

Andrzej STUDZIŃSKI<sup>1</sup>

Józef KOBYLARZ<sup>2</sup>

## JAKOŚCIOWA ANALIZA RYZYKA AWARII PRZEWODÓW WODOCIĄGOWYCH WODOCIĄGU GRUPOWEGO

Celem opracowania jest analiza hydrauliczna stanów awaryjnych przewodów wodociągowych wodociągu grupowego zaopatrującego w wodę 4 sąsiadujące miejscowości, łącznie około 14 tysięcy odbiorców. Rozpatrywany wodociąg jest jednostrefowy, zaopatrywany w wodę z jednego źródła zasilania. Ocenie poddano wielkość obniżenia ciśnienia oraz jego zasięg. W tym celu zastosowano del hydrauliczny sieci wodociągowej utworzony w programie Epanet 2 na podstawie danych uzyskanych od eksploatatora wodociągu. Model obejmuje zbiorniki wody uzdatnionej, pompownię oraz sieć wodociągową. Metodyka badań polega na symulowaniu zamknięcia (awarii) poszczególnych przewodów sieci wodociągowej i analizy porównawczej rozkładu ciśnienia w sieci wodociągowej w stanie bezawaryjnym oraz podczas awarii. Określono skutki awarii poszczególnych odcinków: wielkość obszaru obniżenia ciśnienia poniżej wartości ciśnienia wymaganego, czasu trwania obniżenia ciśnienia, potencjalnych skutków – liczby odbiorców dotkniętych ograniczeniem dostawy wody. Przeprowadzona symulacja umożliwiła wyznaczenie odcinków sieci, które można podzielić na trzy grupy w zależności od stopnia wpływu ich awarii na działanie sieci, tj. odcinki limitujące prawidłową pracę sieci powodujące przerwanie dostaw wody dla całego systemu zaopatrzenia, odcinki powodujące brak dostaw wody do znacznej części odbiorców, odcinki, których awaria powoduje nieznaczne wahania ciśnienia w sieci, jednakże nie powoduje spadku ciśnienia poniżej wymaganego oraz odcinki niemające większego wpływu na działanie sieci. W przypadku awarii odcinka brak dostaw wody będzie dotyczył wyłącznie odbiorców podłączonych do danego odcinka. Przeprowadzona symulacja wskazała, że na prawidłowe działanie całej sieci wodociągowej istotny wpływ ma wystąpienie awarii na zaledwie 5 odcinkach. Zlokalizowano obszary, które są najbardziej narażone na wahania ciśnienia w sieci wodociągowej wynikające z awarii tych przewodów.

**Słowa kluczowe:** ryzyko, przewody wodociągowe, analiza jakościowa

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Andrzej Studziński, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651703, e-mail: astud@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Józef Kobylarz, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651703, e-mail: j\_kobylarz@wp.pl

## 1. Wprowadzenie

Podstawowym zadaniem podsystemów dystrybucji wody jest zaspokojenie potrzeb w dostarczaniu wody pod odpowiednim ciśnieniem, o odpowiedniej jakości i ilości. W procesie eksploatacji sieci wodociągowej powstają awarie poszczególnych jej elementów, powodując zakłócenia w dostawie wody do odbiorców oraz uniemożliwiając pełnienie funkcji, dla której zostały wykonane. Pod pojęciem awarii wodociągowej można rozumieć gwałtowne, nieprzewidziane uszkodzenia obiektu, systemu lub podsystemu powodujące częściową lub całkowitą utratę zdolności prawidłowego funkcjonowania w pewnym przedziale czasowym.

Celem niniejszego opracowania jest analiza hydrauliczna stanów awaryjnych przewodów wodociągowych wodociągu grupowego zaopatrującego w wodę około 14 tys. mieszkańców. Analizę oparto na symulacji stanów awaryjnych przeprowadzonych w modelu hydraulicznym sieci wodociągowej opracowanym w programie Epanet. Zakres pracy obejmuje skompletowanie informacji dotyczących systemu zaopatrzenia w wodę i wykonanie modelu hydraulicznego sieci wodociągowej, przeprowadzenie symulacji hydraulicznej awarii przewodów sieci, przedstawienie i podsumowanie wyników symulacji.

## 2. Obiekt badań

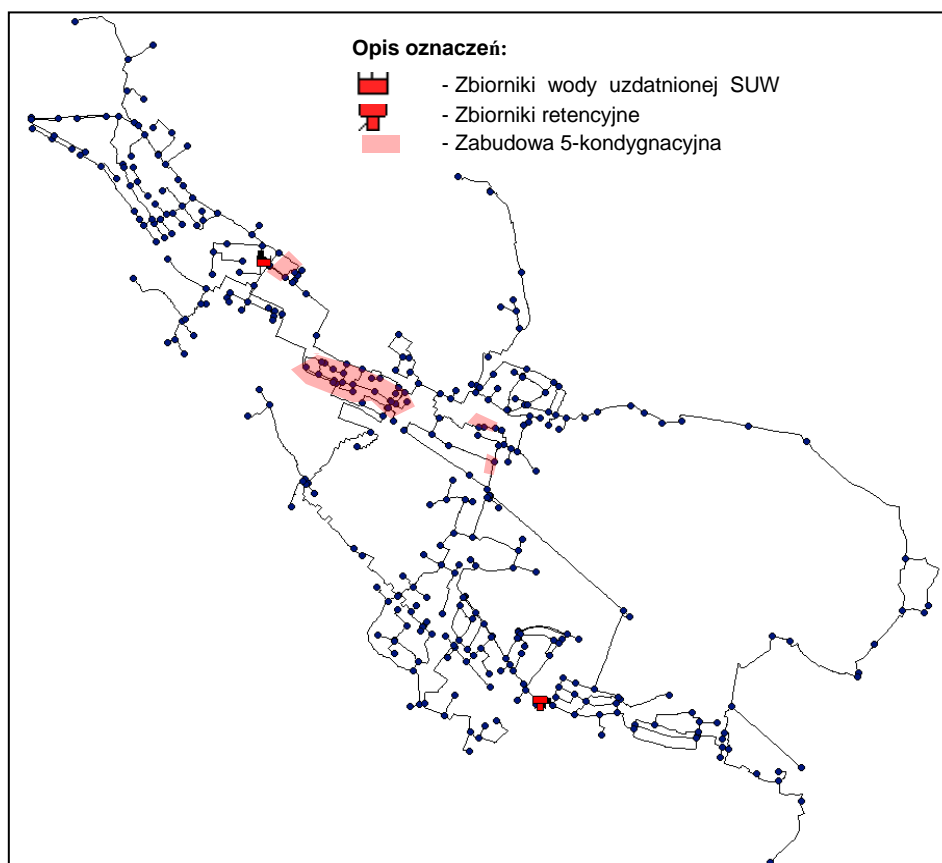
Omawiany wodociąg jest młodym wodociągiem. Początki budowy infrastruktury wodociągowej przypadają na drugą połowę lat 80. ubiegłego stulecia, a pierwszy odcinek sieci został wykonany w 1987 r. Wodociąg jest zaopatrywany z ujęcia wód podziemnych; woda po uzdatnieniu jest gromadzona w zbiornikach wody czystej, a następnie zestawem pompowym kierowana do sieci wodociągowej. Zaopatruje on w wodę 15-tysięczne miasto oraz 3 sąsiednie wsie. Na terenie gminy miejsko-wiejskiej siecią wodociągową jest objętych 61% ogółu mieszkańców (dane GUS za 2012 r.), obsługiwanych przez Miejski Zakład Komunalny (MZK). Liczba ludności korzystającej z sieci wodociągowej to 13689 mieszkańców (z czego 10421 to mieszkańcy miasta). Na terenie zaopatrywanym w wodę przeważa zabudowa niska – do 3 kondygnacji nadziemnych, z wyjątkiem obszarów zaznaczonych na rys. 1., gdzie występuje zabudowa pięciokondygnacyjna.

Strukturę sieci wodociągowej można rozpatrywać jako strukturę mieszaną. Tworzą ją liczne pierścienie z odcinkami rozgałęzonymi na końcówkach sieci. Struktura sieci wodociągowej pod względem materiałowym nie wykazuje dużego zróżnicowania. Do budowy sieci zastosowano głównie materiały PE (83,3 km na koniec 2011 r.) i PVC (125,5 km) oraz w niewielkim stopniu żeliwo szare – 1,8 km, które zostało wykorzystane do wykonania pierwszych odcinków sieci. Zakres średnic rurociągów rozdzielczych kształtuje się w niewielkim zakresie od DN 80 do DN 300, z czego znaczną część sieci stanowią rurociągi o średnicy

DN 100 i DN 150. Łączna długość przewodów wynosiła 210,6 km, z czego przewody rozdzielcze stanowią 93,1 km, pozostałe przewody to zaś podłączenia wodociągowe.

### 3. Model hydrauliczny sieci wodociągowej

Model hydrauliczny został opracowany w programie Epanet 2.0 na podstawie danych uzyskanych z MZK. Model obejmuje zbiorniki wody uzdatnionej, pompownię 2°, sieciowe zbiorniki wodociągowe zaopatrujące w wodę pompownię strefową oraz 406 rozdzielczych przewodów wodociągowych (rys. 1.). Wymienione pompownie są wyposażone w zestawy pompowe sterowane algorytmem stałego ciśnienia.



Rys. 1. Schemat wodociągu w programie Epanet

Fig. 1. Water network scheme in Epanet programme

Zbiorniki wody uzdatnionej stanowią trzy zbiorniki, każdy o pojemności ok. 300 m<sup>3</sup>. Wykonane są w postaci cylindrycznych żelbetowych zbiorników o średnicy 9,0 m i wysokości czynnej 5,0 m. Pompownia 2<sup>o</sup> składająca się z 8 pomp (w tym rezerwowa) jest sterowana przetwornicą częstotliwości z algorytmem stałego ciśnienia na tłoczeniu. Dwa zbiorniki retencyjne o łącznej pojemności 500 m<sup>3</sup> zostały wykonane dla zabezpieczenia dostaw wody do celów przeciwpożarowych oraz bytowo-gospodarczych pod odpowiednim ciśnieniem, dla rozbudowywanej sieci wodociągowej zlokalizowanej na wybranych osiedlach miasta oraz w przyłączonych do sieci wodociągowej wsiach. Stanowią również zbiorniki czerpalne dla pompowni strefowej, zrealizowanej jako zestaw pompowy składający się z pięciu pomp (w tym rezerwowa), sterowanej algorytmem stałego ciśnienia. W warunkach pełnej sprawności systemu pompownia ta nie pracuje, jest załączana w przypadku spadku ciśnienia w jednym z trzech węzłów sieci, co odwzorowano w algorytmach sterowania siecią w modelu. Zagadnienia dotyczące tworzenia modelu są tożsame z przedstawionymi w pracach [1-6].

#### 4. Metodyka badań

Metodyka oceny ryzyka polega na określeniu skutków awarii poszczególnych odcinków:

- wielkości obszaru obniżenia ciśnienia poniżej wartości ciśnienia wymaganego,
- czasu trwania obniżenia ciśnienia,
- potencjalnych skutków – liczby odbiorców dotkniętych ograniczeniem dostawy wody.

Analiza polega na określeniu rozkładu ciśnienia w sieci wodociągowej podczas awarii przewodu i na tej podstawie wyznaczeniu zasięgu oddziaływania awarii odcinka na ciągłość dostawy wody do wszystkich odbiorców. Symulacje awarii realizowano poprzez wyłączenie z eksploatacji poszczególnych odcinków sieci, symulując ich zamykanie podczas naprawy. Symulacje przeprowadzono, przyjmując założenie, że jednocześnie awarii może ulec jeden odcinek. Zakładano 50% napełnienie początkowe w zbiornikach sieciowych. Jako czas przeprowadzania symulacji awarii przyjęto czas równy czterem godzinom [7-10]. Jest to średni czas dla przewodów rozdzielczych, obejmujący moment od zamknięcia przepływu wody na odcinku, na którym wystąpiła awaria, do ponownego włączenia, w tym zamknięcie przepływu wody, odkopanie uszkodzonego odcinka, usunięcie awarii i przywrócenie przepływu wody na odcinku.

Godziny przeprowadzania symulacji pomiędzy 7:00 a 21:00 mają drugorzędne znaczenie, ponieważ w tych godzinach występują niewielkie zmiany rozbiórów godzinowych. Jako godzinę rozpoczęcia symulacji awarii przyjęto 7:00.

Przeprowadzona symulacja nie wymusiła zmniejszania zapotrzebowania wody wynikającego z obniżenia ciśnienia uniemożliwiającego zaopatrzenie w wodę wszystkich odbiorców [11], tak jak to przedstawiono w pracach [1, 2].

## 5. Wyniki symulacji

Przeprowadzona symulacja umożliwia wyznaczenie odcinków sieci, które można podzielić na trzy grupy w zależności od stopnia wpływu ich awarii na działanie sieci:

- 1) odcinki limitujące prawidłową pracę sieci powodujące przerwanie dostaw wody dla całego systemu zaopatrzenia,
- 2) odcinki powodujące brak dostaw wody do znacznej części odbiorców,
- 3) odcinki, których awaria powoduje nieznaczne wahania ciśnienia w sieci, jednakże nie powoduje spadku ciśnienia poniżej wymaganego oraz odcinki niemające większego wpływu na działanie sieci, w przypadku awarii odcinka brak dostaw wody będzie dotyczył wyłącznie odbiorców podłączonych do danego odcinka.

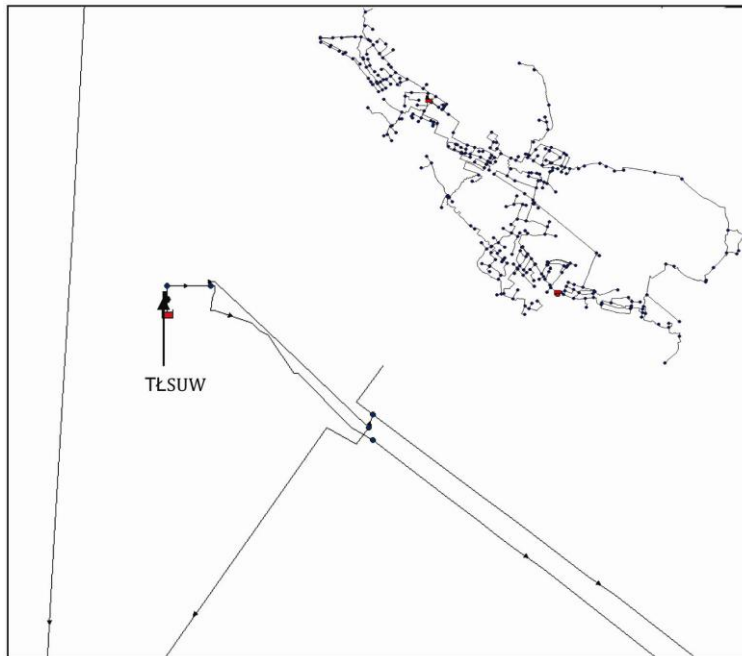
Do pierwszych dwóch grup odcinków mających znaczący wpływ na działanie sieci i dostawę wody do odbiorców są odcinki TSUW, 6., 7., 8. i 72. Wpływ poszczególnych odcinków na działanie sieci ze względu na ich położenie znacząco się różni.

Odcinek TŁSUW jest to główny odcinek łączący stację uzdatniania wody z siecią wodociągową. Położenie tego odcinka przedstawia rys. 2. Odcinek ten o średnicy nominalnej DN 300 pełni rolę głównej magistrali łączącej SUW z siecią wodociągową, ma długość 20 m i jest wykonany z PE. Przykładowe wyniki symulacji awarii przedstawia rys. 3., ilustrujący ciśnienie w sieci w stanie pełnej sprawności (rys. 3a) oraz w stanie wystąpienia awarii (rys. 3b).

Awaria odcinka powoduje załączenie pompowni strefowej – w wodę są zaopatrywani wyłącznie odbiorcy na terenie trzech wsi, pozostała część sieci wodociągowej jest jej pozbawiona. Odcinek ten ma kluczowe znaczenie dla ciągłości dostawy wody do miasta. Na rysunku 4. pokazano lokalizację odcinków 6., 7. i 8. limitujących dostawę wody do północno-wschodniej części miasta, na rys. 5. zaś przykładowy obraz symulacji.

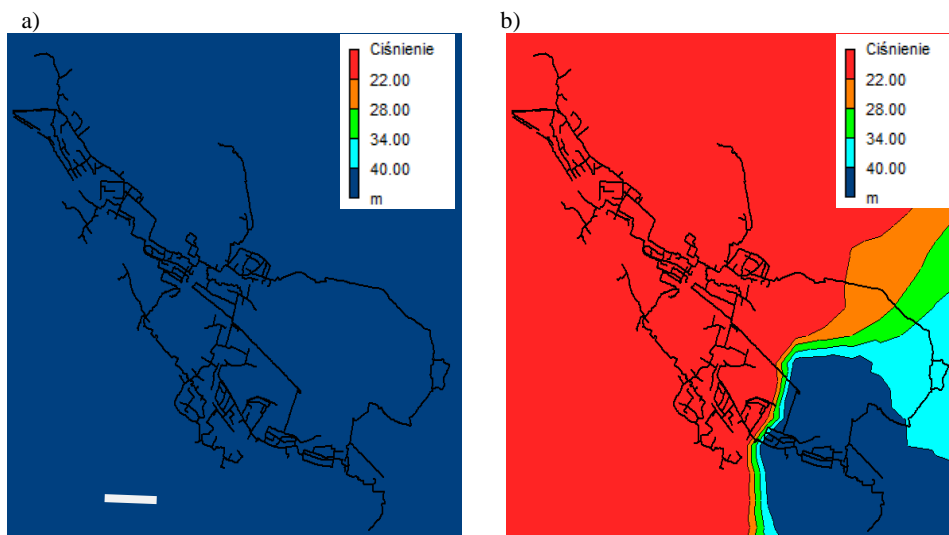
Ostatnim z odcinków o znaczącym wpływie na ciągłość dostawy wody dla większego obszaru sieci wodociągowej jest odcinek 72., którego lokalizację przedstawia rys. 6., a wyniki rys. 7.

W przypadku odcinka 72. o niedoborze wody w północnej części miasta decyduje jednokierunkowy przepływ wody poprzez wsie zlokalizowane we wschodniej części sieci wodociągowej. Spadek ciśnienia wynika ze strat hydraulicznych wynikających ze znacznej długości, tj. 17 km.



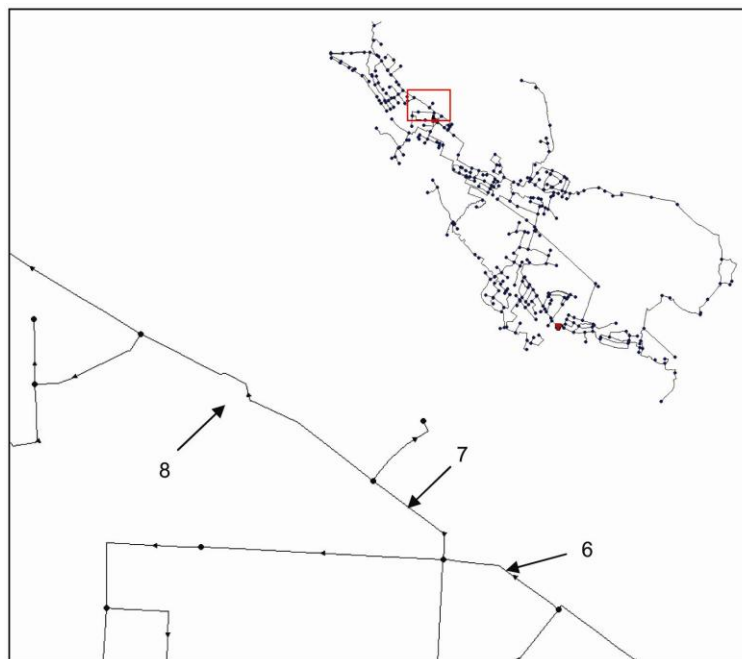
Rys. 2. Lokalizacja odcinka TŁSUW

Fig. 2. Location of TŁSUW pipeline



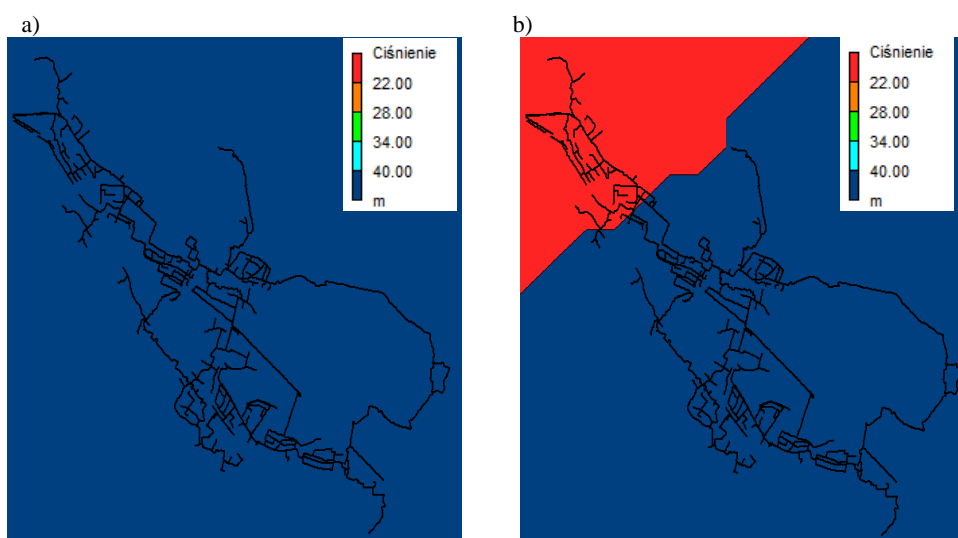
Rys. 3. Rozkład ciśnienia podczas awarii odcinka TŁSUW w pierwszej godzinie symulacji: a) praca sieci w stanie bezawaryjnym, b) praca sieci podczas awarii odcinka

Fig. 3. Pressure layout during pipeline TŁSUW failure in the first hour of simulation: a) network operation in working order, b) network operation during the failure



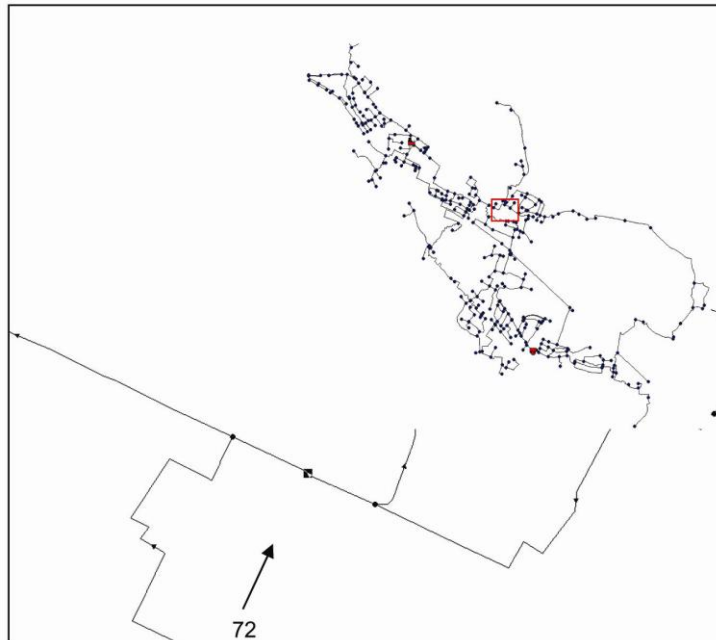
Rys. 4. Lokalizacja odcinków 6., 7. i 8.

Fig. 4. Location of pipelines 6, 7 and 8



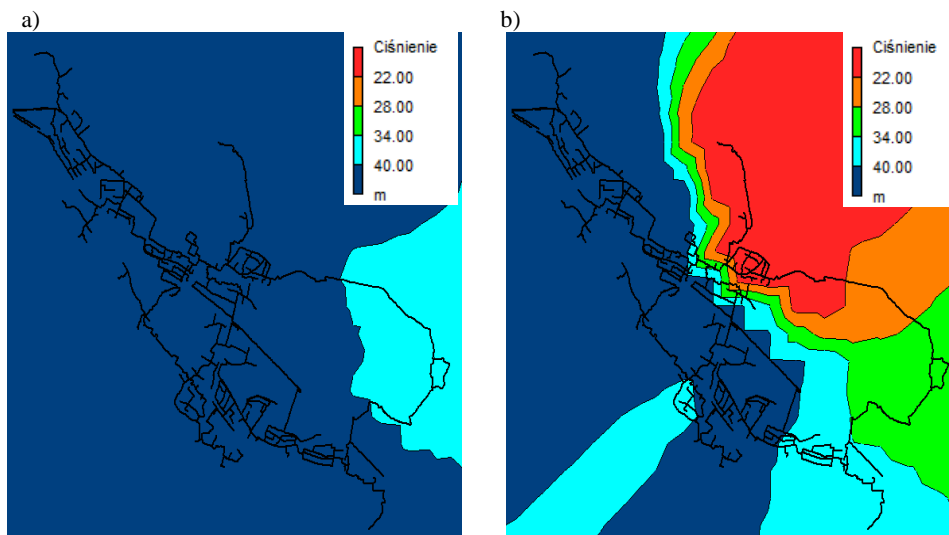
Rys. 5. Rozkład ciśnienia podczas awarii odcinka 6. w pierwszej godzinie symulacji: a) praca sieci w stanie bezawaryjnym, b) praca sieci podczas awarii odcinka

Fig. 5. Pressure layout during pipeline 6 failure in the first hour of simulation: a) network operation in working order, b) network operation during the failure



Rys. 6. Lokalizacja odcinka 72. sieci wodociągowej

Fig. 6. Location of pipeline 72



Rys. 7. Symulacja pracy sieci w trzeciej godzinie symulacji awarii odcinka 72.: a) praca sieci w stanie bezawaryjnym, b) praca sieci podczas awarii odcinka

Fig. 7. Pressure layout during pipeline 72 failure in the third hour of simulation: a) network operation in working order, b) network operation during the failure



Skutki awarii pozostałych odcinków są dotkliwe wyłącznie dla podłączonych do nich odbiorców lub w przypadku struktury promienistej sieci wodociągowej na końcówkach sieci – również dla odbiorców podłączonych do zasilanych przewodów promienistych. Obniżenie wysokości ciśnienia w przewodach będących elementami pierścieni nie przekracza 12 m, pozostała wartość ciśnienia jest wystarczająca do realizacji dostawy wody.

Wyniki przeprowadzonej symulacji awarii pozostałych odcinków pozwalają stwierdzić, że 83% odcinków w przypadku wystąpienia awarii powoduje wyłącznie brak dostawy wody do odbiorców bezpośrednio do nich podłączonych, bez oddziaływania na odcinki sąsiednie. Wystąpienie awarii na tych odcinkach powoduje brak dostawy wody u średnio 40 mieszkańców. Odcinki, których awaria powoduje brak wypływu wody u odbiorców do nich podłączonych i które wykazują niewielki wpływ na działanie sieci wodociągowej (obniżenie ciśnienia, zachowane warunki dostawy wody), stanowią 14%. Przewody, które limitują prawidłową pracę sieci (tj. w przypadku wystąpienia na nich awarii znaczna część mieszkańców może być pozbawiona wody lub wymaganego ciśnienia wypływu), stanowią 3% ogółu sieci.

## 6. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonej analizy pozwoliły na wyodrębnienie odcinków, których awaria w różnym stopniu wpływa na prawidłową pracę układu. Przeprowadzona symulacja wskazała, że na prawidłowe działanie całej sieci wodociągowej istotny wpływ ma awaria na zaledwie pięciu odcinkach. Największe właściwości limitujące prawidłową pracę sieci wodociągowej wykazuje odcinek tłoczny z SUW, którego awaria powoduje brak wody u większości mieszkańców korzystających z sieci wodociągowej.

Odcinkami mającymi duży wpływ na prawidłowe funkcjonowanie sieci, których awaria powoduje całkowity brak wody u znacznej liczby mieszkańców, są również przewody 6., 7. i 8. Odcinki te zaopatrują w wodę mieszkańców na północ od SUW. Awaria każdego z nich powoduje podobne w skutkach oddziaływanie, czyli brak dopływu wody przez cały okres wystąpienia awarii. Powstałe skutki wynikają z jednokierunkowego zasilania sieci wodociągowej przez odcinki 6., 7. i 8.

Do grupy odcinków, których awaria wyraźnie wpływa na działanie sieci, powodując braki dostaw wody w wybranych obszarach odbiorców, należy odcinek 72. Na podstawie przeprowadzonej analizy zlokalizowano obszary, które są najbardziej narażone na wahania ciśnienia w sieci wodociągowej.

Pozostałe odcinki nie wykazują znaczącego wpływu na ciągłość dostawy wody w całej sieci wodociągowej. Jest to związane głównie z krótkim czasem funkcjonowania wodociągu, w którym wielkość średnic przewodów rozdzielczych wynika z obowiązujących w ostatnich trzydziestu latach przepisów przeciwpożarowych w zakresie projektowania sieci wodociągowych.

Przedstawiona metoda i uzyskane wyniki są podstawą dalszych badań ryzyka w wymiarze ilościowym. Znajdują również zastosowanie w praktyce eksploatacyjnej przedsiębiorstwa wodociągowego eksploatującego badaną sieć wodociągową.

### Literatura

- [1] Studziński A., Pietrucha-Urbanik K.: Risk indicators of water network operation. *Chemical Engineering Transactions*, no. 26, pp. 189-194.
- [2] Studziński A.: Analiza hydrauliczna skutków awarii przewodów wodociągowych Rzeszowa. *Instal*, nr 10/2008, s. 109-112.
- [3] Studziński A.: Ryzyko awarii magistrali wodociągowej „ISKRZYNIA” w Krośnie. *Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, Inżynieria Ekologiczna*, z. 26, 2011, s. 247-256.
- [4] Studziński A.: Ryzyko awarii magistrali wodociągowej „Szczepańcowa” w Krośnie. *Ośrodek Informacji „Technika Instalacyjna w Budownictwie” INSTAL. Teoria i Praktyka w Instalacjach*, z. 11/2011, s. 58-62.
- [5] Studziński A.: Ryzyko awarii przewodów rozdzielczych wodociągu Krosna. *Czasopismo Techniczne*, z. 1, Środowisko, 2011, s. 191-200.
- [6] Studziński A., Pietrucha-Urbanik K.: Awaryjność sieci wodociągowej Tarnowa. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 10/2012, s. 464-466.
- [7] Iwanejko R., Bajer J.: Metoda szacowania ryzyka związanego z czasem usuwania awarii sieci wodociągowej w zastosowaniu. *Czasopismo Techniczne*, z. 1., Środowisko, 2011.
- [8] Iwanejko R., Bajer J.: Podstawy teoretyczne metody szacowania ryzyka związanego z czasem usuwania awarii sieci wodociągowej. *Czasopismo Techniczne*, z. 1., Środowisko, 2011.
- [9] Pietrucha-Urbanik K., Studziński A.: Analiza strat wody wodociągu krośnieńskiego. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 10/2012, s. 452-454.
- [10] Rak J., Kwietniewski M.: *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, 2010.
- [11] Knapik K.: *Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociągowych*. Wydaw. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2000.

### QUALITY ANALYSIS OF WATER PIPE FAILURE RISK FOR GROUP WATER SUPPLY SYSTEM

#### Summary

The aim of the study is hydraulic analysis of water pipes faults in group water supply system, a total of approximately 14,000 customers. The water supply system is a single zone, supplied with water from a single water intake. It was evaluated the size reduction of the pressure and its coverage. For this purpose hydraulic model of the water network created in EPANET 2 was used. It was created on the basis of data obtained from the water network operator. The model includes treated water tanks, pumping station and the water network. The research methodology is to simulate the

closure (failure) of individual water pipes and comparative analysis of the distribution of pressure in the water supply system in the state during the failure-free and failure. The effects of failure of individual pipelines were determined: the size of the area of reduction of pressure below the pressure required, the duration of the pressure reduction, the potential consequences – the number of customers affected by the reduction of water supplies. With the simulation are assigned pipelines of the network, which can be divided into three groups depending on the degree of impact of their failure to the water network: pipelines limiting proper operation of the network causing interruption of water supply to the entire supply system, causing the lack of water supply to a large part of the water customers, pipelines, which failure causes a slight pressure fluctuations in the network, however, the pressure does not fall below the required pressure, and finally pipelines of non-significant impact on the operation of the network in case of failure of the lack of water supply section will cover only the customers connected to the pipeline. The simulation indicated that a significant effect on the correct operation of the entire water supply system is a failure on just 5 water conduits. Areas that are most vulnerable to fluctuations in pressure in the water supply system resulting from the failure of these pipelines were located.

**Keywords:** risk, water pipe, quality analysis

*Przesłano do redakcji: 5.01.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 02.06.2014 r.*

DOI 10.7862/rb.2014.21