

Izabela Zimoch

## Regulacja ciśnienia jako element zarządzania ryzykiem eksploatacji sieci wodociągowej

Znaczenie polskiego słowa eksploatacja nie ma prostego odpowiednika w językach obcych – np. francuskie „maintenance” oznacza „trzymanie w rękę”, czy niemieckie „Instandhaltung” w znaczeniu „w stanie trzymania” odnoszą się raczej do obsługiwanego, postrzeganego jako najważniejszy proces eksploatacji. Polskie znaczenie słowa „eksploatacja” to działania obejmujące całość zjawisk i ich powiązań oraz właściwe organizowanie działań operacyjnych, takich jak użytkowanie, obsługiwanie czy zarządzanie. Użytkowanie polega na wykorzystaniu obiektu lub systemu technicznego w czasie eksploatacji zgodnie z przeznaczeniem, podczas gdy obsługiwanie to zespół czynności technicznych wykonywanych w ramach obiektu (urządzenia) w celu utrzymania wymaganej zdolności użytkowej systemu. Pionierem interpretacji „zarządzania w eksploatacji” był francuski inżynier Henri Floy, który zdefiniował zarządzanie jako sztukę, bądź praktykę rozumnego stosowania środków do osiągnięcia wyznaczonych celów. Paradygmat zarządzania zmienił się od tego czasu radykalnie, a jego obecna interpretacja obejmuje działania polegające na racjonalnym dysponowaniu zasobami [1, 2]. W takim ujęciu eksploatacja systemu zaopatrzenia w wodę winna odznaczać się dążeniem do unifikacji wiedzy eksploatacyjnej, gwarantującej niezawodne i bezpieczne funkcjonowanie obiektów wodociągowych. Zatem niezawodność systemu zaopatrzenia w wodę definiowana jest jako stan eksploatacyjny umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na wodę, w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony.

Współczesna eksploatacja sieci wodociągowej ukierunkowana jest na optymalizację niezawodności poszczególnych jej elementów (reliability-centred maintenance – RCM). Jest to proces stosowany do określania wymagań eksploatacyjnych utrzymania sprawności obiektu technicznego w odniesieniu do bieżących zadań produkcyjnych. Analizy bezpieczeństwa funkcjonowania prowadzone są tu w ujęciu probabilistycznym z wykorzystaniem metod statystycznych i komputerowych technik symulacyjnych. Takie podejście badawcze pozwala na szeroką ocenę zachowań systemu wodociągowego w zmiennych (losowych) warunkach jego pracy. Strategia eksploatacji sieci wodociągowej, według niezawodnościowych kryteriów uszkodzeń, polega na podejmowaniu decyzji operacyjnych na podstawie zarówno okresowej kontroli, jak i wyników analizy stopnia

jej niezawodności. Taki kierunek działań w racjonalnym zarządzaniu siecią wodociągową jest szczególnie istotny zarówno w sytuacji zapewnienia bezpieczeństwa oraz minimalizacji ryzyka funkcjonowania przewymiarowanych systemów zaopatrzenia w wodę, jak i optymalizacji kosztów ich eksploatacji [3–5].

Prezentowane w literaturze krajowej i zagranicznej wyniki prac z zakresu niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę dotyczą głównie trzech nurtów badań. Pierwszy odnosi się do metodyki oceny awaryjności sieci wodociągowej i jej elementów, głównie pod kątem przyczyn, liczby i rodzaju uszkodzeń [6–11]. Drugim szeroko rozważanym problemem naukowym są analizy niezawodnościowe eksploatacji systemów dystrybucji wody uwzględniające straty wody [12–15]. W badaniach tych jednak brakuje szerokich analiz dotyczących wpływu wysokości ciśnienia na awaryjność sieci wodociągowej. Zdarzenia te w istotnym stopniu zwiększają ryzyko wystąpienia przerw w dostawie wody do odbiorców. Istotnym z punktu widzenia konsumentów wody są badania prowadzone w trzecim obszarze, uwzględniające problematykę jakości wody, jej zmian w czasie dystrybucji oraz oceny ryzyka zdrowia przez konsumentów z tego powodu [16–18]. Analiza literatury z tego zakresu wykazała brak kompleksowych metod badawczych uwzględniających niezawodność i ocenę ryzyka funkcjonowania sieci wodociągowej. Z tego względu w analizach niezawodnościowych i bezpieczeństwa eksploatacji sieci wodociągowej niezbędne jest podejście systemowe. Jedynie kompleksowa analiza niezawodności, wraz z pełną interpretacją przyczyn i skutków wystąpienia zdarzeń niepożądanych, pozwala wyłonić słabe ogniwa systemu zaopatrzenia w wodę, a następnie podjąć skuteczne działania operacyjne, podnoszące kompleksowo niezawodność całego systemu, a nie tylko jego poszczególnych elementów.

### Metodyka analizy niezawodności i ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej

Awaryjne wywołane różnymi czynnikami wewnętrznymi (wysokość ciśnienia, korozja rurociągu) i zewnętrznymi (prądy błędzące, obciążenia dynamiczne, zmiana temperatury i wilgotności otoczenia przewodu) są podczas eksploatacji sieci wodociągowej zjawiskiem normalnym. Uszkodzenia te, z uwagi na ich skutki, mogą mieć różny charakter (awaria nagła lub stopniowa). W każdym jednak przypadku metodyka badania niezawodności sieci wodociągowej, jako odnawialnego obiektu technicznego, musi być oparta

na założeniach procesu eksploatacji sieci, obejmującego zarówno cykl jej pracy, jak i odnowy, które w pełnej analizie opisane są podstawowymi parametrami wyrażonymi następującymi formułami:

– intensywność uszkodzeń (uszk./km·a):

$$\lambda(t) = \frac{n_u(t, t + \Delta t)}{L \Delta t} \quad (1)$$

– średni czas pracy między uszkodzeniami (d):

$$T_p = \frac{1}{k+z} \left( \sum_{i=1}^k t_{pi} + z t \right) \quad (2)$$

– średni czas odnowy (h):

$$T_o = \frac{1}{n_o} \sum_{i=1}^{n_o} t_{oi} \quad (3)$$

w których:

$n_u(t, t+\Delta t)$  – liczba wszystkich uszkodzeń w przedziale czasu (t, t+Δt)

L – długość badanych przewodów wodociągowych, km

k, z – liczba przedziałów czasu pracy obiektów uszkadzających i nieuszkadzających się

t – długość czasu badań (obserwacji), d

$t_{pi}$  – wartość i-tego czasu pracy obiektów uszkadzających się, d

$n_o$  – liczba odnow w badanym czasie

$t_{oi}$  – czas trwania i-tej odnowy, h

Niezawodność, bezpieczeństwo i ryzyko to pojęcia, które w teorii eksploatacji systemów technicznych, w tym sieci wodociągowych, są ze sobą ściśle powiązane. Miarą niezawodności bezpieczeństwa jest prawdopodobieństwo niewystąpienia skutków katastrofalnych. Ryzyko natomiast związane jest z dwoma pojęciami – z prawdopodobieństwem (lub częstością) wystąpienia danego zdarzenia (zdefiniowanym jako zagrożenie bezpieczeństwa eksploatacji) oraz skutkami tego zdarzenia. Literatura przedmiotu [18, 19] jednoznacznie wskazuje, iż spośród wielu metod badawczych w praktyce wodociągowej powszechnie zastosowanie znalazła procedura jakościowo-ilościowa szacowania ryzyka, tzw. metoda matrycowa. Badania metodą matrycową wymagają identyfikacji zagrożeń eksploatacji systemu dystrybucji wody (scenariusze awaryjne) pod względem prawdopodobieństwa ich występowania oraz potencjalnych skutków. Matryca (macierz) ryzyka przedstawia zależność prawdopodobieństwa i konsekwencji wystąpienia nieoczekiwanych zdarzeń eksploatacyjnych, wyrażonych najczęściej w kategoriach wagowych. Interpretacja zależności funkcji prawdopodobieństwa zdarzeń niepożądanych i ich skutków pozwala wyznaczyć liczbowy poziom ryzyka, będący podstawą przypisania zdarzenia do danej kategorii ryzyka (tab. 1).

Tabela 1. Kategorie ryzyka eksploatacji systemu wodociągowego  
Table 1. Risk category in water-pipe network operation

Kategoria ryzyka	Skala punktowa
Tolerowane	$0,33 \leq r_e \leq 3,0$
Kontrolowane	$4,0 \leq r_e \leq 8,0$
Nieakceptowane	$9,0 \leq r_e \leq 27,0$

Awarie sieci magistralnych, ze względu na ich funkcję, w największym stopniu kształtują bezpieczeństwo eksploatacji systemu dystrybucji wody, a co za tym idzie – ciągłość dostaw wody do odbiorców. Wymagają one wnikliwej

analizy skutków, przy czym szczególnie istotne jest zagrożenie dostawy wody mające charakter nie tylko społeczny, ale również techniczny i logistyczny. Ponadto ważnym elementem w ocenie ryzyka winny być koszty usuwania awarii. Uwzględniając te elementy zaproponowano w standardowej metodzie badawczej, opartej na czteroparametrycznej macierzy ryzyka, weryfikację procedur analitycznych według zmodyfikowanej formuły szacowania ryzyka wyrażonej zależnością:

$$r_e = \frac{I U K}{Z} \quad (4)$$

w której poszczególne elementy przyjmują wagę punktową związaną z następującymi parametrami:

I – intensywność uszkodzeń obiektów (uszk./km·a):  
I=1- $\lambda \in (0; 0,3)$ , I=2- $\lambda \in (0,3; 0,5)$ , I=3- $\lambda \in (0,5; \infty)$ ,

U – uciążliwość napraw: U=1 – awaria rurociągu w terenie niezurbanizowanym, właściwa organizacja i całodobowa dyspozycyjność brygad remontowych, U=2 – awaria rurociągu w pasie ruchu, jednozmianowa dyspozycyjność brygad remontowych, U=3 – awaria rurociągu w pasie ruchu pojazdów, brak zmechanizowanego sprzętu do usuwania awarii,

K – koszty usunięcia awarii: K=1 – koszt usuwania awarii nie przekracza 2 tys. zł; K=2 – koszt usuwania awarii mieści się w przedziale od 2 tys. zł do 5 tys. zł; K=3 – koszt usuwania awarii przekracza 5 tys. zł,

Z – zabezpieczenia funkcjonowania sieci wodociągowej i ciągłości dostaw wody, wyznaczone na podstawie formularza szacowania poziomu zabezpieczenia uwzględniającego cztery aspekty określające zarówno bezpieczeństwo operatora, jak i odbiorców wody:

– sposób realizacji monitoringu sieci wodociągowej: pełny monitoring hydrauliczny i jakości transportowanej wody – 1 p., uproszczony monitoring pracy sieci wodociągowej – 5 p., niesystematyczny monitoring w ograniczonym zakresie – 10 p.,

– alternatywne źródła zasilania w wodę (system wodociągowy eksploatuje co najmniej dwa niezależne układy zasilania mające rezerwę dyspozycyjną mocy produkcyjnej): tak – 1 p., nie – 5 p.,

– ilość wody zgromadzonej w sieciowych zbiornikach zapasowo-wyrównawczych, odniesiona do średniego dobowego zapotrzebowanie na wodę (Q): minimum 70% – 1 p., w zakresie 50÷70% – 3 p., brak zbiorników – 5 p.,

– struktura organizacyjna i logistyczna usuwania awarii: przedsiębiorstwo wodociągowe ma własne wyspecjalizowane pogotowie remontowe oraz niezbędny sprzęt techniczny do sprawnego usuwania awarii, a czas usuwania awarii jest mniejszy od 6h – 1p., przedsiębiorstwo wodociągowe ma własne wyspecjalizowane pogotowie remontowe lub ma podpisaną umowę z podmiotem gospodarczym na świadczenie usług usuwania uszkodzeń, a czas usuwania awarii jest większy od 24h – 5 p.

Suma punktów uzyskanych w formularzu określa jednoznacznie poziom zabezpieczenia eksploatacji sieci wodociągowej i ciągłości dostaw wody do odbiorców w skali trójstopniowej:

- 4÷8: wysoki stopień zabezpieczenia (3 p.),
- 12÷18: średni stopień zabezpieczenia (2 p.),
- 20÷25: niski stopień zabezpieczenia (1 p.).

Końcową procedurą postępowania w metodzie oceny bezpieczeństwa eksploatacji sieci magistralnej jest wyznaczenie ze wzoru (4) wartości liczbowej ryzyka, która pozwala w sposób jednoznaczny przypisać jedną z trzech kategorii ryzyka (tab. 1). Przyjęta metodyka badań wpływu regulacji ciśnienia na niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji sieci magistralnej obejmuje następujące procedury:

- wytypowanie i klasyfikacja obiektów i czasu badań oraz określenie zakresu analiz,
- ustalenie modelu niezawodnościowego badanych obiektów,
- przeprowadzenie badań eksploatacyjnych,
- weryfikacja uzyskanych wyników oraz wyznaczenie wartości wybranych wskaźników niezawodności,
- określenie wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na poziom ryzyka funkcjonowania sieci wodociągowej.

### Charakterystyka obiektu badań

Badaniami niezawodności i szacowania ryzyka objęto system zaopatrzenia wodę Będzina i Czeladzi. System ten jest zasilany wodą powierzchniową ujmowaną z Czarnej Przemszy za pomocą dwóch ujęć brzegowych zlokalizowanych na jazach piętrzących. Układ technologiczny oczyszczania wody oparty jest na procesach wstępnego utleniania ( $\text{ClO}_2$ ), koagulacji (PAX), filtracji pospiesznej oraz dezynfekcji ( $\text{ClO}_2$ ). Woda czysta tłoczona jest do sieci wodociągowej Będzina i Czeladzi układem pomp II stopnia, których parametry techniczne przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyka pompowni II stopnia  
Table 2. Characteristics of second-degree pumping station

Typ pompy	Liczba jednostek	Nr pompy	Q, m <sup>3</sup> /h	H, mH <sub>2</sub> O
30 D 17-2	1	1	576	112
40 D 22	2	3 i 5	1200	120
35 D 22	2	2 i 6	1000	84
30 D 17	2	10 i 13	576	84
25 D 17	2	9 i 12	380	80

Dobową wydajność stacji zapewnia praca zespołu pomp nr 3 i 5, które od 10 maja 2006 r. pracują w układzie z przemiennikiem częstotliwości typu NXP 07305A (400 kW, 380 V, 650÷730 A), gwarantującym utrzymanie stałego ciśnienia wody w sieci. Z niezawodnościowego punktu widzenia pompownia podczas maksymalnego poboru wody stanowi strukturę progową pięciu zespołów pompowych z dwoma jednostkami rezerwowymi. Zespoły pompowe nr 9 i 12 oraz 10 i 13 stanowią w układzie technicznym funkcjonowania pompowni tzw. rezerwę zimną. Pobór wody w Będzinie i Czeladzi powoduje, że warunki eksploatacji stacji wodociągowej zapewniają dużą rezerwę pracy pompowni, czyniąc ją obiektem o dużej niezawodności.

Tabela 3. Charakterystyka obszaru badań  
Table 3. Characteristics of research area

Nr – obszar badań	Długość, km	Rodzaj terenu
4 – pompownia II stopnia – ul. Karola Świerczewskiego	1,960 (stal)	umiarkowanie zabudowany
3 – ul. Karola Świerczewskiego – przejście nad drogą krajową nr 1 (obecnie nr 86)	1,678 (stal)	zabudowany
2 – przejście nad drogą krajową nr 1 (86) – Zakład Inżynierii Komunalnej w Czeladzi	1,497 (stal)	zielony
1 – Zakład Inżynierii Komunalnej w Czeladzi – rozwidlenie ulic Będzińskiej i Grodzieckiej	0,714 (stal)	zabudowany

Objęty badaniami system dystrybucji wody składa się z sieci magistralnej o średnicy 600 mm o łącznej długości 5,85 km. Jest to sieć stalowa z bitumiczną izolacją antykorozyjną, która do eksploatacji została oddana w 1956 r. Obszar analizy został podzielony na cztery części, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 3.

Badania przeprowadzono w latach 2000–2011 w odniesieniu do obiektów, które uszkodzone podlegały w czasie badań naprawie (W), ponadto rozpatrywano długość badanych przewodów (l), a badania zakończono po upływie czasu (t). W badaniach wydzielono dwa etapy analizy: I – od 2000 r. do maja 2006 r. (eksploatacja sieci przed regulacją ciśnienia) oraz II – od maja 2006 r. do 2011 r. (po wdrożeniu systemu kontroli ciśnienia wody w sieci). Analizę oparto na danych archiwalnych zawartych w tzw. kartach eksploatacyjnych sieci wodociągowej. Ustalone warunki badań gwarantowały wyznaczenie miar niezawodnościowych z dokładnością 0,1 (błąd względny) na poziomie wiarygodności 0,95. Zakres przeprowadzonych badań eksploatacyjnych obejmował takie dane, jak data i godzina wystąpienia awarii, naprawy i remontu, czas zgłoszenia uszkodzenia, czas rozpoczęcia naprawy i jej zakończenia, opis zdarzenia obejmujący lokalizację i rodzaj uszkodzenia, sposób naprawy, średnicę i materiał przewodu oraz skutki awarii (lokalne lub w całym systemie wodociągowym).

### Dyskusja wyników

Analizowany system dystrybucji wody jest układem rozległym o skomplikowanej topologii jak i zróżnicowanym uzbrojeniu. Awarie sieci wodociągowej wynikają głównie z ponad 56-letniej eksploatacji oraz negatywnego oddziaływania środowiska zewnętrznego (szkody górnicze, sieć kanalizacyjna). Awarie te dotyczyły przede wszystkim uszkodzeń korpusu rury, złączy, kompensatorów lub uzbrojenia. Objawiały się one w postaci pęknięcia wzdłużnego, wypchnięcia uszczelnienia, uszkodzenia mechanicznego czy też korozji [20–22]. Przeprowadzona analiza wykazała, że najczęściej występowały uszkodzenia będące skutkiem korozji sieci, które stanowiły blisko 92% wszystkich interwencji brygad remontowo-naprawczych w ciągu roku. Średnia intensywność uszkodzeń całej rozpatrywanej sieci magistralnej w czasie przed modernizacją pompowni II stopnia wynosiła 0,49 uszk./km·a. W tym czasie odnotowano elementy systemu dystrybucji wody (obsz. 1 – tab. 4) charakteryzujące się największą (1,63 uszk./km·a) oraz najmniejszą (0,43 uszk./km·a) intensywnością uszkodzeń (obsz. 3 – tab. 4). W czasie eksploatacji przypadającym na lata 2000–2006 (maj) na sieci wodociągowej w obszarze nr 2 nie odnotowano żadnej awarii, uzyskując tym samym wysoki poziom niezawodnego funkcjonowania systemu. Ten pożądaný stan eksploatacyjny został osiągnięty dzięki zakończonej w 1998 r. modernizacji przebiegającego nad drogą krajową odcinka sieci (pokrycie rurociągu od wewnątrz rękawem), który do 1997 r. charakteryzował się największą awaryjnością w obszarze objętym analizą.

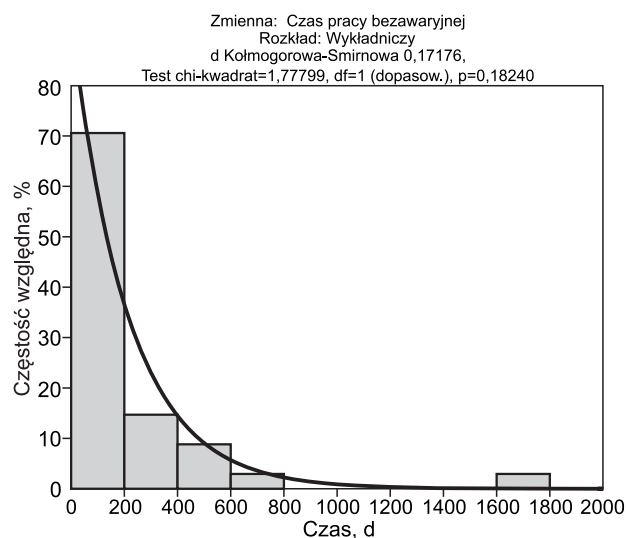
Tabela 4. Wartości wskaźników niezawodności w latach 2000–2011  
Table 4. Variations in reliability parameters over the period 2000–2011

Obszar	Wskaźnik niezawodności				Kategoria ryzyka
	$\lambda$ uszk./km·a	$T_p$ d	$T_o$ h	$r_e$	
1 – przed regulacją ciśnienia	1,63	254	15,88	4	kontrolowane
1 – po regulacji ciśnienia	0,96	294	7,86	4	kontrolowane
2 – przed regulacją ciśnienia	brak awarii w latach 2000–2006			0,67	tolerowane
2 – po regulacji ciśnienia	brak awarii w latach 2006–2011			0,67	tolerowane
3 – przed regulacją ciśnienia	0,43	547	8,97	1,33	tolerowane
3 – po regulacji ciśnienia	0,21	763	6,53	0,33	tolerowane
4 – przed regulacją ciśnienia	0,97	277	8,83	4	kontrolowane
4 – po regulacji ciśnienia	0,33	478	6,83	2,67	tolerowane

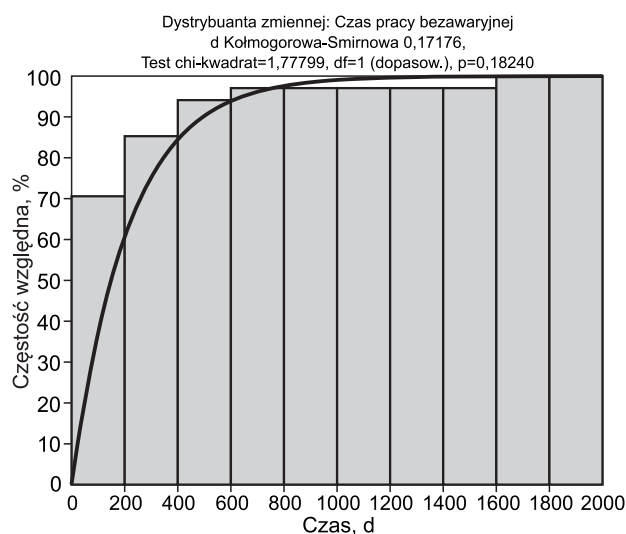
W II etapie badań w obszarze nr 2 nie odnotowano uszkodzeń sieci, natomiast w pozostałych obszarach badawczych intensywność uszkodzeń znacząco zmalała, uzyskując najmniejszą wartość 0,21 uszk./km·a w obszarze nr 3, w którym zostały osiągnięte dopuszczalne europejskie standardy uszkodzeń przewodów magistralnych (0,3 uszk./km·a). Średnia intensywność uszkodzeń przewodu w obszarze nr 4 zmalała o 66% osiągając wartość 0,33 uszk./km·a, natomiast obszar nr 1 charakteryzował się nadal największą intensywnością uszkodzeń osiągając 0,96 uszk./km·a, przy jednoczesnym 2-krotnym skróceniu czasu całkowitej odnowy przewodu z 15,88 h do 7,86 h.

Znaczne zmniejszenie awaryjności rozważanego układu spowodowała skuteczność podejmowanych interwencji naprawczych przez brygady remontowe, przez co zmniejszono niedogodności wynikające z awarii dla mieszkańców tego rejonu (2-krotne skrócenie czasu odnowy przewodu średnio do 7,07 h). Sprawnie działające zespoły pogotowia wodociągowego zwiększyły niezawodność działania całego systemu zaopatrzenia w wodę w wyniku minimalizacji czasu niesprawności uszkodzonych elementów. Sprawna interwencja objawia się również zmniejszeniem skutków występujących awarii, a co za tym idzie ryzyka, jakie ponosi przedsiębiorstwo eksploatując tak rozległy i złożony system zaopatrzenia w wodę (tab. 4). W pierwszym etapie badań zarówno w obszarze nr 1, jak i nr 4 występowało ryzyko kontrolowane. Identyfikacja podstawowego czynnika zagrożeń występowania awarii przewodów oraz podjęte działania regulujące ciśnienie wody w sieci spowodowały, że ryzyko kontrolowane wystąpiło jedynie w obszarze badawczym nr 1.

W ramach pełnej analizy przeprowadzonych badań dokonano również identyfikacji rozkładu czasu pracy bezawaryjnej sieci. Weryfikacji hipotezy  $H_0$  – zmienna ma rozkład wykładniczy – dokonano za pomocą testów Kołmogorowa-Smirnowa oraz  $\chi^2$ . Wyniki testów nie pozwoliły na odrzucenie hipotezy  $H_0$  o wykładniczym rozkładzie czasu pracy bezawaryjnej wydzielonego obszaru dystrybucji wody w systemie wodociągowym Będzina (rys. 1). Interpretacja dystrybuanty czasu pracy bezawaryjnej wykazała, iż z prawdopodobieństwem 0,95 czas ten nie przekroczy 695 d (rys. 2).



Rys. 1. Rozkład czasu pracy bezawaryjnej sieci wodociągowej  
Fig. 1. Distribution of time to failure



Rys. 2. Dystrybuanta czasu pracy bezawaryjnej sieci wodociągowej  
Fig. 2. Cumulative distribution function of time to failure

## Podsumowanie

Wielofunkcyjność systemu dystrybucji wody w istotny sposób określa obszar analiz ryzyka, który przede wszystkim wymaga rozważenia szerokiego zakresu zdarzeń losowych, kształtujących warunki jego eksploatacji w procesie transportu wody. Badania awaryjności systemu dystrybucji wody, wraz z oceną konsekwencji powstałych skutków i strat, stanowią istotny etap w procedurach identyfikacji oraz szacowania ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej. Problem wpływu wysokości ciśnienia na awaryjność sieci wodociągowej, koszty jej napraw, a także zmiany parametrów jakościowych wody transportowanej do odbiorców winny być uwzględniane w kompleksowych analizach ryzyka. Zatem aspekt wysokości ciśnienia w ocenie bezpieczeństwa eksploatacji sieci wodociągowej, uwzględniającej zarówno ryzyko eksploatatora, jak i użytkowników (konsumentów wody), powinien być jednym z niezbędnych elementów procedur opracowywania Planów Bezpieczeństwa Wody.

Przeprowadzone badania ryzyka wraz z analizą techniczno-niezawodnościową sieci wodociągowej dostarczającej wodę mieszkańcom Będzina i Czeladzi wykazały, że wysokość ciśnienia wody panującego w sieci miała bardzo istotny wpływ na uszkodzalność przewodów oraz koszty usuwania awarii. Stabilizacja ciśnienia wody w większości analizowanych obszarów sieci wodociągowej (nr 2, 3 i 4) spowodowała zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody, co przełożyło się na klasyfikację ryzyka w tych obszarach do kategorii ryzyka tolerowanego. Jedynie w obszarze nr 1 nadal występuje ryzyko kontrolowane, powodujące konieczność zmniejszenia intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej. Szczegółowa analiza ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej dowiodła, że podjęta stabilizacja ciśnienia wody przyniosła nie tylko znaczącą poprawę niezawodności systemu, ale również zmniejszenie wartości wskaźnika ryzyka tolerowanego, co poprawiło bezpieczeństwo funkcjonowania sieci wodociągowej.

Stabilizacja ciśnienia przyniosła również zysk ekonomiczny z tytułu mniejszego zużycia energii przez pompownię. W czasie prowadzenia badań odnotowano w skali roku zmniejszenie o 12% wskaźnika zużycia energii niezbędnej do wtłoczenia 1 m<sup>3</sup> wody do systemu dystrybucji.

Wymiernym elementem działań obejmujących stabilizację ciśnienia w sieci wodociągowej było nie tylko zwiększenie niezawodności działania systemu dystrybucji i ograniczenie ryzyka działalności przedsiębiorstwa wodociągowego, ale także zmniejszenie kosztów naprawy uszkodzeń i obciążeń finansowych z tytułu wypłacanych odszkodowań za wyrządzone szkody. Ponadto wymierne było również zmniejszenie strat wody i wzrost komfortu życia mieszkańców. Wyniki badań niezawodności pozwalają w racjonalny sposób zarządzać infrastrukturą techniczną systemu wodociągowego, a także mogą być niezbędnym narzędziem decyzyjnym zarówno przy planowaniu inwestycji modernizacyjnych, jak i strategii rozwoju współczesnych przedsiębiorstw wodociągowych. Badania te dają możliwość wytypowania tych obszarów systemu dystrybucji wody, w których występuje potencjalne zagrożenie wtórnym zanieczyszczeniem wody, wynikającym z braku stabilności ciśnienia wody, czy też jego zwiększonej awaryjności.

*Praca naukowa została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu rozwojowego nr NR14 0006 10 pt. „Opracowanie kompleksowej metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców” w latach 2010–2013.*

## LITERATURA

1. J. CZAPLICKI: Technology vs. exploitation theory. *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance* 2008, Vol. 2 (154), pp. 45–58.
2. O. DOWNAROWICZ: System eksploatacji. Zarządzanie zasobami techniki. Wyd. PG, Bibl. Probl. Ekspł. Gdańsk 2005.
3. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Rozmyty model ryzyka awarii sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 1, ss. 35–40.
4. A. KOTOWSKI, A. PAWLAK, P. WÓJTOWICZ: Modelowanie miejskiego systemu zaopatrzenia w wodę na przykładzie osiedla mieszkaniowego Baranówka w Rzeszowie. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 2, ss. 43–48.
5. H. HOTŁOŚ: Badania zmian poboru wody w wybranych miastach Polski w latach 1990–2008. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 3, ss. 39–42.
6. S. DENCZEW: Wpływ systemu sprawnego usuwania uszkodzeń sieci wodociągowej na jej niezawodność. *Ochrona Środowiska* 2000, vol. 22, nr 2, ss. 21–24.
7. J. BAJER, A. PRZYBINDA: Czynniki wpływające na czas usuwania awarii przewodów wodociągowych i ich uzbrojenia. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2005, nr 11, ss. 20–22.
8. P. GALE: Using risk assessment to identify future research requirements. *Journal American Water Works Association* 2002, nr 9, ss. 30–38.
9. H. HOTŁOŚ: Wpływ wysokości ciśnienia na uszkodzalność i koszty napraw sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska* 2001, vol. 23, nr 2, ss. 31–34.
10. H. HOTŁOŚ: Reliability level of municipal water-pipe network. *Environment Protection Engineering* 2003, Vol. 29, No. 2, pp. 141–151.
11. I. ZIMOCH, M. JAMER, B. BINDA: Eksploatacja systemu dystrybucji wody we Wrocławiu w aspekcie awaryjności sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska* 2005, vol. 27, nr 3, ss. 65–68.
12. D.K. O'DAY: Organizing and analyzing break data for making water main replacement decisions. *Journal American Water Works Association* 1982, Vol. 74, No. 11, pp. 589–596.
13. T. BERGEL: Analiza wskaźnikowa strat wody wodociągowej w gminach wiejskich i miejsko-wiejskich w Polsce. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2012, nr 10, ss. 413–415.
14. H. HOTŁOŚ: Analiza strat wody w systemach wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2003, vol. 25, nr 1, ss. 17–24.
15. H. HOTŁOŚ: Badania zmienności strat wody w wybranych systemach wodociągowych w latach 1990–2008. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 4, ss. 21–25.
16. J.M. LAINE, S. DEMOTIER, K. ODEH, W. SCHON, P. CHARLES: Risk assessment for drinking water production assessing the potential risk due to the presence of *Cryptosporidium* oocysts in water. *Water Science and Technology: Water Supply* 2002, Vol. 2, No. 3, pp. 55–63.
17. S. REGLI, P. BERGER, B. MACLER, C. HAAS: Proposal decision tree for management of risk in drinking water: Consideration for health and socioeconomic factor. In: *Safety of Water Disinfection: Balancing Chemical and Microbial Risk* [G.F. CRAM Ed.], ILS Press, Washington DC 1993.
18. I. ZIMOCH: Bezpieczeństwo działania systemów zaopatrzenia w wodę w warunkach zmian jakości wody w sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 3, ss. 51–55.
19. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Zarządzanie ryzykiem w ramach planów bezpieczeństwa wody. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 3, ss. 57–60.
20. J. NAWROCKI, J. ŚWIETLIK: Analiza zjawiska korozji w sieciach wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 27–40.
21. B. KOŁWZAN: Analiza zjawiska biofilmu – warunki jego powstawania i funkcjonowania. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 3–14.
22. M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ: Czynniki współdecydujące o potencjale powstawania i rozwoju biofilmu w systemach dystrybucji wody. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 3, ss. 7–13.

**Zimoch, I. Pressure Control as Part of Risk Management for a Water-pipe Network in Service. *Ochrona Srodowiska* 2012, Vol. 34, No. 4, pp. 57–62.**

**Abstract:** The study reported on in this paper includes risk assessment and technological reliability analysis for the water-pipe network supplying water to two Upper-Silesian municipalities, Bedzin and Czeladz. Analysis of the results obtained has produced the following findings. Water pressure head in the distribution system had a significant impact on the frequency of pipe failure and the resulting repair costs. Stabilization of water pressure in the pipe network examined brought about an improvement in the reliability and safety of water supply, which allowed the risk in these areas to be classified as tolerable. Other major benefits from pressure stabilization can be itemized as

follows: increased reliability and reduced risk associated with the operation of the waterworks, reduction in repair costs, as well as in the costs incurred in compensation for damages, lowering of water loss, and improvement in the user's quality of life. The results of reliability assessment enable a reasonable management of the technical infrastructure of the waterworks, but they may also become an effective tool in making decisions about modernizing investments, or about strategies for the development of existing waterworks. Based on such research, it is possible to identify parts of the distribution system with potential risk of water recontamination as a result of pressure stability loss or increased pipe failure frequency.

**Keywords:** Water supply system, pipe failure, reliability, repair cost.