

Ryszarda IWANEJKO<sup>1</sup>

## ANALIZA USZKADZALNOŚCI SIECI WODOCIĄGOWYCH DWÓCH WYBRANYCH MIAST POLSKI POŁUDNIOWEJ

W artykule przeprowadzono analizę niezawodnościową sieci wodociągowych dwóch wybranych miast położonych w południowo-wschodnim rejonie Polski. Niedaleko siebie leżące miasta oznaczone symbolami A i B należą o grupy miast średnich. Ich liczby ludności mieszczą się bowiem w zakresie od 10 do 20 tysięcy mieszkańców. Przedsiębiorstwa wodociągowe tych miast eksploatują sieci wodociągowe o różnych długościach oraz różnej strukturze materiałowej i wiekowej. Służby eksploatacyjne wodociągów obu miast rejestrują awarie w podobny, tradycyjny sposób. W artykule prowadzono analizy dla lat 2005-2012. Najpierw dla każdego z miast przeanalizowano bilans wody. Następnie przeprowadzono wieloaspektową analizę uszkodzeń sieci (mi.in. ze względu na czas, miejsce ich występowania, rodzaj sieci, materiał przewodu, przyczynę i typ uszkodzenia, czas trwania naprawy). Wyznaczono wskaźniki uszkodzalności sieci (również w różnych aspektach). Pomimo, że pewne cechy miast A i B są podobne, to jednak charakterystyki uszkodzalności ich sieci wodociągowych bardzo się różnią. W mieście B przeciętnie w ciągu roku odnotowywano ponad 9-cio krotnie więcej awarii sieci niż w mieście A. Same wartości uszkodzalności  $\lambda_0$  nie stanowiły jeszcze wystarczającej podstawy do stwierdzenia, że sieć wodociągowa miasta B jest w dużo gorszym stanie. Dodatkowo porównano wartości jednostkowych strat wody w sieci. Przeprowadzono też wnikliwą analizę baz danych zawierających informacje o awariach w miastach A i B. W rezultacie stwierdzono odmienne, skrajnie różne, zasady rejestrowania awarii w obu miastach. Przeprowadzone analizy wskazują na celowość wprowadzenia pewnych jednolitych zasad rejestrowania awarii. Taka standaryzacja pozwoliłaby na bardziej obiektywną i wiarygodną ocenę stanu sieci wodociągowej.

**Słowa kluczowe:** sieć wodociągowa, awarie, uszkodzalność, wskaźniki

### 1. Krótka charakterystyka wybranych miast

Z terenu Polski południowej wybrano dwa miasta, które w dalszej części będą oznaczane symbolami A i B. Miasta położone są w województwie małopolskim, w podobnym terenie i oddalone są od siebie nie więcej niż o 50 km.

<sup>1</sup> Ryszarda Iwanejko, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 12 6282552, riw@vistula.wis.pk.edu.pl

Liczby ludności w obu miastach są zbliżone i w ciągu ostatnich lat uległy podobnej zmianie (wahania do 0,5% w stosunku do roku poprzedniego). Miasto A na koniec 2012 roku liczyło 11,2 tys. stałych mieszkańców [7]. Ze względu na walory miasta A, czasowo przebywa tam wiele turystów, wczasowiczów i kuracjuszy. Szacuje się, że łącznie z noclegów w A rocznie korzysta dodatkowo ok. 120 tys. osób. Natomiast miasto B z końcem 2012 liczyło 15,2 tys. mieszkańców [9]. W mieście A istnieje niewiele drobnych i nieuciążliwych zakładów przemysłowych, a w mieście B istnieją nieliczne zakłady przemysłu lekkiego.

## 2. Systemy wodociągowe wybranych miast

### 2.1. Podsystemy dostawy wody

W mieście A produkcja wody oparta jest na dwóch ujęciach powierzchniowych. Dodatkowo działają źródła wód podziemnych i studnie głębinowe. Średni pobór wody wynosi ok. 4000 m<sup>3</sup>/d. Istniejąca duża nadwyżka możliwości produkcyjnych, przekraczająca 50%  $Q_{d \max}$ , wynika z zasobności obszaru oraz z konieczności zapewnienia dostawy dobrej wody nie tylko dla mieszkańców, lecz również dla odwiedzających miasto gości. Woda przeznaczona do zasilania wodociągu magazynowana jest w zbiornikach o łącznej pojemności prawie 1 700 m<sup>3</sup> [6].

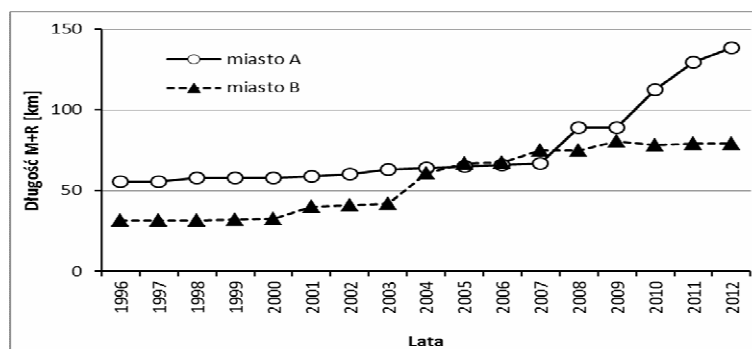
Miasto B posiada tylko jedno źródło wody na pobliskiej rzece. Średnia produkcja wody aktualnie kształtuje się na poziomie ok. 2400 m<sup>3</sup>/d. Ponieważ obszar zasilania w wodę charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem terenu, utworzone zostały trzy strefy ciśnienia, do których woda jest dostarczana poprzez trzy pompownie wody uzdatnionej. W systemie wodociągowym istnieją 3 zbiorniki. Pierwszy to zbiornik wody surowej o pojemności 1500 m<sup>3</sup>, który pełni rolę osadnika, a w czasie wyłączenia źródła wody, może stanowić rezerwę na ok. 5 godzin. Dwa pozostałe zbiorniki to zlokalizowane na terenie miasta zbiorniki wody uzdatnionej pełniące rolę zbiorników wyrównawczych. Ich łączna pojemność wynosi 900 m<sup>3</sup> [3].

### 2.2. Podsystemy dystrybucji wody

Zgodnie z „Ustawą o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę” sieć wodociągową stanowią przewody magistralne (M) i rozdzielcze (R). Choć przyłącza (P) nie wchodzi w skład sieci wodociągowej, to jednak uwzględnianie ich w analizach pracy i uszkodzalności sieci jest uzasadnione, a nawet konieczne.

Rozbudowa sieci wodociągowej miasta A na większą skalę została zapoczątkowana w latach 50-tych ubiegłego wieku. Większe modernizacje sieci zostały przeprowadzone w latach 2006-2012 (rys.1). Długość przewodów magistralnych w roku 2012 osiągnęła 18,8 km a rozdzielczych 119,7 km. Od roku 2007 daje się zauważyć stały przyrost łącznej długości tych przewodów. Wskutek rozbudowy i modernizacji sieci, łączna długość przyłączy (P) jest trudna do

określenia. Wiadomo jedynie, że w roku 2012 liczba przyłączy wyniosła 2458. Również nie do końca rozpoznana jest struktura materiałowa sieci. Eksploatator ocenia, że sieć magistralna w ok. 50% jest wykonana z żeliwa, w 40% ze stali w a 10% z PE. Sieć rozdzielcza w ok. 50% jest z żeliwa, w 30% z PE, w 10% ze stali i w 10% z PCW. Przyłącza w ok. 50% są ze stali, w 40% z PE i w 10% z żeliwa. Również częściowo rozpoznana jest struktura wiekowa sieci. Najwięcej jest przewodów nowych nie przekraczających 10 lat co stanowi prawie 56% długości sieci. Ocenia się, że w wieku powyżej 15 lat jest 40% długości wszystkich przewodów. W sieci występują przewody o średnicy do 400 mm. Miejska sieć wodociągowa składa się z sześciu pierścieni obejmujących centrum miasta i sieci promienistej występującej na jego obrzeżach [6].



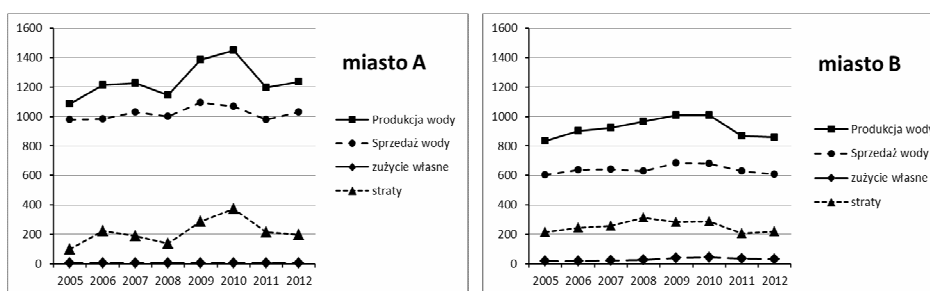
Rys. 1. Zmiany długości przewodów magistralnych i rozdzielczych w miastach A i B

Fig. 1. Changes in lengths of water mains and distribution lines in the cities A and B

W mieście B w roku 2012 cała sieć wodociągowa wraz z przyłączami osiągnęła długość 126,8 km. Od roku 2005 przybyło ok. 19,6 km przewodów. Obecnie przewody magistralne (M) mają długość 11 km, rozdzielcze (R) 68,3 km a podłączenia (P) 47,5 km. W roku 2012 wszystkich przyłączy było 2504 sztuk. Przewodów magistralnych i rozdzielczych łącznie jest o 59,2 km mniej niż w mieście A. Struktura materiałowa przewodów wodociągowych jest rozpoznana tylko częściowo. Ocenia się, że przewody żeliwne o długości ok. 20,5 km stanowią 25,9% długości sieci wodociągowej, stalowe – 17,2% (13,6 km), przewody z PE – 32,4% (25,7 km), z PCW – 19,7% (15,6 km) a azbestocementowe zaledwie 0,4% (0,3 km). Nieznany jest materiał ok. 4,5% długości sieci (1,4 km). Przyłącza są wykonane z PE, PCW i stali, jednak nie jest bliżej znany procentowy rozkład tych materiałów. Szacuje się, że ok. 48% sieci wodociągowej liczy nie więcej niż 10 lat. Jest to sieć mieszana pierścieniowo-promienista. Największą średnicą jest 273 mm [3].

### 3. Składowe bilansu wody

Liczba stałych mieszkańców miasta A jest niższa od liczby mieszkańców miasta B o 4 tys. osób, co stanowi ok. 26% ludności B. Jednak ze względu na duże turystyczne, wypoczynkowe i uzdrowiskowe walory miasta A, a stąd ze względu na praktycznie całoroczne zainteresowania pobytem w tym mieście, zapotrzebowanie na wodę jest tam znacznie wyższe niż zapotrzebowanie na wodę w mieście B. Przykładowo w roku 2012 produkcja wody dla A była o ok. 44% wyższa niż produkcja wody dla miasta B.



Rys. 2. Graficzne przedstawienie składowych rocznych bilansów wody dla miast A i B

Fig. 2. Components of the annual water balances in the cities A and B

Wszystkie składowe bilansów wody dla miast A i B przedstawiono na rys.2, przy czym dla lepszej wizualnej oceny zachowano tę samą skalę. Dla obu miast dają się zauważyć podobne wahania produkcji i zużycia wody. Można powiedzieć, że do roku 2010 była rosnąca tendencja produkcji wody. W roku 2011 nastąpił znaczny spadek produkcji wody w stosunku do roku poprzedniego: w mieście A o ok. 17,3% a w mieście B o ok. 13,9%. Spadek produkcji wody wynika przede wszystkim ze spadku zapotrzebowania na wodę.

W mieście A w roku 2012 ok. 83,4% ilości produkowanej wody zostało sprzedanej, jedynie 0,6% produkowanej wody wodociągi zużyły na cele własne (np. płukanie sieci), a ok. 16% stanowiła woda niedochodowa, czyli tzw. straty wody w sieci. Prawie 41,3% sprzedawanej wody zużywają gospodarstwa domowe, zaledwie 11,6% zużywa drobny przemysł a 39,3% jest zużywane na tzw. cele inne (np. usługi hotelarskie, sanatoryjne) [6].

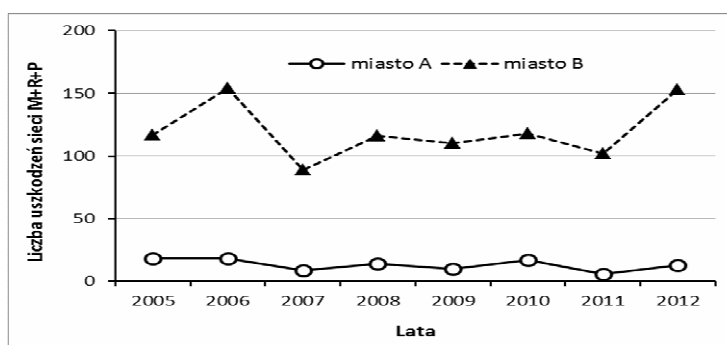
W mieście B w roku 2012 sprzedano ok. 70,9% ilości produkowanej wody. Na cele własne wodociągi zużyły wody 3,8%, a straty wody w sieci osiągnęły poziom ok. 25,3%. Gospodarstwa domowe zużywają 56,8% sprzedawanej ilości wody, przemysł ok. 22% a 21,2% sprzedawanej wody jest zużywanej na cele inne (cele komunalne, placówki oświaty, instytuty, urzędy itp.) [3].

#### 4. Awarie sieci wodociągowych

W obu miastach zgłaszane awarie ewidencjonowane są w sposób tradycyjny tj. w postaci ręcznych wpisów w przeznaczonych do tego celu rejestrach prowadzonych odrębnie dla każdego roku. W rejestrze najczęściej są notowane: data, ulica, materiał, średnica, rodzaju przewodu, miejsce, przyczyna i sposób jej usunięcia oraz ekipa dokonująca naprawy. Sporządzany jest również odrębny szkic sytuacyjny lub dołączane są zdjęcia. Przeprowadzenie analizy awarii przewodów wodociągowych wymagało utworzenia elektronicznej bazy danych w EXCELU [3,6].

Poniżej przedstawiono wybrane fragmenty analiz uszkodzeń przewodów wodociągowych miast A i B przeprowadzonych z uwzględnieniem zmienności w czasie, miejsca i przyczyny występowania awarii.

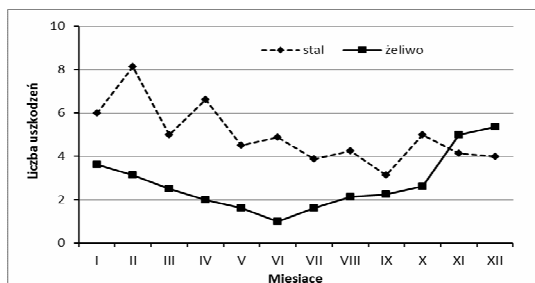
W latach 2005-2012 w miastach A i B zanotowano łącznie odpowiednio 107 i 986 uszkodzeń sieci wodociągowych. Pomimo, że sieć wodociągowa miasta B jest krótsza niż miasta A, to liczba awarii w B jest nieproporcjonalnie większa niż w A (rys.3). W mieście A liczba awarii w latach 2005-2012 nie przekraczała 20 w ciągu roku. Liczba awarii w mieście B wahała się od 92 do 161, a średnia liczba wyniosła 123,25.



Rys.3. Liczby awarii sieci wodociągowej i przyłączy w okresie 2005-2012 w miastach A i B

Fig. 3. Failures of water supply systems and connections in the cities A and B, the years 2005-2012

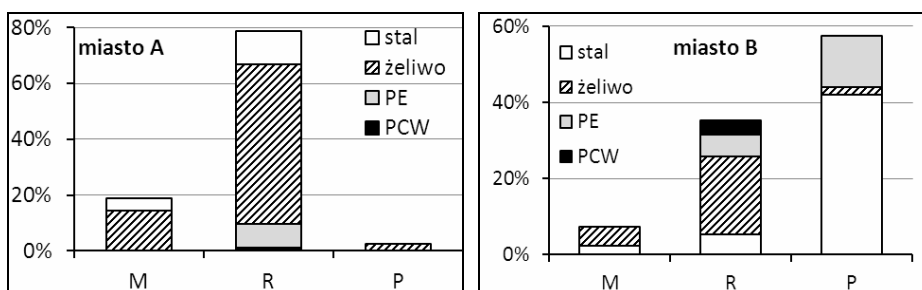
W mieście A w ciągu miesiąca występowała przeciętnie jedna awaria, a w mieście B przeciętnie 10 awarii, przy czym w okresie letnim awarii było prawie dwukrotnie mniej niż w okresie zimowym. W mieście B stwierdzono wyraźny wpływ pory roku na uszkodzenia przewodów żeliwnych i stalowych (rys. 4) oraz brak wpływu pory roku na powstawanie uszkodzeń na przewodach sztucznych (PCW, PE). Przewody żeliwne uszkadzały się późną jesienią, zimą i na wiosnę. W miesiącach listopad i grudzień występowało prawie 5-cio krotnie więcej awarii przewodów żeliwnych niż w miesiącu czerwcu. Przewody stalowe najrzadziej uszkadzały się w okresie od maja do sierpnia.



Rys. 4. Średnie miesięczne liczby awarii przewodów żeliwnych i stalowych w mieście B

Fig. 4. Average monthly failures of steel and cast iron pipes in the city B

W mieście A w latach 2005-2012 uszkodzeniu najczęściej ulegały przewody sieci rozdzielczej (~76% uszkodzeń) i przewody sieci magistralnej (~18%) (rys.5). Uszkodzenia połączeń stanowiły zaledwie 3% wszystkich uszkodzeń, hydrantów ok 1%, a w 2% przypadków zapisy w rejestrach danych nie pozwalały na jednoznaczną identyfikację miejsca awarii. Najwięcej uszkodzeń wystąpiło na przewodach żeliwnych (ok. 68,5% wszystkich awarii). Prawie czterokrotnie mniej uszkodzeń (ok. 17,9%) wystąpiło na przewodach stalowych. Na przewodach z PE i PCW wystąpiło niewiele uszkodzeń (odpowiednio ok. 8,3% i 1,1%). Dla części awarii (ok. 3,7%) nie określono materiału przewodu.



Rys. 5. Procentowy rozkład liczby uszkodzeń z równoczesnym uwzględnianiem rodzaju i materiału przewodu w miastach A i B

Fig. 5. Percentage distribution of failures for different pipes and pipe materials in the cities A and B

W mieście B dominującym miejscem występowania awarii były przede wszystkim przyłącza wodociągowe. Na przyłączach wystąpiło aż 57,3% wszystkich awarii, z czego zdecydowana większość wystąpiła na przewodach stalowych (rys.5). Najczęściej uszkodzenia przyłączy spowodowane były zamarznięciami i występowały w miesiącach zimowych i wiosennych (od grudnia do kwietnia). Na sieci rozdzielczej wydarzyło się ok. 35,4% wszystkich awarii, z czego większość na przewodach żeliwnych. Na przewodach magistralnych wydarzyło się

7,3% awarii. Na przewodach o średnicy do 150 mm wystąpiło ok. 91,5% wszystkich uszkodzeń. Uszkodzenia najczęściej występowały na przewodach stalowych (ok. 49,7% wszystkich uszkodzeń sieci), żeliwnych (27,5%) i PE (19,1%). Najmniej uszkodzeń odnotowano na przewodach z PCW (3,7%).

Najczęstszą przyczyną uszkodzenia wszystkich przewodów w mieście A były pęknięcia (ok. 40% wszystkich uszkodzeń), wypchnięcia (ok. 21%) i nieuszczelnienia (ok. 20%). W przypadku rur żeliwnych najczęstszą przyczyną były pęknięcia (prawie 40% uszkodzeń przewodów żeliwnych), nieuszczelnienia (24,6%) oraz wypchnięcia uszczelnienia (24,5%). Dla przewodów stalowych najczęstszymi przyczynami awarii były korozja (39,3%) i pęknięcia (24,5%). Przewody z PE najczęściej ulegały pęknięciom (75%) i uszkodzeniom mechanicznym (18,8%).

Najczęstszą przyczyną uszkodzenia wszystkich przewodów w mieście B było zużycie (ok. 22% wszystkich uszkodzeń), korozja (21,7%), pęknięcia (15,3%) i zamarznięcia (13,8%). Najczęstszą przyczyną niesprawności przewodów stalowych była korozja, powodująca 38% awarii tych przewodów oraz zamarznięcia (23%). Przyczyną uszkodzeń przewodów żeliwnych w ok. 46% było zużycie, w 30% złamania a w 11% pęknięcia. Przewody z PE podlegały pęknięciom (38,2%), zamarznięciom (ok. 14%) i uszkodzeniom mechanicznym (11,5%).

## 5. Uszkodzalność przewodów wodociągowych

Do oceny stanu technicznego przewodów wodociągowych wykorzystuje się wskaźnik  $\lambda_0$  zwany uszkodzalnością, awaryjnością lub jednostkową intensywnością uszkodzeń. Wyznacza się go jako

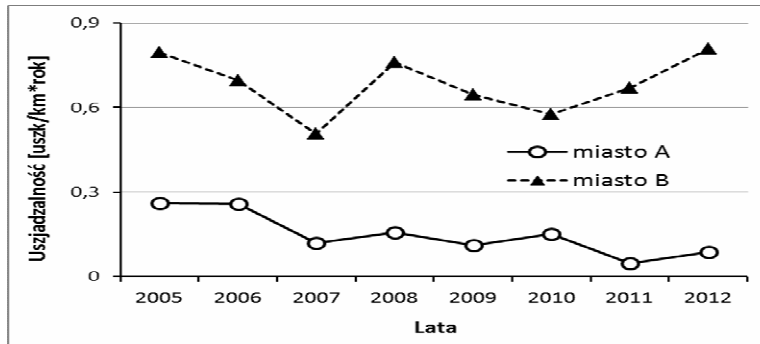
$$\lambda_0 = \frac{u}{L \cdot \Delta t} \quad (1)$$

gdzie  $u$  – liczba uszkodzeń przewodów zaistniałych na długości  $L$  w czasie  $\Delta t$ . W krajach Europy zachodniej najczęściej przyjmuje się, że przekroczenie wartości  $\lambda_0=1$ [uszk/km-rok] powinno kwalifikować przewód do odnowy. Istnieje też ostrzejsze kryterium:  $\lambda_0=0,5$ [uszk/km-rok] [2]. Dla przyłączy przyjmuje się, że liczba 3-4 uszkodzeń w ciągu roku na 1000 przyłączy ( $U$ ) jest stanem normalnym [7]. Dla warunków polskich zostały zaproponowane wartości graniczne zależne od rodzaju przewodu [4]:

- dla sieci magistralnych (M)  $\lambda_0 \leq 0,3$  [uszk/km · rok],
- dla sieci rozdzielczej (R)  $\lambda_0 \leq 0,5$  [uszk/km · rok],
- dla podłączeń domowych (P)  $\lambda_0 \leq 1,0$  [uszk/km · rok].

Poniżej dla miast A i B wyznaczono uszkodzalność przewodów ze względu na ich rodzaj, materiał oraz lokalizację.

Wyznaczone uszkodzalności magistralnych i rozdzielczych przewodów wodociągowych dla miast A i B różnią się znacznie. Łączna uszkodzalność przewodów magistralnych i rozdzielczych (M+R) miasta B w dwóch ostatnich



Rys. 6. Uszkodzalności przewodów magistralnych i rozdzielczych miast A i B

Fig. 6. Failure rates for water mains and distribution lines in the cities A and B

latach była o rząd wyższa niż w mieście A (rys.6). Co więcej, można by mówić o wzrostowej tendencji uszkodzalności w mieście B od roku 2010. Dla miasta A można mówić o niewielkiej tendencji spadkowej uszkodzalności w całym okresie 2005-2012.

Dla miasta A i dla lat 2005-2012 średnia uszkodzalność przewodów magistralnych wyniosła  $\lambda_0(A;M) \approx 0,14$  [uszk/km-rok], a przewodów rozdzielczych  $\lambda_0(A;R) \approx 0,16$  [uszk/km-rok]. Ponieważ nie można było określić długości przyłączy w A, więc nie można było wyznaczyć uszkodzalności dla tej grupy przewodów. Wyznaczono jedynie liczbę uszkodzeń przyłączy w odniesieniu do 1000 sztuk przyłączy. Dla roku 2012 wyniosła ona  $U(A) = 1/2458 = 0,401$  [uszk/1000P]. Jak widać, jest to wartość bardzo niska.

Dla miasta B i dla tego samego okresu czasu wyznaczone średnie uszkodzalności przewodów, w zależności od ich funkcji wyniosły: dla przewodów magistralnych  $\lambda_0(B;M) \approx 0,8$  [uszk/km-rok], dla rozdzielczych  $\lambda_0(B;R) \approx 0,66$  [uszk/km-rok] a dla podłączeń  $\lambda_0(B;P) \approx 1,6$  [uszk/km-rok]. Uzyskane wartości znacznie przekraczają podane wyżej wartości wskazywane w literaturze [4] jako dopuszczalne. Dla roku 2012 liczba uszkodzeń przyłączy odniesiona do 1000 sztuk przyłączy wyniosła  $U(B) = 89/2445 = 36,4$  [uszk/1000P]. Jak widać, przekracza ona normalną liczbę uszkodzeń o rząd wielkości.

Kolejnym krokiem była analiza uszkodzalności przewodów ze względu na materiał, z którego zostały one wykonane. Ze względu na brak pełnej informacji o strukturze materiałowej obu sieci w całym okresie czasu, taką analizę przeprowadzono tylko dla roku 2012. Dla miasta A uszkodzalność przewodów żeliwnych magistralnych i rozdzielczych łącznie wyniosła  $\lambda_0(A;M+R;zel) \approx 0,13$  [uszk/km-rok] a dla stalowych  $\lambda_0(A;M+R;stal) \approx 0,1$  [uszk/km-rok].

Dla miasta B dla roku 2012 wyznaczono uszkodzalności i uzyskano analogiczne wyniki jedynie dla przewodów magistralnych i rozdzielczych  $\lambda_0(B;M+R;zel) \approx 1,5$  [uszk/km-rok] oraz  $\lambda_0(B;M+R;stal) \approx 0,67$  [uszk/km-rok]. Natomiast dla wszystkich przewodów łącznie (M+R+P) uzyskano: dla przewo-



dów żeliwnych  $\lambda_0(\text{B};\text{M}+\text{R}+\text{P};\text{żel})\approx 1,62$  [uszk/km·rok], dla stalowych  $\lambda_0(\text{B};\text{M}+\text{R}+\text{P};\text{stal})\approx 4,38$  [uszk/km·rok] a dla PCW  $\lambda_0(\text{B};\text{M}+\text{R}+\text{P};\text{PCW})\approx 0,28$  [uszk/km·rok]. Uszkodzalności przewodów wykonanych z pozostałych materiałów były zbliżone do  $\lambda_0\approx 1$  [uszk/km·rok]. Otrzymane wartości mogą świadczyć o bardzo złym stanie sieci wodociągowej miasta B. Porównując wartości uszkodzalności przewodów żeliwnych wyznaczonych jedynie dla sieci (M+R+P) można wnioskować o bardzo wysokiej uszkodzalności stalowych przyłączy.

W mieście A najwięcej awarii wystąpiło na ulicy oznaczonej jako X. Było to 21 awarii, czyli prawie 19,7% wszystkich awarii. Jednak ze względu na znaczną długość tej ulicy uzyskano  $\lambda_0(\text{A};\text{X})\approx 0,3$  [uszk/km·rok]. Uszkodzalności przewodów ułożonych wzdłuż innych ulic również nie są wysokie.

W mieście B aż 101 awarii, czyli prawie 10,5% wszystkich awarii, wystąpiło na jednej z ulic oznaczonej dalej jako ulica Y, z czego zdecydowana większość na przyłączach (42 awarie) i przewodach rozdzielczych (42 awarie) a 18 na magistrali. Ekstremalną liczbę 8 awarii sieci zanotowano tam w listopadzie 2011 roku. Uwzględniając liczbę awarii i długość ulicy wyznaczono wskaźnik uszkodzalności i uzyskano  $\lambda_0(\text{B};\text{Y})=6,28$  [uszk/km·rok]. Przewody znajdujące się w tym rejonie wykazują najwyższą uszkodzalność w całym mieście B. Prawie 64% uszkodzeń na tej ulicy zaszło na przewodach stalowych. Przyczyną awarii tych przewodów w 44,6% była korozja, w 28% zamarznięcia i w 9% zużycie. W zaledwie 43% naprawy polegały na wymianie przewodów a aż 37% jedynie na uszczelnieniu. To świadczy o „łataniu” sieci, co zapewne jest spowodowane względami finansowymi.

## 6. Inne wskaźniki charakteryzujące pracę i stan techniczny sieci wodociągowej

Parametrami charakteryzującym stan techniczny i eksploatacyjny sieci wodociągowej oprócz uszkodzalności  $\lambda_0$  są wielkości jednostkowych strat wody w sieci  $q_{\text{str}}$  oraz czasy usuwania awarii.

### 6.1. Jednostkowe straty wody

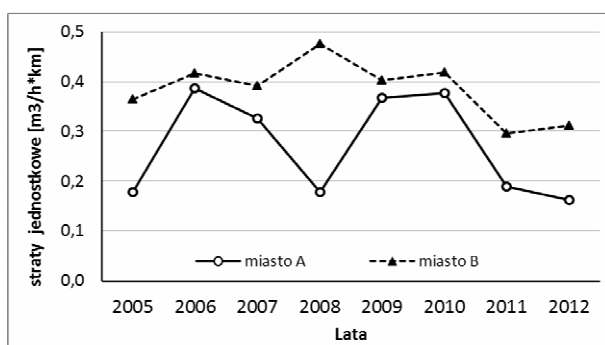
Jednostkowe straty wody  $q_{\text{str}}$  wyznaczają się jako wielkość strat wody w odniesieniu do 1 km przewodów i 1 godziny. Jako dopuszczalną wartość strat jednostkowych podaje się 0,2 [m<sup>3</sup>/h·km] [1].

Dla miasta A wyznaczono straty jednostkowe odniesione jedynie do przewodów magistralnych i rozdzielczych. W latach 2005-2012 straty jednostkowe wykazywały wahania (rys.7), lecz od roku 2008 można obserwować ich spadek. Średnia wartość jednostkowych strat wody wyniosła  $q_{\text{str}}(\text{A};\text{M}+\text{R})\approx 0,27$  [m<sup>3</sup>/h·km]. Od roku 2010 zmalały one do wartości 0,16 [m<sup>3</sup>/h·km] w roku 2012.

Dla miasta B wartości strat wody wzrastały do roku 2008, a później malały. Średnia dla lat 2005-2012 wartość wskaźnika strat wody (odniesiony do

wszystkich przewodów tj. magistralnych, rozdzielczych i podłączeń) wyniosła  $q_{str}(B;M+R+P)\approx 0,24[m^3/h\cdot km]$ . Natomiast średnie jednostkowe straty wody odniesione jedynie do przewodów magistralnych i rozdzielczych (podobnie jak dla miasta A) wyniosły  $q_{str}(B;M+R)\approx 0,33[m^3/h\cdot km]$ . W roku 2012 wyniosły one  $q_{str}(B;M+R)\approx 0,31[m^3/h\cdot km]$ , więc były prawie dwukrotnie wyższe niż analogiczne straty w mieście A.

Można zauważyć, że dla obu miast w okresie 2005-2012 jednostkowe straty wody w sieci pomimo wahań dla ostatnich lat (tj. od roku 2010) wykazują trend malejący (rys.7).



Rys. 7. Jednostkowe straty wody w przewodach magistralnych i rozdzielczych dla miast A i B

Fig. 7. Specific real losses in water mains and distribution lines in the cities A and B

## 6.2. Czas usuwania awarii

Dla miasta A nie odnotowywano czasów wykonywania napraw. Nie notowano również okresów ograniczania dostaw wody do odbiorców.

W mieście B w krótkim czasie do 2 godzin usunięto ok. 36% wszystkich uszkodzeń. Poza nielicznymi przypadkami były to prace na przyłączach. Naprawy te przeważnie polegały na wymianie wodomierza lub uszczelek, przepłukaniu przyłącza. Z tak krótkim czasem działania odnotowano też kilkanaście prac na sieci rozdzielczej. Były to przykładowo: zamknięcie zasuw i zgłoszenie naprawy gwarancyjnej, dokręcenie zasuw, wymiana śrub, naprawa odpowietrznika czy „resetowanie systemu”. W czasie do 2 godzin wykonano również prace na przewodach magistralnych: były to przypadki czyszczenia odpowietrznika. W czasie do 8 godzin usunięto dalszych 60% awarii. Były to wymiany odcinków rur, wymiany złączek, zasuw lub hydrantów, założenia opaski lub doszczelniacza, przy czym znacznie dłużej przeprowadzano naprawy w okresie zimowym. Awarie, których czas usuwania przekraczał 8 godzin stanowiły zaledwie 4% wszystkich przypadków. Usuwanie najdłuższej awarii trwało 24 godziny.

## 7. Uwagi dodatkowe

Jak wykazano powyżej (rys.5) w mieście B najczęściej uszkodzeń wystąpiło na przyłączach. Najgorszym rokiem był rok 2006, kiedy to wydarzyło się ok. 19,5% uszkodzeń na tych przewodach. W samym miesiącu maju tego roku przeprowadzono 14 robót, z czego aż 10 polegało na wymianie zasuwy, obudowy zasuwy lub przyłącza. Jako ich przyczynę podano „korozję” albo „zużycie”. Taki wynik niekoniecznie oznacza rzeczywiste awarie – mogły to być planowe prace remontowe. Na przyłączach w okresie zimowym (od listopada do kwietnia) wystąpiło ok. 59% wszystkich uszkodzeń. Ekstremalnie dużo zimowych awarii (26) wydarzyło się w lutym 2012 roku. Spośród nich aż 22 awarie (ok. 85% awarii z tego jednego miesiąca) spowodowanych było zamarznięciami. W całym zimowym okresie czasu aż 25% awarii przyłączy wynikało z zamarznięcia, z czego prawie 20% wystąpiło na przewodach stalowych, 4,5% na przewodach z PE a reszta na przewodach żeliwnych. Powyższe może świadczyć o zbyt płytkim ułożeniu przyłączy.

Wyznaczone powyżej (punkt 5) uszkodzalności przyłączy odniesione do 1000 sztuk w roku 2012 w miastach A i B wyniosły odpowiednio  $U(A)=0,401$  [uszk/1000P]  $U(B)=36,4$  [uszk/1000P]. Różnica trzech rzędów wielkości nie wynika jedynie z gorszego stanu sieci wodociągowej miasta B, lecz z bardzo szczegółowej ewidencji wszelkich prac. W mieście A w latach 2005-2012 odnotowano łącznie tylko 4 prace (po jednej w roku 2005, 2006, 2007 i 2012). Były to: dwukrotne uszczelnienie, usunięcie hydrantu i wymiana skorodowanego podłączenia. Jest wielce prawdopodobne, że przez 8 lat usuwano również inne, drobne awarie, lecz nie odnotowywano ich w rejestrach. Natomiast w mieście B w tym samym okresie czasu wykonano aż 550 prac na przyłączach, przy czym prawie 60% tych prac nie trwało dłużej niż 2 godziny. Były to wymiany uszczelek lub wodomierza (ok. 40%), czyszczenie wodomierza (8,2%), uszczelnienia (5,5%) i rozmrożenia (3%), płukanie przyłącza (3,3%). Można sądzić, że w dużej mierze wymiany wodomierzy wynikały z konieczności legalizacji i były pracami planowymi. Zróznicowanie uszkodzalności przyłączy w obu miastach może mieć również z ich wykonawstwem. W bogatszym mieście A przyłącza były najprawdopodobniej wykonywane przez specjalistyczne służby. Natomiast w mieście B, jest bardzo prawdopodobne, że wiele podłączeń, zwłaszcza do domów jednorodzinnych, mieszkańcy oszczędzając pieniądze wykonywali sami, nie zawsze zgodnie ze wszystkimi zasadami.

Miasto B można by zaliczyć do nielicznej grupy miast Polskich, dla których wyznaczone powyżej uszkodzalności przewodów magistralnych i rozdzielczych przekraczają wartości dopuszczalne. Na zły stan sieci miasta B wpłynęły wieloletnie zaniedbania eksploatacyjne w zakresie systematycznej konserwacji i modernizacji sieci, niedoinwestowanie wymian przewodów. Przykładem może być jedna z ulic (ul.Y) o niewielkiej długości (ok. 2 km), na której co roku dochodzi od 7 do 20 awarii sieci. Można stwierdzić, że miasto B już dawno weszło w okres, gdy konieczne jest podejmowanie prac renowacyjnych sieci wodociągowej. Według ocen i prognoz, roczny wskaźnik remontów po roku 2010 powinien przyjmować wartości z zakres 1,5÷2% długości sieci [4]. W strategii remontów możliwe jest

uwzględnienie okresu trwałości rur wykonanych z danych rodzajów materiałów [5]. Wszelkie remonty planowe oczywiście nierozzerwalnie wiążą się z kosztami. W tej kwestii sytuacja miast A i B zasadniczo się różni.

W roku 2012 cena wody dla gospodarstw domowych w mieście A wynosiła 4,11 zł/m<sup>3</sup> (razem z podatkiem VAT), natomiast w mieście B 3,01 zł/m<sup>3</sup> [10]. Podobnie odbiór ścieków w A był droższy (5,21 zł/m<sup>3</sup>) niż w B (4,56 zł/m<sup>3</sup>). Wyższe w 2012 roku o ok. 23% opłaty za wodę i ścieki razem dla mieszkańców miasta A z pewnością pozwoliły na prowadzenie szerszego zakresu remontów i modernizacji systemu wodociągowego. Można zauważyć, że dysproporcja między cenami wody i ścieków w obu miastach rośnie [10]. Przykładowo dla roku 2015 wynoszą one odpowiednio 7,12 zł za 1m<sup>3</sup> wody i 6,90 zł za 1m<sup>3</sup> ścieków w A oraz 3,18 zł za 1m<sup>3</sup> wody i 4,89 zł za 1m<sup>3</sup> ścieków w B. Jak widać w roku 2015 mieszkańcy A za wodę i ścieki płacą już o ok. 74% więcej niż mieszkańcy B i prawie 1,5 razy więcej niż w roku 2012.

W obu miastach należałoby wdrażać nowoczesne zasady zarządzania siecią wodociągową. Współcześnie konieczne staje się wyposażanie przedsiębiorstw wodociągowych w nowoczesne systemy informatyczne wspomagające operatora nie tylko w optymalnym zarządzaniu pracą systemu, lecz również przy planowaniu jego modernizacji [8].

## 8. Podsumowanie

W artykule przeanalizowano uszkodzalność sieci wodociągowych dwóch niewielkich miast A i B, leżących niedaleko siebie w Polsce południowej. Liczba ludności miast jest zbliżona i mieści się w zakresie 10-20 tys. mieszkańców. Powierzchnie zajmowane przez oba miasta różnią się prawie dwukrotnie [9]. Dlatego też długości sieci wodociągowych w obu miastach różnią się. W roku 2012 łączne długości przewodów magistralnych i rozdzielczych w mieście B stanowiły ok. 57% długości takich samych przewodów miasta A. Przeprowadzona analiza potwierdziła, że porównywania awaryjności przewodów wodociągowych pracujących w różnych miastach jest trudne i to nie tylko ze względu na różne, często nie całkiem rozpoznane przez eksploatatorów struktury sieci, lecz również ze względu na różne warunki pracy i realizowane różne strategie eksploatacji.

Przeprowadzone analizy pokazują również, że brak jest podstaw do „projekcji” wyników czy jakiegokolwiek wnioskowania o uszkodzalności sieci miast o zbliżonej liczbie ludności. W pracy wskazano na bardzo duże zróżnicowanie wartości uszkodzalności  $\lambda_0$  w dwóch miastach nawet dla przewodów wykonanych z tego samego materiału. Przykładowo dla przewodów żeliwnych stwierdzono, że te uszkodzalności różnią się ponad 11-to krotnie a dla stalowych prawie 7-mio krotnie. Na uszkodzalność przewodów wpływają nie tylko rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne i warunki lokalne, lecz też sposób eksploatacji [2] oraz zasady rejestrowania awarii.

W artykule przedstawiono dwa przypadki – dwa miasta o podobnej liczbie mieszkańców, których wodociągi stosują dwie skrajne zasady rejestrowania

uszkodzeń sieci wodociągowej. Przyjęcie bardzo rygorystycznych zasad rejestrowania (miasto B) nawet najmniejszej usterki daje na pierwszy rzut oka, przy braku wnikliwości, obraz sieci wodociągowej o wysokiej awaryjności przekraczającej nawet awaryjność sieci na terenach górniczych, i obraz nieracjonalnego, niepodjęającego naprawczych działań eksploatatora. Z kolei przyjęcie dużo mniej rygorystycznych zasad rejestrowania tylko poważniejszych awarii (miasto A), choć kreuje pozytywny wizerunek eksploatatora, to jednak w dłuższym okresie czasu może prowadzić do jego nieprawdziwej samooceny, a w rezultacie do mimowolnych nie całkiem świadomych zaniedbań. Powyższe wskazuje również na celowość wprowadzenia albo pewnych dodatkowych jednolitych zasad rejestrowania awarii, albo kryterium decydującego o uwzględnianiu poszczególnych awarii w procesie szacowania uszkodzalności. Pewna standaryzacja baz danych pozwoliłaby na uzyskiwanie porównywalnych miar i lepsze podejmowanie decyzji dotyczących remontów sieci.

Doświadczenie wskazuje, że aby móc dokonać wiarygodnej oceny pracy i uszkodzalności sieci wodociągowej, to należałoby wprowadzić rozróżnienie na naprawy awaryjne i prace związane z remontami i modernizacjami sieci. Te ostatnie nie powinny być brane pod uwagę przy wyznaczaniu wskaźnika  $\lambda_0$ , lecz powinny być wykorzystywane przy wyznaczaniu dodatkowej miary. Jako taką miarę można by zaproponować np. wskaźnik remontów wyznaczany albo jako odsetek prac remontowych w stosunku do wszystkich prac sieciowych albo jako odsetek długości wymienionych przewodów w stosunku do długości całej sieci.

Kolejnym wskazaniem mogłoby być wprowadzenie i stosowanie kilku określonych kategorii awarii. Z pewnością byłoby to prostsze przy stosowaniu elektronicznych baz danych z możliwością wyboru kategorii awarii, co pozwoliłoby na ujednoczenie zapisów, a w efekcie przede wszystkim umożliwiłoby obiektywną, wiarygodną ocenę stanu sieci oraz porównywanie uszkodzalności różnych sieci wodociągowych. Takie rozwiązanie nawet pomimo wszechobecności komputerów jest to mało realne, gdyż eksploatatorzy rejestrują awarie do swoich celów a nie z przeznaczeniem do badań niezawodnościowych.

Jednak ocena stanu sieci nie może być przeprowadzana jedynie na podstawie wartości uszkodzalności  $\lambda_0$ . Należy też przeanalizować wartości jednostkowych strat wody w sieci oraz zasady rejestrowania awarii. Same wysokie jednostkowe straty wody w sieci też nie zawsze świadczą o złym stanie sieci, gdyż mogą być wynikiem pasywnego podejścia do strat i niepodjęcia szybkich napraw.

Patrząc na wyznaczone wartości uszkodzalności  $\lambda_0$  dla obu miast i biorąc pod uwagę przyjęte i stosowane odmienne zasady rejestracji uszkodzeń, można a nawet trzeba zadać pytanie: jak zmieniłyby się te wartości, gdyby w każdym z miast zmieniono dotychczasowe zasady rejestracji uszkodzeń na zasady stosowane przez drugiego eksploatatora.

## Literatura

- [1] Budziło B., Niezawodność wybranych systemów zaopatrzenia w wodę w południowej Polsce. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.

- [2] Kwietniewski M., Rak J., Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 2010.
- [3] Podgórní J., Analiza pracy i uszkodzalności sieci wodociągowej w mieście i gminie B. Praca dyplomowa pod kierunkiem R.Iwanejko. Kraków, 2015.
- [4] Rak J., Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Wydawnictwo Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Lublin, 2005.
- [5] Rak J., Metoda planowania remontów sieci wodociągowej na przykładzie miasta Krosna, JCEEA, t. XXXI, z. 61 (1/14), ss.225-232, 2014.
- [6] Respekta K., Analiza pracy i uszkodzalności sieci wodociągowej w mieście i gminie A. Praca dyplomowa pod kierunkiem R.Iwanejko. Kraków, 2014.
- [7] Sozański M. (red), Wodociągi i kanalizacja w Polsce. Tradycja i współczesność. Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, Poznań – Bydgoszcz, 2002.
- [8] Tchórzewska-Cieślak B., Szpak D., Zarządzanie miejską infrastrukturą wodociągową, JCEEA, t. XXXI, z. 61 (1/14), ss.333-355, 2014.
- [9] <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/ludnosc/ludnosc/powierzchnia-i-ludnosc-w-przekroju-terytorialnym>, [dostęp 30.04.2015 r.].
- [10] [www.ceny-wody.pl](http://www.ceny-wody.pl), [dostęp 30.04.2015 r.].

## **FAILURE RATES OF WATER SUPPLY SYSTEMS – ANALYSIS OF THE TWO CITIES OF SOUTHERN POLAND**

### **S u m m a r y**

The paper presents an analysis of reliability of water supply systems in the two cities located in south-east Poland. The two cities, called A and B, are of medium size and they are located near each other. Their population ranges from 10 000 to 20 000 people. The water supply systems in the cities differ in length, construction material and time of operation. Municipal water works (MWW) operating both systems monitor and register system failures in a similar traditional way. The paper focuses on the data collected in the years 2005 – 2012. The authors analyzed the water balance for each city and then conducted a multifaceted analysis of system failures, taking into consideration different aspects such as: time and place of failure, type of system, pipe material, cause and type of failure and repair time. The system failure indicators for different aspects were determined. Though the cities were similar in many ways their failures characteristics differed significantly. On average, there were nine times more failures per year observed in the city B than in the city A, but the failure rates  $\lambda_0$  only could not provide grounds for the conclusion that the water system in the city B is in a much worse shape than in the city A. Therefore, specific real losses were compared in both systems. Additionally, once the data base on failures in both cities were examined more closely, it was found that very different rules of failures registration were employed. It is recommended that some unified guidelines for a failure registration should be introduced. Such common standards would help to evaluate the conditions of water supply systems in a more objective and reliable way.

**Keywords:** water supply system, failures, failure rate, indicators

*Przesłano do redakcji: 30.05.2015 r.*

*Przyjęto do druku: 30.10.2015 r.*

DOI: 10.7862/rb.2015.101