Marian KULBIK

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

CZYNNIKI DECYDUJĄCE O PRZYDATNOŚCI KOMPUTEROWEGO MODELU PRZEPŁYWÓW W SIECI WODOCIĄGOWEJ

FACTORS DETERMINING USABILITY OF COMPUTER FLOW MODEL IN WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

In the paper is analyzed the multi-purpose process of creating a computer flow model. As a result, has been identified a number of factors limiting the range of application of the model in engineering practice. In relation to acquisition of structural and operational data, were indicated potential sources of errors that contribute to reducing the accuracy of representation the actual state. Special importance has been given to the specification of factors related to the accuracy of estimation of quantity and variability of water use in the model, based on measured data. Most certainly, that erroneous estimate of water consumption disqualify the model due to disturbance of the time - spatial distribution of stream water flows in the network. Among the factors determining the reliability of results of field studies have been characterized: 1) measurement methodology adapted to the scale of the oversizing of network and objects, 2) the impact of measurements duration time and accuracy of equipment used, 3) recommendations regarding the number of measurement points and their density. In addition, the particular attention was paid to the correlation between the efficiency of calibration of model parameters and the choice of measure to estimate the degree of accuracy and the recommended values for indicators for a fitting consistence. However fulfillment of these conditions do not guarantee the proper fit of parameters in the model, if the absolute values of hydraulic losses in the water distribution network are close to the recommended level of indicators.

1. Wprowadzenie

Komputerowy model przepływów w sieci wodociągowej (KMP) jako nowoczesne narzędzie ma szerokie zastosowanie we współczesnej praktyce projektowej i eksploatacyjnej. Na podstawie wyników symulacji komputerowej można zbadać i wyprzedzająco ocenić skutki każdej decyzji przed jej podjęciem. Jednak trzeba mieć pewność, że KMP prawidłowo odwzorowuje reakcję czynnego systemu wodociągowego na zadany pobór wody (wymuszenie) w określonych warunkach eksploatacyjnych.

Celem pracy jest identyfikacja czynników i zagrożeń w procesie tworzenia KMP, które ograniczają obszar jego zastosowania, a nawet mogą spowodować nieprzydatność praktyczną wskutek popełnionych błędów. Argumenty przedstawione w pracy świadczą o potrzebie określenia zakresu przydatności praktycznej KMP przed jego wdrożeniem.

Doświadczenie autora w konstruowaniu KMP wskazuje, że o jego przydatności inżynierskiej decydują kompetencje twórcy i zastosowana metodyka postępowania, jakość danych strukturalnych i operacyjnych, a zwłaszcza wiarygodność wyników badań terenowych. Po przeprowadzeniu analizy wielozadaniowego procesu tworzenia KMP określono czynniki, które rzutują na wiarygodność wszystkich zbiorów danych. Równie istotny wpływ na wartość poznawczą KMP ma także wybór optymalnej metodyki postępowania przez jego twórcę, która byłaby adekwatna do sprawności hydraulicznej urządzeń i czynnej sieci wodociągowej. Najważniejsza jednak rola przypada twórcy KMP na każdym etapie procesu powstawania modelu. Praktyczna przydatność KMP jest zawsze pochodną wiedzy, doświadczenia i intuicji twórczej osoby realizującej, ponieważ konstruowanie KMP jest bardziej sztuką niż nauką [2]. Spośród umiejętności twórczych najważniejszą cechą jest zdolność połączenia wiedzy teoretycznej z zakresu zasad hydraulicznego funkcjonowania systemów z wszechstronną znajomością budowy strukturalnej i reguł działania konkretnego systemu wodociągowego. Twórca KMP zdobywa te informacje sukcesywnie, zarówno na etapie gromadzenia danych o systemie z różnych źródeł, jak i podczas jego konstruowania, testowania i tarowania. Stopień rozpoznania przez twórcę struktury konkretnego systemu wodociągowego i zasad jego funkcjonowania musi być tak szczegółowy, aby spowodować merytoryczną jedność rzeczywistego obiektu z jego odwzorowaniem w postaci KMP.

2. Utrudnienia w pozyskaniu wiarygodnych danych o strukturze systemu i charakterystykach urządzeń

Zbieranie informacji (danych) o istniejącym systemie wodociągowym jest nadal zadaniem żmudnym i pracochłonnym, ponieważ tylko nieliczne przedsiębiorstwa wodociągowe (około 30%) dysponują nowoczesnym System Informacji Geograficznej (GIS) w postaci elektronicznej bazy w połączeniu z mapą numeryczną [8]. W takiej sytuacji trudności potęguje rozproszenie materiałów archiwalnych o sieci i obiektach w wielu źródłach, takich jak: mapy, plany, dokumentacja powykonawcza, raporty, sprawozdania, itd.

Twórca KMP powinien kierować się zasadą ograniczonego zaufania do uzyskanych informacji, która skłania do wstępnego uporządkowania i zróżnicowania zebranego materiału zależnie od źródła jego pochodzenia. Dane o wątpliwej wiarygodności należy dodatkowo oznaczyć, odróżniając je od dobrze udokumentowanych. Informacje te są szczególnie cenną wskazówką w poszukiwaniu ewentualnych błędów w zgromadzonych danych na etapie weryfikacji modelu.

Autor wielokrotnie stwierdzał, że praktyczna wiedza kadry technicznej w przedsiębiorstwie, oparta na wieloletnim doświadczeniu, stanowi uzupełniające źródło informacji. Wyjaśnienia pracowników w połączeniu z bezpośrednią inspekcją obiektów przez twórcę modelu pozwalają zaktualizować często sprzeczne zapisy w archiwalnych materiałach źródłowych.

Wiarygodność pozyskanych danych jest zawsze relatywna do nakładu pracy włożonej w ich gromadzenie i weryfikację. Zasadą powinno być dążenie do 100% kompletności danych przez ciągłe ich aktualizowanie na wszystkich etapach budowy KMP.

2.1. Źródła błędów w danych strukturalnych i ich skutki decydujące o jakości modelu

Zakres i formę potrzebnych danych precyzuje wybrany program użytkowy, który stanowi podstawę do tworzenia KMP w konkretnym systemie wodociągowym. Zazwyczaj dane porządkuje się w dwóch zbiorach ze względu na sposób ich wykorzystania jako:

- strukturalne - służące do identyfikacji elementów systemu,
- operacyjne - potrzebne do sterowania działaniem urządzeń.

Dane strukturalne stanowią zbiór, który odwzorowuje w KMP elementy składowe rzeczywistego systemu wodociągowego, tj. topologię sieci wodociągowej wraz z parametrami urządzeń eksploatowanych w obiektach (pompowniach i zbiornikach).

W modelu strukturalnym sieci wodociągowej przedstawia się przewody w postaci: gałęzi i węzłów. Dla każdego węzła ustala się współrzędne miejsca przestrzennego położenia i rzędną wysokościową. Powszechnie stosowanym uproszczeniem jest przyjmowanie rzędnych terenu jako wysokości położenia węzłów, zamiast rzeczywistego poziomu osi rurociągów wyznaczonych na podstawie profili podłużnych. Jeśli rurociągi ułożone są na standardowej głębokości do 2 m, wówczas uproszczenie to jest dopuszczalne, gdyż różnica w rzędnych linii ciśnienia będzie niewielka. Wyjątek od tej zasady stanowi sytuacja, gdy dany węzeł reprezentuje w modelu także punkt pomiaru ciśnienia. W tym wypadku należy precyzyjnie określić rzeczywiste położenie przyrządu rejestrującego, najlepiej na podstawie pomiarów geodezyjnych, ponieważ wszelkie uproszczenia ujawnią się błędami na etapie weryfikacji KMP.

Niektórzy twórcy KMP chętnie stosują upraszczanie rzeczywistej struktury sieci wodociągowej w procesie jej agregacji niezależnie od przewidywanego zastosowania modelu (pkt. 4.2 – tab.1). Z doświadczeń autora wynika, że pochopne wyeliminowanie gęstej sieci rozdzielczej podczas tworzenia modelu strukturalnego, ma wymierny wpływ na dokładność odwzorowania rzeczywistego rozkładu przepływów. Szczególnie widoczne skutki można odnotować w przewymiarowanej strukturze, jeśli sieć rozdzielcza pełni funkcję magistrali [7].

Najtrudniejszym do ustalenia składnikiem zbioru danych o strukturze sieci są **parametry sprawności hydraulicznej przewodów**. Ich wartości ulegają ciągłym zmianom w czasie i przestrzeni podczas wieloletniej eksploatacji ze względu na losowy charakter procesu hydraulicznego starzenia czynnych sieci wodociągowych. Spośród wielu form tych parametrów [5] najbardziej wygodne w interpretacji są współczynniki umownej chropowatości zastępczej k_{t0}, chociażby ze względu na preferowanie średnicy nominalnej rurociągu. Poszukiwanie rzeczywistego wymiaru średnicy na podstawie pomiarów punktowych jest zawsze przypadkowe ze względu na nieregularności warstwy złogów na wewnętrznych ściankach wzdłuż danego przewodu.

Jednocześnie trzeba podkreślić, że wyznaczenie wartości współczynnika k_{t0} dla wybranych przewodów jest możliwe z wystarczającą dokładnością do celów praktycznych tylko na podstawie pomiarów z zachowaniem odpowiednich warunkach hydraulicznych (pkt. 4.1). Zawsze konieczny jest jednoczesny pomiar objętości przepływu na odcinku w wybranym przekroju oraz ciśnienia w dwóch jego węzłach:

początkowym i końcowym. Wszelkie próby wyznaczania zbioru wartości współczynnika k_{t0} dla przewodów sieci pierścieniowej na podstawie tylko pomiarów ciśnienia, przy jednoczesnym oszacowaniu natężenia przepływu, jest zawsze obarczone błędem kompensacji ze względu na współzależność obu zmiennych.

Zjawiskiem często spotykanym w praktyce eksploatacyjnej są naturalne zmiany katalogowych charakterystyk hydraulicznych pomp, wskutek częściowego zużycia się ich wirników wraz z upływem czasu eksploatacji. Niekiedy zdarza się też, że po wymianie pomp na innego typu, nie nastąpiła odpowiednia korekta dokumentacji technicznej urządzeń zainstalowanych w danym obiekcie. Aby uniknąć tego rodzaju błędów, należy określić charakterystykę wydajności eksploatowanych pomp na podstawie bezpośrednich pomiarów.

W modelu przepływów rozróżnia się także dwa rodzaje zbiorników: retencyjne i wyrównawcze, zależnie od pełnionej funkcji. Zbiornik retencyjny charakteryzuje się w modelu przez podanie rzędnej stałego poziomu zwierciadła wody. Jednocześnie zakłada się, że wielkość poboru wody ze zbiornika jest znikomo mała w stosunku do jego pojemności. Zbiornik wyrównawczy wymaga bardziej szczegółowego opisu, ponieważ należy nie tylko określić rzędną jego posadowienia, wymiary i kształt, lecz także podać minimalne i maksymalne napełnienie. Ponadto trzeba określić we wszystkich zbiornikach stany początkowego poziomu wody w godzinie rozpoczęcia symulacji i zapisać je w zbiorze danych operacyjnych.

Rzetelne ustalenie wymienionych wielkości decyduje o prawidłowym odwzorowaniu współdziałania zbiornika z pozostałymi elementami systemu wodociągowego, a w konsekwencji o przebiegu i zmienności poziomu linii ciśnienia w sieci zależnie od stanu wody w zbiorniku [6].

2.2. Wskazówki i zalecenia przyczyniające się do zachowania jakości danych operacyjnych

Symulacja dynamiczna stanu ustalonego w rozszerzonym horyzoncie czasu wymaga zebrania danych operacyjnych, które określają stan początkowy działania systemu, a także precyzują procedury sterowania urządzeniami. Zebrane dane operacyjne powinny pochodzić z tego samego okresu działania systemu wodociągowego, aby zapewnić stacjonarny stan symulacji [4].

Dodatkowe dane i informacje eksploatacyjne o urządzeniach zwiększają ryzyko popełnienia błędów. Na przykład, dla każdej pompy należy zdefiniować jej harmonogram pracy, który będzie opisywał okres działania poprzez określenie czasu włączeń i wyłączeń, a także podawał czasową zmianę jej wydajności lub wysokości podnoszenia. Realizacja sterowania pompami może być uzależniona od poziomu wody w zbiorniku albo wysokości ciśnienia w rurociągach ssącym lub/i tłocznym, a niekiedy także w wybranych węzłach sieci. W trakcie gromadzenia danych trzeba sprecyzować wartości wymienionych parametrów sterujących, a także rozpoznać stosowany sposób regulacji każdej pompy.

Jakość danych operacyjnych zależy w dużej mierze od dokładności sprzętu pomiarowego. Częstą przyczyną trudności interpretacyjnych są występujące różnice czasowe pomiędzy różnego typu urządzeniami rejestrującymi w systemie. Najczęściej problemy stwarza sprzęt analogowy, gdyż zdarza się, że jego mechanizm czasowy pracuje niepoprawnie. W prawidłowym ustaleniu zmienności czasowej danych operacyjnych wymagana jest pełna zgodność rejestracji przyrządów z czasem rzeczywistym (pkt. 4.3).

W symulacji dynamicznej ustalony zbiór danych operacyjnych powinien ulegać wielokrotnej korekcie, w ślad za czasowymi zmianami w funkcjonowaniu urządzeń konkretnego systemu (układu) wodociągowego. Z tego powodu jego aktualizacja jest procesem ciągłym i wymaga dostosowania na bieżąco, chociażby w wypadku zmiany czasokresu lub/i kroku symulacji (pkt. 3.3).

3. Dokładność odwzorowania poboru wody w modelu

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny postęp w zakresie gromadzenia i przechowywania danych pomiarowych o produkcji i sprzedaży wody w komputerowych bazach przedsiębiorstw wodociągowych. Możliwości te powodują, że obecnie tylko materiały z bezpośrednich pomiarów powinny stanowić bazę empiryczną do określenia wielkości poboru wody przez każdego odbiorcę i jej zmienności czasowej. Korzystanie z danych pomiarowych na pewno zwiększa dokładność odwzorowania, lecz nie zapewnia idealnego oszacowania, ponieważ znane metody pozwalają tylko na około 20% przybliżenie stanu rzeczywistego. Szczególnie trudny do ustalenia jest losowy (stochastyczny) charakter przestrzennego i czasowego rozkładu zużycia wody w obszarze zasilania. Z konieczności stosowane wszelkie uproszczenia, uogólnienia i uśrednienia wyników pomiarów rzeczywistego zużycia wody są zawsze dodatkowym źródłem błędów.

3.1. Możliwości i ograniczenia metodyczne

Procedurę autorskiej metody oszacowania poborów węzłowych w KMP zawiera monografia [7]. Bazę empiryczną stanowią dwa roczne zbiory pomiarów, tj. zapotrzebowania na wodę (poboru) i jej wielkości produkcji w istniejącym systemie wodociągowym. Idea metody opiera się na tezie udowodnionej empirycznie, że pobór wody przez dużych i największych odbiorców (>100 m^3/d) decyduje o dynamice przepływów w sieci wodociągowej, a liczna grupa (70%) małych użytkowników stanowi około 10 % całkowitego zapotrzebowania na wodę (tło wymuszenia). Autor uzyskał obciążanie modelu rzeczywistym poborem wody poprzez grupowanie odbiorców małych w każdej ulicy miasta i wyznaczenie dla nich wartości wskaźnika średniego jednostkowego zużycia wody. Jednak trzeba podkreślić, że przyjęty sposób identyfikacji odbiorców nie zakłócał znacząco ich rzeczywistej lokalizacji obszarowej. W odpowiedzi na tak zdefiniowane wymuszenie uzyskano zadowalające odwzorowanie faktycznego rozkładu przepływów w sieci wodociągowej. Efekty wdrożeniowe KMP dla ośmiu miast potwierdziły przydatność stosowanej metody[7].

Jednak pamiętać trzeba o obowiązkach użytkownika KMP w wieloletniej perspektywie czasowej. Najważniejszym jest potrzeba weryfikacji zarówno pierwotnego przyporządkowania odbiorców do węzłów, jak również bieżącej korekty ustalonego poboru wody. Jeśli użytkownik wdrożonego modelu nie przestrzega tego zalecenia, wówczas następuje dezaktualizacja danych, a KMP staje się bezużyteczny w przedsiębiorstwie wodociągowym. Aby zapobiec temu najwłaściwszym rozwiązaniem jest zastosowanie automatycznego korygowania węzłowych poborów wody w modelu wraz z napływem nowych odczytów wodomierzowych do bazy danych.

3.2. Potrzeba odwzorowania strat wody w sieci

W modelach hydraulicznych należy uzależnić wybór sposobu rozwiązanie problemu identyfikacji strat wody od ich poziomu, ponieważ dyskusyjne są korzyści wynikające z podejmowanych prób dokładnego odwzorowania strat wody w każdej sytuacji. Z tego powodu wyróżnia się dwa poziomy graniczne strat wody, tj. 10 i 20 % wielkości zapotrzebowania na wodę. Ograniczenie strat wody do zalecanego poziomu 10% rocznej produkcji jest zadaniem kosztownym, czasochłonnym i wyjątkowo rzadko osiągalnym w polskich systemach wodociągowych. Jeśli występuje dopuszczalny ekonomicznie poziom przecieków w sieci wodociągowej do 10% zapotrzebowania na wodę, który jest pod stałą kontrolą służb eksploatacyjnych, wówczas nie ma potrzeby ich oddzielnego traktowania w obliczeniach. Podejście takie preferuje się na przykład w Wielkiej Brytanii, gdzie straty wody uważa się jako część zapotrzebowania na wodę w gospodarstwach domowych, które nie jest mierzone [13].

Jeśli straty wody zawierają się w przedziale od 10 do 20% ilości dostarczonej do sieci, to ich wpływ na wyniki obliczeń jest porównywalny z dokładnością możliwą do uzyskania podczas wyznaczania węzłowych poborów wody [9]. Uproszczenie to `tylko w nieznacznym stopniu zniekształca rzeczywisty czasowy rozkład poborów wody pod warunkiem, że histogramy wyznaczono na podstawie pomiarów. Podejście to spełnia jednocześnie wymóg programu EPANET odnośnie warunku równowagi bilansowej w obszarze zasilania.

Jeśli wielkość strat wody jest większa od 20% rocznej produkcji i zróżnicowana obszarowo, wówczas należy ustalić ich przyczyny na podstawie terenowych badań rozpoznawczych, a następnie starać się je ograniczyć do poziomu uzasadnionego ekonomicznie. W takiej sytuacji największą trudność sprawia ujawnienie miejsca powstawania strat wody ze względu na ich znaczne rozproszenie obszarowe. Podstawą identyfikacji i kwantyfikacji strat wody jest pełne oprzyrządowanie obiektów wraz z siecią w układzie dystrybucji wody. W większości polskich systemów wodociągowych warunek ten nie jest spełniony. W takiej sytuacji konieczne jest stosowanie w modelowaniu uproszczonych procedur w identyfikacji strat wody.

Rozsądnym kompromisem wydaje się rozwiązanie zastosowane w programie EPANET [10], które umożliwia obliczanie odpływu na przecieki z każdego odcinka przewodu, zależnie od panującego ciśnienia w sieci. Im wyższa jest wartość ciśnienia, a szczególnie dynamika jego zmian, tym większej staranności wymaga odwzorowanie strat wody w KMP. Każde uproszczenie może utrudnić prawidłowe wytarowanie modelu przepływów, a w konsekwencji ograniczyć obszar jego zastosowania.

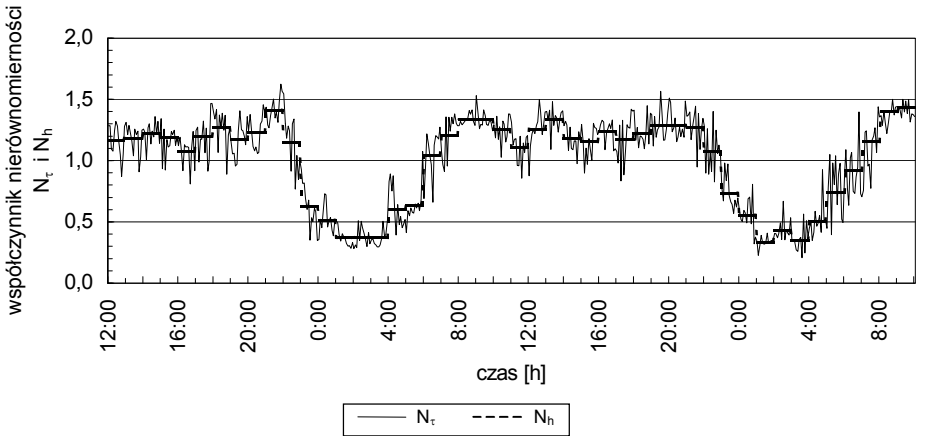
3.3. Dokładność odwzorowania zmienności czasowej poboru wody

W hydraulicznych modelach dynamicznych [10] jest konieczna znajomość zmienności poboru wody w funkcji czasu. Zgodnie z autorską metodyką można uzyskać w KMP zmienność poboru wody zbliżoną do rzeczywistej poprzez wyznaczenie indywidualnych histogramów (wzorców) tylko dla największych odbiorców [7]. Dla pozostałych konsumentów wystarczy wyznaczyć globalny histogram na podstawie pomiarów w konkretnym obszarze zasilania (układ, rejon zaopatrzenia, strefa ciśnienia, dzielnica mieszkaniowa, zabudowa wzdłuż każdej ulicy). Wybór granic obszaru zasilania determinują każdorazowo możliwości pozyskania danych pomiarowych. Histogramy globalne identyfikuje się metodą bilansową na podstawie sumy wartości

chwilowych wydajności wszystkich źródeł wody w przedziałach rejestracji pomiarów. Procedura ta zapewnia rozsądną dokładność odwzorowania zmienności czasowej poboru wody, jednakże pod warunkiem dostosowania w obliczeniach symulacyjnych kroku czasowego do dynamiki zjawiska przepływów.

Standardem jest 1-godzinny krok czasowy, lecz szczególne sytuacje wymagają jego skrócenia, chociażby odwzorowanie przebiegu fali ciśnienia wywołanej włączeniem przewymiarowanej pompy. W tego rodzaju obliczeniach symulacyjnych wymaga się 1-minutowego lub nawet krótszego kroku czasowego [11]. Równocześnie pomija się stany nieustalone analizowane za pomocą specjalnych modeli.

Przykładowy histogram poboru wody przedstawiono (rys. 1.) w dwóch wersjach zależnie od długości kroku czasowego Δt.



N_τ, N_h - współczynnik nierównomierności chwilowej (Δt = 5 min.) i godzinowej (Δt = 1 godz.) poboru wody.

N_τ, N_h - instantaneous coefficients of inequality (Δt = 5 min.) and hourly (Δt = 1hr.), respectively for water use in the supply network.

Rys. 1. Histogram poboru wody w układzie wodociągowym w dwóch wersjach zależnie od długości kroku czasowego

Fig. 1. Histogram of water consumption in water supply system, in two versions depending on the time step

Porównanie obu histogramów pokazuje różnice w rzeczywistej zmienności poboru wody (Δt = 5 min) wyznaczonej na podstawie pomiarów, w relacji do tradycyjnego sposobu analizy z uśrednionym krokiem godzinowym. Jego przyjęcie byłoby zbyt dużym uproszczeniem w stosunku do obserwowanej dynamiki chwilowej zmienności poboru wody, ponieważ wyniki obliczeń będą obarczone błędem dyskretyzacji.

4. Czynniki wpływające na jakość wyników badań terenowych

Uzyskanie wiarygodnych wyników badań terenowych wymaga przestrzegania szeregu uwarunkowań metodycznych i zaleceń praktycznych trudnych do spełnienia w polskich realiach eksploatacyjnych. Specyfika funkcjonowania czynnych systemów wodociągowych jest najczęściej pochodną:

- przewymiarowanych i nadmiernie zanieczyszczonych przewodów,
- szkodliwego oddziaływania pomp na dynamikę ciśnienia w sieci.

Po ustaleniu wymienionych cech, autor opracował spójną metodykę kompleksowych badań terenowych, która zapewnia normatywną prędkość wody w badanych przewodach, a także dostosowuje liczbę i częstość pomiarów do dynamiki ciśnienia i przepływu w sieci.

4.1. Uwzględnienie w metodyce pomiarów skali przewymiarowania sieci i obiektów

Pomiary terenowe w miejskich układach wodociągowych o niewielkim zasięgu obszarowym i stosunkowo prostej strukturze można przeprowadzić jednoetapowo. W takich wypadkach badanie oporności wybranych przewodów realizuje się wraz z pozostałymi obserwacjami na obiektach, w tym także wykonuje się rejestrację poboru wody przez największych odbiorców. W ten sposób badania terenowe mają charakter kompleksowych pomiarów na sieci i obiektach, których zakres nie tylko pozwala ustalić oporność hydrauliczną wybranych przewodów, lecz jednocześnie zidentyfikować istniejące warunki brzegowe zasilania i poboru wody. Ich znajomość pozwala określić dynamikę procesu przepływów w różnych stanach funkcjonowania systemu wodociągowego.

Efektywne przeprowadzenie badań oporności hydraulicznej wymaga przygotowania szczegółowego programu, który powinien zawierać:

- specyfikację przewodów wytypowanych do badania oporności hydraulicznej,
- indywidualne scenariusze pomiarowe dla każdego z wytypowanych przewodów.

Metodykę realizacji wymienionych zadań zawiera monografia autora [7].

Realizacja kompleksowych badań w rozległych systemach wodociągowych o skomplikowanej strukturze wymaga wstępnego rozpoznania hydrauliki systemu wodociągowego za pomocą symulacji komputerowej. W obliczeniach testowych wykorzystuje się wstępnie oszacowane wartości współczynników chropowatości przewodów na podstawie wyników pomiarów rozpoznawczych. W efekcie obliczeń symulacyjnych określa się kierunki i prędkości przepływu wody w sieci, czas zatrzymania wody w systemie, a także rozkład ciśnienia w układzie. Szczególnie istotne są parametry hydrauliczne dla głównych magistral zasilających, ponieważ występujące tam straty hydrauliczne decydują o rozkładzie ciśnienia w całej sieci. Ustalenia te pozwalają zidentyfikować specyficzne cechy badanego systemu wodociągowego, jak chociażby skalę przewymiarowania przewodów i ich stan sanitarno-hydrauliczny. Na tej podstawie określa się niezbędną długość przewodów, które należy objąć pomiarami.

Właściwe badania terenowe w rozległych systemach wodociągowych powinny odbywać się w dwóch etapach. W pierwszym etapie przeprowadza się niezależne badanie oporności hydraulicznej wybranych przewodów, bez jednoczesnej globalnej

kontroli warunków zasilania i rozbioru wody w systemie. Takie podejście umożliwia realizację programu badawczego w dłuższym okresie czasu, jeśli zaistnieje taka potrzeba, to nawet przez kilka miesięcy. Każdorazowo wykonuje się lokalnie jednodniowy pomiar według opracowanych scenariuszy, przy zaangażowaniu mniejszego zespołu ludzi i ograniczonej ilości sprzętu pomiarowego. Dopełnieniem tych badań są przeprowadzane w drugim etapie prac ciągłe pomiary ciśnienia w wybranych węzłach sieci z jednoczesnym monitorowaniem parametrów eksploatacyjnych urządzeń we wszystkich obiektach.

Realizacja badań oporności hydraulicznej jest szczególnie trudna w sieciach przewymiarowanych ze względu na niekorzystne warunki hydrauliczne podczas eksploatacji (prędkość < 0,1 m/s). W takiej sytuacji osiągnąć można oczekiwaną dokładność pomiarów tylko podczas tzw. przepływu pożarowego przez odpowiednie [7]:

- ukierunkowanie ruchu wody w sieci pierścieniowej,
- upust wody wytypowanymi hydrantami,
- okresowe podwyższenie ciśnienia statycznego w układzie lub jego części.

Wybór sposobu wymuszenia przepływu wody zależy od istniejących uwarunkowań lokalnych. Niekiedy w sieci o strukturze pierścieniowej wystarczy dokonać ograniczenia wielu możliwych dróg dopływu wody do jednokierunkowego zasilania hydrantu, stanowiącego miejsce upustu wody z sieci. Jeśli prędkość przepływu jest nadal niewystarczająca, należy ją zwiększyć poprzez upust wody odpowiednio większą liczbą hydrantów czynnych jednocześnie. Niekiedy zbyt niskie ciśnienie dyspozycyjne w sieci rozdzielczej stanowi istotne ograniczenie w uzyskaniu wymaganej prędkości, gdyż jest niewystarczające do pokonania oporów ruchu. W takiej sytuacji najlepiej jest je zwiększyć przez podwyższenie eksploatacyjnej wysokości podnoszenia pomp, jeśli tylko na to pozwalają ich charakterystyki hydrauliczne oraz sprawność techniczna przewodów.

Istotnym utrudnieniem w badaniach czynnych sieci wodociągowych jest konieczność prowadzenia pomiarów na rozległym terenie w realnych warunkach eksploatacyjnych. Oznacza to konieczność ograniczenia do minimum zakłóceń ciągłości dostawy wody w czasie prowadzenia badań oraz dostosowanie programu realizacyjnego do możliwości wynikających z istniejącego uzbrojenia i opomiarowania.

Granicę kompromisu wyznacza hydrauliczna wiarygodność uzyskanych wyników, którą definiuje się w oparciu o różne kryteria. Autor proponuje dążyć do zapewnienia podczas kampanii pomiarowej takiej prędkości w sieci wodociągowej, która gwarantuje spadek hydrauliczny co najmniej 10 ‰, jeśli długość odcinka pomiarowego jest większa od 500 m, a oczekiwana wartość współczynnika $k_{t0} \leq 1{,}5$ mm [5].

Z kolei, Walski [12] uważa, że wiarygodne dane pomiarowe można uzyskać wówczas, gdy spadek naporu hydraulicznego jest co najmniej pięć razy większy od błędu pomiarów ciśnienia. Jeśli natomiast straty hydrauliczne są tego samego rzędu co błąd pomiarów, wtedy dane te są bezużyteczne dla potrzeb tarowania modelu przepływów.

Praktyczne spełnienie kryteriów hydraulicznej wiarygodności pomiarów wymaga każdorazowo dostosowania scharakteryzowanej powyżej metodyki badań terenowych i ich zakresu do specyfiki funkcjonowania danego systemu. Aby nie zatracić naukowego charakteru badań trzeba przestrzegać wymagań odnośnie liczby punktów pomiarowych oraz czasu trwania, częstości i dokładności pomiarów,.

4.2. Wpływ liczby punktów pomiarowych i ich zagęszczenia na ograniczenie obszaru zastosowania modelu

Opinie badaczy są wyraźnie rozbieżne odnośnie niezbędnej liczby punktów pomiarowych, która gwarantuje wiarygodne odwzorowanie stanu rzeczywistego. W większości doniesień podają, że pomiarami wysokości ciśnienia należy obejmować od 10 do 25% węzłów wyznaczonego grafu sieci. Z doświadczenia autorów [3], wynika, że wystarczy jeden punkt pomiarowy na około 500 odbiorców (nieruchomości), aby zgodność pomiędzy ciśnieniem pomierzonym a obliczonym nie przekraczała 1 m sł.w.

Z uwagi na wysokie koszty badań terenowych poszukuje się możliwości ich redukcji. Wielu autorów postuluje możliwość ograniczenia liczby punktów pomiaru ciśnienia i natężenia przepływu, jeśli przyszłe zastosowanie KMP jest znane i ograniczone. Tego rodzaju propozycję przedstawił także Komitet ds. Inżynierskich Zastosowań Komputerów (American Water Works Association - AWWA) w materiała ch konferencyjnych [1]. Gremium to uzależnia liczbę punktów pomiarowych od poziomu schematyzacji struktury sieci wodociągowej (tabela 1).

Tab. 1. Minimalna liczba punktów pomiarowych zależnie od przewidywanego zastosowania modelu

Tab. 1. The minimum number of measurement points depending on the intended application of the model

Zastosowanie modelu	Poziom dokładności schematyzacji struktury sieci	Liczba punktów pomiarowych	
		ciśnienia	przepływu
Planowanie rozwoju systemu	Niski (uproszczony)	10% węzłów	1% gałęzi
Projektowanie sieci	Średni do wysokiego	5–2% węzłów	3% gałęzi
Sterowanie eksploatacyjne	Niski do wysokiego	10–2% węzłów	2% gałęzi
Modelowanie jakości wody	Wysoki (szczegółowy)	2% węzłów	5% gałęzi

W zaleceniach AWWA różnicuje się poziom dokładności schematyzacji struktury sieci jako niski, średni i wysoki dla czterech obszarów zastosowań modelu. Jednak nie precyzuje się stopnia agregacji struktury sieci, która odpowiadałaby wyróżnionym poziomom dokładności schematyzacji. Jednocześnie bez merytorycznego uzasadnienia oparto zalecaną liczebność punktów pomiarowych na następującej formule: im wyższa jest wymagana dokładność schematyzacji sieci w modelu (mniejszy stopień agregacji struktury), tym konieczna jest większa liczba miejsc rejestracji natężenia przepływu i równocześnie mniejsza liczba punktów pomiaru ciśnienia.

W niniejszych zaleceniach AWWA proponuje się także następujące wskaźniki zgodności wartości pomierzonych i obliczonych dla:

- przepływu: ± 10% albo ± 2% w stosunku do wielkości pomierzonej,
- ciśnienia: ± 3,4 albo ± 2,0 m sł. pomierzonej wielkości dla 100% lub 70% odczytów.

Podane wartości dotyczą skrajnych obszarów zastosowania modelu, tj. w planowaniu rozwoju systemu i modelowaniu jakości wody. Ponadto warto zauważyć, że wymaga się spełnienia „najostrzejszego" poziomu zgodności dla obu wskaźników, przy wysokim (szczegółowym) stopniu schematyzacji.

Doświadczenia autora niniejszej publikacji skłaniają do stwierdzenia, że uzależnianie liczby stanowisk pomiarowych w obszarze zasilania tylko od stopnia schematyzacji struktury sieci wodociągowej wydaje się zbyt dużym uproszczeniem problemu. W tym względzie istotne znaczenie ma także wielkość systemu, jego struktura wewnętrzna (ilość ujęć, pompowni i zbiorników), liczba stref ciśnienia, przestrzenne usytuowanie sieci przewodów (zagęszczenie) oraz jej charakterystyka hydrauliczna, wiekowa i materiałowa. Wieloczynnikowe uzależnienie wyboru miejsca i liczby punktów pomiaru ciśnienia powoduje, że parametr ten powinien być każdorazowo ustalany indywidualnie ze względu na lokalną specyfikę (pkt. 4.1). W sytuacji niepełnego rozpoznania zawsze istnieje możliwość wykonania dodatkowych pomiarów uzupełniających.

4.3. Wymagany czas realizacji pomiarów i dokładność sprzętu pomiarowego

Czas realizacji pomiarów chwilowych zależy od zgodności wskazań przyrządów pomiarowych z oczekiwanymi wielkościami, które oszacowano wstępnie na etapie opracowywania programu badań. Zazwyczaj w każdym scenariuszu pomiarowym należy wykonać od kilku do kilkunastu odczytów przyrządów pomiarowych. Wszelkie ujawnione rozbieżności wymagają wyjaśnienia na bieżąco w trakcie badań, a niekiedy nawet korekty opracowanych scenariuszy albo rozszerzenia ustalonego zakresu prac.

Najczęściej spotykane przyczyny zakłóceń podczas pomiarów chwilowych to błędy w danych inwentaryzacyjnych sieci wodociągowej, które zafałszowują wyniki pomiarów. Szczególnie często ujawnia się następujące nieprawidłowości: niezgodne z dokumentacją połączenia przewodów w węzłach oraz ich średnice i rodzaj materiału rur, a także nagminnie występujące częściowo domknięte lub zamknięte zasuwy bez wiedzy eksploatatora oraz niesprawne odpowietrzniki, co powoduje znaczący wzrost oporności hydraulicznej na danym odcinku przewodu.

Czas trwania pomiarów ciągłych zalecany przez Centrum Władz Wodnych w Wielkiej Brytanii [13] powinien wynosić co najmniej 48 godzin. Dwudobowy okres czasu uważa się za wystarczający do identyfikacji wartości parametrów hydraulicznych i warunków brzegowych w systemie wodociągowym. Istotny wpływ na wiarygodność pomiarów ciągłych ma koordynacja czasowa wszystkich urządzeń pomiarowych w stosunku do siebie i czasu rzeczywistego. Rejestratory pomiaru czasu powinny być synchronizowane z dokładnością do ±15 sekund, aby uniknąć trudności interpretacyjnych

Wymagana dokładność sprzętu pomiarowego powinna zapewnić następującą tolerancję dla mierzonych wielkości:

- chwilowego natężenia przepływu ± 5%, gdy jego wartość jest ≥10% całkowitego zapotrzebowania na wodę w systemie, a w pozostałych przypadkach ± 20%,
- wysokości ciśnienia ± 0,25 m,
- napełnienia zbiornika wyrównawczego do kalibracji:
  - ciśnienia ± 0,1 m,

- natężenia przepływu około ± 0,005 m wysokości napełnienia (stan zw. wody) zależnie od wielkości powierzchni jego przekroju poprzecznego, aby uzyskać mierzoną wielkość z dokładnością ± 5%.

Jednocześnie należy zauważyć, że uzyskanie wymaganej dokładności pomiarów może być nieosiągalne za pomocą eksploatowanego sprzętu pomiarowego w czynnych systemach wodociągowych. Z tego powodu trzeba sprawdzić dwukrotnie (legalizować) dokładność istniejącego sprzętu pomiarowego przed rozpoczęciem badań i po ich zakończeniu. W ten sposób uwiarygodni się wyniki pomiarów.

5. Uwarunkowania efektywności kalibracji parametrów

Proces tarowania KMP za pomocą różnych technik jest powszechnie uważany za najtrudniejsze zadanie, którego realizacja w znacznym stopniu wpływa na późniejszą jego przydatność w praktyce inżynierskiej. Na skomplikowanie tego procesu ma także wpływ ujawnianie się w trakcie realizacji negatywnych skutków błędów w danych strukturalnych (pkt. 2.1) i pomiarowych (pkt. 4.1), których trafna ocena i skuteczna eliminacja zależy od wiedzy i doświadczenia twórcy modelu.

O efektywności przeprowadzenia procesu tarowania modelu decyduje także wybór kryterium zgodności w kalibracji parametrów oraz wrażliwość miary, jaką określamy stopień dokładności oszacowania parametrów w modelu.

5.1. Wybór miary dokładności oszacowania parametrów modelu

W praktyce obserwuje się dowolność postępowania w wyborze miary zgodności z powodu braku jednolitych zaleceń. Tradycyjnie jako miarę zgodności stosuje się porównanie wartości ciśnienia pomierzonego i obliczonego w węzłach pomiarowych, przy zapewnieniu dopuszczalnej różnicy (założonej zgodności) natężenia przepływu w kontrolnych przekrojach wybranych przewodów.

Podejście takie jest jednak nieprecyzyjne w przewymiarowanych sieciach wodociągowych, które charakteryzuje stosunkowo „płaska" linia ciśnienia piezometrycznego, jeśli nie stosuje się wymuszenia przepływu podczas pomiarów. W tym wypadku znacznie bardziej wrażliwą miarą zgodności jest porównywanie spadku naporu hydraulicznego pomierzonego i obliczonego dla identyfikowanych odcinków sieci wodociągowej.

Dla obu wskaźników zgodności można dokonać oceny różnic wartości bezwzględnych zdefiniowanych wielkości lub wyrazić je w sposób jeszcze bardziej precyzyjny, posługując się ich procentowym udziałem w stosunku do wielkości pomierzonej.

Wybór najwłaściwszej miary zgodności jest ważny, ponieważ umożliwia lub utrudnia rzetelne pokazanie osiągniętego stopnia dokładności odwzorowania zastanej rzeczywistości podczas realizacji pomiarów hydraulicznej oporności przewodów. Jeśli wyniki pomiarów w niektórych punktach nie spełniają zalecanych kryteriów zgodności powinny być poddane dokładnej analizie w celu ustalenia przyczyn anomalii. Negatywna ocena weryfikacji danych jest podstawą do ich odrzucenia.

5.2. Wybór kryterium zgodności w kalibracji parametrów modelu

Ocena dokładności tarowania modelu (kalibracji i weryfikacji) nie jest w Polsce jednoznacznie określana i unormowana przepisami, zatem stosuje się bezkrytycznie wskaźniki zalecane w USA i Wielkiej Brytanii. Centrum Władz Wodnych [13] w Wielkiej Brytanii ustaliło standardy docelowe, do których twórcy KMP powinni dążyć w kalibracji jego parametrów. Zgodność przepływów obserwowanych i obliczonych dla chwilowych pomiarów powinna być następująca:

- 5% pomierzonego przepływu, jeśli stanowi on więcej niż 10% całkowitego zapotrzebowania na wodę w systemie,
- 10% pomierzonego przepływu w pozostałych przypadkach.

Równocześnie ciśnienie pomierzone i symulowane w węzłach powinno być zgodne z dokładnością do:

- 0,5 m lub 5% strat hydraulicznych dla 85% pomiarów,
- 0,75 m lub 7,5% strat ciśnienia dla 95% pomiarów,
- 2,0 m lub 15% strat ciśnienia dla 100% pomiarów.

Zastosowanie zalecanych kryteriów zgodności w sieciach przewymiarowanych nie gwarantuje właściwego dopasowania parametrów w modelu, jeśli użyto bezużyteczne dane pomiarowe [12]. Stwierdzenie to oznacza, że parametry KMP niewłaściwie skalibrowano, gdy wyznaczone na podstawie pomiarów bezwzględne wartości strat hydraulicznych są zbliżone do zalecanych wskaźników zgodności ciśnienia. Niestety twórcy KMP często wykorzystują bezużyteczne dane pomiarowe, które pozyskano z monitoringu przewymiarowanej sieci wodociągowej, gdy wymagane warunki hydraulicznej wiarygodności nie były spełnione [5].

6. Podsumowanie

Na podstawie analizy wielozadaniowego procesu konstruowania komputerowego modelu przepływów w sieci wodociągowej (KMP) zidentyfikowano czynniki ograniczające obszar jego stosowania w praktyce inżynierskiej. W zakresie pozyskiwania danych strukturalnych i operacyjnych ustalono potencjalne źródła błędów, które przyczyniają się do zmniejszenia dokładności odwzorowania stanu rzeczywistego. Aby wyeliminować ich wpływ na pogorszenie jakości KMP należy unikać:

- pochopnego upraszczania rzeczywistej struktury sieci w procesie jej agregacji,
- przyjmowania rzędnych terenu jako wysokości położenia węzłów, gdy dany węzeł reprezentuje w modelu punkt pomiaru ciśnienia,
- błędów kompensacji wskutek wyznaczania sprawności hydraulicznej sieci pierścieniowej na podstawie tylko pomiarów ciśnienia, przy jednoczesnym oszacowaniu natężenia przepływu,
- przyjmowania katalogowych charakterystyk hydraulicznych zainstalowanych pomp bez uwzględniania naturalnej ich zmiany po wieloletniej eksploatacji.

Specjalną rangę nadano specyfikacji czynników związanych z dokładnością oszacowania wielkości i zmienności poborów wody na podstawie danych pomiarowych. Pewne jest, że błędne oszacowanie poborów wody dyskwalifikuje KMP z powodu zaburzeń czasowo-przestrzennego rozkładu strumienia przepływów wody w sieci. Aby uzyskać poprawne odwzorowanie poborów wody w KMP, zaleca się przestrzegać następujące wskazania metodyczne:

- tylko bezpośrednie pomiary produkcji i sprzedaży wody powinny stanowić bazę empiryczną do określenia jej poboru przez każdego odbiorcę,
- dokładność oszacowania strat wody w KMP staje się istotna, jeśli stanowią one powyżej 10% ilości dostarczonej do sieci, a równocześnie odnotowano znaczącą dynamikę zmian ciśnienia w sieci,
- rozsądną dokładność odwzorowania w modelu rzeczywistej zmienności poboru wody można uzyskać poprzez wyznaczenie indywidualnych histogramów (wzorców) tylko dla największych odbiorców,.
- krok czasowy obliczeń trzeba dostosować do dynamiki zjawiska przepływów w konkretnym systemie wodociągowym, aby uniknąć błędu dyskretyzacji,

Spośród czynników decydujących o wiarygodności wyników badań terenowych zwrócono uwagę na konieczność:

1) dostosowania metodyki pomiarów do wielkości sytemu oraz skali przewymiarowania sieci i obiektów, aby zapewnić normatywną prędkość wody w badanych przewodach, a także dostosować liczbę i częstość pomiarów do dynamiki ciśnienia i przepływu.
2) indywidualnego ustalenia liczby punktów pomiarowych i ich zagęszczenia z uwzględnieniem wielkości systemu, jego struktury wewnętrznej (ilość ujęć, pompowni i zbiorników), liczby stref ciśnienia, przestrzennego usytuowania sieci przewodów (zagęszczenia) oraz jej charakterystyki hydraulicznej, wiekowej i materiałowej.
3) zapewnienia podczas realizacji pomiarów ciągłych:
   - koordynacji czasowej wszystkich urządzeń pomiarowych w stosunku do siebie i czasu rzeczywistego z dokładnością do ±15 sekund, aby uniknąć problemów interpretacyjnych,
   - dokładności sprzętu pomiarowego zgodnie z wymaganiami Centrum Władz Wodnych w Wielkiej Brytanii [13].

Szczególną uwagę zwrócono ponadto na współzależność pomiędzy efektywnością kalibracji parametrów modelu a wyborem miary stopnia dokładności oszacowania oraz wartościami wskaźników zgodności dopasowania zalecanymi przez AWWA i WRc. Ich spełnienie nie gwarantuje jednak właściwego dopasowania parametrów w KMP, jeśli bezwzględne wartości strat hydraulicznych w sieci wodociągowej są zbliżone do tych wskaźników.

Bibliografia

[1] AWWA Engineering Computer Applications Committee: Calibration Guidelines for water distribution system modelling. *Reprinted from Proceedings of the 1999 AWWA Information Management and Technology Conference (IMTech), New Orleans, Louisiana, April 1999.* New York: American Water Works Association, pp. 17.

[2] Boulos, P.F., Wood, D.J. Explicit calculation of pipe network parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990,. 116, (11), 1329–1344.

[3] De Schaetzen, W. New approaches to efficient network model calibration. *Internal Research Paper, University of Exeter*, UK, 1999, 12.

[4] Knapik, K.: Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociągowych. *Wyd. Politechniki Krakowskiej*, Kraków, 2000, (279), 140.

[5] Kulbik, M. Hydrauliczna wiarygodność wyników pomiarów terenowych stosowanych do identyfikacji oporności hydraulicznej przewymiarowanych sieci wodociągowych *INSTAL*, 2013, 345, (11), 62-68.

[6] Kulbik, M. Rola i znaczenie zbiornika sieciowego w kształtowaniu hydrauliki i jakości wody w systemie wodociągowym. *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód = Water supply and water quality.* Tom II, PZITS, Poznań, 2012, 93-106.

[7] Kulbik, M. Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych. *Wyd. Politechniki Gdańskiej.* Gdańsk, 2004, (49), 211.

[8] Kwietniewski, M. GIS w wodociągach i kanalizacji. *Wyd. Naukowe PWN.* Warszawa, 2008, 211.

[9] O'Connell, K.M.C. Allocation of Water System Demand in a Hydraulic Model for the City of Vancouver, British Columbia. *Proceedings Annual Conference, June 1992*, Denver, Colorado: AWWA 1992.

[10] Rossman, L.A. EPANET 2 EPA/600/R–00/057. *Environmental Protection Agency*, Cincinnati, Ohio, USA 2000, 200.

[11] Świercz, M., Ulanicki, B. Application of the SIMULINK Package for Transient Analysis in Water Distribution Systems. *International Conference-Computer Applications for Water Supply and Distribution.* De Montfort University, Leicester, UK, September 1993.

[12] Walski, T.M. Model calibration data: the good, the bad, and the useless. *Journal AWWA,* 2000. 92, issue 1, 94–99.

[13] Water Authorities Association & Water Research Centre (WRc). *Network Analysis – A Code of Practice*, Swindon: Water Research Centre UK, 1989, 57.