

Małgorzata IWANEK¹
Beata KOWALSKA²
Dariusz KOWALSKI³
Marian KWIETNIEWSKI⁴
Katarzyna MISZTA-KRUK⁵
Paulina MIKOŁAJUK⁶

WPLYW RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA AWARYJNOŚĆ SIECI WODOCIĄGOWEJ W UKŁADZIE PRZESTRZENNYM – STUDIUM PRZYPADKU

W pracy przedstawiono wyniki badań eksploatacyjnych awaryjności obiektów sieci wodociągowej funkcjonującej w dużym mieście. Badaniami objęto system dystrybucji wody o długości około 1615 km, przy czym przewody rozdzielcze stanowiły około 1 200 km, przewody magistralne około 220 km i przewody tranzytowe około 190 km. Głównym celem badań była ocena i zilustrowanie awaryjności sieci wodociągowej i jej elementów na mapach numerycznych miasta. Oceniono wpływ rodzaju (funkcji – magistralne, rozdzielcze) i materiału (stal, żeliwo głównie szare, PVC, PE, azbestocement, żelbet) przewodów, ciśnienia w sieci, pory roku, rodzaju gruntu oraz występowania wód gruntowych (poniżej i powyżej 2 m pod powierzchnią terenu) na awaryjność obiektów sieciowych. Na potrzeby analiz awaryjności wyodrębniono odpowiednie obiekty badawcze. Obiekty te są podstawą tworzenia bazy danych w GIS do celów zarządzania awariami. Zamieszczono fragment planu siatki ulic ze wskazaniem miejsc awarii wraz z ich opisem. Zidentyfikowano następujące rodzaje uszkodzeń: uszkodzenie korozyjne, pęknięcie poprzeczne, pęknięcie podłużne, uszkodzenie armatury, uszkodzenie mechaniczne, wypchnięcie uszczelnienia, wyrwanie płata rury. Uszkodzenia te powodowały także skutki w pracy przewodu, jak przerwa i zakłócenie w pracy. W całym okresie obserwacji odnotowano 1991 uszkodzeń na przewodach sieci wodociągowej. Zdecydowanie najwięcej awarii (96%) wystąpiło na przewodach rozdzielczych. Badana sieć wodociągowa nie wyróżnia się wysoką awaryjnością. Średnia intensywność

¹ Małgorzata Iwanek, Politechnika Lubelska

² Beata Kowalska, Politechnika Lubelska

³ Dariusz Kowalski, Politechnika Lubelska

⁴ Autor do korespondencji/corresponding author: Marian Kwietniewski, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, tel. 22 2345336, marian.kwietniewski@is.pw.edu.pl,

⁵ Katarzyna Miszta-Kruk, Politechnika Warszawska

⁶ Paulina Mikołajuk, Adaptronica Sp. z o.o., Łomianki k/Warszawy

ność uszkodzeń wyniosła 0,27 uszk./km-rok i jest porównywalna z intensywnością uszkodzeń sieci wodociągowych miast polskich badanych w latach 2005-2008 (0,37 uszk./km-rok). Uzupełniającym rezultatem badań jest hierarchizacja obiektów pod względem ryzyka ich awarii. Ustalono, że największym ryzykiem awarii są obciążone przewody rozdzielcze wykonane z żeliwa (szarego), ułożone w glinach zwałowych i na głębokości poniżej 2 m.

Słowa kluczowe: niezawodność, sieci wodociągowe, czynniki awaryjności, GIS

1. Wprowadzenie

Badania awaryjności i niezawodności sieci wodociągowych i ich elementów są prowadzone w Polsce i na świecie już od ponad 40 lat. W tym czasie uzyskano wiele oryginalnych wyników. Powstały ogromne zbiory wartości wskaźników niezawodności różnych obiektów wodociągowych, które na ogół były i nadal są wykorzystywane w celach praktycznych, np. do oceny stanu technicznego czy też wskazania możliwości podnoszenia niezawodności funkcjonowania sieci i ich elementów. Zakres tych badań jest bardzo szeroki i nie jest możliwe w ramach niniejszej pracy chociażby skrótowne przybliżenie ich wyników. Obejmują one m.in. analizę wpływu funkcji, materiału i średnicy przewodu, czasu eksploatacji, ciśnienia w sieci, niestabilności gruntu na awaryjność i niezawodność sieci oraz ich elementów. W tym obszarze można wymienić prace [1-4, 5, 8, 9, 15, 22, 24, 27]. Prowadzone są także prace badawcze w poszukiwaniu odpowiednich metod analizy różnych aspektów niezawodnościowych związanych z dystrybucją wody [9, 19, 20, 21, 26] oraz badania opinii odbiorców na temat pewności dostawy wody [10-12, 17, 18, 23]. Pełne omówienie wyników w zakresie badań niezawodności sieci wodociągowych można znaleźć w monografiach [11] i [13].

Wśród bogatego dorobku badawczego w odniesieniu do sieci wodociągowych niezwykle skromne są publikacje wyników badań ukierunkowanych na wykorzystanie baz danych typu GIS (*Geographical Information System*) do oceny niezawodności sieci [7, 25]. Wiąże się to z wyodrębnieniem w systemie dystrybucji wody odpowiednich obiektów wodociągowych i ich właściwą identyfikacją przestrzenną w bazie GIS. Wizualizacja awaryjności tych obiektów na mapach numerycznych sieci i miasta jest istotnym elementem w procesie decyzyjnym dotyczącym odnowy sieci wodociągowej. W pracy [25] przeanalizowano częstość uszkodzeń przewodów przy wykorzystaniu danych z bazy GIS. Pomimo uzyskania zamierzonych wyników wskazano na występujące nadal problemy z zastosowaniem GIS do oceny awaryjności obiektów wodociągowych. Zaobserwowano też wiele niedociągnięć w opisie danych w bazie.

W związku z tym autorzy niniejszej publikacji podjęli próbę badań eksploatacyjnych niezawodności sieci wodociągowej na przykładzie dużego miasta, których celem była ocena wpływu różnych czynników na tę niezawodność z moż-

liwością przestrzennej wizualizacji tego wpływu na mapie numerycznej sieci. Wyniki oceny przedstawiono także w sposób tradycyjny w formie opracowanych statystycznie wykresów i zestawień tabelarycznych.

Przeprowadzone badania są kolejnym etapem prac na drodze tworzenia standardów współpracy baz danych typu GIS z modulem „analiza i ocena awaryjności sieci wodociągowych” rozwijanym w przedsiębiorstwach. Prace w tym kierunku zostały zapoczątkowane przez zespół autorski w ramach projektu badawczego [16] realizowanego w latach 2011-2012 na Politechnice Warszawskiej i Politechnice Lubelskiej. Opracowano już propozycje zakresu i formatu danych oraz sposoby wizualizacji wyników ocen awaryjności, które obecnie są wdrażane w MPWiK w Puławach. Wyniki przedstawione w niniejszej pracy są efektem rozpoznania aktualnego stanu i zakresu ewidencjonowania danych w wybranym przedsiębiorstwie oraz możliwości wizualizacji oceny awaryjności sieci wodociągowej, która powinna usprawnić proces zarządzania jej eksploatacją.

2. Obiekt badań

Sieć wodociągowa objęta badaniami dostarcza wodę do miasta w ilości ok. 55 mln m³ rocznie. Łączna długość sieci w 2012 r. wynosiła około 1 615 km, w tym przewody rozdzielcze stanowiły około 1 200 km, przewody magistralne około 220 km, a przewody tranzytowe około 190 km. Ze względu na znaczne zróżnicowanie wysokościowe terenu w sieci wodociągowej wydzielono strefy ciśnienia. Przewody sieci wodociągowej zostały wykonane głównie z żeliwa szarego (ponad 41% długości – najstarsza część sieci) oraz PVC (ponad 34%). Na pozostałą część sieci składają się rurociągi wykonane ze stali, PE, PP, żelbetu, azbestocementu i GRP.

3. Metodyka badań

Badania były prowadzone w taki sam sposób i według tej samej metodyki, jak w przypadku sieci kanalizacyjnych, co omówiono w innej publikacji tego wydania czasopisma [6]. W przypadku sieci wodociągowej autorzy dysponowali większymi zasobami danych niż w odniesieniu do sieci kanalizacyjnych, co umożliwiło dokładniejsze tworzenia obiektów badawczych. W rezultacie możliwe było wyodrębnienie następujących obiektów:

- 1) sieć wodociągowa jako całość (SW),
- 2) przewody magistralne (M) z podziałem na
 - żeliwne (Z – głównie żeliwo szare),
 - stalowe (S),
 - polietylenowe (PE),
 - żelbetowe (ZB),
- 3) przewody rozdzielcze (R) z podziałem na
 - żeliwne (Z – głównie żeliwo szare),

- stalowe (S),
- polietylenowe (PE),
- azbestocementowe (AC),
- żelbetowe (ZB),
- wykonane z polichlorku winylu (PVC).

Ze względu na brak danych liczbowych dotyczących uzbrojenia tych elementów w analizach nie uwzględniono awaryjności i niezawodności.

W wyniku analizy zgromadzonych danych źródłowych ustalono następującą listę czynników, których wpływ na awaryjność sieci wodociągowej badano w ramach przyjętego programu:

- czas eksploatacji,
- rodzaj i związana z tym funkcja przewodu,
- materiał przewodu,
- ciśnienie w sieci,
- pora roku,
- rodzaj gruntu,
- występowanie i głębokość zwierciadła wód gruntowych.

Wybór czynników był uwarunkowany dostępnością danych.

Do oceny awaryjności i niezawodności sieci poza analizą bezwzględnych liczebności awarii zastosowano jednostkową intensywność uszkodzeń oszacowaną według zależności opisanej w pracy [6]. Zidentyfikowano następujące rodzaje uszkodzeń:

- uszkodzenie korozyjne,
- pęknięcie poprzeczne,
- pęknięcie podłużne,
- uszkodzenie armatury,
- uszkodzenie mechaniczne,
- wypchnięcie uszczelnienia,
- wyrwanie płata rury.

Uszkodzenia te powodowały następujące skutki w pracy przewodu:

- przerwa w pracy,
- zakłócenie w pracy.

Ze względu na brak danych w analizie nie było możliwe zidentyfikowanie wieku uszkodzonych przewodów.

4. Wyniki badań

4.1. Rodzaje i skutki uszkodzeń

Analizę rodzajów i skutków uszkodzeń przeprowadzono dla przewodów z uwzględnieniem materiału, z którego zostały wykonane. Wstępna analiza danych wykazała, że uszkodzenia przewodów z tworzyw termoplastycznych (PVC, PE, PP), jak również z azbestocementu wymagały głównie wyłączenia

uszkodzonego odcinka z pracy, co skutkowało przerwą w dostawie wody do mieszkańców. Ze względu na dostępność danych przedstawiono relacje rodzajowo-skutkowe uszkodzeń przewodów najbardziej awaryjnych, tj. wykonanych z żeliwa (tab. 1.).

4.2. Wpływ różnych czynników na awaryjność sieci wodociągowej

Na rysunkach 1-9. i w tab. 1., 2. zilustrowano rozkłady uszkodzeń oraz jednostkowe intensywności uszkodzeń w funkcji rozważanych czynników: awaryjności w funkcji czasu, wpływu rodzaju materiału, ciśnienia panującego w przewodach, pory roku, wpływu rodzaju gruntu i wód gruntowych.

Tabela 1. Relacje rodzajowo-skutkowe uszkodzeń dla przewodów z żeliwa

Table 1. Causes and types of cast iron pipelines failures

Rodzaj uszkodzenia	Skutek uszkodzenia					
	przerwa w pracy		zakłócenie w pracy		razem uszkodzenia	
	liczba	%	liczba	%	liczba	%
Uszkodzenia korozyjne	96	7	12	1	108	8
Pęknięcie podłużne rury	231	17	21	2	252	18
Pęknięcie poprzeczne rury	506	36	46	3	552	40
Uszkodzenie armatury	8	1	1	0	11	1
Uszkodzenie mechaniczne	182	17	13	1	199	14
Wypchnięcie uszczelnienia	199	61	14	4	260	19
Wyrwanie płata rury	1	0	0	0	1	0
Inne	8	1	0	0	8	1
Razem	1231	88	160	12	1391	100

Należy podkreślić, że liczba uszkodzeń, choć jest istotną informacją o awaryjności sieci wodociągowej, nie wystarcza do pełnej oceny tej awaryjności, zależy ona bowiem od długości sieci. Dlatego koniecznym uzupełnieniem oceny jest średnia jednostkowa liczba uszkodzeń odniesiona do km i roku.

Awaryjność w funkcji czasu

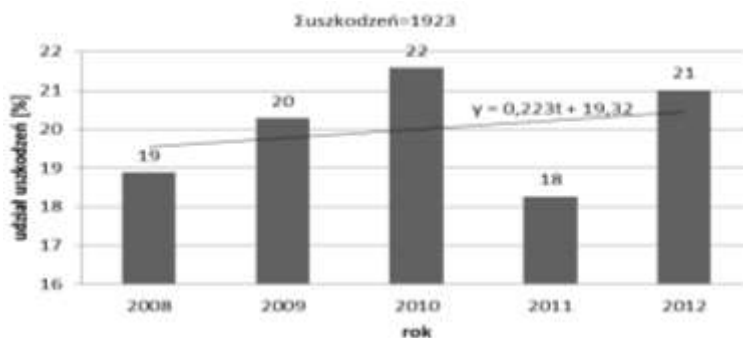
Ten aspekt awaryjności analizowano dla sieci jako całości przewodów magistralnych i rozdzielczych oraz wszystkich rodzajów materiałów. Wyniki zilustrowano na przykładzie sieci oraz najbardziej uszkadzających się obiektów, tj. przewodów żeliwnych (rys. 1. i 2.).

Rodzaj/funkcja przewodów

Przy długości przewodów magistralnych 220 km i długości przewodów rozdzielczych 1200 km jednostkowa intensywność uszkodzeń wyniosła:

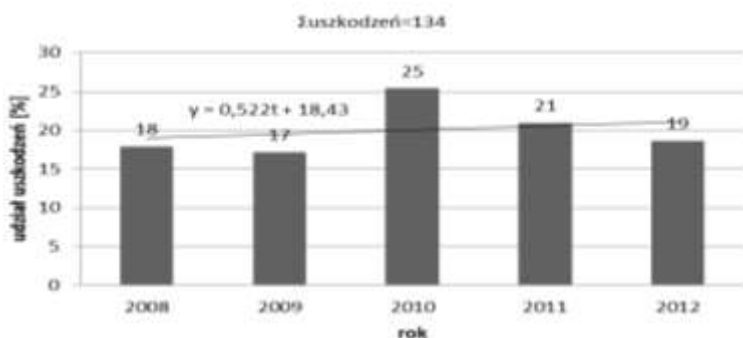
- przewody magistralne – **0,06** uszk./km·rok,

- przewody rozdzielcze – **0,31** uszk./km-rok.



Rys. 1. Rozkład ilościowy uszkodzeń sieci wodociągowej w latach 2008-2012

Fig. 1. Quantitative distribution of water supply network failures in 2008-2012



Rys. 2. Rozkład ilościowy uszkodzeń przewodów żeliwnych w latach 2008-2012

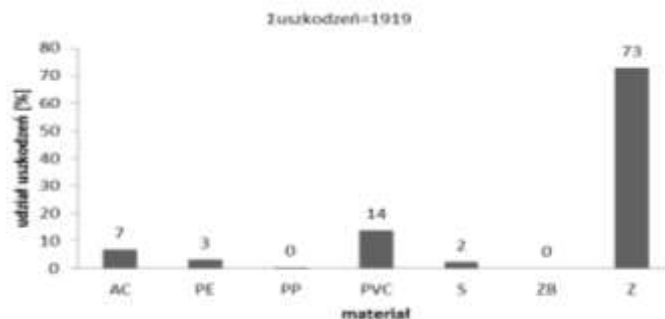
Fig. 2. Quantitative distribution of cast iron pipelines failures in 2008-2012

Material przewodu

Wpływ materiału na awaryjność analizowano w odniesieniu do wszystkich przewodów wodociągowych, dla których uzyskano dane o uszkodzeniach. Wyniki zilustrowano na rys. 3. i w tab. 2.

Ciśnienie w sieci

Analizie poddano liczbę awarii skonfrontowaną z rozkładem przestrzennym ciśnienia w sieci wodociągowej. Ze względu na ograniczoność danych możliwe było uwzględnienie tylko przedziałów wartości ciśnienia w zadanych strefach miasta. Na wykresie (rys. 4.) przedstawiono rozkład liczby awarii w funkcji ciśnienia maksymalnego w sieci wodociągowej.



Rys. 3. Rozkład uszkodzeń sieci wodociągowej w zależności od materiału przewodów

Fig. 3. Distribution of water supply network failures depending on the pipe material

Tabela 2. Średnia intensywność uszkodzeń obiektów sieci wodociągowej w zależności od materiału przewodów

Table 2. The average failure rate of the water network objects depending on the pipe material

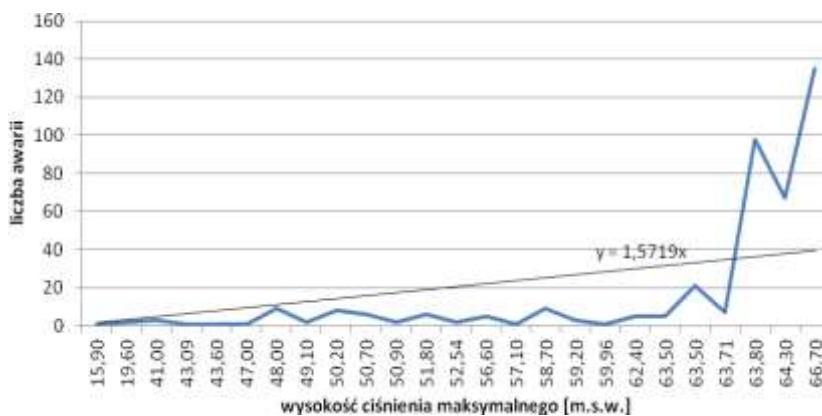
Material przewodu	Długość [km]	Liczba awarii w latach 2008-2012	Średnia intensywność uszkodzeń [uszk/(km ·rok)]	Jedna awaria na przewodach o długości [km]
Żeliwo	643	1397	0,43	2,30
Stal	39	46	0,24	4,24
PVC	424	265	0,13	8,00
PE	208	64	0,06	16,25
Azbestocement	92	134	0,29	3,43
Inne (PP, żelbet)	22	13	0,12	8,46

Wpływ pory roku

Wpływ pory roku na awaryjność sieci wodociągowej analizowano w całym okresie obserwacji, również w rozbiciu na poszczególne miesiące, uwzględniając przy tym średnią temperaturę w miesiącu. Wybrane wyniki przedstawiono na rys. 4-6.

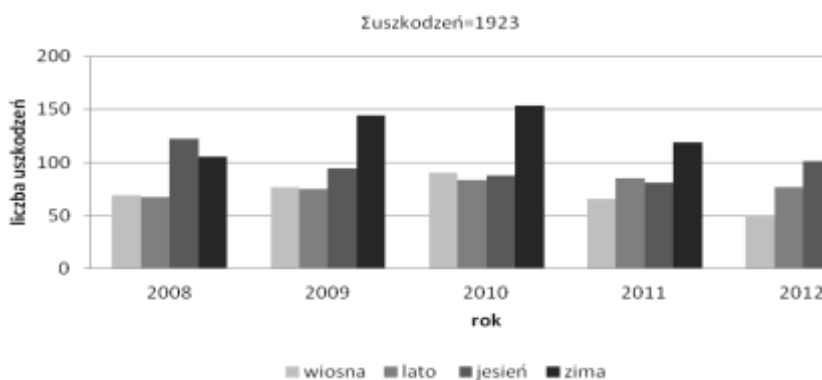
Rodzaj gruntu

Wyniki analizy wpływu warunków gruntowych na awaryjność sieci wodociągowej przedstawiono na rys. 7., a odnoszą się one do 2012 r.



Rys. 4. Rozkład awarii w funkcji ciśnienia maksymalnego w sieci wodociągowej (wartości z 2012 r.)

Fig. 4. The distribution of failures as a function of the maximum pressure in the water network (values from 2012 year)

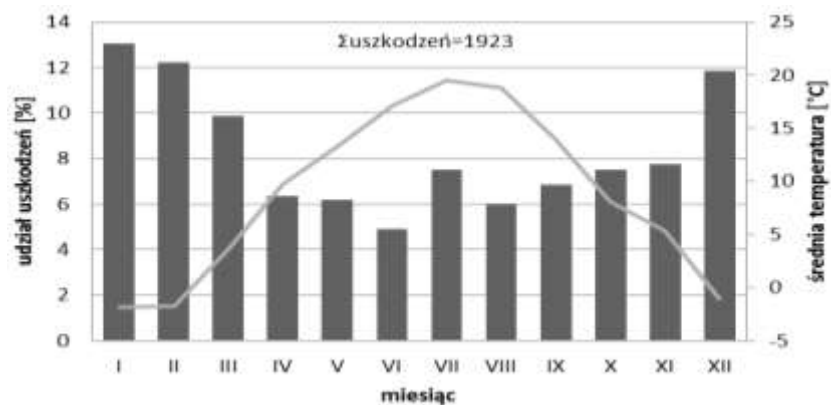


Rys. 5. Rozkład uszkodzeń sieci wodociągowej w kolejnych latach z uwzględnieniem pory roku

Fig. 5. Distribution of the water network failures in subsequent years, taking into account the season

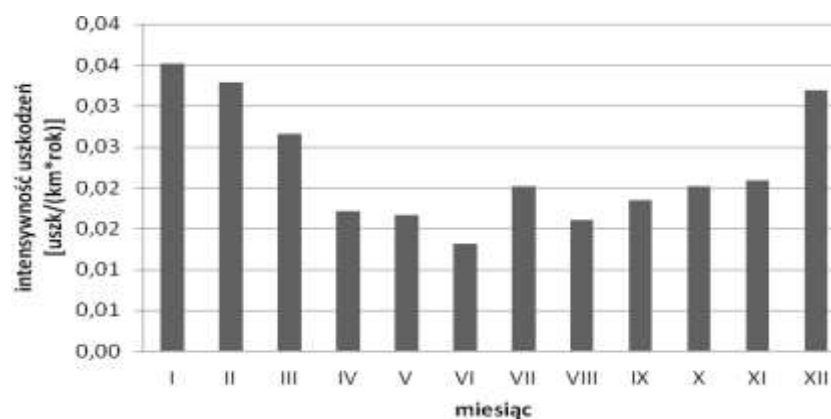
Woda gruntowa

Wpływ występowania wody gruntowej na awaryjność sieci analizowano przy uwzględnieniu zalegania wody na głębokości do 2 m p.p.t. i poniżej 2 m p.p.t. Wyniki zilustrowane na rys. 8. i 9. odnoszą się do danych otrzymanych w 2012 r.



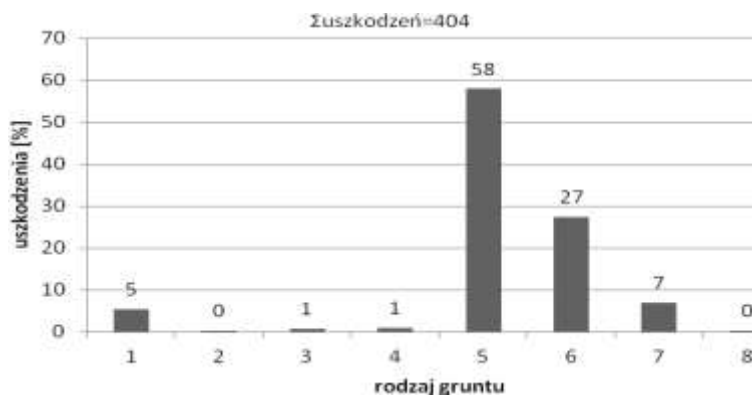
Rys. 6. Rozkład uszkodzeń sieci wodociągowej oraz średniej temperatury powietrza w kolejnych miesiącach w latach 2008-2012

Fig. 6. Distribution of water network failures and the average air temperature in the subsequent months in 2008-2012



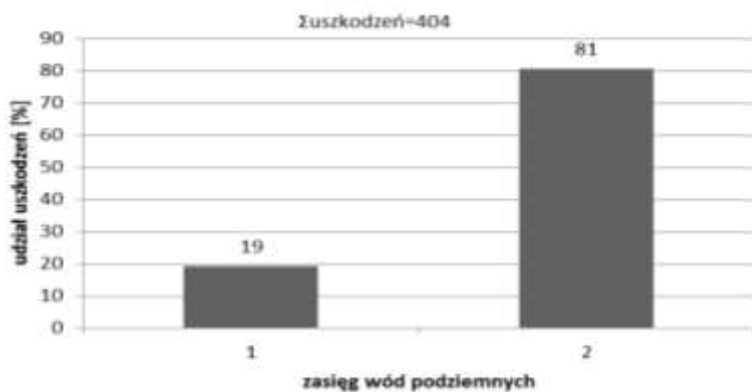
Rys. 7. Rozkład intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej w kolejnych miesiącach w latach 2008-2012

Fig. 7. Distribution of water network failure rate in the subsequent months in 2008-2012



Rys. 8. Rozkład uszkodzeń przewodów wodociągowych w 2012 r. w zależności od rodzaju otaczającego gruntu; 1 – nasypy niebudowlane, 2 – namuły, gytie, 3 – koluwia i deluwia + stożki napływowe, 4 – piaski i żwiry tarasów zalewowych, serie korytowe, 5 – gliny zwałowe, 6 – piaski wodnolodowcowe i lodowcowe, rzeczno-peryglacialne: moren czołowych, ozów, kemów, sandrów, 7 – utwory zastoiskowe, 8 – zwietrzeliny

Fig. 8. Distribution of water pipelines failures in 2012 depending on the surrounding soil; 1 – embankments, 2 – alluvial deposits, gythias, 3 – colluvium and deluvium + alluvial cones, 4 – sands and gravels of flood terraces, a series of beds, 5 – tills, 6 – glacial and fluvioglacial sands, river-periglacial: front moraine, eskers, kames, sandurs, 7 – pocket deposits, 8 – weathered materials



Rys. 9. Rozkład uszkodzeń przewodów wodociągowych w 2012 r. w zależności od zasięgu występowania wód gruntowych; 1 – wody gruntowe powyżej 2 m p.p.t., 2 – wody gruntowe poniżej 2 m p.p.t.

Fig. 9. Distribution of water pipelines failures in 2012 depending on the range of occurrence of groundwater; 1 – groundwater above 2 m p.p.t., 2 – groundwater below 2 m p.p.t.

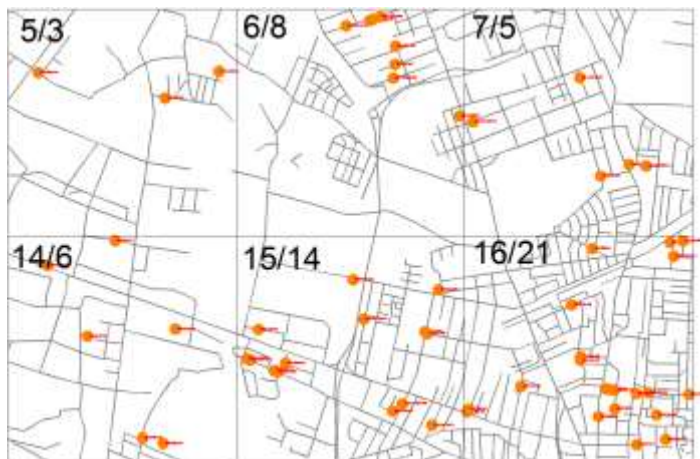
4.3. Klasyfikacja obiektów infrastruktury wodociągowej pod kątem ryzyka awarii

W przypadku sieci wodociągowej ryzyko dotyczy przerw w dostawie wody do odbiorców i związanych z tym strat wody. Badane obiekty sklasyfikowano pod kątem ryzyka wystąpienia awarii w kolejności od maksymalnego do minimalnego. Klasyfikacje przygotowano z uwzględnieniem różnych kryteriów. Należy zaznaczyć, że są one pochodną zakresu i dokładności danych źródłowych, jakie można było uzyskać na potrzeby prowadzonych analiz.

1. Obiekty według funkcji:
 - przewody rozdzielcze,
 - przewody magistralne.
2. Obiekty według materiału:
 - przewody z żeliwa (głównie szarego),
 - przewody z PVC,
 - przewody azbestocementowe,
 - przewody stalowe.
3. Obiekty z uwzględnieniem wpływu rodzaju gruntu:
 - przewody ułożone w glinach zwałowych,
 - przewody ułożone w piaskach wodnolodowcowych i lodowcowych.
4. Obiekty z uwzględnieniem wpływu poziomu wód gruntowych:
 - przewody ułożone na głębokości zalegania wód gruntowych poniżej 2 m,
 - przewody ułożone na głębokości zalegania wód gruntowych powyżej 2 m.
5. Obiekty z uwzględnieniem wpływu ciśnienia w sieci:
 - przewody ułożone w strefie o maksymalnym ciśnieniu powyżej 60 m s w.,
 - pozostałe przewody wodociągowe.

4.4. Rozkład przestrzenny awaryjności sieci wodociągowej

Ze względu na ograniczoną dostępność danych przestrzenne rozkłady awaryjności sieci opracowano dla ostatniego 2012 r. obserwacji. W tym celu na mapie miasta z naniesioną siecią wodociągową utworzono regularną siatkę jednakowych pól i zidentyfikowano w nich awarie, uwzględniając przede wszystkim lokalizację oraz w miarę możliwości wszystkie czynniki determinujące zdarzenia awaryjne. Rozkład przestrzenny awarii zilustrowano na przykładzie fragmentu podstawowej warstwy tematycznej, tj. siatki ulic z inwentaryzacją awarii (rys. 10. i 11.).



Rys. 10. Fragment planu ogólnej siatki ulic z inwentaryzacją awarii;
2/3 – nr strefy/liczba awarii w strefie

Fig. 10. Fragment of a general plan for the street grid with the inventory of the accident; 2/3 – no area/number of failures in the area



Rys. 11. Szczegóły oznaczenia awarii na planie ogólnym z rys. 10.; R – przewód rozdzielczy, Ź – żeliwo, LU – luty, N – nie występuje

Fig. 11. Details of the sign of failure on the general plan from Fig. 10; R – distribution pipe, Y – cast iron, LU – February, N – not occur

5. Dyskusja wyników i wnioski

W całym okresie (2008-2012) obserwacji odnotowano 1991 uszkodzeń na przewodach sieci wodociągowej. Zdecydowanie najwięcej awarii, bo 96%, wy-

stąpiło na przewodach rozdzielczych, a tylko 4% na magistralnych, tj. 24 razy mniej. Badana sieć wodociągowa nie wyróżnia się wysoką awaryjnością – średnia intensywność uszkodzeń wyniosła 0,27 uszk./km-rok i jest porównywalna z intensywnością uszkodzeń sieci wodociągowych miast polskich badanych w latach 2005-2008 (0,37 uszk./km-rok) [14].

Najwyższą intensywnością uszkodzeń charakteryzują się przewody żeliwne (0,43 uszk./km-rok), co oznacza, że średnio w roku jedna awaria wystąpiła na 2,3 km przewodów. Natomiast najmniejszą intensywność uszkodzeń mają rurociągi polietylenowe (0,06 uszk./km i rok) lub inaczej jedna awaria w roku na długości 16,3 km przewodów. Wraz ze wzrostem wysokości ciśnienia w sieci wzrasta także awaryjność (trend ten zaobserwowano zwłaszcza bardzo wyraźnie dla wysokich wartości ciśnienia powyżej 60 m.s.w. (rys. 4.).

Można zauważyć znaczący wpływ pory roku i związanej z nią temperatury powietrza i gruntu na awaryjność sieci wodociągowej. W miesiącach zimowych, tj. grudzień, styczeń, luty, zarejestrowano największą liczbę awarii (37% wszystkich uszkodzeń). Zdecydowanie mniej uszkodzeń występowało wiosną i latem, a miesiącem o najniższej intensywności uszkodzeń (0,01 uszk./km-rok) był czerwiec (rys. 6.). Można również zaobserwować silną odwrotną zależność liczby uszkodzeń od średniej temperatury powietrza w mieście – gdy temperatura wzrastała, liczba awarii malała w skali roku (rys. 5.).

Ponad połowa awarii wiąże się z przewodami ułożonymi w glinach zwałowych, natomiast co czwarta awaria wodociągowa wystąpiła na rurociągach ułożonych w piaskach wodnolodowcowych i lodowcowych (rys. 7.). Ponad 80% awarii wystąpiło na przewodach ułożonych powyżej poziomu wody gruntowej. W związku z tym można ogólnie stwierdzić, że wpływ wód gruntowych na awaryjność sieci wodociągowej jest niewielki (co piąte uszkodzenie).

W badanym okresie, tj. 5 lat, liczba awarii wykazuje tendencję rosnącą niezależnie od rodzaju materiału. Wyjątkiem są lata 2010 (415 awarii) i 2011 (351 awarii). Na sytuację tę wpłynęły głównie awarie na przewodach żeliwnych. Awarie przewodów wykonanych z żeliwa charakteryzują się dużą różnorodnością. Dominującymi uszkodzeniami są jednak pęknięcia poprzeczne i podłużne. Uszkodzenia w 88% powodowały wyłączenie przewodu z pracy.

Przewody ze stali ulegały głównie korozji (74% awarii). Awarie te powodowały na ogół przerwy w dostawie wody do odbiorców. Przewody z PVC uszkadzały się najczęściej w sposób mechaniczny (ponad $\frac{3}{4}$ wszystkich awarii). W 99% przypadków awarie skutkowały wyłączeniem odcinka z pracy. Rurociągi polietylenowe (PE) ulegały uszkodzeniom mechanicznym. W przypadku rurociągów wykonanych z azbestocementu uszkodzenia miały głównie charakter pęknięć poprzecznych i podłużnych (odpowiednio 51% i 31%).

Ogólnie można stwierdzić, że największym ryzykiem awarii są obciążone przewody rozdzielcze wykonane z żeliwa (szarego), ułożone w glinach zwałowych, przy głębokości zalegania wód poniżej 2 m i ciśnieniu powyżej 60 m.s.w.

Strefy o największej liczbie awarii są skupione w południowo-wschodniej części miasta, jednak głównie obejmują jego centrum. Liczba awarii występujących w tych obszarach przekracza 10, a w niektórych nawet 20 w ciągu jednego roku. Ponieważ obszary te charakteryzują się dużą gęstością zabudowy, usuwanie awarii może być utrudnione ze względu na problemy związane z dostępnością terenu.

Wizualizacja oceny zasięgu skutków awarii jest niezwykle trudna, podobnie jak w przypadku sieci kanalizacyjnych, ze względu na ograniczoną ilość danych w archiwach przedsiębiorstwa i stopień szczegółowości dostępnych map. Dlatego nie zawsze można było zastosować jednostkową intensywność uszkodzeń, która byłaby lepszym wskaźnikiem awaryjności niż liczebność awarii. Niemniej liczby awarii skojarzone z określonymi obszarami miasta sygnalizują także gęstość nasilenia uszkodzeń w tych rejonach, co może być istotną pomocą dla eksploatatora sieci.

6. Podsumowanie

Pomimo dużego zaawansowania prac wdrożeniowych w zakresie tworzenia baz danych typu GIS w przedsiębiorstwach wodociągowych nadal widać duże braki w zasobach tych baz niezbędnych do analizy i oceny awaryjności obiektów wodociągowych, która jest podstawą oceny stanu technicznego, a w konsekwencji podejmowania decyzji o ich odnowie.

Na podstawie zebranych dotychczas doświadczeń i analiz danych zawartych w bazach typu GIS innych przedsiębiorstw można stwierdzić, że opracowane już podstawy standardów określających sposób wykorzystania tych baz do oceny awaryjności sieci wodociągowych nie są jeszcze stosowane w przedsiębiorstwach wodociągowych. Ponieważ bazy GIS stwarzają ogromne możliwości usprawnienia procesu zarządzania eksploatacją układów sieciowych, chociażby poprzez wspomaganie oceny przestrzennej stanu technicznego przewodów i podejmowania decyzji odnośnie do ich odnowy, warto podejmować próby odpowiedniego porządkowania i uzupełniania danych o awariach w GIS.

Literatura

- [1] Bjorklund I.: Plastic pipes in water distribution systems. A study of failure frequencies. The Nordic Plastic Pipe Association, Stockholm 1990.
- [2] Buckler M., Sattler R.: DVGW-Schadenstatistik Wasser, erste Auswertung und Umsetzung. GWF Wasser-Abwasser, nr 13, 1999, s. 48-53.
- [3] Dohnalik P., Jędrzejewski A.: Efektywna eksploatacja wodociągów. Wydaw. LEM-tech Konsulting sp. z o.o., Kraków 2004.
- [4] Hotłoś H.: Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacji sieci wodociągowych. Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007 (rozprawa habilitacyjna).

- [5] Hotłoś H., Mielcarzewicz E.: Warunki i ocena niezawodności działania sieci wodociągowych i kanalizacyjnych na terenach górniczych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, seria: Monografie, nr 56, Wrocław 2011.
- [6] Iwanek M., Kowalska B., Kowalski D., Kwietniewski M., Miszta-Kruk K., Rzepka A., Szotowicz K.: Wpływ różnych czynników na awaryjność sieci kanalizacyjnych w układzie przestrzennym – studium przypadku. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej (JCEEA), t. XXXII, z. 62, nr 1/15.
- [7] Kowalska B., Kowalski D., Kwietniewski M., Miszta-Kruk K.: Ocena awaryjności systemu dystrybucji wody z wykorzystaniem bazy danych typu GIS. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”. Poznań-St. Jabłonki 2012, t. II, s. 67-77.
- [8] Kuś K., Witek E.: Badania granicznych wskaźników eksploatacji sieci wodociągowych. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”. Wydaw. PZITS O/Wielkopolski, Poznań 1998.
- [9] Kwietniewski M.: Metodyka badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych pod kątem niezawodności dostawy wody do odbiorców. Prace naukowe „Inżynieria Środowiska”, z. 28. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [10] Kwietniewski M.: Ocena zawodności dostawy wody z punktu widzenia jej odbiorców na przykładzie badań w wybranym osiedlu mieszkaniowym. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, Kraków 2000, s. 705-713.
- [11] Kwietniewski M., Rak J.: Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Studia z Zakresu Inżynierii, nr 67. Polska Akademia Nauk, Warszawa 2010.
- [12] Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczkiwicz H.: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa 1993.
- [13] Kwietniewski M., Podedworna J., Sozański M. (red.): Stan aktualny i kierunki rozwoju nauki w zakresie zaopatrzenia w wodę, usuwania ścieków i unieszkodliwiania osadów oraz gospodarki odpadami. Wydaw. Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Studia z Zakresu Inżynierii, nr 85. Warszawa 2014.
- [14] Kwietniewski M., Tłoczek M., Wysocki L.: Zasady doboru rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych do budowy przewodów wodociągowych. Wydaw. Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”, Bydgoszcz 2011.
- [15] Piechurski F., Kuś K.: Znaczenie wskaźników awaryjności i strat wody w ocenie pracy sieci wodociągowej. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”. Wyd. PZITS O/Wielkopolski, t. II, Poznań 2004, s. 603-617.
- [16] „Przygotowanie założeń i wdrożenie Zintegrowanego Systemu Zarządzania Infrastrukturą Techniczną Przedsiębiorstwa. Cz I.” Projekt realizowany dla MPWiK „Wodociągi Puławskie” w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Działanie 1.4, 2011-2012, <http://www.mpwik.pulawy.pl/> (dostęp: 26.11.2014).
- [17] Rak J.: Zarządzanie ryzykiem w systemie zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
- [18] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: Czynniki ryzyka w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.

- [19] Rak J. (red.), Kwietniewski M., Kowalski D., Tchórzewska-Cieślak B., Zimoch I., Bajer J., Iwanek R., Miszta-Kruk K., Studziński A., Boryczko K., Pietrucha-Urbaniak K., Piegoń I.: *Metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [20] Tanyimboh T.T., Tabesh M., Burrows R.: *Appraisal od source head methods for calculating reliability of water distribution networks*. ASCE J Water Res Plan Manage., 2001, no. 127(4), pp. 206-213.
- [21] Tchórzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
- [22] Wieczysty A.: *Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych. Cz. I i II: Teoria niezawodności i jej zastosowania*. Politechnika Krakowska, Kraków 1990.
- [23] Wieczysty A., Krawczyk P.: *Ocena uciążliwości przerw w dostawie wody przez jej odbiorców*. Mat. konf. „Bezpieczeństwo, niezawodność, diagnostyka urządzeń i systemów gazowych, wodociągowych, kanalizacyjnych, grzewczych”. Zakopane 2001, s. 409-417.
- [24] Zakrzewska A.: *Wpływ wybranych czynników na niezawodność stalowych i żeliwnych przewodów sieci wodociągowych*. Politechnika Śląska, Gliwice 2005 (rozprawa doktorska).
- [25] Zhang T.: *Application of GIS and CARE-W systems on water distribution networks*, Skärholmen. Praca powstała w ramach „International Master Programme of Environmental Engineering & Sustainable Infrastructure”. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 2006.
- [26] Zimoch I.: *Zintegrowana metoda analizy niezawodności funkcjonowania i bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [27] Zuber T.: *Wpływ eksploatacji górniczej na uszkodzalność sieci wodociągowych i kanalizacyjnych na obszarze wybranych miast Śląska*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 6/1999, s. 207-213.

EFFECT OF VARIOUS FACTORS ON WATER SUPPLY NETWORK FAILURE IN SPATIAL SYSTEM – A CASE STUDY

S u m m a r y

The paper presents results of field reliability tests of water supply network. The investigated network is located in a big city. The study covered 1615 km of water distribution system including a distribution network approx. 1200 km a main pipelines approx. 220 km and transit pipelines approx. 190 km. Main aims of the presented research were an evaluation of failures of water supply network and its elements and an illustration of these failures on numerical maps of the city. During the investigation, authors estimated the influence of following factors on network's objects failures: the type of a pipes (function – main and distribution pipelines), their material (steel, grey cast iron, asbestos-cement, reinforced concrete, PVC, PE) , pressure head, seasons, type of soil and groundwater level (below and above 2 m of the ground level). For the purposes of failure analysis the relevant research objects were extracted. These objects are the basis for the creation of a GIS database for the management failures. A fragment of the street grid plan indicating the points of failures and their descriptions were posted. The following types of failures were identified: dam-

age to corrosion, crack transverse, longitudinal fracture, damage to fittings, mechanical damage, pushing seals, pipe wrench lobe. These failures caused to the following effects in the pipeline work: interruption and disruption in the work. Throughout the observation period 1991 failures were recorded on water supply network. By far the largest failure because 96% occurred on distribution lines. The water supply network is not distinguished by a high failure rate. The average failure rate was 0.27 failures/(km·year) and is comparable with the intensity of failure to the water supply networks of Polish cities surveyed in the 2005 to 2008 (0.37 failures/(km·year)). The additional effect of the investigation is an elaboration of the network's objects failure risk hierarchy. The greatest risk of a failure exists in conditions of distributing pipes, made by gray cast iron, located over 2 m under the ground level in boulder clay.

Keywords: reliability, water supply networks, failure factors, GIS

Przesłano do redakcji: 18.12.2014 r.

Przyjęto do druku: 28.03.2015 r.

DOI: 10.7862/rb.2015.12

