

Czas pracy bezuszkodzeniowej sieci wodociągowej miasta Głubczyce jako element bezpieczeństwa funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę

Time between failure of water pipeline in Głubczyce as an element of safe operation of the water supply system

IZABELA ZIMOCH, MARCIN GRABUŃCZYK

DOI 10.36119/15.2021.7-8.7

Zaopatrzenie ludności w wodę przeznaczoną do spożycia przez ludzi stanowi podstawowy element funkcjonowania gminy, będąc jednocześnie jej zadaniem własnym, które w omawianym przypadku jest realizowane przez przedsiębiorstwo wodociągowe. System zbiorowego zaopatrzenia w wodę, zgodnie z ustawą o zarządzaniu kryzysowym, należy do infrastruktury krytycznej państwa. Najważniejszym elementem tego systemu jest sieć wodociągowa stanowiąca newralgiczny punkt całej infrastruktury krytycznej. Niezbędnym warunkiem dla dostaw wody do odbiorców, zgodnym z polskimi wymogami ustawowymi, jest utrzymanie sprawności i prawidłowe działanie sieci wodociągowej wraz z infrastrukturą towarzyszącą, przy czym sieć wodociągowa musi pracować niezawodnie, zarówno przy minimalnych rozbiorach, jak i w okresach wzmożonego zapotrzebowania na wodę. Prawidłowo, bezawaryjnie funkcjonujący system zaopatrzenia w wodę, w tym sieć wodociągowa jest kluczowym elementem budowania systemu bezpieczeństwa zdrowotnego mieszkańców. W artykule przedstawiono analizę czasów eksploatacyjnych (czas pracy bezuszkodzeniowej i czas odnowy) sieci wodociągowej w gminie Głubczyce w aspekcie bezpieczeństwa funkcjonowania infrastruktury krytycznej.

Słowa kluczowe: sieć wodociągowa, infrastruktura krytyczna, niezawodność, awaryjność, czas pracy bezuszkodzeniowej, czas odnowy

Management of delivering water intended for human consumption is essential element of the functioning of the municipality as an independent territorial unit, being at the same time its own task, which in the discussed case is carried out by the water supply company. The collective water supply system, according to the Act on crisis management, belongs to the country's critical infrastructure. The most important element of the water supply system is the water pipe network, which is crucial point of the completely critical infrastructure. A necessary condition for supplying drinking water to consumers, in accordance with Polish law requirements, is maintaining the efficiency and proper operation of the water pipe network together with the accompanying infrastructure, and the water pipe network must operate reliably both at minimum consumption and during periods of increased water demand. Properly, failure-free functioning of water pipelines is a key element of building a health safety system for residents. The article presents an analysis of operating times (time between failure and downtime) of the water supply network in the municipality of Głubczyce in the aspect of security of critical infrastructure functioning.

Keywords: water pipe network, critical infrastructure, reliability, failure, time between failure, downtime

Wstęp

Gospodarka wodna jest podstawowym elementem funkcjonowania gminy jako samodzielnej jednostki terytorialnej. Zbiorowe zaopatrzenie w wodę stanowi podstawę funkcjonowania regionu w tym utrzymania standardów sanitarnych jej mieszkańców, a dostępność i jakość wody przyczyniają się w znacznym stopniu do atrakcyjności inwestycyjnej i wzrostu rozwoju gospodarczego regionu.

Najważniejszym elementem gospodarki wodnej jest sieć wodociągowa, która stanowi newralgiczny punkt całego systemu wodociągowego. Natomiast niezbędnym warunkiem dostawy wody do odbiorców w sposób ciągły w niezbędnej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem jest jej prawidłowe działanie, przy czym musi ona pracować niezawodnie, zarówno przy minimalnych rozbiorach wody, jak i w okresach wzmożonego zapotrzebowania.

System zbiorowego zaopatrzenia w wodę zgodnie z Ustawą z dnia 26 kwietnia 2007r. o zarządzaniu kryzysowym, zaliczany jest do infrastruktury krytycznej. Stanowi to konieczność zapewnienia ciągłości funkcjonowania oraz szybkiego odtworzenia w razie wystąpienia awarii lub zdarzenia niepożądanego. Zgodnie z art. 5 ust. 1 ustawy z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków przedsiębiorstwo wodociągowe-

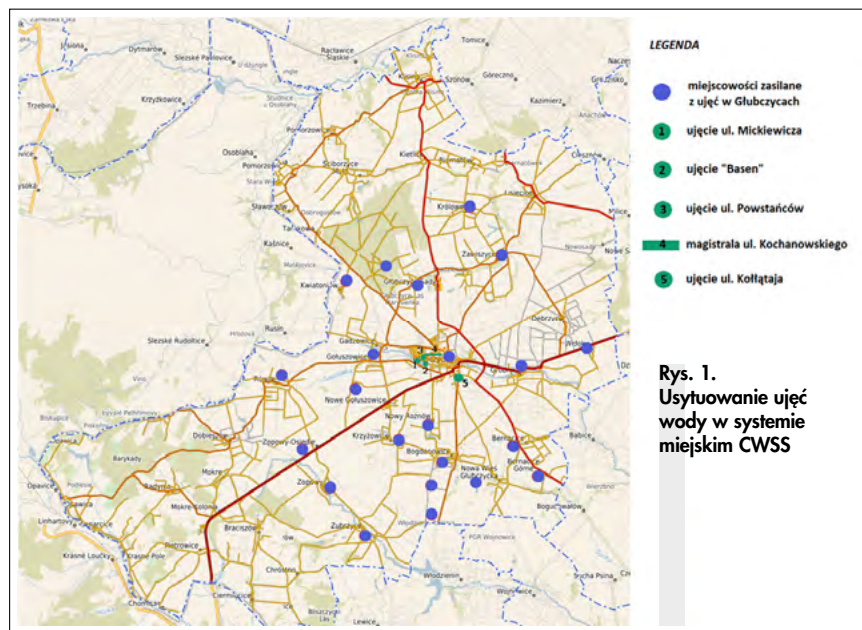
Prof. dr hab. inż. Izabela Zimoch - Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Wody i Ścieków, Gliwice, <https://orcid.org/0000-0003-3048-4002>, mgr Marcin Grabuńczyk - Głubczyckie Wodociągi i Kanalizacja Sp. z o.o., 48-100 Głubczyce, ul. Powstańców 2. Adres do korespondencji/Corresponding author: izabela.zimoch@polsl.pl

-kanalizacyjne ma obowiązek m.in. zapewnić zdolność posiadanych urządzeń wodociagowych do realizacji dostaw wody w wymaganej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem, w sposób ciągły i niezawodny. Wypełnienie tego obowiązku uwarunkowane jest utrzymaniem sieci i urządzeń wodociagowych w dobrym stanie technicznym, zapewnieniem stabilności pracy układu wodociagowego oraz sprawnym usuwaniem ewentualnych awarii [1, 2].

Największym problemem dla przedsiębiorstwa wodociagowego jest występowanie awarii i strat wody w sieci wodociagowej, które wpływają z jednej strony na stabilność dostaw, a z drugiej na sytuację finansową przedsiębiorstwa. Przy czym awarie sieci wodociagowej można zdefiniować jako uszkodzenia lub niesprawności przewodów wodociagowych wraz z uzbrojeniem, powodujące częściową lub całkowitą utratę wymaganych własności technicznych. Są to zwłaszcza brak szczelności i zdolności przepustowej sieci wodociagowej oraz uszkodzenia uzbrojenia, uniemożliwiające jego pracę i wymagające naprawy strukturalnej z odcięciem dopływu wody włącznie. Natomiast usuwanie przecieków wody wymaga znajomości przyczyn, które je powodują, co pozwala na wybranie właściwych środków i sposobów likwidacji przecieków oraz skuteczniejsze prowadzenie kompleksowych poszukiwań i napraw [3-7].

Opis obiektu badań

Gmina Głubczyce położona jest w południowo-wschodniej części Polski, w południowo-wschodniej części województwa opolskiego. Powierzchnia gminy wynosi 294,30 km² i jest zamieszkała przez ponad 23 tys. mieszkańców. System zaopatrzenia w wodę (SZW) w gminie Głubczyce składa się z podsystemu produkcji wody (PsPW - obejmujący ujmowanie i przesyłanie wody), podsystemu gromadzenia



Rys. 1. Usytuowanie ujęć wody w systemie miejskim CWSS



Rys. 2. Pompownia wody przy ulicy Powstańców w Głubczycach



Rys. 3. Zbiornik magazynujący wody w Głubczycach

wody (PsGW) oraz podsystemu jej dystrybucji (PsDW – obejmujący sieć wodociagową wraz z przyłączami wodociagowymi). Eksploatacja systemu w gminie opiera się na 4 ujęciach zlokalizowanych w mieście Głubczyce (Miejski System Zaopatrzenia w Wodę CWSS - tabela 1, rys. 1) oraz 8 ujęciach zlokalizowanych w okolicznych wsiach (Wiejski System Zaopatrzenia w Wodę RWSS tabela 1). Ujęcia te zasilają w wodę miasto Głubczyce oraz 48 gmin wiejskich.

Powierzchnia miasta Głubczyce, które stanowi obiekt badań, wynosi 12,52 km² i jest zamieszkała przez ponad 12 tys. mieszkańców. W CWSS obejmującym również system zaopatrzenia w wodę w mieście Głubczyce (rys. 1) wydzielono dwa podsystemy produkcji wody PsPW-Kofłtąja oraz PsPW - Powstańców (tabela 2), które tłoczą wodę do sieci wodociagowej, budującej podsystem dystrybucji wody PsDW). Eksploatacja PsPW w mieście (tabela 2) opiera się na pracy

Tabela 1. Charakterystyka wydajności SZW na terenie gminy Głubczyce

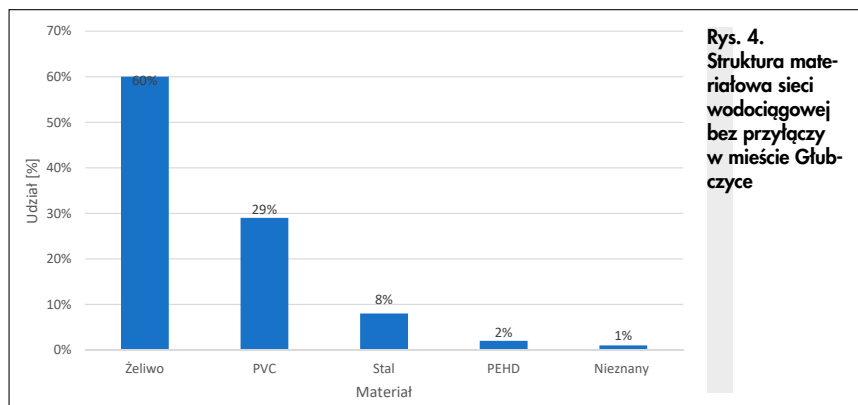
SZW	Ujęcie wody (liczba dni eksploatacji ujęcia w roku [d])	Liczba zasilanych miejscowości	Średniodobowa produkcja wody [m ³ /d]	Całkowita roczna produkcja wody [m ³ /rok]	Udział procentowy w strukturze produkcji ogółem [%]	Średniodobowe zużycie wody w mieście Głubczyce [m ³ /d]	Średnioroczne zapotrzebowanie na wodę gmin wiejskich [m ³ /rok]
Miejski system zaopatrzenia w wodę MSZW (rys. 1)	Powstańców (305)	23 w tym miasto Głubczyce	2 088,44	636 974,00	54.6	1617.01	254 924,28
	Mickiewicza (249)		220,32	54 859,00	4.7		
	Kofłtąja (366)		462,83	169 395,00	14.5		
	"Basen" (364)		258,99	94 274,00	8.1		
Wiejski system zaopatrzenia w wodę WSZW	Klisino	26	293,08	106 976,00	9.2	0	211 612,00
	Mokre Wieś		17,22	6 284,00	0.5		
	Debrzyca		26,90	9 817,00	0.8		
	Dobieszów		10,42	3 803,00	0.3		
	Braciszów		40,54	14 796,00	1.3		
	Mokre Kolonia		66,02	24 097,00	2.1		
	Krasne Pole		44,78	16 343,00	1.4		
	Tarnkowa		80,81	29 496,00	2.5		

Tabela 2. Charakterystyka ujęć wody w miejskim systemie zaopatrzenia w wodę MSZW

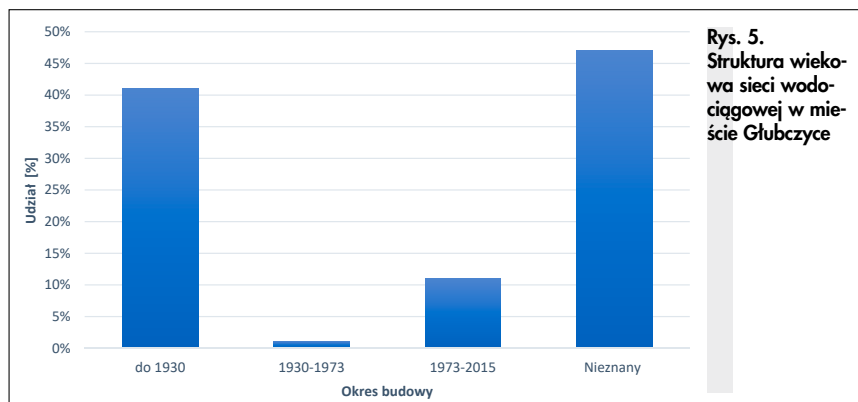
MSZW	Ujęcia wody	Maksymalna wydajność dobową [m ³ /d]	Średnio dobową produkcja wody [m ³ /d]	Rezerwy mocy produkcyjnych [m ³ /d]	Średniodobowa produkcja wody dla PsDW(MG) [m ³ /d]	Infrastruktura techniczna	Obszar zasilania
PsPW-Powstańców	Mickiewicza Powstańców Basen	5 496,00	2 567,75	2 928,25	1390,02	Pompownia wody wyposażona w cztery pompy sterowane falownikami. Zbiorniki zapasowo wyrównawcze dwukomorowe o pojemności 2000 m ³ , zasilane z trzech niezależnych ujęć.	Miasto Głubczyce (56% produkcji dobowej PsPW-Powstańców) oraz 22 miejscowości wiejskich
PsPW-Koźłataja	Koźłataja	720,00	457,96	262,04	226,99	Kontenerowa pompownia wody. Jednokomorowy zbiornik zapasowo wyrównawczy o pojemności 680 m ³ .	Miasto Głubczyce (49% produkcji dobowej PsPW-Koźłataja) oraz 11 miejscowości wiejskich

Tabela 3. Charakterystyka infrastruktury wodociągowej na terenie gminy Głubczyce

PsDW	Typ sieci wodociągowej	Długość [km]	Udział procentowy w strukturze ogółem [%]	Liczba przyłączy wodociągowych [szt.]
MPsDW	Sieć magistralna	2,00	3,12%	1476 [42,76%]
	Sieć rozdzielcza	33,60	20,57%	
	Przyłącza wodociągowe	16,90	22,01%	
WPsDW	Sieć magistralna	62,03	96,88%	1976 [57,24%]
	Sieć rozdzielcza	129,72	79,43%	
	Przyłącza wodociągowe	59,90	77,99%	
Suma		304,15		



Rys. 4. Struktura materiałowa sieci wodociągowej bez przyłączy w mieście Głubczyce



Rys. 5. Struktura wiekowa sieci wodociągowej w mieście Głubczyce

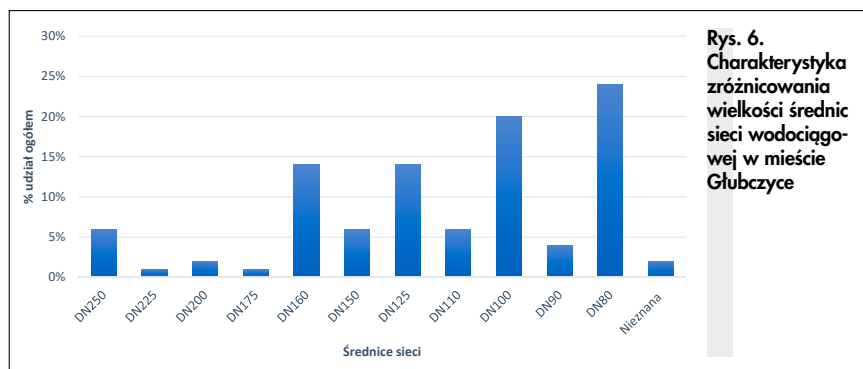
4 niezależnych ujęć wody (rys. 2), z których ujęcie Koźłataja ujmuje wody głębinowe na potrzeby eksploatacyjne PsPW- Koźłataja. Natomiast ujęcia przy ulicy Powstańców, Mickiewicza, „Basen” pracują w układzie zintegrowanym bud-

ującym PsPW- Powstańców. Ujęcie „Basen” eksploatuje zasoby wód głębinowych głównie na potrzeby basenu miejskiego, jednakże w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowej lub awaryjnej zasila sieć miejską. Ujmowana woda w PsPW -

Powstańców kierowana jest do zbiorników magazynujących (rys. 3), skąd tłoczona jest do sieci wodociągowej. SZW miasta Głubczyce charakteryzuje się średnim rocznym dobowym rozbiorem wody na poziomie 1617,01 m³/d. Największy rozbiór wody przypada na miesiące wiosenne i letnie. Szczegółowa analiza rozbiorów wody w 2020 r. wykazała, że największe średniodobowe zapotrzebowanie na wodę odnotowano w kwietniu (1828,74 m³/d) z największym rozbiorem wody w mieście w dniu 28 kwietnia (2176,98 m³/d). Najmniejszy średniodobowy rozbiór wody odnotowano w styczniu (1443,758 m³/d), w którym w dniu 1 stycznia rozbiór wody był najmniejszy i wynosił zaledwie 1146,87 m³/d.

Całkowita długość sieci wodociągowej na terenie gminy Głubczyce wynosi 304,15 km, z czego 17% stanowią przewody wodociągowe w mieście Głubczyce (miejski podsystem dystrybucji wody – MPsDW) z dominacją sieci rozdzielczej o długości 33,6 km (64% całkowitej długości przewodów wodociągowych). Pełna charakterystyka infrastruktury wodociągowej na terenie gminy Głubczyce z podziałem na podsystem miejski (MPsDW) oraz podsystem wiejski (wiejski podsystem dystrybucji wody WPsDW) z uwzględnieniem typu sieci, długości, udziału procentowego w całkowitej strukturze, a także liczby przyłączy wodociągowych została przedstawiona w tabeli nr 3.

Sieć wodociągowa w mieście Głubczyce posadowiona jest głównie na terenach silnie zurbanizowanych (90%) w pasie drogowym oraz w niewielkim stopniu w chodnikach. Pozostała część infrastruktury przebiega w obszarach zielonych, stanowiąc głównie przyłącza w miejscach łączenia się z wewnętrzną instalacją wodociągową.



Rys. 6. Charakterystyka zróżnicowania wielkości średnic sieci wodociągowej w mieście Głubczyce

Sieć wodociągowa w mieście Głubczyce charakteryzuje się dużą różnorodnością materiałową (rys. 4). Dominującymi materiałami są tu żeliwo oraz PCV, z udziałem odpowiednio 60% i 29% w całkowitej długości sieci. Przyłącza wodociągowe w większości wykonane są z rur stalowych, stanowiących około 88% w całkowitej długości tych rur. Rurociągi wykonane z żeliwa dominują w centrum miasta, natomiast rurociągi z materiałów PVC i PEHD stosowane są na obrzeżach i w obszarach rozbudowy miasta.

Przeprowadzona, na podstawie istniejącej dokumentacji technicznej, analiza wieku przewodów (rys. 5) wykazała, iż 46% całkowitej długości sieci to rurociągi o niezidentyfikowanym roku budowy. Z analizy tej wynika, że przewody wybudowane przed 1930 rokiem, tj. o wieku przekraczającym 80 lat, stanowią aż 41%, z czego około 18% to rurociągi ponad stuletnie. Najstarsze przewody znajdują się w centrum miasta.

Sieć wodociągowa na terenie miasta charakteryzuje się również dużą różnorodnością pod względem zmienności średnic (rys. 6), obejmującą przewody o średnicy z przedziału od DN 80 do DN 250. Największy udział w budowie podsystemu dystrybucji wody mają rurociągi o średnicach od DN 80 do DN 100.

Metodyka badawcza

Definicja awarii sieci wodociągowej zgodnie z normą ISO 24516-1 Wytyczne gospodarowania majątkiem wodociągów i kanalizacji Część 1: Sieci wodociągowe, to „lokalne, niedopuszczalne pogorszenie zdolności operacyjnej elementu infrastruktury dystrybucji wody” [8]. W tym kontekście rozróżnia się dwa typy awarii występujących w podsystemie dystrybucji wody: awarię nagłą i stopniową. Awaria nagła spowodowana jest nieoczekiwanymi, znaczącymi zmianami w strukturze materiałowej przewodów, której najczęściej towarzyszy duży wypływ wody. Natomiast awaria stopniowa powstaje na skutek nie-

odwracalnych zmian w strukturze materiału w efekcie zużycia technicznego lub postępującego procesu starzeniowego. W każdym z wyróżnionych przypadków awarii – nagła i stopniowa - odnawialnych obiektów technicznych, do których zaliczane są obiekty sieci wodociągowej, analizy niezawodnościowe ich funkcjonowania obejmują zarówno cykl pracy jak i odnowy. Zatem, ustalenie kryteriów eksploatacji w procedurach badawczych pozwala w sposób jednoznaczny określić dwa eksploatacyjne stany niezawodności:

- stan pracy, czyli zdolności całkowitej, w którym element systemu realizuje powierzoną mu funkcję z wymaganym efektem techniczno-technologicznym i ekonomicznym,
- stan niezdatności częściowej lub całkowitej, w którym z powodów losowych następują zakłócenia w eksploatacji obiektu na skutek jego uszkodzenia.

Uwzględniając powyższe stany eksploatacyjne oraz specyfikę budowy i eksploatacji sieci wodociągowej w analizie niezawodności ich funkcjonowania zwykle wyróżnia się dwa podstawowe czasy eksploatacyjne: średni czas pracy bezuszkodzeniowej T_p (równanie 1) i średni czas odnowy T_o (równanie 2) [7, 9-10].

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

$$T_o = \frac{1}{n_o} \sum_{i=1}^{n_o} t_{oi} \quad (2)$$

gdzie:

k - liczba okresów pracy obiektów uszkodzających się,

z - liczba okresów pracy obiektów nieuszkodzających się,

t - długość okresu badań - obserwacji [d],

t_{pi} - wartość i -tego czasu pracy obiektów uszkodzających się [d],

n_o - liczba odnow w badanym okresie,

t_{oi} - czas trwania i -tej odnowy [h].

W sytuacji pojawienia się uszkodzenia istotnym jest ustalenie przyczyn, uwarunkowań powstania i skutków zaistniałego

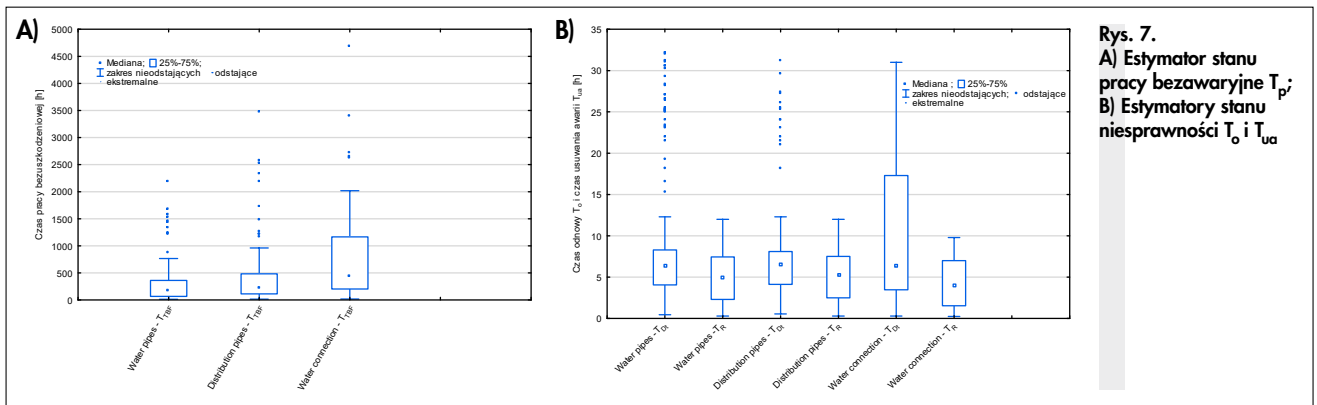
zdarzenia oraz określenie pełnej charakterystyki techniczno-organizacyjnej usunięcia uszkodzenia. Zgromadzone w ramach przeprowadzonych badań dane o uszkodzeniu, archiwizowane w dziennikach awarii, pozwoliły w pełnym zakresie przeprowadzić niezawodnościową analizę czasów eksploatacji sieci wodociągowej w mieście Głubczyce. Analizę oparto na danych archiwalnych pozyskanych z rejestru awarii odnotowanych w latach 2015-2020. Rejestr ten obejmuje takie dane, jak: data wyłączenia awarii, godzina przyjęcia zgłoszenia, godzina przystąpienia do usuwania awarii, godzina usunięcia awarii, miejsce wystąpienia awarii, przyczyna wystąpienia awarii, sposób realizacji zgłoszenia i opis podjętych czynności eksploatacyjnych. Rejestr awarii prowadzony przez przedsiębiorstwo wodociągowe dodatkowo zawiera protokół oraz dokumentację fotograficzną.

W procesie badawczym przeprowadzono wielokryterialną analizę uszkodzeń z uwzględnieniem rodzaju materiału oraz funkcji sieci (sieć: magistralna i rozdzielcza oraz przyłącza wodociągowe). Integralnym elementem badań była analiza czasu pracy bezuszkodzeniowej oraz czasu odnowy i czasu usuwania awarii. W procedurach badawczych czas pracy bezuszkodzeniowej (T_p) definiowany jest jako okres eksploatacji rurociągu między kolejnymi awariami. Czas odnowy (T_o) natomiast stanowi okres od zgłoszenia uszkodzenia do jego całkowitego usunięcia. Zatem obejmuje on dwa komponenty związane z okresem realizacji prac organizacyjnych i przygotowawczych brygady remontowej oraz z okresem prac związanych z rzeczywistym usunięciem uszkodzenia sieci wodociągowej. Natomiast czas usuwania awarii (T_{oa}) to okres od wyjazdu brygady remontowej na miejsce awarii do chwili całkowitego jej usunięcia [10].

Rezultaty i dyskusja wyników

Zebrane w ramach prowadzonych badań dane o awariach poddano weryfikacji i pogrupowano, uwzględniając zarówno funkcję przewodu, jak i rodzaj materiału, z którego zbudowana jest sieć wodociągowa. W oparciu o zgromadzone informacje utworzono także zbiór danych zawierający zmienne losowe czasów eksploatacji tj.: czas pracy bezuszkodzeniowej, czas odnowy i czas usunięcia awarii.

W okresie 6 lat prowadzonych badań w systemie wodociągowym miasta Głubczyce odnotowano łącznie 197 awarii, z czego aż 56% stanowiły uszkodzenia



stalowej sieci wodociągowej (110 awarii w tym 68 na sieci rozdzielczej oraz 42 na przyłączach wodociągowych). Natomiast liczba wszystkich uszkodzeń żeliwnej sieci wodociągowej wynosi 44, z których aż 86% (38 awarii) stanowiły uszkodzenia sieci rozdzielczej. Najmniejszą liczbę awarii odnotowano na sieciach wykonanych z tworzyw sztucznych PCV (20 uszkodzeń). Roczna częstotliwość występowania awarii charakteryzowała się dużą dynamiką zmian. Najwięcej awarii w ciągu roku odnotowano w 2015 roku (48 awarii, 24% wszystkich awarii), a najmniej w 2017 roku (22 awarie, 11% wszystkich awarii). W wyniku przeprowadzonej analizy wykazano, że najbardziej awaryjnym materiałem, z którego została wykonana sieć wodociągowa jest stal, a najczęstszą przyczyną powstawania awarii dla tego typu materiału była korozja. W przypadku przewodów żeliwnych najczęstszą przyczyną awarii stanowiła nieszczelność złączy, natomiast dla przewodów wykonanych z tworzyw sztucz-

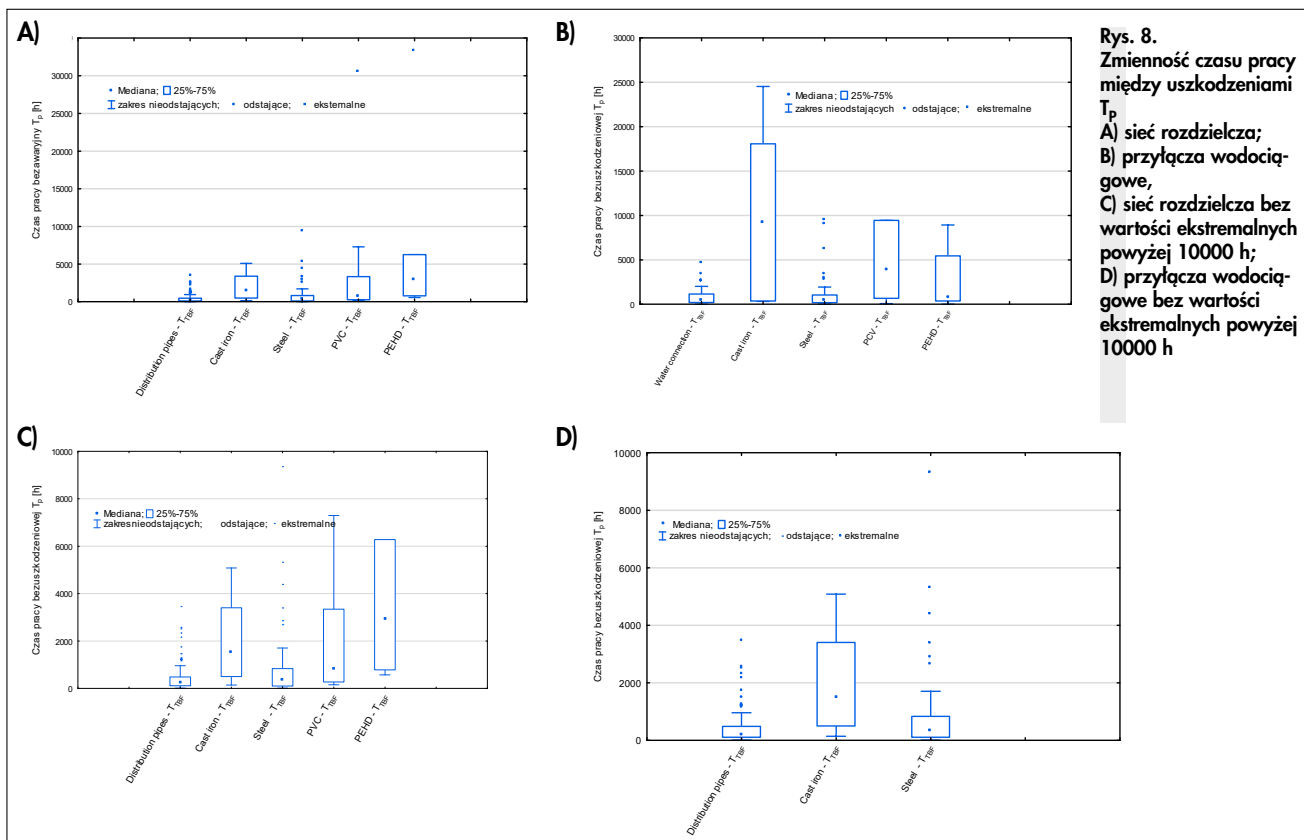
nych główną przyczyną awarii były wady materiałowe, nieszczelności złączy oraz nieodpowiednie prowadzenie prac budowlanych na trasie przebiegu rurociągu. Ponadto zarówno sieć wodociągowa położona zbyt głęboko jak i zbyt płytko sprawia poważne problemy eksploatacyjne. W okresach, kiedy występowały długotrwałe niskie temperatury ujemne, płytkie przewody ulegały zamarzaniu, co skutkowało brakiem dostawy wody do mieszkańców. Z kolei przewody ułożone na dużych głębokościach sprawiają problemy przy lokalizacji wycieków, które ujawniają się przeważnie po długim czasie w postaci uszkodzonych terenów zielonych, chodników czy nawierzchni dróg.

Integralną częścią prac badawczych była analiza czasu pracy bezuszkodzeniowej oraz czasu odnowy i czasu usuwania awarii (tabela 4, rys. 7). Elementem tej analizy była między innymi ocena czasów trwania stanów eksploatacyjnych w 6-letnim okresie prowadzonych obserwacji odniesiona do funkcji sieci, jak sieć roz-

dzielcza i przyłącza wodociągowe (rys. 7 A i B). Stan pracy całej sieci dystrybucji wody determinowany jest głównie awaryjnością sieci rozdzielczej, dla której mediana czasu pracy bezawaryjnej osiągnęła wielkość 212,45 h. W przypadku przyłączy wodociągowych czas ten osiągnął większy rozrzut przyjmując wartości z zakresu od 16,2 h (marzec 2019 r.) do 4675,5 h (listopad 2018r.), dla którego mediana to 450,1 h (rys. 7A). W ciągu sześcioletniego okresu prowadzonych badań na sieci magistralnej odnotowano jedną awarię w dniu 4 marca 2016 r. W konsekwencji stan pracy sieci magistralnej charakteryzuje się bardzo długim średnim czasem między uszkodzeniami wynoszącym aż 26288,55 h, a czas odnowy wynosi 6,83 h, w którym czas rzeczywistego usuwania awarii stanowi 6,5 h. Natomiast stan niezdatności częściowej lub całkowitej opisany jest porównywalnymi estymatorami, dla których mediana czasu odnowy wynosi odpowiednio dla sieci rozdzielczej 6,5 h

Tabela 4. Podstawowe statystyki opisowe czasu pracy bezawaryjnej, czasu odnowy i usuwania awarii w latach 2015-2020

Typ	Rok	Czas pracy bezawaryjnej T_p [h]					Czas odnowy T_o [h]					Czas usuwania awarii T_{ua} [h]				
		N	min	max	sr	Odch.st	N	min	max	sr	Odch.st	N	min	max	sr	Odch.st
Cała sieć wodociągowa	2015	47	18.1	693.05	165.13	145.20	47	0.45	32.2	7.76	8.08	47	0.3	11.5	3.47	2.68
	2016	27	13.42	1461.23	361.75	458.75	27	1.3	30.4	9.58	9.15	27	0.45	12.0	4.45	2.95
	2017	22	18.4	1676.20	398.05	471.62	22	3.0	31.15	10.01	7.43	22	2.5	8.0	5.99	1.79
	2018	32	14.4	1582.00	329.58	354.73	32	2.14	32.0	10.84	8.64	32	1.36	11.0	5.62	2.57
	2019	41	16.1	699.3	209.49	175.84	41	0.3	30.58	8.60	7.20	41	0.25	8.3	5.13	2.87
	2020	27	22.3	2184.35	349.67	415.29	26	0.55	28.15	8.26	7.17	26	0.4	9.0	5.65	2.71
	Średnia	196	13.42	2184.35	278.92	341.75	195	0.3	32.2	8.99	8.04	195	0.25	12.0	4.88	2.82
Sieć rozdzielcza	2015	25	18.1	1171.05	273.45	247.26	25	1.0	31.2	6.38	7.04	25	0.3	9.0	3.57	2.46
	2016	13	16.4	3471.2	752.74	924.20	13	1.3	21.0	6.58	5.44	13	0.45	12.0	3.89	3.40
	2017	15	24.3	2581.25	609.04	745.75	15	3.0	24.1	8.17	4.95	15	2.5	8.0	5.78	1.63
	2018	23	14.4	2536.3	460.56	555.31	23	3.25	25.5	9.02	6.26	23	1.25	10.0	5.63	2.34
	2019	30	16.1	2325.22	274.53	430.62	30	1.15	29.58	8.62	6.23	30	0.3	8.3	5.66	2.84
	2020	22	47.45	2184.35	427.99	462.62	22	0.55	27.15	8.77	7.18	22	0.5	9.0	5.93	2.45
Średnia	128	14.4	3471.20	419.42	566.80	128	0.55	31.2	7.80	6.57	128	0.3	12.0	5.10	2.75	
Przyłącza wodociągowe	2015	22	29.0	1043.36	366.72	290.55	22	0.45	28.43	8.67	8.35	22	0.3	9.8	3.29	2.65
	2016	14	49.37	1939.38	728.50	627.69	14	1.0	30.0	13.30	11.50	14	1.0	8.0	4.53	2.44
	2017	7	331.47	2658.45	1094.30	812.29	7	5.58	23.2	9.56	5.65	7	4.0	8.0	6.25	1.77
	2018	9	68.46	4675.50	1084.40	1392.60	9	2.14	31.0	12.87	11.18	9	1.36	8.0	4.93	2.53
	2019	11	16.20	3405.54	765.41	919.12	11	0.3	24.10	8.00	7.66	11	0.25	8.0	3.64	2.67
	2020	5	380.25	2722.0	1857.04	856.39	4	1.15	8.0	4.66	3.02	4	0.4	8.0	4.10	3.42
	Średnia	68	16.2	4675.50	798.91	899.55	67	0.3	31.0	10.22	9.50	67	0.25	9.8	4.13	2.77



Rys. 8.
Zmienność czasu pracy między uszkodzeniami T_p
A) sieć rozdzielcza;
B) przyłącza wodociągowe,
C) sieć rozdzielcza bez wartości ekstremalnych powyżej 10000 h;
D) przyłącza wodociągowe bez wartości ekstremalnych powyżej 10000 h

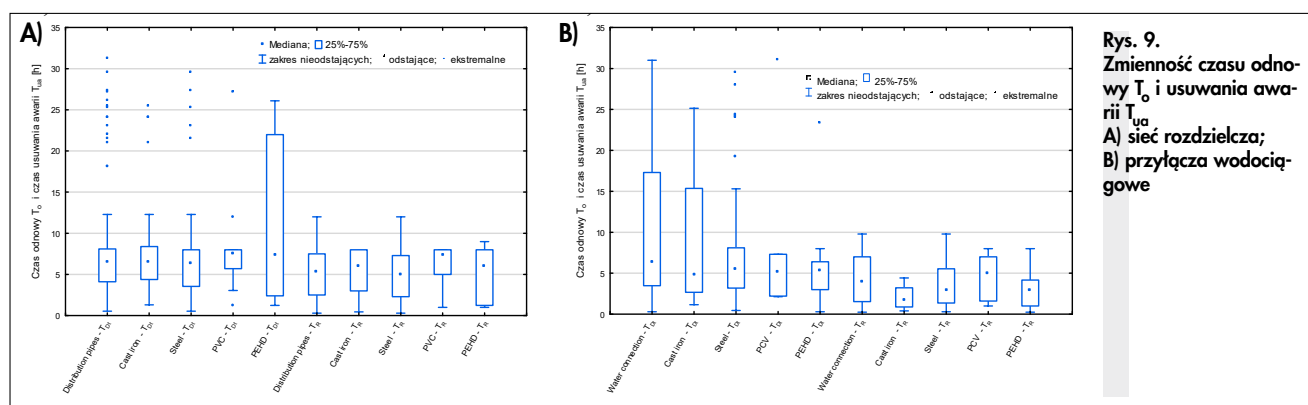
i przyłączy wodociągowych 6,36 h, w rezultacie których mediana czasu odnowy dla całej sieci wodociągowej przyjęła wartość na poziomie 6,45 h. Podobnie w przypadku czasu usuwania awarii, jego mediana wynosi odpowiednio dla całej sieci 5,00 h, dla sieci rozdzielczej 5,30 h i przyłączy wodociągowych 4,0 h (rys. 7B).

Analiza uzyskanych dla PsDW miasta Głubczyce estymatorów czasu bezawaryjnej pracy T_p (tabela 4) w całym okresie badań wykazała, że średnia jego wartość wynosi 278,92 h, która jest o 1,69 razy większa od najmniejszej wartości średniej uzyskanej w 2015 r. Największy średni czas pracy bezawaryjnej 398,05 h odnotowano w 2017 r. Jest on aż o 141% większy od najmniejszej wartości średniej w okresie 6 letnich badań (165,13 h), charakteryzującej stan pracy, czyli całko-

witej zdolności eksploatacyjnej sieci wodociągowej w 2015 r. Najdłuższy interwał czasu pracy bezawaryjnej odnotowano w 2020 roku (2184,35 h), który jest 3,15 razy dłuższy, tj. o 1491,3 h, od najmniejszej wartości maksymalnej, która wystąpiła w 2015 r. Natomiast najkrótszy czas pracy bezawaryjnej odnotowano w dniach 11-12 maja 2016r, kiedy to po usunięciu awarii stalowej sieci rozdzielczej, po upływie zaledwie 13,42 h wystąpiła awaria na stalowym przyłączy wodociągowym. Średni czas bezawaryjnej pracy T_p dla przyłączy wodociągowych (798,91 h) jest 1,9 razy większy od jego wartości średniej dla sieci rozdzielczej (419,42 h). Eksploatacja przyłączy wodociągowych charakteryzowała się największą wartością średnią czasu pracy między uszkodzeniami 1857,04 h występującą w 2020 r., która

jest o 1104,3 h (2,47 razy) większa od największej średniej wartości T_p 745,74 h dla sieci rozdzielczej w 2016 r. Powyższy fakt determinowany jest zarówno najdłuższym interwałem czasu pracy bezawaryjnej odnotowanym w okresie prowadzonych badań dla przyłączy wodociągowych w roku 2018 (4675,5 h) oraz najkrótszym 14,4 h dla sieci rozdzielczej zaobserwowanym w 2018 r.

Średni czas odnowy wyznaczony dla poszczególnych lat (tabela 4) charakteryzował się najmniejszą jego wartością na poziomie 7,76 h w 2015 r. oraz największą wartością średnią 10,84 h w 2018 r. Wartość średnia czasu odnowy w całym okresie badań wyniosła 8,99 h. Jest ona 1,15 razy większa od wartości w 2015 r. i o 1,21 razy mniejsza od największej wartości średniej 10,84 h odnotowanej



Rys. 9.
Zmienność czasu odnowy T_0 i usuwania awarii T_{usa}
A) sieć rozdzielcza;
B) przyłącza wodociągowe

w 2018 r. Najkrótszy czas odnowy miał miejsce w styczniu 2018 r. i wyniósł on zaledwie 0,3 h, co związane było z doszczelnieniem zaworu w studzienice wodomierzowej na przyłączy. Natomiast najdłuższym czasem odnowy $T_o = 31,2$ h charakteryzowała się awaria, która wystąpiła w dniach 14-15 stycznia 2015 r. na stalowej sieci rozdzielczej. W okresie badań średni czas rzeczywistego usuwania awarii T_{ua} wynosił 4,88 h dla całej sieci wodociągowej w mieście Głubczyce (zakres zmienności od 3,47 h do 5,99 h). Natomiast najmniejszy średni czas usuwania awarii odnotowano na poziomie 3,29 h dla przyłączy w 2015 r., podczas gdy jego maksymalną wartość $T_{ua} = 6,25$ h charakteryzował się stan odnowy determinowany awariami w 2017 r. Wyznaczony średni czas usuwania awarii dla sieci rozdzielczej (5,1 h) jest o 0,97 h dłuższy niż jego wartość charakteryzująca przyłącza wodociągowe (4,13 h). Maksymalną wartość usuwania niesprawności odnotowano 23.09.2016 r. na sieci rozdzielczej i jest ona większa o 0,2 h od maksymalnego czasu usuwania awarii dla przyłączy, którą odnotowano 12 stycznia 2015 r.

Elementem przeprowadzonych badań była również ocena estymatorów charakteryzujących wydzielone dwa stany eksploatacyjne sieci wodociągowej w mieście Głubczyce z uwzględnieniem funkcji (sieć rozdzielcza i przyłącza wodociągowe) i rodzaju materiału z jakiego zostały wykonane przewody wodociągowe (rys. 8 i 9).

Czas pracy bezuszkodzeniowej sieci rozdzielczej (rys. 8) determinowany zbieżnością trwania stanów pracy przewodów stalowych przyjmującym wartość z przedziału od 14,4 h (09.09.2018 r.) do 9350 h (okres od 05.02.2017 r. do 02.03.2018 r.), dla których zaobserwowano najmniejszą wartość średnią czasu pracy $T_p = 854,86$ h. Największą wartość średnią czasu pracy bezawaryjnej na poziomie 7168,72 h odnotowaną na sieci rozdzielczej charakteryzowały się przewody z PEHD, dla których czas ten jest aż 17,1 razy większy od wartości średniej wyznaczonej dla wszystkich przewodów sieci rozdzielczej. Sieć rozdzielcza z PVC charakteryzowała się podobnymi do przewodów z PEHD charakterystykami stanu pracy, dla którego największa wartość czasu pracy bezuszkodzeniowej (30679,0 h) była zaledwie o 2622,39 h mniejsza od najdłuższej jego wartości odnotowanej na sieci z PEHD. Natomiast średni czas pracy bezawaryjnej rozdzielczej sieci wodociągowej wykonanej z żelaza jest 4,6 krotnie większy od wartości średniej odnotowanej dla całej sieci roz-

dzielczej. Ponadto maksymalny okres trwania stanu pracy żeliwnej sieci rozdzielczej $T_p = 5086,0$ h osiągał najmniejszą wartość w odniesieniu do pozostałych materiałów, z których zbudowana jest sieć rozdzielcza, która była 1,8 razy mniejsza od wartości max T_p dla rozdzielczej sieci stalowej i ponad 6-krotnie mniejsza w odniesieniu do sieci z PVC (6,03) i PEHD (6,55).

W przypadku przyłączy wodociągowych (rys. 8) zmienność czasu pracy bezawaryjnej wahała się w zakresie od 16,2 h do 4675,5 h (wartość średnia 798,91h). Najkrótszy czas pracy bezawaryjnej $T_p = 16,2$ odnotowano na przyłączy wodociągowym z PEHD w dniu 21.03.2019 r. Najmniejszą wartością średnią czasu pracy bezawaryjnej 1433,54 h charakteryzowały się przyłącza ze stali (zakres zmienności od 29,0 h do 9521,24 h), natomiast największą 10509,26 h przyłącza żeliwne (zakres zmienności od 331,47 h do 24535,0 h). Dla przyłączy wodociągowych z tworzyw sztucznych odnotowano najdłuższy stan pracy ponad 7-krotnie większy od najdłuższego stanu pracy przyłączy (okres od 21.04.2018 r. do 02.11.2018 r.). Przyłącza wodociągowe z tworzyw sztucznych, podobnie jak sieć rozdzielcza z tych materiałów, charakteryzowały się najdłuższym czasem pracy bezawaryjnej wynoszącym dla sieci z PCV 34592,0 h i z PEHD 33634,20 h.

Stan niesprawności sieci rozdzielczej o średnim czasie odnowy 7,99 h (zakres zmienności 0,55 h – 31,2 h, rys. 9) determinowany jest w głównej mierze przebiegiem procesu usuwania uszkodzenia na sieci stalowej (średni $T_p = 7,15$ h, min. $T_p = 0,55$ h; max. $T_p = 31,02$ h). Najdłuższy czas odnowy 26,1 h odnotowano w dniach

14-15 sierpnia 2020 r. na sieci z PEHD, którego przyczyną było usuwanie niesprawności spowodowanej pęknięciem przewodu, w efekcie którego odnotowano wyciek wody na powierzchnię ulicy Fabrycznej. Sieć rozdzielcza z PEHD charakteryzuje się największą wartością średnią czasu odnowy w okresie 6-letnich badań, wynoszącą 10,22 h. Stan niesprawności kształtowany jest czasem usuwania awarii, który w przypadku sieci rozdzielczej PsDW Głubczyc charakteryzuje się dużą jednorodnością, niezależnie od rodzaju materiału. Zakres zmienności czasu usuwania awarii przyjmuje wartości od 0,3 h do 12 h (wartość średnia $T_{ua} = 5,10$ h). Największą wartość średnią usuwania awarii wynoszącą 6,14 h charakteryzowała się sieć rozdzielcza z PCV. Czas ten był 1,20 razy dłuższy od wartości średniej wyznaczonej dla całej sieci rozdzielczej oraz o 1,26 razy dłuższy od najmniejszej wartości średniej odnotowanej na stalowej sieci rozdzielczej ($T_{ua} = 4,87$ h). Najdłuższy czas usuwania awarii 12 h odnotowano w dniach 23-24 września 2016 r. na stalowej sieci rozdzielczej. Czas ten związany był z usuwaniem uszkodzenia przewodu DN100 na Osiedlu Konstytucji, wywołanego korozją.

Czas trwania stanu niesprawności przyłączy wodociągowych PsDW w Głubczycach (rys. 9) jest nieznacznie dłuższy (1,29 razy) w odniesieniu do sieci rozdzielczej. Średni czas odnowy dla przyłączy wodociągowych wynosi 10,32 h, jest zaledwie o 3,27 h dłuższy od najmniejszej wartości średniego czasu odnowy odnotowanego na przyłączy z PEHD ($T_o = 7,04$ h) oraz o 19 minut krótszy od największej średniej wartości czasu odnowy odnotowanego na przyłączy z PCV



Rys. 10.
Awaria na Osiedlu Konstytucji 3 Maja w Głubczycach



Rys. 11.
Awaria na ulicy Słowackiego w Głubczycach

($T_0=10,64$ h). W okresie prowadzonych badań najdłuższy czas odnowy 29,4 h odnotowano na przyłączach stalowych (w dniach 10-11 października 2016 r.), które również charakteryzują się największym czasem usuwania awarii 9,8 h (w dniu 12.01.2015 r.).

Niewątpliwie awarie sieci wodociągowej są zdarzeniami, których dogłębna analiza pozwala na wypracowanie środków bezpieczeństwa minimalizując przedstawione na rys. 10 i 11 negatywne skutki awarii, które miały miejsce na sieci wodociągowej w analizowanym okresie.

Podsumowanie

Ważnym aspektem dla niezawodności i sprawnej eksploatacji sieci wodociągowej pozostaje czynnik materiałowy wykonania rurociągów. Dóbr odpowiednich materiałów przy budowaniu sieci wodociągowych stanowi o poprawności jej eksploatacji. Przeprowadzone badania wykazały, iż w pełni uzasadnionym jest przy podejmowaniu decyzji o wyborze materiału budującego sieć wodociągową przeprowadzenie analizy uwzględniającej poniższe aspekty:

- walory eksploatacyjne rur (trwałość, szczelność, zachowanie w stosunku do wody, łatwość wymiany elementów, możliwość renowacji),

- wytrzymałość konstrukcyjną,
- podatność na obciążenia i uszkodzenia,
- łatwość montażu (pracochłonność wykonania połączeń, ciężar rur),
- cenę materiału,
- zakres oferty techniczno-asortymentowej.

Fundament działań w zarządzaniu PsDW powinny stanowić szkolenia dla kadry kierowniczej oraz montażowej z zakresu prawidłowej eksploatacji sieci wodociągowej oraz prawidłowego jej wykonania. Ponadto, należy tak planować prace inwestycyjne i remontowe związane z rewitalizacją sieci wodociągowej, aby zredukować jej awaryjność i w konsekwencji zmniejszyć negatywne skutki w postaci przerw w dostawie wody do mieszkańców. Ponadto działania te przyczyniają się do sukcesywnej redukcji strat wody, co ma znaczący wpływ na kondycję finansową przedsiębiorstwa, a w konsekwencji na kształtowanie się cen opłat za wodę.

Najmniejszą awaryjnością w okresie 2015-2020 w PDW Głubczyc charakteryzują się przewody magistralne (0,083 uszk./km-rok). Przewody sieci rozdzielczej (0,635 uszk./km-rok) oraz przyłącza wodociągowe (0,671 uszk./km-rok) charakteryzują się zbliżoną intensywnością uszkodzeń. Przeprowadzone badania wykazały, iż istotnym czynnikiem charakteryzującym stany niesprawności sieci

wodociągowej Głubczyc jest czas odnowy, w tym czas trwania prac przygotowawczych бригад remontowych.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Ustawa z dnia 7 czerwca 2001r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz. U. z 2020r. poz. 2028).
- [2] Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz. U. z 2021 r. poz. 159).
- [3] Kwietniewski M., Rak J.: Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2010.
- [4] Szpak D., Tchórzewska-Cieślak B.: Analiza awaryjności sieci wodociągowej w aspekcie bezpieczeństwa funkcjonowania infrastruktury krytycznej, Chemik 2014, 10/2014.
- [5] Świętochowski K.: Awaryjność sieci wodociągowej w województwie dolnośląskim i opolskim, INSTAL 10/2020, s. 42-47 DOI: 10.36119/15.2020/10.7.
- [6] Iwanek M., Suchorab P.: Ocena stanu eksploatacyjnego wybranej sieci wodociągowej, INSTAL 2012, nr 12, s. 39-42.
- [7] Zimoch I.: Niezawodnościowa interpretacja awaryjności podsystemu dystrybucji wody, Czasopismo Techniczne. Środowisko. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, 2011, z 1-Ś, 211-223.
- [8] International Standard ISO 24516-1 Guidelines for the management of assets of water supply and wastewater systems, Part 1: Drinking water distribution networks
- [9] Rak J.: Problematyka ryzyka w wodociągach, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2014.
- [10] Zimoch I.: Czynniki kształtujące czas usuwania awarii wodociągowej. INSTAL 2009, nr 6, s. 50-52