

MODELOWANIE PARAMETRÓW SYSTEMU DYSTRYBUCJI WODY I ICH SZCZEGÓLNE ZNACZENIE W PROCESACH INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Agnieszka Trębicka¹

¹ Katedra Systemów Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok, e-mail: a.trebicka@pb.edu.pl

STRESZCZENIE

Tematem pracy jest przedstawienie modelu matematycznego sieci wodociągowej oraz analiza podstawowych parametrów systemu dystrybucji wody poprzez komputerowy model. Obszar rozważań znajduje się we wsi Kleosin, w gminie Juchnowiec Kościelny w województwie podlaskim, powiecie białostockim, usytuowany przy granicy z Białymstokiem. W badaniach zwraca się szczególną uwagę na znaczenie wszelkich zaistniałych zmian dotyczących jakości i ilości dostarczonej wody do SDW, poprzez modelowanie podstawowych parametrów systemu dystrybucji wody w różnorodnych wariantach pracy w celu określenia nowych bardziej racjonalnych sposobów eksploatacji (zmniejszenie wartości ciśnienia) oraz określenie warunków rozbudowy i modernizacji sieci wodociągowej, ze szczególną analizą układu w ramach wyodrębnienia najbardziej niebezpiecznych miejsc na sieci. Analizowane procesy oparte są na odwzorowywaniu i udoskonalaniu stanów zachowawczych podsystemu dystrybucji wody (SDW), przy wykorzystywaniu matematycznego modelowania uwzględniającego najnowsze dostępne techniki komputerowe.

Słowa kluczowe: model matematyczny, sieć wodociągowa, zaopatrzenie w wodę, dynamiczny model, komputerowe modelowanie.

MODELING OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM PARAMETERS AND THEIR PARTICULAR IMPORTANCE IN ENVIRONMENT ENGINEERING PROCESSES

ABSTRACT

The object of this study is to present a mathematical model of water-supply network and the analysis of basic parameters of water distribution system with a digital model. The reference area is Kleosin village, municipality Juchnowiec Kościelny in podlaskie province, located at the border with Białystok. The study focused on the significance of every change related to the quality and quantity of water delivered to WDS through modeling the basic parameters of water distribution system in different variants of work in order to specify new, more rational ways of exploitation (decrease in pressure value) and to define conditions for development and modernization of the water-supply network, with special analysis of the scheme, in frames of specification of the most dangerous places in the network. The analyzed processes are based on copying and developing the existing state of water distribution sub-system (the WDS) with the use of mathematical modeling that includes the newest accessible computer techniques.

Keywords: mathematical model, water distribution system, water-supply system, dynamic model, computer modeling.

WSTĘP

Postępy w dziedzinie nauki i technologii oraz kwestie dotyczące ochrony środowiska sprawiają, iż nacisk na rozwój systemów wodociągowych cieszy się, co raz większym zainteresowaniem oraz skutkuje wdrażaniem narzędzi informatycznych wspomagających modelowanie i monitoring sieci wodociągowych w postaci spe-

cialistycznych programów inżynierskich. Modelowanie, według [Denczew 2002] zajmuje się budową i badaniem modeli (tj. systemów, procesów, zjawisk) odwzorowujących rzeczywistość lub jej fragment. W eksploatacji modelowanie jest podstawową i ogólną procedurą, z której korzysta się w przypadku badań mających na celu określenie zachowania się rzeczywistości eksploatacyjnej w danych warunkach. W systemach wodocią-

gowych wykorzystuje się do tego odpowiednio utworzone oprogramowania, które pozwalają na utworzenie prostego modelu sieci. Model taki odwzorowuje rzeczywistą sieć wodociągową, na podstawie, którego można dany system wodociągowy monitorować, modelować a także przeprowadzać symulacje [Boulos P.F., Ormsbee L.E 2009]. Zastosowanie komputerowego modelu systemu dystrybucji wody pozwala na:

- przeprowadzenie analizy hydraulicznej oraz ocenę obecnego stanu technicznego systemu,
- racjonalizację parametrów funkcjonowania systemu, [Kulbik M. 2003]
- opracowanie przyszłościowej strategii rozwoju oraz ocenę skutków podjętych decyzji projektowych i eksploatacyjnych przed ich realizacją,
- monitorowanie i obserwację pracy obiektów, urządzeń i instalacji oraz parametry hydrauliczne sieci takie jak ciśnienie wody, prędkość oraz natężenie i kierunek przepływu.

Zadania te są kluczowe do prawidłowego funkcjonowania jednostki osadniczej oraz możliwości jej rozwoju. Prawidłowe wykonywanie tych usług wiąże się z odpowiednią eksploatacją systemu wodociągowego.

ZDARZENIA AWARYJNE I ICH WPŁYW NA FUNKCJONOWANIE SIECI

Zdarza się, że podczas eksploatacji sieci wodociągowej dochodzi do różnych sytuacji awaryjnych. Wpływają one negatywnie na pracę całego układu i wypełnianie podstawowych funkcji sieci wodociągowej [Knapik K 1989]. Najczęściej spotykanymi uszkodzeniami przewodów są:

- pęknięcia podłużne i poprzeczne,
- wypchnięcie uszczelnienia,
- wżery korozyjne,
- zniszczenie spawów,
- rozluźnienie uszczelnienia dławicy za zasuwach,
- niedomykalność się zaworów grzybkowych w hydrantach.

Wiele czynników wpływa na zagrożenia dla sieci wodociągowej. Pierwszą przyczyną są błędy popełnione już na etapie projektowania, takie jak:

- złe usytuowanie odcinków sieci (błędne rozpoznanie warunków gruntowych, niewłaściwy wybór trasy przebiegu wodociągu),
- niewłaściwy standard rozwiązań projekto-

wych (zły wybór armatury, automatyki, ochrony antykorozyjnej; błędy w rozwiązaniach hydraulicznych; brak lub niepełna dokumentacja powykonawcza).

Kolejną przyczyną są błędy popełnione na etapie wykonawstwa. Zaliczamy do nich między innymi: odstępowstwa wykonawcze w stosunku do projektu w zakresie układania rur, sposobu połączeń poszczególnych odcinków, ochrony przeciwkorozyjnej czy niewłaściwie przeprowadzoną próbę ciśnieniową lub inną procedurę odbioru.

Zagrożeniem dla wodociągów są również błędy popełniane podczas eksploatacji wodociągu. Do najważniejszych nieprawidłowości można zaliczyć: niewłaściwe procedury, brak monitoringu pracy sieci, brak reakcji na małe przecieki wody czy brak pogotowia wodociągowego. [Dohnalik 2004, Rak i Tchórzewska-Cieślak 2013]

W przypadku wystąpienia awarii, dyspozytor zarządzający eksploatacją powinien wszcząć odpowiednie procedury postępowania w celu ograniczenia jej negatywnych skutków (zmniejszenie negatywnych skutków w dostawie wody, sprawne i prawidłowe przeprowadzenie prac naprawczych).

Działania dążące w kierunku zmniejszenia negatywnych skutków, wymagają oceny skutków i znajomości układu sieci wodociągowej, która znacząco ułatwia działania na sieci. Działania te polegają między innymi na: zwiększaniu wydajności innych ujęć czy dokonaniu odpowiednich przełączeń na sieci. [Knapik i Bajer 2011]

CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU WODOCIĄGOWEGO KLEOSINA

Kleosin jest to wieś, położona w województwie podlaskim, powiecie białostockim, w gminie Juchnowiec Kościelny, usytuowana jest przy granicy z Białymstokiem. Teren gminy stanowi krajobraz równinny, urozmaicony luźno rozrzuconymi pagórkami, częściowo zalesiony.

Stożek wodociągowania wsi Kleosin wynosi 98,2%. Długość czynnej sieci rozdzielczej wynosi 10,8 km. Charakterystyczną cechą tej sieci wodociągowej jest rosnące w ostatnich latach zużycie wody. Pobór z ujęcia w 2011 roku wyniósł 234982 m³, a rok później wartość poboru wody wzrosła o około 13% i wyniósł 266472 m³.

Woda do sieci dostarczana jest z jednej (wybudowanej w 2010 roku) studni głębinowej SW-3 o wydajności eksploatacyjnej równej 100 m³/h.

W skład ujęcia wchodzi jeszcze dwie studnie SW-1 i SW-2 o wydajności 40 m³/h, pełnią one jednak rolę rezerwową. Zgodnie z pozwoleniem wodnoprawnym pobór wody nie może przekraczać: $Q_{hmax} = 37,64 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{dmax} = 903,23 \text{ m}^3/\text{d}$. Surowa woda pobierana ze źródła – studni głębinowych kierowana jest do budynku hydroforni gdzie poddawana jest procesowi jednostopniowego odżelaziania i napowietrzenia. Na odżelaziaczu znajduje się centralny mieszacz, co skutkuje jednakowym poziomem wytrącania tlenków żelaza.

METODYKA BADAŃ

Podstawą do przeprowadzenia badań było utworzenie modelu obranej sieci wodociągowej, w programie komputerowym EPANET 2.0, który posłużył jako podstawowe narzędzie do przeprowadzenia różnorodnych symulacji. Należy zaznaczyć, iż wiele płatnych aplikacji do matematycznych symulacji hydrauliki sieci wodociągowych wykorzystuje algorytmy obliczeniowe zawarte w programie EPANET. Wykorzystano w pracy cyfrowy podkład sieci wodociągowej wsi Kleosin. Materiały zostały uzyskane z portalu internetowego GEOPORTAL i zawierają oznaczenie podstawowych elementów sieci wodociągowej tj: odcinki wodociągu, średnice, długości. Dodatkowo portal umożliwia naniesienie na mapę nazw ulic, położenie budynków, granice działek i ich numery. Na rysunku 1 przedstawiono fragmenty mapy Kleosina, pobrane ze strony internetowej GEOPORTAL.

Początek pracy z programem EPANET, w celu stworzenia modelu sieci wodociągowej opierał się na wprowadzeniu mapy do programu, która posłużyła, jako podkład. Używając dostępnych narzędzi aplikacji komputerowej stworzony został model, który składa się z: rezerwuaru, pompy, zbiornika, węzłów i odcinków.

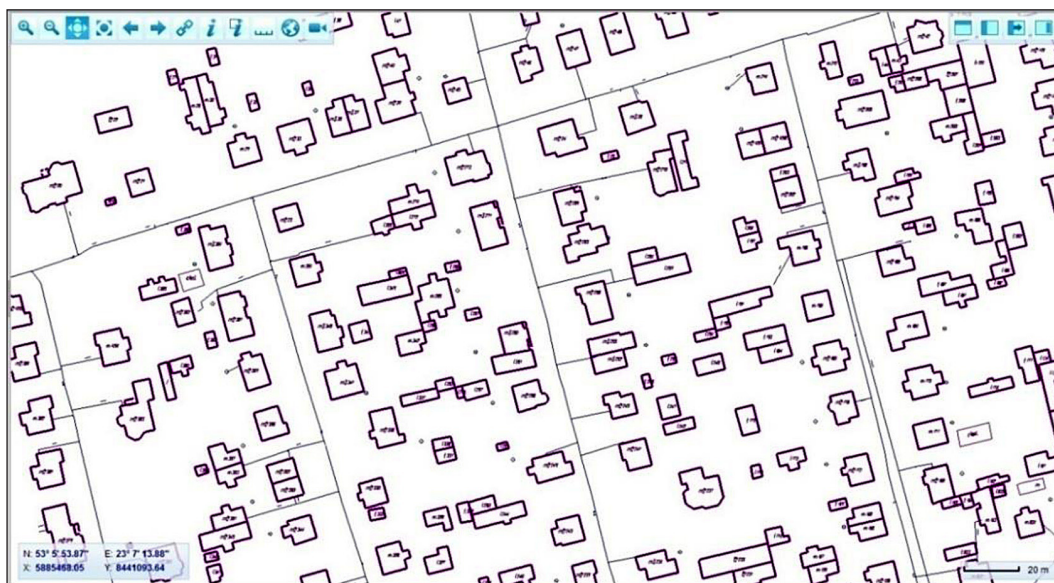
Każdemu z naniesionych elementów zostały przypisane parametry techniczne takie jak: rzędna terenu, długość, zapotrzebowanie na wodę, położenie względem rodzaju zabudowy, średnica i chropowatość przewodów.

Na rysunku (rys. 2) dokonano zestawienia dotyczącego poboru wody oraz liczby ludności Kleosina na tle innych miejscowości należących do Gminy Juchnowiec Kościelny.

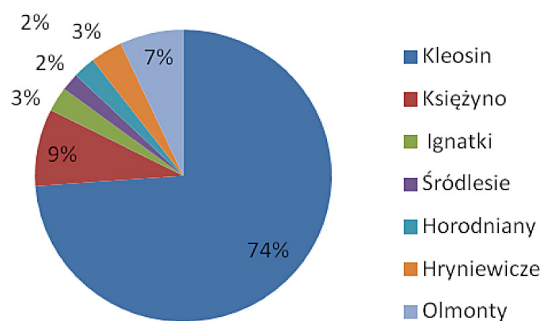
Kolejnym krokiem budowy modelu SDW była potrzeba określenia dla każdego węzła jednego z trzech kategorii rozbiór: ZJ – tereny zabudowy jednorodzinnej, ZW – tereny zabudowy wielorodzinnej PS – tereny przemysłowe Każda z kategorii charakteryzuje się innymi wartościami rozbiórów wody w czasie. Uzyskane dane przypisane zostały do konkretnych węzłów, zsumowane i wprowadzone do programu.

MODEL SIECI WODOCIĄGOWEJ KLEOSINA

Opracowanie danych o funkcjonowaniu sieci wymagało opracowania własnych metod przetwarzania zdobytych informacji o rzeczywistych zużyciach wody. Do odwzorowania układu sieci



Rys. 1. Fragment cyfrowej mapy sieci wodociągowej Kleosina
Fig. 1. A part of the digital map of water-supply system in Kleosin



Rys. 2. Procentowe zestawienie rozkładu pobranej wody przypadającej na konkretne miejscowości w 2012 roku

Fig. 2. Proportional composition of water distributed to concrete localities in 2012 year

przewodów z dokładnymi średnicami, długościami i rzędnymi wykorzystano nowoczesne mapy cyfrowe. Symulacje komputerowe przeprowadzono przy pomocy programu EPANET sprawdzonego w środowiskach naukowych jak i w zastosowaniach praktycznych.

ANALIZA I WYNIKI BADAŃ SYSTEMU DYSTRYBUCJI WODY

Model sieci składa się z: jednego zbiornika (1), który jest węzłem reprezentującym źródło sieci, jednej pompy (1), opisanej za pomocą numeru węzła, w którym jest ona zlokalizowana, sześćdziesięciu czterech (64) ponumerowanych przewodów wodociągowych, które prowadzą wodę z jednego punktu sieci do innego, czterdziestu dwóch węzłów (42), które reprezentują punkty w sieci, w których spotykają się połączenia lub gdzie woda wpływa lub wypływa z sieci.

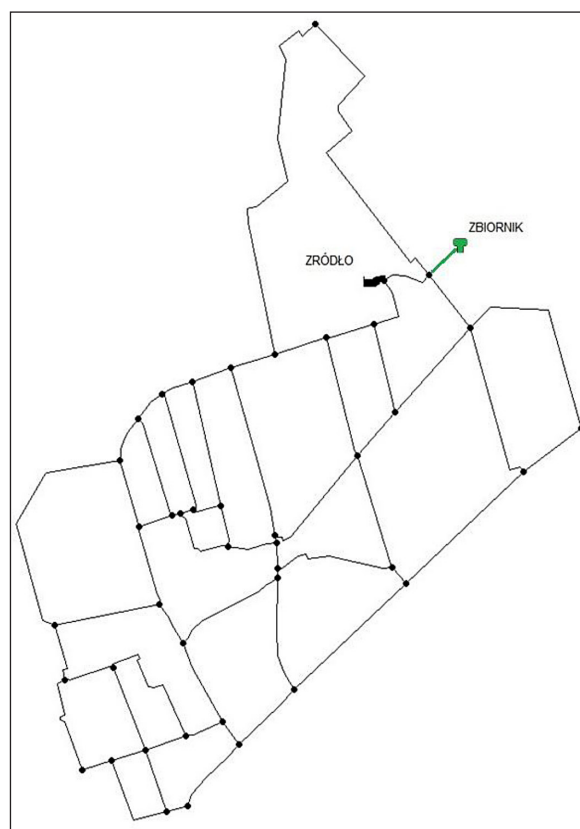
Każdemu z tych obiektów zostały przypisane konkretne wartości. Węzłom przypisano rzędną terenu oraz rozbiór wody, przewodom wodociągowym średnice i długości a dla zbiornika wysokość hydrauliczną i ciśnienie. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenia symulacji modelu sieci wodociągowej w programie EPANET i uzyskania parametrów charakteryzujących całą sieć, tj: przepływy (m^3/s), prędkości przepływów (m/s), ciśnienie w węzłach, współczynniki tarcia oraz współczynniki strat jednostkowych (m/km) do obliczenia, którego posłużono się wzorem Hazena-Williamsa [Trębicka A. 2011].

W części badawczej pracy, sieć wodociągowa została poddana symulacji w odmiennych wariantach pracy. Podstawą było odtworzenie ukła-

du hydraulicznego sieci wodociągowej, dla stanu istniejącego, będącego bazą do dalszych badań i pomiarów. Zmiany następujące poszczególnych parametrów systemu porównywano do stanu ustalonego (stanu bez zauważalnych zmian na sieci). Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było przeprowadzenie dokładnej analizy. W ramach niniejszej pracy przedstawia się zaproponowaną próbę dodania dodatkowego zbiornika nieopodal głównego ujęcia wody. Wszystkie warianty poddano symulacji w różnych warunkach eksploatacyjnych: wystąpienie pożaru, praca w czasie największego i najmniejszego rozbioru wody w sieci.

MODEL SIECI WODOCIĄGOWEJ Z DODATKOWYM ZBIORNIKIEM

W wariantcie oznaczonym jako symulacja pracy systemu SYM_Z, podjęto próbę dodania nowego zbiornika wody, nieopodal głównego źródła zaopatrującego sieć w wodę w ramach poprawy efektywności (rys. 3). Zbiornik został umieszczony na terenie o rzędnej 147 m. n.p.m.,



Rys. 3. Schemat modelu wariantu SYM_Z, z zaznaczonym zbiornikiem oraz nowym przewodem

Fig. 3. Scheme of the SYM_Z model with the reservoir and new line marked

jego poziom początkowy wynosi 10, średni 20 a maksymalny 40. Zbiornik został podłączony do sieci za pomocą nowego przewodu oznaczonego nr 67, o średnicy 100 mm i długości 100 m. Miejscem, w którym zbiornik wraz z dodatkowym przewodem łączy się z siecią jest węzeł nr 39. Największe rozbiory wody w sieci zaobserwowano o godzinie 8.00 – 1537,34 m³/d, a najmniejsze o godzinie 23.00: – 1433,02 m³/d.

Średnice przewodów w modelu są takie same jak w wariancie nr 1, czyli ich zakres wynosi od 90 mm do 225 mm. Średnie dobowe rozbiory wody w zbiorniku wynoszą 696,775 m³/d, a średnie ciśnienie panujące w zbiorniku to 23,17 m.

SYMULACJA PRACY SIECI W GODZINIE NAJWIĘKSZEGO ZAPOTRZEBOWANIA NA WODĘ

Największą wartość ciśnienia podczas symulacji pracy sieci w wariancie SYM_Z, w godzinie największego rozbioru odnotowano w węźle nr 13 i wynosi 30,92 m, natomiast minimalne w węźle nr 40 i wynosi 15,03 m są mniejsze o odpowiednio 6,18 m i 6,19 m od wyników symulacji pracy sieci w warunkach ustalonych. Największa prędkość przepływu miała miejsce w przewodzie nr 53 i osiągnęła 0,42 m/s, z drugiej strony prędkość równą 0 m/s zaobserwowano w pięciu odcinkach o numerach 9, 14, 42 i 59.

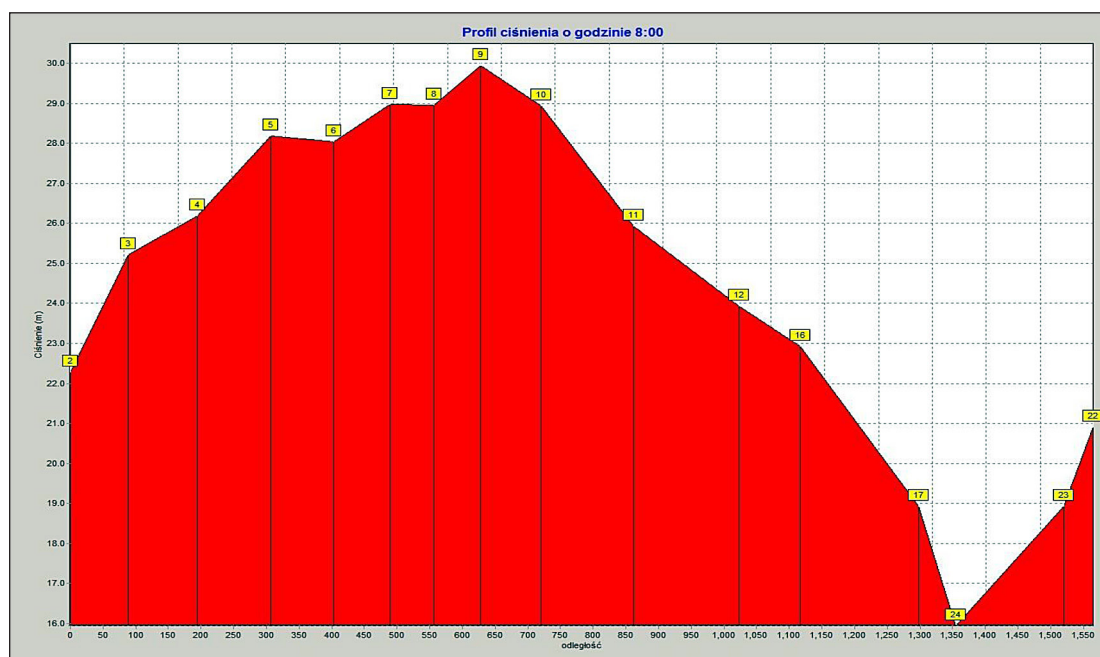
Przepływ o największej wartości zaobserwowany podczas symulacji wariantu SYM_Z, w godzinie największego rozbioru sieci, miał miejsce w przewodzie nr 1 i osiągnął wartość 1195,15 m³/s. Wartość najmniejsza równa 0,05 m³/s występuje w odcinku nr 14. Na rysunku (rys. 4) przedstawiono profil ciśnienia jakie panuje w węzłach wchodzących w skład przewodu magistralnego. Natomiast na rysunku 5 zobrazowano rozkład ciśnienia w całej sieci.

W wariancie SYM_Z przebadano też sytuację symulacji na wypadek pożaru, w godzinie największego rozbioru, odnotowano, iż największe ciśnienie będzie w węźle nr 13 (29,86 m), najmniejsze zaś w węźle nr 40 (9,11 m).

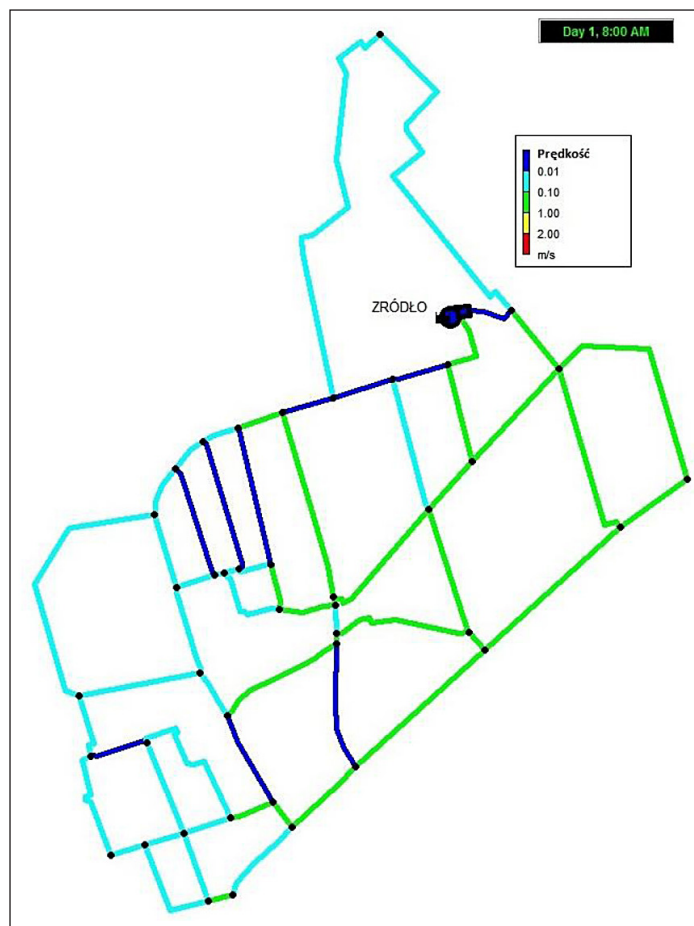
Największa zaobserwowana prędkość przepływu miała miejsce w przewodzie nr 62 i osiągnęła 1,67 m/s, natomiast prędkość równą 0 m/s odnotowano w dwóch odcinkach o numerach 21 i 42. Przepływ o największej wartości zaobserwowany podczas symulacji sieci miał miejsce w przewodzie nr 1 i osiągnął wartość 2474,09 m³/s. Wartość najmniejsza równa 0,23 m³/s występuje w odcinku nr 21.

WNIOSKI

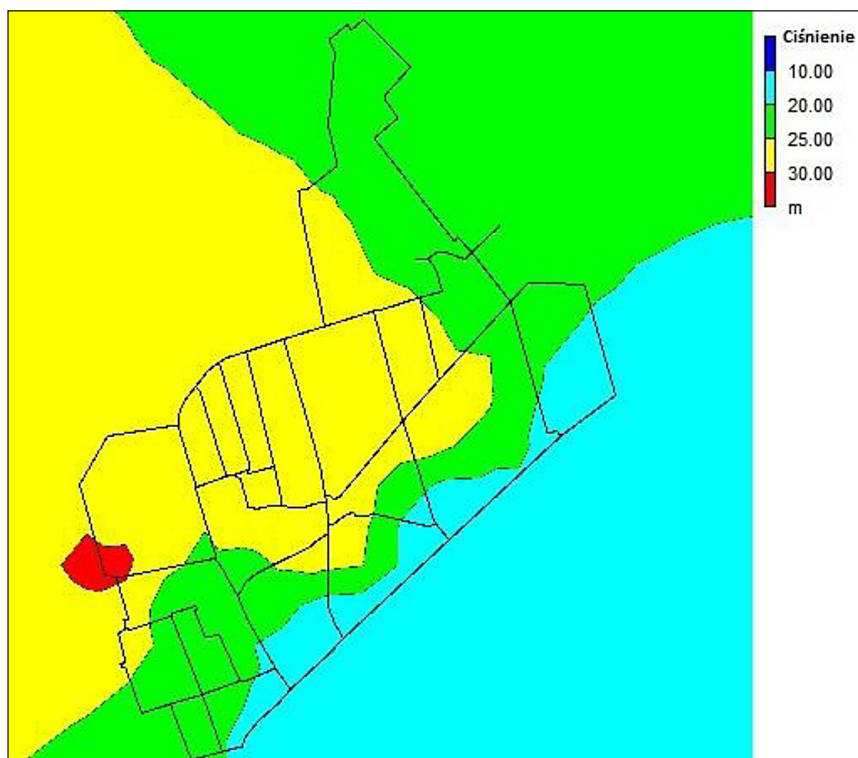
Utworzenie komputerowego modelu symulacyjnego w programie EPANET odwzorowującego układ i pracę sieci wodociągowej miał na



Rys. 4. Profil ciśnienia w węzłach głównego przewodu magistralnego w godzinie największego rozbioru
Fig. 4. Profile of pressure in the main line junctions in the hours of the largest consumption



Rys. 5. Prędkości przepływu wody w przewodach sieci wodociągowej w godzinie największego rozbioru
Fig. 5. Flow speed of water in lines of water-supply network in the hour of the largest consumption



Rys. 6. Rozkład ciśnienia w sieci w godzinie największego rozbioru wody [opracowanie własne]
Fig. 6. Distribution of pressure in the network in the hour of the largest consumption

celu zwrócenia szczególnej uwagi na udoskonalenie wybranych parametrów systemu dystrybucji wody w procesach inżynierii środowiska. Uzyskane wyniki symulacji, pracy SDW we wsi Kleosin, przeprowadzone na jej komputerowym modelu wskazują, iż obecnie istniejący system poboru i produkcji wody w zupełności wystarcza na pokrycie potrzeb mieszkańców. Maksymalne dobowe zużycie wody wynosi 903,23 m³/d, natomiast średnie dobowe zużycie wody osiąga wartość 821,11 m³/d. Wydajność maksymalna głównego ujęcia wynosi ok. 1100 m³/d w warunkach pracy normalnej, w przypadku zagrożenia pożarowego wydajność została zwiększona do 2100 m³/d w celu pokrycia zapotrzebowania przeciwpożarowego. Obecny system produkcji wody zapewnia wymagane zapotrzebowanie, ale nie dysponuje większymi rezerwami.

Analiza wyników, uzyskanych z badanych wariantów wykazała, iż wartości prędkości przepływu wody w sieci, niezależnie od wariantu, są zbyt niskie. W większości przewodów średnia osiągnięta prędkość nie przekracza 0,11 m/s, a w wielu z nich panują wartości zbliżone do stagnacji wody – prędkość jest mniejsza niż 0,1 m/s. Powoduje to konieczność okresowego płukania przewodów. Zalecana optymalna prędkość dla przewodów o średnicy do 300 mm mieści się w przedziale 0,5–0,8 m/s. Przyczyną takiego stanu rzeczy są restrykcyjne normy przeciwpożarowe, które musiały spełniać budowane dawniej wodociągi, spowodowały, że obecnie wodociągi tego typu są przewymiarowane. Rozwiązaniem problemu może być czas gdyż prędkości przepływu zwiększają się wraz ze wzrostem przepływu, a pobór wody z ujęcia w analizowanej sieci jest większy z roku na rok.

Średnie wartości ciśnienia w każdym z przeanalizowanych wariantów mieszczą się w przedziale od 26,07 m do 40,22 m. Zapewnia to dostarczenie wody wszystkim użytkownikom pod odpowiednim ciśnieniem. Charakterystyczną cechą jest stały wzrost ilości dostarczanej wody, zaobserwowany na przestrzeni lat 2009–2012.

Dodanie, do modelu analizowanej sieci wodociągowej dodatkowego zbiornika w wariantcie SYM_Z, przyczyniło się do spadku średniego ciśnienia w układzie o około 35%. Odnotowano natomiast aż 58%-y wzrost wielkości przepływu oraz uzyskano największe wielkości prędkości prze-

pływów (średnio 0,10 m/s) w modelowanej sieci. Poprawa tych dwóch parametrów, skutkuje mniejszym ryzykiem nadmiernego gromadzenia się osadów w przewodach oraz pozytywnym wpływem, na jakość dostarczanej wody do odbiorców.

Zastosowanie komputerowego modelu SDW, przy użyciu programu EPANET i odpowiednim przeprowadzanie symulacji w różnych warunkach użytkowania sprawia, że analiza uzyskanych wyników staje się o wiele prostsza, a decyzje dotyczące planowania przedsięwzięć, modernizacji mniej ryzykowne.

Podziękowania

Badania zostały realizowane w Politechnice Białostockiej w ramach pracy statutowej o nr S/WBIIS/2/2014.

LITERATURA

1. Boulos P.F., Ormsbee L.E 2009. Explicit network calibration for multiple loading. *Journal of Civil Engineering Systems*, 153–160.
2. Denczew S. 2006. Podstawy modelowania systemów eksploatacji wodociągów i kanalizacji, teoria i praktyka. Monografia. Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Środowiska.
3. Dohnalik P., Jędrzejewski Z., 2004. Efektywna eksploatacja wodociągów. Kraków.
4. Knapik K. 1989. Czasoprzestrzenna symulacja działania systemu dystrybucji wody. Monografia. Wyd. Politechniki Krakowskiej.
5. Knapik K. 1998. Zastosowanie techniki komputerowej w obliczaniu systemów zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków. Wyd. Politechniki Krakowskiej.
6. Knapik K., Bajer J. 2011. Wodociągi. Wyd. Politechniki Krakowskiej.
7. Kulbik M. 2004. Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych. Wyd. Politechniki Gdańskiej.
8. Rak J.R., Tchórzewska-Cieślak B. 2013. Ryzyko w eksploatacji systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Warszawa.
9. Rossman L.A. 2000. Instrukcja obsługi programu EPANET 2, US EPA 2000.
10. Trębicka A. 2011. Odwzorowywanie stanów zachowawczych podsystemu dystrybucji wody metodą symulacji komputerowej. *Inżynieria Ekologiczna*, 26.