

Maria ORŁOWSKA-SZOSTAK¹

MODELOWANIE KOMPUTEROWE PRZEPŁYWÓW I JEGO WYKORZYSTANIE DO POPRAWY PRACY PRZYKŁADOWEGO WODOCIĄGU

THE USE OF THE COMPUTER MODELING OF FLOWS FOR THE WORK IMPROVEMENT OF EXEMPLARY WATER SUPPLY SYSTEM

Abstrakt: Zaprezentowano proces powstawania i niestandardowego wykorzystania modelu komputerowego przepływów w grupowym systemie transportu i dystrybucji wody wodociągowej (STDW) zaopatrującym cztery miejscowości gminy Wejherowo. Dane opisujące stan aktualny sieci obejmują m.in. topologię sieci, średnice, materiał oraz wiek przewodów, obiekty współpracujące z układem wodociągowym, występujące rozbiory wody i obecny charakter zapotrzebowania miasta na wodę wodociągową, a także parametry charakteryzujące jakość wody dostarczanej odbiorcom. W procesie gromadzenia tych danych, pozyskiwanych od przedsiębiorstwa wodociągowego, występowały ograniczenia odnośnie do ich asortymentu i dokładności. W tych warunkach starano się maksymalnie wykorzystać posiadane informacje z punktu widzenia niezbędnej wiarygodności powstającego modelu. Podobne podejście zaprezentowano podczas przeprowadzania kalibracji modelu, mając na uwadze, że obie czynności (gromadzenie danych i kalibracja) stanowią czynności komplementarne. Dane pomiarowe dotyczyły produkcji wody na ujęciach oraz ciśnień w wybranych węzłach sieci. W procesie kalibracji modelu wykorzystano zalety symulacji czasowo-przestrzennej, co pozwoliło na optymalne wykorzystanie posiadanych danych pomiarowych. W rezultacie osiągnięty został wysoki stopień korelacji wyników pomiarów w układzie wodociągowym z wartościami zasymulowanymi. Skalibrowany model posłużył do przeprowadzenia kompleksowej analizy pracy systemu. Analiza ta obejmowała m.in. czas przebywania wody w sieci wodociągowej, w poszczególnych jej częściach (tzw. wiek wody), mający istotny bezpośredni wpływ na jakość wody dostarczanej odbiorcom. Zaproponowano również pewne koncepcje modernizacji zmierzające do usprawnienia pracy nieoptymalnie działającego układu wodociągowego miasta. Wspomniane usprawnienie systemu obejmowało przede wszystkim korektę podziału systemu na strefy ciśnienia i sterowanie przepływami w sieci.

Słowa kluczowe: system transportu i dystrybucji wody, model komputerowy przepływów, kalibracja modelu, wiek wody, strefowanie ciśnienia, sterowanie przepływami

Wprowadzenie

Obszar zaopatrywany w wodę przez analizowany system wodociągowy obejmuje cztery miejscowości gminy Wejherowo. Zaopatrzenie w wodę mieszkańców gminy odbywa się z ujęć wód podziemnych zlokalizowanych w Sopieszynie i Pętkowicach. W tych miejscowościach znajdują się też stacje uzdatniania wody [1]. Stacje te zasilają odpowiednio dwie niezależnie pracujące części sieci wodociągowej (głównie typu końcówkowego z nielicznymi pierścieniami), stanowiące dwie strefy ciśnienia odcięte od siebie zasuwą strefową. Konieczność strefowania ciśnienia w sieci wynika z bardzo dużej różnicy rzędnych terenu, który wznosi się w kierunku południowym i różnica ta przekracza 45 m.

Jako podstawę budowy modelu komputerowego wykorzystano standardowe oprogramowanie na bazie EPANET-u [2, 3], jak również starannie zgromadzone dane

¹ Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel. 58 347 21 19, tel. kom. 692 534 462, email: maria.o@pg.gda.pl

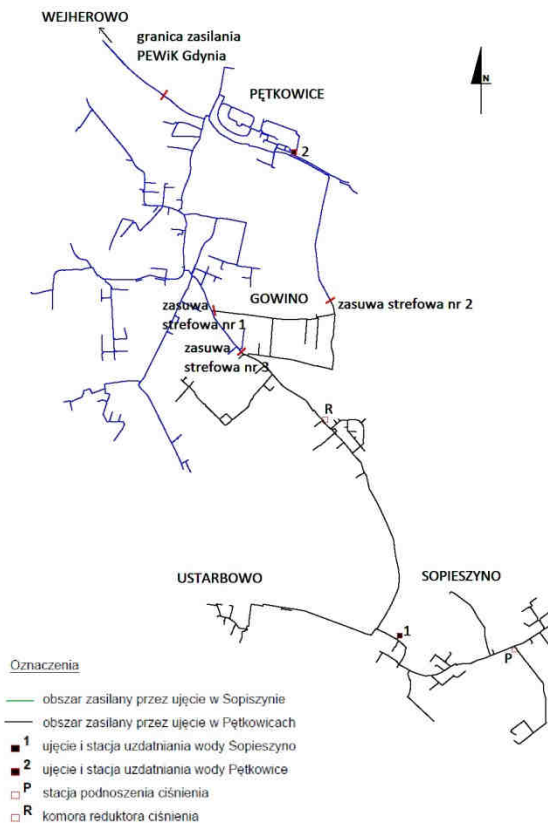
Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'16, Zakopane 5-8.10.2016

opisujące rozbiory wody oraz topologię i uzbrojenie sieci wodociągowej, a także wszelkie niezbędne parametry ją charakteryzujące [4].

Opracowany model komputerowy przepływów zachodzących w systemie umożliwił sprawdzenie funkcjonowania istniejącego wodociągu oraz zoptymalizowanie parametrów jego pracy [5]. W szczególności analizowano występujące ciśnienia [6, 7], prędkości przepływu, pracę w warunkach awaryjnych i ekstremalnych, wiek wody (tj. czas przebywania wody w sieci istotny ze względu na kształtowanie się jakości wody dostarczanej odbiorcom) i wreszcie pewne koncepcje przebudowy oraz modernizacji analizowanego systemu transportu i dystrybucji wody.

Analizowany system transportu i dystrybucji wody wodociągowej (STDW)

Grupowy system transportu i dystrybucji wody wodociągowej (STDW) zaopatruje cztery miejscowości gminy Wejherowo: Sopieszyno, Ustarbowo, Gowino i Pętkowice. Ujęcia pobierają wodę z utworów czwartorzędowych i zlokalizowane są w Sopieszynie i Pętkowicach (rys. 1).



Rys. 1. Schemat poglądowy sieci [4]

Fig. 1. Demonstrative scheme of the network [4]

Określone na podstawie pomiarów wodomierzy stacyjnych średnie zapotrzebowanie na wodę z ujęcia w Sopieszynie wynosi $Q_{sr} = 136 \text{ m}^3/\text{dobę}$, zaś średnie zapotrzebowanie na wodę z ujęcia w Pętkowicach wynosi $Q_{sr} = 210 \text{ m}^3/\text{dobę}$ (tab. 1).

Wody ujmowane w Sopieszynie charakteryzują się stosunkowo dużą mętnością i barwą, co może być związane z wysoką zawartością jonów żelaza i manganu. Wody z ujęcia w Pętkowicach wykazują lepszą jakość, ponieważ zawierają mniej związków żelaza i manganu oraz nie są tak mętne jak wody ujmowane w Sopieszynie. Zgodnie z wynikami badań [8], woda ujmowana w Sopieszynie charakteryzuje się stosunkowo stabilnym składem fizykochemicznym i przekroczoną dopuszczalną ilością związków żelaza i manganu. Również w wodzie ujmowanej w Pętkowicach [9] stwierdzono nieprawidłowe ilości ww. związków. Badane wody pod względem bakteriologicznym są bez zastrzeżeń.

Tabela 1

Zapotrzebowanie na wodę z ujęć Sopieszyno i Pętkowice

Table 1

Demand for water from Sopieszyno and Pętkowice water intakes

Lp.	Przepływ	Jednostka	Wartość dla Sopieszyna	Wartość dla Pętkowic
1	Q_{sr}	$[\text{m}^3/\text{d}]$	136,0	210,0
2	Q_{maxd}	$[\text{m}^3/\text{d}]$	176,0	273,0
3	Q_{maxh}	$[\text{m}^3/\text{h}]$	16,1	22,8

Na obydwu ujęciach woda surowa dostarczana jest do stacji uzdatniania wody za pomocą dwóch naprzemiennie pracujących pomp głębinowych. W pierwszej kolejności woda przepływa do aeratora, w którym następuje kontakt związków zawartych w wodzie - głównie żelaza i manganu - z tlenem. W wyniku tego następuje reakcja chemiczna utleniania tych związków, co prowadzi do wytrącenia się ich w postaci aglomeratów. Kolejno woda przepływa na dwa równoległe pracujące filtry ciśnieniowe. Na filtrach zatrzymywane są zanieczyszczenia stałe, czyli wcześniej wytrącone związki żelaza i manganu, ale również inne zanieczyszczenia znajdujące się w wodzie, np. piaski. Ostatnim elementem są hydrofory pracujące w tradycyjnym schemacie przy określonych ciśnieniach włączania i wyłączania pomp głębinowych. Aktualnie wartości bezwzględne tych ciśnień wynoszą odpowiednio 30 i 45 m sł. wody (co odpowiada wartości $3,9 \cdot 10^5$ i $4,4 \cdot 10^5$ Pa). Ujęcia mają obejścia pożarowe umożliwiające, w razie uruchomienia hydrantów pożarowych, tłoczenie wody z ominięciem urządzeń uzdatniających, co zwiększa wydajność tych ujęć.

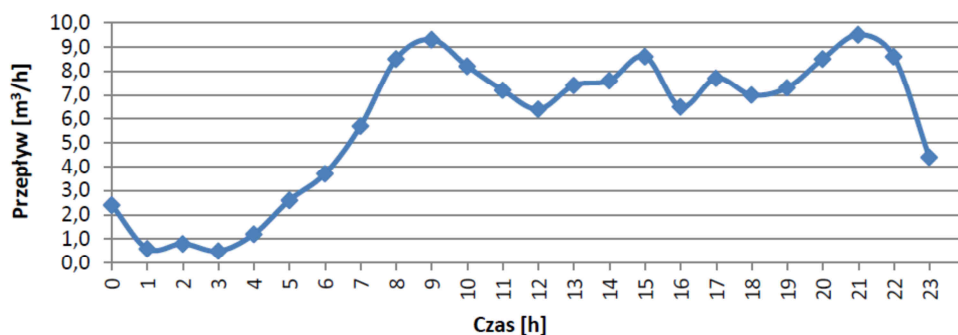
Proces powstawania modelu komputerowego

Dane do modelu

Dane opisujące stan aktualny sieci obejmują m.in. topologię sieci, średnice, materiał oraz wiek przewodów (mający wpływ na ich szorstkość, tj. opór hydrauliczny przy przepływie), schematy technologiczne i sposób regulacji pracy obiektów i armatury sieciowej współpracujących z układem wodociągowym, występujące rozbiory wody [10] i obecny charakter zapotrzebowania miasta na wodę wodociągową, a także parametry charakteryzujące jakość wody dostarczanej odbiorcom. W procesie gromadzenia tych

danych, pozyskiwanych od przedsiębiorstwa wodociągowego, występowały ograniczenia odnośnie do ich asortymentu i dokładności. W tych warunkach starano się maksymalnie wykorzystać posiadane informacje z punktu widzenia niezbędnej wiarygodności powstającego modelu.

Struktura sieci, w tym materiały, z jakich wykonane są przewody, jest charakterystyczna dla typowych sieci miejskich w Polsce budowanych w latach 90. [11]. Znaczna część sieci wykonana została z PVC. Przewody te posiadają sporo zalet, w tym małą chropowatość. Pozostałe przewody, których wiek nie przekracza 10 lat, zostały wykonane z PE.



Rys. 2. Charakterystyka rozbiórów wody dla typowego dnia (26.07.2016) na ujęciu Pętkowice

Fig. 2. Characteristics of the water consumptions for the typical day (July 26, 2016) at Petkowice water intake

Na ujęciach w Sopieszynie i w Pętkowicach przeprowadzono liczne serie pomiarów wydatku i ciśnienia. Rejestrację prowadzono z częstotliwością co 15 minut [4]. Następnie jako miarodajną dobę wybrano wtorek 26.07.2016 r. (rys. 2). Bazując na danych dla wybranej doby, do analizy wykonano wzorce nierównomierności rozbioru wody. Ze względu na brak możliwości uzyskania dokładnych danych odnośnie do rozbiórów w poszczególnych węzłach określono je na podstawie średniego zużycia wody dla poszczególnych gospodarstw, które uzyskano na podstawie kilkuletnich kwartalnych odczytów z wodomierzy. Dzięki tym danym określono wagowy rozkład przepływów w sieci wodociągowej.

Informacja nt. przeprowadzonej kalibracji modelu

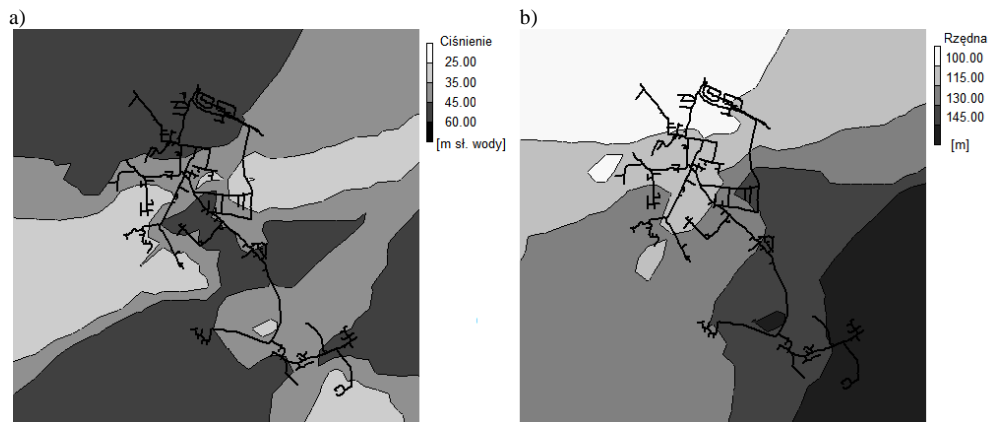
Dążenie do maksymalnego wykorzystania posiadanych informacji z punktu widzenia optymalizacji efektów prowadzonej kalibracji zaprezentowano również podczas przeprowadzania kalibracji modelu [12]. Dane pomiarowe, w oparciu o które przeprowadzono kalibrację modelu, dotyczyły produkcji wody na ujęciach oraz ciśnień w wybranych węzłach sieci. Stopień zgodności wartości ciśnień pomierzonych w terenie z zasymulowanymi wynosił 99%, zaś maksymalna różnica między wartością zmierzoną i zasymulowaną nie przekraczała 0,36 m.

Przeprowadzone analizy

Skalibrowany model posłużył do przeprowadzenia kompleksowej analizy pracy systemu. Analiza ta obejmowała m.in. czas przebywania wody w poszczególnych częściach sieci wodociągowej, co ma istotny bezpośredni wpływ na jakość wody dostarczanej odbiorcom. Zaproponowano również pewne koncepcje modernizacji zmierzające do usprawnienia pracy nieoptymalnie działającego układu wodociągowego. Obejmowały one przede wszystkim korektę podziału systemu na strefy ciśnienia i sterowanie przepływami w sieci za pomocą hydroforni i reduktorów ciśnienia, a także analizę możliwości zasilania wodociągu z ujęcia w Sopieszynie.

Symulacje pracy podstawowej wodociągu

Występujące w sieci wodociągowej prędkości przepływu wahają się w granicach od 0.01 do 0.25 m/s, a zatem są niższe niż standardowo wymagane w projektowaniu [13]. Ciśnienia aktualnie występujące pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. a) Mapa ciśnień bezwzględnych w sieci wodociągowej - sytuacja podstawowa (pracują obydwa ujęcia)
b) Kształt sieci wodociągowej na tle zróżnicowanego wysokościowego terenu

Fig. 3. a) Map of pressures in the water supply network - basic situation (both water intakes are working)
b) Shape of the water supply network on the background of the altitude-diverse terrain

Ukształtowanie terenu jest bardzo zróżnicowane, co ma istotny wpływ na ciśnienia w sieci (rys. 3b). Drugim czynnikiem wpływającym na ciśnienia jest aktualny podział wodociągu na strefy. Generalnie ciśnienia występujące w wodociągu mieszczą się w dopuszczalnych granicach, które określono w zakresie 23-60 m s.f. wody (rys. 3a) [13, 14].

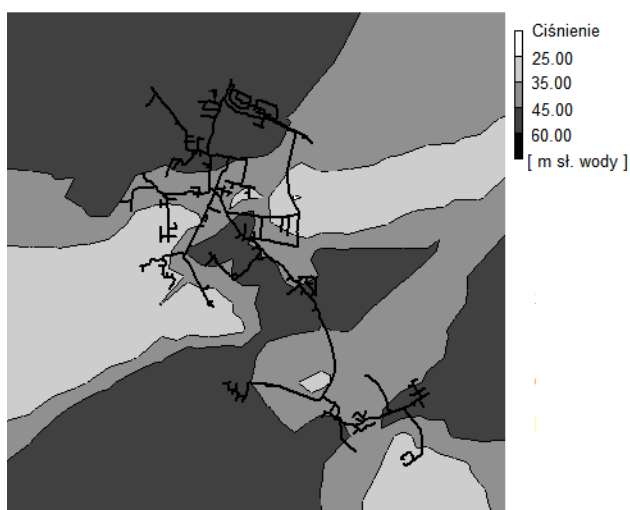
Możliwości zasilania wodociągu wyłącznie z ujęcia w Sopieszynie

Przeprowadzono analizę możliwości zasilania całego systemu wyłącznie z ujęcia w Sopieszynie. Taka sytuacja może wystąpić w przypadku awarii ujęcia w Pętkowicach.

Ponadto rozwiązanie to było traktowane jako wariant modernizacji systemu, gdyż ujęcie w Sopieszynie ma wystarczającą wydajność, aby zaopatrzyć w wodę cały system.

Posunięcia techniczne nie są tutaj duże, gdyż wystarczyło nieznacznie przesunąć zakres stref ciśnienia (pozostaje podział wodociągu na dwie strefy oraz zastosowanie dwóch odpowiednio wyregulowanych reduktorów ciśnienia na granicy stref). Wariant ten pracuje dobrze i ciśnienia mieszczą się w wymaganych granicach (rys. 4).

Wariant odwrotny, polegający na zasilaniu systemu wyłącznie w Pętkowicach, okazał się praktycznie niemożliwy do zrealizowania zarówno ze względów technicznych, jak i ekonomicznych. Duże różnice rzędnych terenu wymagałyby zastosowania co najmniej trzech pompowni strefowych w kaskadzie dzielącej wodociąg na cztery podstawowe strefy ciśnienia.



Rys. 4. Mapa ciśnień bezwzględnych w sieci wodociągowej - sytuacja zasilania wodociągu wyłącznie z ujęcia w Sopieszynie

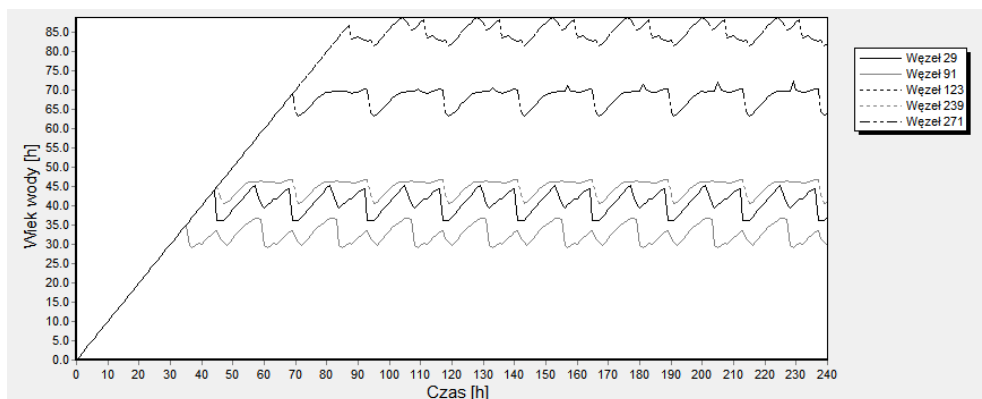
Fig. 4. Map of pressures in the water supply network - situation of supplying the system exclusively from Sopieszyno water intake

Analiza wieku wody

W celu określenia czasu zatrzymania wody w sieci prowadzono symulacje pracy sieci w czasie 240 h, czyli 10 dni. Najwyższe wartości czasu zatrzymania wody w przewodach występują we wschodniej i zachodniej części systemu. Czas zatrzymania wynosi tam w kilku przewodach powyżej 50 godzin, a nawet na jednym odcinku powyżej 80 godzin, natomiast wartości najniższe występują w sąsiedztwie ujęć i nie przekraczają 37 godzin. Średni czas zatrzymania wody w sieci wynosi ok. 39 godzin.

Prezentując wiek wody na wykresie (rys. 5), wybrano przykładowe węzły położone w różnej odległości od ujęcia. Maksymalny czas zatrzymania w analizowanym układzie wynosił 86 h na końcówkach sieci wodociągowej. Woda po dopłynięciu do danego węzła osiąga pewien czas przebywania w sieci, równy czasowi, jaki potrzebuje na dopłynięcie

z pompowni na ujęciu. W tym momencie mamy początek wykresu czasu przebywania w sieci wody przepływającej przez dany węzeł. Wykres ten ulega wahaniom wynikającym m.in. ze zmieniających się rozbiorów, a zatem i z oscylujących nieregularnie prędkości przepływu w sieci. Wahania te są jednak niewielkie. Powodem wydłużonego czasu zatrzymania wody dopływającej do końcówek sieci jest nie tylko dłuższa droga dopływu z pompowni na ujęciu, lecz także mała liczba odbiorców zlokalizowanych na tychże końcówkach oraz znikomy rozbiór wody, a zatem bardzo małe prędkości przepływu. Generalnie jednak, czas zatrzymania wody w sieci osiąga wartości akceptowalne i nie stanowi realnego zagrożenia dla skażenia wody lub znacznego pogorszenia jej stanu [15].



Rys. 5. Wykres wieku wody w wybranych węzłach

Fig. 5. Graph of the water age in chosen nodes

Podsumowanie i wnioski

Skalibrowany model stanowi nieocenione narzędzie służące do poprawnej symulacji pracy wodociągu w różnych aspektach, a zatem do prowadzenia wszelkich analiz pracy wodociągu oraz opracowywania koncepcji jego ewentualnej przebudowy i modernizacji.

Przeprowadzone przez autorkę symulacje pracy przedmiotowego wodociągu i analizy uzyskanych wyników doprowadziły m.in. do konkretnych wniosków odnośnie do pracy wodociągu w warunkach normalnych, w warunkach zasilania tylko z jednego spośród ujęć, a także zatrzymania wody w sieci wodociągowej. Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych opisano w poprzednim rozdziale, w którym zawarto również ważniejsze spośród wniosków. I tak, odnośnie do aktualnej pracy wodociągu, generalnie można powiedzieć, że pracuje on w sposób charakterystyczny dla wodociągów przewymiarowanych, a zatem takich, jakie przeważają w obecnej sytuacji w większości miast w Polsce. Prędkości przepływu są generalnie za małe (0,01 do 0,25 m/s), natomiast ciśnienia w sieci, które łatwiej jest wyregulować, oscylują w dopuszczalnych granicach. Przeanalizowane, na drodze symulacji komputerowych, warianty zasilania sieci z jednego spośród ujęć (Sopieszyno, Pętkowice), np. w sytuacji awaryjnej (lecz niekoniecznie), wykazały, iż jedynie zasilanie całego systemu z pierwszego z nich ma sens i jest

praktycznie wykonalne ze względów technicznych, co jest związane z ukształtowaniem terenu zdecydowanie opadającego w kierunku drugiego spośród ujęć. Wreszcie opisana analiza wieku wody rozprowadzanej przedmiotową siecią wykazała, że generalnie jest on do zaakceptowania z wyjątkiem rejonów wschodnich i zachodnich, gdzie na mało używanych końcówkach sieci czas zatrzymania wody wydłuża się powyżej 80 godzin.

Literatura

- [1] Strategia rozwoju społeczno-gospodarczego Gminy Wejherowo na lata 2014-2021. <http://ugwejherowo.pl/wp-content/uploads/2017/09/strategia.pdf>.
- [2] Epanet 2.0 United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- [3] Jinesh Babu K, Mohan, S. Extended period simulation for pressure-deficient water distribution network. *J Comput Civil Eng.* 2012;26 (4): 498-505. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000160.
- [4] Mapy geodezyjne terenu, z wyszczególnioną infrastrukturą wodociągową, pozyskane z Wydziału Geodezji Urzędu Miasta oraz Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Wejherowie, szczegółowe dane dotyczące sieci, otrzymane z Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Wejherowie, dane dotyczące rozbiórów wody w wybranych dobach, otrzymane z Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Wejherowie. (The materials used and the source documentation 2016: geodesic map of the area with the specified water supply infrastructure acquired from the Municipal Department of Geodesy; details of the water supply network, data on water consumption in selected time periods and pressure measurements data acquired from the water company.)
- [5] Soltanjalili M, Bozorg Haddad O, Seifollahi Aghmiuni S, Mariño MA. Water distribution network simulation by optimization approaches. *Water Sci Technol: Water Supply.* 2013;13(4): 1063-1079. DOI: 10.2166/ws.2013.086.
- [6] Gupta R, Nair A, Ormsbee L. *J Water Resour Planning Manage.* 2016;142(6). DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000629.
- [7] Lee HM, Yoo DG, Kang D, Jun H, Kim JH. *Water Sci Technol: Water Supply.* 2016;16(3):599-610. DOI: 10.2166/ws.2015.168.
- [8] Operat wodnoprawny na pobór wód podziemnych z utworów czwartorzędowych w Sopieszynie sporządzony w grudniu 2009 r.
- [9] Operat wodnoprawny na pobór wody podziemnej z utworów czwartorzędowych z ujęcia w Pętkowicach na potrzeby wodociągu miejskiego sporządzony w lipcu 2015 r.
- [10] De Marchis M, Fontanazza CM, Freni G, La Loggia G, Notaro V, Puleo V. *Water Sci Technol: Water Supply.* 2013;13(4):914-923. DOI: 10.2166/ws.2013.076.
- [11] Kwietniewski M, Hoczek M, Wysocki L. Zasady doboru rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych do budowy przewodów wodociągowych. (Rules for selection of materials and design solutions for the construction of water pipes). Bydgoszcz: Izba Gospodarcza Wodociągi Polskie; 2011. ISBN: 9878390651.
- [12] Takahashi S, Saldarriaga J G, Vega M C, Hernández F. *Water Sci Technol: Water Supply.* 2010;10(1):31-38. DOI: 10.2166/ws.2010.906.
- [13] Grabarczyk C. Przepływ cieczy w przewodach: metody obliczeniowe (Liquid flow in pipes: calculation methods). Poznań: Envirotech; 1997. ISBN: 8390170140.
- [14] Knapik K, Bajer J. Wodociągi (Water supply systems). Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej; 2011. ISBN: 9788372425201.
- [15] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 13 listopada 2015 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U., poz. 1989, załącznik nr 3). <https://www.dziennikustaw.gov.pl/du/2015/1989>.

THE USE OF THE COMPUTER MODELING OF FLOWS FOR THE WORK IMPROVEMENT OF EXEMPLARY WATER SUPPLY SYSTEM

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology, Gdańsk

Abstract: In the paper a process of coming into existence and a nonstandard use of the computer model of water transport and distribution system (STDW) for middle size (of about 50,000 inhabitants) city located in Pomorskie region was presented. Collecting the data describing current state of the system the authors concentrated their attention on the network of pipes (the network topology, diameters, material and the age of pipes), objects cooperating with the waterworks system, network fittings, appearing consumptions of water and current character of the water demand in the city and also some parameters being characteristic of a quality of water delivered to the consumers. All these data constituting the base for creating the model STDW were collected in the essential scope and with the essential accuracy. There appeared here some restrictions in the form of the assortment and accuracies of the data which the water authority had at their disposal. In these conditions the authors were trying to exploit to the maximum the gathered data from a point of view of the essential credibility of the model coming into existence. The similar approach was presented while making the calibration of the model bearing in mind that both activities (the completing of the data and the calibration) constitute activities of complementary character. The measuring data concerned water production at the water intakes and pressures occurring in chosen nodes of the water supply network. In the process of the calibration of the model advantages of the extended period simulation were exploited what allowed for the optimal use of the measuring data being for the author disposal. As a result a satisfactory correlation of results of measurements and simulated values has been achieved. The calibrated model was used for conducting the comprehensive work analysis of the system. This analysis included the residence time of water in the water supply network (so-called "age of water") having essential direct impact on the quality of water delivered to consumers. Also some concepts of modernization of the system were offered. They are aiming at streamlining the work of the non-optimal waterworks in the city. The mentioned streamlining the system included correction of the division of the system into zones of pressure and the control of flows.

Keywords: water transport and distribution system, computer model of flows, model calibration, retention time of water in the network, zoning of pressure, flow control