 80÷250 mm w badanych latach wynosiły 6,6÷4,1. Powodem dużego wzrostu kosztów była inflacja, której udział w przyroście kosztów wymiany stanowił 54÷66%, oraz wysokie koszty zakupu zasuw, zwłaszcza od zagranicznych producentów. Koszt materiałów (głównie zasuw) stanowił od 20÷50% (dla średnic 80÷400 mm) całkowitych kosztów wymiany zasuw.

Koszty naprawy hydrantów (K_{HN}) były porównywalne z kosztami naprawy zasuw w danym roku obserwacji (rys. 5) i wynosiły średnio 400 zł, 1800 zł, 3000 zł, odpowiednio w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. Udział wskaźników wzrostu cen we wzroście kosztów naprawy, jak i wymiany hydrantów wynosił ok. 60%. Koszt wymiany hydrantów (K_{HW}) był wyższy od kosztu jego naprawy o wartość (cenę) hydrantu i wynosił około 670 zł, 2080 zł, 3500 zł, odpowiednio w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. Koszt materiałów stanowił średnio 24% całkowitych kosztów wymiany.



Rys. 5. Jednostkowe koszty naprawy i wymiany zasuw (K_{ZN} , K_{ZW}) oraz hydrantów (K_{HN} , K_{HW}) w czasie obserwacji

Analiza wskaźników kosztów naprawy uszkodzeń wybranych sieci wodociągowych

Znajomość kosztów naprawy różnych rodzajów uszkodzeń przewodów i armatury wodociągowej oraz intensywności ich uszkodzeń umożliwia określenie wskaźników kosztów naprawy (κ) w odniesieniu do określonych odcinków przewodów, części lub całej sieci wodociągowej. Wskaźnik κ (nazywany wskaźnikiem strumienia kosztów naprawy) oznacza koszty naprawy uszkodzeń przewodów w przeliczeniu na jednostkę długości sieci w jednostce czasu i jest wyrażany w zł/km·a. Wskaźnik ten jest iloczynem intensywności uszkodzeń (λ) i jednostkowego kosztu naprawy (K_n) określonego rodzaju uszkodzenia rozważanych elementów. Metodę określenia wskaźnika κ oraz całkowitych rocznych kosztów naprawy uszkodzeń (K , zł/a) przedstawiono w pracach [4,5]. Należy podkreślić, że obliczenie wskaźników i całkowitych kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej (w zależności od parametrów charakteryzujących sieć i od warunków jej eksploatacji) możliwe jest jedynie tam, gdzie prowadzona jest co najmniej kilku- czy kilkunastoletnia rejestracja obejmująca:

- uszkodzenia sieci wodociągowej (przyczyny, skutki, liczba uszkodzeń elementów sieci), z uwzględnieniem m.in. materiału i średnicy przewodów, rodzaju uszkodzeń, roku budowy itp.,

- długości rurociągów (z podziałem na materiał i średnice) oraz liczby i rodzaje zabudowanej armatury,

- jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń elementów sieci wodociągowej, z uwzględnieniem rodzaju i wielkości elementów oraz rodzaju ich uszkodzeń.

W oparciu o powyższe dane można m.in. zbadać wpływ parametrów charakteryzujących sieć, jak i warunki jej eksploatacji, na koszty naprawy sieci. Analizę taką przeprowadzono na przykładzie systemów wodociągowych kilku miast, w których podjęto działania, dzięki którym ograniczono nadwyżki ciśnienia oraz zmniejszono jego dobowe wahania w sieci wodociągowej [2–8]. W rezultacie obniżeniu uległa zarówno intensywność uszkodzeń, jak i koszty naprawy przewodów wodociągowych.

Stałe jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń

Ocenę wpływu zmiany wysokości ciśnienia w sieci wodociągowej na koszty naprawy uszkodzeń przewodów w Brzegu, Kłodzku, Oleśnicy i w wybranych rejonach Wrocławiu przeprowadzono przez porównanie średnich wartości wskaźnika kosztów naprawy uszkodzeń (κ_s) w pierwszym okresie eksploatacji sieci (I), w którym utrzymywane było wysokie ciśnienie, ze średnimi wartościami tego wskaźnika w drugim okresie eksploatacji (II), tj. w warunkach obniżonego ciśnienia.

Założenia wyjściowe przyjęte do obliczeń wskaźników strumienia kosztów naprawy rurociągów (κ_{sr}) oraz armatury (κ_{sa}) były następujące:

- intensywność uszkodzeń rurociągów, z uwzględnieniem ich średnicy i rodzaju uszkodzeń (λ_u – intensywność uszkodzeń złączy, λ_p – intensywność pęknięć lub perforacji rur), przyjęto jako wartości średnie w poszczególnych okresach eksploatacji [2–8],

- wartości wskaźnika κ_{sa} (dla zasuw i hydrantów ogółem) określono w oparciu o liczbę uszkodzeń (ze względu na brak możliwości oceny intensywności uszkodzeń w większości analizowanych miast) w dwóch okresach badań [2–8],

- jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń rurociągów (K_n) oraz naprawy (K_N) i wymiany (K_W) armatury, w rozbięciu na

średnice i rodzaj uszkodzeń, przyjęto stałe w obydwu okresach eksploatacji badanych systemów i równe wartościom z obserwacji we Wrocławiu w 1999 r. (ze względu na brak rejestracji kosztów w pozostałych miastach objętych programem badań).

Wyniki obliczeń wartości wskaźnika kosztów naprawy rurociągów (κ_{sr}) w badanych systemach wodociągowych zawarto w tabeli 2, a armatury (κ_{sa}) i przewodów ogółem ($\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa}$) – w tabeli 3. Stwierdzono, że skutek znaczącego obniżenia ogólnej intensywności uszkodzeń (λ) rurociągów (dzięki ograniczeniu nadwyżek ciśnienia i jego dobowych wahań) nastąpił także istotny spadek wartości średniego wskaźnika strumienia kosztów ich naprawy (κ_{sr}) (tab. 2). Większy spadek wartości κ_{sr} niż λ wynikał głównie z faktu, że w II okresie znacznemu ograniczeniu uległa uszkadzalność rurociągów o większych średnicach, których jednostkowy koszt naprawy był wyższy. Można zatem stwierdzić, że zmniejszenie ciśnienia o 10+40% oraz jego wahań dobowych w badanych systemach dystrybucji wody [4–8] spowodowało spadek intensywności uszkodzeń rurociągów o 30+58% oraz strumienia kosztów naprawy o 42+58% (tab. 2).

Na koszty naprawy sieci wodociągowej składają się także koszty naprawy uszkodzeń armatury. Mimo iż koszt naprawy jednego uszkodzenia zasuw czy hydrantu jest z reguły niższy od kosztu naprawy uszkodzenia rurociągu (zwłaszcza o dużej średnicy), to przy dużym udziale uszkodzeń armatury w ogólnej liczbie uszkodzeń sieci wpływ kosztów tych napraw może być znaczny. Przykładem może być Wrocław, gdzie uszkodzenia zasuw i hydrantów stanowiły 40+57% ogólnej liczby uszkodzeń, a wartość wskaźnika strumienia kosztów ich naprawy wynosiła 27+55% wartości wskaźnika ogólnego. W pozostałych systemach wodociągowych wskaźnik κ_{sa} był niewielki i stanowił 7+15% wskaźnika κ_s (tab. 3). Sieć wodociągowa we Wrocławiu (rejon 1 i 2) charakteryzowała się ponadto najwyższymi wartościami wskaźników κ_s spośród badanych systemów wodociągowych. Wynikało to zarówno z dużej intensywności uszkodzeń (λ) rurociągów (tab. 2), jak i wysokiej awaryjności armatury (tab. 3).

Powyższą analizę przeprowadzono przy założeniu stałych w czasie kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń przewodów.

Zmienne jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń

Ponieważ koszty naprawy uszkodzeń zmieniają się w czasie, dlatego do oceny i porównania zmian intensywności uszkodzeń i rzeczywistych wskaźników kosztów naprawy sieci w okresie obserwacji obliczono odpowiednie wskaźniki dla 2 rejonu sieci wodociągowej we Wrocławiu w odniesieniu do 1993 r., 1996 r. i 1998 r. Jednostkowe koszty naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń rurociągów i armatury z obserwacji w 1993 r. i 1996 r. obliczono ze wzorów (1), (2), (7), (8), (18) i (19), natomiast w odniesieniu do 1998 r. określono je z zależności funkcyjnych opisujących zmiany kosztów naprawy poszczególnych rodzajów uszkodzeń w okresie obserwacji (rys. 2, 3, 5).

Charakterystyczne wartości wskaźników uszkodzeń i kosztów naprawy rurociągów i armatury zestawiono w tabeli 4.

Z porównania wartości wskaźników wynika, że we Wrocławiu – pomimo spadku lub niewielkiego wzrostu intensywności uszkodzeń – w latach 1993–1998 nastąpił znaczny wzrost wskaźników kosztów naprawy, głównie z powodu ponaddwukrotnego (2,24) wzrostu wskaźników cen (inflacji).

Tabela 2. Średnie wartości intensywności uszkodzeń (λ) i wskaźników kosztów (κ_s, K) naprawy rurociągów (bez armatury) w dwóch okresach eksploatacji sieci wodociagowych (poziom kosztów z 1999 r. we Wrocławiu)

Miasto	Okres badań	Intensywność uszkodzeń uszk./km-a			Strumień kosztów naprawy zł/km-a			Całkowity roczny koszt naprawy uszkodzeń rurociągów, zł/a		
		złącza λ_u	pęknięcia λ_p	ogółem λ	złącza κ_{su}	pęknięcia κ_{sp}	ogółem κ_{sr}	złącza K_u	pęknięcia K_p	ogółem K_r
Brzeg	I (I 1991–VIII 1996)	0,06	0,24	0,30	206	1002	1208	14935	72741	87676
	II (IX 1996–XII 2000)	0,05	0,16	0,21	176	528	704	13083	39362	52445
	II/I	0,83	0,67	0,70	0,85	0,53	0,58	0,87	0,54	0,60
Kłodzko	I (I 1992–VIII 1997)	0,05	0,28	0,33	174	1144	1318	11029	72530	83559
	II (IX 1997–XII 1999)	0,02	0,18	0,20	78	680	758	5340	46407	51747
	II/I	0,40	0,64	0,61	0,45	0,59	0,57	0,48	0,64	0,62
Oleśnica	I (I 1981–XII 1992)	0,64	0,24	0,88	2391	1332	3723	120709	67248	187957
	II (I 1993–XII 2000)	0,14	0,23	0,37	581	974	1555	37900	63519	101419
	II/I	0,22	0,96	0,42	0,24	0,73	0,42	0,31	0,94	0,54
Wrocław (rejon 1)	I (I 1990–XII 1994)	0,33	0,77	1,10	2369	3704	6073	96686	151164	247850
	II (I 1995–VI 1997)	0,25	0,37	0,62	1736	1453	3189	71241	59607	130848
	II/I	0,76	0,48	0,56	0,73	0,39	0,52	0,74	0,39	0,53
Wrocław (rejon 2)	I (I 1990–XII 1994)	0,30	0,57	0,87	2253	2925	5178	77762	100974	178736
	II (I 1995–XII 1998)	0,14	0,47	0,61	506	1841	2347	17806	64781	82587
	II/I	0,47	0,82	0,70	0,22	0,63	0,45	0,23	0,64	0,46

Tabela 3. Liczba uszkodzeń i średni strumień kosztów naprawy rurociągów i armatury w dwóch okresach eksploatacji sieci wodociagowych

Miasto	Okres badań	Liczba uszkodzeń, szt.			Średni strumień kosztów naprawy, zł/km-a		
		rurociągi	armatura	ogółem	rurociągi κ_{sr}	armatura κ_{sa}	ogółem $\kappa_s = \kappa_{sr} + \kappa_{sa}$
Brzeg	I (I 1991–VIII 1996)	123 (91)	12 (9)	135	1208 (92)	107 (8)	1315
	II (IX 1996–XII 2000)	68 (86)	11 (14)	79	704 (85)	120 (15)	824
Kłodzko	I (I 1992–VIII 1997)	119 (88)	16 (12)	135	1318 (89)	155 (11)	1473
	II (IX 1997–XII 1999)	32 (97)	1 (3)	33	758 (92)	68 (8)	826
Oleśnica	I (I 1981–XII 1992)	530	–	–	3723	–	–
	II (I 1993–XII 2000)	191 (91)	18 (9)	209	1555 (93)	107 (7)	1662
Wrocław (rejon 1)	I (I 1990–XII 1994)	179 (60)	117 (40)	296	6073 (73)	2266 (27)	8339
	II (I 1995–VI 1997)	64 (45)	78 (55)	142	3189 (54)	2671 (46)	5860
Wrocław (rejon 2)	I (I 1990–XII 1994)	120 (43)	161 (57)	281	5178 (59)	3620 (41)	8798
	II (I 1995–XII 1998)	86 (44)	111 (56)	197	2347 (45)	2818 (55)	5165
Opole	1996–2001	228 (90)	26 (10)	254	627 (92)	54 (8)	681

Wartości w nawiasach – udział w ogólnej liczbie uszkodzeń przewodów lub w ogólnym wskaźniku kosztów naprawy (%)

Tabela 4. Wartości wskaźników uszkodzeń i wskaźników kosztów naprawy rurociągów i armatury we Wrocławiu (rejon 2) w czasie obserwacji

Rok obserwacji	Wskaźnik uszkodzeń i kosztów naprawy rurociągów			Wskaźnik uszkodzeń i kosztów naprawy armatury		
	λ uszk./km-a	κ_{sr} zł/km-a	K_r zł/a	λ_a uszk./a	κ_{sa} zł/km-a	K_a zł/a
1993	0,83	1077	37705	0,148	900	31486
1996	0,65	1498	52688	0,058	1564	55025
1998	0,94	2607	94909	0,042	1863	65560

Dla przykładu, w 1998 r. intensywność uszkodzeń rurociągów wynosiła $\lambda_{98}=1,13\lambda_{93}$, zaś strumień kosztów naprawy wzrósł do wartości $\kappa_{sr98}=2,50\kappa_{sr93}$. W wypadku armatury wartość wskaźnika κ_{sa} wzrosła dwukrotnie, pomimo 3,5-krotnego spadku wartości wskaźnika λ_a . Przyrost wartości wskaźników kosztów naprawy w analizowanym okresie spowodowany był dla rurociągów w 63% inflacją, a w 37% innymi czynnikami, natomiast dla armatury – w 100% inflacją.

Podsumowanie

Jednostkowe koszty naprawy uszkodzeń zależą przede wszystkim od średnicy przewodów (rosną wraz ze wzrostem średnicy) oraz od rodzaju uszkodzeń rurociągów i armatury. Największe koszty występują w wypadku naprawy pęknięć podłużnych rur. Stwierdzony we Wrocławiu znaczny wzrost jednostkowych kosztów naprawy w okresie prowadzonych badań spowodowany był w dużej mierze bardzo wysoką inflacją.

W celu obniżenia wartości wskaźników kosztów naprawy, a więc i całkowitych kosztów usuwania uszkodzeń, należy przede wszystkim ograniczać awaryjność przewodów i armatury wodociągowej – głównie poprzez modernizację istniejących systemów wodociągowych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na kontrolę i analizę wartości i zmian ciśnienia w sieci.

Przedsiębiorstwa wodociągowe powinny prowadzić systematyczne badania i analizy uszkodzeń oraz kosztów naprawy, bowiem ich wyniki można wykorzystać w praktyce do planowania – z kilkuletnim wyprzedzeniem – środków finansowych na naprawę sieci. Znajomość i możliwość prognozowania jednostkowych kosztów naprawy oraz wskaźników uszkodzeń przewodów jest także konieczna do opracowania strategii odnowy sieci wodociągowej, polegającej m.in. na określeniu górnej granicy opłacalności ekonomicznej naprawy uszkodzeń, powyżej której bardziej opłacalna jest renowacja, a nawet wymiana przewodów.

LITERATURA

1. Materiały źródłowe dotyczące kosztów naprawy uszkodzeń sieci wodociągowej systemem zleconym we Wrocławiu w 1993 r., 1996 r. i 1999 r. MPWiK sp. z o. o. we Wrocławiu (prace nie publikowane).
2. E. MIELCARZEWICZ, H. PEŁKA, H. HOTŁOŚ, Z. LEWICKI: Optymalne programowanie eksploatacji (renowacji) sieci wodociągowych ze względu na ich sprawność hydrauliczną i niezawodność działania. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, raporty serii SPR, nr 27, Wrocław 1993 (praca nie publikowana).
3. H. HOTŁOŚ, E. MIELCARZEWICZ: Intensywność uszkodzeń i koszty napraw przewodów sieci wodociągowych. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1996, nr 1, ss. 25–28.
4. H. HOTŁOŚ, E. MIELCARZEWICZ: Badania wskaźników niezawodności sieci wodociągowych oraz ich wpływu na koszty eksploatacji sieci w wybranych miastach. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, raporty serii SPR, nr 70, Wrocław 1997 (praca nie publikowana).
5. H. HOTŁOŚ: Ograniczenie ciśnienia w sieci wodociągowej jako czynnik zmniejszający uszkodzalność i koszty napraw uszkodzeń przewodów. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1999, nr 5, ss. 180–184.
6. H. HOTŁOŚ: Badania wpływu warunków eksploatacji sieci wodociągowych na ich wskaźniki niezawodności i wskaźniki kosztów napraw. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, raporty serii SPR, nr 31, Wrocław 2000 (praca nie publikowana).
7. H. HOTŁOŚ: Wpływ wysokości ciśnienia na uszkodzalność i koszty napraw sieci wodociągowej. Ochrona Środowiska, 2001, nr 2, ss. 31–34.
8. H. HOTŁOŚ: Wpływ modernizacji pompowni na parametry eksploatacyjne sieci wodociągowej. Ochrona Środowiska, 2002, nr 4, ss. 27–31.
9. Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej. GUS, Warszawa 1992–2004.

Hotłóś, H. Analysis of Damage Repair Costs for the Water Distribution System of Wrocław. *Ochrona Środowiska* 2005, Vol. 27, No. 2, pp. 37–43.

Abstract: Knowing the costs of water pipe repair (or having the possibility to predict them) enables planning, several years in advance, the expenditure on the repair and retrofit of the networks in service. Analysis included the unit costs of damage repair in water mains and in the water distribution system (80 to 1200 mm pipe diameters) for the city of Wrocław in 1993, 1996 and 1999. Determined were the following relationships: the correlation between repair costs, type of damage, pipe diameter and depth at which the pipes were laid; the correlation between the type of damage of the pipe fittings (valves, hydrants); trends in repair cost variations for particular types of damage in water-pipes and pipe fittings observed in the course of the study, consideration being also given to the variations in

the price indexes (due to inflation). The unit costs of damage repair were found to depend primarily on the pipe diameter (increasing with the diameter), as well as on the type of damage in the pipeline and the pipe fittings. The highest were the costs involved in the repair of pipes marked with longitudinal cracks. It was also found that the frequent rise in the unit costs of damage repair should be attributed primarily to the high inflation rate in Poland in the nineteen-nineties. The comparison of the water-pipe networks of several municipalities (which was also based on the analysis of network damage indexes) has shown reverse relationship to pressure head drop and its daily variations. The pressure that was reduced by 10 to 40% decreased the pipeline failure and the mean annual repair cost indexes by 30 to 58% and 42 to 58%, respectively.

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