

ŚRODOWISKO

CZASOPISMO TECHNICZNE  
TECHNICAL TRANSACTIONS  
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

WYDAWNICTWO

POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1-Ś/2011

ZESZYT 1

ROK 108

ISSUE 1

YEAR 108

ANDRZEJ STUDZIŃSKI\*

## RYZIKO AWARII PRZEWODÓW ROZDZIELCZYCH WODOCIĄGU KROSNA

### RISK OF WATER DISTRIBUTION CONDUITS FAILURE FOR TOWN OF KROSNO

#### Streszczenie

W artykule podjęto próbę oceny ryzyka konsumentów wody wynikającą z awarii przewodów rozdzielczych. Ryzyko definiowane jest jako wartość oczekiwana strat, jako miarę strat przyjęto liczbę mieszkańców pozbawionych wody na skutek awarii przewodów. Estymacja ryzyka została przeprowadzona dla miasta Krosna. Do określenia prawdopodobieństwa oraz czasu trwania awarii przewodów wykorzystano dane eksploatacyjne z lat 2006–2007. Analizę przeprowadzono, wykorzystując model sieci wodociągowej. Skutki awarii poszczególnych rurociągów określono na podstawie symulacji ich wyłączenia, badając zakres oddziaływania awarii na przyległy obszar.

*Słowa kluczowe: ryzyko, przewody rozdzielcze, model sieci wodociągowej*

#### Abstract

The paper contains an attempt of water consumers risk assesment resulting from distribution conduits failures. Risk is defined as an expected value of losses, as a measurement of loss amount of deprived inhabitants of water was assumed. Risk assesment was made for town of Krosno. For estimating a probability and a time of failure field data from years 2006–2007 were used. An analysis was made using water network model. Results of individual pipes failures were described on the basis of their closing simulations, examining range of closing the pipe influence on neighbouring area.

*Keywords: risk, distribution conduit, water network model*

\* Dr inż. Andrzej Studziński, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska.

## 1. Wstęp

Pojęcie ryzyka definiowane jest jako wartość oczekiwana strat, czyli suma iloczynu prawdopodobieństwa zdarzeń negatywnych i ich skutków [3–5], zapisana równaniem:

$$r = \sum_i P_i \cdot C_i \quad (1)$$

gdzie:

- P – prawdopodobieństwo zdarzenia niepożądanego,
- C – wartość strat.

Celem pracy jest estymacja ryzyka konsumenta wody miasta Krosna. Z uwagi na szerokie spektrum skutków awarii sieci wodociągowej (np. utrudnienia w korzystaniu z wody przez odbiorców indywidualnych, ograniczenie bezpieczeństwa pożarowego czy zaburzenia procesów produkcyjnych) jako wskaźnik strat przyjęto liczbę mieszkańców pozbawionych wody na skutek awarii danego przewodu.

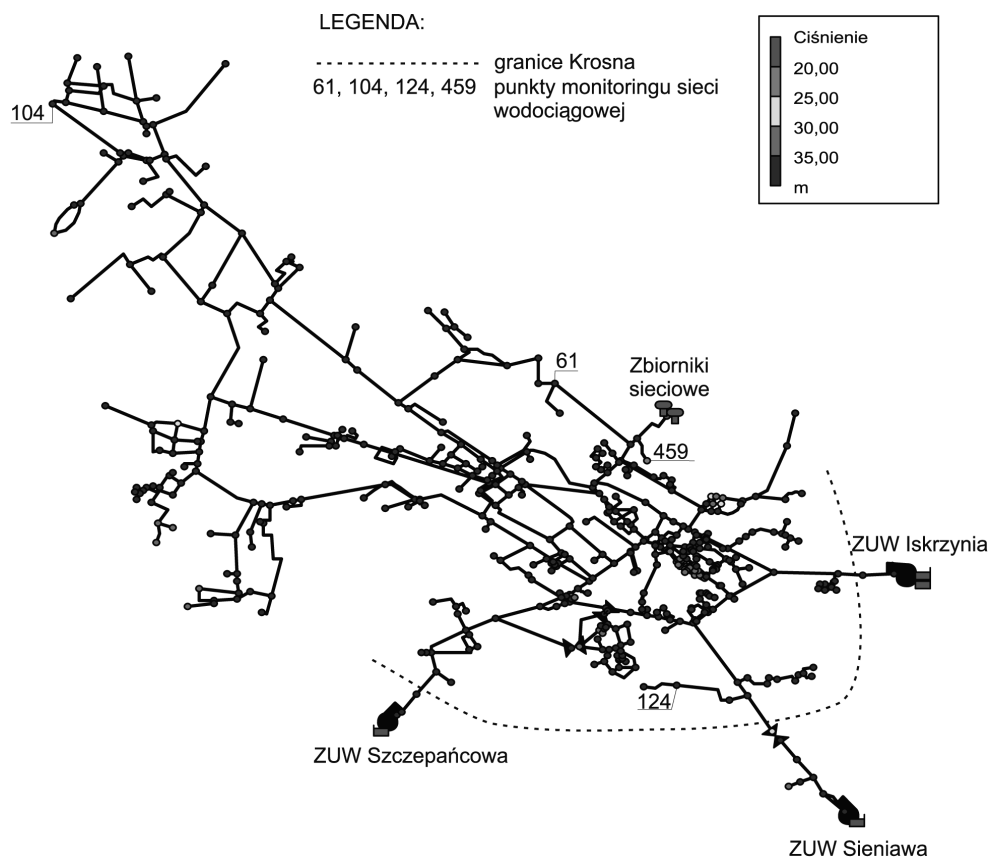
Krosno zaopatrywane jest w wodę z trzech ujęć, dla których źródłem wody są wody powierzchniowe: ZUW Sieniawa, ZUW Szczepańcowa i ZUW Iskrzynia. Woda przewodami magistralnymi doprowadzana jest na terenie miasta do sieci wodociągowej, która współpracuje z terenowymi zbiornikami wyrównawczymi. Wodociąg swoim zasięgiem obejmuje również sąsiednie miejscowości, w tym położone wzdłuż trasy magistrali wodociągowej z Sieniawy. Dostawą wody objęte są miejscowości w gminach: Korczyna, Krościenko Wyżne, Miejsce Piastowe, Chorkówka, Jedlice, Wojaszówka, Besko, Zarszyn, Rymanów i Iwonicz Zdrój. System zaopatrzenia w wodę eksploatuje Miejskie Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej w Krośnie. Z uwagi na rozległość wodociągu zakres niniejszego artykułu obejmuje wyłącznie analizę skutków awarii rozdzielczych przewodów wodociągowych na terenie miasta Krosna.

## 2. Metodyka

Analiza została przeprowadzona na podstawie modelu systemu zaopatrzenia w wodę opracowanego w programie Epanet 2. Model utworzono, wykorzystując dane uzyskane z Miejskiego Przedsiębiorstwa Gospodarki Komunalnej w Krośnie. Przedstawia stan systemu na koniec 2008 roku. Model sieci wodociągowej przedstawiono na rys. 1.

Model opracowano na podstawie danych uzyskanych z MPGK w Krośnie. Zakres danych obejmował:

- pompownie 2<sup>o</sup> w Sieniawie, Iskrzyni oraz Szczepańcowej (charakterystyki pomp, algorytmy sterowania, rzędne osi pomp, układ przewodów ssawnych oraz tłocznych),
- sieciowe zbiorniki wyrównawcze (wymiary, rzędne charakterystycznych poziomów napełnienia),
- przewody (średnice, materiał, wiek, długość, rzędne w węzłach początkowym i końcowym),
- rozbiory na poszczególnych odcinkach,
- pozostałe istotne dla pracy sieci wodociągowej elementy (hydrofornie, zawory redukcyjne).



Rys. 1. Model sieci wodociągowej Krosna, zaznaczono węzły, w których prowadzony jest monitoring sieci

Fig. 1. Water network model for town of Krosno, marked junctions with network monitoring

Szczególny nacisk położono na identyfikację rozbiórów odcinkach, ich rzetelne odwzorowanie umożliwiły cyfrowe mapy sieci wodociągowej. Chropowatość bezwzględna dla rur stalowych oraz żeliwnych  $k$  [mm] określono z zależności [2]:

$$k_t = 0,6 + 0,123 \cdot t^{0,902} \quad (2)$$

gdzie:

$t$  – czas eksploatacji [a].

Wytyczne weryfikacji modeli systemów zaopatrzenia w wodę zostały przedstawione w monografii [1]. Weryfikacji modelu dokonano na podstawie danych z monitoringu sieci wodociągowej (4 węzły) oraz danych dotyczących pompowni 2° i zbiorników sieciowych z 1 doby (od godziny 7:00 13 marca do godziny 7:00 14 marca 2009) przez porównanie danych eksploatacyjnych i wyników symulacji.

Porównanie danych rzeczywistych i wyników symulacji w węzłach sieci objętych monitoringiem pozwala na następujące stwierdzenia: maksymalna różnica ciśnień wynosi 0,05 MPa,

średnio od 0,014 do 0,019 MPa, co stanowi średnio od 0,7 do 9,8%, przy czym wartości maksymalne zaobserwowano dla węzła nr 495, w którym średnie ciśnienie w rozpatrywanej dobie wynosi 0,2 MPa i różnica pomiędzy wartościami rzeczywistymi oraz uzyskanymi przez obliczenia w modelu w tym węźle nie przekracza 0,03 MPa.

Różnica poziomów wody w zbiornikach sieciowych pomiędzy rzeczywistymi odczytami a modelem w ciągu całej symulacji wynosi maksymalnie 9 cm na obu zbiornikach (niższy poziom w zbiornikach w modelu).

Średnia różnica wydajności poszczególnych pompowni wynosi: Sieniawa – 4,5%, Szczepańcowa – 6,3%, Iskrzynia – 7,9%, maksymalną wartość zaobserwowano dla pompowni w Iskrzyni w pierwszej godzinie symulacji i wynosiła ona 60,3%. Należy zaznaczyć jednak, że dysponowano chwilowymi odczytami rzeczywistych wydajności pompowni, co przy płaskich charakterystykach wydajności pomp oznacza niską wiarygodność tego elementu porównania.

Na podstawie powyższych wartości uznano jakość odwzorowania sieci wodociągowej jako wystarczająco dokładną dla przeprowadzenia analizy.

Analizę przeprowadzono przez symulowanie wyłączenia poszczególnych odcinków sieci wodociągowej z eksploatacji w czasie równym przeciętnemu czasowi braku dostawy wody, który został opracowany dla danych eksploatacyjnych zestawionych w tabeli nr 1. W tabeli zestawiono dane dla średnic z zakresu 80–300 mm, przy czym wszystkie przewody DN 250 mm potraktowano jako magistralne, natomiast 2 odcinki DN 300 mm uznano za rozdzielcze.

Dane odnoszące się do prawdopodobieństwa oraz czasu trwania awarii, których skutkiem jest przerwanie przepływu wody na odcinkach (czyli wyłącznie tych, których naprawa wymaga wyłączenia odcinka z eksploatacji), zaczerpnięto z danych eksploatacyjnych.

Tabela 1

Dane dotyczące czasu usuwania awarii sieci wodociągowej Krosna w latach 2006–2007

Średnica nominalna	Liczba awarii	Czas wyłączenia odcinka z eksploatacji $T_n$		Całkowity czas naprawy	
		Zakres	Wartość średnia	Zakres	Wartość średnia
[mm]	[-]	[h]	[h]	[h]	[h]
80	12	1–16,5	4,71	3,5–18	7,3
100	12	1–11	3,96	2,5–16	9,5
150	22	1–10	3,73	4–16	6,5
200	5	4–5	4,5	8–10	8,5
250	7	3–18	6,14	5–18,5	9,5
300	2	5–10,5	7,75	6–11	8,2

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych z MPGK w Krośnie

Średnia wartość czasu braku dostawy wody z przewodów rozdzielczych określona dla lat 2006–2007 wynosi  $T_n = 4,09$  h, w symulacjach przyjęto wartość 4,1 h dla wszystkich rozpatrywanych odcinków.

Jako miarę prawdopodobieństwa awarii przyjęto estymator wskaźnika postoju  $K_p$  [8] obliczony z zależności:

$$K_p = 1 - K = 1 - \frac{T_p}{T_p + T_n} \quad (3)$$

gdzie:

$K$  – wskaźnik gotowości, [-],

$T_p$  – wartość średnia czasu pracy pomiędzy uszkodzeniami [a].

$$T_p = \frac{1}{\lambda \cdot L} \quad (4)$$

gdzie:

$\lambda$  – intensywność uszkodzeń [ $1/a \cdot km$ ],

$L$  – długość przewodów [km].

Obliczenia te przeprowadzono dla wszystkich przewodów rozdzielczych łącznie, bez podziału na poszczególne średnice nominalne. Średnia długość przewodów rozdzielczych w latach 2006–2007 wynosi 149,4 km, zanotowano 51 awarii. Intensywność uszkodzeń wynosi  $\lambda = 0,17$   $1/a \cdot km$ . Wartość estymatora wskaźnika postoju  $K_p$  przedstawiono w tabeli nr 2.

Tabela 2

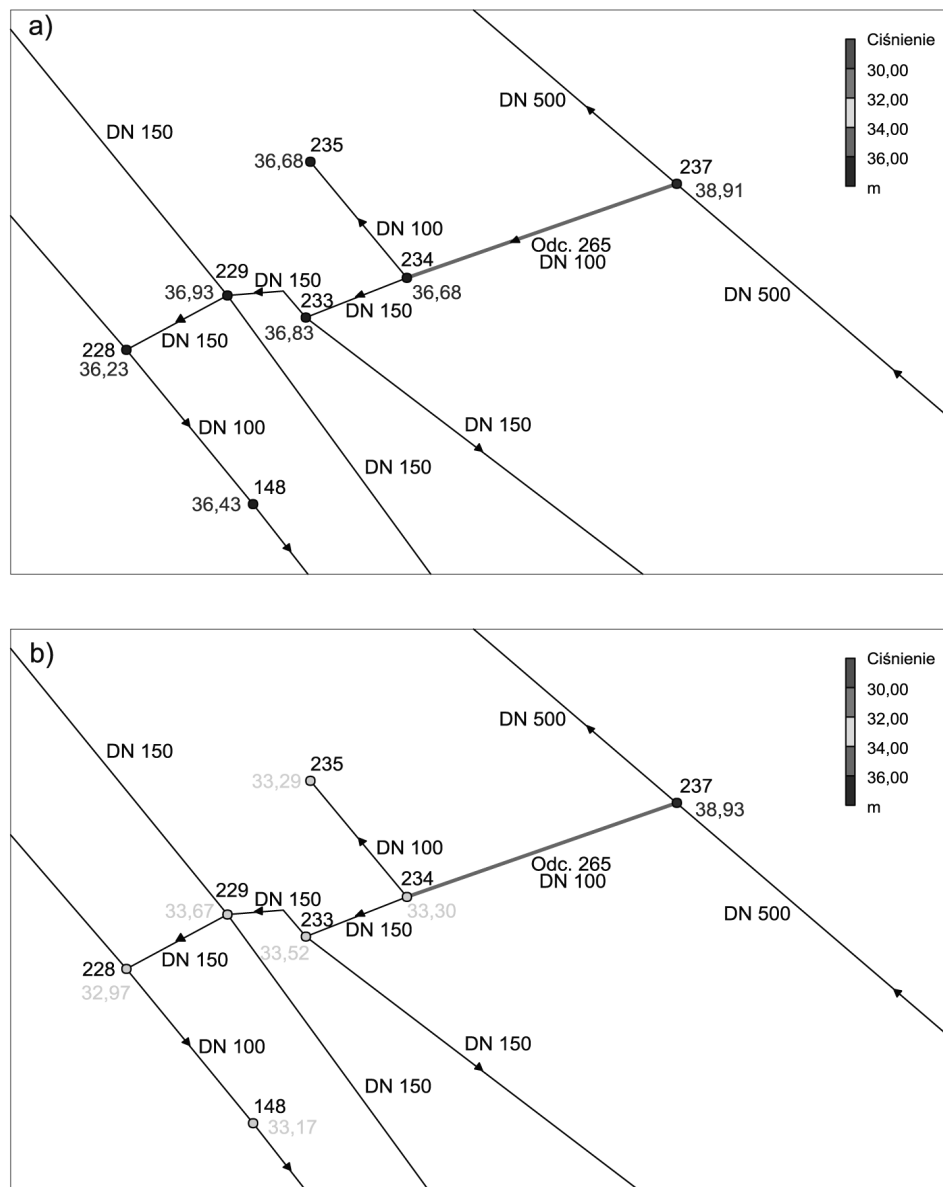
Zestawienie danych do obliczeń prawdopodobieństwa awarii

Średnica nominalna	Liczba awarii	$T_n$	$\lambda$	$T_p$	$K_p$
[mm]	[-]	[a]	[ $km^{-1} \cdot a^{-1}$ ]	[a]	[-]
80–300	51	0,00047	0,17	$\frac{1}{0,17 \cdot L}$	$1 - \frac{\frac{1}{0,17 \cdot L}}{0,00047 + \frac{1}{0,17 \cdot L}}$

Źródło: opracowanie własne

### 3. Wyniki symulacji i estymacja ryzyka

Zakres skutków oszacowano na podstawie symulacji czasowych wyłączenia poszczególnych odcinków sieci, wygenerowanych za pomocą modelu sieci. Symulowano awarie przewodów w czasie trwania przyjętym jako średni czas braku dostawy wody, podczas doby, w której występuje średni dobowy rozbiór wody. Jako początek awarii przyjęto godzinę 6:00 – pierwszą godzinę, w której rozbiór przekracza wartość średnią. Przyjęto typowy dla wodociągu reżim pracy pompowni oraz napełnienie w zbiornikach sieciowych 50%. Rozpatrywano wyłączenie równocześnie jednego odcinka. Analizy dokonano przez porównanie ciśnień i przepływów w sieci wodociągowej podczas doby, w której wszystkie przewody są sprawne z dobą, w której symulowano awarie.



Rys. 2. Symulacja awarii odcinka DN100 (niebieski), zaznaczono ciśnienia w węzłach:  
a) praca bezawaryjna, b) awaria

Fig. 2. Pipe DN 100 (blue) failure simulation, pressure in junctions are shown:  
a) failure-free exploitation, b) failure

Na rysunku 2 pokazano przykładowy obraz symulacji awarii odcinka oznaczonego w modelu nr 265 o średnicy nominalnej DN 100 i długości 114 m, położonego wzdłuż ulicy Oficerskiej w dzielnicy Śródmieście. Z odcinka tego zaopatrywane są budynki 4-piętrowe, co oznacza

wartość wymaganą ciśnienia – około 25 m. W tabeli nr 3 przedstawiono ciśnienia w sąsiednich węzłach podczas pracy bezawaryjnej oraz podczas awarii rozpatrywanego odcinka.

Tabela 3

**Wysokość ciśnienia w węzłach sąsiadujących z odcinkiem nr 265, E – eksploatacja, A – awaria**

Godzina	Węzeł nr 233		Węzeł nr 234		Węzeł nr 235		Węzeł nr 237	
	E	A	E	A	E	A	E	A
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
7:00	36,83	33,52	36,68	33,30	36,68	33,29	38,91	38,93
8:00	36,41	32,54	36,27	32,32	36,26	32,31	38,76	38,78
9:00	36,20	32,12	36,06	31,89	36,06	31,89	38,66	38,68
10:00	36,41	32,45	36,17	32,23	36,17	32,22	38,66	38,69
11:00	36,15	31,90	36,05	31,68	35,91	31,67	38,55	38,58
12:00	36,43	36,33	36,19	36,19	36,18	36,19	38,61	38,61

Źródło: opracowanie własne

Porównanie wysokości ciśnienia wskazuje na obniżenie ciśnienia o około 4 m w węzłach 233, 234 oraz 235 podczas awarii, po czym wysokość ciśnienia jest porównywalna z wartościami dla pracy bezawaryjnej.

Symulacje wykazały 15 odcinków, których awaria powoduje obniżenie ciśnienia w przyległych węzłach o minimum 0,01 MPa (maksymalnie 0,064 MPa), 7 z nich znajduje się w dzielnicy Śródmieście, pozostałe zlokalizowane są w dzielnicach: Przemysłowej, Polanka oraz Białobrzegi. Są to następujące odcinki:

- ul. Jasna, DN 100,
- ul. Grodzka, DN 100,
- ul. Kisielewskiego, DN 150,
- ul. Oficerska, DN 100,
- ul. Bohaterów Westerplatte, DN 100,
- ul. Bohaterów Westerplatte, DN 150,
- DN 150,
- ul. Grodzka, DN 100,
- ul. Bohaterów Westerplatte, DN 150,
- ul. Baczyńskiego, DN 150,
- ul. Skłodowskiej-Curie, DN 150,
- ul. Tysiąclecia, DN 150,
- ul. Lwowskiej, DN 150,
- ul. Bohaterów Westerplatte, DN 150,
- ul. Bohaterów Westerplatte, DN 100.

Modelowanie awarii pozostałych odcinków powoduje zmiany ciśnienia nieprzekraczające 0,01 MPa.

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że w przypadku przewodów rozdzielczych skutki awarii dotyczą wyłącznie odbiorców podłączonych bezpośrednio do tych odcinków, co potwierdza trafność analizy przeprowadzonej dla Rzeszowa [6]. Wyjątkiem od tej reguły są odcinki końcówek sieci, gdzie ze względu na konfigurację terenu oraz przestrzenny rozkład zabudowy, sieć wodociągowa przechodzi w promienistą. Szczególnie dotkliwe skutki powodują wyłączenia z pracy odcinków, z których zaopatrywane są hydrofornie na terenie miasta.

Potwierdzeniem powyższych stwierdzeń jest praktyka eksploatacyjna. Na podstawie informacji uzyskanych od eksploatatora sieci wodociągowej Krosna nie odnotowuje się zgłoszeń dotyczących braku wody lub odczuwalnego obniżenia ciśnienia w instalacjach wewnętrznych od mieszkańców, którzy nie są zaopatrywani w wodę z uszkodzonego odcinka.

Zestawienie obliczeń ryzyka rozumianego jako wartość oczekiwana liczby mieszkańców pozbawionych wody przedstawia tabela 4. Zestawiono liczbę odcinków rozdzielczych dla danej średnicy nominalnej, średnią wartość ryzyka dla poszczególnych średnic  $r_{sr}$ , wartość odchylenia standardowego  $\sigma$ , wartość ryzyka dla poszczególnych średnic nominalnych  $r_{DN}$  oraz wartość ryzyka odniesioną dla 1 m przewodu danej średnicy nominalnej.

Tabela 4

## Ryzyko awarii przewodów rozdzielczych

Średnica nominalna	Liczba odcinków	Ryzyko $r$				
		zakres zmian	$r_{sr}$	$\sigma$	$r_{DN}$	$r$ na 1 m przewodu
80	10	0,0009–0,0047	0,0018	0,0017	0,02	$1,68 \times 10^{-5}$
100	95	0,00002–0,068	0,0026	0,0075	0,25	$1,50 \times 10^{-5}$
125	2	0,00001–0,00003	0,0053	0,0049	0,01	$2,20 \times 10^{-5}$
150	90	0,000004–0,065	0,0050	0,0111	0,45	$2,73 \times 10^{-5}$
200	7	0,00007–0,011	0,0039	0,0033	0,03	$2,76 \times 10^{-5}$
300	2	0,00021–0,0044	0,0023	0,0021	0,00	$2,68 \times 10^{-5}$

Źródło: opracowanie własne

Zwraca uwagę niewielka liczba odcinków o średnicach 80, 125, 200 oraz 300 mm, zdecydowaną większość stanowią odcinki DN 100 i DN 150 mm (89% ogólnej liczby odcinków oraz 94% długości). Niewielka liczba odcinków rozdzielczych DN 80 wynika z ich stosowania prawie wyłącznie jako odgałęzienia do hydrantów, które z racji zwykle niewielkiej długości nie stanowią miejsca podłączeń wodociągowych. Średnica DN 125 mm była w przeszłości rzadko stosowana, natomiast średnice DN 250 i większe w miastach tej wielkości stanowią zwykle rurociągi magistralne.

Zakres zmian dla poszczególnych średnic jest szeroki, co wynika głównie z różnych długości i liczby podłączonych mieszkańców (gęstości zabudowy). Średnie wartości ryzyka przypadające na odcinek rozdzielczy różnią się nawet trzykrotnie. Na uwagę zasługuje wartość ryzyka odniesionego do 1 m rurociągu – wykazuje wartości zbliżone, zwłaszcza w zakresie średnic 150–300 mm, jednak wartości uzyskane dla średnic DN 100 i DN 150 mm



reprezentowanych przez większość odcinków różnią się prawie dwukrotnie. Przypuszczalnie należy poszukiwać związków pomiędzy odcinkami zaopatrującymi obszary o podobnej gęstości zaludnienia, a nie zależnych od średnicy.

Przyjmując jako wartość oczekiwaną strat liczbę mieszkańców pozbawionych wody, ryzyko awarii rozdzielczych przewodów wodociągowych Krosna można określić jako sumę ryzyk  $r_{DN}$  i wynosi ono dla przedstawionych danych  $r = 0,76 M$ , co stanowi 0,0017% korzyści z wodociągu.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzona analiza dowodzi znikomego wpływu awarii odcinków będących częścią pierścieni zarówno na przepływy w odcinkach sąsiednich, jak i rozkład linii ciśnienia w przyległym obszarze. Wyłączenie wszystkich rozpatrywanych odcinków rozdzielczych budujących pierścienie skutkuje ograniczeniem dostawy wody tylko dla przyłączonych do nich odbiorców. Powyższe stwierdzenie nie dotyczy przewodów, które stanowią końcówki sieci o strukturze promienistej, gdzie awaria rurociągu pociąga za sobą brak dostawy wody również dla odcinków z niego zaopatrywanych.

Podczas symulacji awarii w sąsiednich węzłach zaobserwowano spadek ciśnienia nieprzekraczający 0,064 MPa (w zdecydowanej większości poniżej 0,01 MPa). W każdym przypadku awaria nie powoduje spadku ciśnienia poniżej wartości ciśnienia gospodarczego w sieci wodociągowej. Można stwierdzić, że uszkodzenia przewodów nie powodują ograniczenia dostawy wody dla odbiorców podłączonych do sąsiednich odcinków.

Przedstawiona metodyka oceny ryzyka związanego z awariami sieci wodociągowej jest niezmiernie pracochłonna oraz obciążona niepewnością, która wynika zarówno z losowości wielu czynników eksploatacyjnych (np. rozbioru wody), jak również wielu wielkości przyjmowanych arbitralnie podczas budowy modelu (np. chropowatości bezwzględnej rur). Uzyskane wyniki symulacji zarówno sieci wodociągowej Krosna, jak i Rzeszowa [6] pozwalają uprościć metodykę szacowania ryzyka awarii sieci wodociągowej w odniesieniu do przewodów rozdzielczych przez pominięcie modelowania całej sieci wodociągowej i skupieniu się na przewodach magistralnych. Wydaje się zatem, że szacowanie strat związanych z awariami przewodów rozdzielczych możliwe jest wyłącznie na podstawie przyporządkowania im rozbiorów [7].

Ryzyko definiowane jako wartość oczekiwana liczby mieszkańców pozbawionych wody na skutek awarii przewodów rozdzielczych dla przyjętych założeń oraz przedstawionych danych eksploatacyjnych wynosi  $r = 0,76 M$ . Wartość ta pozwala zakwalifikować je jako kontrolowane [5].

*Praca naukowa finansowana jest ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu rozwojowego Nr N R14 0006 10 nt. „Opracowanie kompleksowej metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców” w latach 2010–2013.*

## Literatura

- [1] Knapnik K., *Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociagowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2000, 1-140.
- [2] Mielcarzewicz E., *Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę*, Arkady, Warszawa 2000, 1-461.
- [3] PN-EN ISO 14121-1:2008 *Maszyny. Bezpieczeństwo. Zasady oceny ryzyka*.
- [4] Rak J.R., Tchórzewska-Cieślak B., *Czynniki ryzyka w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, 1-190.
- [5] Rak J.R., *Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004, 1-113.
- [6] Studziński A., *Analiza hydrauliczna skutków awarii przewodów wodociagowych Rzeszowa*, Instal nr 10, Wydawnictwo Ośrodka Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa 2008, 109-112.
- [7] Tchórzewska-Cieślak B., Wybraniec E., *Metoda wyznaczania obszarów ryzyka awarii w podsystemie dystrybucji wody*, Instal, nr 10, Wydawnictwo Ośrodka Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa 2008, 99-101.
- [8] Wiczysty A., *Niezawodność systemów wodociagowych i kanalizacyjnych*, t. 1 i 2, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.