

Andrzej Kotowski, Andrzej Pawlak, Patryk Wójtowicz

Modelowanie miejskiego systemu zaopatrzenia w wodę na przykładzie osiedla mieszkaniowego Baranówka w Rzeszowie

Model hydrauliczny systemu zaopatrzenia w wodę jest jednym z podstawowych narzędzi badawczych, wykorzystywanych do analizy właściwości i działania systemu wodociągowego miasta. Jakość badań i wyników symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu hydraulicznego systemu jest ściśle związana z precyzją odwzorowania wszystkich rodzajów obiektów systemu zaopatrzenia w wodę, ich parametrów hydraulicznych oraz warunków zasilania i poboru wody. O jakości modelu hydraulicznego sieci wodociągowej decydują następujące elementy [1–5]:

- odwzorowanie struktury systemu zaopatrzenia w wodę,
- identyfikacja elementów systemu zaopatrzenia w wodę,
- modele poboru wody i parametry zasilania sieci wodociągowej.

System wodociągowy Rzeszowa zasilany jest z ujęć wody powierzchniowej. Układ strefowy wodociągu tworzy kilka zbiorników wyrównawczych i kilkadziesiąt hydroforni (przepompowni). Z wodociągu korzysta ok. 180 tys. mieszkańców miasta i pobliskich miejscowości. Sieć wodociągowa ma łączną długość ok. 810 km. Zbudowana jest głównie z przewodów stalowych i żeliwnych, ale także z PVC, PE i AC. Głównymi przyczynami awarii sieci wodociągowej są uszkodzenia uszczelnień (47%) i korozja ścianek rurociągów (46%), a ponadto wady montażowe (4%), uszkodzenia mechaniczne (2%) i wady materiałowe (1%) [6,7]. W ostatnich latach w Rzeszowie wymieniono ponad 20 km najbardziej awaryjnych odcinków sieci wodociągowej, co spowodowało zmniejszenie liczby awarii o 25%. Prowadzone są również systematyczne prace remontowe w przepompowniach i hydroforniach. Montowane są m.in. przemienniki częstotliwości, co ograniczyło zużycie energii elektrycznej i zapewniło większą stabilność ciśnienia wody w sieci. Obecnie planowane jest wprowadzenie monitoringu w całym systemie wodociągowym miasta [8].

Celem badań była analiza działania systemu wodociągowego Rzeszowa na wybranych osiedlach mieszkaniowych. Zakres pracy obejmował badania korozyjności wody wodociągowej, pomiary terenowe oporności hydraulicznej i ciśnienia, a także wykonanie kalibracji modeli hydraulicznych na potrzeby modelowania całego systemu zaopatrzenia Rzeszowa w wodę. Niniejsza praca zawiera wyniki modelowania wodociągu na osiedlu Baranówka [9].

Odwzorowanie struktury systemu zaopatrzenia w wodę

Proces budowy modelu hydraulicznego sieci wodociągowej polega na postępowaniu iteracyjnym, na który składa się sekwencja takich działań, jak identyfikacja elementów rzeczywistego systemu i ich parametrów, rejestracja i gromadzenie danych, weryfikacja danych oraz kalibracja (doprecyzowanie) struktury i parametrów modelu. Z uwagi na przenikanie się tych działań oraz zmienność w czasie zarówno struktury, jak i parametrów modelowanego systemu rzeczywistego, budowa modelu hydraulicznego systemu wodociągowego jest procesem ciągłym. W przypadku systemu zaopatrzenia w wodę Rzeszowa proces ten został już zainicjowany poprzez zbudowanie [10]:

- systemu informacji GIS, w wyniku czego powstało repozytorium danych o infrastrukturze technicznej sieci wodociągowej Rzeszowa; podstawowymi elementami tego systemu są cyfrowe podkłady geodezyjne obszaru miasta (pokazujące lokalizacje tras przewodów wodociągowych, zasuw, pompowni, hydroforni, zbiorników sieciowych i odbiorców wody) oraz bazy danych (zawierające informacje o strukturze i parametrach wszystkich elementów sieci wodociągowej),

- monitoringu systemu zaopatrzenia w wodę, pozwalającego na odczytywanie, gromadzenie i prezentowanie informacji o poborze wody, wysokości ciśnień oraz stanie urządzeń aktywnych, którymi są pompownie, hydrofornie i zbiorniki eksploatowane w systemie wodociągowym,

- opracowanie autorskiego programu OHIO do symulacji i optymalizacji dynamicznej pracy systemu wodociągowego [11].

W wyniku tych działań powstały zbiory danych oraz narzędzia umożliwiające automatyczny transfer (z poziomu systemu GIS) danych niezbędnych do konstrukcji wstępnych modeli hydraulicznych całego miasta lub jego wybranych obszarów w formatach OHIO, MOSUW i EpaNet. Do realizacji zadania, polegającego na zainicjowaniu procesu weryfikacji modelu hydraulicznego osiedla Baranówka, wybrany został program EpaNet (v. 2.00.08) [9, 12].

Skonstruowany model sieci wodociągowej osiedla Baranówka składał się z hydroforni, 197 odcinków przewodów, 108 zaworów oraz 298 węzłów tworzących sieć obwodowo-rozgałęźną, zawierającą w swojej strukturze 10 obwodów. Całkowita długość przewodów uwzględnionych w modelu sieci wynosiła 10457 m. Pierwsza weryfikacja i korekta danych wyjściowych wykorzystanych do budowy modelu sieci osiedla Baranówka została przeprowadzona podczas przygotowania i przeprowadzania badań

Dr hab. inż. A. Kotowski, dr inż. A. Pawlak, dr inż. P. Wójtowicz: Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Usuwania Ścieków, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław
andrzej.kotowski@pwr.wroc.pl, andrzej.pawlak@pwr.wroc.pl
patryk.wojtowicz@pwr.wroc.pl

terenowych. Zweryfikowano, a następnie skorygowano informacje i parametry dotyczące materiałów przewodów, średnic wewnętrznych i współczynników chropowatości rurociągów tranzytowych i w miejscach prowadzenia pomiarów.

Ze skorygowanych informacji wynikało, że długość sieci wykonanej ze stali lub żeliwa stanowiła 30,1% długości przewodów uwzględnionych w modelu, a przewodów wykonanych z PVC i PE było 69,9%. Zmiana informacji o rodzaju materiału, z którego wykonane zostały przewody sieci dotyczyła 31 odcinków o średnicach wpływających na przepływność sieci, co stanowiło 15,7% wszystkich odcinków przewodów uwzględnionych w modelu.

Zaktualizowanie informacji o rodzaju materiałów przewodów oraz uwzględnienie czasu eksploatacji głównych odcinków sieci pozwoliło na wstępną weryfikację i korektę współczynników chropowatości przewodów wodociagowych, jeszcze przed wykonaniem badań terenowych i kalibracją oporności sieci. Na podstawie tych informacji zmienione zostały średnice obliczeniowe na 38 odcinkach sieci i współczynniki chropowatości na 45 odcinkach sieci. Ustalając wyjściowe wartości współczynnika chropowatości posłużono się zaleceniami literaturowymi i wynikami badań własnych. Przykładowo, dystrybucja rozkładu chropowatości odcinków przewodów wykazała, że 40% odcinków sieci miało chropowatość nie większą niż 0,05 mm, lecz aż 87% odcinków nie większą niż 0,4 mm. W pozostałych 13% odcinków sieci odpowiednio 6% odcinków miało chropowatość 1,0 mm, 3% – 2,6 mm i 4% – 6,2 mm [9].

Identyfikacja parametrów systemu zaopatrzenia w wodę

Źródłem zaopatrzenia Rzeszowa w wodę są dwa ujęcia na Wisłoku z dwoma stacjami oczyszczania wody. Wisłok charakteryzuje się dużą zmiennością jakości wody, która w dużej mierze zależy od warunków atmosferycznych (pory roku). Na przestrzeni kilkudziesięciu lat proces technologiczny oczyszczania wody był wielokrotnie zmieniany. Do 2000 r. jakość wody kierowanej do miejskiej sieci wodociagowej pozostawiała wiele do życzenia (głównie zapach). Proces technologiczny oczyszczania wody obejmuje obecnie ozonowanie wstępne, koagulację, sedymentację, filtrację i dezynfekcję chlorem gazowym.

W miarę upływu czasu eksploatacji, rurociągi żeliwne i stalowe, w tym pokryte powłokami bitumicznymi, ulegają inkrustacji związkami chemicznymi wytrącającymi się z wody lub będącymi produktami korozji materiału rur. Prowadzi to bezpośrednio do wzrostu chropowatości ścian rurociągów i spadku ich przepływności hydraulicznej. Problem ten od strony ilościowej opisano w pracy [13]. Do oceny korozyjnego charakteru wody wykorzystuje się najczęściej wskaźniki Langeliera (IL) i Ryznara (IR), uwzględniające pH badanej wody i jej pH w stanie równowagi ze stałym węglanem wapnia (pH_s) w funkcji zasadowości. Na podstawie zebranych danych o jakości wody wodociagowej w latach 2004–2008 wyznaczono wartości wskaźników jej korozyjności (tab. 1). Dane te wskazują, że obecnie woda w sieci wodociagowej w Rzeszowie, charakteryzowana przez zmiany wartości wskaźnika Langeliera w przedziale od $-0,3$ do $0,4$, kwalifikuje się do niekorozyjnych (stabilnych), jednak wartości wskaźnika Ryznara w zakresie od $6,9$ do $7,9$ kwalifikują już wodę do korozyjnych ($\text{IR} > 6,8$) [14].

Tabela 1. Wartości wskaźników IL i IR wody wodociagowej w Rzeszowie (2004–2008) [9]

Table 1. Values of the Langelier and Ryznar indices of municipal water in Rzeszow (2004–2008) [9]

Rok	Kwartał	pH	Zasadowość ogólna $\text{gCaCO}_3/\text{m}^3$	IL	IR
2004	III	7,54	217,0	0,11	7,32
	IV	7,66	227,0	0,27	7,12
2005	I	7,64	217,5	0,21	7,22
	II	7,40	187,0	-0,16	7,72
	III	7,45	212,0	0,00	7,45
	IV	7,74	244,5	0,41	6,92
2006	I	7,70	227,0	0,31	7,08
	II	7,32	183,0	-0,26	7,84
	IV	7,68	229,5	0,30	7,08
2007	I	7,53	177,5	-0,07	7,67
	II	7,46	214,0	0,02	7,42
	III	7,28	184,0	-0,29	7,86
	IV	7,76	227,0	0,37	7,02
2008	I	7,72	220,0	0,30	7,12
	II	7,30	205,0	-0,18	7,66
	III	7,25	200,0	-0,25	7,75

Chropowatość stalowych i żeliwnych rurociągów wodnych rośnie z reguły proporcjonalnie do czasu ich eksploatacji, zgodnie z zależnością [13,15]:

$$k_t = k_0 + \alpha t \quad (1)$$

w której:

k_t – chropowatość rurociągu po t latach eksploatacji, mm
 k_0 – chropowatość początkowa nowego rurociągu, mm
 α – roczny przyrost chropowatości (odniesiony do średnicy nowego rurociągu), mm/a

Wyniki badań korozyjności wody z lat 2004–2008 nie są reprezentatywne w przypadku kilkudziesięcioletniego czasu eksploatacji rurociągów wodociagowych rzeszowskiego. Jedynie przyrost chropowatości rurociągów stalowych i żeliwnych wybudowanych po 2000 r. (po pełnej modernizacji stacji oczyszczania wody) można przyjąć z literatury jak w przypadku wód I grupy Kamersztejna, tj. słabo zmineralizowanych i niekorozyjnych – $\alpha \in <0,005; 0,055>$ mm/a [15]. W przypadku starszych rurociągów niezbędne były pomiary terenowe ich oporności hydraulicznej. Na podstawie przeprowadzonych badań bitumowanych rurociągów żeliwnych na osiedlu Baranówka [9] wartość parametru α ustalono w wysokości $0,23$ mm/a, co wywołuje spadek przepływności rurociągów właściwy w przypadku wód III grupy wg Kamersztejna (bardzo korozyjnych) – $\alpha \in <0,18; 0,4>$ mm/a. Wyznaczony parametr α odpowiadał bitumowanym rurociagom stalowym i żeliwnym o średnicach $150 \div 300$ mm. Przy większych średnicach roczny przyrost chropowatości będzie mniejszy – $\alpha \approx 0,2$ mm/a. Chropowatość początkową rurociągów stalowych i żeliwnych przyjęto odpowiednio $k_0 = 0,4$ mm i $k_0 = 0,6$ mm [15]. Rurociągi z tworzyw sztucznych są znacznie bardziej odporne na zmiany przepływności w czasie eksploatacji. Chropowatość (k_t) rurociągów wykonanych z PVC-U oraz PE (z lat 80. XX w.) ustalono na podstawie danych literaturowych, potwierdzonych w części wynikami badań własnych [16,17].

Modele zużycia wody i parametry zasilania sieci wodociągowej

Jednymi z najistotniejszych elementów modelu hydraulicznego sieci wodociągowej, od których zależy jakość wyników obliczeń hydraulicznych sieci, są wartości poboru wody i ich rozkład w czasie oraz warunki zasilania sieci wodociągowej. Do precyzyjnego modelowania poboru wody wskazane jest dysponowanie odczytami z liczników na każdym przyłączy wodociągowym oraz pomiarami wydajności hydroforni w roku rozliczeniowym. Wobec braku precyzyjnych danych o poborze wody przez każdego odbiorcę, w celu określenia przybliżonego rozkładu poboru wody w sieci osiedla Baranówka na podstawie zarejestrowanych godzinowych wydajności hydroforni zasilającej osiedle przyjęto założenie, że rozkład poboru wody jest proporcjonalny do długości przewodów sieci wodociągowej osiedla i przedstawiono w postaci poborów odcinkowych. Z uwagi na to, że w programie EpaNet pobór wody jest przypisywany do węzłów sieci, należało dokonać transformacji poborów odcinkowych na pobory węzłowe, dzieląc każdy pobór odcinkowy na połowę i przypisując go do węzłów ograniczających odcinek. W konsekwencji każdemu węzłowi sieci można przypisać wagę określającą jego udział w całkowitym poborze wody w osiedlu, którą będzie suma połowy długości odcinków sieci incydenentnych z danym węzłem. Całkowita długość przewodów sieci osiedla, do których przypisano pobory odcinkowe wynosiła 10325 m. W celu wyznaczenia wartości poboru węzłowego przy pomocy tak obliczonych wag, przemnożono je przez zarejestrowane w czasie badań terenowych średnie wartości wydajności hydroforni zasilającej osiedle.

Po zaimportowaniu wartości poboru wody (obliczonych na podstawie wydajności hydroforni zarejestrowanej

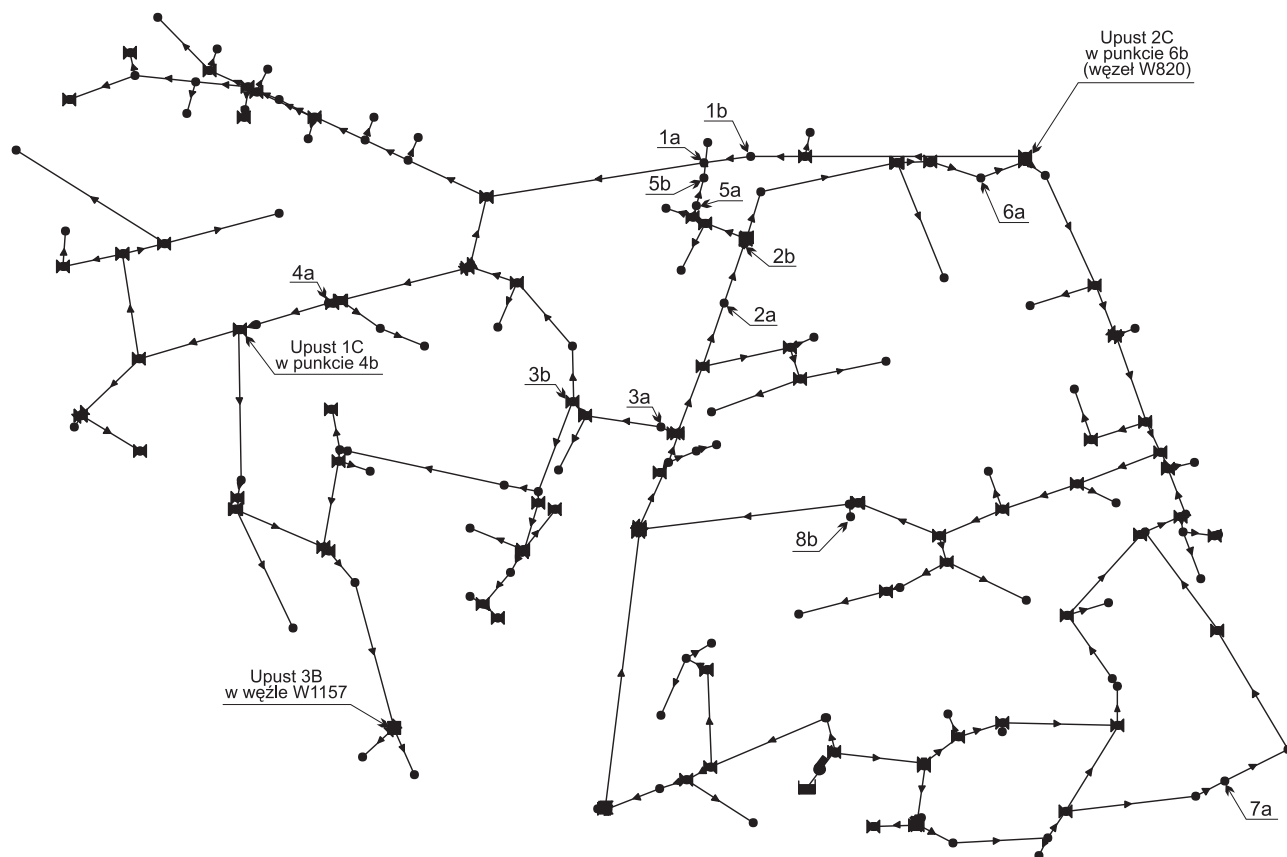
22-10-2008 w godz. 15–16) do budowanego w środowisku EpaNet modelu hydraulicznego sieci wodociągowej osiedla Baranówka, powstała wersja modelu wyjściowego, przydatna do weryfikacji i kalibracji oporności sieci na podstawie jednoczesnych pomiarów wysokości ciśnienia w wybranych punktach sieci przy wymuszonych upustach wody. Pobory węzłowe w pozostałym czasie zostały przeliczone z wykorzystaniem mnożników wyrażających zmianę średniej wydajności hydroforni, pomniejszonej o zarejestrowany pobór wody wymuszony upustem, w stosunku do średniej wydajności hydroforni w godz. 15–16, która była podstawą wyjściowego modelu poboru wody w węzłach sieci. Mnożniki te wyniosły odpowiednio 1,029 (w godz. 17:03–17:24), 0,973 (w godz. 18:10–18:15) i 1,351 (w godz. 19:08–19:15).

Kalibracja parametrów modelu hydraulicznego wodociągu

Spośród przeprowadzonych pomiarów terenowych na potrzeby kalibracji modelu wyselekcjonowano następujące zestawy danych pomiarowych:

- jednoczesny pomiar ciśnienia w 12 punktach pomiarowych w godz. 15–16, bez dodatkowych upustów w węzłach sieci wymuszających większe prędkości przepływu wody,
- „upust 1C” z węzła pomiarowego 4b, wykonany w godz. 17:03–17:15,
- „upust 2C” z węzła pomiarowego 6b, wykonany w godz. 18:05–18:15,
- „upust 3B” z węzła pomiarowego W1154, wykonany w godz. 19:08–19:15.

Rozmieszczenie 12 węzłów pomiaru ciśnienia oraz punktów upustu wody przedstawiono w postaci grafu sieci wodociągowej osiedla Baranówka (rys. 1).



Rys. 1. Graf sieci wodociągowej osiedla Baranówka z punktami pomiaru ciśnienia i miejscami upustu wody
Fig. 1. Graph of the water-pipe network in the housing estate Baranówka with points of pressure measurements and water outflow

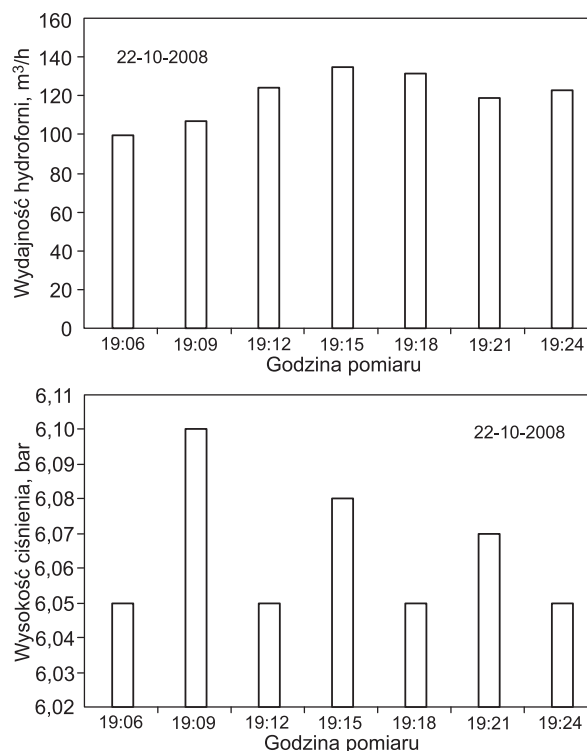
W celu zilustrowania przebiegu badań symulacyjnych na modelu sieci opisano postępowanie i przedstawiono wyniki symulacji wybranego wariantu badań terenowych, określonych jako „upust 3B”. W celu zasymulowania warunków pracy systemu zaopatrzenia w wodę osiedla Baranówka, występujących podczas prowadzenia eksperymentu badawczego na sieci, wykorzystano wyniki następujących pomiarów:

- wydajność hydroforu w czasie trwania eksperymentu wymuszonego upustu wody na sieci (rys. 2),
- zmienność wysokości podnoszenia wody w hydroforu w tym czasie (rys. 2),
- jednoczesny ciągły pomiar zmienności wysokości ciśnienia w 12 miarodajnych węzłach sieci,
- jednoczesny ciągły pomiar strumienia objętości (natężenia przepływu) oraz kierunków przepływu na 4 stanowiskach pomiarowych na sieci,
- pomiar strumienia przepływu wody w punkcie wymuszonego upustu.

Wyniki pomiarów po opracowaniu wprowadzono do modelu wyjściowego, zbudowanego na podstawie warunków pracy sieci 22-10-2008 w godz. 15:00–16:00. Pomiar wydajności hydroforu, z uwzględnieniem upustu, posłużyły do wyznaczenia wyjściowych wartości poboru wody w węzłach modelu sieci, występujących w czasie eksperymentu badawczego. Pomiar wysokości podnoszenia w hydroforu posłużyły do zadania wysokości podnoszenia wody w modelu podczas obliczeń symulacyjnych. Pomiar jednoczesnych zmian ciśnienia w 12 punktach sieci zostały wykorzystane do przygotowania pliku kalibracyjnego, w celu oszacowania odchyłek między zmierzonymi wartościami ciśnienia w sieci i zasymulowanymi w modelu. Wartości odchyłek potraktowano jako kryterium poprawności i precyzji budowanego modelu sieci wodociągowej osiedla. Dodatkowym kryterium oceny jakości modelu hydraulicznego, w tym adekwatności modelu poboru wody, było porównanie kierunków i strumieni przepływów zmierzonych na sieci z zasymulowanymi przy pomocy modelu.

Średni pobór wody w sieci w godz. 19:08–19:15 ($23,45 \text{ dm}^3/\text{s}$) obliczono odejmując od zarejestrowanej w tym czasie średniej wydajności hydroforu ($35,0 \text{ dm}^3/\text{s}$) średni pobór wymuszony upustem w punkcie W1157 ($11,55 \text{ dm}^3/\text{s}$). Średnia zarejestrowana wysokość podnoszenia wody w hydroforu 22-10-2008 w godz. 19:08–19:15 wynosiła 6,07 bar, co po przeliczeniu na mH_2O , z uwzględnieniem rzędnej położenia osi manometru, dało rzędną linię ciśnienia o wysokości 277,95 m n.p.m. Ciśnienie wody zmierzono przy pomocy urządzeń typu Cellbox-H BOX oraz Cellbox-H/Hydrant z zapisem cyfrowym o dokładności 0,5% (błąd bezwzględny pomiaru 0,08 bar). Rzędna ta została zadana w hydroforu podczas symulowania stanu hydraulicznego sieci wodociągowej osiedla w analizowanym czasie.

Plik kalibracyjny, przedstawiony w tabeli 2, zawiera wartości ciśnień zmierzonych w węzłach (rys. 1) podczas trwania eksperymentu badawczego „upust 3B”. Wyniki symulacji pracy sieci w warunkach tego eksperymentu przy pomocy kalibrowanego modelu przedstawiono na rysunku 3, pokazując na grafie sieci warstwicę obliczonych ciśnień w węzłach. Symulowane ciśnienie w sieci podczas eksperymentu „upust 3B” zmieniało się w zakresie $53,27 \div 65,44 \text{ mH}_2\text{O}$, natomiast strumień przepływu w przewodach sieci w otoczeniu punktu W1157 mieścił się w granicach $0,01 \div 1,50 \text{ m/s}$ [9].



Rys. 2. Wydajność hydroforu i wysokość podnoszenia wody podczas eksperymentu „upust 3B”
Fig. 2. Hydrophore plant capacity and hydraulic head during the experiment 'upust 3B'

Tabela 2. Wartości ciśnienia wody w węzłach sieci podczas eksperymentu „upust 3B”

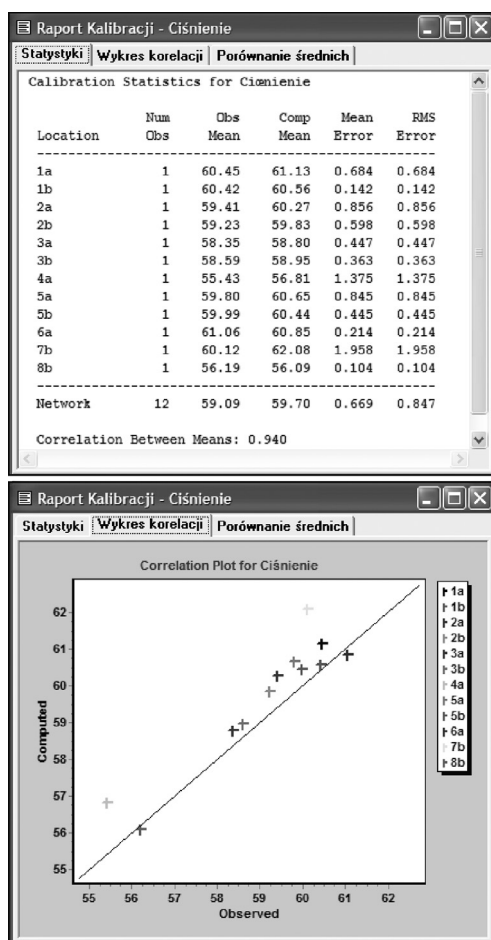
Table 2. Values of water pressure in the nodes of the water-pipe network during the experiment 'upust 3B'

Węzeł	Ciśnienie mH_2O	Węzeł	Ciśnienie mH_2O
1a	60,45	4a	55,43
1b	60,42	5a	59,80
2a	59,41	5b	59,99
2b	59,23	6a	61,06
3a	58,35	7b	60,12
3b	58,59	8b	56,19

Dodatkowo na rysunku 4 przedstawiono statystyczne wyniki porównania ciśnień zmierzonych podczas badań z ciśnieniami obliczonymi podczas symulacji z wykorzystaniem modelu. Z zamieszczonego raportu kalibracji dotyczącego eksperymentu „upust 3B” wynika, że średnie odchylenie ciśnień zaobserwowanych i obliczonych wynosiło $0,67 \text{ mH}_2\text{O}$, przy maksymalnej różnicy $1,96 \text{ mH}_2\text{O}$ w punkcie 7b. Rozmieszczenie punktów na korelogramie nad przekątną wyznaczającą linię korelacji dodatniej między wartościami ciśnień zmierzonych w terenie i obliczonych przy pomocy modelu w tych samych punktach sieci wskazuje na istnienie stałego czynnika zaburzającego tę korelację. Wyraźnie widoczna na korelogramie (rys. 4) tendencja wyższych wartości ciśnień obliczonych przy pomocy modelu nad zmierzonymi w terenie wynikała z nieuwzględnienia różnicy pomiędzy rzędną położenia manometru a rzędną położenia czujnika rejestrującego ciśnienie w hydroforu (wynoszącą w tym przypadku ok. $0,7 \text{ mH}_2\text{O}$). Ten dość często występujący problem podczas kalibracji modeli na podstawie pomiarów terenowych ciśnienia w węzłach sieci jest też sygnalizowany w pracy [18].



Rys. 3. Warstwy wysokości ciśnienia podczas symulacji pracy sieci („upust 3B”)
Fig. 3. Contour plot of hydraulic head during simulation ('upust 3B')



Rys. 4. Korelogram ciśnien wódy zmierzonych w sieci i obliczonych z modelu

Fig. 4. Correllogram of water pressure measured in the water-pipe network and calculated in terms of the hydraulic model

Podsumowanie

Konstruowanie modelu sieci wodociągowej jest wieloetapowym procesem hierarchicznym, obejmującym identyfikację i odwzorowanie struktury sieci wodociągowej, identyfikację parametrów hydraulicznych poszczególnych przewodów sieci oraz odwzorowanie rozkładu poboru wody w każdym obszarze sieci, łącznie z parametrami jej zasilania. Rezultaty działań na każdym poziomie budowy modelu mają istotny wpływ na jego adekwatność i w konsekwencji na przydatność do badań symulacyjnych sieci.

Proces identyfikacji oporności (kalibracji) sieci wodociągowej osiedla Baranówka w Rzeszowie polegał na iteracyjnym dopasowywaniu hipotetycznych oporności każdego przewodu do wartości oporności rzeczywistej w oparciu o dane wyjściowe, dotyczące rodzaju materiału przewodów, czasu eksploatacji oraz jakości wody, a także wyniki pomiarów oporności wybranych przewodów na sieci. Weryfikację kompletności budowanego modelu oraz adekwatności przyjmowanej oporności przeprowadzono na podstawie eksperymentów polegających na jednoczesnym pomiarze ciśnienia i strumienia przepływu wody w wybranych punktach (węzłach) pomiarowych, przy kilkuminutowych wymuszonych upustach wody dochodzących do 50% średniego poboru. Przyjęto, że proces identyfikacji uznaje się za zakończony, gdy różnice ciśnień zmierzonych w sieci i zasymulowanych przy pomocy zbudowanego modelu, w warunkach zasilania i poboru występujących podczas analizowanych eksperymentów pomiarowych, nie przekraczają 2 mH₂O (przy błędzie wskazania rejestratora ciśnienia Cellbox-H wynoszącym 0,8 mH₂O). Uzyskane wyniki analiz porównawczych, które zostały przeprowadzone w zmiennych warunkach zasilania i poboru wody w sieci osiedla Baranówka w Rzeszowie, potwierdzają adekwatność zbudowanego modelu hydraulicznego na poziomie założonej dokładności.

LITERATURA

1. S. DENCZEW, A. KRÓLIKOWSKI: Podstawy nowoczesnej eksploatacji układów wodociagowych i kanalizacyjnych. Arkady, Warszawa 2003.
2. M. GRZENDA: Pozyskanie i przetwarzanie danych na potrzeby modelowania pracy sieci. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2009, nr 6, ss. 16–19.
3. M. KWIETNIEWSKI [red.]: Kierunki rozwoju współczesnej eksploatacji obiektów wodociagowych i kanalizacyjnych. W: *Wodociagi i Kanalizacja. Monitorowanie sieci wodociagowych i kanalizacyjnych*. PZITS, Warszawa 2007.
4. A. PAWLAK, A. KOTOWSKI: Budowa modeli systemów zaopatrzenia w wodę z wykorzystaniem geograficznych systemów informacji. Mat. konf. „Infrastruktura podziemna miast”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005, ss. 282–293.
5. Z. SIWON: Symulacyjne modele przepływów w systemach dystrybucji wody – problemy kalibracji i weryfikacji modeli. Mat. konf. „Eksploatacja wodociagów i kanalizacji, GIS modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociagowymi i kanalizacyjnymi”, Organizator, Warszawa 2005, ss. 157–184.
6. J. POPEK, D. KACZMARSKA: Charakterystyka wodociagów rzeszowskich warunkująca awaryjność sieci wodociagowej. Raport 4A, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2007 (praca niepublikowana).
7. A. STUDZIŃSKI: Analiza hydrauliczna skutków awarii przewodów wodociagowych Rzeszowa. *Instal* 2008, nr 10, ss. 109–112.
8. Praca zbiorowa: System monitorowania sieci i obiektów wodociagowych MPWiK Rzeszów. Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2008 (praca niepublikowana).
9. A. KOTOWSKI, A. PAWLAK, H. PEŁKA, P. WÓJTOWICZ: Badania oporności hydraulicznej i ciśnienia w sieci wodociagowej osiedli mieszkaniowych Baranówka i Zimowit miasta Rzeszowa na potrzeby modelowania systemu zaopatrzenia w wodę. Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr nr SPR-2, Wrocław 2009 (praca niepublikowana).
10. J. STUDZIŃSKI, D. KACZMARSKA, J. POPEK: Uwagi o wdrożeniu, eksploatacji i propozycjach rozbudowy GIS-Geomedia w wodociagach rzeszowskich. Mat. konf. „Eksploatacja wodociagów i kanalizacji, GIS modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociagowymi i kanalizacyjnymi”, Organizator, Warszawa 2005, ss. 117–128.
11. A. BARSKI, A. PAWLAK: Komputerowe wspomaganie optymalizacji i symulacji dynamicznej złożonych układów dystrybucji. Mat. konf. „Wspomaganie komputerowe w projektowaniu i eksploatacji systemów wodociagowych i kanalizacyjnych”, Świnoujście–Kopenhaga 2000, PZITS Oddział Wielkopolski, ss. 87–100.
12. L.A. ROSSMAN: EpaNet 2 Users Manual. National Risk Management Research Laboratory. EPA, Cincinnati 2000.
13. A. KOTOWSKI: Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących spadek przepływności rurociagów. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 27–32.
14. A.L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ: Oczyszczanie wody. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
15. E.W. MIELCARZEWICZ: Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Arkady, Warszawa 2000.
16. A. KOTOWSKI, P. WÓJTOWICZ: Podstawy metodologiczne badań parametrów hydraulicznych ciśnieniowych rurociagów i kanałów z tworzyw sztucznych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2005, t. 78, nr 1, ss. 18–24.
17. A. KOTOWSKI: Durchflusswiderstaende in hydraulisch glatten Rohren, Kniekruemmern und Segmentkruemmern. *GWF-Wasser/Abwasser* 2003, Jg. 144, Nr 9, S. 582–588.
18. M. GRZĘDA, M. SUDOŁ, W. GEBSKI: Modelowanie systemu dystrybucji wody na przykładzie dużej aglomeracji miejskiej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 3, ss. 2–6.

Kotowski, A., Pawlak, A., Wójtowicz, P. Modeling of a Municipal Water Distribution System: A Case Study. *Ochrona Środowiska* 2010, Vol. 32, No. 2, pp. 43–48.

Abstract: The case in point is the water distribution system in Baranówka, a housing estate of the city of Rzeszów. The object under study is the process of hydraulic resistance identification for this water distribution system. The paper includes a description of the identification process, which consisted in adjusting the hypothetic resistance of each pipe to its real resistance, making use of the following input data: pipe material and age, quality of transported water, and the measured values of hydraulic resistance for selected pipes. The constructed hydraulic model and the adequacy of the estimated pipe resistance were

verified by a number of experiments, where pressure and flow rate were measured simultaneously at selected points of the water-pipe network during controlled fire hydrant outflows. The identification process was regarded as completed when the difference between the pressure measured in the water-pipe network and the pressure simulated using the hydraulic model did not exceed 2 mH₂O. The results of comparative analysis performed under variable conditions of water demand and supply in the water-pipe network substantiate the adequacy of the hydraulic model at the level of the accuracy assumed.

Keywords: Modeling, water-pipe network, water demand, pressure, flow rate, calibration.