

Izabela ZIMOCH¹ i Ewelina BARTKIEWICZ^{1*}

MODELOWANIE WIEKU WODY JAKO ELEMENT WSPOMAGAJĄCY ZARZĄDZANIE SIECIĄ WODOCIAĞOWĄ

MODELING OF WATER AGE AS AN ELEMENT SUPPORTING THE MANAGEMENT OF THE WATER SUPPLY SYSTEM

Abstrakt: Płukanie oraz czyszczenie sieci wodociągowej są podstawowymi zadaniami związanymi z eksploatacją sieci wodociągowej. Mogą być one wykonywane w sytuacjach wymagających tego typu zabiegów, np. po zakończonych pracach remontowych lub awariach, lub w efekcie planów długoterminowych, których celem jest poprawa stanu pracy sieci wodociągowej. Decyzja o płukaniu przewodów powinna być podjęta na podstawie analizy pracy Systemu Zaopatrzenia w Wodę (SZW). Jednym z narzędzi wspomagających zarządzanie siecią wodociągową jest model matematyczny, dzięki któremu można zamodelować przepływy oraz wiek wody. Analiza wieku wody umożliwia zlokalizowanie miejsc, w których woda ulega stagnacji. Wiek wody jest ważnym parametrem określającym przydatność wody do spożycia, im jest dłuższy, tym większe jest prawdopodobieństwo, że w wodzie rozwiną się bakterie zagrażające zdrowiu. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy wieku wody, opartej na matematycznym modelowaniu różnych scenariuszy symulacyjnych, odwzorowujących zmienne warunki eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę. Model przedmiotowej sieci wykonano i skalibrowano w programie Epanet.

Słowa kluczowe: model matematyczny systemu wodociągowego, wiek wody, sieć dystrybucji, wtórne zanieczyszczenie wody

Wprowadzenie

Woda dostarczana do odbiorców i konsumentów musi spełniać warunki określone w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi z dnia 13 listopada 2015 r. Ujęte w nim regulacje dotyczą m.in. składu wody, zakresu badań oraz sposobu monitorowania jakości wody [1]. Na zmianę jakość wody dostarczanej do odbiorców wpływają procesy zachodzące podczas jej transportu rozległymi i przewymiarowanymi przewodami wodociągowymi, które stanowią swoisty reaktor procesów chemicznych. Procesy te zachodzą w strumieniu transportowanej wody oraz na granicy faz woda-ścianka rurociągu, zatem częstym i nieuniknionym problemem operacyjnym spotykanym w systemach wodociągowych jest tworzenie się osadów w wyniku procesów korozji bądź wytrącania się z wody związków mineralnych i organicznych oraz tworzenie biofilmu na powierzchni rurociągów. Osady te negatywnie wpływają na materiał, z którego są wykonane przewody wodociągowe. Zmniejszają przepustowość rurociągów oraz zwiększają porowatość ścian, a powstałe wżery stwarzają dogodne warunki dla rozwoju mikroorganizmów [2-4]. Przewody stalowe i żeliwne bez specjalnych powłok ochronnych łatwiej ulegają złożonemu procesowi korozji. Produktami procesu korozji są między innymi tlenki metali oraz rdza, które rozpuszczają się w zetknięciu z agresywnym ditlenkiem węgla i substancjami organicznymi, jednocześnie

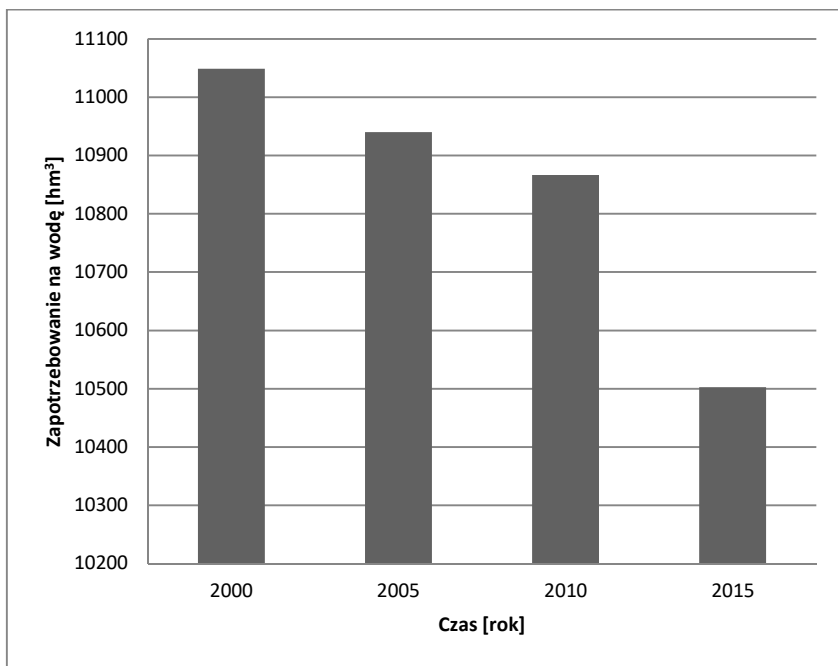
¹ Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Politechnika Śląska, ul. S. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, tel. 32 237 16 98, fax 32 237 10 47, email: izabela.zimoch@polsl.pl

*Autor do korespondencji Ewelina.bartkiewicz@polsl.pl

Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'17, Polanica-Zdrój, 4-7.10.2017

przedostając się do wody. Natomiast przewody z tworzyw sztucznych bardzo wolno ulegają procesom starzenia się, jednak na ich powierzchni szybko powstaje biofilm. Biofilm jest skupiskiem mikroorganizmów (bakterii, grzybów i glonów) oraz ich metabolitów. Przy gwałtownych zmianach warunków hydraulicznych pracy sieci wodociągowej, to jest prędkości przepływu lub kierunku przepływu, błona biologiczna może zostać oderwana i przetransportowana wraz wodą do odbiorców [2-5]. Przyczyną tych procesów jest niestabilność chemiczna i biologiczna wody włączanej do sieci. Wody o niskim pH i wysokim zasoleniu wykazują własności agresywne, natomiast o wysokim pH mają tendencję do wytrącania osadów, prowadzących do korozji wżerowej [3, 6-8]. Do czynników sprzyjających powstawaniu osadów i biofilmu należą między innymi [2-10]: brak stabilności chemicznej i mikrobiologicznej wody, temperatura wody, stężenie dezynfektanta w transportowanej wodzie, stagnacja wody w sieci wodociągowej, zawartość tlenu oraz średnica i materiał przewodu. Skutkiem opisanych powyżej czynników jest zwiększenie dawki dezynfektanta w procesie dezynfekcji w celu zabezpieczenia wody przed skażeniem mikrobiologicznym, a co za tym idzie zwiększenie kosztów produkcji wody [2, 10].

Podstawowym założeniem przy projektowaniu sieci wodociągowej jest konieczność doboru średnic przewodów gwarantujących zachowania prędkości przepływu wody, zapewniającej samooczyszczanie się rurociągów. W ubiegłym stuleciu wytyczne do prognozowania zapotrzebowania na wodę nie przewidywały obecnego stanu zmniejszonego zużycia wody na cele komunalne i przemysłowe, co skutkowało znacznym, blisko 100 % zawyżeniem wielkości jednostkowego wskaźnik zużycia wody przez jednego mieszkańca przyjmowanym w założeniach do projektowania infrastruktury wodociągowej, przyczyniając się tym samym do przewymiarowania systemu wodociągowego. W ostatnich dziesięcioleciach zaobserwowano znaczny spadek zużycia wody, co tym samym przekłada się na zmniejszenie natężenia i prędkości przyprływu wody w systemie dystrybucji. Powodem takiej sytuacji jest wdrożenie zamkniętych układów gospodarki wodą w zakładach przemysłowych oraz stosowanie oszczędnych urządzeń sanitarnych w gospodarstwach domowych. Na rysunku 1 zaprezentowano spadek zużycia wody w okresie 2000-2015 pokrywającego całkowite potrzeby gospodarki narodowej i potrzeby eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę, natomiast na rysunku 2 przedstawiono zużycie wody wyłącznie na potrzeby gospodarstw domowych. W okresie tym procent wody wykorzystywanej na cele konsumpcyjne obywateli zmieniał się od 16 do 12 % w stosunku do łącznego zużycia wody przez wszystkie sektory gospodarki narodowej, dla której w tym okresie odnotowano zaledwie 5 % spadek. Natomiast zużycie wody w gospodarstwach domowych spadło aż o 31 %, co przekłada się na znaczne niekorzystne zmiany warunków hydraulicznych pracy sieci wodociągowej. Zmniejszony oraz nierównomierny pobór wody w systemie dystrybucji jest głównym powodem stagnacji wody szczególnie w godzinach nocnych, obserwowanej przede wszystkim na końcówkach sieci. Mała prędkość przepływu lub postój wody powoduje gromadzenie się osadów w przewodach wodociągowych, natomiast gwałtowne zwiększenie prędkości oderwanie ich i transport w strumieniu wody do odbiorców.



Rys.1. Ilość wtłoczonej wody do sieci na potrzeby gospodarki narodowej i ludności w latach 2000-2015 [11]

Fig. 1. The quantity of water delivered into the water pipe network for the needs of the national economy and populations in the years 2000-2015 [11]

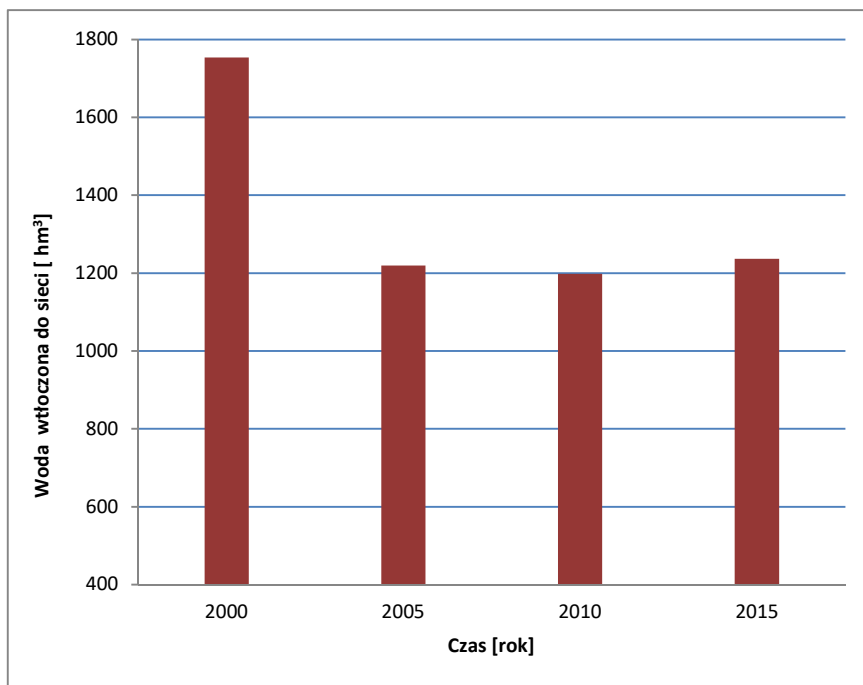
Aby zapobiec powstawaniu mineralnych i organicznych osadów na ściankach przewodów, należy podjąć czynności związane z ograniczeniem powstawania wtórnego zanieczyszczenia wody. Do najważniejszych tych czynności należą [2]:

- zmiany w technologii uzdatniania wody pozwalające na uzyskanie wody stabilnej chemicznie i biologicznie,
- okresowe czyszczenie sieci wodociągowej i obiektów systemu dystrybucji,
- regularne płukanie sieci wodociągowej,
- renowacja przewodów wodociągowych.

Do podstawowych czynności eksploatacyjnych systemu zalicza się płukanie sieci wodociągowej, dzięki któremu usuwane są z przewodów zgromadzone osady oraz część biofilmu. Można je wykonać wodą lub wodą i powietrzem. Metoda z zastosowaniem dwóch mediów (wody i powietrza) jest bardziej skuteczna. Według Kowala [10], płukaniem powinno się objąć głównie:

- końcówki sieci, niezależnie od miejsca ich lokalizacji, dwa razy w miesiącu, z jednoczesnym poborem próbek do badań jakości wody,
- przewody wodociągowe, znajdujące się pomiędzy końcówkami a pompowniami tłoczącymi wodę do sieci, raz w miesiącu, z jednoczesnym poborem próbek do badań jakości wody,

- odcinki sieci po zgłoszeniu skargi na złą jakość wody przez odbiorców, stanowiące tzw. płukanie interwencyjne,
- odcinki sieci po wymianie wodomierza lub przewodu.



Rys. 2. Ilość wody wtłoczonej do sieci na potrzeby gospodarstw domowych w latach 2000-2015 [11]

Fig. 2. Water delivered into the water pipe network for household needs in the years 2000-2015 [11]

Pomimo zalecanych wytycznych [12, 13], określenie harmonogramu oraz częstotliwości płukania sieci należy wykonywać na podstawie analizy wieku wody. W tym celu powinno się wykorzystać model matematyczny sieci wodociągowej, pozwalający na symulacje różnych scenariuszy eksploatacyjnych, odzwierciedlających zachowanie systemu dystrybucji wody w zmiennych warunkach funkcjonowania, uwzględniających dobową i sezonową dynamikę rozbioru wody w systemie. Poprawnie skalibrowany model hydrauliczny powinien stanowić podstawę do budowy modelu jakościowego, wspomagającego zarządzanie Systemem Dystrybucji Wody (SDW). W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy zmian wieku wody, przeprowadzonej dla różnych scenariuszy eksploatacyjnych SZW przy wykorzystaniu modelu matematycznego, zbudowanego w programie Epanet 2.0.

Charakterystyka sieci wodociągowej

Przedmiotem badań jest wybrany podsystem magistralnej sieci wodociągowej zaopatrującej w wodę kilka aglomeracji miejsko-przemysłowych Śląska, gdzie obecnie

dominującym typem odbiorcy są tereny mieszkalne. W ostatnich latach ilość pobieranej wody spadła o około 30 %, co przyczyniło się do znacznego zmniejszenia produkcji wody. Badany podsystem zasilany jest z czterech Zakładów Uzdatniania Wody A, B, C i D (ZUW) oraz z przepompowni strefowej znajdującej się poza rozpatrywanym obszarem. Do przedmiotowego podsystemu należą cztery kompleksy zbiorników (E, F, G, H) o łącznej pojemności 162 tys. m³ pełniące rolę zbiorników zapasowo-wyrównawczych (rys. 3).

Wiodącą funkcję w eksploatacji SDW tego rejonu pełnią zbiorniki E, które zasilane są zarówno z przepompowni strefowej, jak i ZUW A, a następnie rozprowadzają wodę do północnej części sieci. W zbiornikach E i H następuje mieszanie się wód z ZUW A oraz z przepompowni strefowej, ze zbiorników E woda dopływa do zbiorników F (w rozpatrywanym okresie prowadzonych analiz zbiorniki F były wyłączone z eksploatacji, co zostało odwzorowane w procesie modelowania matematycznego), natomiast zbiorniki G zasilane są z ZUW C.



Rys. 3. Schemat sieci wodociągowej

Fig. 3. Scheme of water pipe network

Badana sieć ma ponad 240 km długości i zbudowana jest głównie z przewodów stalowych oraz w mniejszym stopniu z przewodów z polietylenu PE-SDR17 i z żeliwa sferoidalnego. Udział rurociągów o średnicach w zakresach 560-800 mm oraz 1000-1600 mm w całkowitej długości sieci wodociągowej rozpatrywanego obszaru jest jednakowy i wynosi 39%, pozostała część (22%) to rury o średnicy mniejszej niż 500 mm. Analizowana sieć była budowana głównie w latach 1960-1990, najstarsze rurociągi pochodzą z 1929 r. (przewody stalowe), zaś najnowsze z 2016 r. (PE-SDR17).

Metodologia badań

W badaniach wykorzystano model hydrauliczny sieci wodociągowej utworzony w programie Epanet 2.0. Model został skalibrowany i poddany walidacji. Dla przedmiotowego modelu uzyskano wysoką korelację zgodności wielkości ciśnień symulowanych z wartościami pomierzonymi, która wynosi 99,4 %, zaś dla przepływów 99,0 %. Dane do modelu zostały wyeksportowane z baz danych GIS (Geographic Information System) oraz z systemu SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) z okresu jednego miesiąca (październik 2016 r.), natomiast pliki walidacyjne z okresu 17-19 października 2016 r.

Rozbiór wody w systemie zaopatrzenia - październik 2016 roku

Tabela 1

Water consumption in water supply system - October 2016

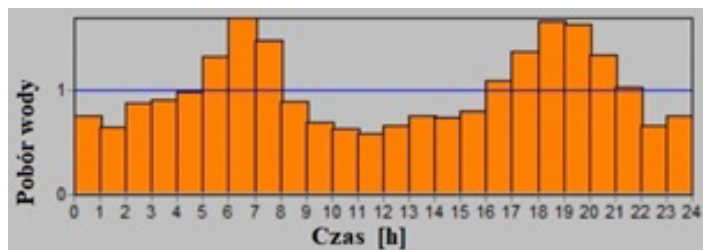
Table 1

Rozbiór wody w systemie		
Minimalny [m^3/d]	Średni [m^3/d]	Maksymalny [m^3/d]
105 068	108 200	111 450

Wiek wody w sieci wodociągowej analizowano dla trzech scenariuszy obliczeniowych uwzględniających prace systemu w zmiennych warunkach zapotrzebowania na wodę, to jest: a) maksymalnego, b) minimalnego oraz c) średniego dziennego zużycia wody (tab. 1). Maksymalny pobór wody jest o 3% większy niż średnie obciążenie sieci, zaś minimalny o 3 % mniejszy. W badaniach przeprowadzono symulacje dla horyzontu czasowego 120 godzin.

Wyniki i ich dyskusja

Analizowany podsystem zaopatruje w wodę obszar miejski, charakteryzujący się zwiększonymi porannymi oraz wieczornymi jej poborami (rys. 4). Taki charakter pracy sieci wymusza zwiększone prędkości przepływu wody tylko w godzinach szczytowego rozbioru. Ze względu na przewymiarowanie systemu prędkości przepływu wody są niewielkie oraz cechują się małą zmiennością dobową w godzinach porannych stanowiącą 3,1 %, a w godzinach wieczornych dochodzącą do 7,7 % (tab. 2).



Rys. 4. Dobowy histogram rozbioru wody dla obszaru mieszkalnego; linia 1 - wartość średnia poboru wody z okresu jednego miesiąca

Fig. 4. Daily water consumption pattern for domestic area; line 1 - average value of water intake from the period of one month

Średnie prędkości przepływu wody dla godzin porannych i nocnych

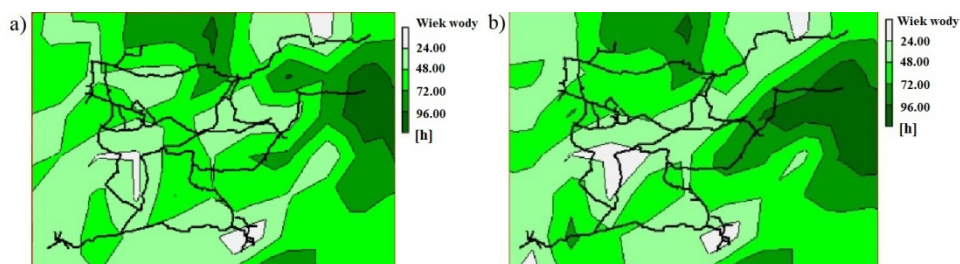
Tabela 2

Average water velocity for morning and night hours

Table 2

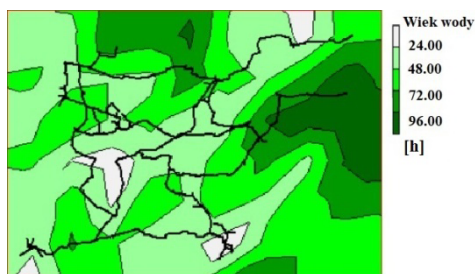
Średnia prędkość przepływu wody [m/s]					
Dla minimalnego rozbioru wody		Dla średniego rozbioru wody		Dla maksymalnego rozbioru wody	
Godziny ranne	Godziny nocne	Godziny ranne	Godziny nocne	Godziny ranne	Godziny nocne
0,155	0,120	0,157	0,122	0,160	0,130

Wyniki przeprowadzonych symulacji w postaci wykresów warstwowych przestrzennego rozkładu wieku wody w systemie zaopatrzenia w wodę przedstawiono dla 3 scenariuszy obliczeniowych na rysunkach 5 i 6. Wykresy te utworzono w programie Epanet 2.0.



Rys. 5. Rozkład przestrzenny wieku wody dla: a) maksymalnego b) minimalnego zużycia wody

Fig. 5. Spatial distribution of water age for: a) the maximum and b) minimum water consumption



Rys. 6. Rozkład przestrzenny wieku wody dla średniego zużycia wody - scenariusz c

Fig. 6. Spatial distribution of water age for the average water consumption - scenario c

Przeprowadzona analiza pozwoliła wyznaczyć procentowy udział zasięgu obszaru zasilania w wodę o określonym jej wieku w odniesieniu do całkowitej powierzchni strefy zaopatrzenia w wodę (tab. 3).

Korzystając z modelu hydraulicznego, obliczono czas przebywania wody w systemie wodociągowym, na podstawie którego określono miejsca stagnacji wody. W strefach o kolorze ciemnozielonym występuje najdłuższy czas przebywania wody w sieci, wynoszący ponad 96 godzin (rys. 5b), w których prędkość przepływu wody spada poniżej 0,155 m/s.

Największy obszar zasilania w wodę stanowią strefy o wieku wody powyżej dwóch dób, z czego ponad 40 % to rejony o wieku wody do trzech dób (tab. 3). Jedynie w przypadku maksymalnego zużycia wody wartość ta jest mniejsza o ok. 6 % w odniesieniu do minimalnego rozbioru wody w systemie. Mniejszym obszarem, stanowiącym średnio 1/5 powierzchni badanej strefy dla wszystkich analizowanych scenariuszy obliczeniowych, są rejony, w których woda przebywa ponad trzy doby. Są to obszary o podwyższonym ryzyku wtórnego skażenia wody. W wymienionych obszarach powinno się zwiększyć częstotliwość wykonywanych badań jakości wody, dzięki którym będzie można dokładnie określić skład wody oraz dynamikę zmian parametrów jakości. W przypadku tych stref mamy do czynienia z końcówkami sieci, dlatego ilość wykonanych czynności związanych z płukaniem powinna być dwukrotnie większa niż w przypadku pozostałych odcinków systemu wodociągowego.

Tabela 3

Procentowy udział powierzchni cząstkowych obszaru zasilania przynależnych do danego wieku wody

Table 3

Percentage share of surface area associated with water age

Wiek wody [h]	Maks.	Min.	Średnia
	Udział procentowy powierzchni [%]		
do 24	3,0	2,0	2,5
24-48	40,0	37,0	37,5
48-72	35,0	41,0	36,0
72-96	15,0	7,0	16,0
powyżej 96	7,0	13,0	8,0

Przeprowadzone analizy wykazały, iż w badanej strefie zaopatrzenia w wodę występuje najmniej obszarów cechujących się brakiem stagnacji wody w sieci wodociągowej. Stanowią one dla przepływów średnich dobowych zaledwie 3 % (rys. 6) i cechują się zmiennością zasięgu obszarowego od 2 % (rys. 5b) do 4 % (rys. 5a). Najdłuższe czasy przebywania wody w sieci otrzymano dla minimalnych wartości rozbioru wody, natomiast dla maksymalnych wartości otrzymano krótsze czasy. Różnice pomiędzy symulacjami są małe ze względu na niewielkie różnice poboru wody w rozpatrywanym okresie.

W badanym systemie zaopatrzenia w wodę obszary o niskim wieku wody znajdują się w strefach o największym skupieniu odbiorców, natomiast pozostałe obszary wyróżniają się niewielkim zagęszczeniem klientów (rys. 5 i 6).

Wnioski

1. Modele matematyczne infrastruktury podziemnej można wykorzystywać do wielu celów. Najbardziej popularne modele dotyczą hydrauliki sieci, jednakże coraz częściej przedsiębiorstwa komunalne zaczynają wykorzystywać tego typu narzędzia do modelowania zmian jakości wody. Na podstawie takich modeli można oprzeć proces podejmowania decyzji dotyczących rutynowych czynności, tj. czyszczenie sieci, harmonogram poboru próbek wody, a także działań mających na celu polepszenie pracy sieci, np. modernizacje.

2. Otrzymany z symulacji rozkład powierzchni cząstkowych wieku wody charakterystyczny jest dla dużych układów wodociągowych, często przewymiarowanych. Małe prędkości przepływu oraz znaczna odległość odbiorców od zakładu uzdatniania wody są głównymi powodami stagnacji wody w systemie wodociągowym.
3. Przeprowadzone symulacje pozwoliły wskazać problematyczne obszary w różnych warunkach pracy sieci (minimalne, średnie oraz maksymalne pobory wody) cechujące się stagnacją wody. Dzięki analizom określono, iż blisko 60 % rozpatrywanego obszaru zajmują strefy o wieku wody powyżej dwóch dób, z czego 1/6 to obszary o wieku wody powyżej czterech dób.
4. Otrzymane wyniki mogą stanowić podstawę dalszych analiz lub do określenia harmonogramu okresowych prac.

Podziękowania

Badania były realizowane między innymi w ramach dotacji celowej dla młodych naukowców Politechniki Śląskiej - BKM-303/RIE-4/2017.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 13 listopada 2015 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz.U. 2015, poz. 1989. <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20150001989>
- [2] Piersceniak M, Trzcńska N, Słomczyński T, Wąsowski J. Problem of secondary contamination of water. *Ochr Środ Zasob Natur.* 2009;39:28-39. <https://docplayer.pl/7229150-Magdalena-piersceniak-natalia-trzcinska-tomasz-slomczynski-jacek-wasowski.html>.
- [3] Domańska M, Łomotowski J. Wpływ osadów wodociągowych na kinetykę zużycia chloru i dwutlenku chloru w wodzie. *Ochr Środ.* 2011;33:43-46. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BPOB-0040-0008>.
- [4] Nescerecka A, Juhna T, Hammes F. Identifying the underlying causes of biological instability in a full-scale drinking water supply system. *Water Res.* 2018;135:11-21.
- [5] Reid RN. *Water Quality and Systems - A Guide for Facility Managers.* 2nd Edition. Fairmont Press Inc.; 2004. ISBN -10: 0824740106.
- [6] Kotowski A. Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów. *Ochr Środ.* 2010;32:27-32. http://www.os.not.pl/docs/czasopismo/2010/Kotowski_1-2010.pdf.
- [7] Asghari FB, Jaafari J, Yousefi M, Mohammadi AA, Dehghanzadeh R. Evaluation of water corrosion, scaling extent and heterotrophic plate count bacteria in asbestos and polyethylene pipes in drinking water distribution system. *Hum Ecol Risk Assess.* 2018;24:1138-1149. DOI: 10.1080/10807039.2017.1407632.
- [8] Qiu W, Li W, He J, Zhao H, Liu X, Yuan Y. Variations regularity of microorganisms and corrosion of cast iron in water distribution system. *J Environ Sci.* 2018;74:177-185. DOI: 10.1016/j.jes.2018.03.004.
- [9] Boryczko K. Water age in the water supply network as health risk factor associated with collective water supply. *Ecol Chem Eng A.* 2016;23:33-43. DOI: 10.2428/ecea.2016.23(1)3.
- [10] Kowal AL. Przyczyny i zapobieganie zmianom jakości wody w systemach wodociągowych. *Ochr Środ.* 2003;25:3-6. http://www.os.not.pl/docs/czasopismo/2003/Kowal_4-2003.pdf.
- [11] <http://stat.gov.pl>.
- [12] Hrudey SE, Hrudey EJ, Pollard SJT. Risk management for assuring safe drinking water. *Environ Int.* 2006;32:948-957. DOI: 10.1016/j.envint.2006.06.004.
- [13] Bereskie T, Delpla I, Rodriguez MJ, Sadiq R. Drinking-water management in Canadian provinces and territories: a review and comparison of management approaches for ensuring safe drinking water. *Water Policy.* 2018;20:565-596. DOI: 10.2166/wp.2018.040.

MODELING OF WATER AGE AS AN ELEMENT SUPPORTING THE MANAGEMENT OF THE WATER SUPPLY SYSTEM

Faculty of Energy and Environmental Engineering, Silesian University of Technology, Gliwice

Abstract: Flushing pipes and cleaning of the water supply network are the basic tasks related to the network operation. They can be made in situations requiring such type of treatments, e.g. the completed repair work or failures, or as long-term plans undertaken for betterment work condition of water distribution network. The decision of pipes flushing should be based on an analysis of the work of the Water Supply System (WSS). Commonly used tools supporting the water supply management is a mathematical model, which can model flows and age of water. Water age analysis allows to locate places where water is stagnant. Water age is an important parameter in determining the suitability of water for consumption, with the long water age, there is higher probability that will caused appear of health-threatening bacteria. This paper presents the results of computer simulation and water age analysis, on the basis of which it was proposed plans for flushing the network. The network model for chosen region of Silesia was made and calibrated in the Epanet program.

Keywords: mathematical model of water supply system, water age, water supply system, secondary water contamination