

Kalibracja modelu hydraulicznego sieci ciepłowniczej

Calibration of the hydraulic model of the district heating network

OLGIERD NIEMYJSKI

DOI 10.36119/15.2020.3.1

W artykule przedstawiono różne aspekty przeprowadzenia kalibracji modeli sieci ciepłowniczej. Szczególną uwagę zwrócono na kontrolę jakości danych, z których budowany jest model hydrauliczny. Często źródłem informacji o systemie ciepłowniczym są bazy danych systemów GIS. Zawierają one bardzo duży zakres danych, lecz dla celów obliczeń symulacyjnych nie są one wystarczające i należy korzystać z innych baz danych, charakterystycznych dla branży ciepłowniczej. Podstawowym kryterium poprawności kalibracji jest uzyskanie akceptowalnej zgodności między wynikami obliczeń a wynikami pomiaru ciśnienia w wybranych miejscach sieci ciepłowniczej. Na przykładzie modelu hydraulicznego strat ciśnienia w rurociągu ciepłowniczym przedstawiono przyczyny powstawania rozbieżności wyników obliczeń i rzeczywistych wartości parametrów wody. Zwrócono uwagę na konieczność przeprowadzenia weryfikacji danych opisujących model sieci ciepłowniczej zgodnie ze stanem rzeczywistym. Ma to szczególne znaczenie przy interpretacji obliczonych wartości ciśnienia wody w rurociągach.

Słowa kluczowe: modelowanie sieci ciepłowniczej, kalibracja modelu hydraulicznego, obliczenia symulacyjne systemu ciepłowniczego.

The article presents various aspects of performing calibration of district heating network models. Special attention has been paid to the quality of data control from which the hydraulic model is built. The GIS databases are the source of information about the district heating system. They contain a very wide range of data, but for the purpose of simulation calculations they are not sufficient and other databases characteristic for the district heating industry should be used. The basic criterion for correctness of calibration is to obtain an acceptable correspondence between the calculation results and the pressure measurement results at selected locations of the district heating network. An example of a hydraulic model of pressure loss in a district heating pipeline shows the reasons for discrepancies between the calculation results and the actual values of water parameters. Attention was drawn to the necessity of verification of data describing the model of heat network according to the real state. It is a particular importance for interpretation of calculated values of water pressure in pipelines.

Keywords: modelling of district heating network, calibration of hydraulic model, computer simulation of heating system.

Wstęp

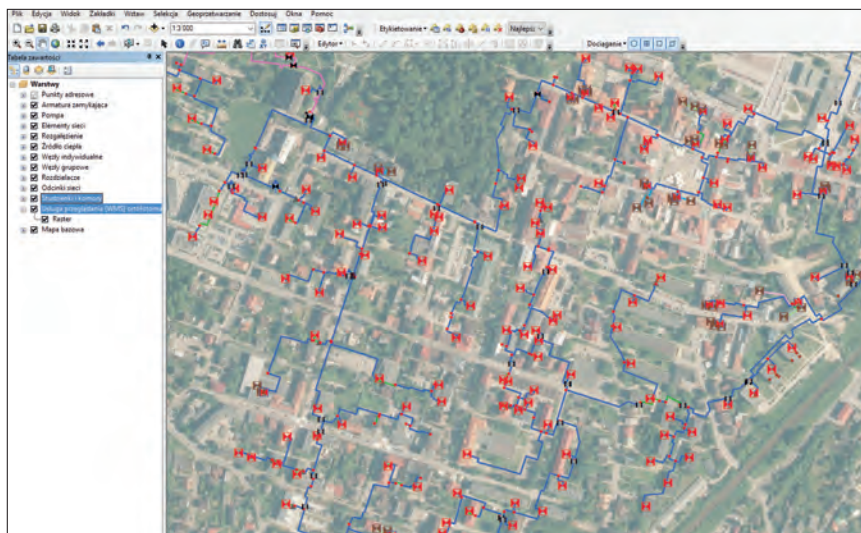
Przedsiębiorstwa ciepłownicze wspomagają proces zarządzania firmą z wykorzystaniem różnych specjalistycznych rozwiązań informatycznych. Standardem stało się wdrożenie systemów GIS jako podstawowego narzędzia do tworzenia map numerycznych. Systemy GIS stanowią źródło danych geoprzestrzennych o strukturze i stanie technicznym sieci ciepłowniczej znajdującej się na terenie danego miasta [1,5]. Mogą być one wykorzystywane do prezentacji przebiegu rurociągów ciepłowniczych i innych elementów uzbrojenia terenu oraz prostych analiz tematyczno-przestrzennych systemu ciepłowniczego (rys.1). Zakres tematyczny oraz sposób wizualizacji informacji zawartych w bazach danych systemów GIS jest bardzo szeroki. Dodat-

kowo, zastosowanie specjalistycznych „nakładek”, zwiększa możliwości prezentacji danych zgodnie z potrzebami użytkowników. Z uwagi na duży zakres tematyczny informacji zawartych w bazie danych, bardzo często systemy GIS stanowią źródło danych dla innych, specjalistycznych programów. Są nimi także programy obliczeniowe służące do przeprowadzania symulacji pracy systemów ciepłowniczych. Programy obliczeniowe przepływu wody i strat ciśnienia w sieci rurociągów ciepłowniczych bardzo często stanowią podstawowe narzędzie do wspomagania podejmowania decyzji i wykonywania bieżących zadań w przedsiębiorstwie ciepłowniczym. W ramach zadań związanych z eksploatacją systemu dystrybucji ciepła, obliczenia symulacyjne pozwalają ocenić możliwości przesyłowe rurociągów, planować optyma-

lizację topologii sieci w celu zwiększenia zasięgu dostawy ciepła i wzrostu bezpieczeństwa dostawy ciepła do odbiorców. Symulacje komputerowe są często wykorzystywane w pracach związanych z planowaniem remontów i modernizacji sieci ciepłowniczej oraz określania skutków wyłączenia z ruchu remontowanych lub modernizowanych odcinków sieci ciepłowniczej. W przypadku wielopięsieniowej struktury sieci rurociągów, obliczenia symulacyjne odgrywają kluczową rolę w sytuacjach awaryjnych, wskazując miejsca zamknięć zasuw w celu umożliwienia usunięcia awarii oraz umożliwienia dostawy ciepła do wszystkich odbiorców ciepła bez pogorszenia parametrów czynnika grzewczego.

Warunkiem koniecznym wykonywania powyższych obliczeń symulacyjnych

Dr inż. Olgierd Niemyjski – <https://orcid.org/0000-0002-2678-1883>, Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa. Adres do korespondencji/Corresponding author: olgierd.niemyjski@pw.edu.pl



Rys. 1
Baza danych sieci ciepłowniczej w systemie GIS – ArcMap (Źródło: Gis-Expert)
Fig. 1 Database of district heating network in GIS system – ArcMap (Source: Gis-Expert)

jest posiadanie modelu systemu ciepłowniczego zawierającego trzy podstawowe składniki: źródła ciepła, sieć ciepłowniczą i węzły ciepłone. Najczęściej modele sieci ciepłowniczej, a w szczególności ich topologia, tworzone są z wykorzystaniem danych uzyskanych z systemu GIS, jeżeli został on wcześniej wdrożony w firmie. Pozostałe składowe modelu systemu ciepłowniczego tj. źródła ciepła i węzły ciepłone, muszą być uzupełniane danymi pochodzącymi z innych baz danych, ponieważ bazy danych systemów GIS nie zawsze zawierają wystarczający zakres informacji wymaganych do przeprowadzania symulacji pracy węzłów ciepłonych i źródeł ciepła. Kompletność danych wejściowych jest warunkiem koniecznym do wykonania obliczeń przepływu wody i strat ciśnienia w rurociągach ciepłowniczych. Natomiast istotą oceny efektywności obliczeń i przydatności modelu obliczeniowego jest uzyskanie zbieżności uzyskanych wyników obliczeń z rzeczywistymi wartościami parametrów wody w sieci ciepłowniczej. W celu uzyskania powyższej zgodności należy przeprowadzić kalibrację modelu hydraulicznego sieci ciepłowniczej, ponieważ rzeczywiste charakterystyki hydrauliczne rur są różne od teoretycznych, podawanych przez producentów.

Model hydrauliczny systemu ciepłowniczego

Podstawą wykonania obliczeń wartości strumienia i strat ciśnienia wody płynącej w rurociągach sieci ciepłowniczej jest zbudowanie modelu obliczeniowego systemu ciepłowniczego. Model taki składa się z trzech podstawowych części: model źródeł ciepła, model sieci ciepłowniczej,

model węzłów ciepłonych. Każdy z tych modeli posiada zestaw charakterystyk hydraulicznych dla każdego elementu wchodzącego w jego skład.

Model źródła ciepła. W zależności od zakresu wymaganych danych i wykonywanych obliczeń przez programy symulacyjne, model źródła ciepła może dotyczyć procesów technologicznych produkcji ciepła i energii elektrycznej, obiegów wodnych w obrębie ciepłowni, procesów spalania paliwa itd. Najczęściej programy symulacyjne nie wymagają złożonych modeli technologicznych źródeł ciepła. Ograniczają się jedynie do określenia parametrów wody sieciowej na wyjściu ze źródeł ciepła tj.: wartości ciśnienia dyspozycyjnego, temperatury wody zasilającej i np. ciśnienia wody w rurociągu powrotnym.

Model sieci ciepłowniczej. Model sieci ciepłowniczej składa się z matematycznego zapisu układu i struktury topologii sieci w postaci grafu oraz grupy modeli matematycznych opisujących charakterystykę hydrauliczną poszczególnych elementów sieci ciepłowniczej. Graf sieci odzwierciedla układ połączeń ze sobą poszczególnych odcinków sieci. Zawiera on dwa rodzaje elementów: łuki i węzły. Łuki grafu odnoszą się do odcinków sieci a węzły do punktów połączenia łuków. Elementy grafu są odpowiednio ponumerowane w celu ich identyfikacji oraz zapisu grafu w pamięci komputera w postaci macierzy i przeprowadzenia obliczeń numerycznych. Węzły dotyczą miejsc połączeń odcinków sieci (rur) i mogą pełnić następujące funkcje: połączenie rurociągów, źródło ciepła, węzeł ciepłony. Punkt węzłowy opisują między innymi: współrzędne geodezyjne (x,y), rzędna wysokościowa (z). Szczególnie ważną daną jest wartość rzędnej

wysokościowej (z), ponieważ wpływa ona na obliczaną wartość ciśnienia manometrycznego w punkcie węzłowym sieci ciepłowniczej. Na etapie kalibracji modelu jest ona porównywana z rzeczywistą wartością ciśnienia wody w rurociągu odczytaną z manometru lub systemu monitoringu.

Drugi rodzaj elementów grafu – łuki – reprezentują w grafie: odcinki (rurociągi) sieci ciepłowniczej, armaturę, przepompownie, dla których zdefiniowane są odpowiednie modele matematyczne uzależniające wartość strat ciśnienia od wartości strumienia wody przepływającej przez dany element. Model hydrauliczny odcinka rurociągu dotyczy opisu zjawiska tarcia strumienia wody o wewnętrzną powierzchnię rury, powodując stratę ciśnienia wody w rurze zwaną stratą liniową. W obliczeniach sieci ciepłowniczych wykorzystywane są równania uzależniające wartość liniowych strat ciśnienia wody w rurociągach od wartości strumienia wody oraz parametrów charakteryzujących rury. Zależność tą opisuje równanie Darcy-Weisbacha:

$$\Delta p_L = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2} \rho, \text{ Pa} \quad (1)$$

gdzie:

Δp_L – liniowa strata ciśnienia, Pa,
 λ – współczynnik oporu liniowego,
 L – długość rury, m,
 d – średnica wewnętrzna rury, m,
 v – prędkość przepływu wody, m/s,
 ρ – gęstość wody, kg/m³.

W powyższym wzorze, gęstość wody określana jest na podstawie wzorów aproksymujących zmienność wartości gęstości wody w zależności od temperatury czynnika. Dokładność obliczeń modelujących liniowe straty ciśnienia zależy głównie od dokładności określenia wartości współczynnika oporów liniowych λ . Istnieje kilka sposobów wyznaczenia wartości współczynnika oporów liniowych opracowanych przez: Prandtla, Nikuradsego, Colebrooka, White'a. Panuje powszechnie przekonanie potwierdzone doświadczeniem Autora opracowania, że w sieciach ciepłowniczych na skutek wysokiej temperatury wody, kinematyczny współczynnik lepkości wody ma małą wartość, w związku z tym przepływ jest burzliwy i odbywa się w strefie kwadratowej zależności oporów liniowych. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład prędkości przepływu wody w rurociągach w okresie zimowym dla jednego z systemów ciepłowniczych w Polsce. Z tego powodu do obliczania wartości współczynnika oporów liniowych λ można stosować wzór Nikuradsego:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,14 + 2\lg\frac{1}{\varepsilon}\right)^2}, \quad \varepsilon = \frac{k}{d} \quad (2)$$

gdzie:

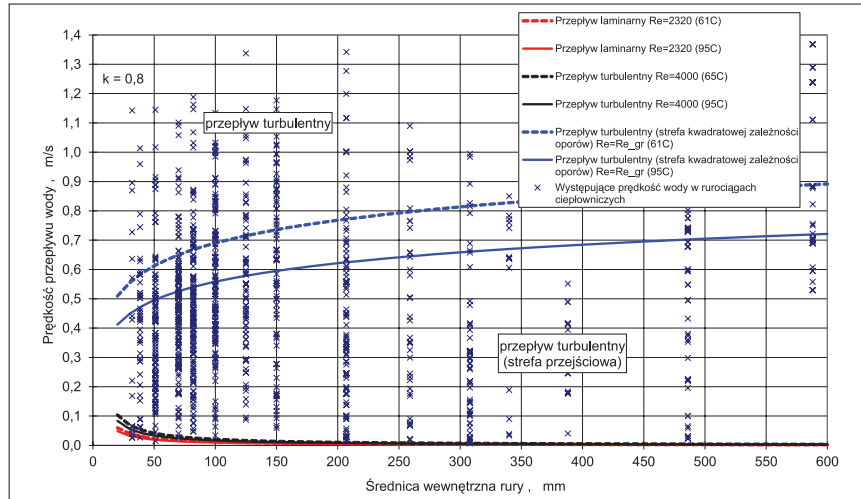
- ε – względna chropowatość rury,
- d – średnica wewnętrzna rury, m,
- k – chropowatość bezwzględna powierzchni wewnętrznej rury, m.

typ węzła tzn.: jednofunkcyjny lub dwufunkcyjny w układzie równoległym, szeregowo-równoległym, wymagane ciśnienie dyspozycyjne itd. Na tej podstawie obliczany jest strumień wody sieciowej przepływający przez węzeł cieplny oraz określone są warunki dostawy ciepła czyli dotrzymanie wymaganego ciśnienia dyspozycyjnego. Inne programy modelują węzły

w celu ograniczenia kosztów dostawy ciepła do odbiorców końcowych. Optymalizacja ta wykonywana jest indywidualnie dla każdego systemu ciepłowniczego uwzględniając strukturę jego sieci ciepłowniczej i właściwości układów technologicznych węzłów cieplnych. Rozszerzony model węzła cieplnego wymaga dostarczenia danych o urządzeniach technologicznych zamontowanych w węzłach cieplnych, takich jak: wymienniki ciepła, armatura, elementy regulacyjne i inne. Analiza procesów wymiany ciepła zachodzących w wymiennikach ciepła rozszerza obszar stosowania programów symulacyjnych w zakresie optymalizacji parametrów pracy dla systemu ciepłowniczego oraz diagnostyki możliwości obniżenia temperatury wody sieciowej.

Kalibracja modelu sieci ciepłowniczej

Podstawowym kryterium poprawności wykonanego modelu sieci ciepłowniczej jest zgodność otrzymanych wyników obliczeń z wartościami parametrów wody zmierzonymi w terenie. Z uwagi na zmiany właściwości charakterystyk hydraulicznych elementów składowych systemu ciepłowniczego w okresie jego eksploatacji wymagane jest przeprowadzenie tak zwanej kalibracji modelu sieci ciepłowniczej. Kalibracja jest procesem dostosowania cech elementów modelu w celu uzyskania akceptowalnej zgodności wyników obliczeń z rzeczywistymi parametrami wody panującymi w rurociągach. Istotą kalibracji jest porównywanie wyników pomiarów wielkości ciśnienia wody w rurociągach z wartościami obliczonymi na podstawie zdefiniowanych modeli obliczeniowych [2,3,4]. Jednak kalibracja powinna być poprzedzona weryfikacją danych o sieci



Rys. 2
Rozkład prędkości przepływu wody w odcinkach sieci ciepłowniczej, w okresie zimowym dla jednego z systemów ciepłowniczych w Polsce
Fig.2 Distribution of water flow velocity in the heating network pipes, in winter season, for one of the heating systems in Poland

Kolejnym składnikiem modelu strat ciśnienia w rurociągach sieci ciepłowniczej jest model oporów miejscowych wynikający z obecności takich urządzeń, jak np.: zasuw, kolana, miejscowe przewężenia przekroju rury i wiele innych. Model matematyczny określony jest następującym równaniem:

$$\Delta p_M = \zeta \frac{v^2 \rho}{2}, \text{ Pa} \quad (3)$$

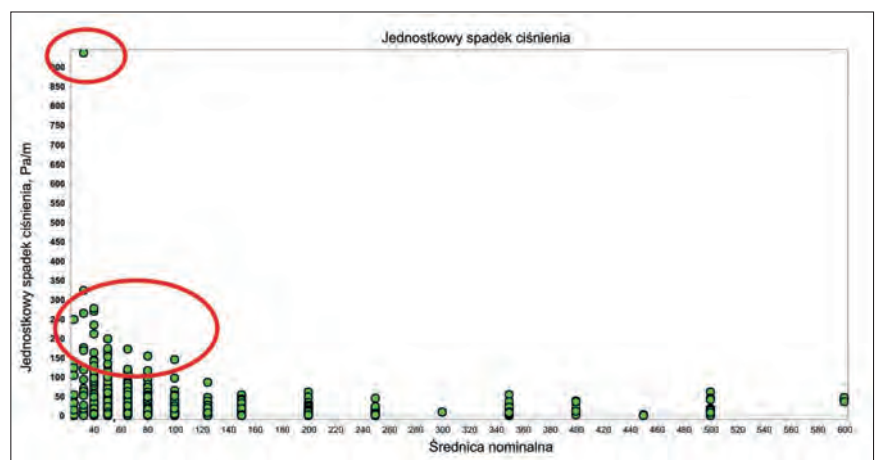
gdzie:

- ζ – współczynnik oporu miejscowego.

Parametrem decydującym o wartości miejscowych strat ciśnienia jest współczynnik oporów miejscowych ζ . Określany jest on na podstawie badań doświadczalnych, z których wynika, że jego wartość zależy od kształtu geometrycznego elementu (przeszkody), liczby Reynoldsa oraz chropowatości ścianki przewodu. W strefie przepływu turbulentnego wartości współczynników ζ są prawie stałe.

Model węzłów cieplnych. Najczęściej popularne programy symulacyjne modelują węzły cieplne w sposób uproszczony tj. traktując go jako odbiór ciepła. Odbiorcy ciepła charakteryzują się następującymi wielkościami: moc zamówiona na cele centralnego ogrzewania i/lub ciepłej wody,

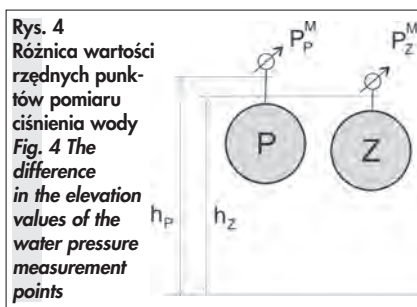
ciepłe bardziej szczegółowo poprzez analizowanie procesów technologicznych i wymiany ciepła w urządzeniach zamontowanych w węzle cieplnym. Daje to większe możliwości symulacji pracy systemów ciepłowniczych dla różnych warunków zapotrzebowania na ciepło miasta. Innym zastosowaniem takiego modelowania węzłów cieplnych jest możliwość przeprowadzenia optymalizacji parametrów (temperatury) wody czyli korekty istniejącej tabeli temperatur dla systemu ciepłowniczego



Rys.3
Wykres jednostkowych strat ciśnienia w rurociągach
Fig. 3 Chart of pressure losses in pipelines

ciepłowniczej zebranych w bazach danych systemów GIS lub innych programach obliczeniowych. Na etapie tworzenia bazy danych istnieje duże prawdopodobieństwo popełnienia błędów. Mogą one powstać przy wprowadzaniu danych lub wynikać z rozbieżności między stanem wiedzy o danym fragmencie sieci ciepłowniczej a stanem rzeczywistym. Najprostszym sposobem przeprowadzenia weryfikacji podstawowych danych dotyczących rurociągów jest analiza wartości jednostkowych strat ciśnienia w rurociągach. Wartości większe od 100 Pa/m mogą świadczyć o błędnie wprowadzonych danych w zakresie średnic i długości rur lub zawyżonych wartościach przepływu wody w rurociągach. Na rysunku 3 przedstawiono wykres wartości jednostkowych strat ciśnienia w rurociągach dla jednego z systemów ciepłowniczych w Polsce. Wyróżniono odcinki sieci ciepłowniczej, które wymagają przeprowadzenia weryfikacji danych. Podobną weryfikację należy wykonać dla rurociągów, w których występują małe wartości jednostkowych strat ciśnienia.

Bardzo istotną czynnością w procesie kalibracji jest weryfikacja wartości strumienia wody dla węzłów cieplnych. Najczęściej jest on liczony na podstawie zadeklarowanej wartości zapotrzebowania na moc cieplną (c_o , c_w , i inne) odbiorców ciepła, która odpowiada mocy zamówionej. Wartość ta jest najczęściej większa od mocy rzeczywistej węzła cieplnego i wpływa na obliczenia zawyżonych wartości strat ciśnienia w rurociągach. Jest to bardzo ważne, aby przepływ wody w rurociągach odpowiadał wartościom rzeczywistym, ponieważ wartości strat ciśnienia w elementach sieci ciepłowniczej są wprost proporcjonalne do kwadratu wartości strumienia wody przepływającej przez dany element (1,3). Kolejnym ważnym parametrem mającym wpływ na jakość kalibracji są rzędne punktów pomiarowych. Powinny one mieć tą samą wartość zarówno w modelu, jak i w miejscu pomiaru. Kalibracja polega na porównaniu wartości ciśnienia wody w wybranych punktach sieci ciepłowniczej. Różnica wartości rzędnych w modelu i w punkcie pomiaru wpływa na rozbieżności w wyznaczaniu wartości ciśnienia. Można zmniejszyć wpływ tych błędów na kalibrację modelu hydraulicznego poprzez porównywanie wartości ciśnienia dyspozycyjnego jako różnicy między wartościami ciśnienia wody w rurociągu zasilającym i powrotnym. Jest to możliwe w przypadku, gdy rzędne manometrów pomiarowych zamontowanych na obu rurach (zasilanie i powrót) mają te



same wartości. Ma to uzasadnienie szczególnie w przypadku kalibracji modeli sieci ciepłowniczych, gdzie ważne są wartości ciśnienia dyspozycyjnego. W szczególnych przypadkach rzędne miejsc pomiaru ciśnienia mogą być różne. Na rysunku 4 przedstawiono taki przypadek. Wartości rzędnych dla manometrów zamontowanych na rurociągu zasilającym i powrotnym są różne z uwagi na występujące różnice w długości rurek impulsowych dla obu manometrów oraz rzędnych rur.

Jeżeli w modelu sieci ciepłowniczej nie uwzględniono tych rozbieżności, wówczas obserwujemy występowanie dodatkowego błędu przy porównywaniu wyników obliczeń z rzeczywistymi wartościami ciśnienia dyspozycyjnego. Wartość tego błędu wynosi: $\Delta P = \rho g(h_p - h_z)$. Na przykład: przy różnicy wartości rzędnych punktów pomiaru ciśnienia wynoszącej 10 cm, której nie uwzględniono w modelu obliczeniowym, błąd wynosi około 1 kPa.

Podobne problemy występują w przypadku porównywania wartości ciśnienia wody w rurociągach.

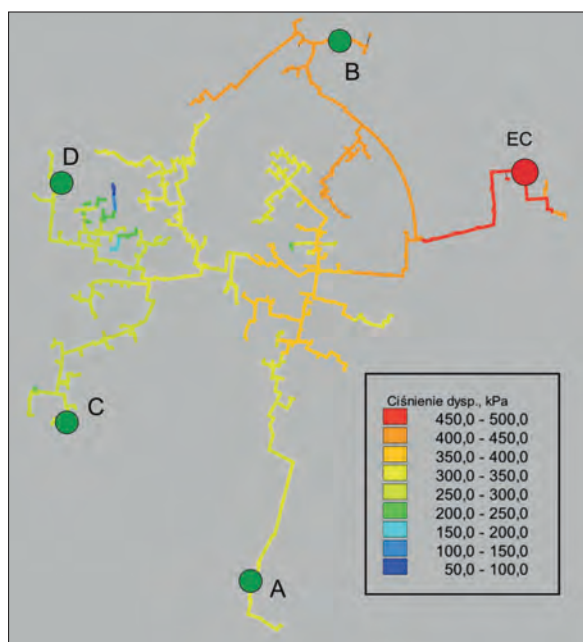
Wartości ciśnienia wody w rurociągach mają jednak mniejsze znaczenie, ale ważne jest, aby nie przekraczały one wartości granicznych pod względem bezpie-

czeństwa pracy sieci ciepłowniczej oraz funkcjonowania urządzeń technologicznych np.: nie były niższe od wartości minimalnych w króćcach ssawnych pomp.

Powodem braku zgodności wyników obliczeń z rzeczywistymi wartościami parametrów wody w rurociągach są zmiany charakterystyk hydraulicznych poszczególnych elementów systemu. W kolejnych latach eksploatacji sieci ciepłowniczej następuje naturalna zmiana chropowatości wewnętrznych powierzchni rur i innych elementów w wyniku obecności w wodzie sieciowej tleny i innych związków chemicznych powodujących korozję i wytrącanie osadów w wodzie. Opór hydrauliczny rur w modelu (1) opisany jest wartością współczynnika oporu liniowego – λ , natomiast dla armatury jest to współczynnik oporów miejscowych – ζ (3). W procesie kalibracji można korygować wartości współczynników oporów hydraulicznych. W artykule [6] przedstawiono wrażliwość modeli hydraulicznych rurociągów na zmiany danych wejściowych. Korekta wartości tych współczynników może być niewystarczająca, aby uzyskać akceptowalną zbieżność wyników obliczeń z wartościami zmierzonymi. Dlatego czasem stosuje się tzw. współczynniki kalibracji, które nie mają znaczenia fizycznego a jedynie doprowadzają do zgodności porównywanych wielkości. Natomiast w przypadku zaobserwowania dużego dławienia ciśnienia w rurociągu, przekraczającego zakres możliwości oporności hydraulicznej wewnętrznych powierzchni rur, stosuje się dodatkowe, zastępcze opory miejscowe.

Poniżej przedstawiono wyniki kalibracji modelu hydraulicznego wykonanej dla przykładowej sieci ciepłowniczej (rys.5).

Rys.5
Mapa sieci ciepłowniczej z zaznaczonymi punktami pomiarowymi
Fig.5 The map of district heating network with marked measuring points



System ciepłowniczy zasilany jest z jednego źródła ciepła. Ciepło dostarczane jest do 260 węzłów ciepłowniczych o łącznej mocy zamówionej ok. 45 MW. Z uwagi na wprowadzenie do bazy danych informacji o zapotrzebowaniu na ciepło odbiorców ciepła w formie wartości mocy zamówionych, konieczne było przeprowadzenie weryfikacji mocy rzeczywistej systemu w celu osiągnięcia zgodności wartości całkowitego strumienia wody sieciowej płynącej w sieci rurociągów w warunkach rzeczywistych i w modelu hydraulicznym. Powyższy warunek został spełniony przy wprowadzeniu redukcji mocy węzłów o 80%. W przypadku braku monitoringu wielkości przepływu wody przez wszystkie węzły cieplne, jest to jedyny sposób na weryfikację (kalibrację) wartości strumienia wody płynącej w systemie ciepłowniczym. Należy jednak spodziewać się występowania lokalnych błędów określania tą metodą rzeczywistych wartości strumienia wody płynącej do węzłów cieplnych.

Kalibrację modelu hydraulicznego przeprowadzono z wykorzystaniem pomiarów wartości ciśnienia wody w czterech punktach sieci ciepłowniczej. Miejscem pomiaru były węzły ciepłownicze znajdujące się na końcach gałęzi sieci ciepłowniczych. Lokalizację punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 5 i oznaczono literami: A, B, C, D. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 1.

Kalibracja modelu hydraulicznego polegała na:

- weryfikacji wartości strumienia wody płynącej w rurociągach,
- wprowadzeniu korekty wartości współczynników chropowatości wewnętrznych powierzchni rurociągów,
- wprowadzeniu dodatkowych współczynników korekcyjnych dla obliczenia strat ciśnienia w rurociągach. Współczynniki te wprowadzono dla odcinków sieci, w których wartości chropowatości rur przekraczały wartości graniczne.

Wyniki obliczeń wartości ciśnienia wody w rurociągach zasilających i powrotnych dla punktów pomiarowych zestawiono w tabeli 1. Porównując wartości pomiarów ciśnienia wody z wartościami obliczo-

Tab. 1 Porównanie wyników pomiaru i obliczeń wartości ciśnienia wody w punktach pomiarowych
Tab. 1 Comparison of measurement results and calculations of water pressure values at measuring points

Punkt	-	Ciśnienie (zasilanie) Pz, kPa	Ciśnienie (powrót) Pp, kPa	Ciśnienie dysp. ΔPd, kPa
A	Pomiar	930	592	338
	Obliczenia	914	602	312
	Błąd, %	1,7	-1,7	7,7
B	Pomiar	1037	585	452
	Obliczenia	982	572	410
	Błąd, %	5,3	2,2	9,3
C	Pomiar	1078	871	207
	Obliczenia	1096	841	255
	Błąd, %	-1,7	3,4	-23,2
D	Pomiar	1105	842	263
	Obliczenia	1117	863	254
	Błąd, %	-1,1	-1,3	3,4

nymi według skalibrowanego modelu hydraulicznego można zauważyć występowanie pewnych różnic pomiędzy porównywanymi wartościami. Dla wartości ciśnienia wody wynoszą one poniżej 10%, a dla wielkości ciśnienia dyspozycyjnego maksymalna wartość błędu wynosi 23%. Dla badanego systemu ciepłowniczego błędy kalibracji mieściły się w zakresie wartości akceptowalnych. Należy zwrócić uwagę, że obliczenia oparte na modelu hydraulicznym sieci ciepłowniczej, dotyczą w większości przypadków, stanów statycznych. Systemy ciepłownicze są obiektami dynamicznymi, gdzie strumień wody płynącej w rurociągach jest zmienny w czasie. Zmiany przepływu wody wywołane są zmianami przepływu wody w węzłach ciepłych związanych z pracą armatury regulacyjnej w gałęziach ciepłej wody i centralnego ogrzewania.

Podsumowanie

Symulacje komputerowe pracy systemu ciepłowniczego mają szerokie zastosowanie w podejmowaniu decyzji na etapie projektowania, eksploatacji i w sytuacjach awaryjnych sieci ciepłowniczej. Efektywność modeli hydraulicznych zastosowanych w obliczeniach numerycznych uwarunkowana jest otrzymaniem zgodności wyników obliczeń z rzeczywistymi parametrami wody panującymi w rurociągach. W tym celu konieczne jest przeprowadze-

nie weryfikacji danych opisujących model oraz kalibracji charakterystyk hydraulicznych jego składników. Należy jednak zauważyć, że z powodu dużej liczby niewiadomych i współczynników opisujących modele hydrauliczne, absolutnie dokładna kalibracja nie jest możliwa. Dokładność kalibracji wzrasta wraz z liczbą wytypowanych punktów pomiarowych, co przekłada się na wzrost kosztów i czasu badań poligonowych. Istnieje więc pewien kompromis między dążeniem do osiągnięcia znacznej dokładności a minimalizacją kosztów przeprowadzenia pomiarów w terenie. Zaprezentowany przykład kalibracji modelu hydraulicznego niewielkiej sieci ciepłowniczej potwierdza powyższą tezę.

LITERATURA

- [1] Niemyjski O. Systemy Informacji Geograficznej – GIS wykorzystywane w przedsiębiorstwach ciepłowniczych, COW 8/2019, ss. 295-299,
- [2] Grzenda M., Sudół M., Gębski W., Modelowanie systemu dystrybucji wody na przykładzie dużej aglomeracji miejskiej, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 3/2010
- [3] Bhawe P., Grupta R., Analysis of Water Distribution Network, Alpha Science, Oxford, 2006
- [4] Walski T., Chase D., Advanced Water Distribution Modeling and Management, Haestad Press, 2003
- [5] Nordin J. Zastosowanie GIS w ciepłownictwie, Instal 5/2018, s. 5 - 7
- [6] Niemyjski O., Wpływ danych na dokładność obliczeń sieci ciepłowniczych, Instal 12/2016, s. 9 - 12

„bioz – bezpieczeństwo i ochrona zdrowia na budowie” autor: Krzysztof Karol Booss

Książka zawiera liczne komentarze ułatwiające opracowanie i realizację planu bioz, w których zwrócono uwagę na zagrożenia wynikające z „niedociągnięć” obowiązujących przepisów prawnych.

Z książką tą powinien też zapoznać się inwestor w celu zapewnienia bezpiecznej realizacji swojego obiektu budowlanego, za co zgodnie z Prawem budowlanym ponosi odpowiedzialność.

Książkę wydał i rozpowszechnił:

Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”
02-674 Warszawa, ul. Marynarska 14, tel/fax 22/843 77 71
e-mail: redakcja@informacjainstal.com.pl
www.informacjainstal.com.pl
Cena książki 35 zł + VAT

