POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Olgierd Niemyjski

Modelowanie procesów cieplno-hydraulicznych w sieciach ciepłowniczych

WARSZAWA

2000

+ 1 spreadsheet

697.34:519.863:043

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Olgierd Niemyjski

Modelowanie procesów cieplno-hydraulicznych w sieciach ciepłowniczych

Promotor:
Prof. dr hab. inż.
Stanisław Mańkowski

WARSZAWA 2000

I4

POLITECHNIKA WARSZAWSKA (1)
A.005503
Biblioteka Główna

Serdecznie dziękuję mojemu Promotorowi
Panu prof. dr hab. inż. Stanisławowi Mańkowskiemu
za okazaną pomoc w realizacji pracy.

Olgierd Niemyjski

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP 1

2. CEL I ZAKRES PRACY 4

3. SYNTEZA STANU BADAŃ 6

4. MODELOWANIE PROCESÓW HYDRAULICZNYCH ZACHODZĄCYCH W SYSTEMACH SIECI CIEPŁOWNICZYCH 10

4.1 Odwzorowanie struktury sieci ciepłowniczej na graf 11

4.2 Model przepływu wody w odcinkach sieci ciepłowniczej 16

4.3 Ogólna metoda obliczania przepływów wody w sieciach pierścieniowych 24

4.4 Zastosowanie technologii macierzy rzadkich w obliczeniach symulacyjnych sieci ciepłowniczych 33

4.5 Wnioski 49

5. MODELOWANIE PROCESÓW STRAT CIEPŁA SIECI CIEPŁOWNICZYCH 50

5.1 Przegląd uproszczonych metod obliczania strat ciepła sieci ciepłowniczych w stanach ustalonych 54

5.2 Dwuwymiarowy model nieustalonych procesów strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych. 61

5.2.1 Sformułowanie i definicja dwuwymiarowego modelu strat ciepła 62
5.2.2 Warunki brzegowe 68
5.2.3 Sformułowanie układy równań bilansowych 75
5.2.4 Obliczenia numeryczne 76
5.2.5 Wpływ błędu określenia danych wejściowych na wyniki obliczeń 79
5.2.6 Wnioski 82

5.3 Uproszczony model dynamiki strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych 83

5.3.1 Analiza porównawcza metod określania oporu przenikania ciepła przez gruntu 84
5.3.2 Założenia i definicja modelu uproszczonego 87
5.3.3 Warunki brzegowe 94
5.3.4 Obliczenia testujące poprawność modelu 98
5.3.5 Wnioski 99

5.4 Program komputerowy do symulacji nieustalonych procesów strat ciepła sieci ciepłowniczych 100

6. MODELOWANIE PROCESÓW TRANSPORTU ENERGII CIEPLNEJ RUROCIĄGAMI SIECI CIEPŁOWNICZEJ 104

6.1 Przegląd numerycznych metod modelowania procesów transportu ciepła.....106
6.1.1 Metoda elementów 106
6.1.2 Metoda węzłowa 108

6.2 Sformułowanie modelu transportu energii cieplnej.....110
6.2.1 Warunki brzegowe.....114
6.2.2 Jakość aproksymacji 116

6.3 Wnioski 118

7. BAZY DANYCH SIECI CIEPŁOWNICZYCH 119

8. WERYFIKACJA MODELI PROCESÓW CIEPLNO-HYDRAULICZNYCH WYNIKAMI POMIARÓW POLIGONOWYCH 121

8.1 Badania jakości modelowania procesów cieplno-hydraulicznych przy skokowym wymuszeniu temperatury wody sieciowej.....121
8.1.1 Aparatura pomiarowa 122
8.1.2 Opis stanowisk badawczych 124
8.1.3 Wyniki pomiarów 128

8.2 Badania poligonowe przepływu fali temperaturowej w rurociągach sieci ciepłowniczej w rzeczywistych warunkach pracy systemu 130
8.2.1 Opis obiektu badań.....130
8.2.2 System rejestracji parametrów wody sieciowej.....131
8.2.3 Wyniki pomiarów 133
8.2.4 Porównanie wyników badań z wynikami obliczeń symulacyjnych.....135

8.3 Wnioski 138

9. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA SYMULACJI PROCESÓW CIEPLNO-HYDRAULICZNYCH W ROZPOZNAWANIU WŁAŚCIWOŚCI SYSTEMÓW CIEPŁOWNICZYCH 139

9.1 Wpływ niedociążenia systemu ciepłowniczego na wielkość strat ciepła oraz schłodzenia wody sieciowej.....141

9.2 Zmiany strat ciepła w ciągu roku 144

9.3 Wpływ dobowych zmian zapotrzebowania ciepła na wartość strat ciepła w okresie letnim 145

9.4 Udział sieci magistralnych i rozdzielczych w całkowitych stratach ciepła.....146

9.5 Wnioski 147

10. WNIOSKI KOŃCOWE..... 148

11. PIŚMIENNICTWO 150

12. ZAŁĄCZNIKI 158

12.1 Wyniki obliczeń testowych zbieżności modelu dwuwymiarowego z modelem uproszczonym 158

12.2 Wyniki obliczeń dla przykładów zastosowania symulacji procesów cieplno-hydraulicznych 162

12.3 Wyniki pomiarów fali temperaturowej 163

12.4 Wyniki rejestracji parametrów wody sieciowej na terenie Politechniki Warszawskiej w dniach: 1.02.1999 - 14.02.1999 168

12.5 Wyniki weryfikacji modeli procesów cieplno-hydraulicznych 170

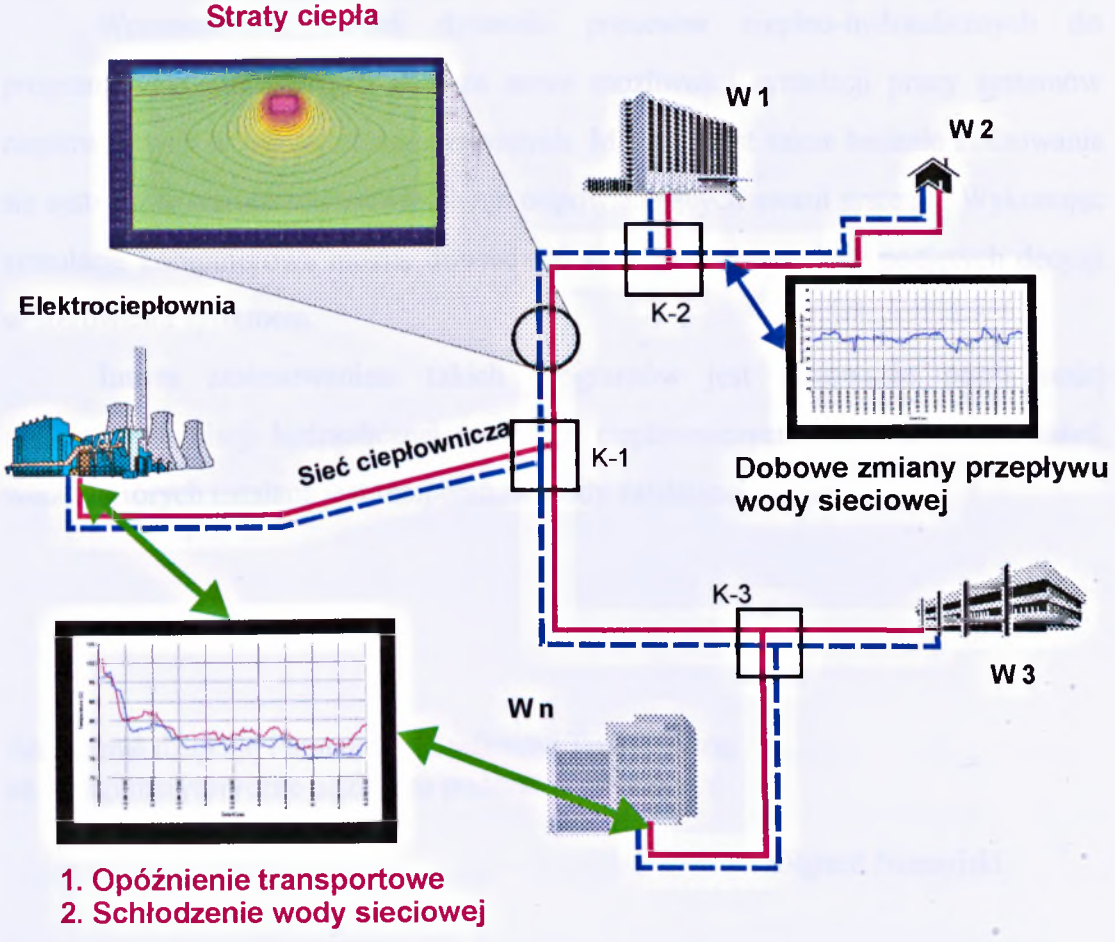
1. WSTĘP

Zmiany gospodarcze jakie miały miejsce w Polsce w latach 90-tych spowodowały, że Przedsiębiorstwa Energetyki Cieplnej (PEC) zmuszone zostały do racjonalizacji wytwarzania i przesyłania energii cieplnej do odbiorców ciepła. W tym celu prowadzone były prace modernizacyjne związane z automatyzacją źródeł ciepła, węzłów cieplnych oraz uszczelnianiem i wymianą sieci ciepłowniczej. Stopniowy wzrost zautomatyzowania węzłów cieplnych w systemach ciepłowniczych z jednej strony zwiększał jakość dostawy energii cieplnej do odbiorców, z drugiej zaś strony powodował niestabilność przepływu wody sieciowej wynikającą z pracy zaworów regulacji automatycznej dostosowującej ilość strumienia wody sieciowej do chwilowego zapotrzebowania budynków na energię cieplną. Wzrost liczby zautomatyzowanych węzłów ciepłowniczych w systemie wymusił wprowadzenie zmian sposobu regulacji sieci z regulacji jakościowej na ilościowo-jakościową- [24] uwzględniającą dobową zmienność wody sieciowej.

Regulacje hydrauliczne systemów ciepłowniczych wykonywane są w oparciu o obliczenia z użyciem specjalistycznych programów komputerowych. Najbardziej znanymi w Polsce tego typu programami są: PSR oraz NetzCAD SCW [66], [105], [106], które przystosowane są do wykonywania obliczeń przepływu wody sieciowej w warunkach regulacji jakościowej przy niewielkim stopniu zautomatyzowania systemów ciepłowniczych. Pozwalają one rozwiązywać jedynie problemy analizy przepływu wody w zadanym stanie pracy systemu przy ustalonych przepływach wody sieciowej w węzłach ciepłowniczych, określanych najczęściej na podstawie obliczeniowych wielkości parametrów pracy węzłów oraz obliczeniowych wartości temperatury wody sieciowej. Algorytmy tych programów nie uwzględniają zatem strat ciepła rurociągów oraz schłodzenia wody na drodze od źródła ciepła do odbiorców ciepła. Znajomość wielkości spadku temperatury wody sieciowej jest wymagana między innymi przy wykonywaniu projektów regulacji ilościowo-jakościowej dla systemów ciepłowniczych. Do tej pory wielkość ta była szacowana na

podstawie wieloletniego doświadczenia projektantów lub pomiarów temperatury wody sieciowej.

Wspomniane programy, analizują statyczne stany pracy systemów ciepłowniczych. Analizując zmienność wartości przepływu wody sieciowej w ciągu doby należy uwzględniać w obliczeniach dynamikę procesów cieplno-hydraulicznych towarzyszących przesyłowi energii cieplnej siecią rurociągów. Należą do nich między innymi: straty ciepła, procesy rozchodzenia się fali temperaturowej w sieci przejawiające się tzw „opóźnieniem transportowym sieci", zmienność poboru energii cieplnej węzłów ciepłowniczych powodowana zmianami warunków atmosferycznych (temperatura powietrza zewnętrznego) oraz zmiennością poboru ciepłej wody użytkowej. Na rysunku (Rys. 1–1) zaznaczono miejsca występowania tych zjawisk w systemach sieci ciepłowniczych..



Rys. 1–1 Procesy cieplno-hydrauliczne występujące w sieciach ciepłowniczych

Brak implementacji wymienionych modeli procesów w istniejących programach komputerowych ogranicza wykorzystanie ich do obliczeń cieplnych i hydraulicznych systemów ciepłowniczych, w których parametry zmieniają się w sposób dynamiczny. Istnieje zatem potrzeba stworzenia takiego oprogramowania, które w pełni modeluje system ciepłowniczy wraz z dynamiką jego procesów cieplno-hydraulicznych. Powstanie takich programów komputerowych poprzedzone musi być opracowaniem odpowiednich modeli wspomnianych wcześniej procesów lub dostosowaniem istniejących modeli do przeprowadzenia tego typu obliczeń symulacyjnych. Z uwagi na złożoność zagadnienia wynikającego z istnienia wzajemnych współzależności pomiędzy wspomnianymi zjawiskami, wymagane jest aby opracowane modele były stosunkowo proste w budowie i nie wymagały wykonywania wielu obliczeń przy zachowaniu jednocześnie dobrej jakości aproksymowania modelowanych zjawisk.

Wprowadzenie modeli dynamiki procesów cieplno-hydraulicznych do programów komputerowych stwarza nowe możliwości symulacji pracy systemów ciepłowniczych w warunkach rzeczywistych. Możliwe jest także badanie zachowania się systemu w warunkach testowych np. odpowiadających awarii systemu. Wykonując symulacje komputerowe można dowiedzieć się o konsekwencjach podjętych decyzji w sterowaniu systemem.

Innym zastosowaniem takich programów jest testowanie poprawności projektów regulacji hydraulicznej systemów ciepłowniczych oraz weryfikacja tabel, według których ustalana jest temperatura wody zasilającej system.

Serdecznie dziękuję Panu dr inż. Stefanowi Turlejskiemu
za uwagi merytoryczne udzielone podczas pisania pracy.

Olgierd Niemyjski

2. CEL I ZAKRES PRACY

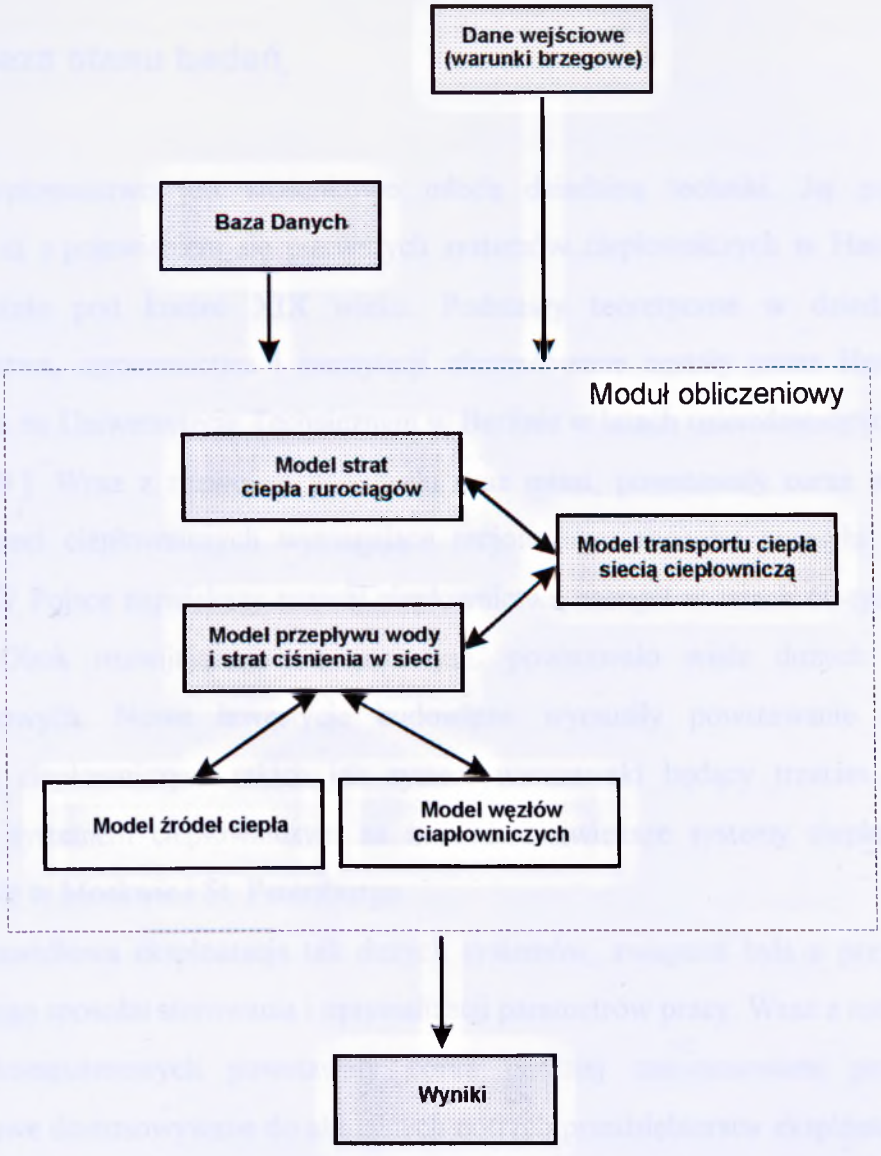
Celem pracy jest opracowanie modeli matematycznych procesów cieplno-hydraulicznych zachodzących podczas pracy systemów ciepłowniczych w aspekcie wykorzystania ich w obliczeniach symulacyjnych oraz rozwiązywaniu problemów technicznych sterowania systemem ciepłowniczym.

W pracy zbudowano zintegrowany model całego systemu ciepłowniczego począwszy od źródła ciepła a kończąc na odbiorcach ciepła, a w szczególności na budynkach ogrzewanych z sieci ciepłowniczej. Z uwagi na złożoność zagadnienia, świadomie wprowadzono pewne uproszczenia dotyczące modeli matematycznych. Szczególną uwagę poświęcono składowym modelu systemu ciepłowniczego, które mają bezpośredni wpływ na jakość procesów cieplno-hydraulicznych zachodzących w sieciach ciepłowniczych. Należą do nich:

1. model strat ciepła rurociągów sieci ciepłowniczej,
2. model przepływu wody oraz strat ciśnienia w systemach sieci ciepłowniczych,
3. model transportu energii cieplnej rurociągami sieci ciepłowniczej.

Pozostałe modele tj. źródeł ciepła oraz węzłów ciepłowniczych, zostały opracowane w niezbędnym zakresie, umożliwiającym poprawne przeprowadzenie symulacji procesów cieplno-hydraulicznych zachodzących w sieci ciepłowniczej. Opisy pracy tych podzespołów systemu ciepłowniczego powinny stać się przedmiotem odrębnych prac badawczych.

Na rysunku Rys. 2–1 przedstawiono schemat ideowy modelu systemu ciepłowniczego analizowanego w pracy. Elementy wyróżnione (kolorem szarym) wchodzą w zakres pracy i zostały opracowane w sposób szczegółowy. Dla pozostałych elementów wprowadzono wspomniane wcześniej uproszczenia.



Rys. 2–1 Schemat idcowy modelu systemu ciepłowniczego

Praca obejmuje swym zakresem także opracowanie bazy danych systemów ciepłowniczych zawierającej niezbędną ilość informacji pozwalających przeprowadzać obliczenia symulacyjne pracę systemów ciepłowniczych. Baza danych dotyczy głównie sieci ciepłowniczej i opisuje ona jej elementy w sposób szczegółowy. Pozostałe składniki systemu (węzły ciepłownicze, źródła ciepła) opisane są w zakresie podstawowym wymaganym dla wykonania obliczeń zapotrzebowania na wodę sieciową w kolejnych chwilach czasowych obliczeń symulacyjnych.

Przedstawione w pracy wyniki obliczeń strat ciepła wykonane zostały na podstawie rzeczywistych danych klimatycznych zarejestrowanych w Warszawie w okresie kilku lat. Zebrano je w formie bazy danych będącej źródłem danych dla określania warunków brzegowych dla opracowanych modeli matematycznych.

3. Synteza stanu badań

Ciepłownictwo jest stosunkowo młodą dziedziną techniki. Jej początki związane są z pojawieniem się pierwszych systemów ciepłowniczych w Hamburgu oraz Dreźnie pod koniec XIX wieku. Podstawy teoretyczne w dziedzinach: ciepłownictwa, ogrzewnictwa i wentylacji sformułowane zostały przez Hermanna Rietschel'a na Uniwersytecie Technicznym w Berlinie w latach osiemdziesiątych XIX wieku [39]. Wraz z rozwojem przemysłu oraz miast, powstawały coraz większe systemy sieci ciepłowniczych wymagające racjonalnego sposobu przesyłu energii cieplnej. W Polsce największy rozwój ciepłownictwa nastąpił w latach 60-tych oraz 70-tych. Obok rozwijającego się przemysłu powstawało wiele dużych osiedli mieszkaniowych. Nowe inwestycje budowlane wymusiły powstawanie dużych systemów ciepłowniczych takich jak system warszawski będący trzecim co do wielkości systemem ciepłowniczym na świecie. Największe systemy ciepłownicze znajdują się w Moskwie i St. Petersburgu.

Prawidłowa eksploatacja tak dużych systemów, związana była z przyjęciem racjonalnego sposobu sterowania i optymalizacji parametrów pracy. Wraz z rozwojem technik komputerowych powstawały coraz bardziej zaawansowane programy obliczeniowe dostosowywane do aktualnych potrzeb przedsiębiorstw eksploatujących systemy ciepłownicze. Służyły one głównie do analizy rozpływu wody oraz strat ciśnienia w sieciach dla stanów statycznych oraz regulacji hydraulicznej węzłów ciepłowniczych. Najbardziej znanymi w Polsce tego typu programami są: PSR i REGS [103], [105], które dotyczą jedynie problemów hydrauliki sieci z pominięciem procesów cieplnych towarzyszących przepływowi wody w sieci rurociągów. Problematyką zjawisk hydraulicznych sieci ciepłowniczych zajmował się także Śnieżyk [96], który analizował wpływ stopniowego automatyzowania węzłów ciepłowniczych na wielkość przepływów wody sieciowej oraz strat ciśnienia dyspozycyjnego.

Algorytmy analizy rozpływu wody w sieciach rurowych zostały opracowane w okresie gdy powstawały na świecie coraz większe systemy wodociągowe i ciepłownicze. Jednym z pierwszych twórców metod obliczania przepływu wody w rozległych sieciach rurociągów był Cross [15]. W latach trzydziestych

zaprezentował słynną metodę obliczania wielkości strumieni wody w sieciach pierścieniowych zwaną metodą Crossa . Z uwagi na prostą budowę, w krótkim czasie stała się ona najpopularniejszą metodą obliczania sieci pierścieniowych [47], [52], [96]. W latach późniejszych, opracowano alternatywne metody przeznaczone do obliczeń na maszynach cyfrowych. Powstały więc uniwersalne i bardzo efektywne metody węzłowe [40], [73] i oczkowe [7], [37], [40], [73], [114], [115], które wykorzystywane są obecnie w programach komputerowych w wielu dziedzinach techniki: wodociągach, ciepłownictwie, gazownictwie, ogrzewnictwie, wentylacji i klimatyzacji i innych. Oparte one są na analizie strukturalnej sieci z wykorzystaniem teorii grafów. Tematem zastosowania teorii grafów w obliczeniach przepływów wody w sieciach zajmowali się między innymi: Valdimarsson [113], Osiadacz [72], [73], Turlejski [101], [103], Hasiliew [37].

Przepływ wody w sieciach cieplnych odbywa się w warunkach nieizotermicznych wynikających z obecność zjawisk strat ciepła. Podstawy teoretyczne procesów strat ciepła zostały zdefiniowane już w latach trzydziestych przez Krischera [48] oraz Forhcheimera [55], którzy opracowali metody analityczne obliczania strat ciepła rurociągów dostosowane do ówczesnych technik obliczeniowych.

W tym okresie w Rosji Szubin prowadził badania strat ciepła sieci wieloprzewodowych z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania rur [41],[44]. Problem strat ciepła stał się tematem wielu prac badawczo-naukowych prowadzonych między innymi w Szwecji, Wielkiej Brytanii, Francji oraz Stanach Zjednoczonych. Amerykanie stworzyli metodę logarytmicznego określania strat ciepła sieci układanych w ziemi oraz określania strat ciepła w funkcji powierzchni izolacji. Vidal oraz Krygier zastosowali przekształcenia konforemne do obliczania wielkości strumienia ciepła przepływającego przez izolację rur [44], [49], [50], [51].

Racjonalizacja sterowania systemów ciepłowniczych ściśle związana jest z optymalnym rozdziałem wody sieciowej i doborem odpowiednich parametrów wody sieciowej. Turlejski [102] przedstawił metodykę optymalizacji strat ciśnienia i strumieni wody dla potrzeb regulacji hydraulicznej oraz projektowania sieci rurociągów ciepłowniczych. Ponadto, zaproponował sposób optymalnego określania parametrów termodynamicznych wody sieciowej, które mają bezpośredni wpływ na jakość i koszty dostawy energii cieplnej [104].

W wyniku automatyzacji systemów ciepłowniczych ich właściwości hydrauliczne ulegają dynamicznym zmianom zależnym od aktualnych potrzeb cieplnych odbiorców. Stopniowy wzrost zautomatyzowania węzłów ciepłowniczych prowadzi do zmiany charakteru procesów cieplno-hydraulicznych zachodzących w systemach ciepłowniczych. Zmiany dotyczą stopniowego przechodzenia ze stanów statycznych do stanów dynamicznych.

Zagadnienia związane z dynamiką pracy poszczególnych elementów systemów ciepłowniczych rozwijane były w Polsce już w latach 70-tych. Chmielnicki [13] przedstawił metodykę określania strat przesyłu ciepła rurociągami sieci cieplnych z uwzględnieniem dynamicznych zmian temperatury wody sieciowej. Turlejski [101] zajmował się analizą przepływu wody w sieciach ciepłowniczych w stanach ustalonych wymiany ciepła. Kolejne prace dotyczyły dynamicznych procesów wymiany ciepła zachodzących w kanałowych sieciach ciepłowniczych. Rybska [90] zaproponowała model strat ciepła sieci kanałowych w oparciu o dwuwymiarowy model przewodzenia ciepła przez grunt. Modelowaniem procesów strat ciepła także zajmowali się: Bohm [8], [9], [10], Christensen [14], Glück [31], [32], [33], Huovilainen [41], Pieńkowski [82], Kusuda [54] i inni.

Zmiany procesów cieplno-hydraulicznych zachodzących w sieciach ciepłowniczych ściśle związane są z autonomią regulacji węzłów cieplnych oraz wzajemnym oddziaływaniem na siebie rozproszonych układów automatycznej regulacji poboru mocy cieplnej budynków. Wpływ pracy zaworów regulacyjnych na pracę systemu ciepłowniczego analizowała A.Czemplik [17], która stworzyła model systemu ciepłowniczego przeznaczonego do badania efektywności układów regulacji węzłów ciepłowniczych.

Jedne z pierwszych symulacji procesów cieplno-hydraulicznych sieci ciepłowniczy wykonano w Danii. Benonysson [6] przedstawił opis numerycznego modelu sieci z uwzględnieniem dynamiki strat ciepła oraz transportu ciepła. Podobne prace wykonywali: Palsson [80], Wolters [110], Larsson [58], Richardson [88], [89]. W latach 90-tych powstało wiele prac poświęconych zjawiskom transportu energii cieplnej siecią rurociągów. Oprócz wspomnianych badań Benonyssona i Palssona należy tu wspomnieć o pracach w tym zakresie prowadzonych przez Tobiasa [99], Tin-Tai Chow [98] ,Clarka [12] oraz Arvastsona [3], którzy dużo miejsca w swoich opracowaniach poświęcili problemom opóźnienia transportowego

w rozległych sieciach rurociągów ciepłowniczych oraz instalacji ogrzewczych w budynkach. Zagadnienia dynamiki pracy systemów grzewczych zostały wykorzystane w wielu aplikacjach programów komputerowych np.: TRNSYS [100], ASV-SIM, HeatSim [59], BoFit [1], HVACSIM+ [12]. Programy te dotyczą głównie symulacji systemów sieci instalacji ogrzewczych oraz chłodniczych w kontekście utrzymywania komfortu cieplnego oraz określania zapotrzebowania ciepła budynków.

Obliczenia symulacyjne sieci ciepłowniczych wymagają zgromadzenia odpowiedniej ilości informacji o obiekcie jakim jest system ciepłowniczy. Pierwsze programy komputerowe (PSR, REGS) korzystały z baz danych zawierających informacje charakteryzujące elementy systemu w zakresie niezbędnym do wykonania obliczeń. Tworzenie tego typu baz danych nastręczało wiele kłopotów użytkownikom tych programów wynikających z braku możliwości przeprowadzania właściwych diagnostyk poprawności wprowadzonych danych. Operowanie jedynie danymi liczbowymi wymagało od użytkowników bardzo dobrej znajomości topologii systemu.

Szybki rozwój technik komputerowych w latach 90-tych stworzył możliwości zastosowania technologii GIS (Geographical Information System) w tworzeniu kompleksowych baz danych sieci ciepłowniczych pozwalających na lokalizację poszczególnych elementów sieci na mapie terenu. Przykładem zastosowania GIS w branży ciepłowniczej są aplikacje NetzCAD SCW [66], [105], [106] i SCP dotyczące sieci ciepłowniczych wodnych i parowych. Zaletą tych programów jest bezpośrednie połączenie graficzno-numerycznej bazy danych z modułem obliczeń numerycznych będącym integralną częścią programu.

4. Modelowanie procesów hydraulicznych zachodzących w systemach sieci ciepłowniczych

Modelowanie procesów hydraulicznych związane jest z obliczaniem wartości przepływu wody oraz spadków ciśnienia w odcinkach sieci ciepłowniczej. Problem analizy rozpływu wody w systemach sieci ciepłowniczych powstał w wyniku gwałtownego rozwoju ciepłownictwa komunalnego już w latach 60-tych. Ówczesne metody obliczeniowe wynikały z zaawansowania technik wykonywania obliczeń matematycznych. Stosowano więc proste metody Crossa [15] oraz oporów zastępczych [52].

Z chwilą pojawienia się maszyn cyfrowych zaczęto wykorzystywać je do obliczeń przepływów wody w układach sieciowych. Powstało więc wiele programów komputerowych wspomagających analizę procesów hydraulicznych zachodzących w sieciach wodociągowych, gazociągach, wentylacyjnych, ciepłowniczych oraz centralnego ogrzewania. Najczęściej stosowanymi programami do obliczeń hydraulicznych sieci ciepłowniczych są: PSR oraz REGS wchodzący w skład pakietu NetzCAD SCW [66], [105], [106]. Algorytm programu REGS oparty jest na numerycznej analizie struktury sieci oraz rozwiązywaniu układu równań modelujących straty ciśnienia w odcinkach sieci ciepłowniczej. Służy on do wykonywania analiz rozpływu wody w sieciach dla zadanych stanów pracy systemów ciepłowniczych. Obliczenia te stanowią podstawową część projektów regulacji hydraulicznej węzłów ciepłowniczych.

Przyjęty w pracy sposób modelowania procesów hydraulicznych również oparty jest na numerycznych metodach rozpoznawania struktury sieci, obliczania strat ciśnienia oraz przepływu wody w rurociągach. Różnica polega na dostosowaniu tych metod do obliczeń dynamiki procesów cieplno-hydraulicznych zachodzących w sieciach ciepłowniczych w symulowanej wirtualnej rzeczywistości.

Przy obliczeniach tego typu, wygodny jest opis struktury sieci w formie grafu, który umożliwia identyfikację układów pierścieniowych w sieci oraz formułowanie odpowiedniego układu równań, którego rozwiązaniem są wartości przepływu wody w odcinkach domykających pierścienie. W rozdziale tym przedstawiono kolejne etapy oraz techniki modelowania procesów hydraulicznych w sieciach ciepłowniczych,

które zastosowano w pracy. Przedstawiono tu metodę odwzorowania struktury sieci ciepłowniczej na graf i sposób zapisu jej w formie macierzowej, modele fizyczne strat ciśnienia w rurociągach oraz techniki numeryczne pozwalające na zwiększenie wydajności obliczeń numerycznych przepływów wody sieciowej.

4.1 Odwzorowanie struktury sieci ciepłowniczej na graf

Analiza procesów przepływu wody w sieciach ciepłowniczych bardzo ściśle związana jest z teorią grafów. Dla celów analizy topologii sieci, grafy stanowią najlepszą formę odwzorowania ich struktur. Istnieje wiele pozycji literaturowych poświęconych właściwościom grafów oraz sposobom ich tworzenia np.:[16], [18], [20].

Graf $G(V,E)$ definiuje się jako zbiór wierzchołków $V = \{v_1, v_2, v_3, \ldots v_w\}$, krawędzi $E = \{e_1, e_2, e_3, \ldots e_u\}$, któremu przyporządkowane jest pewne odwzorowanie Ψ przekształcającego każdą krawędź grafu na parę wierzchołków (v_i, v_j) zwanych wierzchołkami końcowymi krawędzi. Jeżeli odwzorowanie Ψ przekształca każdą krawędź na pewną nieuporządkowaną parę wierzchołków (v_i, v_j), wówczas graf $G(V,E)$ jest grafem nieskierowanym (niezorientowanym). Natomiast, jeżeli Ψ przekształca każdą krawędź na pewną uporządkowaną parę wierzchołków (v_i, v_j) , wówczas graf $G(V,E)$ jest grafem skierowanym (zorientowanym).

Odwzorowując strukturę sieci ciepłowniczej na graf, przyjmuje się następujące założenia:

1. wierzchołkami grafu są punkty rozgałęzienia przewodów sieci, połączenia przewodów o różnych średnicach oraz połączenia węzłów ciepłowniczych i źródeł ciepła z przewodami sieci,
2. krawędziami grafu są przewody zasilające i powrotne sieci, węzły ciepłownicze oraz źródła ciepła,
3. wierzchołek początkowy i końcowy krawędzi określają dodatni przepływu wody w przewodzie.

Przyjmując powyższą zasadę odwzorowania, każdy graf sieci ciepłowniczej posiada obwody (cykle lub półcykle) będące odwzorowaniem obiegów wody przez węzły ciepłownicze. Dodatkowe obwody pojawiają się w przypadku istnienia pierścieni

w strukturze sieci. Całkowitą liczbę obwodów w grafie można określić jako sumę liczby węzłów ciepłowniczych i podwojonej liczby pierścieni w sieci czyli:

$$q = c + 2p \qquad (4\text{-}1)$$

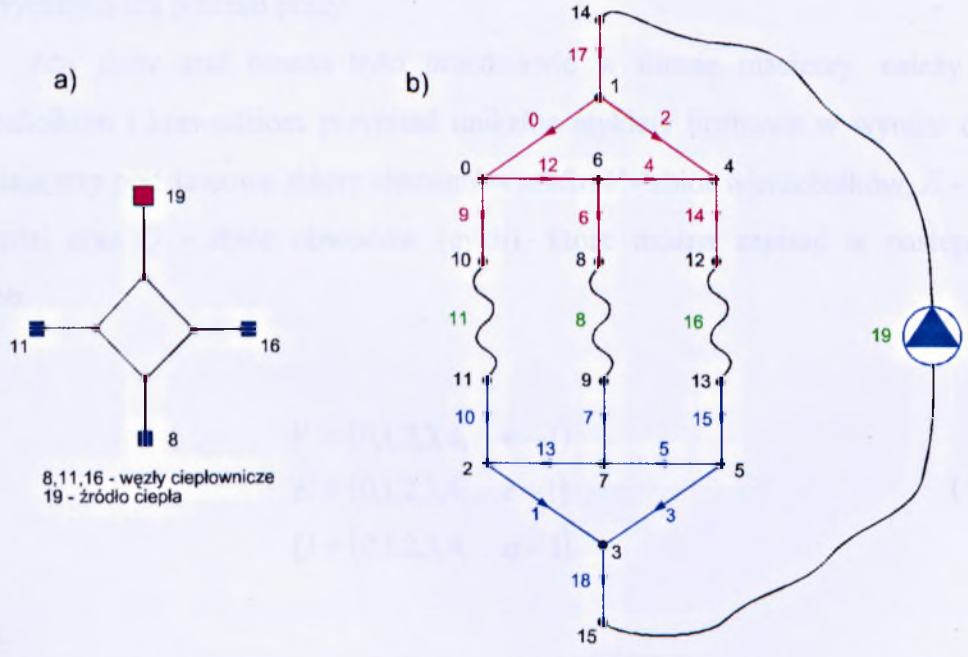
gdzie:

q - liczba obwodów w grafie,

c - liczba węzłów ciepłowniczych,

p - liczba pierścieni w sieci.

Na rysunku Rys. 4–1b przedstawiono przykładowy graf zorientowany dla przykładowej sieci ciepłowniczej posiadającej jeden pierścień oraz zasilającej trzy węzły ciepłownicze (Rys. 4–1a). Graf powstał na podstawie przytoczonych powyżej założeń. W wyniku „rozklejenia" sieci zasilającej i powrotnej, otrzymano obliczeniową strukturę grafu sieci zawierającą 5 obwodów (zgodnie z (4-1)).



Rys. 4–1 Przykład sieci (a) oraz jej odwzorowania w formie grafu (b)

Taki sposób odwzorowania pozwala analizować sieci ciepłownicze o dowolnej strukturze a w szczególności umożliwia analizę sieci niesymetrycznych pod względem prowadzenia przewodów oraz umieszczenia armatury i dodatkowych pomp sieciowych. Natomiast wymaga on rezerwowania dwa razy większego obszaru pamięci operacyjnej komputera w porównaniu do metody analizy układów sieci

symetrycznych. Obecnie niedogodność ta przestała mieć decydujące znaczenie w optymalizacji wykorzystania zasobów pamięci komputera, ponieważ w ostatnim czasie nastąpiło gwałtowne obniżenie cen pamięci operacyjnych, a komputery mogą obsługiwać pamięć o wielkości wielokrotnie przewyższającej potrzeby programów analizujących grafy sieci ciepłowniczej.

Dla celów obliczeń numerycznych bardzo użytecznymi i dogodnymi sposobami reprezentacji grafu są macierze. Macierzowy sposób zapisu grafu stwarza możliwość numerycznej analizy struktury grafu, a co za tym idzie i struktury sieci ciepłowniczej. Zastosowanie praw rachunku macierzowego pozwala na bardzo precyzyjne określenie rozpatrywanych problemów. Znanych jest co najmniej pięć rodzajów macierzy opisujących strukturę grafu w formie numerycznej. Są to macierze: incydencji, obwodów, przekrojów, przyległości i ścieżek. Szczegółowy opis tworzenia i zastosowania tych macierzy przedstawili Chua oraz Deo [16], [18], [94]. Poniżej zostały omówione tylko te, które były stosowane w obliczeniach numerycznych dla potrzeb pracy.

Aby dany graf można było przedstawić w formie macierzy, należy jego wierzchołkom i krawędziom przypisać unikalne etykiety liczbowe w wyniku czego powstają trzy podstawowe zbiory elementów grafu: V - zbiór wierzchołków, E - zbiór krawędzi oraz Q - zbiór obwodów (cykli), które można zapisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned} V &= (0,1,2,3,4,\ldots v-1) \\ E &= (0,1,2,3,4,\ldots e-1) \\ Q &= (0,1,2,3,4,\ldots q-1) \end{aligned} \qquad (4\text{-}2)$$

gdzie:

v - liczba węzłów,

e - liczba krawędzi,

q - liczba obwodów.

Liczba obwodów w grafie jest jednoznacznie określona na podstawie równania Eulera:

$$q = e - v - 1 \qquad (4\text{-}3)$$

Podstawową formą reprezentacji grafu jest macierz incydencji. Określa ona sposób połączenia krawędzi oraz ich sąsiedztwo. Dla grafu G o v wierzchołkach oraz e krawędziach nie zawierającego pętli własnych, macierz incydencji o wymiarach (v x e) definiuje się jako: **A** = $[a_{ij}]$. Wiersze macierzy odpowiadają etykietom wierzchołków a kolumny - krawędziom grafu. Dlatego też często macierz **A** nazywana jest wierzchołkowo-krawędziową macierzą incydencji.
Elementy macierzy incydencji grafu nieskierowanego przyjmują następujące wartości:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } j\text{ - ta krawędź } (e_j) \text{ jest incydentna do } i\text{ - tego wierzchołka } (v_i) \\ 0 & \text{jeśli } j\text{ - ta krawędź } (e_j) \text{ nie jest incydentna do } i\text{ - tego wierzchołka } (v_i) \end{cases}$$

Z definicji macierzy incydencji wynika, że w każdej kolumnie znajdują się tylko dwa elementy niezerowe. W związku z tym, można usunąć dowolny wiersz macierzy bez utraty informacji o topologii grafu. W wyniku takiej operacji otrzymuje się zredukowaną macierz incydencji.

Dla grafu skierowanego (zorientowanego) wartości macierzy **A** przyjmują następujące wartości:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } j\text{ - ta krawędź } (e_j) \text{ jest incydentna z } i\text{ - tego wierzchołka } (v_i) \\ -1 & \text{jeśli } j\text{ - ta krawędź } (e_j) \text{ jest incydentna w } i\text{ - ty wierzchołek } (v_i) \\ 0 & \text{jeśli } j\text{ - ta krawędź } (e_j) \text{ nie jest incydentna do } i\text{ - tego wierzchołka } (v_i) \end{cases}$$

Krawędź e_j jest incydentna z i-tego wierzchołka (v_i) wtedy, gdy węzłem początkowym krawędzi jest wierzchołek v_i. Natomiast krawędź e_j jest incydentna w i-ty wierzchołek (v_i), gdy jest on wierzchołkiem końcowym krawędzi.
Poniżej przedstawiono przykład macierzy incydencji dla grafu skierowanego wg Rys. 4–1 b.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
-1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1
\end{bmatrix}$$

Drugą podstawową macierzą opisującą strukturę grafu jest macierz obwodów. Macierz obwodów grafu G jest macierzą o wymiarach (q x e) i zapisywana jest jako $\mathbf{B} = [b_{ij}]$ gdzie wiersze odpowiadają obwodom grafu a kolumny - krawędziom. Liczba obwodów (cykli) w grafie określana jest na podstawie równania Eulera (4-3).
Dla grafu niezorientowanego macierz **B** jest macierzą binarną ponieważ jej elementy przyjmować mogą następujące wartości:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } i\text{ - ty obwód } (q_i) \text{ zawiera } j\text{ - tą krawędź } (e_j) \\ 0 & \text{jeśli } i\text{ - ty obwód } (q_i) \text{ nie zawiera } j\text{ - tej krawędzi } (e_j) \end{cases}$$

Tworząc macierz obwodów grafu zorientowanego należy każdemu obwodowi q przypisać orientację (np. zgodną lub przeciwną do ruchu wskazówek zegara). W ten sposób otrzymujemy obwody skierowane. Macierz obwodów **B** grafu skierowanego G posiada wymiar (q x e). Jej elementy mogą posiadać następujące wartości:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } i\text{ - ty obwód } (q_i) \text{ zawiera } j\text{ - tą krawędź } (e_j) \text{ oraz orientacja krawędzi } (e_j) \text{ jest zgodna z orientacją obwodu } (q_i) \\ -1 & \text{jeśli } i\text{ - ty obwód } (q_i) \text{ zawiera } j\text{ - tą krawędź } (e_j) \text{ oraz orientacja krawędzi } (e_j) \text{ jest nie zgodna z orientacją obwodu } (q_i) \\ 0 & \text{jeśli } i\text{ - ty obwód } (q_i) \text{ nie zawiera } j\text{ - tej krawędzi } (e_j) \end{cases}$$

W pracy przyjęto, że orientacja obwodów w grafie jest zawsze zgodna z orientacją krawędzi będących ich domknięciami.

Poniższy rysunek przedstawia przykład macierzy obwodów grafu zorientowanego przedstawionego na rysunku Rys. 4–1b.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2 *Model przepływu wody w odcinkach sieci ciepłowniczej*

Przyjęty w pracy model matematyczny przepływu wody w rurociągach sieci ciepłowniczej oparty jest na wyrażeniu określającym wielkość strat ciśnienia wody w przewodach. Straty ciśnienia w przewodzie, w którym przepływa określony strumień masy wody można wyrazić jako sumę strat liniowych i miejscowych czyli:

$$\Delta p_s = \Delta p_L + \Delta p_M \qquad (4\text{-}4)$$

gdzie:

Δp_s - całkowita strata ciśnienia w przewodzie, Pa,

Δp_L - liniowa strata ciśnienia, Pa,

Δp_M - miejscowa strata ciśnienia wynikająca z obecności oporów miejscowych, Pa.

Składnik liniowych strat ciśnienia występujący w równaniu (4-4) opisuje wzór Darcy-Weisbacha:

$$\Delta p_L = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2} \rho \,, \quad \text{Pa} \qquad (4\text{-}5)$$

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/m^3.

W powyższym wzorze, gęstość wody określana jest na podstawie wzorów aproksymujących zmienność wartości gęstości wody w zależności od temperatury czynnika [84],[92]. Dokładność obliczeń modelujących liniowe straty ciśnienia zależy głównie od dokładności określenia wartości współczynnika oporów liniowych przewodu λ. Badania zmienności współczynnika oporów liniowych prowadzone były już w XIX wieku. Na podstawie teorii podobieństwa ustalono, że jego wartość zależy od liczby Reynoldsa (Re) oraz względnej chropowatości rury (ε). Na początku XX wieku przeprowadzono kolejne badania przez Prandtla, Nikuradsego, Colebrooka, White'a i innych, które pozwalały w sposób bardziej precyzyjny określić wartość współczynnika λ. W roku 1952 odbył się w Paryżu Międzynarodowy Kongres Zaopatrzenia w Wodę, na którym Lamont [57] przedstawił analizę porównawczą znanych wówczas wzorów na wartość współczynnika oporów liniowych λ. Okazało się, że najbardziej zgodnym z pomiarami jest wzór Colebrooka-White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3.71}\right) \qquad (4\text{-}6)$$

w którym:

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\upsilon}$$

$$\varepsilon = \frac{k}{d}$$

gdzie:

Re - liczba Reynoldsa,

ε - względna chropowatość rury,

v - prędkość przepływu wody, m/s,

d - średnica wewnętrzna rury, m,

υ - kinematyczny współczynnik lepkości cieczy, m^2/s,

k - chropowatość bezwzględna powierzchni wewnętrznej rury, m,

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
A.005503 (1)
Biblioteka Główna

Wzór Colebrooka-White'a może być stosowany w całym zakresie turbulentnego przepływu wody. Liczne badania wykazały [34], [93], że dla rur powszechnie stosowanych w przemyśle, przepływ burzliwy wody występuje już przy Re>4000. Mankamentem równania (4-6) jest to, że współczynnik oporów liniowych λ występuje w formie uwikłanej i nie można go obliczyć w sposób bezpośredni. W związku z tym próbowano stworzyć prostsze wzory w oparciu o badania empiryczne lub aproksymujące zależności Colebrooka-White'a. Analiza porównawcza tych wzorów wykazała [35], że najdokładniejsze wyniki w strefie przejściowej przepływu turbulentnego otrzymuje się ze wzoru aproksymacyjnego Guido di Ricco oraz wzoru Waldena [107].

Wzór Guido di Ricco:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{4{,}52}{\mathrm{Re}}\lg\frac{\mathrm{Re}}{7} + \frac{\varepsilon}{3{,}71}\right) \qquad (4\text{-}7)$$

Wzór Waldena:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{6{,}1}{\mathrm{Re}^{0{,}915}} + 0{,}268\varepsilon\right) \qquad (4\text{-}8)$$

W strefie kwadratowej zależności oporów wartość współczynnika λ w sposób jawny opisuje równanie Nikuradsego:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1{,}14 + 2\lg\frac{1}{\varepsilon}\right)^2} \qquad (4\text{-}9)$$

Przedział stosowalności wzorów (4-7), (4-8) oraz (4-9) określa graniczna wartość liczby Reynoldsa (Re_{gr}), którą można obliczyć wg wzoru Rouse'a [34]:

$$\mathrm{Re}_{gr} = \frac{200}{\sqrt{\lambda}}\frac{1}{\varepsilon} \qquad (4\text{-}10)$$

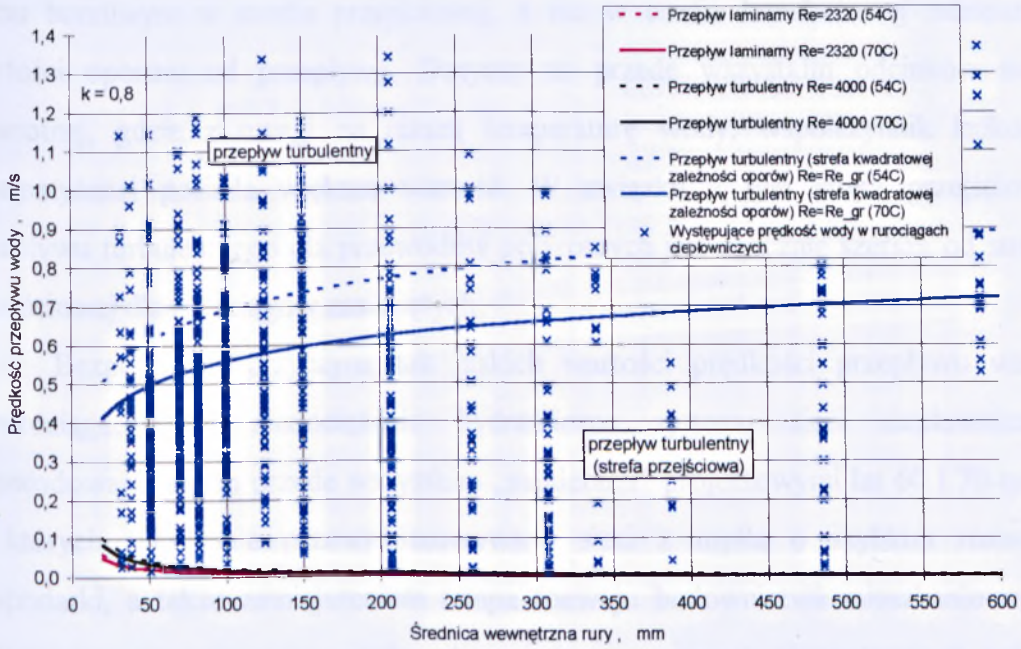
Wartość współczynnika λ w strefie przepływu laminarnego czyli gdy Re<2320 opisuje wzór Hagen-Poiseuile'a:

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}} \qquad (4\text{-}11)$$

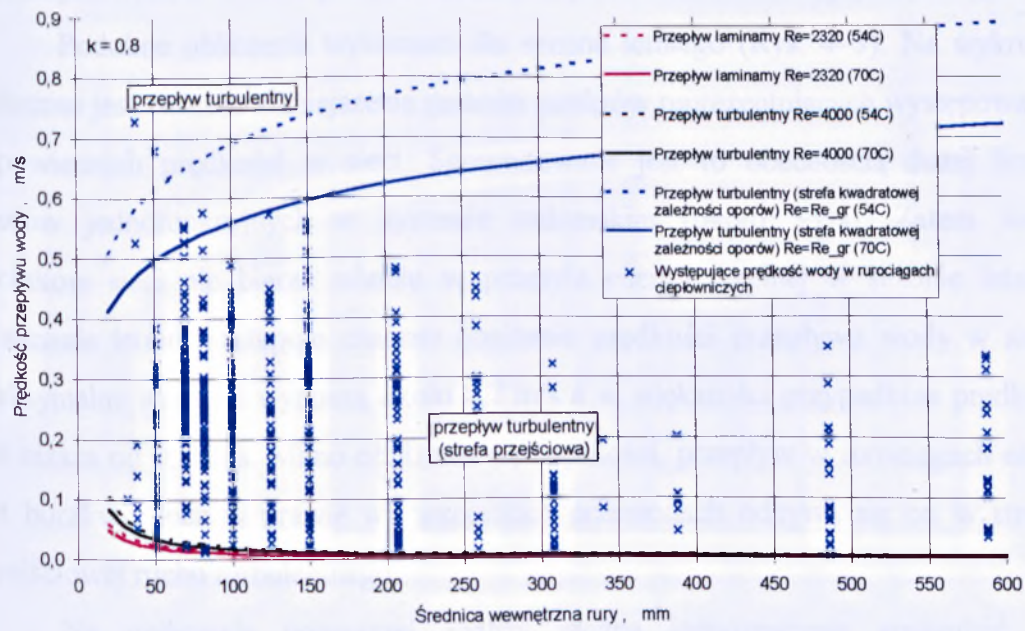
W sieciach ciepłowniczych przepływ laminarny w zasadzie nie występuje. Może on pojawić się jedynie w przypadku sieci niedociążonych w okresach letnich przy chwilowym obniżeniu zapotrzebowania na energię cieplną np. w porze nocnej. Trudno jest jednoznacznie określić jaki rodzaj przepływu ma miejsce w rurociągach ciepłowniczych. Panuje powszechnie przekonanie [34], 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 czyli do obliczania wartości współczynnika oporów liniowych λ można stosować wzór Nikuradsego (4-9). Dysponując szczegółowymi danymi o kilkunastu systemach sieci ciepłowniczej w Polsce, wykonano obliczenia przepływów wody dla okresu zimowego i letniego dla średniej wielkości systemu ciepłowniczego jakim jest system w Radomiu. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach rozkładu prędkości wody w odcinkach sieci ciepłowniczej (Rys. 4–2, Rys. 4–3) . Dodatkowo naniesiono na nich linie rozgraniczające poszczególne strefy przepływu wody w rurach. Przyjęto wartość chropowatości bezwzględnej k=0,8 mm. Linię graniczną przepływu laminarnego wyznaczają punkty z wartościami prędkości przepływu wody odpowiadającymi wartościom liczby Reynoldsa równej Re_{kr}=2320. Poniżej tej linii znajduje się strefa przepływu laminarnego. Przepływ burzliwy rozpoczyna się przy prędkości przepływu wody odpowiadającej wartości liczby Re=4000 [34], [93]. Punkty odpowiadające tym wartościom prędkości wyznaczają granice między strefą przejściową przepływu turbulentnego a strefą przepływu laminarnego. Przy wzroście prędkości do wartości odpowiadającej liczbie $Re=Re_{gr}$ (4-10) rozpoczyna się strefa przepływu turbulentnego, w której wielkość oporów hydraulicznych zależy od kwadratu prędkości przepływu wody w rurze.

Wykresy (Rys. 4–2, Rys. 4–3) wykonano dla warunków pracy systemu ciepłowniczego w sezonie zimowym i letnim przy następujących założeniach:

1. temperatura wody sieciowej: T_z=95 °C i T_p=61 °C co odpowiada średniej temperaturze wody zasilającej i powrotnej dla dwóch miesięcy sezonu ogrzewczego 1994/1995 tzn. grudzień 1994 i styczeń 1995,
2. temperatura wody sieciowej: T_z=70 °C i T_p=54 °C będącymi średnimi wartościami temperatury wody zasilającej i powrotnej jednego z miesięcy sezonu letniego (czerwiec 1994).



Rys. 4–2 Rozkład prędkości przepływu wody w odcinkach sieci ciepłowniczej (Radom) dla okresu zimowego - 1994/1995



Rys. 4–3 Rozkład prędkości przepływu wody w odcinkach sieci ciepłowniczej (Radom) dla okresu letniego

Jak wynika z obliczeń wykonanych dla warunków sezonu ogrzewczego 1994/1995 (Rys. 4–2), w większości odcinków sieci ciepłowniczej panuje ruch turbulentny. W kilku odcinkach sieci prędkość przepływu wody jest większa od 2 m/s. Ponieważ są to pojedyncze przypadki, ograniczono zakres wykresu do 1,4 m/s co zwiększyło jego czytelność. Należy zwrócić uwagę, że w większości przypadków, wartość prędkości przepływu wody w przewodach świadczy o występującym w nich ruchu burzliwym w strefie przejściowej, a nie w strefie kwadratowej zależności wartości oporów od przepływu. Dotyczy to przede wszystkim odcinków sieci powrotnej, gdzie z uwagi na niższą temperaturę wody, współczynnik lepkości kinematycznej posiada większą wartość. W związku z tym strefa przejściowa przepływu turbulentnego dla przewodów powrotnych jest znacznie szersza od strefy przejściowej dla rurociągów zasilających.

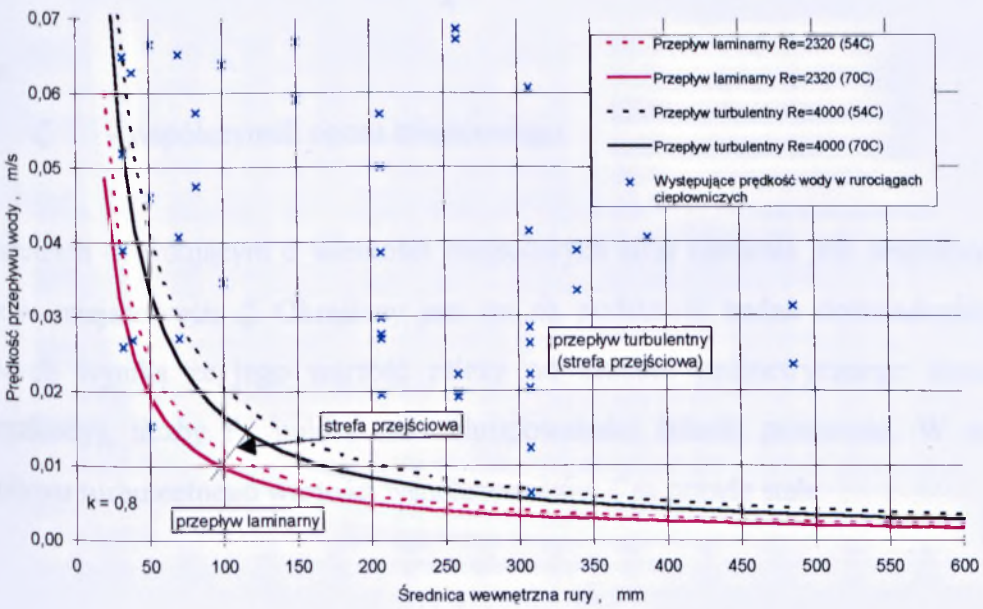
Bezpośrednią przyczyną tak niskich wartości prędkości przepływu wody w rurociągach jest niedociążenie hydrauliczne systemu sieci ciepłowniczej. Spowodowane jest to przede wszystkim „manierami" projektowymi lat 60 i 70-tych, w których świadomie przewymiarowywano sieci z myślą o szybkim rozwoju gospodarki, a także zmniejszeniem tempa rozwoju budownictwa mieszkaniowego, odłączaniem się odbiorców ciepła od sieci na rzecz innych alternatywnych źródeł ciepła oraz zmniejszeniem zużycia energii cieplnej budynków mieszkalnych i przemysłowych w wyniku przeprowadzanych prac termorenowacyjnych [24],[61].

Podobne obliczenia wykonano dla sezonu letniego (Rys. 4–3). Na wykresie widoczne jest znaczne zmniejszenie gęstości punktów reprezentujących występowanie odpowiednich prędkości w sieci. Spowodowane jest to obecnością dużej liczby węzłów jednofunkcyjnych w systemie radomskim (około 55%). Zatem wiele odcinków sieci nie bierze udziału w przesyle energii cieplnej w sezonie letnim. W sezonie letnim następuje znaczne obniżenie prędkości przepływu wody w sieci. Maksymalne wartości wynoszą około 0,7 m/s a w większości przypadków prędkość jest niższa od 0,5 m/s. Mimo obniżenia się prędkości, przepływ w rurociągach nadal jest burzliwy, lecz w prawie we wszystkich przewodach odbywa się on w strefie przejściowej ruchu turbulentnego.

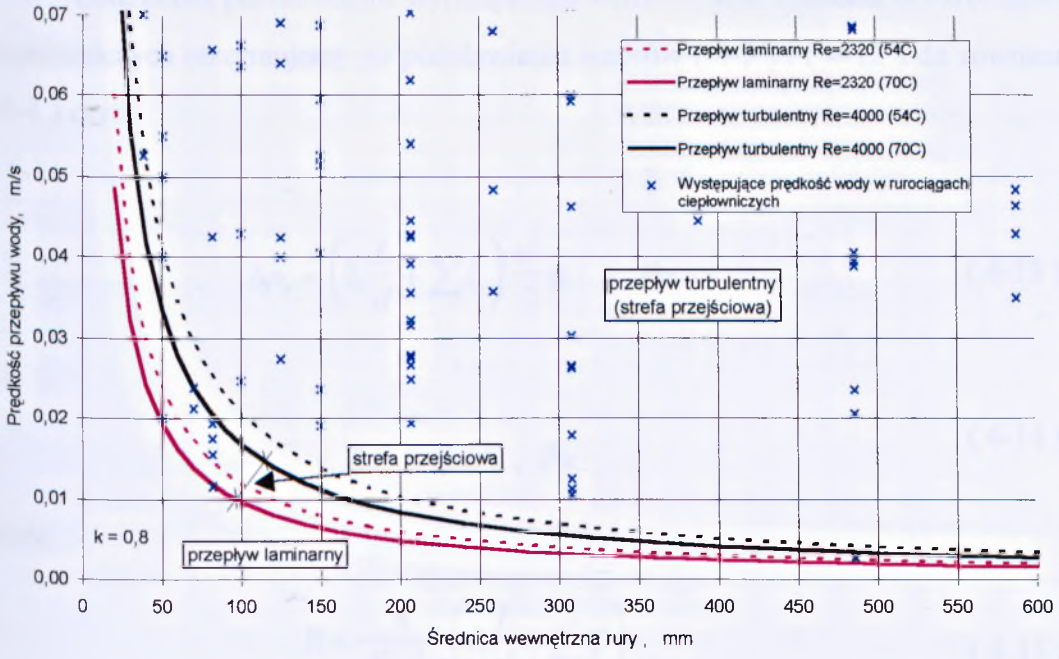
Na podstawie powyższej analizy można jednoznacznie stwierdzić, że w sieciach ciepłowniczych panuje przeważnie przepływ wody burzliwy lecz odbywa się on w większości przypadków w strefie przejściowej ruchu turbulentnego.

Przepływ turbulentny w strefie kwadratowej zależności oporów pojawia się w okresie ogrzewczym i nie jest on dominujący w odcinkach sieci ciepłowniczej.

Z uwagi na stosunkowo małe wartości prędkości przepływu wody w rurociągach sieci ciepłowniczych należy przeprowadzić jeszcze analizę możliwości występowania przepływów laminarnych. Przedstawione wcześniej wykresy (Rys. 4–2, Rys. 4–3) obejmują także i tę strefę przepływu, lecz z uwagi na małą ich czytelność w zakresie niskich wartości prędkości, przedstawiono poniżej te wykresy przy zmienionym zakresie tzn. do 0,07 m/s (Rys. 4–4, Rys. 4–5). Przepływ laminarny w systemach sieci ciepłowniczych pojawia się przy bardzo niskich prędkościach przepływu wody. Dla przewodów o średnicy nominalnej do DN100 czyli przyłączy, ruch laminarny występuje przy prędkościach mniejszych od 0,03 m/s. Dla większych średnic, tego typu przepływ występuje przy prędkości 0,005 m/s. Jak wykazano na wykresach poniżej, istnieje możliwość wystąpienia lokalnie przepływu laminarnego w okresie zimowym spowodowanego niedociążeniem hydraulicznym sieci. Większe prawdopodobieństwo jego wystąpienia jest w okresie letnim (Rys. 4–5). Dla tego okresu wykonano obliczenia przepływu wody w sieci w oparciu o średnie wartości zapotrzebowania na moc cieplną na podgrzanie wody użytkowej. W okresie zmniejszonego zapotrzebowania na ciepło (np. w nocy) prędkość przepływu wody w przewodach może zmniejszyć się do wartości bliskich zeru. Istnieje zatem realna możliwość wystąpienia ruchu laminarnego właśnie w tym okresie.



Rys. 4–4 Wykres prędkości wody sieciowej w zakresie przepływu laminarnego dla sezonu ogrzewczego



Rys. 4–5 Wykres prędkości wody sieciowej w zakresie przepływu laminarnego dla sezonu letniego

Drugim składnikiem strat ciśnienia w rurociągach sieci ciepłowniczej (4-4) są straty miejscowe wynikające z obecności oporów miejscowych takich jak zasuwy, kolana, miejscowe przewężenia przekroju rury i wiele innych. Wartość tych strat określana jest na podstawie następującego wzoru:

$$\Delta p_M = \zeta \frac{v^2 \rho}{2}, \; Pa \qquad (4\text{-}12)$$

gdzie:

ζ - współczynnik oporu miejscowego.

Parametrem decydującym o wielkości 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.

Ostateczną postać wzoru wyrażającego wielkość strat ciśnienia w rurociągach ciepłowniczych otrzymujemy po podstawieniu wzorów (4-5) i (4-12) do równania (4-4) czyli:

$$\Delta p_s = \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta\right) \frac{v^2}{2} \rho \quad , \; Pa \qquad (4\text{-}13)$$

lub

$$\Delta p_s = R \dot{m}^2 \quad , \; Pa \qquad (4\text{-}14)$$

gdzie:

$$R = \frac{8}{d^4 \pi^2 \rho}\left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta\right) \qquad (4\text{-}15)$$

$\dot{m}$ - strumień masy wody, kg/s.

Wartość współczynnika R jest stała w zakresie przepływu turbulentnego (przy k=const) gdzie Re > Re_{gr} czyli w strefie kwadratowej zależności oporów. Natomiast w strefie przejściowej przepływu burzliwego, wartość jego zmienia się z uwagi na zależność współczynnika oporów liniowych λ od wartości liczby Reynoldsa.

4.3 Ogólna metoda obliczania przepływów wody w sieciach pierścieniowych

Obecnie znanych jest wiele metod obliczania przepływów wody i strat ciśnienia w systemach sieci ciepłowniczych. Używane są one w różnych dziedzinach techniki związanych z zagadnieniami przepływu płynu w przewodach sieciowych tzn:

- ciepłownictwie [36], [37], [52], [102], [103],
- gazownictwie [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78],
- ogrzewnictwie [40], [114], [115],
- wodociągach [34], [93], [7],
- wentylacji i klimatyzacji [91].

W każdej z tych dziedzin obowiązują takie same lub prawie takie same zależności rozpływu czynnika w sieci. Z uwagi na występowanie różnego rodzaju płynów, o różnych właściwościach fizycznych i parametrach, istnieją pewne różnice charakteru zjawisk fizycznych zachodzących w każdej z tych sieci co powoduje, że modele matematyczne opisujące te zjawiska są od siebie różne.

W obliczeniach komputerowych najczęściej stosowanymi metodami są:

1. metoda oczkowa, [7], [37], [40], [73], [114], [115],
2. metoda węzłowa, [40], [73],
3. metoda oporów zastępczych [52].

Z uwagi na przyjęty w pracy, sposób odwzorowania sieci ciepłowniczej na graf (rozdział 4.1), metoda oporów zastępczych nie może być wykorzystana ponieważ podstawowym jej założeniem jest to, że graf sieci musi posiadać strukturę drzewa. Zatem jedynymi metodami możliwymi do zastosowania są: metoda oczkowa i metoda węzłowa. Szczegółowy opis tych metod zamieszczony jest w przedstawionej wcześniej literaturze.

Z analiz porównawczych [72] wynika, że metoda oczkowa wyróżnia się od metody węzłowej większą zbieżnością procesu iteracyjnego oraz brakiem czułości na wybór pierwszego przybliżenia iteracyjnego. W związku z tym, do analiz rozpływu wody sieciowej przyjęto w pracy metodę oczkową. Polega ona na przybliżaniu natężenia przepływu wody w pierścieniach (oczkach) w trakcie kolejnych iteracji. Rozpoczynając obliczenia, należy założyć dowolne przepływy w przewodach sieci spełniające jednocześnie warunki ciągłości w każdym punkcie węzłowym sieci. Następnie wykonywane są obliczenia wartości poprawek strumieni wody w odcinkach sieci oraz wykonywana jest korekta przepływu wody w pierścieniach. Jeżeli wartości poprawek są większe od założonego błędu obliczeń, wówczas obliczenia są powtarzane. Szczegółowy opis tej metody obliczania przepływów wody w sieciach pierścieniowych, został przedstawiony w dalszej części pracy.

Algorytmy analizy przepływów wody w sieciach ciepłowniczych muszą spełniać dwa podstawowe warunki:

1. warunek ciągłości przepływu zwany także pierwszym prawem Kirchhoffa,
2. warunek zachowania energii ciśnienia w pierścieniach czyli II prawo Kirchhoffa,

oraz muszą definiować równanie przepływu wody w rurociągach w formie modelu matematycznego.

I-sze prawo Kirchhoffa:

Warunek ciągłości przepływu wody w punktach węzłowych sieci określony jest pierwszym prawem Kirchhoffa: suma algebraiczna wartości przepływów wody dla każdego węzła jest równa zero. Warunek ten można zapisać w formie macierzowej tzn.:

$$\mathbf{A}\,\mathbf{m} = \mathbf{0} \qquad (4\text{-}16)$$

gdzie:

A - zredukowana macierz incydencji, $\mathbf{A}=[a_{ij}]$ o rozmiarze (v x e),

m - wektor wartości przepływów wody w przewodach $\mathbf{m} = \left[\dot{m}_i\right]$.

II-gie prawo Kirchhoffa:

II-gie prawo Kirchhoffa dotyczy warunku zachowania energii ciśnienia w każdym pierścieniu. Według tego prawa, suma algebraiczna wartości spadków ciśnienia w każdym pierścieniu jest równa sumie wartości ciśnienia pomp znajdujących się w danym oczku. W przypadku braku pomp w obiegu, suma spadków ciśnienia równa jest zero. II-gie prawo Kirchhoffa można zapisać w postaci macierzowej:

$$\mathbf{B}\,\Delta\mathbf{p}_S = \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{p}_P \qquad (4\text{-}17)$$

gdzie:

B - macierz obwodów o rozmiarze (q x e) ,

$\Delta\mathbf{p}_S$ - wektor strat ciśnienia w przewodach,

$\Delta\mathbf{p}_P$ - wektor wartości ciśnienia pomp.

Szczegółowy opis macierzy incydencji oraz obwodów został przedstawiony w rozdziale 4.1 pracy.

Równanie przepływu:

Równanie przepływu wody wyrażone jest zależnością strat ciśnienia w przewodzie od wartości przepływu czyli:

$$\Delta \mathbf{p}_S = f_p(\mathbf{m}) \qquad (4\text{-}18)$$

Wartości wektora $\Delta \mathbf{p}_S$ dla sieci ciepłowniczych opisywane są zależnością (4-14).

Na podstawie definicji powyższych równań, w metodzie oczkowej tworzony jest układ równań (4-19), którego rozwiązaniem są wartości przepływów wody w przewodach sieci.

$$\begin{cases} \mathbf{A}\,\mathbf{m} = \mathbf{0} \\ \mathbf{B}\,\Delta \mathbf{p}_S = \mathbf{B}\,\Delta \mathbf{p}_P \\ \Delta \mathbf{p}_S = f_p(\mathbf{m}) \end{cases} \qquad (4\text{-}19)$$

Zanim zostanie przedstawiona metoda rozwiązywania tego układu równań należy wprowadzić kilka pojęć, które będą wykorzystywane w dalszej części rozdziału.

Zgodnie z przyjętym sposobem odwzorowania sieci ciepłowniczej na graf (rozdział 4.1), otrzymany graf sieci posiada strukturę pierścieniową. Lokalizację pierścieni przeprowadza się poprzez analizę drzewa rozpinającego graf prowadzącą do wyszczególnienia przewodów domykających pierścienie. Krawędzie grafu można zatem podzielić na krawędzie drzewa rozprowadzającego oraz domykające pierścienie zwane przewodami domykającymi. Przyjmując powyższe założenia macierze: incydencji **A** i pierścieni **B** oraz wektor przepływów **m** można zapisać w postaci blokowej:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \left[\mathbf{A}_D \mid \mathbf{A}_R\right] \\ \mathbf{B} &= \left[\mathbf{B}_D \mid \mathbf{B}_R\right] = \left[\mathbf{I} \mid \mathbf{B}_R\right] \\ \mathbf{m} &= \begin{bmatrix} \mathbf{m}_D \\ \mathbf{m}_R \end{bmatrix} \end{aligned} \qquad (4\text{-}20)$$

gdzie:

$\mathbf{A_D}$ - podmacierz macierzy **A** o rozmiarze (v x q), w której numery kolumn odpowiadają indeksom przewodów domykających,

$\mathbf{A_R}$ - podmacierz macierzy **A** o rozmiarze (v x e-q), w której numery kolumn odpowiadają indeksom przewodów tworzących drzewo rozpinające,

$\mathbf{B_D}$ - kwadratowa podmacierz macierzy **B** o wymiarach (q x q), w której numery kolumn odpowiadają indeksom przewodów domykających. W przypadku gdy każda krawędź domykająca należy tylko do jednego pierścienia wówczas podmacierz $\mathbf{B_D}$ jest macierzą jednostkową czyli $\mathbf{B_D} = \mathbf{I}$,

$\mathbf{B_R}$ - podmacierz macierzy **B** o wymiarach (q x e-q), w której numery kolumn odpowiadają indeksom przewodów tworzących drzewo rozpinające,

$\mathbf{m_D}$ - wektor wartości strumieni wody w przewodach domykających,

$\mathbf{m_R}$ - wektor wartości strumieni wody w przewodach tworzących drzewo rozprowadzające.

Przy tak przyjętym podziale macierzy, I-sze prawo Kirchhoffa (4-16) można zapisać w następujący sposób:

$$\left[\mathbf{A_D} \mid \mathbf{A_R}\right]\left[\frac{\mathbf{m_D}}{\mathbf{m_R}}\right] = \mathbf{0} \qquad (4\text{-}21)$$

czyli:

$$\mathbf{A_D}\,\mathbf{m_D} + \mathbf{A_R}\,\mathbf{m_R} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{m_R} = -\mathbf{A_R^{-1}}\,\mathbf{A_D}\,\mathbf{m_D} \qquad (4\text{-}22)$$

Istnieje dowód [18],że:

$$-\mathbf{A_R^{-1}}\,\mathbf{A_D} = \mathbf{B_R^T} \qquad (4\text{-}23)$$

Podstawiając zależność (4-23) do równania (4-22) otrzymujemy:

$$\mathbf{m}_R = \mathbf{B}_R^T \mathbf{m}_D \qquad (4\text{-}24)$$

Równanie (4-24) określa zależność strumieni wody w przewodach drzewa rozprowadzającego od wartości strumieni przepływu wody w przewodach domykających pierścienie.

Korzystając z (4-20), zależność (4-24) można zapisać w postaci:

$$\left[\frac{\mathbf{m}_D}{\mathbf{m}_R}\right] = \left[\frac{\mathbf{I}}{\mathbf{B}_R^T}\right] \mathbf{m}_D \qquad (4\text{-}25)$$

lub

$$\mathbf{m} = \mathbf{B}^T \mathbf{m}_D \qquad (4\text{-}26)$$

Do rozwiązywania układu równań (4-19) zastosowano metodę Newtona [7], [37], [43], [52], [103]. Polega ona na iteracyjnym przybliżaniu wartości strumieni wody w przewodach na podstawie obliczonych poprawek przepływu w domknięciach pierścieni. Zaletą tej metody jest brak wrażliwości na dokładność przyjętego pierwszego przybliżenia, a zatem wstępnie można założyć dowolne wartości przepływów w przewodach - muszą one jednak spełniać I-sze prawo Kirchhoffa (4-16). Jak wynika z przyjętego w pracy sposobu odwzorowania sieci na graf, domknięciami pierścieni są między innymi węzły ciepłownicze, które decydują o ilości wody płynącej w sieci. Pierwsze przybliżenie określane jest na podstawie przyjętych lub obliczonych (dla węzłów ciepłowniczych) wartości strumieni w przewodach domykających $\mathbf{m}_D$ według zależności (4-24), czyli:

$$\mathbf{m}_R^{(i)} = \mathbf{B}_R^T \mathbf{m}_D^{(i)} \qquad (4\text{-}27)$$

gdzie:

i - numer iteracji. Dla pierwszego przybliżenia $i=1$.

Dla przybliżonych wartości strumieni wody sprawdzany jest warunek zachowania energii ciśnienia (4-17). W przypadku nie spełnienia warunków II-go prawa Kirchhoffa zachodzi następująca nierówność:

$$\mathbf{B}\,\Delta\mathbf{p}_S^{(i)} - \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{p}_P^{(i)} = \Delta\mathbf{P}^{(i)} \neq \mathbf{0} \qquad (4\text{-}28)$$

Wobec tego, należy określić wektor takich poprawek wartości strat ciśnienia $\Delta(\Delta p_S)$, który spowoduje że warunki II-go prawa Kirchhoffa zostaną spełnione.

$$\mathbf{B}\left[\Delta\mathbf{p}_S^{(i)} + \Delta\left(\Delta p_S\right)^{(i)}\right] - \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{p}_P = \mathbf{0} \qquad (4\text{-}29)$$

Z równania tego wynika, że:

$$\mathbf{B}\,\Delta\left(\Delta p_S\right)^{(i)} = -\left(\mathbf{B}\,\Delta\mathbf{p}_S^{(i)} - \mathbf{B}\,\Delta\mathbf{p}_P^{(i)}\right) \qquad (4\text{-}30)$$

Podstawiając zależność (4-28) otrzymujemy:

$$\mathbf{B}\,\Delta\left(\Delta p_S\right)^{(i)} = -\Delta\mathbf{P}^{(i)} \qquad (4\text{-}31)$$

W metodzie Newtona wektor poprawek strat ciśnienia przybliżany jest różniczką zupełną wektora funkcji przepływu (4-18). Postać funkcji przepływu określa przedstawiony w punkcie 4.2 matematyczny model przepływu wody wyrażony równaniem (4-14). W postaci macierzowej można go zapisać:

$$\Delta\mathbf{p}_S^{(i)} = \mathbf{R}^{(i)}\left|\mathbf{M}^{(i)}\right|\mathbf{m}^{(i)} \qquad (4\text{-}32)$$

gdzie:

R - diagonalna macierz współczynników **R** dla każdego przewodu obliczonych według zależności (4-15),

M - diagonalna macierz wartości strumieni wody w przewodach. Macierz **M** zawiera bezwzględne wartości strumieni przepływów wody w celu ustalenia znaku wielkości strat ciśnienia w danym przewodzie w zależności od zgodności kierunku przepływu wody z przyjętą orientacją w pierścieniu,

m wektor wartości strumieni wody w odcinkach sieci.

Jak wykazano w punkcie 4.2 pracy, w rurociągach ciepłowniczych przeważa przepływ turbulentny w strefie przejściowej. W związku z tym, wartości macierzy **R** zmieniają się w czasie kolejnych iteracji. Obliczane one są na podstawie wartości strumieni przepływu z wcześniejszej iteracji (*i-1*). Pogarsza to w prawdzie zbieżność obliczeń lecz w znacznym stopniu je upraszcza i przyspiesza.

Korzystając z równania (4-32), przybliżenie wektora poprawek strat ciśnienia w postaci różniczki zupełnej wyraża się wzorem:

$$\Delta\left(\Delta p_S\right)^{(i)} = \left(\frac{d\Delta p_S}{d\mathbf{m}}\right)^{(i)} \Delta\mathbf{m}^{(i)} = 2\,\mathbf{R}^{(i)}\left|\mathbf{M}^{(i)}\right|\Delta\mathbf{m}^{(i)} \qquad (4\text{-}33)$$

Wektor poprawek strumieni przepływu wody **Δm** można uzależnić od wektora poprawek wartości natężenia przepływu w przewodach domykających przybliżając go różniczką zupełną równania (4-26).

$$\Delta\mathbf{m}^{(i)} = \left(\frac{d\mathbf{m}}{d\mathbf{m}_D}\right)^{(i)} \Delta\mathbf{m}_D{}^{(i)} = \mathbf{B}^T\,\Delta\mathbf{m}_D{}^{(i)} \qquad (4\text{-}34)$$

Podstawiając (4-34) i (4-33) do (4-31) otrzymujemy:

$$2\,\mathbf{B}\,\mathbf{R}^{(i)}\,\mathbf{M}^{(i)}\,\mathbf{B}^T\,\Delta\mathbf{m}_D^{(i)} = -\Delta\mathbf{P}^{(i)} \qquad (4\text{-}35)$$

lub

$$\mathbf{Mx}^{(i)}\,\Delta\mathbf{m}_D^{(i)} = -\Delta\mathbf{P}^{(i)} \qquad (4\text{-}36)$$

$$\mathbf{Mx}^{(i)} = 2\,\mathbf{B}\,\mathbf{R}^{(i)}\,\mathbf{M}^{(i)}\,\mathbf{B}^T \qquad (4\text{-}37)$$

Macierz **Mx** (4-37) nazywany jest macierzą Maxwella [37]. Jest ona macierzą kwadratową i symetryczną o rozmiarze (*q* x *q*). Jej elementami są wartości sum pochodnych funkcji przepływu przewodów sąsiednich pierścieni. Na przekątnej natomiast, znajdują się sumy pochodnych funkcji przepływu wszystkich przewodów wchodzących w skład poszczególnych pierścieni. Jeżeli pierścień o numerze *k* nie sąsiaduje z pierścieniem *j* to element mx_{kj} macierzy **Mx** jest równy zero. Wynika

z tego wniosek, że bardzo ważne jest w jaki sposób analizowana jest obecność pierścieni w grafie. Jeżeli macierz **Mx** zawiera informacje o pełnych cyklach grafu, wówczas jest ona gęsta lub prawie gęsta. Aby macierz Maxwella była macierzą rzadką, macierz pierścieni **B** musi zawierać informacje o półcyklach. Wówczas podczas rozwiązywania układy równań można wykorzystać mechanizmy technologii macierzy rzadkich co w znacznym stopniu przyspiesza proces obliczeń przy jednocześnie mniejszych wymaganiach wielkości pamięci operacyjnej komputera. Zalety wynikające z zastosowania technologii macierzy rzadkich w obliczeniach symulacyjnych sieci ciepłowniczych przedstawiono w punkcie 4.4.

Równanie (4-36) stanowi macierzową postać zapisu układu równań liniowych, w którym niewiadomymi są wartości poprawek strumieni przepływu wody w przewodach domykających pierścienie. Istnieje wiele dokładnych oraz iteracyjnych metod rozwiązywania układów równań liniowych [5], [16], [27], [64], [71], [86]. Z uwagi na symetryczność macierzy Maxwella, najbardziej efektywnymi metodami są te, które wykorzystują rozkład macierzy współczynników na macierz trójkątną według metody Choleskiego [29], [46], [64] lub metody $\mathbf{LDL}^{T}$ [64]. W pracy, do rozwiązywania układy równań (4-36) zastosowano zmodyfikowaną metodę Choleskiego przystosowaną do wykorzystanie techniki macierzy rzadkich. Wynikiem rozwiązania układu równań jest wektor poprawek strumieni wody w domknięciach pierścieni:

$$\Delta \mathbf{m}_{D}^{(i)} = -\left[\mathbf{Mx}^{(i)}\right]^{-1} \Delta \mathbf{P}^{(i)} \qquad (4\text{-}38)$$

Na podstawie otrzymanego wyniku, obliczane są kolejne przybliżenie przepływów wody w przewodach domykających pierścienie:

$$\mathbf{m}_{D}^{(i+1)} = \mathbf{m}_{D}^{(i)} + \Delta \mathbf{m}_{D}^{(i)} \qquad (4\text{-}39)$$

A dla pozostałych przewodów:

$$\mathbf{m}_{R}^{(i+1)} = \mathbf{m}_{R}^{(i)} + \Delta \mathbf{m}_{R}^{(i)} \qquad (4\text{-}40)$$

gdzie zgodnie z (4-27):

$$\Delta \mathbf{m}_{R}^{(i)} = \mathbf{B}_{R}^{T} \Delta \mathbf{m}_{D}^{(i)} \qquad (4\text{-}41)$$

Podstawiając równanie (4-41) do (4-40) otrzymujemy:

$$\mathbf{m}_R^{(i+1)} = \mathbf{m}_R^{(i)} + \mathbf{B}_R^T \Delta\mathbf{m}_D^{(i)} \qquad (4\text{-}42)$$

Jeżeli wszystkie elementy wektora poprawek otrzymanego w i-tej iteracji są mniejsze od założonej dokładności ε, wówczas obliczenia zostają zakończone. W przeciwnym wypadku przeprowadzane są ponownie. Warunek zakończenia obliczeń można zapisać w następujący sposób:

$$\max\left|\Delta\mathbf{m}_D^{(i)}\right| \le \varepsilon \qquad (4\text{-}43)$$

4.4 *Zastosowanie technologii macierzy rzadkich w obliczeniach symulacyjnych sieci ciepłowniczych*

W zagadnieniach symulacji przepływów wody w sieciach ciepłowniczych pojawia się problem braku wystarczająco dużej pamięci w komputerach wymaganej z uwagi na duże rozmiary macierzy opisujących strukturę sieci. Inny problem związany jest z koniecznością rozwiązania układu wielu równań co przy braku optymalizacji struktury danych, dodatkowo wydłuża czas obliczeń.

W oparciu o analizę grafu tworzone są macierze incydencji krawędzi o wymiarach (w x e) gdzie w jest liczbą wierzchołków grafu, a e – liczbą przewodów sieci (krawędzi grafu). Ponieważ każda krawędź grafu jest incydentna dokładnie do dwóch wierzchołków, to w każdej kolumnie macierzy znajdują się tylko dwa elementy niezerowe. Jest to szczególna właściwość macierzy incydencji, która powoduje, że macierze te zawierają niewielką liczbę elementów niezerowych w stosunku do ich wielkości. Wielkością określającą stopień wypełnienie macierzy jest współczynnik SW zdefiniowany jako stosunek ilości elementów niezerowych macierzy do ilości wszystkich komórek macierzy.

$$SW = \frac{n}{w \times e} \qquad (4\text{-}44)$$

gdzie:

n – liczba elementów niezerowych,

w – liczba wierszy macierzy,

e – liczba kolumn macierzy.

Na podstawie wzoru (4-44) nie można jednoznacznie określić wartości współczynnika *SW* dla macierzy incydencji sieci ciepłowniczych ponieważ wielkość oraz zawartość macierzy zależy także od topologii sieci. Dlatego do dalszych analiz wykorzystano bazy danych dla kilkunastu rzeczywistych sieci ciepłowniczych w Polsce. Obliczenia wykonano dla systemów ciepłowniczych o zróżnicowanej wielkości tzn. od 6MW do 672 MW mocy systemu. Wyniki obliczeń zostały zamieszczone w tabeli Tab. 4-1, z których wynika że stopień wypełnienia macierzy incydencji nie przekracza wartości 0,015. Wartość współczynnika *SW* gwałtownie maleje wraz ze wzrostem wielkości sieci ciepłowniczej. W podobny sposób wykonano obliczenia dla macierzy Maxwella. Stopień wypełnienia tej macierzy jest wyższy w porównaniu z macierzą incydencji i wynosi około 0,05 dla dużych sieci ciepłowniczych oraz około 0,08 dla sieci osiedlowych. Tendencja spadku wartości współczynnika *SW* jest taka sama jak dla macierzy incydencji. Natomiast wyższe wartości współczynnika *SW* dla macierzy Maxwella wynikają z większej liczby elementów niezerowych oraz z mniejszego rozmiaru tych macierzy.

Analizując zależność (4-44), należało spodziewać się tak szybkiego spadku wartości współczynnika *SW* wraz ze wzrostem wielkości macierzy, ponieważ liczba elementów niezerowych w macierzy wzrasta proporcjonalnie do przyrostu liczby węzłów sieciowych. Z drugiej strony, rozmiar (w x e) macierzy wzrasta w kwadracie przyrostu liczby węzłów.

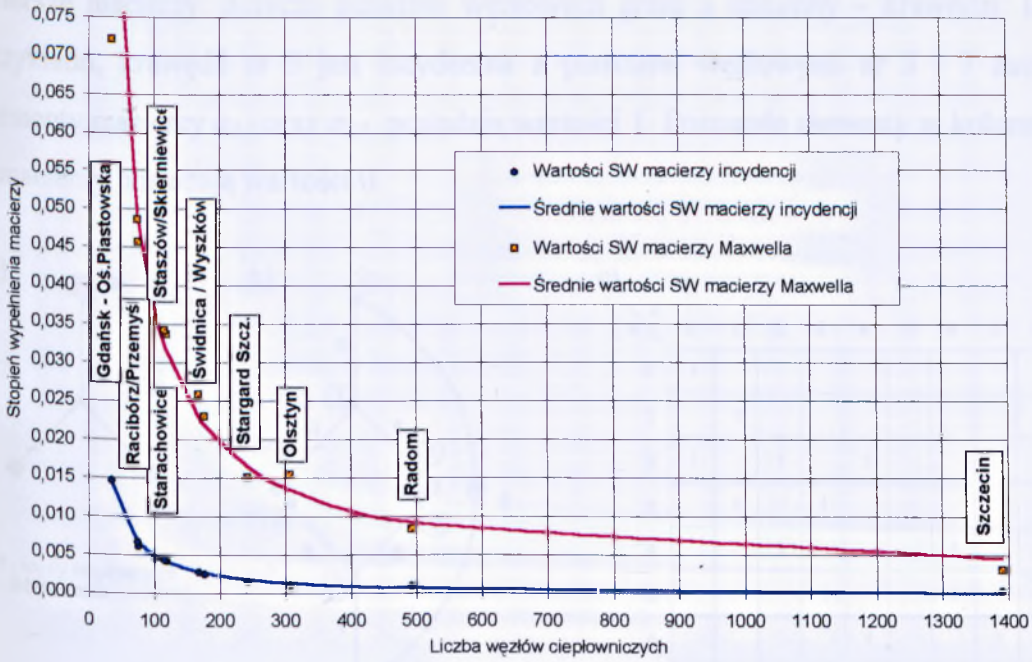
Celem wykonanych obliczeń było uzyskanie wartości liczbowych współczynników *SW* dla sieci rzeczywistych oraz określenia zakresu zmienności jego wartości w przypadku analizy grafów sieci ciepłowniczych z uwzględnieniem specyficznego charakteru tego rodzaju systemów. W przypadku innych sieci (gazowych, wodociągowych, elektroenergetycznych) wyniki obliczeń mogą być odmienne od zaprezentowanych.

Tab. 4-1 Zestawienie wartości współczynnika *SW* dla macierzy incydencji oraz macierzy Maxwella dla 12 systemów sieci ciepłowniczych w Polsce.

System ciepłowniczy	Moc	Liczba węzłów cieplnych	Rozmiar mac. incydencji (liczba wzł x liczba odc.)	Wsp. SW macierzy incydencji	Rozmiar macierzy Maxwella	Wsp. SW macierzy Maxwella
Szczecin	672	1391	6166 x 7634	**0,0003244**	1469 x 1469	**0,003084**
Radom	362	492	2130 x 2633	**0,0009390**	504 x 504	**0,008322**
Olsztyn	240	307	1922 x 2259	**0,001041**	338 x 338	**0,01538**
Stargard Szczeciński	115	243	1306 x 1553	**0,001528**	248 x 248	**0,01512**
Świdnica	60	177	808 x 987	**0,002475**	180 x 180	**0,02296**
Wyszków	45	168	730 x 898	**0,002740**	169 x 169	**0,02580**
Staszów	32	119	474 x 593	**0,004219**	120 x 120	**0,03361**
Starachowice-Star	83	116	466 x 582	**0,004292**	117 x 117	**0,03411**
Skierniewice	85	102	448 x 548	**0,004464**	101 x 101	**0,03539**
Racibórz	12	76	332 x 406	**0,006024**	75 x 75	**0,04569**
Przemyśl	67	75	298 x 372	**0,006711**	75 x 75	**0,04853**
Gdańsk-Osiedle Piastowska	6	36	136 x 173	**0,01471**	38 x 38	**0,07202**

Rysunek (Rys. 4–6) przedstawia w formie graficznej wyniki obliczeń wartości współczynnika wypełnienia macierzy incydencji i Maxwella dla wymienionych wyżej systemów sieci ciepłowniczych. Wartości *SW* odniesiono do liczby węzłów ciepłowniczych ponieważ jest to wielkość charakterystyczna dla systemów ciepłowniczych i przyjęta jako miara wielkości systemu ciepłowniczego.

Z powyższych obliczeń wynika że, stopień wypełnienia macierzy jest niewielki, rzędu kilku procent, a w przeważającej większości przypadków wynosi poniżej jednego procenta. Jak wynika z wcześniejszych rozważań, stopień wypełnienia macierzy maleje wykładniczo wraz ze wzrostem wielkości sieci ciepłowniczej. Można zatem jednoznacznie stwierdzić, że stosowanie technologii macierzy rzadkich w przypadku analizy przepływów wody w sieciach ciepłowniczych, nawet tych najmniejszych, jest uzasadnione.



Rys. 4–6 Wykres zmian wielkości stopnia wypełnienia macierzy incydencji oraz Maxwella w zależności od wielkości systemu sieci ciepłowniczej.

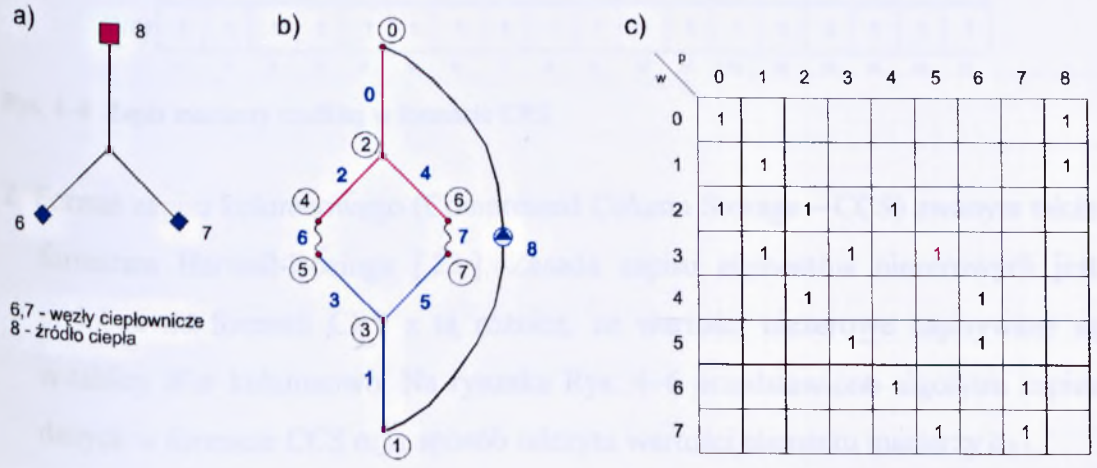
Z uwagi na bardzo niski stopień wypełnienia elementami niezerowymi macierzy incydencji oraz Maxwella, celowe jest wykorzystanie własności macierzy rzadkich w operacjach macierzowych oraz obliczeniach numerycznych.

Technika macierzy rzadkich spełnia dwa podstawowe zadania:

1. oszczędne gospodarowanie pamięcią poprzez zapamiętywania jedynie niezerowych elementów macierzy,
2. umożliwia wykonywanie operacji tylko na niezerowych elementach macierzy. W rezultacie prowadzi to do radykalnego zmniejszenia liczby operacji w stosunku równym mierze rzadkości macierzy.

Obecnie, znanych jest wiele sposobów zapamiętywania macierzy rzadkich. Poniżej zostały opisane te najczęściej stosowane. Prezentacja formatów zapisu macierzy rzadkich przedstawiona zostanie na przykładzie prostej sieci ciepłowniczej składającej się z jednego źródła ciepła oraz dwóch węzłów ciepłowniczych (Rys. 4–7a). Przyjęty w tej pracy sposób tworzenia grafu sieci ciepłowniczej dotyczy analizy pełnych obiegów wody sieciowej przez węzły ciepłownicze. Zatem konieczne jest „rozklejenie" sieci na część zasilającą i powrotną. Szczegółowy opis sposobu tworzenia grafu sieci przedstawiono w rozdziale 4.1. Na rysunku Rys. 4–7b zamieszczono schemat grafu sieci przyjęty do dalszych analiz. Natomiast na rysunku Rys. 4–7c przedstawiono macierz incydencji krawędzi grafu nieskierowanego sieci.

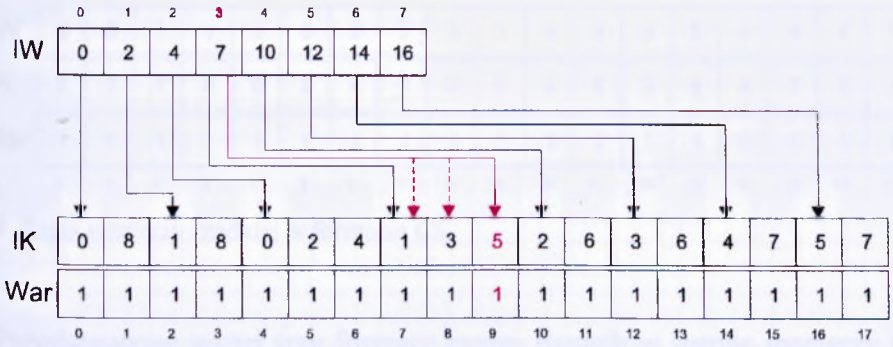
Wiersze macierzy, dotyczą punktów węzłowych grafu a kolumny – krawędzi. Dla przykładu, krawędź nr 5 jest incydentna z punktami węzłowymi nr 3 i 7 zatem elementy macierzy $a_{3,5}$ oraz $a_{7,5}$ posiadają wartości 1. Pozostałe elementy w kolumnie 5 macierzy posiadają wartości 0.



Rys. 4–7 Przykład sieci ciepłowniczej i jej macierzy incydencji a) schemat sieci. b) graf sieci. c) macierz incydencji

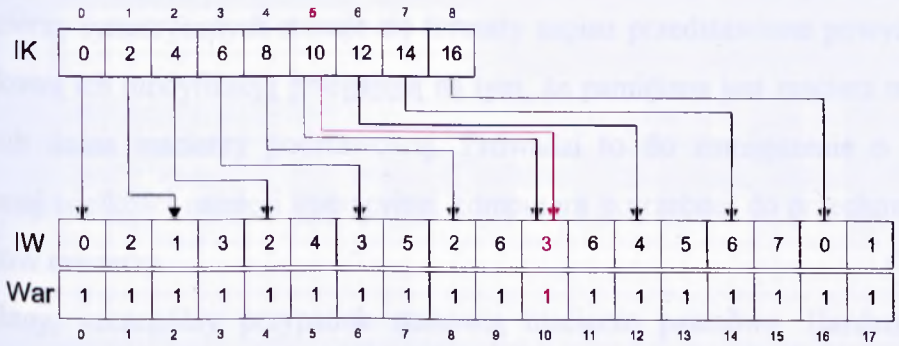
Macierz incydencji (wg Rys. 4–7c), można zapisać w pamięci komputera stosując kilka formatów zapisu. Poniżej opisane zostały te najczęściej używane:

1. Format zapisu wierszowego (Compressed Row Storage – CRS). Według tego sposobu zapisu, elementy niezerowe kolejnych wierszy macierzy zapisywane są w tablicy jednowymiarowej *War*. Dodatkowo tworzone są dwie tablice typu *integer* : *IK* – która zawiera indeksy kolumn dla elementów niezerowych, *IW* zawierająca informacje o lokalizacji pierwszych elementów niezerowych w wierszach macierzy. Algorytm zapisu danych w formacie CRS przedstawiono na rysunku Rys. 4–8. Kolorem czerwonym został zaznaczony sposób poszukiwania elementu macierzy $a_{3,5}$. Najpierw z pozycji $w_p=3$ tablicy *IW* odczytywany jest adres początku danych wiersza nr 3 czyli $k_p=7$. Z pozycji $w_k=3+1$ odczytywany jest adres końca danych wiersza czyli $k_k=10$. Następnie w komórkach tablicy *IK* od adresu $k_p=7$ do $k_k=10$ szukana jest wartość indeksu kolumny szukanego elementu niezerowego czyli wartość 5. Ponieważ indeks kolumny został znaleziony na pozycji 9 w tabeli *IK* to wartość elementu niezerowego macierzy rzadkiej odczytywany jest z tej samej pozycji (9) lecz z tablicy *War*.



Rys. 4–8 Zapis macierzy rzadkiej w formacie CRS

2. Format zapisu kolumnowego (Compressed Column Storage – CCS) zwanym także formatem Harwell-Boeinga [22]. Zasada zapisu elementów niezerowych jest podobna do formatu CRS z tą różnicą, że wartości niezerowe zapisywane są w tablicy *War* kolumnowo. Na rysunku Rys. 4–6 przedstawiono algorytm zapisu danych w formacie CCS oraz sposób odczytu wartości elementu macierzy $a_{3,5}$.



Rys. 4–9 Zapis macierzy rzadkiej w formacie CCS

3. Format zapisu współrzędnych elementów niezerowych (Coordinate Storage – CS). Ten rodzaj zapisu zakłada przechowywanie wartości elementów niezerowych macierzy wraz z ich współrzędnymi (indeksy wierszy i kolumn). Sposób ten wymaga utworzenia w pamięci komputera trzech tablic jednowymiarowych o wielkości równej liczbie elementów niezerowych macierzy. Tablica *War* zawiera wartości elementów niezerowych natomiast tablice: *IW* i *IK* – numery wierszy i kolumn elementów macierzy. Na poniższym rysunku (Rys. 4–10) przedstawiono sposób zapisu macierzy incydencji (według Rys. 4–6c) w formacie CS. Ten zapis jest zdecydowanie prostszy od formatu CRS oraz CCS, natomiast wymaga on większej pamięci operacyjnej komputera co można potraktować za jego wadę.

IW	0	0	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7
IK	0	8	1	8	0	2	4	1	3	5	2	6	3	6	4	7	5	7
War	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Rys. 4–10 Zapis macierzy rzadkiej w formacie CS

Przedstawione wyżej trzy formaty zapisu danych w formie macierzy rzadkich są formatami najczęściej spotykanymi i opisywanymi w literaturze [22], [45], [71], [83], [85]. Stanowią one grupę formatów ogólnych, służących do zapisu dowolnych macierzy o dowolnym rozkładzie elementów niezerowych. W zagadnieniach dotyczących symulacji przepływów wody w sieciach ciepłowniczych pojawiają się w większości przypadków macierze symetryczne. Jest to bardzo istotna właściwość nie tylko z punktu widzenia samych obliczeń numerycznych, ale także z uwagi na możliwą optymalizację sposobu zapisu macierzy w pamięci komputera. Dla macierzy symetrycznych stosuje się formaty zapisu przedstawione powyżej, lecz z dodatkową ich modyfikacją polegającą na tym, że pamiętana jest macierz trójkątna górna lub dolna macierzy podstawowej. Prowadzi to do zmniejszenie o połowę wymaganej wielkości pamięci operacyjnej komputera potrzebnej do przechowywania elementów macierzy.

Inny, szczególny przypadek stanowią macierze pasmowe. Bardzo często spotykanymi są macierze ortogonalne, w których elementy niezerowe znajdują się jedynie na przekątnej macierzy. Sposób zapisu takiej macierzy jest bardzo prosty. Polega on na przechowywaniu wartości przekątnej macierzy (n x n) w tablicy jednowymiarowej o rozmiarze n.

Istnieje ciekawy sposób zapisu macierzy pasmowej - trójdiagonalnej [45]. Ten rodzaj macierzy pojawia się często w zagadnieniach dotyczących np.: przewodzenia ciepła rozwiązywanych metodami elementów skończonych lub różnic skończonych.

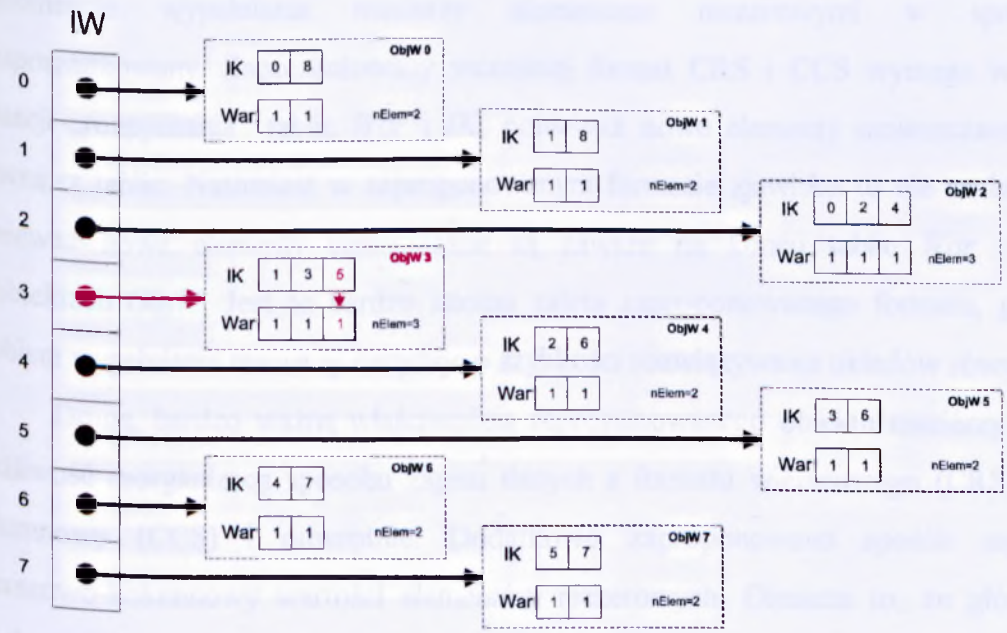
$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 3 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 7 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 9 \end{pmatrix}$$

B (-1)	0	8	3	1	1
B (0)	1	3	5	7	9
B (+1)	2	4	6	8	0

Rys. 4–11 Przykład macierzy pasmowej trójdiagonalnej oraz jej zapis w formacie CDS

Według metody CDS (Compressed Diagonal Storage), elementy każdego pasma macierzy zapisywane są w oddzielnych tablicach jednowymiarowych. Zatem konieczne jest tworzenie tylu tablic ile pasm elementów niezerowych posiada macierz. Na rysunku Rys. 4–11 przedstawiono zapis wartości elementów niezerowych w formacie CDS przykładowej macierzy pasmowej, trój-diagonalnej. Tablica *B(0)* przechowuje wartości elementów macierzy znajdujących się na przekątnej macierzy. Natomiast w tablicy *B(+1)* zapisane są wartości liczb stanowiących pierwsze górne pasmo macierzy. Tablica *B(-1)* zawiera elementy dolnego pasma macierzy. Macierze pasmowe oczywiście mogą być zapisywane w formatach wcześniej przedstawionych (CRS, CCS,CS) lecz format CDS jest najbardziej efektywnym sposobem zapisu tego typu macierzy, ponieważ nie wymaga rezerwowania dodatkowej pamięci na tablice przechowujące informacje o położeniu każdego elementu niezerowego w macierzy.

Najczęściej stosowanymi formatami zapisu macierzy rzadkich są CRS i CCS. Są to bardzo efektywne formaty zarówno pod względem wielkości wymaganej pamięci komputera jak i dostępności do wartości elementów niezerowych macierzy, co w decydujący sposób wpływa na przyspieszenie procesów obliczeń numerycznych. Dlatego w pracy przyjęto do obliczeń właśnie ten sposób zapisu macierzy. Wprowadzono także pewne modyfikacje formatu wynikające z przyjętej w pracy techniki programowania obiektowego języka C++. Na rysunku (Rys. 4–12) zamieszczono przykład zapisu macierzy (wg. Rys. 4–7c) w zmodyfikowanym formacie CRS.



Rys. 4–12 Przykład zapisu macierzy rzadkiej według zmodyfikowanego formatu CRS.

Główne zmiany formatu dotyczą sposobu realizacji przechowywania wartości elementów niezerowych macierzy. Polegają one na tym, że wartości niezerowe wierszy lub kolumn (z zależności od przyjętego formatu) zapisywane są w formie oddzielnego obiektu typu *ObjW*. Obiekt ten zawiera dwie tablice jednowymiarowe o wielkości równej liczbie elementów niezerowych w danym wierszu (kolumnie). Tablica *War* przechowuje wartości elementów niezerowych wiersza (kolumny) macierzy, którego dotyczy dany obiekt. Natomiast w tablicy *IK* zapisane są numery kolumn (wierszy) macierzy odpowiednio dla każdego elementu niezerowego. Główny obiekt reprezentujący macierz rzadką zawiera jednowymiarową tablicę *IW* wskaźników do obiektów typu *ObjW*. Odczyt wartości elementu a_{ij} macierzy polega na pobraniu wartości wskaźnika do obiektu *ObjW* z tablicy *IW*, czyli *IW[i]*. Następnie, należy odnaleźć w tablicy *IK* wartość *j* czyli numer kolumny w której znajduje się element a_{ij}. Ostatnim etapem jest odczytanie wartości elementu w tablicy *War* na tej samej pozycji, na której znaleziono wartość *j* w tablicy *IK*. Jest to opisowa forma sposobu odczytu wartości elementu niezerowego. W praktyce, główny obiekt macierzy rzadkiej oraz obiekty *ObjW* posiadają odpowiednie metody realizujące opisane czynności. Zatem korzystanie z obiektu nie wymaga znajomości jego wewnętrznej struktury. Zastosowanie techniki obiektowej w znacznym stopniu uprościło algorytmy realizacji zapisu macierzy rzadkich, co w efekcie prowadzi do przyspieszenia procesu obliczeń numerycznych. Szczególnie widoczne jest to w momencie wypełniania macierzy elementami niezerowymi w sposób nieuporządkowany. Zaprezentowany wcześniej format CRS i CCS wymaga w tej sytuacji „rozpychania" tablic *War* i *IK*, ponieważ nowe elementy umieszczane są wewnątrz tablic. Natomiast w zaproponowanym formacie zjawisko to nie zachodzi ponieważ nowe elementy umieszczane są zawsze na końcu tablic *War* i *IK* w obiektach *ObjW*. Jest to bardzo istotna zaleta zaproponowanego formatu, gdyż problem wypełniania macierzy decyduje o szybkości rozwiązywania układów równań.

Drugą, bardzo ważną właściwością zaproponowanego obiektu macierzy jest możliwość reorganizacji sposobu zapisu danych z formatu wierszowego (CRS) na kolumnowy (CCS) i odwrotnie. Dodatkowo zaproponowano sposób zapisu wierszowo-kolumnowy wartości elementów niezerowych. Oznacza to, że główny obiekt macierzy przechowuje wartości elementów wierszowo i kolumnowo

jednocześnie. Wymaga to wprawdzie rezerwowania dwa razy większego obszaru pamięci operacyjnej komputera lecz w znacznym stopniu przyspiesza obliczenia numeryczne.

Jedną z zalet stosowania techniki macierzy rzadkich jest oszczędność pamięci operacyjnej komputera. Poniżej przedstawiono analizę wielkości wymaganej pamięci do zapisu macierzy rzadkich oraz analizę opłacalności stosowania tej techniki. Zaproponowany w pracy, zmodyfikowany format zapisu macierzy rzadkich wymaga zarezerwowania pewnej wielkości pamięci komputera na przechowywanie wartości elementów niezerowych oraz dych pomocniczych zawierających informacje o położeniu elementów niezerowych w macierzy. Przedstawiona analiza ma na celu określenie kryterium efektywności stosowania technologii macierzy rzadkich. W tym celu przeprowadzono obliczenia wielkości pamięci operacyjnej komputera wymaganej przez przyjęty w pracy format w porównaniu do wielkości pamięci wymaganej przez zapis w formacie tablicowym tzn. w tablicach dwuwymiarowych. Obliczenia wykonano według następującego algorytmu:

1. Obszar pamięci zajmowanej przez macierz zapisywaną w formacie tablicowym:

$$M_1 = w \times e \times nWar \qquad (4\text{-}45)$$

gdzie:

M_1 – obszar pamięci operacyjnej komputera zajmowanej przez macierz, b,
w – liczba wierszy macierzy,
e – liczba kolumn macierzy,
$nWar$ – obszar pamięci operacyjnej komputera potrzebnej na przechowywanie jednego elementu macierzy, b.

2. Obszar pamięci zajmowanej przez macierz zapisaną w zmodyfikowanym formacie CRS:

Wielkość pamięci zajmowanej przez tablicę *IW* głównego obiektu macierzy.

Wartościami przechowywanymi w tej tablicy są wskaźniki na obiekty typu *ObjW*. Wielkość zajmowanej pamięci przez zmienną wskaźnikową wynosi 4 bajty czyli:

$$M_{IW} = w \times 4 \qquad (4\text{-}46)$$

Obszar pamięci zajmowanej przez wszystkie obiekty typu *ObjW*.

$$M_{IK} = n \times 2 \qquad (4\text{-}47)$$

$$M_{War} = n \times nWar \qquad (4\text{-}48)$$

$$M_{nElem} = w \times 2 \qquad (4\text{-}49)$$

$$M_2 = M_{IW} + M_{IK} + M_{War} + M_{nElem} \qquad (4\text{-}50)$$

gdzie:

M_{IW} - obszar pamięci zajmowanej przez tablicę *IW*, b,

M_{IK} - obszar pamięci zajmowanej przez tablicę *IK*, b,

M_{War} - obszar pamięci zajmowanej przez tablicę wartości elementów niezerowych *War*, b,

M_{nElem} - obszar pamięci zajmowanej przez zmienne *nElem* zawierające liczbę elementów niezerowych w każdym wierszu macierzy, b,

M_2 – obszar pamięci operacyjnej komputera zajmowanej przez macierz rzadką, b,

w – liczba wierszy macierzy,

n – liczba elementów niezerowych macierzy,

nWar – obszar pamięci operacyjnej komputera potrzebnej na przechowywanie jednego elementu macierzy, b. Tab. 4-2 zawiera wartości *nWar* w zależności od typu danych.

Tab. 4-2 Tabela wartości *nWar* dla różnych typów danych

nWar b	Typ danych	Zakres
1	bool char	true/false -128 ÷ 128
2	short int	-32,768 ÷ 32,767
4	int long *void	-2,147,483,648 ÷ 2,147,483,647 -2,147,483,648 ÷ 2,147,483,647 wskaźnik
6	float	$3.4 \times 10^{-38} \div 3.4 \times 10^{+38}$
8	double	$1.7 \times 10^{-308} \div 1.7 \times 10^{+308}$
10	long double	$3.4 \times 10^{-4932} \div 1.1 \times 10^{+4932}$

Miarą efektywności stosowania techniki macierzy rzadkich jest współczynnik *WM* określający stopień wykorzystania pamięci operacyjnej komputera i zdefiniowany jest jako:

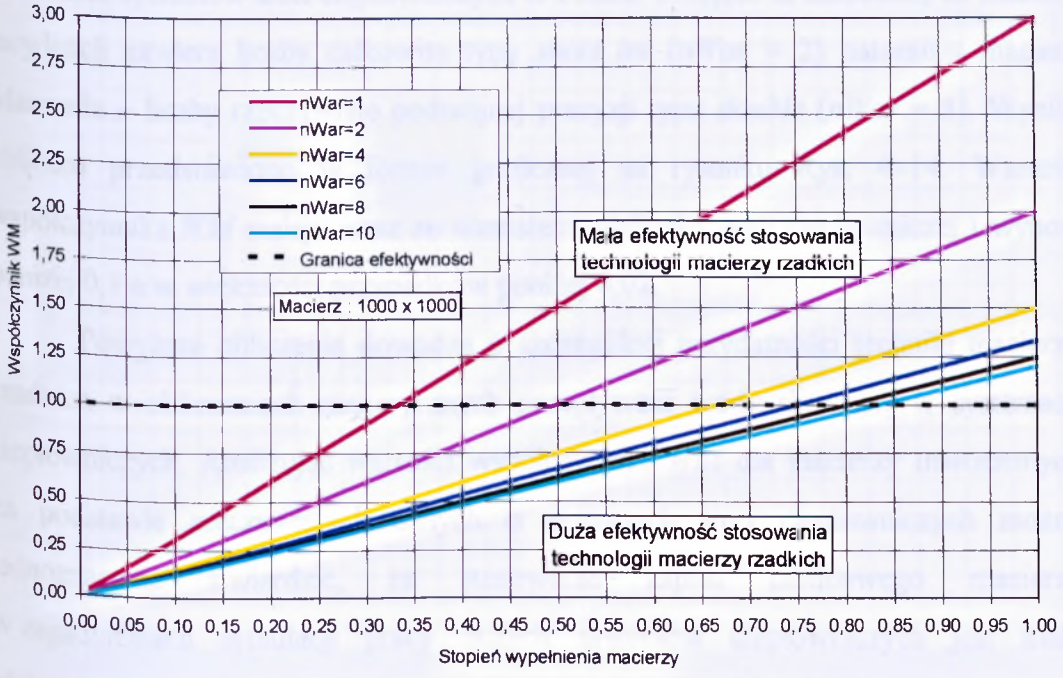
$$WM = \frac{M_2}{M_1} \qquad (4\text{-}51)$$

Wartość współczynnika *WM* określa efektywność stosowania techniki macierzy rzadkich pod względem wykorzystania pamięci operacyjnej komputera. Macierze dla których $WM < 1$ powinny być zapisane w pamięci komputera według jednego z wcześniej opisanych formatów zapisu macierzy rzadkich.

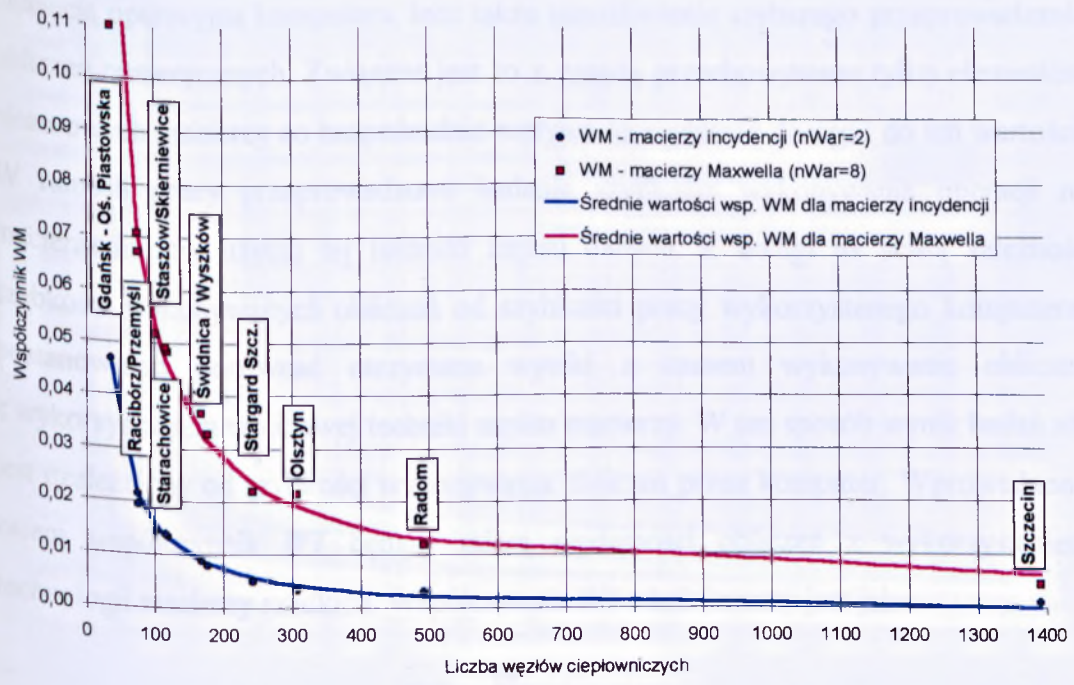
Jak wynika ze wzoru (4-50), ilość zajmowanej pamięci M_2 przez macierz rzadką ściśle zależy od typu danych przechowywanych w macierzy czyli od wartości *nWar*. Na rysunku Rys. 4–13 przedstawiono zależność współczynnika *WM* od rodzaju danych przechowywanych w macierzy oraz od stopnia wypełnienia macierzy elementami niezerowymi (*SW*). Obliczenia wykonano dla macierzy o wymiarach 1000 x 1000.

Jak wynika z obliczeń, efektywność stosowania techniki macierzy rzadkich wzrasta wraz ze wzrostem wielkości zajmowanej pamięci przez przechowywane elementy macierzy (*nWar*) oraz wraz ze zmniejszeniem stopnia wypełnienia macierzy (*SW*). W przypadku obliczeń numerycznych rozpływów wody w sieciach ciepłowniczych, stosowanie techniki macierzy rzadkich jest szczególnie wskazane, ponieważ jak to

wykazano wcześniej, stopień wypełnienia *SW* macierzy incydencji i Maxwella nie przekracza wartości 0,08.



Rys. 4–13 Wykres efektywności stosowania zmodyfikowanej metody zapisu macierzy rzadkich w zależności od stopnia wypełnienia macierzy oraz rodzaju przechowywanych informacji w macierzy.



Rys. 4–14 Wykres wartości współczynnika *WM* (zajętości pamięci) macierzy incydencji oraz macierzy Maxwella dla 12 sieci ciepłowniczych w Polsce w zależności od wielkości sieci ciepłowniczej.

W pracy przeprowadzono dodatkowo obliczenia wartości współczynnika *WM* dla macierzy incydencji oraz Maxwella opartych na rzeczywistych danych dla kilkunastu systemów sieci ciepłowniczych w Polsce. Przyjęto tu założenie, że macierz incydencji zawiera liczby całkowite typy *short int* (*nWar* = 2) natomiast macierz Maxwella – liczby rzeczywiste podwójnej precyzji typu *double* (*nWar* = 8). Wyniki obliczeń przedstawiono w formie graficznej na rysunku Rys. 4–14. Wartość współczynnika *WM* maleje wraz ze wzrostem wielkości sieci ciepłowniczej i wynosi poniżej 0,1 a w większości przypadków poniżej 0,02.

Powyższe obliczenia dowodzą o szczególnej przydatności techniki macierzy rzadkich w obliczeniach numerycznych przepływów wody sieciowej w systemach ciepłowniczych. Analizując wartości współczynnika *WM* dla macierzy utworzonych na podstawie rzeczywistych danych o systemach sieci ciepłowniczych można jednoznacznie stwierdzić, że stosowanie zapisu tablicowego macierzy w zagadnieniach symulacji pracy dużych systemów ciepłowniczych jest mało efektywne i prowadzi do niepotrzebnego wydłużenia czasu obliczeń.

Zadaniem techniki macierzy rzadkich jest nie tylko oszczędne gospodarowanie pamięcią operacyjną komputera, lecz także umożliwienie szybszego przeprowadzania obliczeń numerycznych. Związane jest to z zasadą przechowywana tylko elementów niezerowych macierzy co bezpośrednio wpływa na szybkość dostępu do ich wartości. W ramach pracy przeprowadzono badania szybkości wykonywania operacji na macierzach przy użyciu tej techniki zapisu danych. Z uwagi na ścisłą zależność szybkości wykonywanych obliczeń od szybkości pracy wykorzystanego komputera, postanowiono porównać otrzymane wyniki z czasem wykonywania obliczeń z wykorzystaniem tablicowej techniki zapisu macierzy. W ten sposób wynik badań nie jest uzależniony od szybkości wykonywania obliczeń przez komputer. Wprowadzono zatem współczynnik *WT* będący miarą wydajności obliczeń z wykorzystaniem technologii macierzy rzadkich. Współczynnik *WT* zdefiniowany jest jako:

$$WT = \frac{\Theta_G}{\Theta_{RZ}} \qquad (4\text{-}52)$$

gdzie:

Θ_G – czas wykonywania operacji testowych z wykorzystaniem tablicowego formatu zapisu macierzy , s,

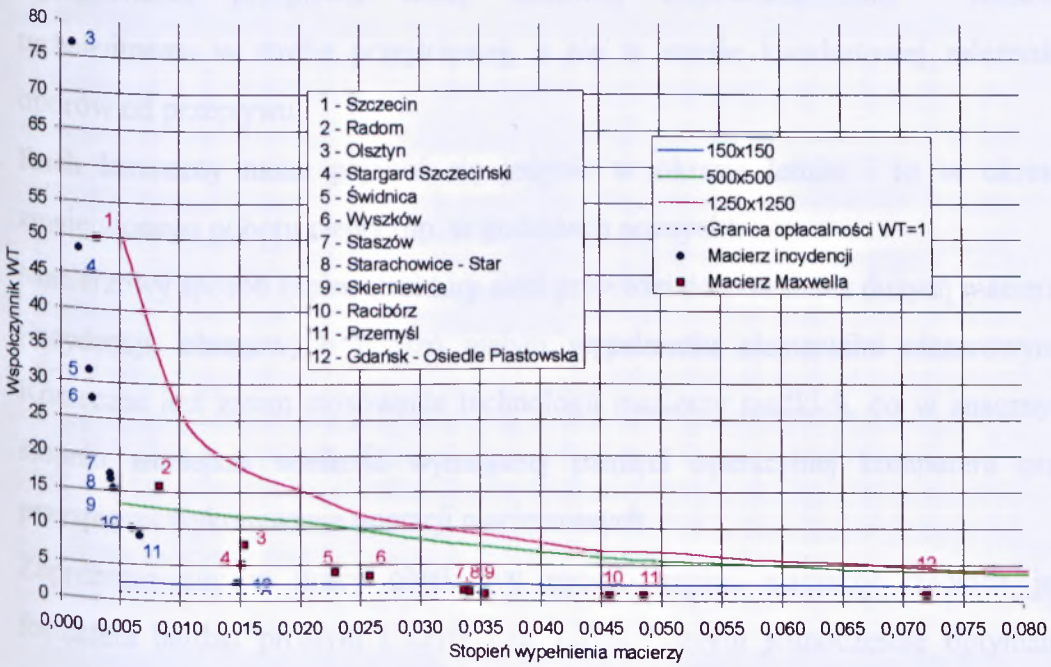
Θ_{RZ} – czas wykonywania operacji testowych z wykorzystaniem technologii macierzy rzadkich , s.

Operacją testową w przeprowadzonych badaniach było tworzenie macierzy transponowanej. Są to bardzo proste działania, lecz w pełni wykorzystujące właściwości zapisu elementów niezerowych w formacie macierzy rzadkich i często stosowane w obliczeniach związanych z formułowaniem i rozwiązywaniem układów równań.

Badania wykonano dla trzech macierzy kwadratowych o wymiarach: 150x150, 500x500 i 1250x1250 w zakresie wartości stopnia wypełnienia macierzy *SW* od SW=0,005 do SW=0,080. Zakres zmienności wartości współczynnika *SW* określono na podstawie danych o 12 wcześniej wspomnianych systemach sieci ciepłowniczych w Polsce, dla których wyznaczono macierze incydencji i macierze Maxwella. Badaniom poddano zastosowany w pracy zmodyfikowany format CRS i CCS zapisu macierzy rzadkich.

W trakcie badań przeprowadzono 10 serii obliczeń, z których uśrednione wartości współczynnika *WT* przedstawiono w formie wykresu (Rys. 4–15). Z wykonanej analizy wynika, że opłacalność stosowania techniki macierzy rzadkich maleje wraz ze wzrostem wartości stopnia wypełnienia macierzy, natomiast rośnie wraz ze wzrostem wielkości macierzy. Dla dużych macierzy, szybkość wykonywania obliczeń jest kilkadziesiąt razy większa niż dla obliczeń wykonanych na macierzach zapisywanych w formacie tablicowym. Na rysunku Rys. 4–15 zaznaczono także wartości współczynnika *WT* dla macierzy incydencji oraz Maxwella powstałych na podstawie danych dla wspomnianych wcześniej systemów sieci ciepłowniczych. W większości przypadków współczynnik *WT* przyjmuje wartości wyższe od *1*. Efektywność stosowania macierzy rzadkich gwałtownie wzrasta wraz ze wzrostem wielkości macierzy czyli także i systemu sieci ciepłowniczej. Na zamieszczonym rysunku, kilka punktów znajduje się w okolicy linii wyznaczającej granicę efektywności stosowania techniki macierzy rzadkich czyli *WT=1*. Punkty te dotyczą macierzy Maxwella niewielkich systemów sieci. Ponieważ rozmiary macierzy w tych przypadkach są

także małe w związku z tym mimo niskiej efektywności stosowania tej technologii zapisu macierzy, obliczenia wykonywane są i tak stosunkowo szybko. Zatem nie ma potrzeby stosowania zapisu tablicowego macierzy dla małych systemów sieci ciepłowniczych.



Rys. 4–15 Wartości współczynnika efektywności stosowania macierzy rzadkich w zależności od stopnia wypełnienia macierzy oraz jej wielkości.

Podczas prac badawczych nad szybkością operacji macierzowych zaobserwowano, że czas wykonywania obliczeń zależy także od sposobu pisania programu (procedur). Zauważono, że procedury (metody) zapisujące dane do macierzy lub je odczytujące, powinny być jak najkrótsze i powinny zawierać tylko niezbędną liczbę instrukcji. Szczególnie spowalniające pracę programu są instrukcje warunkowe, których stosowanie z jednej strony zwiększa niezawodność programu (np. kontrola zakresu tablic), a z drugiej strony znacznie go spowalnia. Zatem pisząc metody obsługi obiektu macierzy rzadkich szczególnie należy mieć to na uwadze.

Innym, bardzo istotnym spostrzeżeniem jest to, że aby otrzymać maksymalny efekt w stosowaniu technologii macierzy rzadkich należy konsekwentnie stosować tę technologię we wszystkich etapach procesu obliczeniowego. Czyli począwszy od momentu formułowania macierzy układu równań kończąc na procedurach rozwiązujących te równania.

4.5 Wnioski

1. Przewymiarowanie systemów sieci ciepłowniczych jest główną przyczyną występowania przepływu wody sieciowej odpowiadającemu ruchowi turbulentnemu w strefie przejściowej, a nie w strefie kwadratowej zależności oporów od przepływu.
2. Ruch laminarny może pojawić się jedynie w okresie letnim i to w okresie zmniejszonego poboru ciepła (np. w godzinach nocnych).
3. Macierzowy sposób zapisu struktury sieci prowadzi do powstania dużych macierzy (incydencji, obiegów) o bardzo małym wypełnieniu elementami niezerowymi. Konieczne jest zatem stosowanie technologii macierzy rzadkich, co w znacznym stopniu zmniejsza wielkość wymaganej pamięci operacyjnej komputera oraz przyspiesza wykonywanie operacji macierzowych.
4. Zaprezentowany w pracy obiektowy sposób zapisu macierzy rzadkich jest formatem bardzo prostym i czytelnym zapewniającym jednocześnie optymalne gospodarowanie zasobami pamięci komputera. Dodatkowo charakteryzuje się elastycznością zapisu elementów niezerowych metodą wierszową, kolumnową lub wierszowo-kolumnową.

5. Modelowanie procesów strat ciepła sieci ciepłowniczych

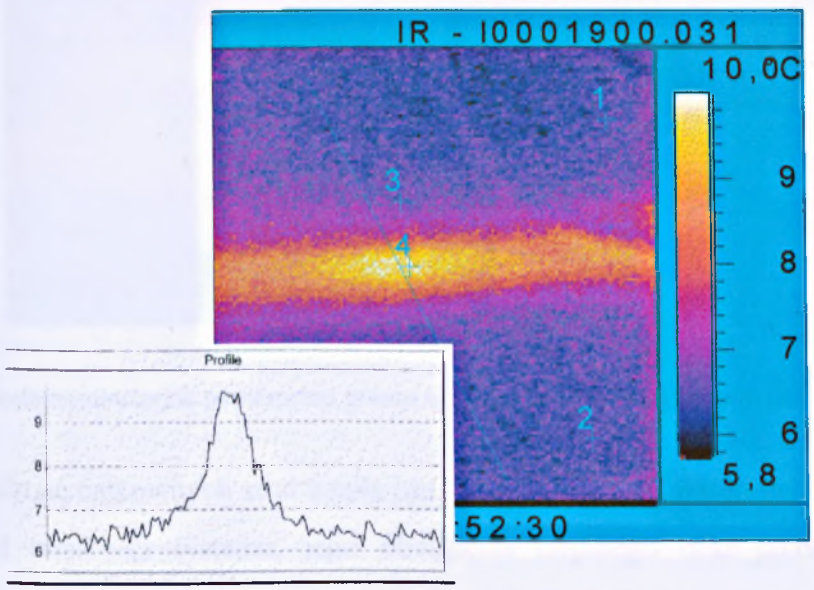
Straty ciepła są jednym z wielu procesów cieplnych zachodzących w sieci ciepłowniczej w trakcie przesyłu energii cieplnej. Wielkość strat ciepła zależy przede wszystkim od właściwości termoizolacyjnych materiałów użytych do izolacji rurociągów. W wyniku rozbudowy sieci w ciągu kilkudziesięciu minionych lat obecne systemy rurociągów ciepłowniczych posiadają niejednorodną strukturę izolacji rur, ponieważ w kolejnych etapach rozwoju sieci były produkowane inne, lepsze materiały izolacyjne.

W okresie powstawania i największego rozwoju systemów ciepłowniczych w Polsce, najbardziej popularnym systemem budowy rurociągów był system kanałowy. Zaizolowane rury umieszczane były w kanałach łukowych prowadzonych pod powierzchnią ziemi. Jak wykazują badania odkrywkowe rurociągów eksploatowanych kilkanaście lat [4], stan ich pod względem termoizolacyjności nie jest zadawalający. Sprawność izolacji spada bowiem miejscami nawet poniżej 50% wartości początkowej. Wynika to z zawilgocenia materiału izolacyjnego, skruszenia włókien waty szklanej powłok termoizolacyjnych, występowania charakterystycznego zwisu spowodowanego słabym zamocowaniem izolacji cieplnej oraz innych czynników wywołujących zmniejszenie grubości warstwy izolacyjnej. Występowanie powyższych zjawisk powoduje postępującą w czasie destrukcję materiału izolacyjnego. Wspomniane badania wykonane były w latach 60-tych. Należy przypuszczać, że stan obecny tych rurociągów (o ile do tej pory nie zostały one ponownie zaizolowane lub wymienione) jest jeszcze gorszy.

Obecne badania potwierdzają występowanie zjawiska zmiany właściwości izolacji wraz z upływem czasu [62], [63]. Porównując wyniki pomiarów przeprowadzonych dla różnych systemów ciepłowniczych, nie można określić wspólnej zależności wartości współczynnika sprawności izolacji od czasu eksploatacji systemu, ponieważ dla każdego systemu zależność ta jest inna. Proces destrukcji materiału izolacyjnego głównie zależy od warunków panujących w kanale. W jednym z badanych systemów, sieć ciepłownicza położona była na niewielkiej głębokości. Takie usytuowanie kanałów wynikało z obecności wysokiego poziomu wód

gruntowych na tym terenie. Kanały ciepłownicze były stale zalewane w wyniku opadów deszczu lub topnienia śniegu. Dodatkowym czynnikiem powodującym zawilgocenia kanałów są cykliczne zmiany poziomu wód gruntowych w ciągu roku powodujące częste zalewanie kanałów co ostatecznie doprowadza do zawilgocenia izolacji i zwiększenia jej przewodności cieplnej. Udział strat ciepła w produkcji energii cieplnej dla sezonu zimowego w jednym z badanych systemów sięgał około 50%, dla innych badanych systemów wartość ta wynosiła 10-20% (w sezonie zimowym).

Potwierdzeniem występowania problemu strat ciepła w sieciach ciepłowniczych są badania termowizyjne powierzchni gruntu nad kanałami ciepłowniczymi. Charakterystyczny obraz powierzchni gruntu przedstawiono na rysunku Rys. 5–1.

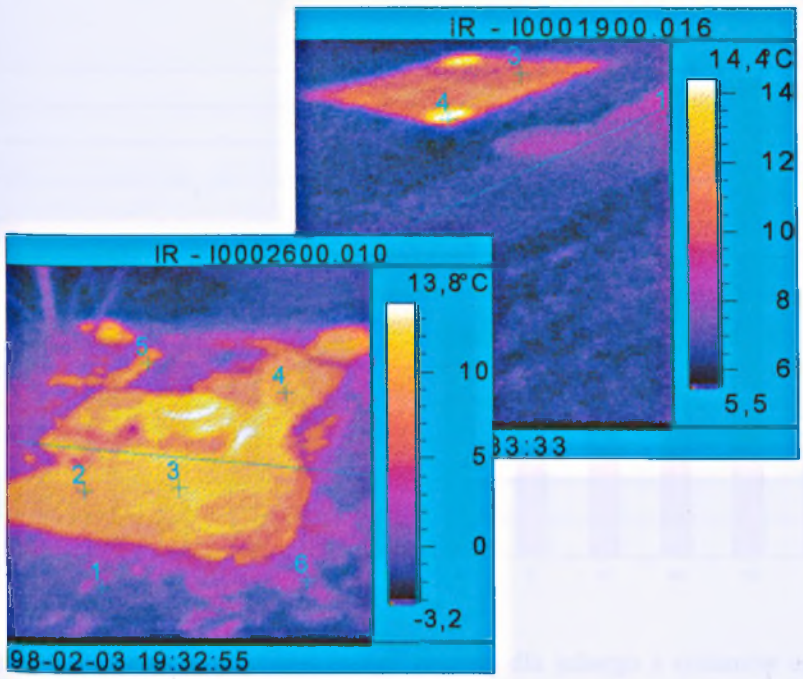


Rys. 5–1 Zdjęcie termowizyjne powierzchni gruntu nad kanałem ciepłowniczym [62], [63]

Na zdjęciu termowizyjnym widoczny jest wzrost temperatury powierzchni gruntu bezpośrednio nad kanałem ciepłowniczym o około 4-5 K. Zdjęcia termowizyjne coraz częściej wykorzystywane są w ekspertyzach dotyczących strat ciepła sieci ciepłowniczych. W Danii opracowano metodę określenia wielkości strat ciepła na podstawie zdjęć termowizyjnych i profili temperatury powierzchni gruntu [10].

Innym miejscem występowania strat ciepła są komory ciepłownicze. Umieszczona jest w nich armatura odcinająca tzn. zawory i zasuwy, które przeważnie nie są zaizolowane termicznie, co powoduje wzrost temperatury powietrza w pomieszczeniu komory. Jak podano w literaturze [44], straty ciepła komór

ciepłowniczych stanowią około 20-30 % całkowitych strat. Wielkość tych strat widoczna jest także na zamieszczonych zdjęciach termowizyjnych (Rys. 5–2). Komory ciepłownicze przeważnie przykryte są niewielką grubością gruntu oraz ich górne części nie są zaizolowane co dodatkowo powoduje zwiększenie strat ciepła w stosunku do kanałów.



Rys. 5–2 Zdjęcia termowizyjne powierzchni gruntu nad komorami ciepłowniczymi [62], [63]

Wielkość całkowitych strat ciepła jest inna dla różnych systemów. Zależy ona głównie od wielkości systemu, jego obciążenia cieplnego oraz jakości izolacji termicznej rurociągów. Chcąc porównać wielkość strat ciepła w systemach ciepłowniczych należy odnieść je do wielkości przesyłanej energii czyli:

$$Us = \frac{Es}{Ep} * 100 \ , \ \% \qquad (5\text{-}1)$$

gdzie:

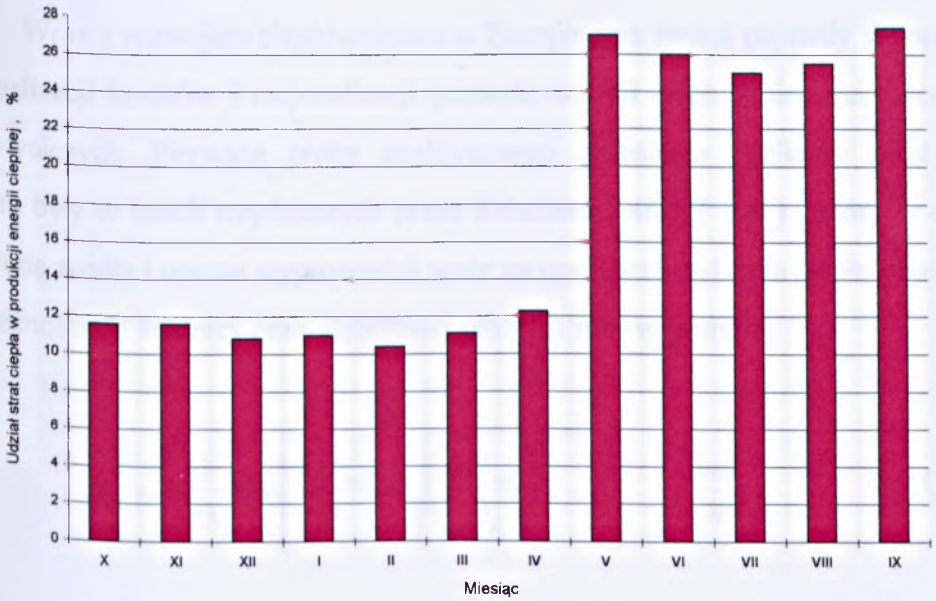
Us - udział strat ciepła w produkcji energii cieplnej , %,

Es - energia strat ciepła , J,

Ep - przesyłana energia cieplna , J.

Wielkość udziału strat ciepła w produkcji energii cieplnej jest wskaźnikiem jakości termoizolacji rurociągów. Dla polskich systemów wartość tych wskaźników wynosi

10-20% dla sezonu zimowego oraz 25-50% dla sezonu letniego przy czym, niższe wartości tego wskaźnika występują dla większych systemów [62], [63], [111]. Na rysunku (Rys. 5–3) przedstawiono przykładowy wykres zmian udziału strat ciepła w produkcji energii cieplnej w poszczególnych miesiącach roku dla jednego z systemów ciepłowniczych w Polsce.



Rys. 5–3 Udział strat ciepła w produkcji energii cieplnej dla jednego z systemów ciepłowniczych w Polsce

Jak wynika z przedstawionych wyżej przykładów, straty ciepła są istotnym elementem procesów cieplnych zachodzących w sieci ciepłowniczej. Mają one bezpośredni wpływ na wartość temperatury wody sieciowej dopływającej do węzłów ciepłowniczych oraz na wskaźniki ekonomiczne przedsiębiorstw. Spadek temperatury wody na drodze od źródła ciepła do końcowych odbiorców wynosi kilka stopni. Szczególnie duży spadek temperatury ma miejsce w systemach niedociążonych gdzie może on wynosić nawet kilkanaście stopni [65].

W pracy przedstawiono matematyczne modele strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych. Dokonano przeglądu znanych i najczęściej używanych metod określania strat ciepła w warunkach ustalonej i nieustalonej wymiany ciepła przy zmiennych wartościach temperatury wody sieciowej oraz zmiennych warunkach atmosferycznych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej opisanych metod, wybrano metodę najdokładniejszą oraz wprowadzono w niej pewne zmiany

powodujące zwiększenie zbieżności wyników w stosunku do modelu dokładnego (modelu dwuwymiarowego).

5.1 Przegląd uproszczonych metod obliczania strat ciepła sieci ciepłowniczych w stanach ustalonych

Wraz z rozwojem ciepłownictwa w Europie i na świeci pojawiły się problemy optymalizacji kosztów i racjonalizacji przesyłu energii cieplnej sieciami rurociągów ciepłowniczych. Pierwsze próby analitycznego określenia wielkości strat ciepła podjęte były w latach trzydziestych przez Krischera [48], [109] , który w oparciu o metodę źródła i upustu wyprowadził wzór na opór przewodzenia ciepła przez grunt w zależności od średnicy oraz głębokości ułożenia rury w gruncie:

$$R_{gr} = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \ln\left[\frac{2H_{red}}{D_Z} + \sqrt{\left(\frac{2H_{red}}{D_Z}\right)^2 - 1}\right] \quad , \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}2)$$

$$H_{red} = H + \frac{\lambda_{gr}}{\alpha_e} \quad , m \qquad (5\text{-}3)$$

gdzie:

λ_{gr} - współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu , W/mK,

α_e - współczynnik przejmowania ciepła od gruntu do powietrza , W/m^2K,

H - zagłębienie rury , m,

H_{red} - zredukowane zagłębienie rury , m,

D_Z - średnica zewnętrzna rury , m,

W kolejnych latach rozwoju ciepłownictwa, powstało wiele innych wzorów aproksymacyjnych dla określenia strat ciepła rurociągów ciepłowniczych. Poniżej wymieniono kilka z nich.

Wzór Forchheimera :

Najczęściej spotykanym w literaturze [9], [44] , [55], [109] wzorem określającym opór przepływu ciepła prze warstwę gruntu nad rurociągiem jest wzór Forchheimera (5-4), który z uwagi na prostą budowę jest bardzo często stosowany w obliczeniach strat ciepła.

$$R_{gr} = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \ln \frac{4H_{red}}{D_Z} \quad , \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}4)$$

Wzór Faxena

Faxen zaproponował analityczny sposób obliczania jednostkowych strat ciepła rurociągu z uwzględnieniem przejmowania ciepła przez wodę gruntową [31], [33]. Z uwagi na skomplikowaną postać wzoru jest on rzadko stosowany w obliczeniach.

$$q = 2\pi\lambda_{gr} \frac{T_w - \frac{t_e\chi_i + t_{gr}\chi_a}{\chi_i + \chi_a}}{\frac{2\lambda_{gr}}{\alpha_w D_W} + \frac{\lambda_{gr}}{\lambda_{sc}} \ln \frac{D_Z}{D_W} + \ln \frac{l}{\pi D_Z} - \frac{\pi}{l} G_i + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{g_a(s) + g_i(s)}{s}} \quad , \frac{W}{m} \qquad (5\text{-}5)$$

wartości stałych:

$$\chi_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{h_i}{\lambda_{gr}}}; \qquad \chi_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{h_a}{\lambda_{gr}}}; \qquad G_i = \frac{-2\lambda_{gr}}{\chi_a + \chi_i}$$

$$g_a(s) = \frac{\frac{\varepsilon_a + 2\pi s}{\varepsilon_a - 2\pi s} e^{-\frac{4\pi s}{l} h_i} - e^{-\frac{4\pi s}{l}(h_i + h_a)}}{e^{-\frac{4\pi s}{l}(h_i + h_a)} - \frac{\varepsilon_a + 2\pi s}{\varepsilon_a - 2\pi s} \frac{\varepsilon_i + 2\pi s}{\varepsilon_i - 2\pi s}}; \qquad g_i(s) = \frac{\frac{\varepsilon_i + 2\pi s}{\varepsilon_i - 2\pi s} e^{-\frac{4\pi s}{l} h_a} - e^{-\frac{4\pi s}{l}(h_i + h_a)}}{e^{-\frac{4\pi s}{l}(h_i + h_a)} - \frac{\varepsilon_a + 2\pi s}{\varepsilon_a - 2\pi s} \frac{\varepsilon_i + 2\pi s}{\varepsilon_i - 2\pi s}}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\alpha_a}{\lambda_{gr}} l; \qquad \varepsilon_i = \frac{\alpha_e}{\lambda_{gr}} l$$

gdzie:

T_w - temperatura wody w rurze , °C,

t_e - temperatura powietrza zewnętrznego , °C,

t_{gr} - temperatura wód gruntowych , °C,

λ_{gr} - współczynnik przewodzenia ciepła przez grunt , W/mK,

λ_{sc} - współczynnik przewodzenia ciepła przez ściankę rury , W/mK,

h_i - zagłębienie rury poniżej poziomu gruntu , m,

h_a - poziom wód gruntowych poniżej osi rury , m,

D_W - średnica wewnętrzna rury , m,

D_Z - średnica zewnętrzna rury , m,

α_w - współczynnik przejmowania ciepła do ścianki rury , W/m^2K,

α_e - współczynnik przejmowania ciepła od gruntu do powietrza zewnętrznego , W/m^2K,

α_a - współczynnik przejmowania ciepła między gruntem a wodą gruntową , W/m^2K,

l - odległość między rurami , m.

Wzór wg Wiśniewskiego:

Wiśniewski w pracy [112] wyprowadził wzór na wartość oporu przewodzenia ciepła przez grunt w oparciu o metodę źródła i upustu:

$$R_{gr} = -\frac{1}{4\pi\lambda_{gr}} \ln\left[8\left(\frac{H_{red}}{D_Z}\right)^2 - 1 - \frac{4H_{red}}{D_Z}\sqrt{4\left(\frac{H_{red}}{D_Z}\right)^2 - 1} \right] , \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}6)$$

Wszystkie przedstawione wyżej wzory dotyczą pojedynczej rury umieszczonej w gruncie traktowanym jako jednorodne ciało półnieskończone. Istnieje wiele opracowań poświęconych analizie strat ciepła dla pary rur umieszczonych w gruncie. W krajach Europy Zachodniej większość rurociągów wykonanych jest w technologii preizolowanej gdzie rury układane są bezpośrednio w gruncie i nie wymagających

budowy dodatkowych konstrukcji kanałów. Z tego powodu w literaturze zachodniej spotyka się przeważnie przykłady dotyczące rur bezpośrednio umieszczonych w gruncie [6], [9], [31] , [33] , [41], [109]. Szczególnie dużo prac poświęconych tym zagadnieniom powstało w Danii oraz Szwecji. W Polsce sytuacja jest inna, ponad 70 % rurociągów sieci ciepłowniczych ułożonych jest w kanałach. Tylko nowe odcinki sieci budowane w ostatnich latach wykonywane są już w technologii preizolowanej.

Chcąc przeprowadzić obliczenia strat ciepła sieci kanałowych wykorzystując przedstawione powyżej wzory, należy wprowadzić wielkość średnicy zastępczej odpowiadającej danemu kształtowi kanału. Wewnętrzna średnica zastępcza zdefiniowana jest jako [44 [, [55]:

$$D_w = \frac{4F}{U}, \quad m \qquad (5\text{-}7)$$

gdzie:

F - pole powierzchni wewnętrznej przekroju kanału , m^2,

U - obwód wewnętrzny przekroju kanału , m.

Zewnętrzna średnica równoważna określana jest według wzoru:

$$D_z = D_w + 2g, \quad m \qquad (5\text{-}8)$$

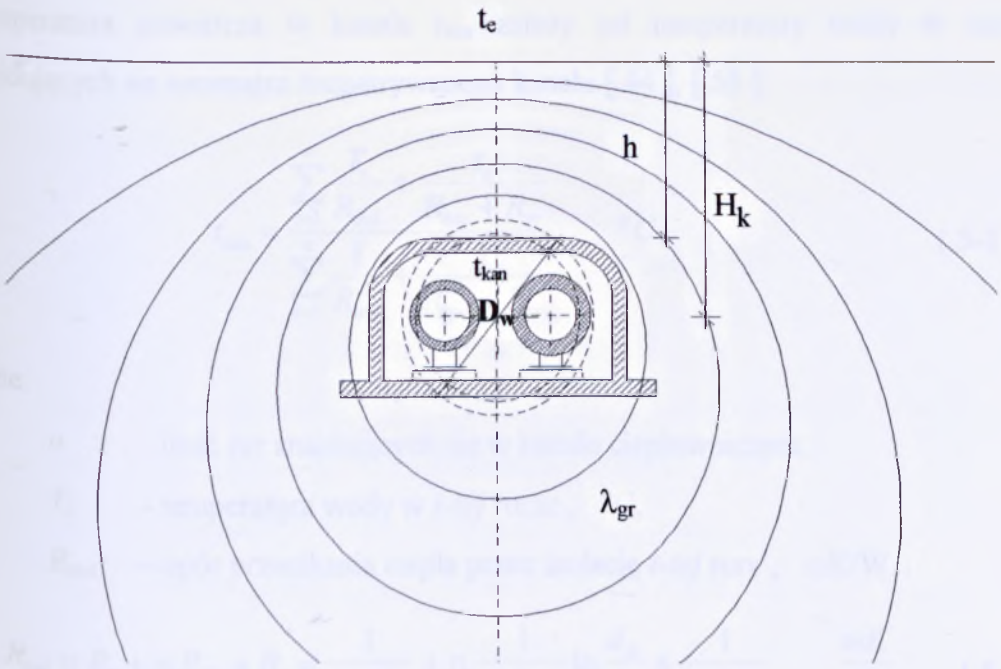
gdzie:

g - grubość ścianki kanału , m.

Wprowadzenie wielkości średnicy zastępczej umożliwia korzystanie w obliczeniach strat ciepła sieci kanałowych z przedstawionych wcześniej wzorów. Na poniższym rysunku przedstawiono układ zastępczy kanału ciepłowniczego z zaznaczoną równoważną średnicą kanału.

Występująca we wzorze (5-3) wielkość zagłębienia rury H odpowiada głębokości posadowienia kanału w gruncie H_K, czyli:

$$H = H_K$$



Rys. 5–4 Układ zastępczy kanału ciepłowniczego wg metody źródła i upustu

Według uproszczonych metod obliczeniowych [70], wielkość strat ciepła odcinka rurociągu o długości L określana jest według wzoru:

$$Q = qL \ , \ W \qquad (5\text{-}9)$$

gdzie:

q - jednostkowe straty ciepła , W/m,

L - długość rurociągu , m.

Wartość jednostkowych strat ciepła obliczana jest na podstawie ogólnego wzoru:

$$q = \frac{t_{kan} - t_e}{R_{gr} + R_{kan}} \ , \ \frac{W}{m} \qquad (5\text{-}10)$$

gdzie:

t_{kan} - temperatura powietrza w kanale ciepłowniczym , °C,

t_e - temperatura powietrza zewnętrznego , °C,

R_{gr} - opór przewodzenia ciepła przez grunt wyznaczony według wzorów od (5-2) do (5-6) , mK/W,

R_{kan} - opór cieplny zastępczego cylindrycznego kanału , mK/W.

Temperatura powietrza w kanale t_{kan} zależy od temperatury wody w rurach znajdujących się wewnątrz rozpatrywanego kanału [44], [55]:

$$t_{kan} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{T_i}{R_{izol}} + \frac{t_e}{R_{kan} + R_{gr}}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{izol}} + \frac{1}{R_{kan} + R_{gr}}} \quad , \quad °C \qquad (5\text{-}11)$$

gdzie:

n - ilość rur znajdujących się w kanale ciepłowniczym,

T_i - temperatura wody w *i-tej* rurze , °C,

R_{izol} - opór przenikania ciepła przez izolację *i-tej* rury , mK/W.

$$R_{izol} = R_n + \eta_i R_{IZi} + R_o = \frac{1}{\alpha_n d_{ni} \pi} + \eta_i \frac{1}{2\pi\lambda_{izol}} \ln \frac{d_{Zi}}{d_{Wi}} + \frac{1}{\alpha_o d_{Zi} \pi} \quad , \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}12)$$

gdzie:

α_n - współczynnik przejmowania ciepła w kierunku od wody do ścianki rury , W/m^{2}K,

α_o - współczynnik przejmowania ciepła od zewnętrznej powierzchni płaszcza izolacji do powietrza w kanale ciepłowniczym , W/m^{2}K,

λ_{izol} - współczynnik przewodzenia ciepła materiału izolacyjnego rury , W/mK,

d_{ni} - średnica wewnętrzna rury , m,

d_{Zi} - średnica zewnętrzna płaszcza izolacji , m,

d_{Wi} - średnica wewnętrzna płaszcza izolacji , m,

η_i - sprawność izolacji ,

R_n - opór przejmowania ciepła od strony wody , mK/W,

R_o - opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej izolacji , mK/W.

W powyższym wzorze pominięto opory cieplne warstw ochronnych powłoki termoizolacyjnej, ponieważ są one niewielkie w porównaniu z oporem cieplnym zasadniczej warstwy izolacji. Z tego samego powodu w równaniu można także pominąć wartość oporu przejmowania ciepła od strony wody (R_n).

Wartość całkowitego oporu przenikania ciepła przez ściankę kanału określana jest według następującego wzoru:

$$R_{kan} = \frac{1}{\alpha_{kan} D_W \pi} + \frac{1}{2\pi\lambda_{kan}} \ln \frac{D_Z}{D_W} \quad , \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}13)$$

gdzie:

α_{kan} - współczynnik przejmowania ciepła do ścianki kanału , W/m^{2}K,

D_W - zastępcza średnica wewnętrzna kanału , m,

D_Z - zastępcza średnica zewnętrzna kanału , m,

λ_{kan} - współczynnik przewodzenia ciepła dla ścianki kanału , W/mK.

Inną metodę określania strat ciepła sieci cieplnych układanych bezkanałowo zaproponowała Krygier [49] , [51]. Wielkość strat ciepła określana jest z wykorzystaniem przekształceń konforemnych według wzoru:

$$Q = F_t \lambda_{izol} \left(t_1 - t_2 \right) \qquad (5\text{-}14)$$

gdzie:

Q - straty ciepła , W,

F_t - współczynnik kształtu , m,

λ_{izol} - współczynnik przewodzenia ciepła dla izolacji , W/mK,

t_1, t_2 - temperatura powierzchni zewnętrznej rury oraz powierzchni zewnętrznej izolacji , °C.

Metoda ta szczególnie jest przydatna w przypadku występowania izolacji cieplnych rur o skomplikowanych kształtach. Dla kształtu przekroju poprzecznego izolacji określany jest współczynnik kształtu przy pomocy przekształceń konforemnych. Obecnie w ciepłownictwie stosowane są izolacje o jednolitym kształcie w formie walca. Z tego względu nie ma potrzeby stosowania powyższej metody.

5.2 *Dwuwymiarowy model nieustalonych procesów strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych.*

Poprawność obliczań strat ciepła sieci ciepłowniczych zależy od dokładności odzwierciedlenia w modelu rzeczywistych procesów wymiany ciepła. Zatem najdokładniejszymi modelami są te, które umożliwiają wyznaczenie pola temperatury w przekroju poprzecznym przez grunt i kanał. Istniej wiele metod wyznaczania pól temperatury w ciałach stałych. Najczęściej stosowanymi są:

- metoda różnic skończonych,
- metoda bilansów elementarnych,
- metoda elementów skończonych,
- metoda brzegowych równań całkowych.

Zastosowanie powyższych metod w modelach przewodzenia ciepła uzależnione jest głównie od skomplikowania kształtu badanego ciała. Do modelowania strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych wystarczającą metodą jest metoda różnic skończonych. Rybska [90] zastosowała tę metodę do numerycznego badania dynamiki strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych. Z uwagi na duże wymagania tej metody (wielkość pamięci operacyjnej oraz szybkości pracy komputera) nie jest ona powszechnie stosowana do obliczeń dynamiki strat ciepła dla całych systemów ciepłowniczych.

W pracy skonstruowano dwuwymiarowy model strat ciepła oparty na metodzie bilansów elementarnych, która jest uważana za wariant numerycznej metody różnic skończonych [95]. Model ten został wykonany w celu weryfikacji istniejących, uproszczonych metod opisanych w rozdziale 5.1. Wnioski z przeprowadzonej analizy porównawczej zdecydowały o wyborze i konstrukcji uproszczonego modelu dynamiki strat ciepła.

5.2.1 Sformułowanie i definicja dwuwymiarowego modelu strat ciepła.

Metoda bilansów elementarnych oraz metoda różnic skończonych są znanymi metodami numerycznymi rozwiązywania zagadnień przewodnictwa ciepła w ciałach. Wymagają one dokonania dyskretyzacji geometrycznej obszaru badanego ciała tzn. gruntu otaczającego kanał ciepłowniczy. W wyniku tej operacji otrzymywana jest siatka podziałowa, której oczka (elementy podziałowe) mogą mieć dowolne kształty, lecz w większości przypadków przyjmowany jest kształt prostokąta.

W pracy rozpatrywane są zjawiska strat ciepła przy nieustalonej wymianie ciepła, stąd wymagana jest dyskretyzacja czasu na chwile czasowe. Z uwagi na bardzo dużą bezwładność gruntu, do obliczeń przyjęto krok czasowy wynoszący $\Delta\tau$=3600 sekund. Wielkość elementów podziałowych uzależniona jest od przyjętego kroku czasowego przy jednoczesnym spełnieniu kryterium zbieżności.

Metoda bilansów elementarnych oparta jest na rozwiązaniu równania różniczkowego Fouriera-Kirchoffa [30], [81] dla elementów zdyskretyzowanego obszaru gruntu.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{gr}}{c_{pgr}\rho_{gr}} \nabla^2 t \qquad (5\text{-}15)$$

gdzie:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$$

ρ_{gr} - gęstość gruntu , kg/m^3,

c_{pgr} - ciepło właściwe , kJ/kg K,

λ_{gr} - współczynnik przewodzenia ciepła gruntu , W/mK,

τ - czas , s,

t - temperatura , °C,

∇^2 - operator Laplace'a .

Rozpatrywanym w pracy obszarem dyskretyzacji, jest przekrój poprzeczny kanału ciepłowniczego wraz z otaczającym go gruntem o wymiarach 18 m x 8 m. Wielkość obszaru została określona doświadczalnie wykonując szereg obliczeń strat ciepła i odpowiada maksymalnemu obszarowi oddziaływania kanału na grunt. Dla uproszczenia modelu, wprowadzono przybliżenie kształtu kanału ciepłowniczego prostokątem o wymiarach *a* x *b*. Przy określaniu wymiarów tego prostokąta przyjęto założenie równości średnicy zastępczej (5-7) kształtu prostokąta z średnicą zastępczą rzeczywistego kanału. Z uwagi na bardzo dużą bezwładność gruntu, przybliżenie takie jest dopuszczalne i nie ma wpływu na wynik obliczeń. Wymiary kanału obliczane są według następujących zależności:

$$D_Z^{rz} = D_Z^{zast} \text{ oraz } b = b_{rz}$$

$$D_Z^{zast} = \frac{4ab}{2(a+b)}, \ m \qquad (5\text{-}16)$$

$$a = \frac{D_Z^{rz} b}{2b - D_Z^{rz}}, \ m$$

gdzie:

a, b - wysokość i szerokość zastępczego kanału , m,

b_{rz} - szerokość kanału , m,

D_Z^{zast}, D_Z^{rz} - średnica zastępcza przekroju prostokątnego oraz przekroju rzeczywistego kanału ciepłowniczego , m.

Podział powierzchni przekroju gruntu uzależniony jest od przyjętego w obliczeniach kroku czasowego oraz wynika ze spełnienia warunku zbieżności [112] :

$$\Delta X_{Min} = \Delta Y_{Min} = \sqrt{M a \Delta \tau} \qquad (5\text{-}17)$$

$$M_{Fo} = \frac{1}{Fo} \ ; \quad a = \frac{\lambda_{gr}}{\rho_{gr} c_{pgr}}$$

gdzie:

$\Delta X_{Min}, \Delta Y_{min}$ - minimalny wymiary elementu podziałowego , m,

$\Delta \tau$ - krok czasowy , s,

λ_{gr} - współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu , W/mK,

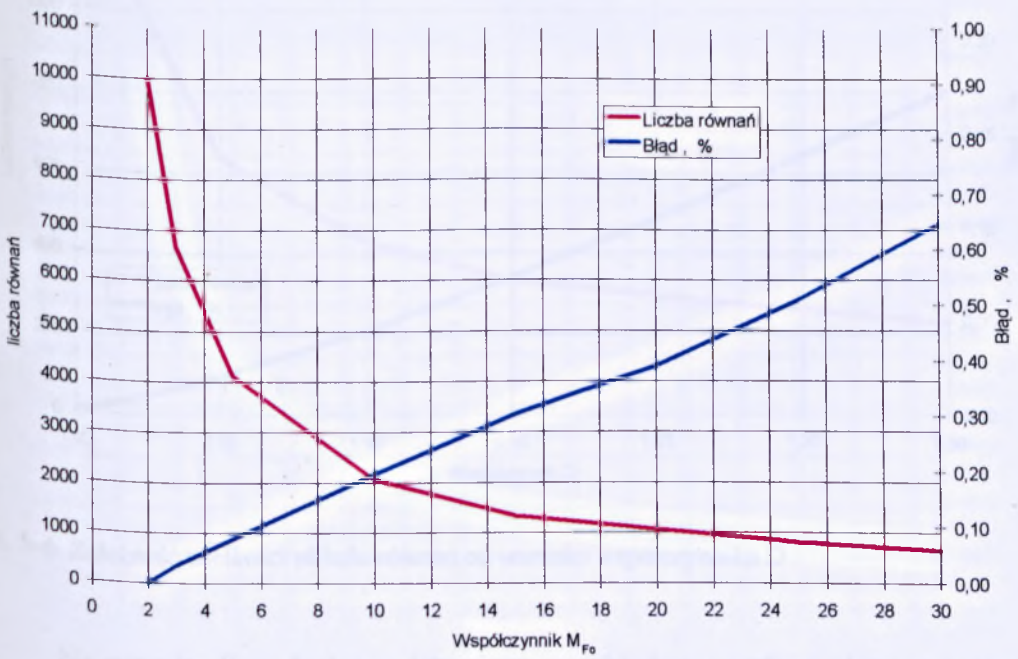
ρ_{gr} - gęstość gruntu , kg/m^3,

c_{pgr} - ciepło właściwe gruntu , J/kg K,

Fo - liczba Fouriera.

Wartość współczynnika M_{Fo} decyduje o zbieżności zastosowanej w modelu metody różnicowej. Dla metody jawnej zbieżność rozwiązań układu równań uzyskuje się dla liczb $M_{Fo}\geq 2$. W pracy rozwiązano równanie (5-15) metodą różnicową niejawną, która zapewnia lepszą zbieżność i większą stabilność rozwiązania układu równań niż metoda jawna [112].

Wartość współczynnika M_{Fo} wpływa na gęstość podziału przekroju gruntu na elementy podziałowe. Przy mniejszych jego wartościach, następuje zagęszczenie podziału i wzrost liczby równań oraz zwiększenie dokładności obliczeń. Na wykresie poniżej (Rys. 5–5) przedstawiono zależność ilości równań bilansowych oraz błędu aproksymacji od wartości współczynnika M_{Fo} w zakresie od M_{Fo}=2 do M_{Fo}=30. Przy wzroście liczby M_{Fo}, wielkość układu równań gwałtownie maleje przy niewielkim wzroście błędu do około 0,6 %. W pracy przyjęto wartość współczynnika M_{Fo}=15, ponieważ dla większych wartości następuje już niewielki spadek ilości równań układu przy narastającym jednocześnie błędzie aproksymacji.

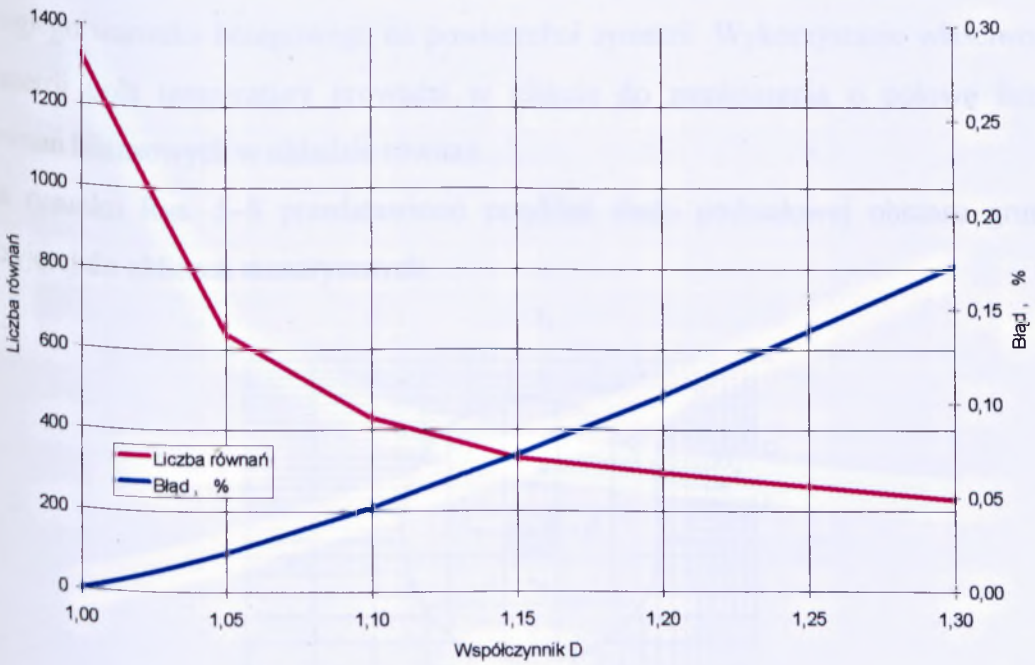


Rys. 5–5 Zależność wielkości układu równań od wartości współczynnika M_{Fo}

Dalsze zmniejszenie ilości równań można uzyskać wprowadzając niejednorodny podział przekroju gruntu. Zagęszczenie siatki podziałowej powinno być w miejscach przekroju gdzie występuje duży gradient temperatury tzn. w okolicy kanału ciepłowniczego oraz przy powierzchni gruntu. W pracy przyjęto niejednorodny podział gruntu wprowadzając współczynnik rozrzedzenia siatki D, jednakowy w kierunku poziomym i pionowym. Wielkość sąsiednich elementów podziałowych obliczana jest według zależności:

$$\Delta X_i = D\,\Delta X_{i-1} \quad \text{oraz} \quad \Delta Y_i = D\,\Delta Y_{i-1} \qquad (5\text{-}18)$$

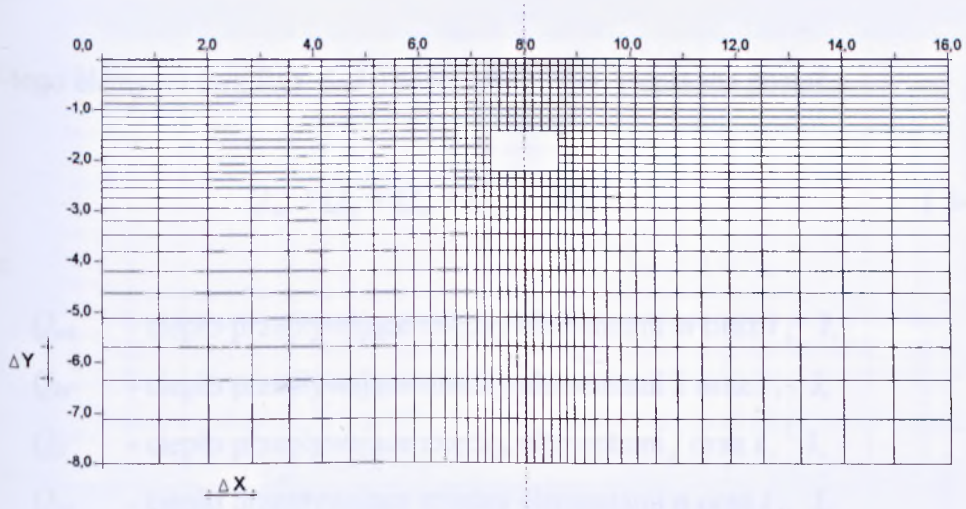
Wprowadzenie siatki niejednorodnej w podziale gruntu w znacznym stopniu prowadzi do zmniejszenia wielkości układu równań propagując jednocześnie niewielki błąd w obliczeniach (Rys. 5–6). W zaproponowanym w pracy dwuwymiarowym modelu strat ciepła sieci ciepłowniczych zastosowano niejednorodny podział przekroju gruntu przy wartości współczynnika D=1,15, dzięki któremu otrzymano blisko 3-krotne zmniejszenie wielkości układu równań.



Rys. 5–6 Zależność wielkości układu równań od wartości współczynnika D

Na rysunku Rys. 5–7 przedstawiono przykładowy podział obszaru gruntu na elementy podziałowe powstały z uwzględnieniem przyjętych wartości

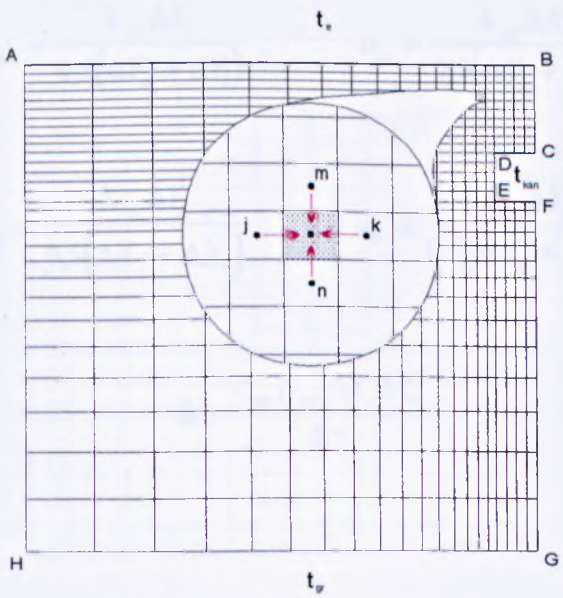
współczynników M_{Fo} i D. Wymiary elementów wzrastają wraz ze wzrostem ich odległości od kanału. Wprowadzenie takiego uproszczenia nie wpływa na wynik obliczeń, powoduje natomiast zmniejszenie ilości równań w układzie równań i skraca czas wykonywania obliczeń.



Rys. 5–7 Podział obszaru gruntu na elementy podziałowe

Ponieważ rozkład temperatury w gruncie jest symetryczny względem osi pionowej kanału, można analizować połowę jego powierzchni przy założeniu drugiego warunku brzegowego na powierzchni symetrii. Wykorzystanie właściwości symetrii pola temperatury prowadzi w efekcie do zmniejszenia o połowę liczby równań bilansowych w układzie równań.

Na rysunku Rys. 5–8 przedstawiono przykład siatki podziałowej obszaru gruntu przyjętej do obliczeń numerycznych.



Rys. 5–8 Obliczeniowy podział obszaru gruntu

Wykorzystana w pracy metoda bilansów elementarnych wymaga ułożenia równania bilansowego dla każdego elementu siatki podziałowej przekroju. Liczba powstałych równań jest równa ilości elementów podziałowych w siatce.

Dla *i*-tego elementu (wg Rys. 5–8) równanie bilansu ciepła ma postać:

$$Q_{mi} + Q_{ki} + Q_{ni} + Q_{ji} = \Delta Q_i \qquad (5\text{-}19)$$

gdzie:

Q_{mi} - ciepło przepływające między elementami *m* oraz *i* , J,

Q_{ki} - ciepło przepływające między elementami *k* oraz *i* , J,

Q_{ji} - ciepło przepływające między elementami *j* oraz *i* , J,

Q_{ni} - ciepło przepływające między elementami *n* oraz *i* , J,

ΔQ_i - przyrost energii wewnętrznej *i*-tego elementu , J.

Dla elementów podziałowych znajdujących się wewnątrz badanego obszaru, równanie bilansu ciepła ma następującą postać:

$$a_{mi}(t_m - t_i) + a_{ki}(t_k - t_i) + a_{ni}(t_n - t_i) + a_{ji}(t_j - t_i) = b(t_i - \overline{t_i}) \qquad (5\text{-}20)$$

$$a_{mi} = \frac{\lambda_{gr}\Delta X_i}{0{,}5(\Delta Y_m + \Delta Y_i)}; \qquad a_{ni} = \frac{\lambda_{gr}\Delta X_i}{0{,}5(\Delta Y_n + \Delta Y_i)}$$

$$a_{ji} = \frac{\lambda_{gr}\Delta Y_i}{0{,}5(\Delta X_j + \Delta X_i)}; \qquad a_{ki} = \frac{\lambda_{gr}\Delta Y_i}{0{,}5(\Delta X_k + \Delta X_i)}$$

$$b = \frac{c_{pgr}\rho_{gr}\Delta X_i \Delta Y_i}{\Delta \tau}$$

Przekształcając równanie (5-20) otrzymujemy ostateczną formę równania układu równań:

$$a_{mi}t_m + a_{ki}t_k + a_{ni}t_n + a_{ji}t_j - \left(a_{mi} + a_{ki} + a_{ni} + a_{ji} + b\right)t_i = -b\bar{t}_i \qquad (5\text{-}21)$$

gdzie:

t_m, t_k, t_n, t_j, t_i - nieznane temperatury w elementach: *m, k, n, j, i* , °C,

$\bar{t}_i$ - temperatura *i*-tego elementu w chwili poprzedniej , °C,

$\Delta X, \Delta Y$ - wymiary elementu podziałowego , m.

Jak wykazują badania [25], [79], właściwości cieplne gruntu są zmienne w ciągu roku ponieważ bezpośrednio zależą od jego wilgotności. Wilgotność gruntu zależy od warunków atmosferycznych, których zmiany są stochastyczne i niemożliwe do dokładnego przewidzenia. Największe zmiany właściwości gruntu występują na głębokości do 0,5 m gdzie roczne zmiany wilgotności wahają się od 10 % do 40 %. Wraz ze wzrostem zagłębienia, zmiany właściwości cieplnych gruntu w ciągu roku maleją przy jednoczesnym wzroście wilgotności gruntu. Tendencje zmian właściwości gruntu nie są jednakowe i są inne w różnych miejscach na ziemi. Ponieważ nie można jednoznacznie określić ogólnej zależności właściwości cieplnych gruntu od głębokości, w pracy przyjęto grunt jako ciało jednorodne o średnich wartościach właściwości cieplnych [2], [26], [79] tzn.

- gęstość : $\rho_{gr} = 1760$ kg/m^3,
- współczynnik przewodzenia ciepła : $\lambda_{gr} = 1{,}6$ W/mK,
- ciepło właściwe : $c_{pgr} = 1050$ J/kgK.

5.2.2 Warunki brzegowe

Istotną częścią modelu numerycznego procesów cieplnych zachodzących w gruncie są prawidłowo określone warunki brzegowe i początkowe.
Wprowadzenie warunków brzegowych zmienia postać ogólnego równania bilansowego (5-21) dla elementów podziałowych znajdujących się na brzegach rozpatrywanego obszaru. Przyjęto następujące warunki brzegowe (oznaczenia wg Rys. 5–8):

Powierzchnia A-B:

Na powierzchni A-B następuje wymiana ciepła między powierzchnią gruntu a powietrzem zewnętrznym, czyli należy tu założyć warunek brzegowy III rodzaju. Równanie (5-21) przyjmuje postać:

$$a_{ji}t_j + a_{ki}t_k + a_{ni}t_n - \left(a_{ji} + a_{ki} + a_{ni} + a_{mi} + b\right)t_i = -b\bar{t}_i - a_{mi}t_s \qquad (5\text{-}22)$$

$$a_{mi} = \frac{\Delta X_i}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{\Delta Y_i}{2\lambda_{gr}}}$$

gdzie:

α_e - współczynnik przejmowania ciepła między powierzchnią gruntu a powietrzem zewnętrznym , W/m^{2}K,

t_s - temperatura słoneczna , °C.

Współczynnik przejmowania ciepła na drodze konwekcji α_e określany jest na podstawie wzorów Jürgesa [87]. Jego wartość zależy od prędkości v wiatru przy powierzchni gruntu:

$$\alpha_e = 7{,}15\,v^{0{,}78} \ , \ \frac{W}{m^2K} \qquad \text{dla } v > 5 \text{ m/s} \qquad (5\text{-}23)$$

oraz

$$\alpha_e = 5{,}8 + 4v \ , \ \frac{W}{m^2K} \qquad \text{dla } v < 5 \text{ m/s} \qquad (5\text{-}24)$$

Wpływ promieniowania słonecznego uwzględniono w modelu wprowadzając wielkość temperatury słonecznej zdefiniowanej jako:

$$t_s = t_e + \frac{EI_C}{\alpha_e}, \ ^\circ C \qquad (5\text{-}25)$$

gdzie:

E - współczynnik absorpcji promieniowania słonecznego przez powierzchnię gruntu,

I_C - promieniowanie całkowite , W/m^2,

t_e - temperatura powietrza zewnętrznego , °C.

W modelowaniu strat ciepła sieci ciepłowniczych dużą trudność sprawia prawidłowe określenie współczynnika absorpcji promieniowania słonecznego przez powierzchnię gruntu. Z uwagi na zróżnicowanie terenu oraz roczne zmiany właściwości pochłaniania promieniowania słonecznego na powierzchni gruntu, w obliczeniach symulacyjnych przyjmuje się średnie wartości współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni gruntu.

Wielu autorów nie uwzględnia zmian wartości współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni grunt w wyniku dobowych zmian promieniowania słonecznego oraz prędkości wiatru. Kvisgaard oraz Bohm [9], [56] przyjmują do obliczeń stałą wartość współczynnika α = 14,6 W/m^2K, który uwzględnia przepływ ciepła na drodze konwekcji oraz promieniowania. Christensen [14] natomiast podał, że wartość współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni gruntu jest zmienna w zakresie α = 13,0 - 14,3 W/m^2K dla prędkości wiatru od v=3,6 m/s do v=4,6 m/s.

Powierzchnia B-G:

Linia B-G jest osią symetrii pola temperatury przekroju gruntu. W płaszczyźnie B-G nie następuje przepływ ciepła w kierunku poziomym między sąsiednimi elementami podziałowymi. Wprowadzono tu warunek brzegowy II rodzaju czyli:

$$Q_{ki} = 0$$

Równanie bilansowe (5-21) ma postać:

$$a_{mi}t_m + a_{ni}t_n + a_{ji}t_j - \left(a_{mi} + a_{ni} + a_{ji} + b\right)t_i = -b\bar{t}_i \qquad (5\text{-}26)$$

Powierzchnia G-H :

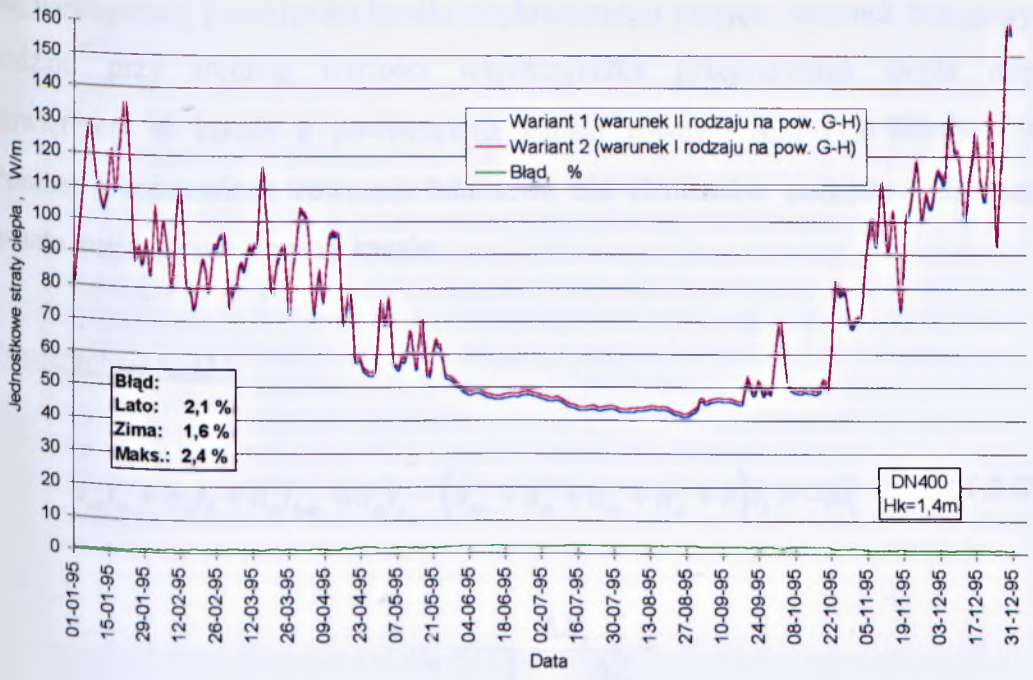
Jak podno w literaturze [90] na głębokości poniżej 8 m temperatura gruntu jest stała i na terenie Polski wynosi około t_{gr}=8 °C. Przeprowadzone przez autora obliczenia symulacyjne z wykorzystaniem danych klimatycznych dla dziesięciu ostatnich lat potwierdzają tą opinię. Na głębokości 8 metrów roczne wahania temperatury wyniosły około 0,3 K.

Na tej podstawie na powierzchni G-H rozpatrywanego przekroju gruntu przyjęto warunek brzegowy I rodzaju zakładając stałą wartość temperatury gruntu wynoszącą t_{gr}=8 °C. Dla elementów znajdujących się na brzegu G-H równanie (5-21) ma postać:

$$a_{mi}t_m + a_{ki}t_k + a_{ji}t_j - \left(a_{mi} + a_{ki} + a_{ni} + a_{ji} + b\right)t_i = -b\bar{t}_i - a_{ni}t_{gr} \qquad (5\text{-}27)$$

$$a_{ni} = \frac{\lambda_{gr}\Delta X_i}{0{,}5\,\Delta Y_i}$$

Dla dodatkowego potwierdzenia słuszności przyjętego założenia, wykonano analizę porównawczą wyników obliczeń strat ciepła przy założeniu I oraz II warunku brzegowego na powierzchni G-H (Rys. 5–9). Maksymalna rozbieżność wyników w ciągu roku wyniosła 2,4 %, średni błąd dla okresu letniego - 2,1 % a dla okresu zimowego (grzewczego) - 1,6 %. Z uwagi na tak niewielkie różnice wyników, w modelu przyjęto warunek I rodzaju.



Rys. 5–9 Wyniki strat ciepła przy założeniu II (Wariant 1) i II (Wariant 2) warunku brzegowego na powierzchni G-H.

Powierzchnia H-A :

Wymiary badanego przekroju gruntu odpowiadają maksymalnemu zasięgowi wpływu obecności kanału na rozkład temperatury w gruncie. Zatem na brzegu H-A nie występuje przepływ ciepła w kierunku poziomym. Przyjęto więc warunek brzegowy II rodzaju.

$$Q_{ji} = 0$$

Równanie (5-21) ma postać:

$$a_{mi}t_m + a_{ki}t_k + a_{ni}t_n - \left(a_{mi} + a_{ki} + a_{ni} + b\right)t_i = -b\bar{t}_i \qquad (5\text{-}28)$$

Powierzchnia C-D-E-F :

Kanały ciepłownicze wykonywane są z betonu, dla którego współczynnik przewodzenia ciepła wynosi λ_b=1,1-1,7 W/mK. Wartość ta jest porównywalna do wartości współczynnika przewodzenia ciepła przez grunt. Z tego powodu w modelu przyjęto, że materiał z którego wykonany jest kanał posiada zbliżone właściwości cieplne do gruntu. Ściankę kanału zastąpiono materiałem o właściwościach gruntu.

Na wewnętrznej powierzchni kanału ciepłowniczego przyjęto warunek brzegowy III rodzaju przy średniej wartości współczynnika przejmowania ciepła między powietrzem w kanale a powierzchnią kanału równym α_{kan}=11,6 W/m^{2}K [90]. Poniżej przedstawiono równanie bilansowe dla elementów podziałowych obszaru gruntu znajdujących się przy kanale:

Powierzchnia C-D :

$$a_{mi}t_m + a_{ki}t_k + a_{ni}t_{kan} + a_{ji}t_j - \left(a_{mi} + a_{ki} + a_{ni} + a_{ji} + b\right)t_i = -b\bar{t}_i \qquad (5\text{-}29)$$

$$a_{mi} = \frac{\Delta X_i}{\frac{1}{\alpha_{kan}} + \frac{\Delta Y_i}{2\lambda_{gr}}}$$

Powierzchnia D-E :

$$a_{mi}t_m + a_{ki}t_{kan} + a_{ni}t_n + a_{ji}t_j - \left(a_{mi} + a_{ki} + a_{ni} + a_{ji} + b\right)t_i = -b\bar{t}_i \qquad (5\text{-}30)$$

$$a_{mi} = \frac{\Delta Y_i}{\frac{1}{\alpha_{kan}} + \frac{\Delta X_i}{2\lambda_{gr}}}$$

Powierzchnia E-F :

$$a_{mi}t_{kan} + a_{ki}t_k + a_{ni}t_n + a_{ji}t_j - \left(a_{mi} + a_{ki} + a_{ni} + a_{ji} + b\right)t_i = -b\bar{t}_i \qquad (5\text{-}31)$$

$$a_{mi} = \frac{\Delta X_i}{\frac{1}{\alpha_{kan}} + \frac{\Delta Y_i}{2\lambda_{gr}}}$$

Występująca w równaniach (5-29), (5-30), (5-31) wartość temperatury powietrza w kanale t_k jest wielkością niewiadomą zależną od temperatury wody sieciowej.

Temperatura t_{kan} obliczana jest na podstawie równania bilansowego:

$$\frac{T_Z - t_{kan}}{R_{izolZ}} + \frac{T_P - t_{kan}}{R_{izolP}} = \sum_{i=1}^{h} a_i \left(t_{kan} - t_i \right) \qquad (5\text{-}32)$$

gdzie:

T_Z, T_P - temperatura wody sieciowej w rurze zasilającej i powrotnej , °C,

R_{izolZ}, R_{izolP} - opór cieplny izolacji rurociągu zasilającego i powrotnego określany wg (5-12) , W/m,

h - ilość elementów podziałowych przylegających do kanału ciepłowniczego.

Po przekształceniu równania (5-32), otrzymujemy jego ostateczną formę:

$$t_{kan}\left(\sum_{i=1}^{h} a_i + \left(\frac{1}{R_{izolZ}} + \frac{1}{R_{izolP}} \right) \right) - \sum_{i=1}^{h} a_i t_i = \frac{T_Z}{R_{izolZ}} + \frac{T_P}{R_{izolP}} \qquad (5\text{-}33)$$

W równaniu (5-33) pominięto człony bezwładnościowe izolacji cieplnej rurociągów z uwagi na przyjęty do obliczeń długi krok czasowy ($\Delta\tau$=1h) wynikający z dużej bezwładności gruntu. Przeprowadzone przez autora badania symulacyjne wykazały, że dla typowych grubości izolacji termicznej rurociągów ciepłowniczych maksymalny krok czasowy pozwalający uwzględniać bezwładność izolacji rur jest równy $\Delta\tau$=20 min. Wynika to z warunku zbieżności obliczeń numerycznych nieustalonego przewodzenia ciepła przez ściankę walcową [112]. Dla maksymalnej grubości izolacji (d_{izol}=0,08 m) [53] rurociągu wykonanej z wełny mineralnej krok dyskretyzacji czasu wynosi:

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{d_{izol}^2 \rho_{izol} c_{pizol}}{\lambda_{izol} 4} = \frac{0{,}08^2 \cdot 50 \cdot 750}{0{,}05 \cdot 4} = 1200\,s = 20\,\text{min}$$

Dla rurociągów o mniejszych średnicach stosuje się izolację o mniejszej grubości co powoduje dalsze zmniejszenie maksymalnego kroku czasowego.

Sposób określania warunków początkowych przedstawiono w rozdziale 5.2.4.

5.2.3 Sformułowanie układy równań bilansowych

Dla każdego elementu podziałowego analizowanego obszaru przekroju gruntu, układane jest jedno z przedstawionych wcześniej równań bilansowych. Otrzymujemy w ten sposób układ N równań liniowych, gdzie N jest równe liczbie elementów podziałowych. Układ równań można zapisać w formie macierzowej jako:

$$\mathbf{A}\,\mathbf{x} = \mathbf{b} \qquad (5\text{-}34)$$

gdzie:

A - macierz kwadratowa współczynników a_{xy} równań bilansowych,

x - wektor wartości temperatury gruntu w elementach podziałowych, będący rozwiązaniem układu równań,

b - wektor wyrazów wolnych.

W analizach dwuwymiarowego pola temperatury w gruncie, otrzymujemy duże układy równań rzędu kilkuset równań. Przy takiej wielkości układów wymagana jest optymalizacja zapisu macierzy współczynników układu oraz optymalizacja obliczeń numerycznych. Macierz **A** jest w niewielkim stopniu wypełniona elementami niezerowym. Optymalizacja zapisu jej w pamięci komputera polega na wykorzystaniu technologii macierzy rzadkich opisanej we wcześniejszych rozdziałach pracy. Cechą charakterystyczną macierzy współczynników układu równań jest symetryczny rozkład niezerowych elementów względem przekątnej macierzy. Właściwość ta, umożliwia zastosowania metod numerycznych rozwiązywania układów równań liniowych zawierających symetryczną macierz współczynników. Można więc zastosować metodę Choleskiego, metodę $\mathbf{LDL}^{T}$, iteracyjną metodę Czebyszewa [64] lub inne. W zagadnieniach nieustalonego przewodnictwa ciepła najlepszymi metodami rozwiązywania układów równań liniowych są metody iteracyjne (np. metoda Czebyszewa). Po dokonaniu niewielkich zmian, można je przystosować do współpracy z formatem zapisu macierzy rzadkich co w znacznym stopniu przyspiesza obliczenia. Metody iteracyjne wymagają podania na wstępie pierwszego przybliżenia rozwiązania układu równań. W przypadku nieustalonego przewodnictwa ciepła najlepszym przybliżeniem są wyniki obliczeń z poprzedniej chwili czasowej.

5.2.4 Obliczenia numeryczne

Obliczenia strat ciepła sieci ciepłowniczych wymagają określenia odpowiednich danych dla warunków brzegowych (rozdział 5.2.2). Obliczenia wykonano dla rzeczywistych danych klimatycznych zarejestrowanych w Warszawie w latach 1994 i 1995. Rejestracja danych odbywała się co trzy godziny zbierając następujące dane:

- czas,
- temperatura powietrza zewnętrznego,
- kierunek i prędkość wiatru,
- natężenia promieniowania słonecznego.

Bazę danych uzupełniono o wartości pośrednie pomiarów na drodze aproksymacji danych 3 godzinowych. W końcowej fazie, baza danych zawierała godzinowe dane klimatyczne. Dodatkowo baza danych została uzupełniona o wartości temperatury wody sieciowej (zasilanie i powrót) określone według wykresu regulacyjnego T_Z/T_P=135/70 °C wg [55] dla temperatury powietrza zewnętrznego odpowiadającej średniej wartości z ostatnich 48 godzin. Utworzona w ten sposób baza danych zawiera wszystkie niezbędne informacje dla sformułowania warunków brzegowych dla obliczeń symulacyjnych procesów wymiany ciepła w gruncie.

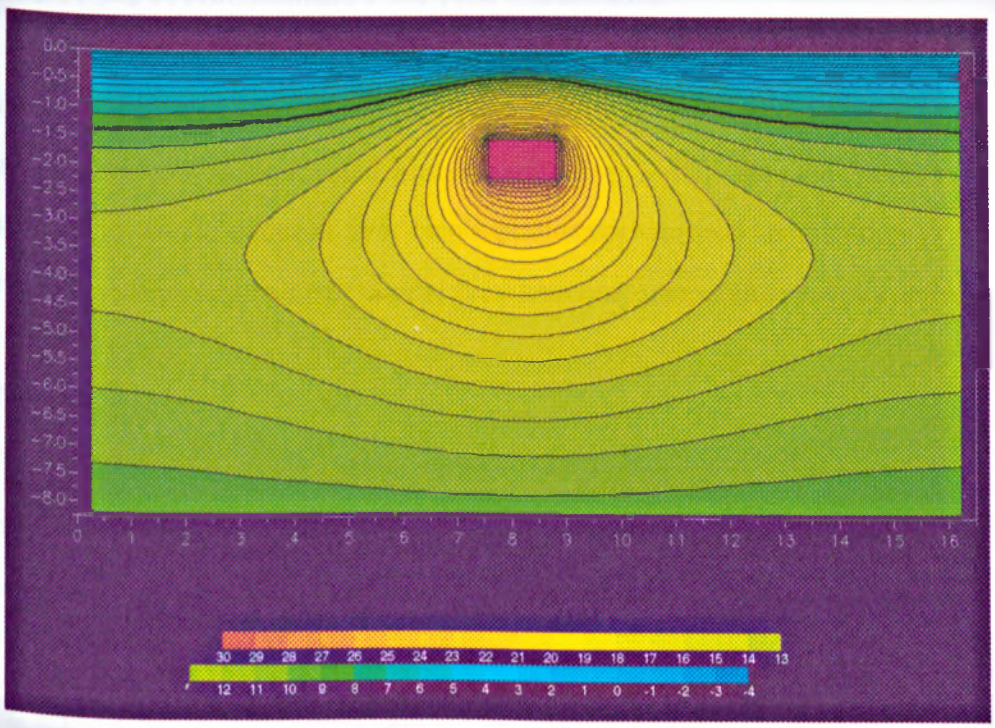
W modelowaniu procesów wymiany ciepła w gruncie bardzo ważne jest prawidłowe określenie warunków początkowych. Z uwagi na dużą bezwładność cieplną gruntu, początkowe pole temperatury w gruncie wyznaczano na podstawie dwuetapowych obliczeń:

1. Obliczenie pola temperatury w gruncie w stanie ustalonym,
2. Obliczenie pola temperatury w gruncie w stanie nieustalonym w ciągu jednego roku.

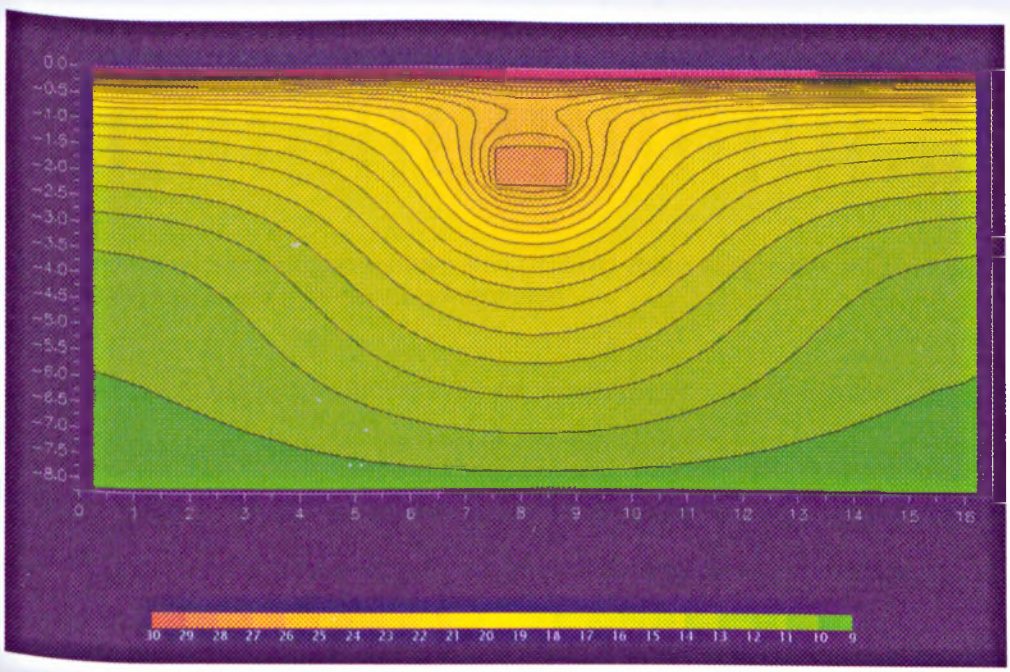
Wyniki obliczeń dwuetapowych przyjęto za warunek początkowy do dalszych obliczeń strat ciepła w ciągu roku.

W pracy wykorzystano dane klimatyczne zarejestrowane w roku 1994, na postawie których obliczono warunek początkowy rozkładu temperatury w gruncie. Właściwe obliczenia strat ciepła wykonano dla danych klimatycznych dla roku 1995.

Obliczenia wykonywane były dla okresu jednego roku z krokiem czasowym wynoszącym $\Delta\tau$=3600s. Dla każdej chwili czasowej otrzymywano rozkład temperatury w gruncie. Na poniższych rysunkach, (Rys. 5–10, Rys. 5–11) przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń pola temperatury w gruncie dla okresu zimowego oraz letniego.



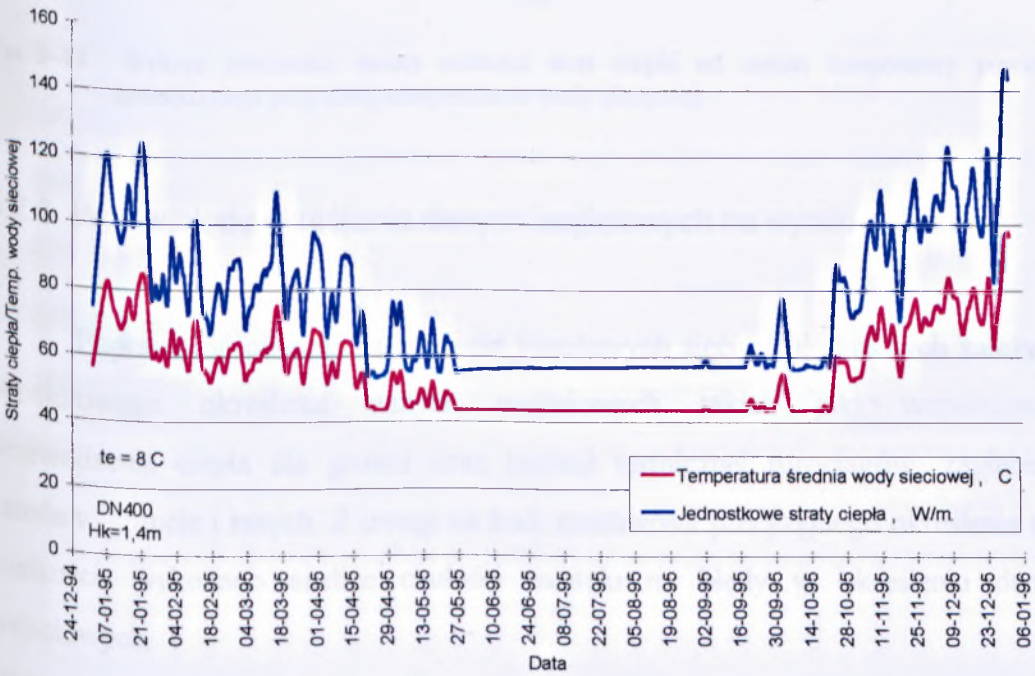
Rys. 5–10 Pole temperatury w gruncie dla okresu zimowego (22 grudzień 1995)



Rys. 5–11 Pole temperatury w gruncie dla okresu letniego (10 lipiec 1995)

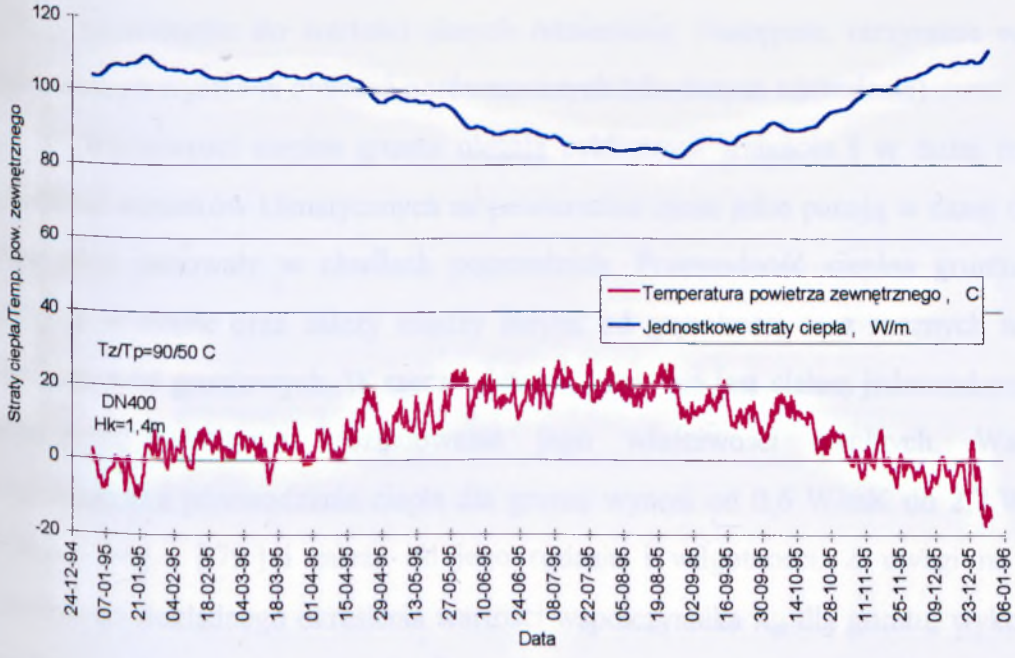
Cechą charakterystyczną pola temperatury wokół kanału ciepłowniczego jest kołowy kształt izoterm. Izotermy wraz ze wzrostem odległości od kanału, ulegają stopniowemu zniekształceniu w formie elips. Kołowy charakter izoterm świadczy o możliwości przybliżenia procesów przewodzenia ciepła przez grunt uproszczonymi zależnościami opartymi na metodzie źródła i upustu. Korzystanie zatem ze wzorów Krischera (5-2) i Forchheimera (5-4) jest uzasadnione.

Obliczenia symulacyjne dynamiki strat ciepła w ciągu roku wykazały, że dobowe zmiany wartości strat ciepła zależą głównie od zmian temperatury wody sieciowej w rurach zasilających i powrotnych (Rys. 5–12). Na poniższym rysunku, zamieszczono wyniki obliczeń strat ciepła przy stałej wartości temperatury powietrza zewnętrznego wynoszącej t_e=8 °C oraz przy zmiennej temperaturze wody sieciowej.



Rys. 5–12 Wykres zależności zmian wartości strat ciepła od zmian temperatury wody sieciowej przy stałej temperaturze powietrza zewnętrznego

Drugim czynnikiem wpływającym na dynamikę procesów cieplnych w gruncie są dobowe wahania temperatury powietrza zewnętrznego. Analizę wpływu tych zmian wykonano przy założeniu stałej wartości temperatury wody sieciowej (T_Z/T_P=90/50 °C) oraz przy zmiennej temperaturze powietrza zewnętrznego. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku Rys. 5–13, na którym widoczne są niewielkie zmiany strat ciepła wynikające jedynie ze zmian średniej miesięcznej temperatury powietrza zewnętrznego



Rys. 5–13 Wykres zależności zmian wartości strat ciepła od zmian temperatury powietrza zewnętrznego przy stałej temperaturze wody sieciowej

5.2.5 Wpływ błędu określenia danych wejściowych na wyniki obliczeń

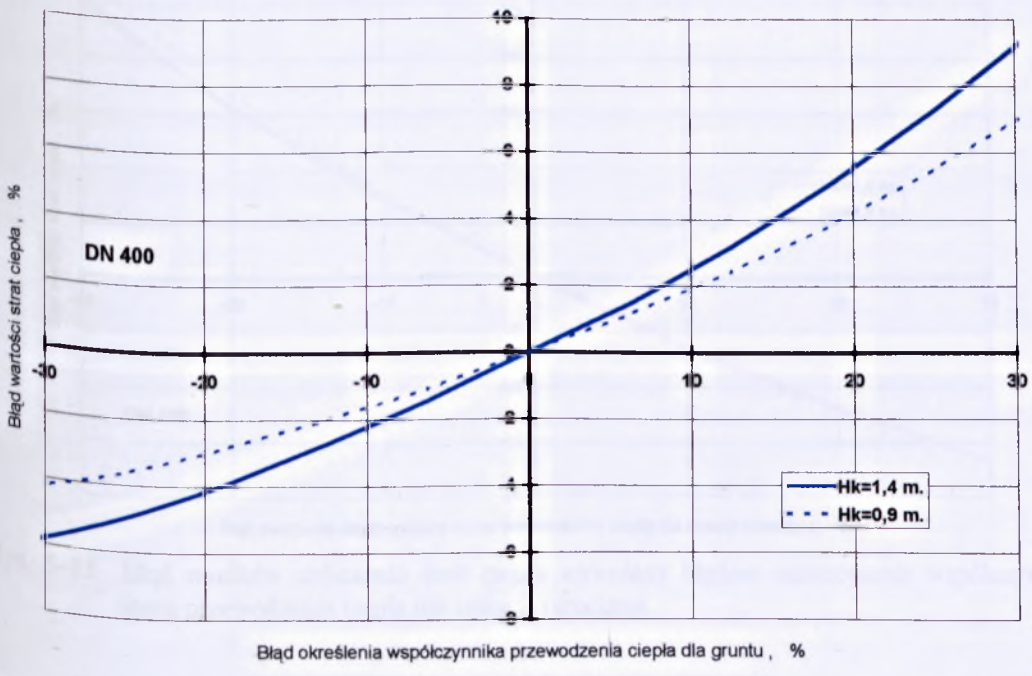
Poprawność obliczeń strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych zależy od prawidłowego określenia danych wejściowych takich jak: współczynniki przewodzenia ciepła dla gruntu oraz izolacji termicznej rurociągów, zagłębienie kanału w gruncie i innych. Z uwagi na brak możliwości precyzyjnego określenia tych wielkości, wykonano analizę czułości modelu na błędy w określeniu danych wejściowych.

Obliczenia wykonano dla następujących danych odniesienia:

- średnica nominalna rurociągu: DN400,
- typ kanału: T-9/65,
- zagłębienie środka kanału: H_k=1,4m i H_k=0.9m,
- współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu: λ_{gr}=1,6 W/mK,
- współczynnik przewodzenia ciepła dla materiału izolacji rur: λ_{izol}=0,05 W/mK,
- grubość izolacji: zasilanie: g_Z=0,08 m,
  powrót: g_P=0,04 m.

Obliczenia wykonano dla zmienionych wartości danych wejściowych w zakresie ±30 % w stosunku do wartości danych odniesienia. Następnie, otrzymane wyniki porównano z wynikami obliczeń porównawczych (dla danych odniesienia).

Właściwości cieplne gruntu ulegają cyklicznym zmianom i w dużej mierze zależą od warunków klimatycznych na powierzchni ziemi jakie panują w danej chwili oraz jakie panowały w chwilach poprzednich. Przewodność cieplna gruntu jest zmienna w czasie oraz zależy między innymi od głębokości oraz rocznych wahań poziomu wód gruntowych. W rzeczywistości, grunt nie jest ciałem jednorodnym, co powoduje dodatkowe zróżnicowanie jego właściwości cieplnych. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla gruntu wynosi od 0,6 W/mK do 2,7 W/mK [26], [38], [79] i zależy od jego rodzaju i wilgotności. Z uwagi na brak możliwości dokładnego określenia wartości współczynnika λ_{gr} dla gruntu, wykonano analizę zmian wyników obliczeń wywołanych błędem oszacowania tej wielkości (Rys. 5–14). Błąd w określeniu współczynnika λ_{gr} wynoszący 30% w stosunku do wartości rzeczywistej (niewiadomej) powoduje zmianę wyniku obliczeń o około 7-9%. Większe wartości błędu występują dla głębiej posadowionych kanałów z uwagi na większy udział oporu gruntu w całkowitym oporze przenikania ciepła na drodze od wody sieciowej do powietrza zewnętrznego.

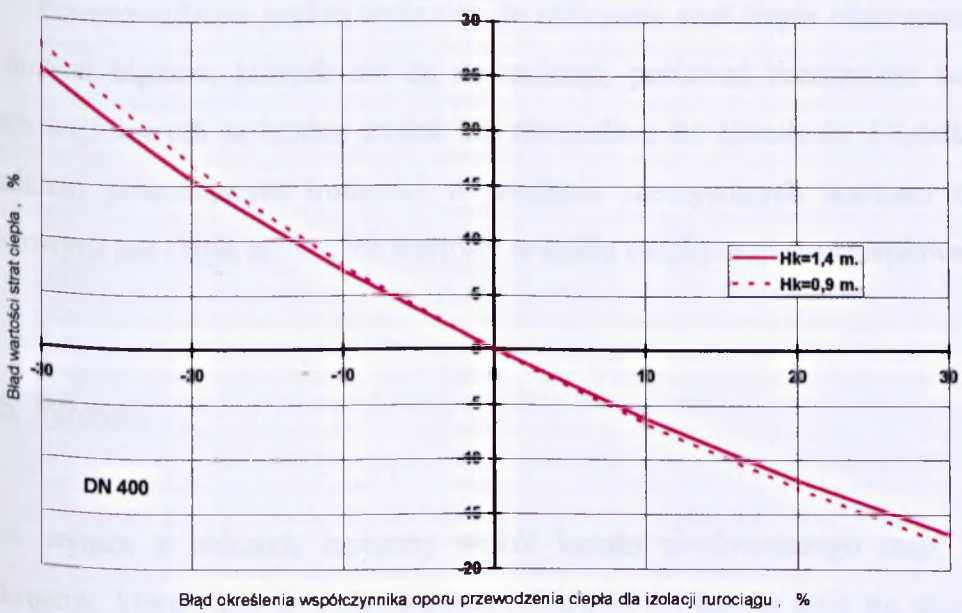


Rys. 5–14 Błąd wyników obliczania strat ciepła wywołany błędem oszacowania współczynnika przewodzenia ciepła dla gruntu.

Drugą wielkością, którą również jest bardzo trudno określić jest rzeczywista wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla materiału termoizolacyjnego powłok izolacji rurociągu λ_{izol} oraz rzeczywista grubość izolacji. Zmiana właściwości cieplnych izolacji rur oraz ich rzeczywista grubości zależy od wielu czynników [4] np.:

- poprawności wykonania izolacji w okresie budowy rurociągu,
- jakości materiałów,
- warunków panujących w kanale ciepłowniczym w okresie eksploatacji rurociągu,
- czasu eksploatacji rurociągu i innych.

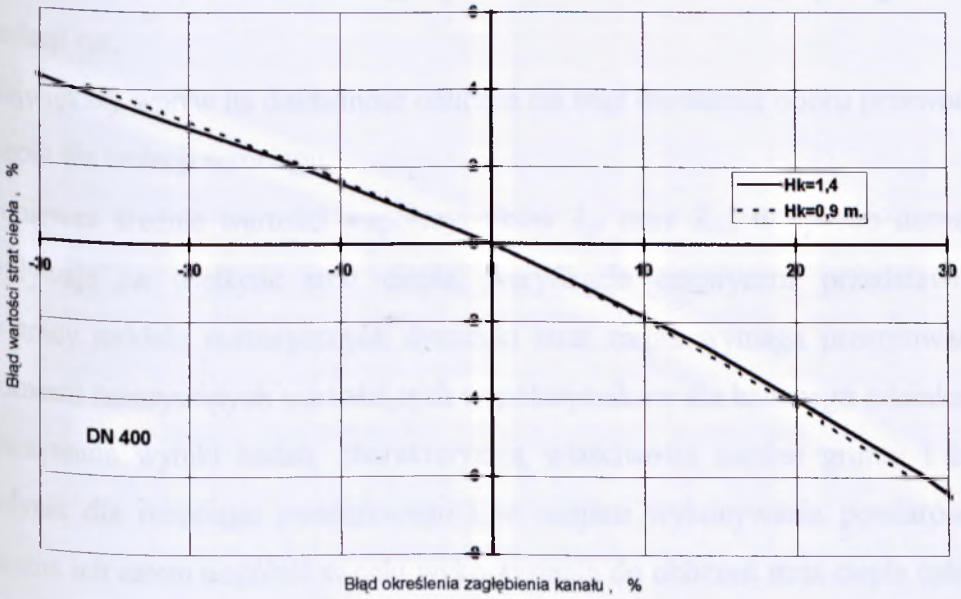
Współczynnik λ_{izol} oraz grubość izolacji bezpośrednio wpływają na opór przewodzenia ciepła R_{izol} warstwy izolacji. W pracy wykonano analizę zależności wyników obliczeń strat ciepła od błędu oszacowania wartości oporu przewodzenia ciepła dla izolacji rurociągu. Z analizy wynika, że błąd w określeniu współczynnika R_{izol} dla izolacji rur wynoszący 30 % powoduje zmianę wyniku obliczeń o około 25-27% i w niewielkim stopniu zależy od zagłębienia kanału (Rys. 5–15).



Rys. 5–15 Błąd wyników obliczania strat ciepła wywołany błędem oszacowania współczynnika oporu przewodzenia ciepła dla izolacji rurociągu.

Najmniejszy wpływ na poprawność wyników obliczeń ma wielkość błędu zagłębienia kanału H_k . Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono na poniższym rysunku (Rys. 5–16). Jest to wielkość, którą można określić z stosunkowo dużą

dokładnością poprzez pomiar jej w komorach ciepłowniczych. Powstanie ewentualnego błędu może być spowodowane zmianami rzędnej terenu między komorami. Jak wynika z analizy, błędne określenie wielkości H_k w zakresie ±30 % powoduje błąd w obliczeniach strat ciepła rzędu 4-7 %.



Rys. 5–16 Błąd wyników obliczania strat ciepła wywołany błędem oszacowania zagłębienia kanału ciepłowniczego.

Przeprowadzona analiza wykazała, że obliczenia strat ciepła obarczone mogą być dużymi błędami, których nie da się uniknąć, ponieważ rzeczywiste wartości danych wejściowych są bardzo trudne lub niemożliwe do określenia. Dodatkowym czynnikiem powodującym trudności w ustaleniu rzeczywistych wartości danych wejściowych jest ciągła zmiana ich wartości w czasie eksploatacji sieci ciepłowniczej.

5.2.6 Wnioski

1. Jak wynika z obliczeń, izotermy wokół kanału ciepłowniczego mają kształt okręgów, które wraz ze zwiększeniem odległości od kanału stają się stopniowo elipsami. Kołowy kształt izoterm świadczy o możliwości przybliżenia procesów przewodzenia ciepła przez grunt uproszczonymi zależnościami opartymi na metodzie źródła i upustu czyli metodami Krischera i Forchheimera.
2. Dobowe zmiany strat ciepła zależą głównie od wahań temperatury wody sieciowej

3. Straty ciepła w niewielkim stopniu zależą od dobowych zmian temperatury powietrza zewnętrznego. Zależą one jedynie od wartości średniej temperatury powietrza w dłuższym okresie czasu np.: miesiąca lub kwartału.
4. Głównym problemem w obliczaniu strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych jest brak możliwości dokładnego pomiaru właściwości cieplnych gruntu oraz izolacji rur.
5. Największy wpływ na dokładność obliczeń ma błąd określenia oporu przewodzenia ciepła dla izolacji rurociągu.
6. Ponieważ średnie wartości współczynników λ_{gr} oraz λ_{izol} w sposób decydujący wpływają na wielkość strat ciepła, weryfikacja empiryczna przedstawionego w pracy modelu numerycznych dynamiki strat ciepła wymaga przeprowadzenia pomiaru rzeczywistych wartości tych współczynników dla badanego odcinka sieci. Otrzymane wyniki badań, charakteryzują właściwości cieplne gruntu i izolacji jedynie dla rurociągu pomiarowego i w miejscu wykonywania pomiarów. Nie można ich zatem uogólnić w celu wykorzystania do obliczeń strat ciepła całej sieci ciepłowniczej.

5.3 *Uproszczony model dynamiki strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych*

Jak wspomniano na wstępie pracy, systemy ciepłownicze składają się z wielu współzależnych od siebie składników. Z tego powodu w obliczeniach symulacyjnych powinny być stosowane proste modele matematyczne, które jednocześnie przybliżają zjawiska cieplno-hydrauliczne z wystarczającą dokładnością.

W pracy zaproponowano uproszczenie modelu strat ciepła sieci ciepłowniczych, które nie wpływa na pogorszenie wyników obliczeń, a jedynie zwiększa ich wydajność. Głównym założeniem w tworzeniu nowego modelu jest jego zgodność z modelem dwuwymiarowym pod względem uzyskiwanych wartości strat ciepła. Rozkład temperatury w gruncie nie jest w tym przypadku istotny.

Próby stworzenia takiego modelu były już podjęte między innymi przez Benonyssona [6] i Pancewicza [79]. Model podany przez Benonyssona dotyczy rurociągów

układanych bezpośrednio w gruncie natomiast model Pancewicza opisuje straty ciepła gazociągu prowadzonego pod powierzchnią ziemi.

Ponieważ systemy ciepłownicze w Polsce charakteryzują się dużym udziałem sieci wykonanej w technologii kanałowej, zaproponowana w pracy metodyka modelowania strat ciepła dotyczy właśnie sieci kanałowych.

5.3.1 Analiza porównawcza metod określania oporu przenikania ciepła przez gruntu

Pierwszym etapem tworzenia uproszczonego modelu strat ciepła sieci ciepłowniczych jest porównanie wartości współczynnika przenikania ciepła pomiędzy powietrzem w kanale a powietrzem zewnętrznym, uzyskanych według metody Krischera i Forchheimera oraz według modelu dwuwymiarowego. W analizie pominięto wzór Faxena (5-5), ponieważ zgodnie z wcześniejszymi badaniami przeprowadzonymi przez autora [69], wzór ten niedostatecznie dokładnie aproksymuje zjawiska strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych. Pominięto także wzór Wiśniewskiego (5-6) ponieważ metoda ta jest całkowicie zgodna z metodą Krischera (5-2).

W przeprowadzonej analizie zajmowano się całkowitym oporem przenikania ciepła między powietrzem w kanale a powietrzem zewnętrznym. Z tego powodu, wartość tego oporu jest sumą oporów przejmowania i przewodzenia ciepła na tej drodze.

Wartość całkowitego oporu przenikania ciepła (R_{pc}) liczona według metod uproszczonych, zdefiniowana jest w następujący sposób:

$$R_{pc} = \frac{t_{kan} - t_e}{q_s}, \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}35)$$

gdzie:

q_s - jednostkowe straty ciepła, określone według metod uproszczonych (rozdział 5.1), W/m,

t_{kan} - temperatura powietrza w kanale, °C,

t_e - temperatura powietrza zewnętrznego, °C.

Wartość jednostkowych strat ciepła we wzorze (5-35) określana jest z wykorzystaniem metody Krischera (5-2) oraz Forchheimera (5-4) wyznaczania oporu przewodzenia ciepła przez warstwę gruntu na kanałem ciepłowniczym. Opory przejmowania ciepła, określone zostały dla stałych wartości współczynnika przejmowania ciepła α, określonych w literaturze [9], [56], [90] oraz w rozdziale 5.2.2.

Otrzymane wartości oporu przenikania ciepła przez grunt, porównane zostały z wartościami otrzymanymi według modelu dwuwymiarowego. Całkowity opór przenikania ciepła przez grunt w modelu dwuwymiarowym obliczono według następującej zależności:

$$R_{pc}^{2D} = \frac{t_{kan} - t_e}{q_s^{2D}}, \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}36)$$

gdzie:

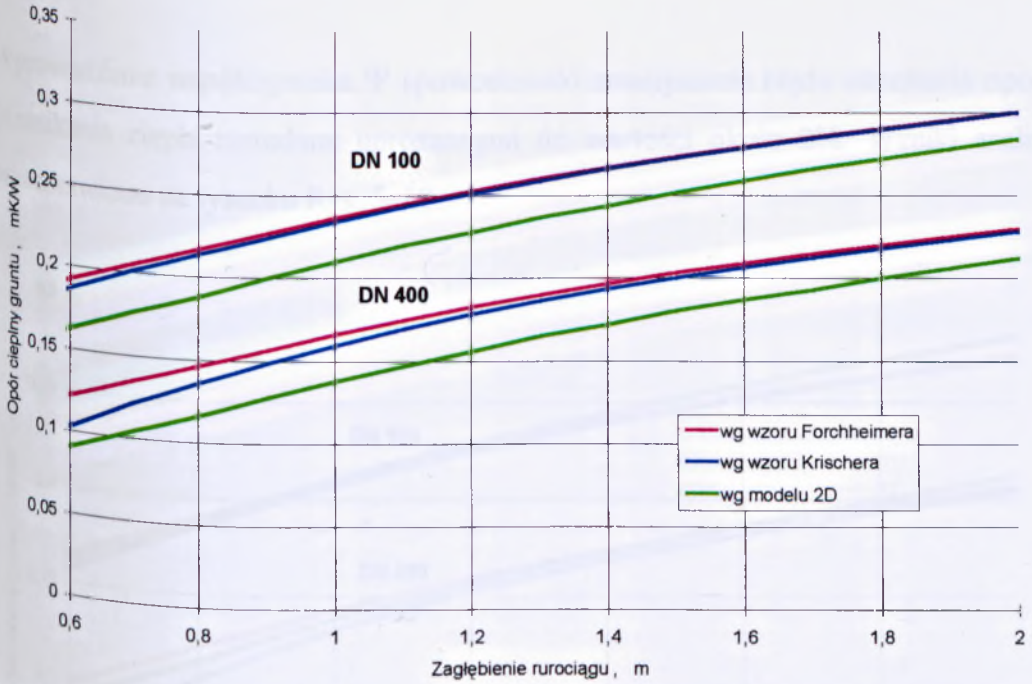
t_{kan} - temperatura powietrza w kanale , °C,

t_e - temperatura powietrza zewnętrznego , °C,

q_s^{2D} - jednostkowe straty ciepła , W/m.

Obliczenia strat ciepła z wykorzystaniem modelu dwuwymiarowego zostały wykonane dla stanu ustalonego oraz dla takich samych danych jak dla modeli uproszczonych.

W analizie porównawczej przeprowadzono szereg obliczeń wartości badanego oporu przenikania ciepła dla dwóch rurociągów o średnicy nominalnej DN100 oraz DN400 prowadzonych w kanałach typu T-9/65. Obliczenia wykonano dla zmiennego zagłębienia środka kanału w zakresie od H_k=0,6m do H_k=2m. Wyniki obliczeń przedstawione są na wykresie: Rys. 5–17



Rys. 5–17 Porównanie wartości oporów przenikania ciepła przez grunt obliczonych według metody Krischera, Forchheimera oraz modelu dwuwymiarowego.

Wykonane obliczenia wykazały, że otrzymane wyniki metodami Krischera oraz Forchheimera są zbieżne ze sobą przy zagłębieniu osi kanału w gruncie większym od 1 metra. Porównując je z wynikami otrzymanymi według modelu dwuwymiarowego, widoczna jest rozbieżność wyników wynosząca około 10 - 30 %. Dla zmniejszenia błędu, wprowadzono współczynnik Ψ korygujący wielkość średnicy zastępczej dla kanału określanej według wzoru (5-7). Wartość tego współczynnika określona została doświadczalnie wykonując szereg obliczeń dla dwóch wielkości kanału (DN100 i DN400) oraz dla zmiennego zagłębienia kanału. Współczynnik Ψ jest wielkością stałą i charakterystyczną dla danego typu kanału ciepłowniczego. Jego wartość zależy od rzeczywistego kształtu kanału.

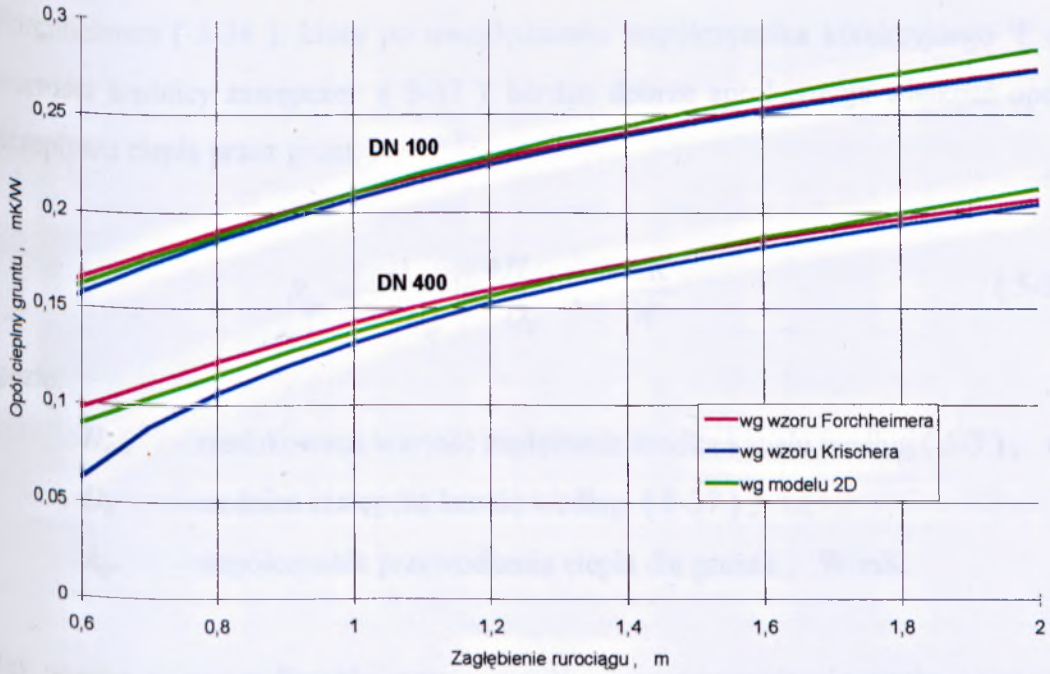
Na podstawie obliczeń ustalono, że wartość współczynnika Ψ dla kanałów typu T-9/65 wynosi:

$$\Psi = 1{,}21$$

Uwzględniając wielkość współczynnika korekcyjnego we wzorze (5-7) otrzymujemy jego ostateczną postać:

$$D_w = \Psi \frac{4F}{U} = 1{,}21 \frac{4F}{U}, \quad m \qquad (5\text{-}37)$$

Wprowadzenie współczynnika Ψ spowodowało zmniejszenie błędu określania oporu przenikania ciepła metodami uproszonymi do wartości około 2%. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku Rys. 5–18.



Rys. 5–18 Porównanie wartości oporów przenikania ciepła przez grunt obliczonych według metody Krischera, Forchheimera oraz modelu dwuwymiarowego przy uwzględnieniu współczynnika Ψ.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że metoda Forchheimera lepiej aproksymuje wartość oporu przenikania ciepła przez grunt niż metoda Krischera. Z tego powodu, do budowy uproszczonego modelu strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych wybrano wzór Forchheimera (5-4)

5.3.2 Założenia i definicja modelu uproszczonego

Obliczenia symulacyjne procesów cieplnych zachodzących w systemach sieci ciepłowniczych wymagają wykonania szeregu obliczeń wielkości strat ciepła dla każdego odcinka sieci w kolejnych chwilach czasowych. Z tego względu zastosowany model matematyczny strat ciepła musi spełniać następujące założenia:

- prosty w budowie,
- niewymagający wykonywania wielu skomplikowanych obliczeń,
- możliwie dokładnie odzwierciedlający poziom strat ciepła.

Budowę modelu uproszczonego oparto na wspomnianym wcześniej wzorze Forchheimera (5-38), który po uwzględnieniu współczynnika korekcyjnego Ψ dla wartości średnicy zastępczej (5-37), bardzo dobrze aproksymuje wielkość oporu przepływu ciepła przez grunt.

$$R_{gr} = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \ln \frac{4H_{red}}{D_Z} \quad , \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}38)$$

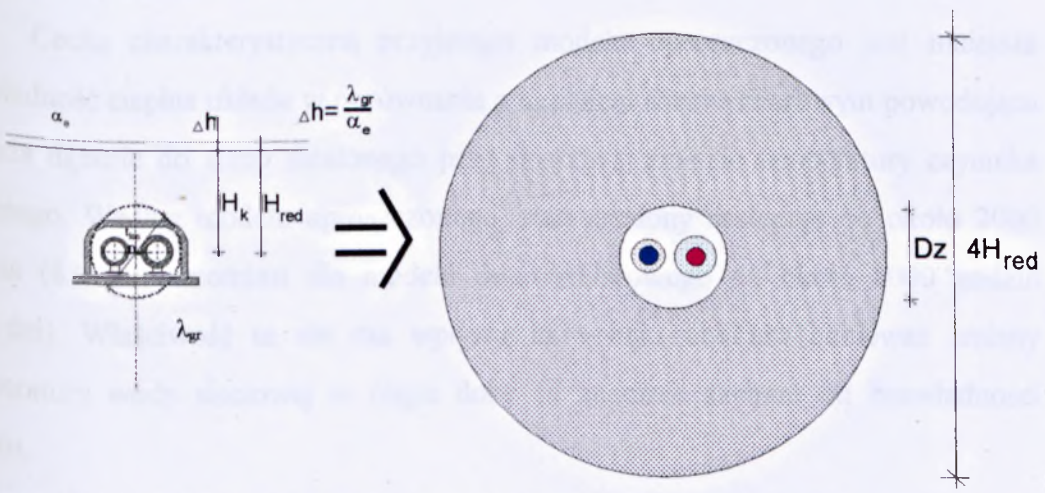
gdzie:

H_{red} - zredukowana wartość zagłębienia środka kanału według (5-3), m,

D_Z - średnica zastępcza kanału według (5-37), m,

λ_{gr} - współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu , W/mK.

Jak wynika ze wzoru Forchheimera, wartość oporu przewodzenia ciepła gruntu jest równoważna oporowi przewodzenia ciepła dla ścianki cylindrycznej o wewnętrznej średnicy równej D_Z i średnicy zewnętrznej równej $4H_{red}$. Graficzną interpretacje układu zastępczego przedstawiono na rysunku Rys. 5–19.



Rys. 5–19 Graficzna interpretacja zastępczego oporu przepływu ciepła przez grunt

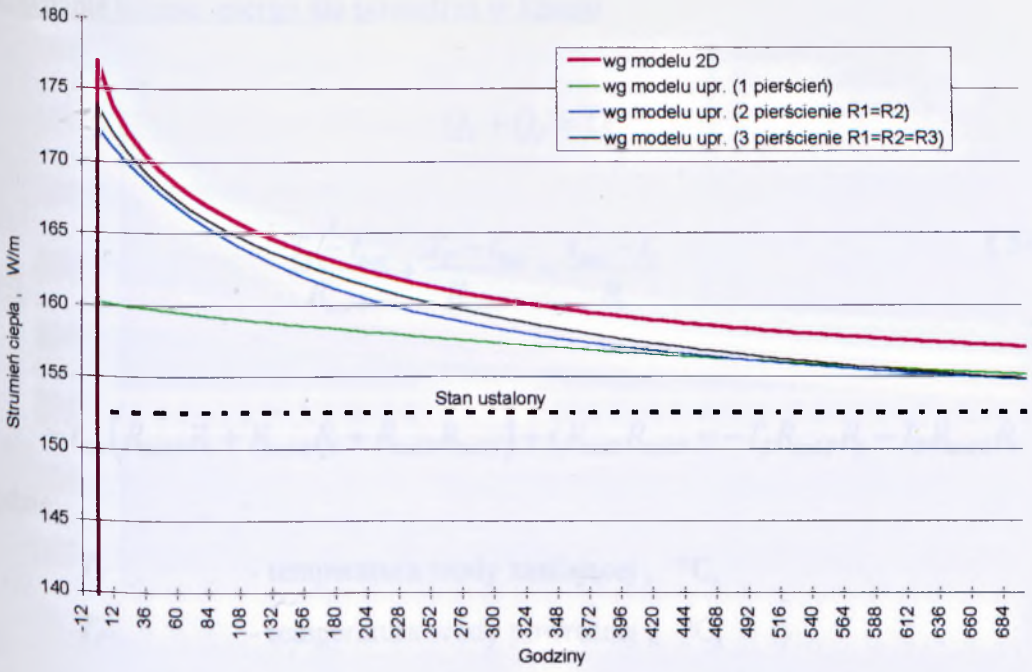
Zaproponowany układ zastępczy modelu strat ciepła, bardzo dobrze aproksymuje zjawiska przewodzenia ciepła przez grunt w stanie ustalonym. Jednak w przypadku

rozpatrywania procesów dynamicznych, wymagane jest wprowadzenie dodatkowych zmian w modelu polegającej na wprowadzeniu dyskretyzacji zastępczego pierścienia.

W pracy zaproponowano podział zastępczego pierścienia gruntu wokół kanału na niezbędną ilość mniejszych pierścieni. Liczba oraz grubość pierścieni podziałowych zastały określone na podstawie analizy zmienności strumienia strat ciepła wywołanej skokową zmianą temperatury wody sieciowej. Obliczenia wykonano dla skokowej zmiany średniej temperatury wody sieciowej wynoszącej ΔT=50 °C a otrzymane wyniki porównano z wynikami obliczeń według modelu dwuwymiarowego. Grunt wokół kanału został podzielony na pierścienie o równych oporach przewodzenia ciepła. Dzięki takiemu założeniu, uzyskano stopniowy wzrost pojemności cieplnych pierścieni bardziej oddalonych od kanału ciepłowniczego co w sposób naturalny przybliża rzeczywistość. Obliczenia wykazały, że zwiększenie ilości pierścieni podziałowych wpływa na wzrost dokładności wyników obliczeń, co zgodne jest z zasadą dyskretyzacji obszaru dla metod numerycznych rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła.

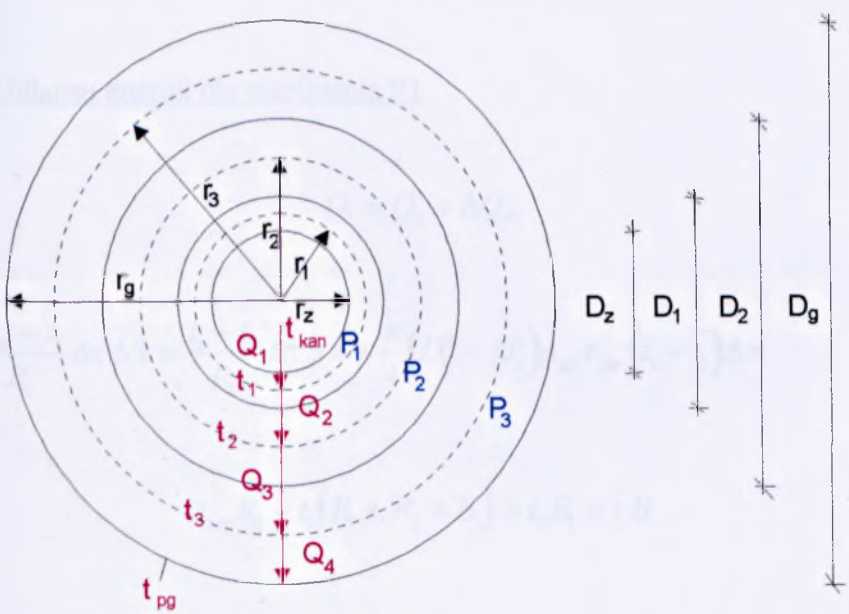
W modelu uproszczonym przyjęto podział gruntu na trzy pierścienie ponieważ dalsze zwiększanie ilości pierścieni powoduje niewielki wzrost dokładności obliczeń. Na wykresie (Rys. 5–20) przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy. Wprowadzenie podziału gruntu na dwa oraz trzy pierścienie bardzo wyraźnie poprawia wyniki obliczeń. Dalsze zwiększanie ilości pierścieni w niewielkim stopniu zmniejsza błąd obliczeń.

Cechą charakterystyczną przyjętego modelu uproszczonego jest mniejsza bezwładność cieplna układu w porównaniu z modelem dwuwymiarowym powodująca szybsze dążenie do stanu ustalonego przy skokowej zmianie temperatury czynnika grzejnego. Według modelu uproszczonego, stan ustalony następuje po około 2000 godzin (83 dni) natomiast dla modelu dwuwymiarowego po około 8000 godzin (330 dni). Właściwość ta nie ma wpływu na wyniki obliczeń ponieważ zmiany temperatury wody sieciowej w ciągu doby są znacznie szybsze od bezwładności gruntu.



Rys. 5–20 Wykres porównawczy zmiany strumienia ciepła przepływającego przez ścianki kanału w wyniku skokowej zmiany temperatury wody sieciowej przy zmiennej ilości pierścieni podziałowych

Zaproponowany w pracy uproszczony model strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych oparty jest na rozwiązaniu układu równań bilansu energii dla każdego pierścienia podziałowego. Poniżej przedstawiono równania bilansowe, w których użyto symboli zgodnych z oznaczeniami jak na rysunku Rys. 5–21.



Rys. 5–21 Podział gruntu na pierścienie podziałowe

Równanie bilansu energii dla powietrza w kanale

$$Q_Z + Q_P = Q_1$$

$$\frac{T_Z - t_{kan}}{R_{izol\,Z}} + \frac{T_P - t_{kan}}{R_{izol\,P}} = \frac{t_{kan} - t_1}{R_1} \qquad (5\text{-}39)$$

$$-t_{kan}\left(R_{izol\,P}R_1 + R_{izol\,Z}R_1 + R_{izol\,P}R_{izol\,Z}\right) + t_1 R_{izolZ}R_{izol\,P} = -T_Z R_{izol\,P}R_1 - T_P R_{izol\,Z}R_1$$

gdzie:

T_Z - temperatura wody zasilającej , °C,

T_P - temperatura wody powrotnej , °C,

t_{kan} - temperatura powietrza w kanale , °C,

$R_{izol\,Z}$, $R_{izol\,P}$ - współczynnik oporu przenikania ciepła przez izolację rury zasilającej i powrotnej według (5-12), $\frac{mK}{W}$.

W równaniu (5-39) nie występuje człon bezwładności cieplnej izolacji rur ponieważ krok czasowy przyjęty do obliczeń wynosi $\Delta\tau$=3600 s. Jak wykazano w punkcie 5.2.2 pracy, maksymalny krok czasowy dla izolacji rur wynosi 1440 s. Przy większej wartości kroku czasowego, w izolacji ustala się stan ustalony wymiany ciepła.

Równanie bilansu energii dla pierścienia P1

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q_{P1}$$

$$\frac{t_{kan} - t_1}{R_1}\Delta\tau\,\Delta x = \frac{t_1 - t_2}{R_2}\Delta\tau\,\Delta x + \frac{\pi}{4}\left(D_1^2 - D_Z^2\right)\rho_{gr}\,c_{pgr}\left(t_1 - \bar{t}_1\right)\Delta x \qquad (5\text{-}40)$$

$$t_{kan}R_2 - t_1\left(R_1 + R_2 + B_1\right) + t_2 R_1 = \bar{t}_1 B_1$$

$$B_1 = \frac{\pi\left(D_1^2 - D_Z^2\right)\rho_{gr}\,c_{pgr}R_1R_2}{4\Delta\tau}$$

gdzie:

ρ_{gr} - gęstość gruntu , kg/m^3,

c_{pgr} - ciepło właściwe gruntu , J/kgK,

$\Delta\tau$ - krok czasowy , s,

Δx - długość podziału wzdłuż rurociągu , m.

Równanie bilansu energii dla pierścienia P2

$$Q_2 = Q_3 + \Delta Q_{P2}$$

$$\frac{t_1 - t_2}{R_2}\Delta\tau\,\Delta x = \frac{t_2 - t_3}{R_3}\Delta\tau\,\Delta x + \frac{\pi}{4}\left(D_2^2 - D_1^2\right)\rho_{gr}\,c_{pgr}\left(t_2 - \bar{t}_2\right)\Delta x \qquad (5\text{-}41)$$

$$t_1 R_3 - t_2\left(R_2 + R_3 + B_2\right) + t_3 R_2 = \bar{t}_2 B_2$$

$$B_2 = \frac{\pi\left(D_2^2 - D_1^2\right)\rho_{gr}\,c_{pgr}\,R_2 R_3}{4\Delta\tau}$$

Równanie bilansu energii dla pierścienia P3

$$Q_3 = Q_4 + \Delta Q_{P3}$$

$$\frac{t_2 - t_3}{R_3}\Delta\tau\,\Delta x = \frac{t_3 - t_{pg}}{R_4}\Delta\tau\,\Delta x + \frac{\pi}{4}\left(D_g^2 - D_2^2\right)\rho_{gr}\,c_{pgr}\left(t_3 - \bar{t}_3\right)\Delta x \qquad (5\text{-}42)$$

$$t_2 R_4 - t_3\left(R_3 + R_4 + B_3\right) = -t_{pg} R_3 - \bar{t}_3 B_3$$

$$B_3 = \frac{\pi\left(D_g^2 - D_2^2\right)\rho_{gr}\,c_{pgr}\,R_3 R_4}{4\Delta\tau}$$

Pozostałe oznaczenia, wspólne dla równań bilansowych:

t_{kan} - temperatura powietrza w kanale , °C,

t_{pg} - temperatura na powierzchni zewnętrznej zastępczego walca gruntu , °C. Ponieważ całkowity opór przewodzenia ciepła przez grunt (walca zastępczego wg wzoru Forchheimera (5-4)) obliczany jest przy uwzględnieniu współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni gruntu wprowadzając wielkość głębokości zredukowanej (5-3), wartość temperatury t_{pg} jest równa temperaturze powietrza zewnętrznego.

t_1, t_2, t_3 - temperatury gruntu w pierścieniach podziałowych P_1, P_2, P_3 (Rys. 5–21) , °C,

r_Z, r_1, r_2, r_3, r_r - promienie powierzchni izotermicznych wg Rys. 5–21 , m,

D_Z, D_1, D_2, D_g - średnice pierścieni wg Rys. 5–21 , m,

α_{kan} - współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni kanału , W/m^2K,

R_1 - współczynnik oporu przenikania ciepła na drodze od powietrza w kanale do powierzchni izotermicznej t_1,

$$R_1 = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \ln\frac{r_1}{r_Z} + \frac{1}{\pi D_Z \alpha_{kan}}, \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}43)$$

R_2 - opór przewodzenia ciepła między pierścieniami P_1 a P_2,

$$R_2 = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \ln\frac{r_2}{r_1}, \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}44)$$

R_3 - opór przewodzenia ciepła między pierścieniami P_2 a P_3,

$$R_3 = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \ln\frac{r_3}{r_2}, \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}45)$$

R_4 - opór przenikania ciepła między pierścieniem P_3 a powietrzem zewnętrznym.

$$R_4 = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \ln \frac{r_g}{r_3}, \quad \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}46)$$

Przedstawione równania bilansowe (5-39), (5-40), (5-41), (5-42) tworzą układ równań liniowych o rozmiarze (4x4), który może być rozwiązany jedną ze znanych metod numerycznych np.: metodą eliminacji Gaussa [5], [64].

5.3.3 Warunki brzegowe

Opracowany uproszczony model strat ciepła kanałowych sieci ciepłowniczych wymaga określenia odpowiednich warunków brzegowych:

1. na wewnętrznej powierzchni rury,
2. na zewnętrznej powierzchni izolacji rurociągu,
3. na wewnętrznej powierzchni kanału ciepłowniczego,
4. na powierzchni gruntu.

Powierzchnia wewnętrzna rury

Na wewnętrznych powierzchniach rur zachodzi wymiana ciepła między wodą sieciową a ścianką rurociągu w wyniku przejmowania ciepła. Jak wykazano w rozdziale 4.2, w sieciach ciepłowniczych prawie zawsze panuje przepływ turbulentny wody. W takich warunkach współczynnik przenikania ciepła α ma dużą wartość wynoszącą 300-20000 W/m^{2}K [112]. Opór przejmowania ciepła zatem jest pomijalnie mały i dlatego po stronie wewnętrznej rury założono warunek brzegowy I-szego rodzaju tzn. temperatura ścianki wewnętrznej rury (t_{sc}) jest równa temperaturze wody sieciowej (T_s).

$$t_{sc} = T_s$$

Powierzchnia zewnętrzna izolacji

Na zewnętrznej powierzchni izolacji termicznej rurociągu następuje wymiana ciepła na drodze przejmowania - warunek brzegowy III rodzaju. W modelu przyjęto średnią wartość współczynnika przejmowania ciepła uwzględniającego wymianę ciepła na drodze konwekcji i promieniowania [44], [55].
Przy założonych warunkach brzegowych, opór przenikania ciepła między wodą sieciową a powietrzem w kanale ciepłowniczym wyraża wzór (5-12).

Powierzchnia wewnętrzna kanału ciepłowniczego

Na powierzchni wewnętrznej ścianki kanału ciepłowniczego założono warunek brzegowy III rodzaju, ponieważ zachodzą tu zjawiska przejmowania ciepła. Wewnątrz kanału występuje ruch konwekcyjny powietrza wokół rur oraz ścianki kanału, a także promieniowanie powierzchni izolacji rurociągów oraz elementów niezaizolowanych (zasuwy, kompensatory itp.). W obliczeniach strat ciepła sieci ciepłowniczych nie bada się szczegółowo wpływu konwekcji i promieniowania na intensywność wymiany ciepła w kanale. Przyjmuje się stałą, średnią wartość współczynnika przejmowania ciepła α_{kan}, który uwzględnia konwekcję i promieniowanie. Opór przejmowania ciepła na wewnętrznej ściance kanału wyraża wzór:

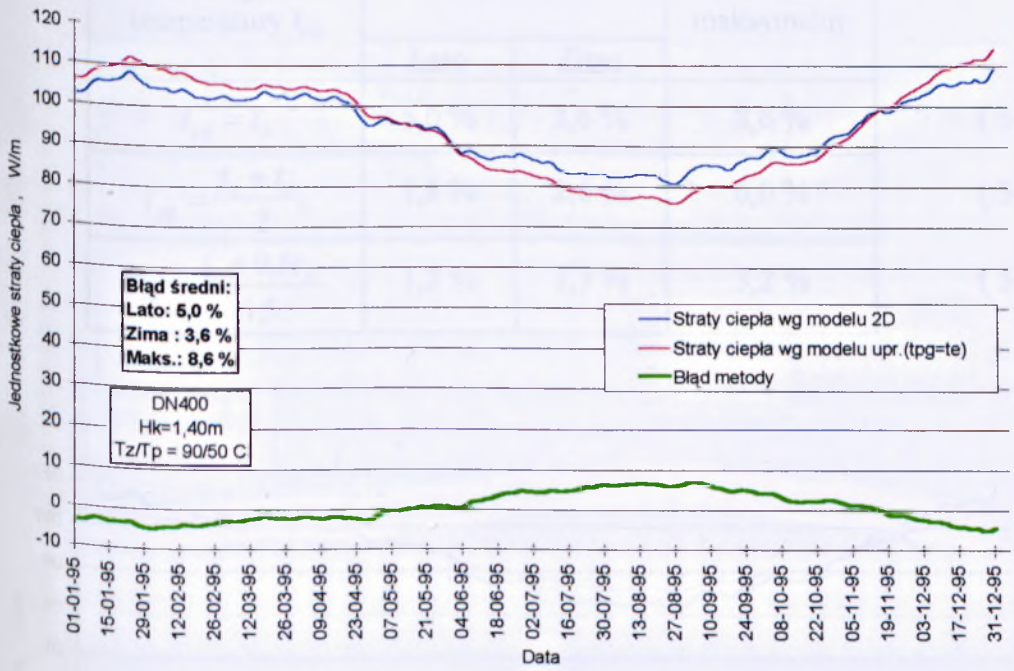
$$R_k = \frac{1}{\pi D_Z \alpha_{kan}}, \frac{mK}{W} \qquad (5\text{-}47)$$

Powierzchnia gruntu

Na powierzchni gruntu zachodzą zjawiska wymiany ciepła na drodze konwekcji oraz promieniowania. Podobnie jak dla modelu dwuwymiarowego (rozdział 5.2.2) przyjęto warunek brzegowy III rodzaju z założeniem stałej wartości współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni gruntu. Wartość jego określona została przez Kvisgaarda oraz Bohma [9], [56] i wynosi α_e=14,6 W/m^{2}K.

W uproszczonym modelu strat ciepła zamieniono opór przejmowania ciepła równoważnym oporem gruntu zgodnie z zależnością (5-3). Dzięki tej operacji przyjęto tu warunek brzegowy I-go rodzaju, gdzie temperatura powierzchnia gruntu ma wartość równą temperaturze powietrza zewnętrznego.

Wykonując obliczenia testujące poprawność przyjętych warunków brzegowych w modelu uproszczonym, zauważono pewne rozbieżności wyników obliczeń w stosunku do modelu dwuwymiarowego (Rys. 5–22).



Rys. 5–22 Porównanie wyników obliczeń strat ciepła według modelu uproszczonego i dwuwymiarowego przy założeniu: $t_{pg}=t_e$.

Największe rozbieżności wyników występują przy obliczeniach strat ciepła dla okresu letniego. Zaobserwowany błąd wynika z uproszenia jakie przyjęto w tworzeniu modelu tzn. wprowadzenie zastępczego gruntu wokół kanału w kształcie walca. Uproszczenie to powoduje, że zmiany temperatury powietrza zewnętrznego mają jednakowy wpływ na wielkość strumienia ciepła przepływającego przez wszystkie ścianki kanału. W rzeczywistości (według modelu dwuwymiarowego) największe zmiany strumienia ciepła występują na ściance górnej oraz ściankach bocznych kanału, najmniejsze zaś na ściance dolnej.

Zmieniając definicję temperatury powierzchni gruntu (t_{pg}) jako średnią z wartości temperatury powietrza zewnętrznego (t_e) i średniej temperatury powietrza

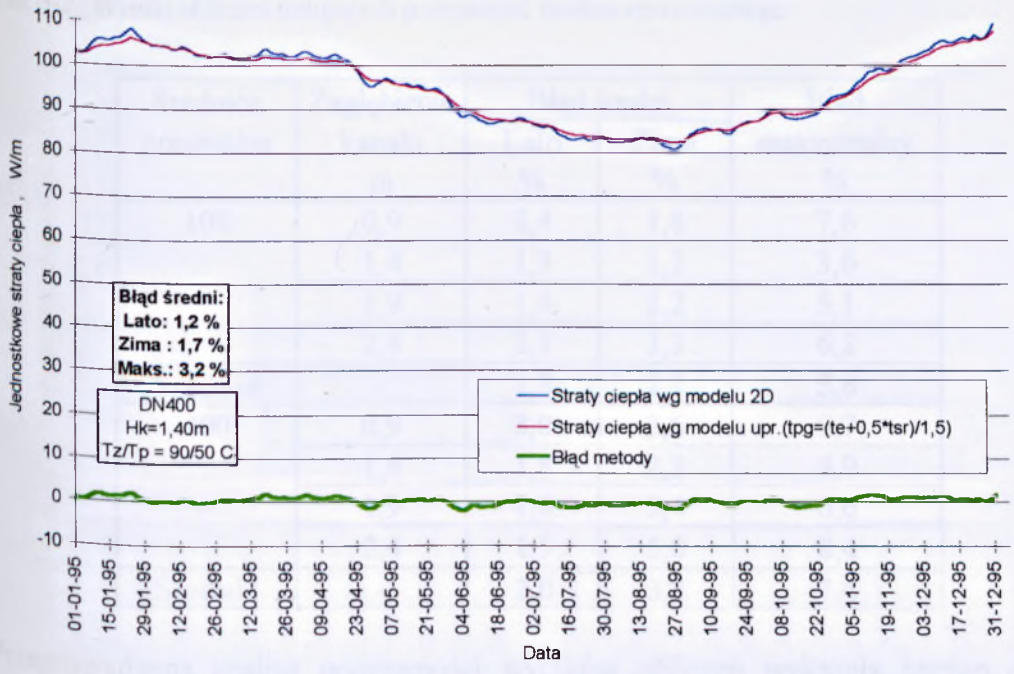
w ciągu roku ($t_{śr}$) uzyskano zmniejszenie błędu. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli poniżej (Tab. 5-1) oraz na wykresach: Rys. 5–22, Rys. 5–23, Rys. 5–24. Najmniejsze rozbieżności wyników uzyskano definiując temperaturę t_{pg} według wzoru (5-50).Obliczenia wykonano dla stałej wartości temperatury wody sieciowej tzn.: T_Z/T_P = 90/50 °C oraz dla zmiennej temperatury powietrza zewnętrznego.

Tab. 5-1 Zestawienie wielkości błędów obliczeń w zależności od sposobu definiowania temperatury t_{pg}

Definicja temperatury t_{pg}	Błąd średni		Błąd maksymalny	
	Lato	Zima		
$t_{pg} = t_e$	5,0 %	3,6 %	8,6 %	(5-48)
$t_{pg} = \frac{t_e + t_{śr}}{2}$	1,8 %	2,6 %	6,0 %	(5-49)
$t_{pg} = \frac{t_e + 0{,}5t_{śr}}{1{,}5}$	1,2 %	1,7 %	3,2 %	(5-50)



Rys. 5–23 Porównanie wyników obliczeń strat ciepła według modelu uproszczonego i dwuwymiarowego przy założeniu: $t_{pg} = \frac{t_e + t_{śr}}{2}$



Rys. 5-24 Porównanie wyników obliczeń strat ciepła według modelu uproszczonego i dwuwymiarowego przy założeniu: $t_{pg} = \frac{t_e + 0{,}5t_{śr}}{1{,}5}$

5.3.4 Obliczenia testujące poprawność modelu

Opracowany uproszczony model procesów strat ciepła sieci ciepłowniczych został poddany testowi zgodności wyników z modelem dwuwymiarowym traktowanym jako model wzorcowy. Obliczenia testujące wykonano dla rzeczywistych danych klimatycznych dla Warszawy dla lat: 1994 i 1995 według zasad opisanych w rozdziale 5.2.4. Wartość temperatury powierzchni gruntu dla modelu uproszczonego przyjęto według wzoru (5-50).

Obliczenia strat ciepła wykonano dla rurociągów DN100 oraz DN400 ułożonych w kanałach typu T-9/65 [53]. Przyjęto cztery warianty zagłębienia osi kanału H_k tj.: 0,9 m, 1,4 m, 1,9 m i 2,4 m.

Porównanie otrzymanych wyników obliczeń dla obu modeli przedstawiają wykresy zamieszczone w załączniku 12.1 .Wyniki końcowe testu zestawiono w tabeli poniżej (Tab. 5-2).

Tab. 5-2 Wyniki obliczeń testujących poprawność modelu uproszczonego

Średnica nominalna	Zagłębienie kanału m	Błąd średni		Błąd maksymalny %
		Lato %	Zima %	
100	0,9	2,4	1,8	7,6
	1,4	1,3	1,2	3,6
	1,9	1,4	2,2	5,1
	2,4	2,1	3,3	6,2
Średnio	-	**1,8**	**2,1**	**5,6**
400	0,9	3,0	2,6	9,7
	1,4	1,8	2,1	4,9
	1,9	1,6	3,4	6,6
	2,4	1,5	5,0	8,4
Średnio	-	**2,0**	**3,3**	**7,4**

Przeprowadzona analiza poprawności wyników obliczeń wykazała bardzo dobrą zbieżność wartości strat ciepła sieci ciepłowniczych obliczonych według modelu uproszczonego z wynikami uzyskanymi z obliczeń modelem dwuwymiarowym. Średni błąd nie przekracza 5 % w zakresie zagłębienia kanału 0,9 - 2,4 m, a maksymalna wartość błędu dla okresu jednego roku wynosi poniżej 8 %. Otrzymane wyniki testu świadczą o możliwości wykorzystania modelu uproszonego do obliczeń symulacyjnych pracę systemu ciepłowniczego.

5.3.5 Wnioski

1. Uproszczone metody Forchheimera i Krischera dobrze aproksymują procesy strat ciepła sieci ciepłowniczych. Jednak w zastosowaniu do obliczeń strat ciepła sieci kanałowych wymagane jest wprowadzenie współczynnika poprawkowego w określaniu średnicy zastępczej dla kształtu kanału.
2. Dla sieci kanałowych analizowanych w pracy (typu T-9/65), lepszą metodą obliczania strat ciepła jest metoda Forchheimera.
3. Modelowanie dynamicznych procesów strat ciepła z wykorzystaniem wzoru Forchheimera wymaga dokonania dyskretyzacji przekroju zastępczego gruntu w kształcie walca. Wprowadzenia trzech pierścieni podziałowych zapewnia wystarczającą dokładność obliczeń dynamiki strat ciepła.

4. Wprowadzenie układu zastępczego dla gruntu wokół kanału wymaga określenia odpowiedniej definicji dla wielkości zastępczej temperatury na powierzchni przyjętego walca gruntu.

5.4 *Program komputerowy do symulacji nieustalonych procesów strat ciepła sieci ciepłowniczych*

Wszystkie obliczenia symulacyjne strat ciepła zostały wykonane za pomocą programu komputerowym SCSC (Straty Ciepła Sieci Ciepłowniczych) wykonanego dla potrzeb pracy. Program pracuje w 32-bitowym środowisku MS Windows 98. Napisany został w obiektowym języku programowania C++. Kompilację programu wykonano kompilatorem Borland C++ Builder wersja 5.0 [11], [42], [97].

Program SCSC wykonuje obliczenia symulacyjne strat ciepła z wykorzystaniem opisanego modelu dwuwymiarowego oraz modelu uproszczonego. Obliczenia wykonywane są na podstawie bazy danych klimatycznych zapisanych w pliku dyskowym w formacie dBase. Baza danych zawiera następujące informacje:

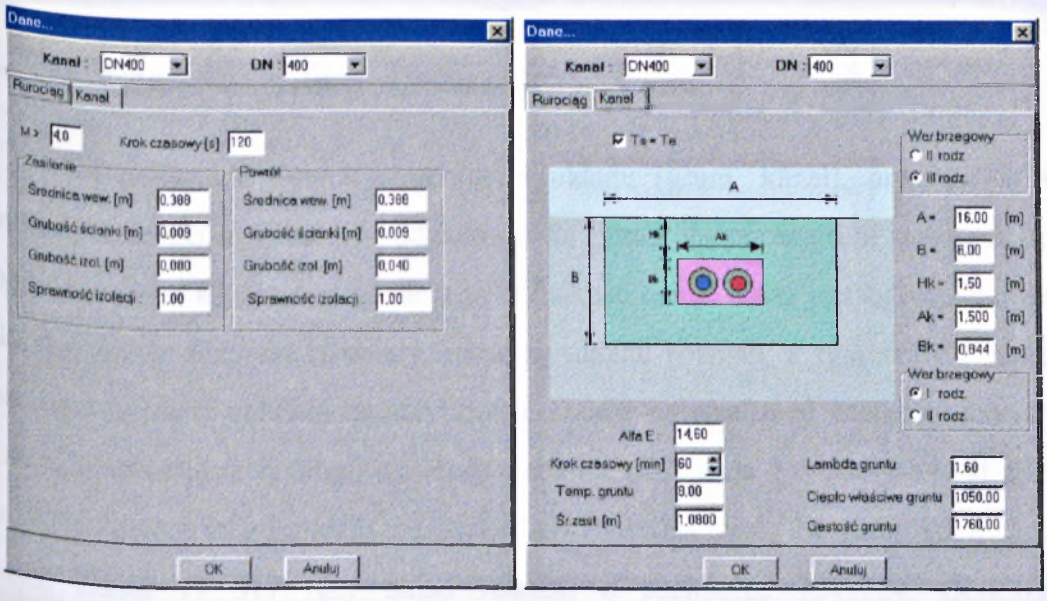
- czas,
- temperatura powietrza zewnętrznego,
- prędkość wiatru,
- natężenia promieniowania słonecznego,
- temperatura wody sieciowej w rurociągu zasilającym,
- temperatura wody sieciowej w rurociągu powrotnym.

Pozostałe dane do obliczeń wprowadzane są w odpowiednich oknach dialogowych (Rys. 5–25). Należy tam podać między innymi:

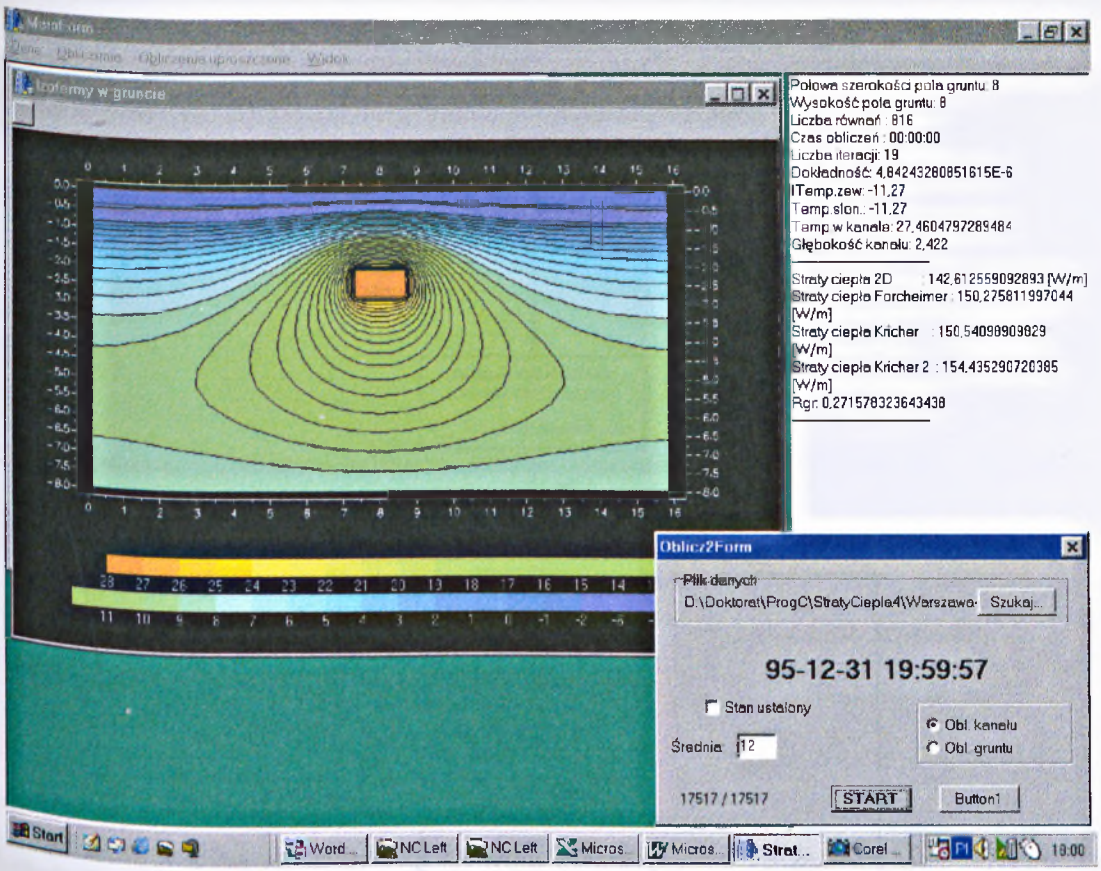
- średnicę wewnętrzną rur (zasilanie, powrót),
- grubość ścianki rur,
- grubość izolacji termicznej rur (zasilanie, powrót),
- współczynnik przewodzenia ciepła dla materiału izolacji,
- sprawność izolacji,

- wymiary obszaru analizowanego gruntu wokół kanału,
- wymiary kanału,
- zagłębienie kanału,
- temperaturę w głębi gruntu,
- właściwości cieplne gruntu: współczynnik przewodzenia, ciepło właściwe, gęstość,
- średnicę zastępczą dla kanału

Pola edycyjne dotyczące wymiarów kanałów ciepłowniczych oraz rur są automatycznie wypełniane po wyborze odpowiedniego typu kanału z listy katalogowej. Program zawiera katalog danych dla kanałów typu T-9/65 oraz rur powszechnie stosowanych w ciepłownictwie.



Rys. 5–25 Okna dialogowe do wprowadzania danych dla programu SCSC

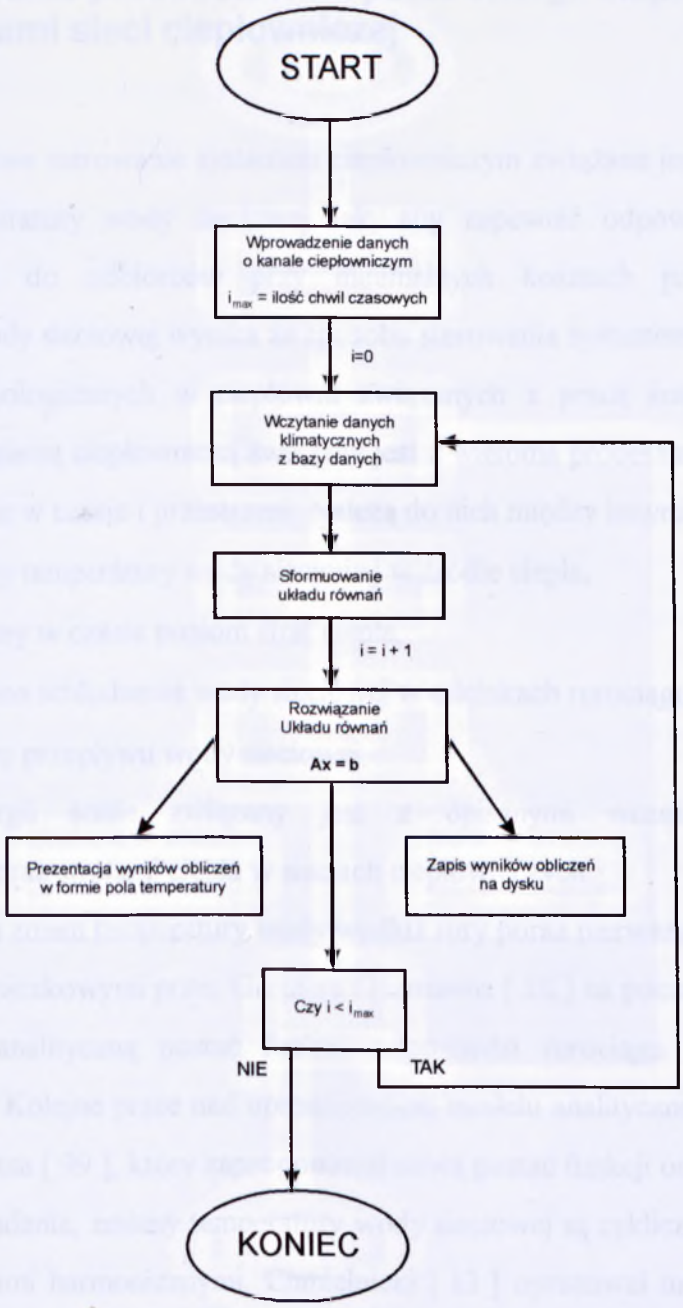


Rys. 5–26 Widok głównego ekranu programu SCSC

Na podstawie danych o geometrii układu (grunt, kanał), program SCSC automatycznie generuje siatkę podziałową dla przekroju przez grunt uwzględniając obecność w nim kanału ciepłowniczego. Wielkość oczek siatki jest optymalizowana tak, aby zminimalizować rozmiary macierzy układu równań, a tym samym skrócić czas wykonywania obliczeń numerycznych. Dzięki optymalizacji wielkości macierzy oraz zastosowaniu technologii macierzy rzadkich, obliczenia symulacyjne strat ciepła dla okresu dwóch lat z krokiem czasowym $\Delta\tau$=1h trwają około 34 minut, rozwiązując w tym czasie 17 517 razy układ równań o rozmiarze 724x724. Obliczenia wykonywane były na komputerze z procesorem Intel Pentium II z zegarem 300MHz.

Program SCSC wykonuje obliczenia według algorytmu przedstawionego na rysunku Rys. 5–27. Dane wejściowe pobierane są z pól edycyjnych okien dialogowych (Rys. 5–25) oraz bazy danych klimatycznych. Następnie formułowany jest układ równań bilansowych i zapisywany w formie macierzy. Rozwiązaniem układu równań (**Ax=b**) są wartości temperatury w gruncie, które prezentowane są na ekranie w formie pola temperatury. Koniec pracy programu następuje z chwilą

wykonania obliczeń dla ostatniej chwili czasowej zdefiniowanej w bazie danych klimatycznych.



Rys. 5–27 Algorytm programu SCSC

Wyniki obliczeń program prezentuje na ekranie w formie pola temperatury w przekroju poprzecznym przez kanał i otaczający go grunt (Rys. 5–26). Pole temperatury obliczane jest dla każdej chwili czasowej. Rozkład temperatury w gruncie zapisywany jest na dysku komputera w plikach tekstowych w formacie czytanym przez inne programy graficzne np. Surfer.

6. Modelowanie procesów transportu energii cieplnej rurociągami sieci ciepłowniczej

Prawidłowe sterowanie systemem ciepłowniczym związane jest z cyklicznymi zmianami temperatury wody sieciowej tak, aby zapewnić odpowiednie warunki dostawy ciepła do odbiorców przy minimalnych kosztach przesyłu energii. Temperatura wody sieciowej wynika ze sposobu sterowania systemem oraz przebiegu procesów technologicznych w ciepłowni związanych z pracą kotłów. Transport energii cieplnej siecią ciepłowniczą związany jest z wieloma procesami dynamicznymi zmieniającymi się w czasie i przestrzeni. Należą do nich między innymi:

- zmiany temperatury wody sieciowej w źródle ciepła,
- zmienny w czasie poziom strat ciepła,
- zmienne schłodzenie wody sieciowej w odcinkach rurociągu,
- zmiany przepływu wody sieciowej.

Transport energii ściśle związany jest z opisanymi wcześniej procesami hydraulicznymi oraz stratami ciepła w sieciach ciepłowniczych.

Zjawiska zmian temperatury wody wzdłuż rury poraz pierwszy zostały opisane równaniami różniczkowymi przez Gartnera i Harrisona [28] na początku lat 60-tych, którzy podali analityczną postać funkcji odpowiedzi rurociągu na wymuszenie temperaturowe. Kolejne prace nad uproszczeniem modelu analitycznego prowadzone były przez Tobiasa [99], który zaproponował nową postać funkcji odpowiedzi.
Jak wykazują badania, zmiany temperatury wody sieciowej są cykliczne, które można opisać równaniami harmonicznymi. Chmielnicki [13] opracował metodę określania strat ciepła w nieustalonych warunkach pracy systemu przy harmonicznych zmianach temperatury wody sieciowej.

Z chwilą pojawienia się odpowiednio szybkich maszyn cyfrowych nastąpił dalszy rozwój modeli transportu energii. Powstało więc wiele programów komputerowych rozwiązujących problemy opóźnienia transportowego w sieciach.
W programie HVACSIM+ [12] przyjęto sposób aproksymowania rozkładu temperatury cieczy w przewodach wielomianem piątego stopnia, którego współczynniki są zmienne w czasie. Wartości tych współczynników wyliczane są dla

każdej chwili czasowej obliczeń symulacyjnych. Program stosowany jest do symulacji pracy sieci lub instalacji, w których występują niewielkie zmiany wartości temperatury wody w czasie. Dokładność obliczeń maleje gdy oscylacje temperatury są szybsze od czasu przepływu wody w rurociągu.

Pod koniec lat 80-tych, powstały nowe modele numeryczne procesów transporty ciepła (zimna) siecią rur. Jedne z pierwszych prób zastosowania ich w symulacjach sieci ciepłowniczych miały miejsca w Dani. Benonysson [6] przedstawił dwie metody numerycznego modelowania dynamicznych procesów przesyłu ciepła rurociągami sieci ciepłowniczej: elementów oraz węzłową. Obie metody zakładają podział rury na elementy.

Metoda elementów wprowadza podział odcinka rury na jednakowej długości elementy. Procesy wymiany ciepła z otoczeniem analizowane są w obrębie każdego elementu osobno. Tak więc, w każdej chwili czasowej obliczana jest temperatura wody w każdym elemencie podziałowym.

Metoda węzłowa zakłada podział rury na elementy o różnej długości wynikającej z prędkości wody na początku rury. Temperatura wody obliczana jest tylko dla końcowego przekroju rury (węzła końcowego), uwzględniając jedynie średnią wartość strat ciepła rurociągu w czasie przepływu wody w rurze. Metoda węzłowa bardzo dobrze aproksymuje przemieszczenie się fali temperaturowej wzdłuż rury, natomiast straty ciepła do otoczenia powodujące schłodzenie wody są uogólnione, co w przypadku rozległych sieci ciepłowniczych może mieć wpływ na błąd obliczeń.

Palsson [80] wykonał analizę porównawczą obu metod, z której wynika że metoda węzłowa bardzo dobrze modeluje procesy transportu ciepła w szerokim zakresie zmienności prędkości przepływu wody w rurach. W metodzie elementów warunkiem dobrej aproksymacji jest odpowiedni dobór podziału rurociągu do wartości prędkości wody oraz przyjętego kroku czasowego.

Przedstawione przez Benonyssona metody zostały wykorzystane w pakiecie programów komputerowych TRNSYS [100] służących do symulacji dynamiki procesów wymiany ciepła w budynkach oraz instalacji ogrzewczych i chłodniczych.

Zagadnieniami transportu ciepła siecią rur zajmował się także Richardson [88], [89], który stworzył modułowy system obliczeniowy o nazwie BRISTOL, służący do przeprowadzania symulacji procesów nieustalonych w instalacjach

ogrzewczych. Jednym z komponentów jego systemu jest model rurociągu oparty na metodzie elementów.

6.1 *Przegląd numerycznych metod modelowania procesów transportu ciepła*

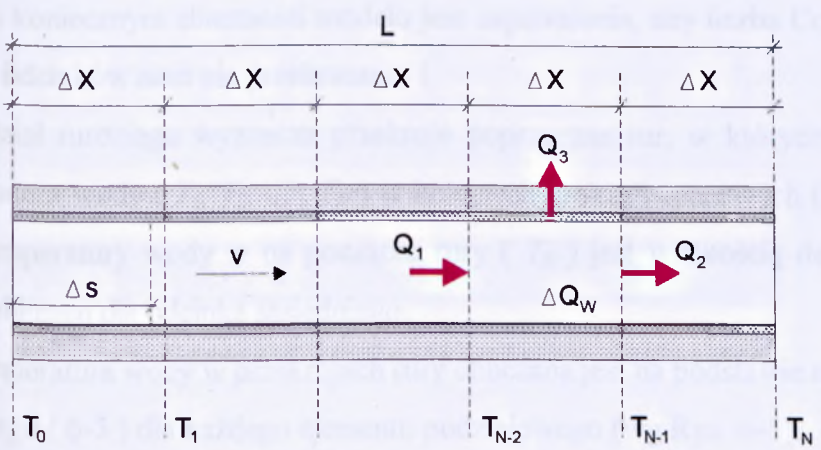
W rozdziale tym przedstawione zostały dwie numeryczne metody modelowania procesów przepływu fali temperaturowej wzdłuż rurociągu ciepłowniczego:

- metoda elementów,
- metoda węzłowa.

W odróżnieniu od metod analitycznych, metody te zakładają dyskretyzację rur sieci ciepłowniczej na elementy podziałowe. Różnica między mini polega na sposobie podziału rurociągu oraz obliczaniu wartości temperatury wody na końcu przewodu.

6.1.1 Metoda elementów

W metodzie elementów przyjmuje się podział odcinka sieci na elementy o jednakowej długości (Rys. 6–1). Ilość podziałów rury N zależy od przyjętego kroku czasowego $\Delta\tau$ oraz prędkości przepływu wody v [68].



Rys. 6–1 Dyskretyzacja rury według metody elementów

Długość ΔX elementu podziałowego obliczana jest w następujący sposób:

1. Droga przebyta przez wodę w czasie $\Delta\tau$ wynosi:

$$\Delta s = v\,\Delta\tau\,, \quad m$$

2. Ilość elementów dyskretyzacji rury:

$$N = round\left(\frac{L}{\Delta s}\right) + 1$$

3. Długość elementu:

$$\Delta X = \frac{L}{N},\ m$$

$$\Delta X \geq \Delta s$$

Warunkiem dobrej aproksymacji zjawiska przepływu fali temperaturowej jest zapewnienie takiego podziału rury aby:

$$\Delta X \cong \Delta s \qquad (6\text{-}1)$$

Wskaźnikiem jakości aproksymacji zjawiska jest bezwymiarowa liczba Couranta (Cou) zdefiniowana jako:

$$Cou = \frac{\Delta s}{\Delta X} = \frac{V\Delta\tau}{\Delta X} \qquad (6\text{-}2)$$

Spełnienie warunku (6-1) zachodzi przy wartości liczby Couranta bliskiej jedności. Warunkiem koniecznym zbieżności modelu jest zapewnienia, aby liczba Couranta dla wszystkich odcinków sieci nie przekraczała 1.

Podział rurociągu wyznacza przekroje poprzeczne rur, w których obliczana jest temperatura wody (T_1, T_2, ... , T_N) w kolejnych krokach czasowych (Rys. 6–1). Wartość temperatury wody w na początku rury (T_0) jest wielkością daną będącą wynikiem obliczeń dla odcinka sąsiedniego.

Temperatura wody w przekrojach rury obliczana jest na podstawie równania bilansu energii (6-3) dla każdego elementu podziałowego (wg Rys. 6–1).

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + \Delta Q_W \qquad (6\text{-}3)$$

gdzie:

Q_1 - ilość ciepła dopływającego do elementu , J,

Q_2 - ilość ciepła odpływającego z elementu , J,

Q_3 - straty ciepła , J,

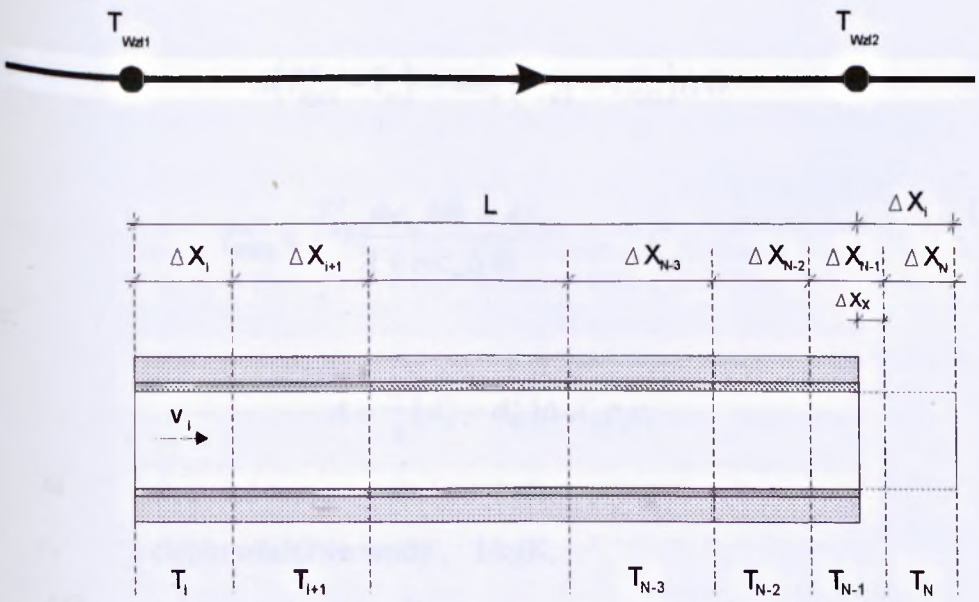
ΔQ_W - przyrost energii wewnętrznej w elemencie , J.

Rozwinięcie oraz rozwiązanie równania (6-3) przedstawiono w dalszej części pracy. Tworząc równanie bilansowe przyjęto następujące założenia upraszczające:

- pominięto przewodzenie ciepła między elementami podziałowymi rury w kierunku przepływu wody,
- pominięto przewodzenie ciepła w materiale rury w kierunku równoległym do kierunku przepływu wody,
- pominięto energię kinetyczną i potencjalną strumienia wody jako niewielką co do wartości w porównaniu z przesyłaną energię cieplną,

6.1.2 Metoda węzłowa

Metoda węzłowa [6] także zakłada dyskretyzację rury, lecz elementy podziałowe posiadają różną długość wynikającą z prędkości przepływu wody w danej chwili czasowej (Rys. 6–2).



Rys. 6–2 Dyskretyzacja rury według metody węzłowej

Długość elementów obliczana jest w chwili „wpływania" nowej porcji wody do rury w czasie równym krokowi czasowemu symulacji $\Delta\tau$. Długość elementów nie zmienia się w czasie przepływu wody (elementu) w rurze. Długość elementu obliczana w *i-tej* chwili czasowej wynosi:

$$\Delta X_i = v_i \Delta \tau \ , \quad m$$

Prędkość przepływu wody v zmienia się w każdej chwili czasowej co powoduje, że długość każdego elementu podziałowego jest inna.

Największe problemy w metodzie węzłowej stwarza określenie temperatury wody na końcu rury (w węźle końcowym). Temperatura ta obliczana jest w następującej kolejności (oznaczenia symboli według Rys. 6–2):

1. Obliczenie temperatury z pominięciem strat ciepła i pojemności cieplnej ścianki rury:

$$T^{I}_{Wzl2} = \frac{\Delta X_N T_N + \Delta X_X T_{N-1}}{\Delta X_i} \ , \quad ^{\circ}C \qquad (6\text{-}4)$$

2. Uwzględniając pojemność cieplną materiału rury należy ułożyć równanie bilansu energii:

$$A\left(T^{II}_{Wzl2} - \bar{t}_{sc}\right) = \dot{m} c_w \left(T^{I}_{Wzl2} - T^{II}_{Wzl2}\right)\Delta\Theta$$

$$T^{II}_{Wzl2} = \frac{T^{I}_{Wzl2}\dot{m} c_w \Delta\Theta + A\bar{t}_{sc}}{A + \dot{m} c_w \Delta\Theta} \ , \quad ^{\circ}C \qquad (6\text{-}5)$$

gdzie:

$$A = \frac{\pi}{4}\left(d_Z^2 - d_W^2\right)\Delta X_i \rho_s c_s$$

$\dot{m}$ - strumień masowy wody , kg/s,

c_w - ciepło właściwe wody , J/kgK,

$\Delta\Theta$ - czas przepływu wody w rurze , s,

$\bar{t}_{sc}$ - temperatura ścianki rury w chwili poprzedniej , °C,

d_Z, d_W - średnica zewnętrzna i wewnętrzna rury , m,

ρ_s - gęstość stali , kg/m^3,

c_s - ciepło właściwe stali , J/kgK.

3. Ostatnim etapem jest obliczenie schłodzenia wody w wyniku strat ciepła czyli:

$$\dot{m}c_w\left(T^{II}_{Wzl2} - T^{III}_{Wzl2}\right)\Delta\Theta = q^{śr}_{Str}\Delta X_i\Delta\Theta$$

$$T_{Wzl2} = T^{III}_{Wzl2} = T^{II}_{Wzl2} - \frac{q^{śr}_{Str}\Delta X_i}{\dot{m}c_w} \quad [°C] \qquad (6\text{-}6)$$

gdzie:

$q^{śr}_{Str}$ - średnie, jednostkowe straty ciepła rury , W/m.

Wynikiem trójetapowych obliczeń jest wartość temperatury wody (T_{Wzl2}) na końcu odcinka rurociągu z uwzględnieniem pojemności cieplnej materiału rur oraz średniej wartości strat ciepła rurociągu.

6.2 Sformułowanie modelu transportu energii cieplnej

Przyjęty w pracy model transportu energii cieplnej siecią ciepłowniczą oparto na metodzie elementów, ponieważ bardzo precyzyjnie opisuje zjawiska przenikania ciepła na drodze od przepływającej w rurach wody sieciowej poprzez grunt do powietrza zewnętrznego. Ponadto, przy spełnieniu warunku :

$$Cou \approx 1 \qquad (6\text{-}7)$$

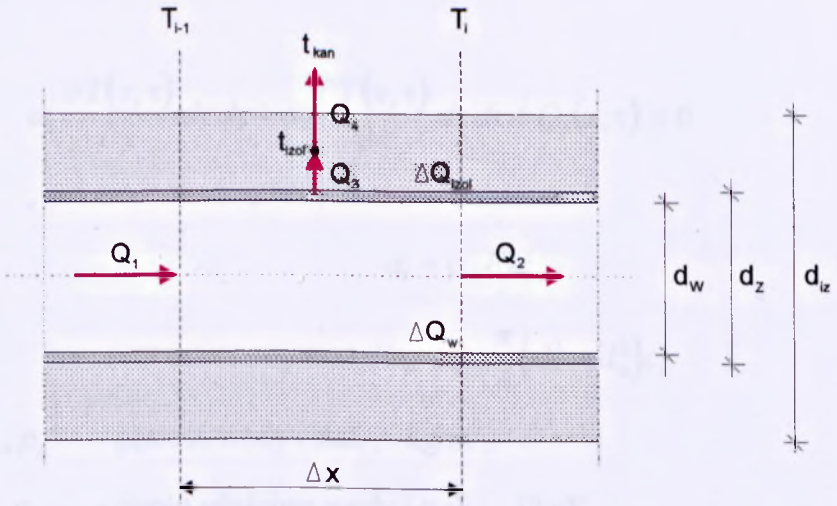
bardzo dobrze aproksymuje procesy rozchodzenia się fali temperaturowej wzdłuż rurociągu. W sieciach ciepłowniczych panuje zmienny przepływ wody, który powoduje, że warunek (6-7) jest trudny do spełnienia. W tym celu opracowano sposób dynamicznego podziału odcinków sieci na elementy bilansowe. Polega on na wyznaczaniu nowego podziału oraz określaniu wielkości temperatury wody w elementach podziałowych w każdej chwili czasowej obliczeń symulacyjnych.

Modelowanie zjawisk transportu energii cieplnej metodą elementów oparte jest na rozwiązaniu równania bilansu energii dla elementów podziałowych rurociągu. Równania bilansowe mają następującą postać (oznaczenia zgodnie z Rys. 6–3):

$$\Delta Q_w + Q_3 + Q_2 - Q_1 = 0 \qquad (6\text{-}8)$$

$$Q_4 + \Delta Q_{iz} - Q_3 = 0 \qquad (6\text{-}9)$$

Równania (6-8) i (6-9) tworzą układ równań liniowych, którego rozwiązaniem jest wartość temperatury wody w *i-tym* przekroju (T_i) oraz wartość temperatury izolacji rury (t_{izol}) w danej chwili czasowej.



Rys. 6–3 Schemat metody elementów

Składniki równania (6-8) można zapisać w następującej formie:

Ilość ciepła dopływającego do elementu:

$$Q_1 = \rho_w F v c_w T(x,\tau) d\tau \ , \quad J \qquad (6\text{-}10)$$

Ilość ciepła odpływającego z elementu:

$$Q_2 = \rho_w F v c_w \left[T(x,\tau) + \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} dx \right] d\tau \ , \quad J \qquad (6\text{-}11)$$

Przyrost ciepła ΔQ_w w elemencie.

W modelu przyjęto, że temperatura ścianki rury jest równa temperaturze wody, ponieważ współczynnik przejmowania ciepła między wodą, a ścianką rury ma dużą wartość czyli opór przejmowania ciepła w tym miejscu jest pomijalnie mały.

$$\Delta Q_w = \left[\rho_w F c_w + \rho_s \frac{\pi}{4}\left(d_z^2 - d_w^2\right)c_s \right] \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} dx d\tau \ , \quad J \qquad (6\text{-}12)$$

Straty ciepła Q_3 są zmienne w czasie i wzdłuż rurociągu:

$$Q_3 = Q_3(x,\tau) \qquad (6\text{-}13)$$

Podstawiając równania (6-10) - (6-13) do równania bilansu energii (6-8) otrzymujemy jego różniczkową postać:

$$a_1 \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} dx\, d\tau + a_2 \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} dx\, d\tau + Q_3(x,\tau) = 0 \qquad (6\text{-}14)$$

gdzie:

$$a_1 = \rho_w F v c_w$$

$$a_2 = \rho_w F c_w + \rho_s \frac{\pi}{4}\left(d_z^2 - d_w^2\right)c_s$$

ρ_w, ρ_s - gęstość wody i stali , kg/m^3,

c_w , c_s - ciepło właściwe wody i stali , J/kgK,

F - pole przekroju wewnętrznego rury , m^2,

V - prędkość przepływu wody , m/s,

d_w , d_z - średnica wewnętrzna i zewnętrzna rury , m.

Wartości pochodnych cząstkowych funkcji temperatury T w równaniu (6-14) przybliża się ilorazami różnicowymi:

$$\left.\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x}\right|_i = \frac{\overline{T}_i - \overline{T}_{i-1}}{\Delta x} \ ; \ \left.\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau}\right|_i = \frac{T_i - \overline{T}_i}{\Delta \tau} \qquad (6\text{-}15)$$

Równanie (6-14) przyjmuje postać:

$$a_1\left(\overline{T}_i - \overline{T}_{i-1}\right)\Delta\tau + a_2\left(T_i - \overline{T}_i\right)\Delta x + Q_3(x,\tau) = 0 \qquad (6\text{-}16)$$

gdzie:

$\overline{T}_i, \overline{T}_{i-1}$ - temperatura wody w przekrojach *i, i-1* w chwili czasowej τ-$\Delta\tau$ (poprzedniej), °C,

T_i - temperatura wody w przekroju *i-tym* w chwili czasowej τ (aktualnej), °C.

Składniki równania (6-9) można zapisać w następujący sposób (oznaczenia zgodne z Rys. 6–3):

Straty ciepła Q_3 strumienia wody przepływającej w rurze:

$$Q_3 = \left(\frac{T_i + T_{i-1}}{2} - t_{izol}\right)\frac{\Delta x\,\Delta\tau}{R_3}, \quad J \qquad (6\text{-}17)$$

Ilość ciepła Q_4 przepływającego do powietrza w kanale:

$$Q_4 = \frac{t_{iz} - t_{kan}}{R_4}\Delta x\,\Delta\tau, \quad J \qquad (6\text{-}18)$$

Przyrost energii cieplnej ΔQ_{izol} w izolacji rury:

$$\Delta Q_{izol} = \rho_{izol} c_{izol}\frac{\pi}{4}\left(d_{iz}^2 - d_z^2\right)\left(t_{izol} - \overline{t}_{izol}\right)\Delta x, \quad J \qquad (6\text{-}19)$$

gdzie:

$$R_3 = \frac{1}{2\pi\lambda_{izol}}\ln\frac{\frac{d_z + d_{iz}}{2}}{d_w}, \quad \frac{mK}{W}$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi\lambda_{izol}}\ln\frac{d_{iz}}{\frac{d_z + d_{iz}}{2}} + \frac{1}{\alpha_{izol}\pi d_{iz}}, \quad \frac{mK}{W}$$

λ_{izol} - współczynnik przewodzenia ciepła przez materiał izolacji, W/mK,

α_{izol} - współczynnik przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni izolacji, W/m^2K,

ρ_{izol} - gęstość materiału izolacji, kg/m^3,

c_{izol} - ciepło właściwe materiału izolacji, J/kgK,

$\bar{t}_{izol}, t_{izol}$ - temperatura izolacji w chwili czasowej τ-$\Delta\tau$ (poprzedniej) i τ (aktualnej), °C.

Podstawiając równania (6-17) - (6-19) do równania bilansu ciepła (6-9) otrzymujemy ostateczną jego formę:

$$\frac{\frac{T_i + T_{i-1}}{2} - t_{izol}}{R_3} + \rho_{izol} c_{izol} \frac{\pi}{4}\left(d_{iz}^2 - d_z^2\right)\left(t_{izol} - \bar{t}_{izol}\right)\frac{1}{\Delta\tau} - \frac{t_{izol} - t_{kan}}{R_4} = 0 \qquad (6\text{-}20)$$

6.2.1 Warunki brzegowe

Przepływ fali temperaturowej w rurze związany jest ze zmianami w czasie wielkości określających warunki brzegowe.

W przedstawionym modelu transportu energii cieplnej warunkami brzegowymi są:

- temperatura wody na początku rury (wpływającej do rury) będąca temperaturą w pierwszym przekroju rury tzn. T_0 (wg. Rys. 6–1)
- strumień masy wody $\dot{m}$ przepływającej w rurze.

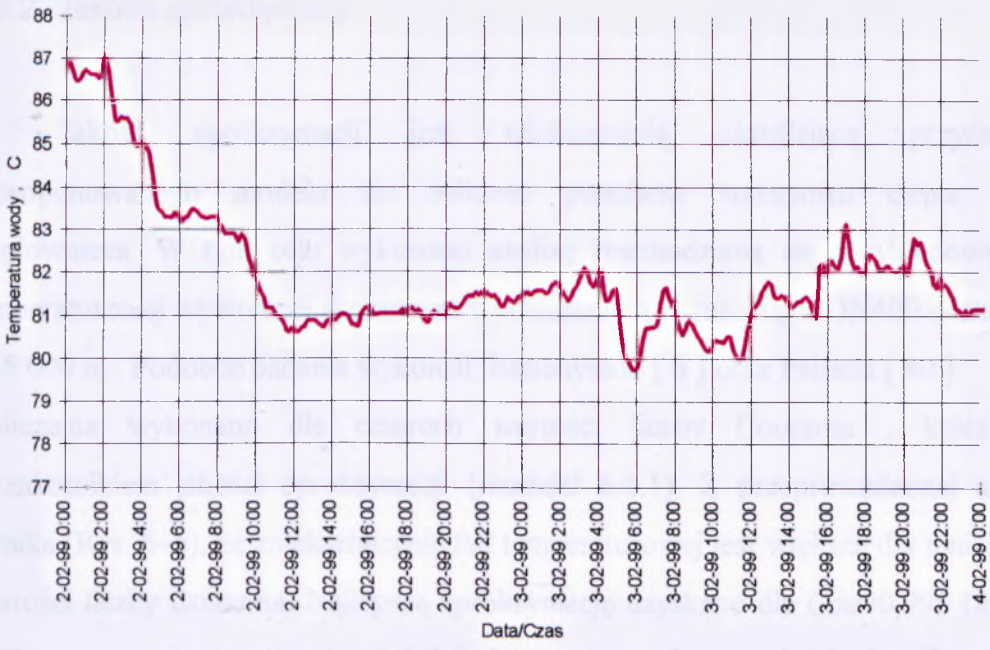
Warunki brzegowe dla *n-tej* chwili czasowej można zapisać jako:

$$T_0^{(n)} = T\left(\tau^{(n)}\right) \qquad (6\text{-}21)$$

oraz

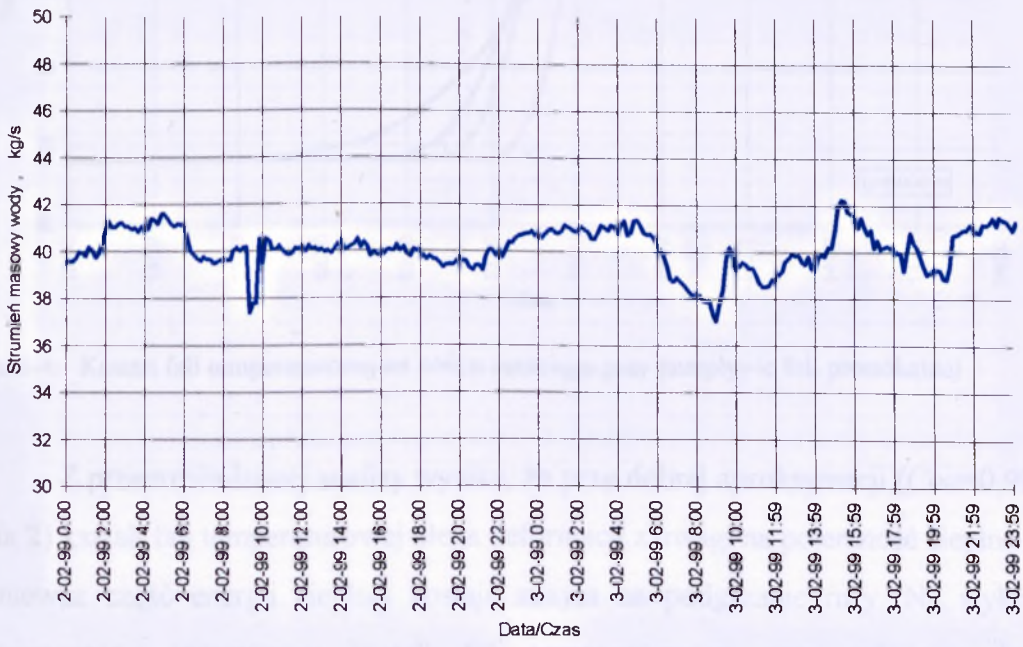
$$\dot{m}^{(n)} = \dot{m}\left(\tau^{(n)}\right) \qquad (6\text{-}22)$$

Zmiany wartości temperatury wody sieciowej wynikają ze zmiennego obciążenia cieplnego kotłów ciepłowniczych oraz chwilowych zmian strat ciepła rurociągów. Wahania temperatury wody w ciągu doby wynoszą kilka stopni, o czasie narastania impulsów wynoszącym kilkadziesiąt minut. Na rysunku Rys. 6–4 przedstawiono wykres zmienności temperatury wody sieciowej zarejestrowany na terenie Politechniki Warszawskiej w dniach 2-II-1999 i 3-II-1999 r.



Rys. 6–4 Wykres zmienności temperatury wody sieciowej

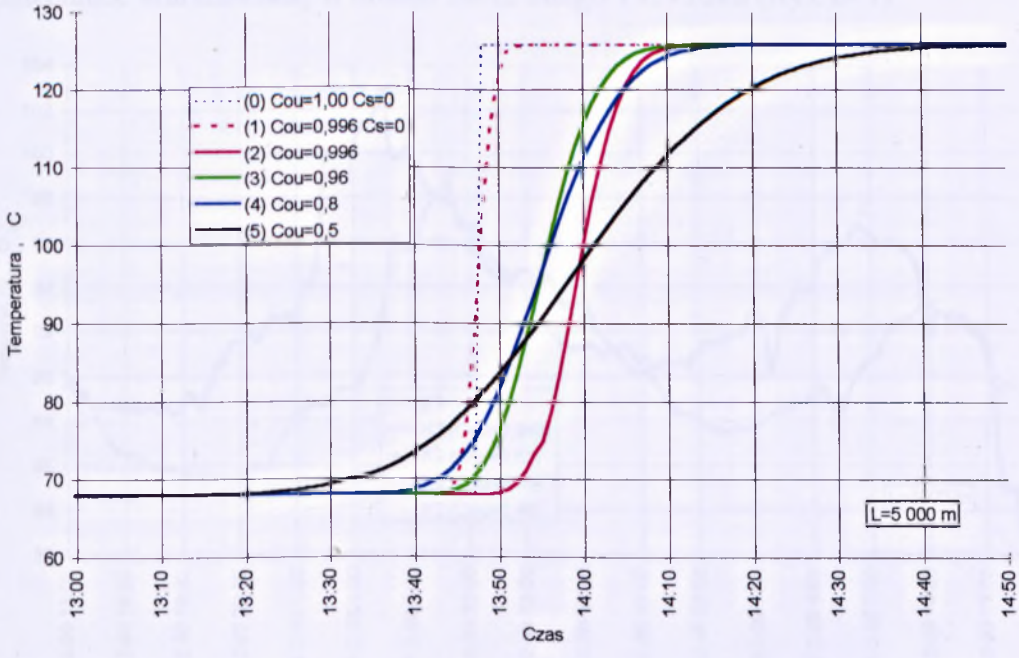
Dobowe zmiany przepływu wody sieciowej związane są ze zmiennością zapotrzebowania na moc cieplną węzłów ciepłowniczych wynikającą z chwilowych potrzeb cieplnych budynku na cele centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej oraz wahań temperatury wody sieciowej dopływającej do węzłów. Jak wynika z danych zarejestrowanych na Politechnice Warszawskiej (Rys. 6–5), zmiany wartości przepływu wody w ciągu doby wynoszą około 10 %.



Rys. 6–5 Wykres zmienności strumienia masowego wody sieciowej

6.2.2 Jakość aproksymacji

Jakość aproksymacji jest właściwością określającą przydatność zaproponowanego modelu do obliczeń procesów transportu ciepła siecią ciepłowniczą. W tym celu wykonano analizę rozchodzenia się przykładowej fali temperaturowej wywołanej skokowym wymuszeniem w rurociągu DN400 o długości L=5 000 m . Podobne badania wykonali: Benonysson [6] oraz Palsson [80].
Obliczenia wykonano dla czterech wartości liczby Couranta , która jest wyznacznikiem jakości aproksymacji (rozdział 6.1.1). Z przeprowadzonej analizy wynika (Rys. 6–6), że zniekształcenie fali temperaturowej jest większe dla mniejszych wartości liczby Couranta. Najlepszą aproksymację uzyskano dla *Cou*=0,998 (linia 2) czyli przy spełnieniu warunku (6-7). Dla mniejszych wartości liczby *Cou* jakość aproksymacji gwałtownie maleje. Przy *Cou*=0,5 (linia 5) widoczne jest duże zniekształcenie czoła prostokątnej fali temperaturowej.



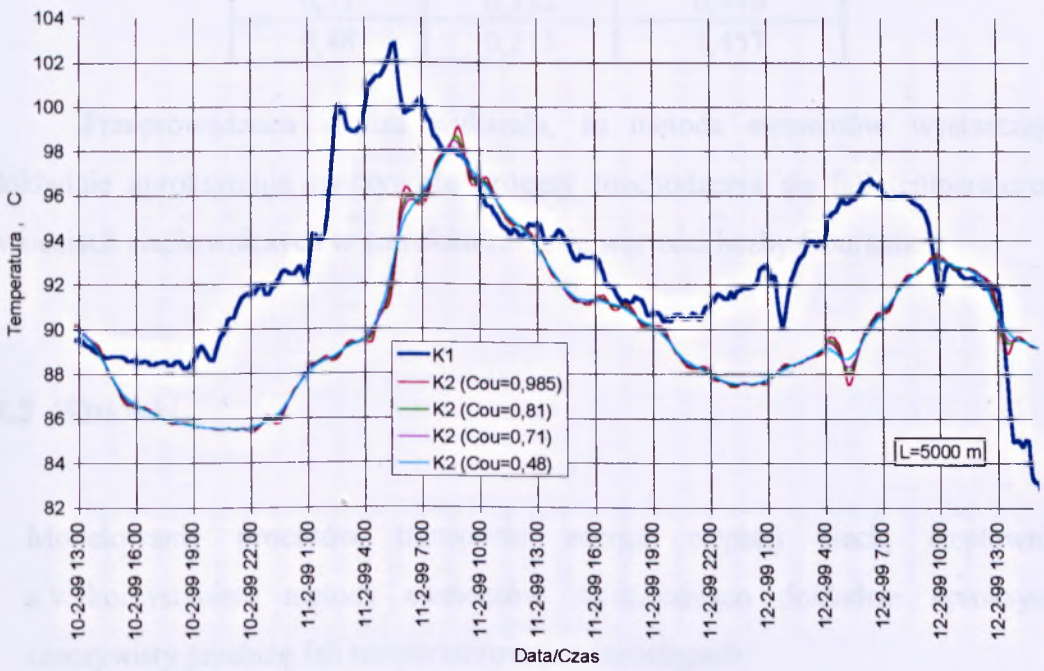
Rys. 6–6 Kształt fali temperaturowej na końcu rurociągu przy przepływie fali prostokątnej

Z przeprowadzonej analizy wynika, że przy dobrej aproksymacji (*Cou*=0,998 - linia 2) kształt fali temperaturowej ulega deformacji z uwagi na pojemność cieplną rur, ponieważ część energii cieplnej zostaje zużyta na podgrzanie rury. Na wykresie zamieszczono teoretyczny kształt fali temperaturowej przy założeniu braku pojemności cieplnej materiału, z którego wykonano rury (c_s=0). Przy *Cou*=1,00

widoczny jest brak zniekształcenia fali (linia 0) natomiast przy *Cou*=0,998 zniekształcenie jest niewielkie (linia 1). Przesunięcie linii 0 i 1 w stosunku do pozostałych linii przedstawiających odpowiedzi rury na skok temperatury, wynika z pominięcia nagrzewania ścianek rurociągu przy przepływie fali temperaturowej. Powyższe badania potwierdzają opinię Benonyssona i Palssona, że metoda elementów niewystarczająco dokładnie aproksymuje przebieg prostokątnej fali temperaturowej w rurociągach.

Autorzy badań (Benonysson i Palsson), nie wzięli po uwagę faktu, że w sieciach ciepłowniczych nie występują tak gwałtowne wahania temperatury. Z uwagi na bardzo dużą bezwładność kotłów ciepłowniczych oraz obiegów wodnych źródeł ciepła, zmiany temperatury wody sieciowej o kilka stopni trwają kilkanaście minut.

W pracy wykonano badania symulacyjne dokładności metody elementów przy rzeczywistych zmianach temperatury wody sieciowej zarejestrowanych na Politechnice Warszawskiej w dniach 10-12 lutego 1999 roku (Rys. 6–7).



Rys. 6–7 Kształt fali temperaturowej na początku i na końcu rurociągu przy przepływie rzeczywistej fali temperaturowej

Obliczenia symulacyjne wykonano dla czterech wartości liczby *Cou* (0,985; 0,81; 0,71; 0,48) dla rurociągu DN400 o długości L=5 000 m. Przy rzeczywistych zmianach temperatury wody sieciowej, linie odpowiedzi temperaturowych dla analizowanych

wariantów pokrywają się. Rozbieżności przebiegu linii pojawiają się jedyne przy nagłych zmianach temperatury wody. Wyniki obliczeń wariantowych odniesiono do wyników obliczeń najdokładniejszych czyli dla Cou=0,985. W tabeli (Tab. 6-1) zestawiono wartości błędów aproksymacji fali temperaturowej w zależności od liczby Couranta. W badanym zakresie zmienności liczby Couranta, otrzymano bardzo dobre wyniki obliczeń. Wartości średnie błędów nie przekraczają 0,3 % dla dwudniowego okresu symulacji przebiegu zmienności temperatury wody sieciowej. Największe błędy występowały przy szybkich zmianach temperatury wody, lecz nie przekraczały wartości 1,5 %.

Tab. 6-1 Zestawienie błędów aproksymacji fali temperaturowej w stosunku do wyników obliczeń dla Cou=0,985

Liczba Couranta	Błąd	
	Średni	Maksymalny
	%	%
0,81	0,091	0,651
0,71	0,132	0,916
0,48	0,213	1,457

Przeprowadzona analiza wykazała, że metoda elementów wystarczająco dokładnie aproksymuje rzeczywiste procesy rozchodzenia się fali temperaturowej w sieciach ciepłowniczych w szerokim zakresie wartości liczby Couranta.

6.3 Wnioski

1. Modelowanie procesów transportu energii cieplnej siecią ciepłowniczą z wykorzystaniem metody elementów wystarczająco dokładnie aproksymuje rzeczywisty przebieg fali temperaturowej w rurociągach.
2. Dokładność metody elementów maleje przy gwałtownych zmianach temperatury wody sieciowej.
3. Wskaźnikiem jakości aproksymacji przebiegu fali temperaturowej w rurociągu jest wartość liczby Couranta. Najlepsze wyniki otrzymywane są dla liczby Cou=1.

7. Bazy danych sieci ciepłowniczych

Obliczenia symulacyjne procesów cieplno-hydraulicznych zachodzących w sieciach ciepłowniczych zostały wykonane w pracy podstawie baz danych istniejących, kilkunastu systemów ciepłowniczych w Polsce. Bazy danych powstały w latach 1994-1998 w ramach wykonywanych przez autora projektów regulacji hydraulicznej sieci ciepłowniczej oraz wdrażania programu komputerowego graficzno-numerycznej bazy danych NetzCAD. W pracy wykorzystano dane dla 12 systemów ciepłowniczych:

- SEC Szczecin,
- RadPEC Radom,
- MPEC Olsztym,
- MPEC Stargard Szczeciński,
- PEC Świdnica,
- PEC Wyszków,
- ZEC Staszów,
- PEC Starachowice-Star,
- PEC Starachowice,
- PEC Racibórz,
- MPEC Przemyśl,
- OPEC Gdańsk - Osiedle Piastowska.

Jest to zestaw baz danych dla systemów o różnej wielkości, począwszy od 6MW kończąc na 672MW.

Bazy danych powstały przy użyciu specjalistycznego programu NetzCAD [66], [67], [105], [106], którego współtwórcą jest autor pracy. Baza danych systemu ciepłowniczego składa się z dwóch części:

1. bazy graficznej, w formie szczegółowej mapy terenu z naniesionym przebiegiem trasy sieci ciepłowniczej, lokalizacją węzłów cieplnych, komór itp.
2. bazy numerycznej zawierającej niezbędne informacje dla przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych. Informacje zawarte w bazie dotyczą:
   - odcinków sieci,
   - elementów sieci ciepłowniczej tj.: armatura, kompensatory i innych,

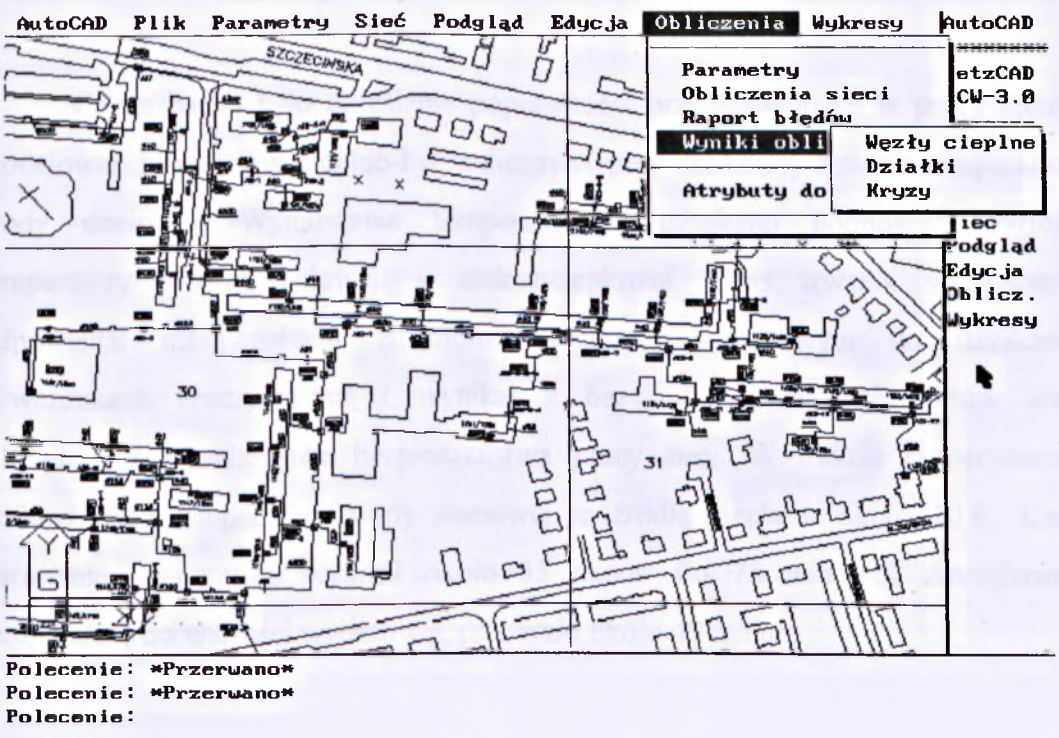
- układów technologicznych w węzłach cieplnych,
- powiązań strukturalnych odcinków sieci.

Program NetzCAD jest aplikacją znanego programu graficznego AutoCAD, stąd graficzna baza danych (mapa sieci) przechowywana jest w komputerze w plikach w formacie charakterystycznym dla AutoCAD-a czyli DWG.

Baza danych posiada format baz danych typu dBase i składa się z pięciu tablic:

WEZLY.DBF	- informacje o punktach węzłowych sieci,
DZIALKI.DBF	- dane o odcinkach sieci ciepłowniczej,
ELEMENTY.DBF	- dane o elementach sieci ciepłowniczej tj. zasuwy, kompensatory itp.,
WEZLYC.DBF	- dane o węzłach cieplnych,
ZRODLA.DBF	- dane o źródłach ciepła.

Elementy graficznej bazy danych są powiązane z rekordami numerycznej bazy danych tworząc jednolitą, graficzno-numeryczną bazę danych zarządzaną przez aplikację NetzCAD. Takie połączenia znacznie usprawnia proces wprowadzania danych do bazy. Na rysunku Rys. 7–1 przedstawiono przykładowy widok ekranu komputera z działającym programem NetzCAD.



Rys. 7–1 Widok ekranu programu NetzCAD

8. Weryfikacja modeli procesów cieplno-hydraulicznych wynikami pomiarów poligonowych

Przedstawione w pracy modele procesów cieplno-hydraulicznych zachodzących w systemach sieci ciepłowniczych zostały zweryfikowane pomiarami przebiegu fali temperaturowej zarejestrowanymi w rzeczywistych rurociągach. Wykonano następujące pomiary:

1. Pomiar przepływu fali temperaturowej w rurociągu przy wymuszonym skoku temperatury w źródle ciepła,
2. Pomiar przepływu fali temperaturowej w warunkach rzeczywistych pracy systemu ciepłowniczego.

W rozdziale opisano stanowiska pomiarowe oraz przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań poligonowych.

8.1 Badania jakości modelowania procesów cieplno-hydraulicznych przy skokowym wymuszeniu temperatury wody sieciowej

Celem badań było określenie poprawności przedstawionych w pracy metod modelowania procesów cieplno-hydraulicznych przy skokowej zmianie temperatury wody sieciowej. Wymuszenie temperaturowe uzyskano podnosząc wartość temperatury wody sieciowej w elektrociepłowni. Czas trwania wymuszenia odpowiadał maksymalnym zmianom temperatury, możliwym do uzyskania w warunkach rzeczywistych i wynikał z bezwładności cieplnej kotłów oraz z konieczności zachowania bezpieczeństwa pracy sieci. W trakcie eksperymentu podwyższono temperaturę wody sieciowej w źródle ciepła o około 10 K. Czas narastania temperatury wynosił około 35 minut. Po 75 minutach zmniejszono temperaturę do wartości wyjściowej, co trwało około 40 minut.

8.1.1 Aparatura pomiarowa

Pomiar temperatury wody wykonano dwoma termometrami elektronicznymi: EMT-80 firmy Czaki Thermo-Product oraz TESTO 452 firmy TESTO.
Dane techniczne przyrządów pomiarowych:

Czaki EMT-80

Zakres pomiaru:	-50 °C - +200 °C,
Rozdzielczość:	0,1 °C,
Dokładność pomiaru:	+/- 0,15% zakresu pomiarowego,
Dopuszczalna temperatura otoczeni:	+5°C - +40°C,
Kompensacja nieliniowości:	cały zakres pomiarowy,
Czujnik	NiCr-NiAl,
Klasa termoelementu:	1,
Stała czasowa:	1 sekunda.

TESTO 452

Zakres pomiaru:	-200 °C - +1100 °C,
Rozdzielczość:	0,1 °C,
Dokładność pomiaru:	wg. DIN IEC 584,
Kompensacja nieliniowości:	cały zakres pomiarowy,
Czujnik:	Ni Cr Ni,
Klasa termoelementu	1.

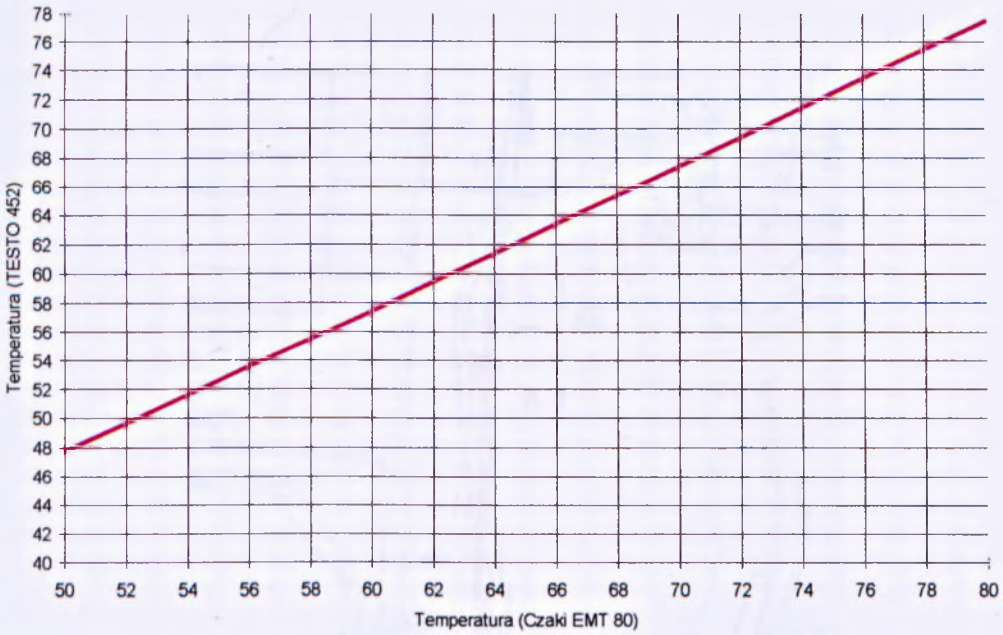
Dla zwiększenia dokładności pomiarów wykonano kalibrację wskazań termometrów w zakresie wykonywanych pomiarów temperatury wody sieciowej tzn.: 50°C - 80°C. Kalibracja została przeprowadzona przy użyciu kalorymetru przyjmując za wzorcowe wskazania termometru TESTO 452. Uzyskaną krzywą kalibracji wskazań przyrządów przedstawiono na wykresie Rys. 8–1. Opisuje ją następujące równanie aproksymacyjne:

$$t_{TESTO} = 2{,}29656557 + 0{,}85848485\, t_{Czaki} + 0{,}001010101\, t_{Czaki}^2 , \quad °C \qquad (8\text{-}1)$$

gdzie:

t_{TESTO} - wskazania termometru firmy TESTO , °C,

t_{Czaki} - wskazania termometru firmy Czaki , °C.



Rys. 8–1 Linia kalibracji wskazań termometrów

Pomiar przepływu wody sieciowej wykonano przy pomocy bezinwazyjnego przepływomierza ultradźwiękowego typu SYSTEM 990E Uniflow firmy Controlotron (USA). Zestaw pomiarowy składa się z następujących elementów:

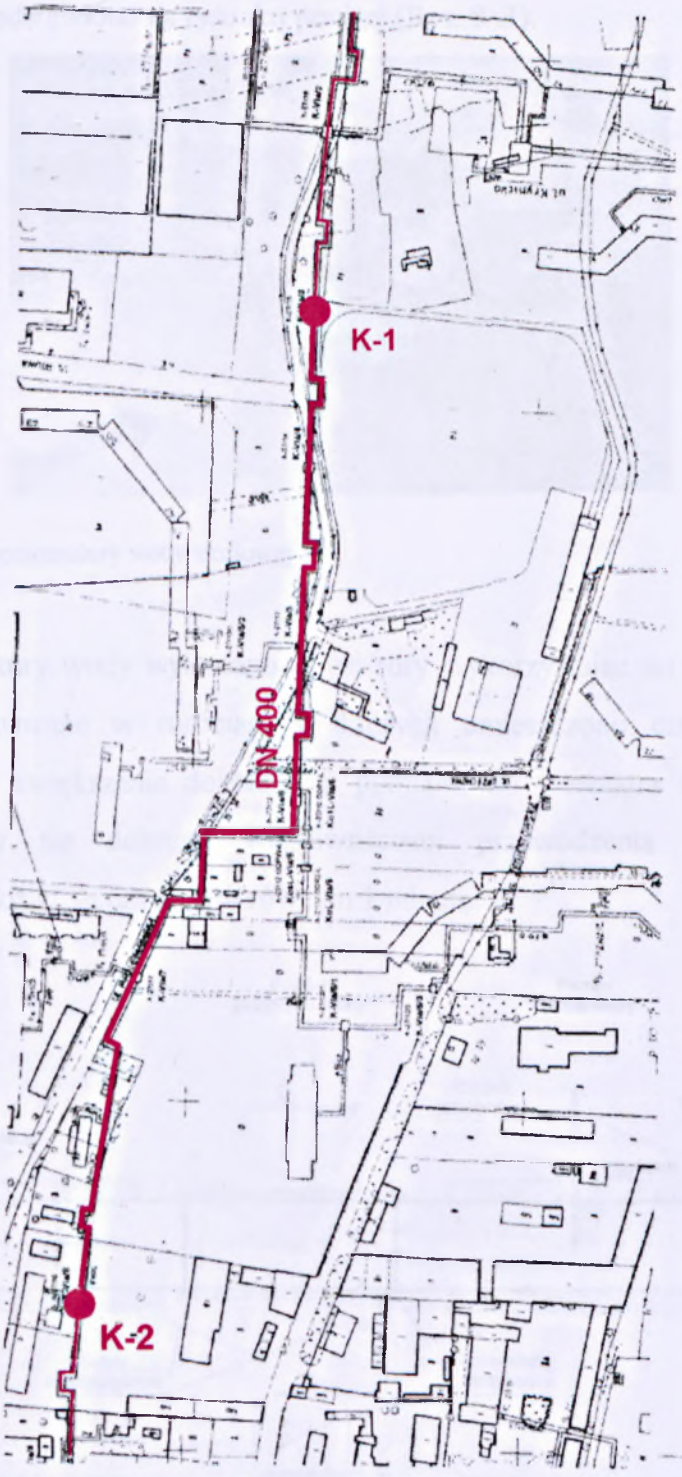
- komputer pomiarowy,
- sondy ultradźwiękowe,
- prowadnice dystansowe,
- łańcuszki mocujące prowadnice na rurze,
- elementy pomocnicze tj.: papier ścierny, odrdzewiacz, silicon, przewody połączeniowe i inne.

Dane techniczne przepływomierza:

Dokładność pomiaru :	± 2 - 3% wartości mierzonej,
Zakres pomiaru prędkości:	± 12 m/s,
Krok próbkowania:	0,1 - 60 sekund,
Zakres pomiarowy wielkości rurociągu:	152,4 - 609,6 mm.

8.1.2 Opis stanowisk badawczych

Badania fizykalne wykonano na rzeczywistym obiekcie systemu ciepłowniczego we Wrocławiu w dniu 24.06.1998 r. w godzinach 9.05 - 16.15.



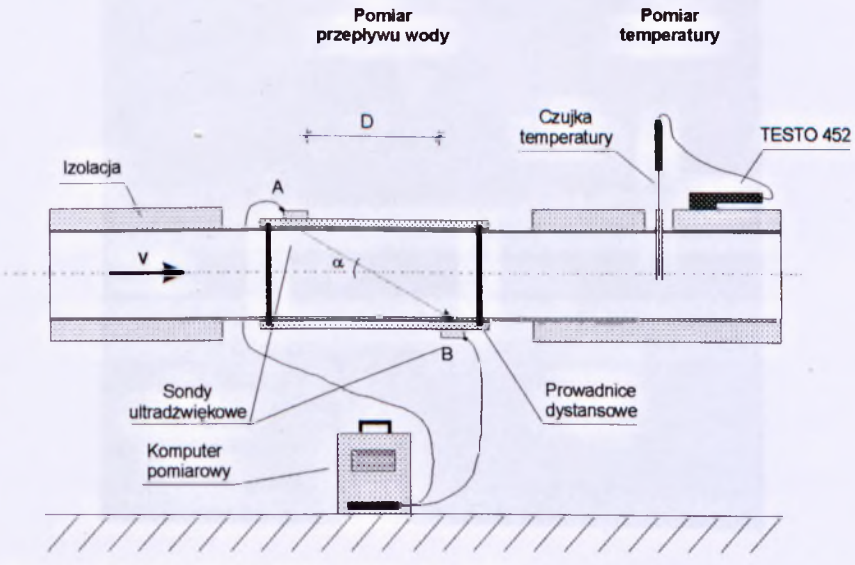
Rys. 8–2 Miejsce pomiarów temperatury wody sieciowej

Do pomiaru wybrano odcinek sieci DN400 o długości L=710 metrów zbudowany w tradycyjnej technologii kanałowej. Pomiary temperatury wody sieciowej wykonywano na rurociągu zasilającym, w komorach : K1 i K2 (Rys. 8–2). W komorze K1 wykonano pomiar temperatury oraz strumienia masy przepływającej wody, a w komorze K2 - pomiar temperatury. Sposób wykonywania pomiaru temperatury przedstawiono na rysunku poniżej (Rys. 8–3).



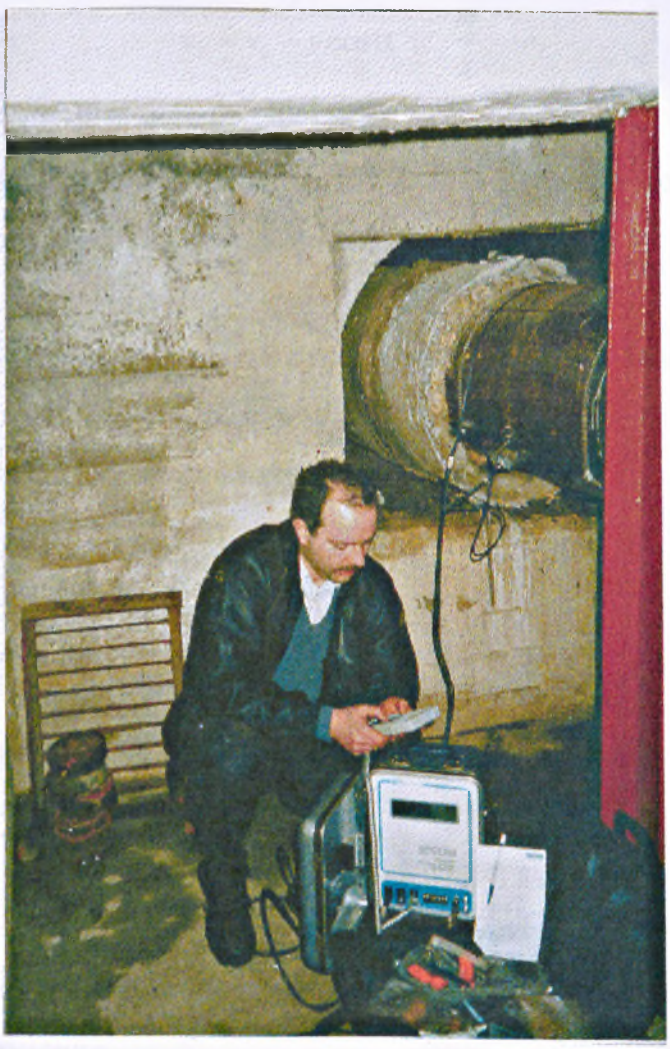
Rys. 8–3 Pomiar temperatury wody sieciowej

Pomiar temperatury wody wykonano w osi rury wykorzystując do tego celu tuleje pomiarowe wspawane w rurociąg, w których umieszczono czujki pomiarowe (Rys. 8–4). Dla zwiększenia dokładności pomiaru, do wewnątrz tulei wlano olej charakteryzujący się dobrymi właściwościami przewodzenia ciepła. Pomiar wykonywano z krokiem czasowym równym 1 minutę.



Rys. 8–4 Schemat stanowiska pomiarowego (komora K1)

Pomiar wielkości strumienia masy wody sieciowej odbywał się w komorze K1 (Rys. 8–2), na rurociągu zasilającym o średnicy nominalnej DN400. Pomiaru dokonano metodą bezinwazyjną przy użyciu przepływomierza ultradźwiękowego Uniflow 990E (dane techniczne opisano w rozdziale 8.1.1). Sposób pomiaru przedstawiono na rysunku Rys. 8–4. Na odizolowanym odcinku rury montowane są dwie sądy ultradźwiękowe: nadawcza (A) i odbiorcza (B). Sądy oddalone są od siebie na odległość D zależną od wielkości średnicy zewnętrznej rury. Odległość D obliczana jest przez komputer pomiarowy na podstawie wprowadzonych danych o rurociągu (średnica zewnętrzna rury, grubość ścianki, materiał z którego wykonana jest rura itd.). Sądy pomiarowe połączone są z komputerem przewodami koncentrycznymi. Na rysunku (Rys. 8–5) przedstawiono sposób wykonywania pomiaru w warunkach rzeczywistych.



Rys. 8–5 Pomiar wielkości przepływu wody sieciowej przepływomierzem ultradźwiękowym

Przed przystąpieniem do pomiarów, przyrząd musi być skalibrowany. Kalibracja wykonywana jest dwuetapowo według wskazówek podawanych przez komputer pomiarowy:

1. Pomiar prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w strumieniu przepływającej wody wysyłanej z nadajnika w kierunku od A do B (Rys. 8–4):

$$v_1 = v_0 + v\cos\alpha \ , \ \frac{m}{s}$$

2. Pomiar prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w strumieniu przepływającej wody po zamianie miejscami sond pomiarowych. Przepływ fali ultradźwiękowej odbywa się w kierunku od B do A.

$$v_2 = v_0 - v\cos\alpha \ , \ \frac{m}{s}$$

gdzie:

v_0 - prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w wodzie , m/s,

v - prędkość przepływającej wody w rurze , m/s.

Znając odległość między sądami: nadawczą i odbiorczą, oraz czas przepływu fali ultradźwiękowej między sądami, można określić prędkości v_1 i v_2.

Różnica między tymi prędkościami wynosi:

$$v_1 - v_2 = 2v\cos\alpha \ , \ \frac{m}{s}$$

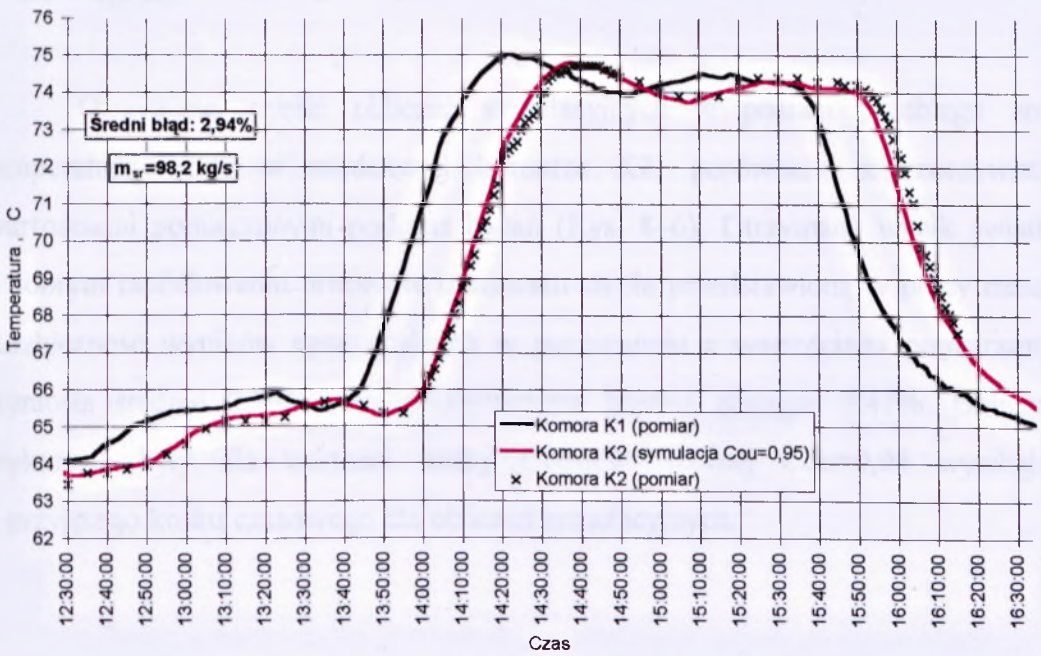
Różnica v_1-v_2 jest proporcjonalna do v a więc i do wielkości strumienia masy przepływającej wody.

Impulsy ultradźwiękowe docierające do sądy odbiorczej są przekształcane na sygnały elektryczne, które doprowadzane są przewodami do komputera pomiarowego. Zaletą tej metody pomiaru jest niezależność wskazań przyrządu od takich parametrów wody, jak gęstość i temperatura.

8.1.3 Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów parametrów wody sieciowej rejestrowane były w komorach: K1 i K2 (Rys. 8–2) w odstępach czasowych od 1 minuty do 5 minut w zależności od szybkości zmian temperatury. W czasie wzrostu temperatury wody okres pomiędzy kolejnymi odczytami zmniejszano, natomiast wydłużano go w chwilach stabilizacji mierzonych wielkości. Pomierzone wartości parametrów wody zestawiono w tabelach: Tab. 12-3, Tab. 12-4 i Tab. 12-5 znajdujących się w rozdziale 12.3.
Na poniższym rysunku (Rys. 8–6) przedstawiono wyniki pomiarów w komorach K1 (linia czarna) i K2 (czarne punkty). W wyniku strat ciepła spadek temperatury wody sieciowej na badanym odcinku rurociągu wyniósł ΔT = 0,2 K czyli blisko granicy błędu przyrządów pomiarowych. Z tego powodu pomiar ten nie może być wykorzystany do weryfikacji modelu strat ciepła.

Przeprowadzone pomiary wykazały powtarzalność kształtu impulsu zarejestrowanego w obu punktach pomiarowych. Otrzymane wyniki badań mogą więc być użyte do weryfikacji modelu transportu energii cieplnej siecią rurociągów z uwzględnieniem strat ciepła.



Rys. 8–6 Porównanie wyników obliczeń symulacyjnych z wartościami pomiarowymi.

Weryfikację modeli numerycznych wykonano w następujący sposób:

1. Wykonano model numeryczny odcinka sieci odpowiadający obiektowi badań fizykalnych. Wprowadzono do programu komputerowego dane o rurociągu tj.: długości poszczególnych jego fragmentów, średnice, informacje o właściwościach izolacji termicznej, właściwości kanałów ciepłowniczych oraz gruntu.
2. Przyjęto przepływ wody sieciowej równy średniej wartości strumienia masy wody zmierzonego w czasie wykonywanych pomiarów czyli $\dot{m}$=98,2 kg/s.
3. Zmierzone wartości temperatury wody w komorze K1 wyznaczały zmienność warunku brzegowego dla badanego modelu transportu ciepła.
4. Wynikiem badań symulacyjnych jest przebieg zmian temperatury wody na końcu modelowanego odcinka sieci, odpowiadającego położeniu komory K2. Obliczenia wykonano z krokiem czasowym równym $\Delta\tau$=60 sekund.
5. W wyniku braku technicznych możliwości dokładnego pomiaru rzeczywistych wartości współczynników przewodności cieplnej gruntu oraz izolacji rurociągu, do obliczeń przyjęto takie wartości tych współczynników, aby zapewnić spadek temperatury wody w modelowanym odcinku sieci równy pomierzonemu, czyli ΔT = 0,2 K.

Otrzymane wyniki obliczeń symulacyjnych w postaci przebiegu zmian temperatury wody w modelowej komorze K2, porównano z rzeczywistymi wartościami pomierzonymi podczas badań (Rys. 8–6). Otrzymany wynik świadczy o dobrym modelowaniu procesów transportu ciepła przedstawioną w pracy metodą. Rozbieżność wyników symulacyjnych w porównaniu z wartościami pomierzonymi wyniosła średnio 2,94% przy maksymalnym błędzie równym 7,47%. Obliczenia wykonane były dla wartości liczby Couranta równej Cou=0,95 wynikającej z przyjętego kroku czasowego dla obliczeń symulacyjnych.

8.2 *Badania poligonowe przepływu fali temperaturowej w rurociągach sieci ciepłowniczej w rzeczywistych warunkach pracy systemu*

Drugim sposobem weryfikacji zaproponowanych w pracy modeli procesów cieplno-hydraulicznych jest porównanie wyników symulacji komputerowych z pomiarami przepływu fali temperaturowej w rurociągach w rzeczywistych warunkach pracy systemu ciepłowniczego. W tym celu wykonano pomiary parametrów wody sieciowej (temperatura, przepływ) w trakcie pracy systemu ciepłowniczego bez wprowadzania dodatkowych wymuszeń temperatury i przepływu. Obiektem badań fizykalnych była jedna sieć ciepłownicza znajdująca się na terenie głównym Politechniki Warszawskiej. Pomiary wykonywano w miesiącu lutym 1999 roku.

8.2.1 Opis obiektu badań

Badania poligonowe wykonano na jednej z gałęzi sieci ciepłowniczej znajdujących się na terenie głównym Politechniki Warszawskiej. Teren główny Politechniki Warszawskiej stanowi wydzielony zespół obiektów dydaktycznych oraz mieszkalnych. Ciepło dostarczane jest do budynków z miejskiej sieci ciepłowniczej poprzez centralny węzeł rozdzielczy, od którego prowadzi sieć lokalna doprowadzająca energię cieplną do poszczególnych budynków.

Do pomiarów wytypowano odcinek sieci lokalnej między punktem pomiaru (Punkt 1) początkowych parametrów wody zasilającej teren Politechniki, a węzłem ciepłowniczym zlokalizowanym w budynku Aerodynamiki (Punkt 5). Pomiar wykonano także w punktach pośrednich tj. w gmachu Inżynierii Środowiska (Punkt 3') oraz w budynku mieszkalnym przy ulicy Nowowiejskiej 22 (Punkt 4'). Schemat sieci ciepłowniczej na terenie Politechniki wraz z zaznaczoną gałęzią pomiarową przedstawiono na rysunku Rys. 8–7.

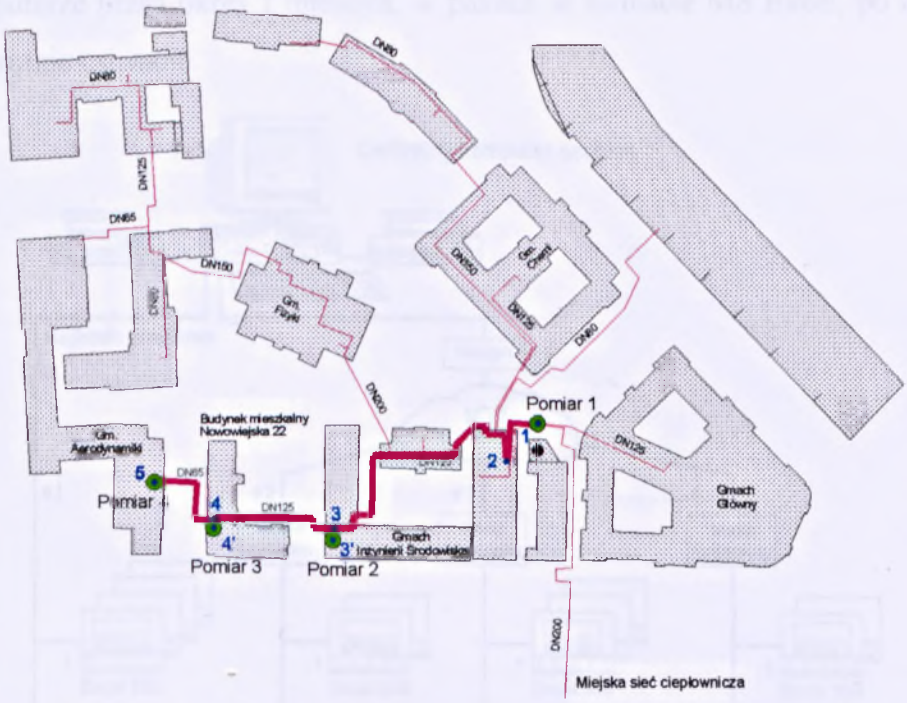
Wybrany do pomiarów odcinek sieci posiada długość ok. 590 metrów i zbudowany jest w technologii kanałowej. Rurociąg zbudowany jest z rur o średnicy

nominalnej : DN65, DN125 i DN200. Szczegółowa struktura długości kolejnych fragmentów gałęzi pomiarowej przedstawiono w tabeli Tab. 8-1.

Tab. 8-1 Struktura rurociągu pomiarowego

Odcinek sieci	Średnica nominalna	Długość m
1-2	200	70,0
2-3	125	295,3
3-4	125	132,8
4-5	65	91,8

Odcinki 3-3' oraz 4-4' są przyłączami do budynków: Inżynierii Środowiska oraz mieszkalnego Nowowiejska 22 o długości 2-3 metry. Sieć ciepłownicza przechodzi bezpośrednio przez pomieszczenia wymienionych węzłów ciepłowniczych (Rys. 8–7).



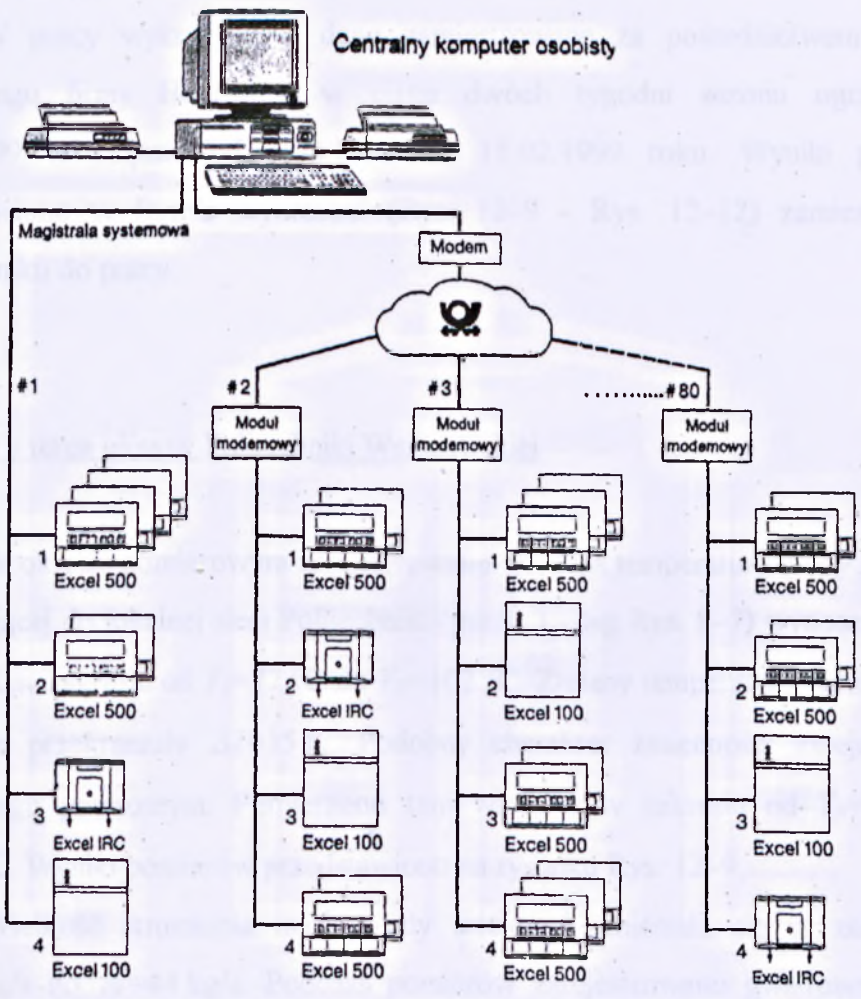
Rys. 8–7 Schemat sieci ciepłowniczej na terenie głównym Politechniki Warszawskiej

8.2.2 System rejestracji parametrów wody sieciowej

Węzły cieplne w budynkach znajdujących się na terenie głównym Politechniki Warszawskiej zostały zmodernizowane w ostatnich latach przy udziale firm: Danfoss i Honeywell. Oprócz przebudowy układów technologicznych, węzły wyposażone

zostały dodatkowo w aparaturę kontrolno-pomiarową wchodzącą w skład centralnego systemu monitoringu i rejestracji parametrów wody sieciowej oraz pracy układów automatycznej regulacji. Urządzenia kontrolno-pomiarowe przesyłają sygnały do komputera centralnego wyposażonego w specjalistyczny program zarządzający pracą regulatorów oraz rejestrujący parametry pracy systemu ciepłowniczego. Sterowanie armaturą regulacyjną odbywa się przy pomocy sterowników swobodnie programowalnych typu Excel połączonych siecią przewodów z komputerem centralnym (Rys. 8–8). Z poziomu operatora komputera istnieje zatem możliwość dokonywania zmian parametrów pracy sterowników.

Parametry pracy węzłów ciepłowniczych przesyłane są do komputera centralnego co 1 minutę a następnie wartości pomierzone podlegają uśrednieniu w czasie zdefiniowanym przez użytkownika systemu. Dane przechowywane są w komputerze przez okres 1 miesiąca, w plikach w formacie MS Excel, po czym są niepowrotnie usuwane.



Rys. 8–8 Schemat ideowy systemu zbierania danych firmy Honeywell

8.2.3 Wyniki pomiarów

Pomiary parametrów wody sieciowej wykonano w czterech miejscach na wytypowanym odcinku pomiarowym (Rys. 8–7):

- pomiar 1 : parametry wody zasilającej w ciepło budynki na terenie głównym,
- pomiar 2 : gmach Inżynierii Środowiska,
- pomiar 3 : budynek mieszkalny przy ulicy Nowowiejskiej 22,
- pomiar 4 : gmach Aerodynamiki.

W każdym punkcie pomiarowym rejestrowano trzy parametry wody oraz wartości uśrednione co 10 minut zapisywane były na dysk. Są to:

- temperatura wody zasilającej,
- temperatura wody powrotnej,
- przepływ wody sieciowej.

W pracy wykorzystano dane zarejestrowane za pośrednictwem systemu monitoringu firmy Honeywell w ciągu dwóch tygodni sezonu ogrzewczego 1998/1999 w okresie od 1.02.1999 do 15.02.1999 roku. Wyniki pomiarów przedstawiono w formie wykresów (Rys. 12–9 - Rys. 12–12) zamieszczonych w załączniku do pracy.

Pomiar 1 - teren główny Politechniki Warszawskiej

W okresie pomiarowym zarejestrowano wahania temperatury wody zasilającej dopływającej do lokalnej sieci Politechniki (punkt 1 - wg Rys. 8–7) wynoszące około ΔT=25 K w zakresie od T_Z=77 °C do T_Z=102 °C. Zmiany temperatury wody w ciągu doby nie przekraczały ΔT=15 K. Podobny charakter zmienności zarejestrowano w rurociągu powrotnym. Pomierzono tam wartości w zakresie od T_P=51 °C do T_P=67 °C. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku Rys. 12–9.

Wielkość strumienia masy wody sieciowej zmieniała się w zakresie od $\dot{m}$=35 kg/s do $\dot{m}$=44 kg/s. Podczas pomiarów zarejestrowano gwałtowny spadek przepływu w dniu 6.02.1999 w godzinach 1:00 - 5:00 (Rys. 12–9). Przerwa

w dostawie energii cieplnej jest przyczyną obniżenia temperatury wody sieciowej wynikającej z wielkości aktualnych strat ciepła. Jest to szczególny przypadek stanu awarii systemu ciepłowniczego.

Pomiar 2 - gmach Inżynierii Środowiska

Drugim miejscem pomiarów parametrów wody sieciowej był węzeł cieplny znajdujący się w gmachu Inżynierii Środowiska (punkt 3' - wg Rys. 8–7).

Zakres zmienności zarejestrowanych parametrów wody:

- temperatura wody zasilającej od T_Z=76 °C do T_Z=101 °C (z pominięciem okresu awarii w dniu 6.02.1999r),
- spadek temperatury wody na odcinku sieci od punktu 1 do 3' ΔT=1 K,
- temperatura wody powracającej z węzła od T_P=39 °C do T_P=58 °C,
- przepływ wody sieciowej od $\dot{m}$=2,2 kg/s do $\dot{m}$=6 kg/s (z pominięciem okresu awarii).

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku Rys. 12–10.

Pomiar 3 - budynek mieszkalny Nowowiejska 22

Trzecim miejscem pomiarów parametrów wody sieciowej był węzeł cieplny zlokalizowany w budynku mieszkalnym przy ulicy Nowowiejskiej 22 (punkt 4' - wg Rys. 8–7).

Zakres zmienności zarejestrowanych parametrów wody:

- temperatura wody zasilającej od T_Z=76 °C do T_Z=101 °C (z pominięciem okresu awarii w dniu 6.02.1999r),
- spadek temperatury wody na odcinku sieci od punktu 1 do 4' ΔT=1,2 K,
- temperatura wody powracającej z węzła od T_P=37 °C do T_P=59 °C,
- przepływ wody sieciowej od $\dot{m}$=0,5 kg/s do $\dot{m}$=1,5 kg/s (z pominięciem okresu awarii).

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku Rys. 12–11.

Pomiar 4 - gmach Aerodynamiki

Czwartym miejscem pomiarów parametrów wody sieciowej był węzeł cieplny znajdujący się w gmachu Aerodynamiki (punkt 5' - wg Rys. 8–7).

Zakres zmienności zarejestrowanych parametrów wody:

- temperatura wody zasilającej od T_Z=75,5 °C do T_Z=100,5 °C (z pominięciem okresu awarii w dniu 6.02.1999r),
- spadek temperatury wody na odcinku sieci od punktu 1 do 5' ΔT=1,7 K,
- temperatura wody powracającej z węzła od T_P=42 °C do T_P=61 °C,
- przepływ wody sieciowej od $\dot{m}$=0,8 kg/s do $\dot{m}$=4,5 kg/s (z pominięciem okresu awarii).

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku Rys. 12–12.

8.2.4 Porównanie wyników badań z wynikami obliczeń symulacyjnych

Na podstawie danych o średnicach i długościach odcinków rurociągu pomiarowego (Tab. 8-1) wykonano jego model numeryczny dla potrzeb obliczeń symulacyjnych. Wielkości pomierzone w węzłach ciepłowniczych (przepływ i temperatura wody powrotnej) oraz w punkcie pomiarowym 1 (temperatura wody zasilającej) traktowano jako dane wejściowe do obliczeń. Obliczenia miały na celu zweryfikowanie przedstawionych w pracy modeli strat ciepła i transportu ciepła. Dane wejściowe umożliwiają przeprowadzenie symulacji przepływu fali temperaturowej wzdłuż modelowego odcinka sieci, gdzie wymuszenie temperaturowe stanowią dane zarejestrowane w punkcie pomiarowym nr 1 (Rys. 8–7). Przepływ wody sieciowej oraz temperatura wody powracającej z węzłów ciepłowniczych dla kolejnych chwil czasowych symulacji, ustalane były na podstawie danych zarejestrowanych podczas pomiarów.

Obliczenia symulacyjne wykonano dla okresu dwóch tygodni z krokiem czasowym równym $\Delta\tau$=60 sekund. Ponieważ dane pomiarowe (wejściowe) rejestrowane były co 10 minut, dane do obliczeń uzyskano w wyniku interpolacji liniowej sąsiednich punktów pomiarowych. W wyniku zmienności przepływu wody

sieciowej, symulacje wykonywane były przy zmiennej wartości liczby Couranta (6-2) w zakresie od *Cou=0,8* do *Cou=1*.

Końcowym etapem badań weryfikacyjnych było porównanie wartości temperatury wody zasilającej w węzłach ciepłowniczych w kolejnych chwilach czasowych obliczonych na drodze symulacji komputerowych z wartościami uzyskanymi z pomiarów. Wyniki porównania przedstawiono na wykresach Rys. 12–13, Rys. 12–14 i Rys. 12–15. Linia czerwona przedstawia przebieg temperatury wody zasilającej będącej wynikiem obliczeń symulacyjnych, a linia czarna - przebieg temperatury wody zasilającej zarejestrowana w systemie monitoringu. Punktami niebieskimi zaznaczono wielkość błędu względnego zdefiniowanego jako:

$$\sigma = \frac{\left|T^{Obl} - T^{Sym}\right|}{T^{Sym}} 100, \quad \%$$

gdzie:

T^{Obl} - wartość temperatury obliczona , °C,

T^{Sym} - pomierzona wartość temperatury , °C.

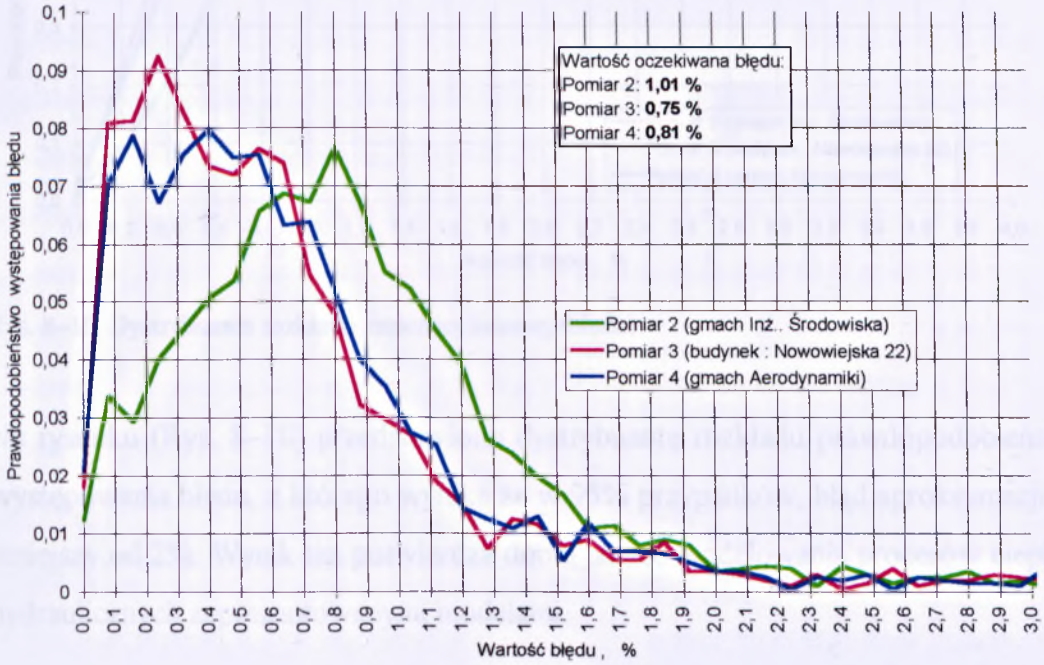
Uśredniając wartości błędów dla każdego pomiaru, ich wartość nie przekracza 1 % przy wystąpieniu maksymalnej wartości błędy wynoszącym około 13 %.

Na wykresach: Rys. 12–13, Rys. 12–14 oraz Rys. 12–15 widoczny jest wzrost wartości błędu względnego przy nagłych zmianach temperatury wody sieciowej, co potwierdza wnioski do rozdziału 6 pracy. Maksymalne wartości błędu dla symulacji przebiegu temperatury wody sieciowej w okresie dwóch tygodni wyniosły około 8-13%. Uśredniając wielkość błędu okazało się, że nie przekracza on 1 %, co świadczy o bardzo dobrej aproksymacji badanych procesów. W tabeli Tab. 8-2 zestawiono liczbowe wartości rozbieżności wyników obliczeń symulacyjnych w stosunku do wyników pomiarów.

Tab. 8-2 Błąd wyników obliczeń symulacyjnych w stosunku do wartości temperatury wody sieciowej zarejestrowanych podczas pomiarów

Pomiar	Średnia arytmetyczna	Błąd maksymalny	Wartość oczekiwana
-	%	%	%
2	0,90	8,89	1,01
3	0,69	12,59	0,75
4	0,75	12,77	0,81

Z uwagi na brak powtarzalności wartości błędów, zakres ich zmienności podzielono na przedziały o długości 0,08, a następnie wykonano obliczenia ilości powtórzeń wartości błędów w poszczególnych przedziałach oraz określono prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Zależność między prawdopodobieństwem (częstością występowania) a wartością błędu przedstawiono na wykresach rozkładu zmiennej losowej - błędu (Rys. 8–9).



Rys. 8–9 Rozkład prawdopodobieństwa występowania błędu wyników obliczeń symulacyjnych w porównaniu z wartościami pomiarowymi.

Na podstawie obliczonych wartości prawdopodobieństwa występowania zmiennej losowej (błędu) można określić wartość oczekiwaną błędu aproksymacji dla każdego pomiaru. Wartość oczekiwana zmiennej losowej EX zdefiniowana jest jako:

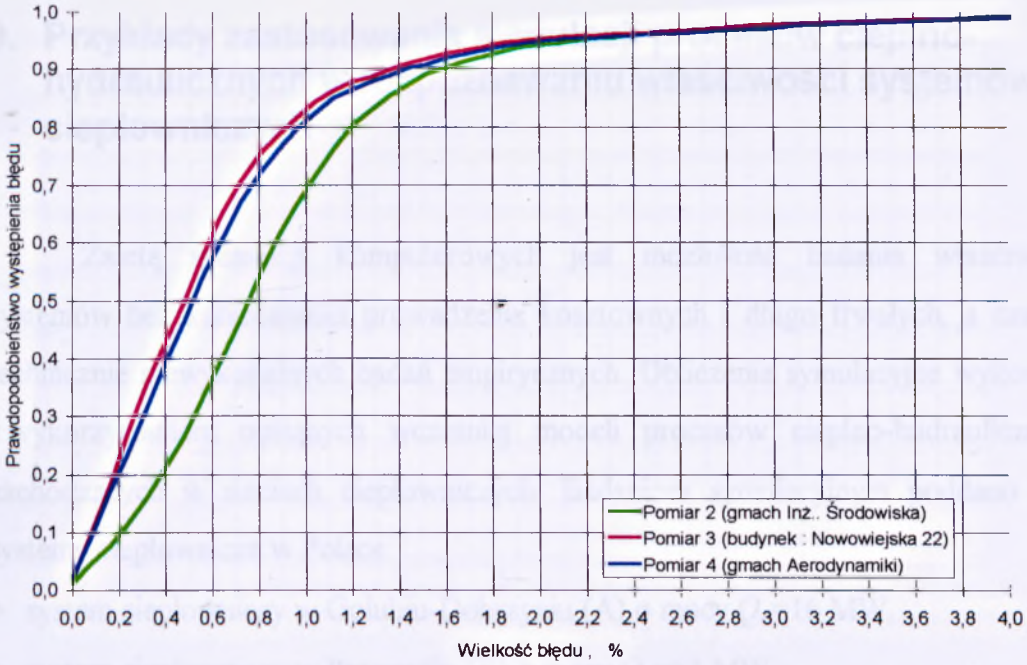
$$EX = \sum_{i=1}^{i=n} x_i p_i$$

gdzie:

x_i - wartość zmiennej losowej (błędu),

p_i - prawdopodobieństwo wystąpienia zmiennej losowej (błędu).

Wartości oczekiwane zestawiono w tabeli Tab. 8-2 i wynoszą one około 1 % co dodatkowo potwierdza dobrą aproksymację zjawisk fizycznych, zachodzących podczas transportu energii cieplnej siecią ciepłowniczą, zaproponowanymi w pracy modelami matematycznymi.



Rys. 8–10 Dystrybuanta rozkładu zmiennej losowej (błędu)

Na rysunku (Rys. 8–10) przedstawiono dystrybuantę rozkładu prawdopodobieństwa występowania błędu, z którego wynika że w 95% przypadków, błąd aproksymacji był mniejszy od 2%. Wynik ten potwierdza dobrą jakość modelowania procesów cieplno-hydraulicznych zaprezentowanymi modelami.

8.3 Wnioski

1. Przeprowadzona analiza wykazała, że zaproponowane w pracy modele procesów cieplno-hydraulicznie bardzo dobrze aproksymują zjawiska strat ciepła oraz transportu energii cieplnej w sieciach ciepłowniczych.
2. Modelowanie procesów transportu ciepła z wykorzystaniem metody elementów jest wystarczająco dokładne dla wymuszeń temperaturowych odpowiadających wartościom rzeczywistym.
3. W przypadku nagłych zmian temperatury wywołanych np. stanem awarii systemu ciepłowniczego, błąd aproksymacji zwiększa się do wartości kilkunastu procent.

9. Przykłady zastosowania symulacji procesów cieplno-hydraulicznych w rozpoznawaniu właściwości systemów ciepłowniczych

Zaletą symulacji komputerowych jest możliwość badania właściwości systemów bez konieczności prowadzenia kosztownych i długo trwałych, a czasem technicznie niewykonalnych badań empirycznych. Obliczenia symulacyjne wykonano z wykorzystaniem opisanych wcześniej modeli procesów cieplno-hudraulicznych zachodzących w sieciach ciepłowniczych. Badaniom symulacyjnym poddano trzy systemy ciepłownicze w Polsce:

- system ciepłowniczy w Golubiu-Dobrzyniu (A) o mocy Q_o=16 MW,
- system ciepłowniczy w Przemyślu (B) o mocy Q_o=63 MW,
- system ciepłowniczy w Stargardzie Szczecińskim (C) o mocy Q_o=112 MW.

W rozdziale przedstawiono kilka praktycznych przykładów zastosowań obliczeń symulacyjnych w rozpoznawaniu reakcji systemów ciepłowniczych na zmieniające się warunki zapotrzebowania na ciepło. Przedstawiono następujące zagadnienia:

- wpływ niedociążenia systemu ciepłowniczego na wielkość strat ciepła oraz schłodzenia wody sieciowej,
- zmiany strat ciepła w ciągu roku,
- wpływ dobowych zmian zapotrzebowania ciepła c.w.u. na wartość strat ciepła w okresie letnim,
- udział strat ciepła sieci magistralnych i rozdzielczych w całkowitych stratach ciepła.

Wskaźnikiem zmian obciążenia systemu ciepłowniczego jest bezwymiarowy współczynnik obciążenia cieplnego systemu, zdefiniowany jako:

$$WOC = \frac{Q_X}{Q_O} \qquad (9\text{-}1)$$

gdzie:

Q_X - moc chwilowa systemu , MW,

Q_O - obliczeniowa moc systemu ciepłowniczego , MW.

Innym wskaźnikiem, określającym obciążenie systemu ciepłowniczego jest współczynnik obciążenia liniowego:

$$WOL = \frac{Q_X}{\sum_{i=1}^{n} L_i}, \frac{MW}{km} \qquad (9\text{-}2)$$

gdzie:

Q_X - moc systemu ciepłowniczego , MW,

$\sum_{i=1}^{n} L_i$ - całkowita długość sieci ciepłowniczej , km.

W przedstawionych przykładach dużo miejsca poświęcono schłodzeniu wody sieciowej w rurach zasilających. Zagadnienie schładzania wody w sieci jest tematem dyskusji oraz badań [65]. Znajomość tego zjawiska jest bardzo istotna w tworzeniu wykresów regulacji jakościowej i ilościowo-jakościowej. Wartość schłodzenia wody (w warunkach ustalonych) jest inna dla każdego węzła i wynosi ona:

$$\Delta T_{sch}^{i} = T_{zr}^{Z} - T_{i}^{Z}, \quad K$$

gdzie:

T_{zr}^{Z} - temperatury wody sieciowej w źródle ciepła , °C,

T_{i}^{Z} - temperatura wody zasilającej w *i-tym* węźle ciepłowniczym , °C.

W przykładach posłużono się średnią wartością schłodzenia wody sieciowej zdefiniowaną jako:

$$\Delta T_{sch} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta T_{sch}^{i} \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_i}, \quad K \qquad (9\text{-}3)$$

gdzie:

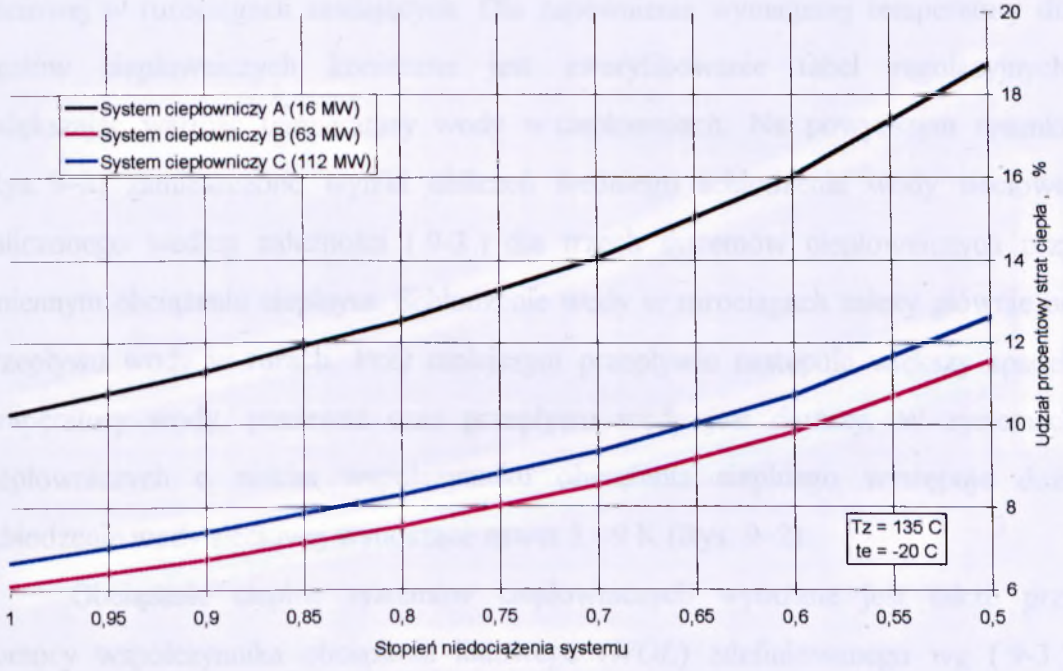
ΔT_{sch}^{i} - schłodzenie wody sieciowej dla *i-tego* węzła cieplnego, K,

Q_i - obliczeniowa moc cieplna węzła ciepłowniczego , kW.

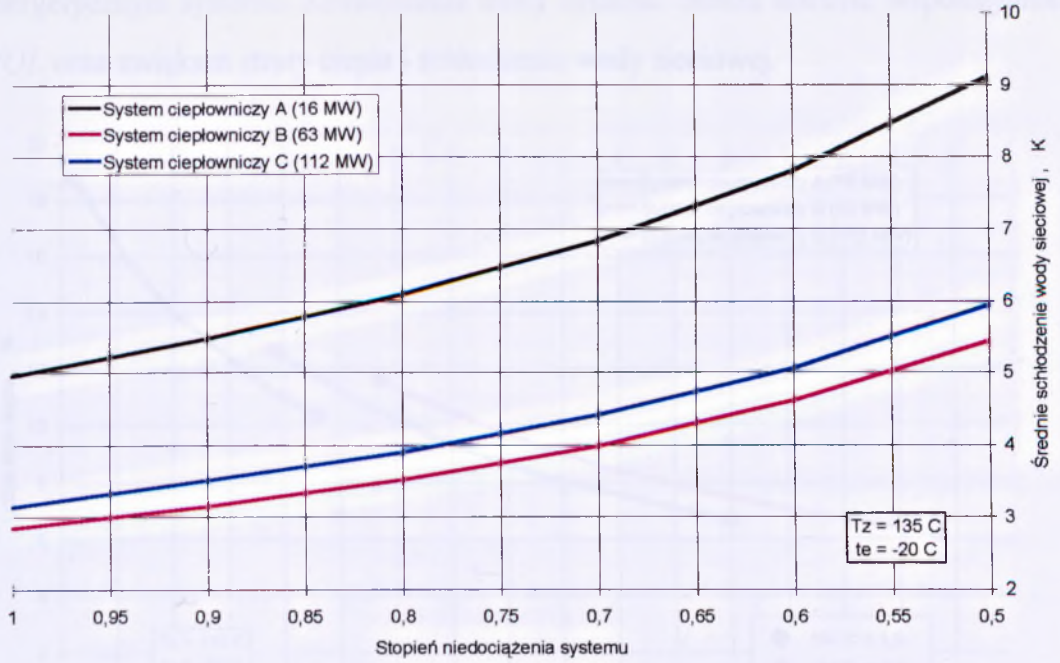
9.1 Wpływ niedociążenia systemu ciepłowniczego na wielkość strat ciepła oraz schłodzenia wody sieciowej

Problemem Przedsiębiorstw Energetyki Cieplnej (PEC) w Polsce jest niedociążenie systemów ciepłowniczych, które szczególnie nasiliło się po zmianach gospodarczo-politycznych w kraju po roku 1989. Udział strat ciepła w całkowitej produkcji energii cieplnej (5-1) zależy przede wszystkim od zapotrzebowania na ciepło lub inaczej od obciążenia cieplnego systemu. Przy spadku sprzedaży energii cieplnej, straty ciepła mają coraz większy wpływ na kształtowanie cen oraz dochody firm ciepłowniczych.

Obliczenia wykonano dla trzech (wspomnianych wcześniej) systemów ciepłowniczych dla warunków obliczeniowych tzn.: T_Z/T_P = 135/75 °C i t_e=-20 °C oraz dla warunków 50% obniżenia obciążenia cieplnego systemów. Wzrost udziału strat ciepła nie jest wprost proporcjonalny do zmian obciążenia systemu (Rys. 9–1), ponieważ w wyniku zmniejszenia się przepływu wody w sieci, następuje obniżenie średniej temperatury wody sieciowej, co z kolei powoduje zmniejszenie strat ciepła.



Rys. 9–1 Wzrost udziału strat ciepła w wyniku zmian niedociążenia systemu ciepłowniczego

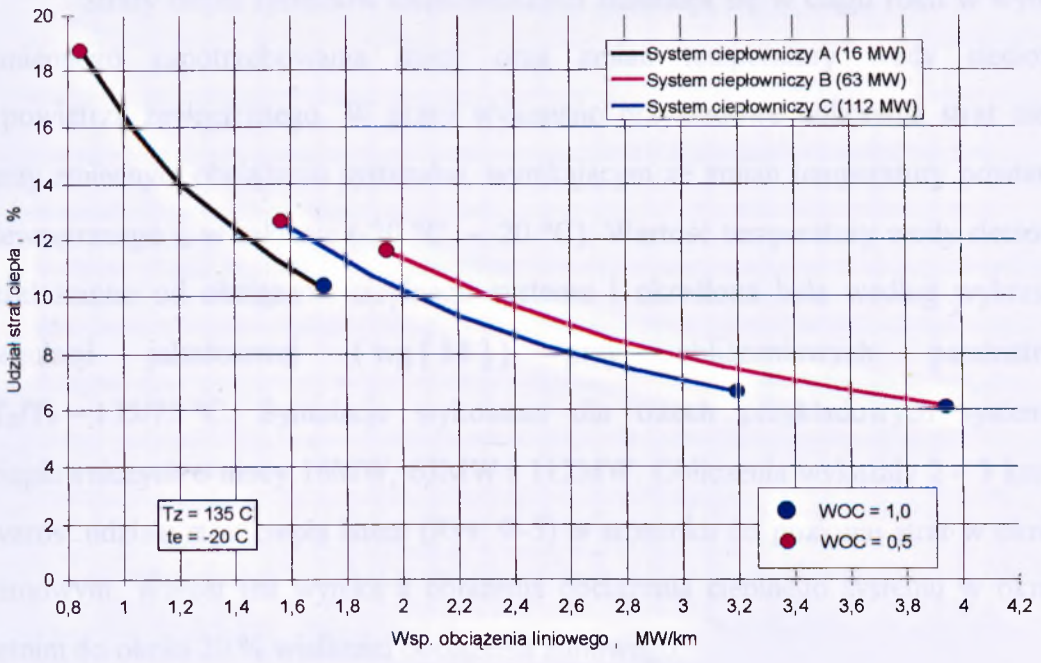


Rys. 9–2 Wzrost średniego schłodzenia wody sieciowej (zasilanie) w wyniku zmian stopnia niedociążenia systemu ciepłowniczego

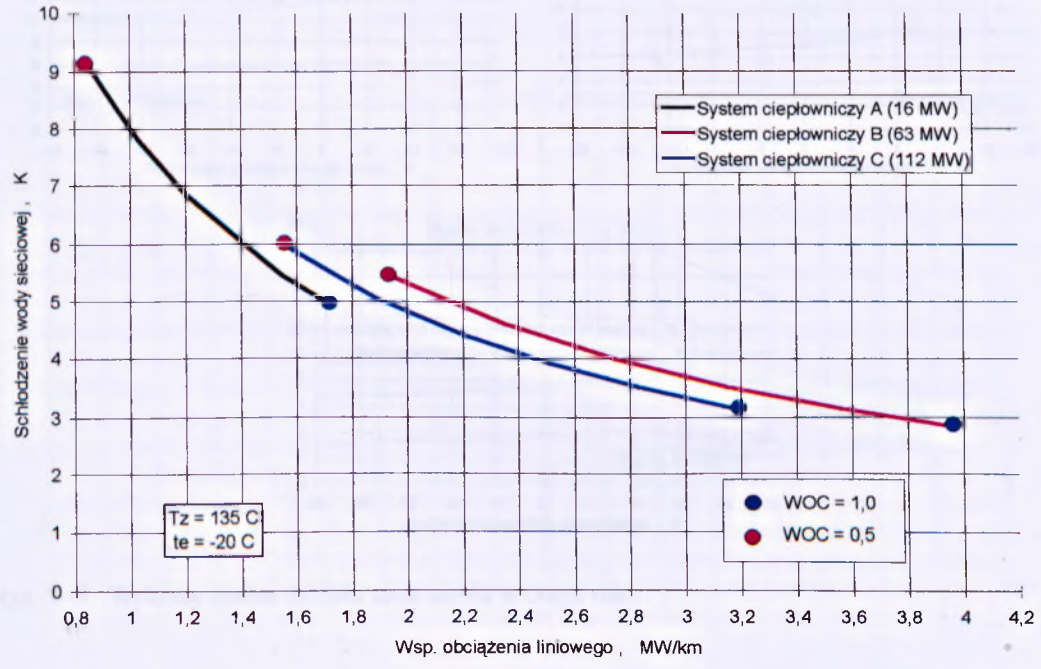
Zmniejszenie przepływu wody sieciowej spowodowane obniżeniem zapotrzebowania na energię cieplną, powoduje zwiększenie ochłodzenia wody sieciowej w rurociągach zasilających. Dla zapewnienia wymaganej temperatury dla węzłów ciepłowniczych konieczne jest zweryfikowanie tabel regulacyjnych, zwiększając wartość temperatury wody w ciepłowniach. Na powyższym rysunku (Rys. 9–2) zamieszczono wyniki obliczeń średniego schłodzenia wody sieciowej obliczonego według zależności (9-3) dla trzech systemów ciepłowniczych przy zmiennym obciążeniu cieplnym. Schłodzenie wody w rurociągach zależy głównie od przepływu wody w rurach. Przy mniejszym przepływie następuje większy spadek temperatury wody, ponieważ czas przepływu wody jest dłuższy. W systemach ciepłowniczych o niskim współczynniku obciążenia cieplnego występuje duże schłodzenie wody sieciowej wynoszące nawet 5 - 9 K (Rys. 9–2).

Obciążenie cieplne systemów ciepłowniczych wyrażane jest także przy pomocy współczynnika obciążenia liniowego (*WOL*) zdefiniowanego wg (9-3). Przedstawione wcześniej wyniki obliczeń strat ciepła oraz schłodzenia wody sieciowej można uzależnić do wartości współczynnika *WOL* (Rys. 9–3 i Rys. 9–4). Systemy ciepłownicze posiadające rozległą sieć rurociągów charakteryzują się niskimi współczynnikami *WOL* (< 2) oraz większym udziałem strat ciepła w bilansie

energetycznym systemu. Zmniejszenie mocy systemu obniża wartość współczynnika *WOL* oraz zwiększa straty ciepła i schłodzenie wody sieciowej.



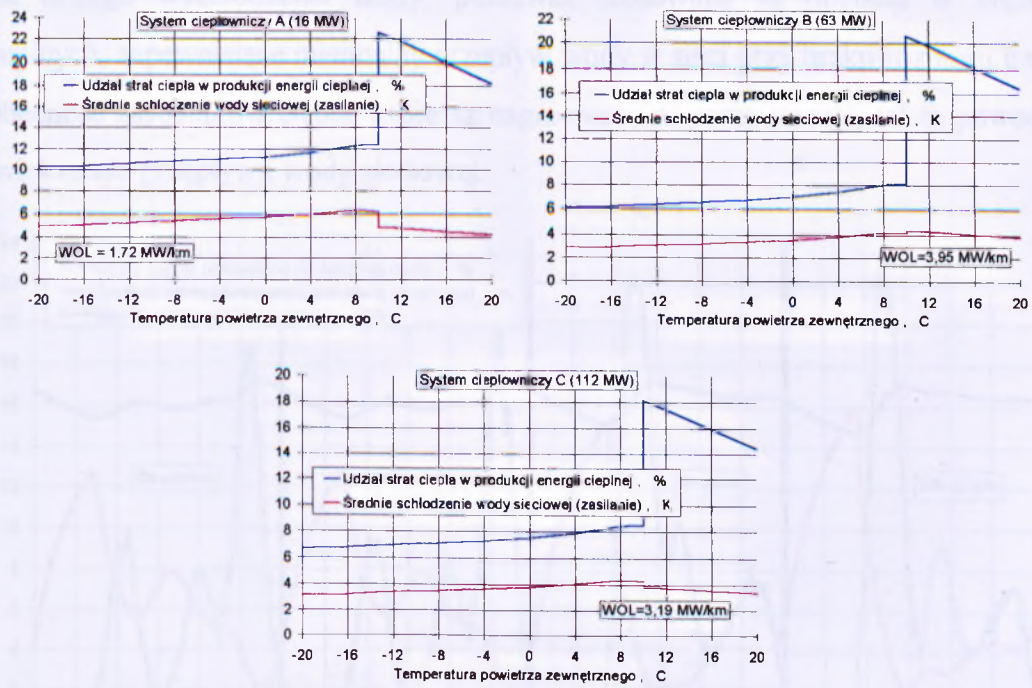
Rys. 9–3 Zależność strat ciepła od współczynnika obciążenia liniowego sieci ciepłowniczej



Rys. 9–4 Zależność średniego schłodzenia wody sieciowej od współczynnika obciążenia liniowego

9.2 Zmiany strat ciepła w ciągu roku

Straty ciepła systemów ciepłowniczych zmieniają się w ciągu roku w wyniku zmiennego zapotrzebowania mocy oraz zmian temperatury wody sieciowej i powietrza zewnętrznego. W pracy wykonano przykładowe obliczenia strat ciepła przy zmiennym obciążeniu systemów, wynikającym ze zmian temperatury powietrza zewnętrznego t_e w zakresie (-20 °C - 20 °C). Wartość temperatury wody sieciowej uzależniono od obciążenia cieplnego systemu i określona była według wykresów regulacji jakościowej (wg [55]) przy obliczeniowych parametrach T_Z/T_P = 135/75 °C. Symulacje wykonano dla trzech przykładowych systemów ciepłowniczych o mocy 16MW, 63MW i 112MW. Obliczenia wykazały 2 - 3 krotny wzrost udziału strat ciepła latem (Rys. 9–5) w stosunku do poziomu strat w okresie zimowym. Wzrost ten wynika z obniżenia obciążenia cieplnego systemu w okresie letnim do około 20 % wielkości obciążenia zimowego.

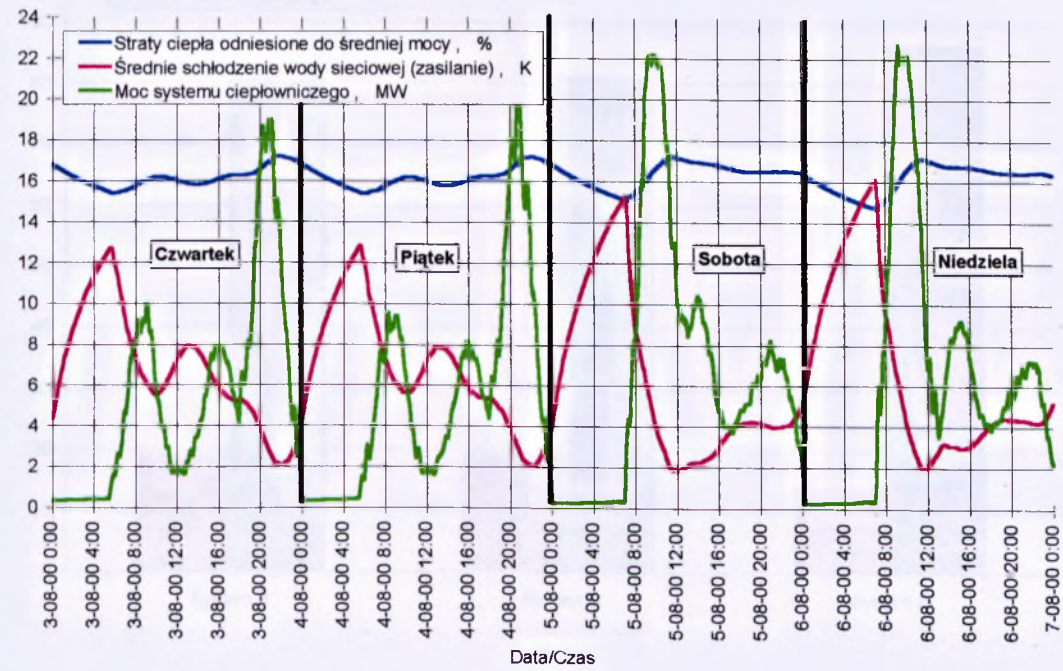


Rys. 9–5 Wykresy zmian udziału strat ciepła w ciągu roku

9.3 Wpływ dobowych zmian zapotrzebowania ciepła na wartość strat ciepła w okresie letnim

W okresie letnim występują duże wahania przepływu wody sieciowej wywołane zmiennością poboru ciepłej wody użytkowej. W związku z tym, w sezonie letnim dochodzi do nadmiernego schłodzenia wody sieciowej w godzinach nocnych gdzie pobór c.w.u. jest znikomy.

Na poniższym rysunku (Rys. 9–6) zamieszczono wyniki obliczeń symulacyjnych pracy systemu ciepłowniczego w ciągu czterech dni okresu letniego. Obliczenia wykonano dla dwóch dni roboczych (czwartek, piątek) i dwóch dni wolnych od pracy (sobota, niedziela), w których wykorzystano symulator rozbioru ciepłej wody użytkowej opracowany przez Wasilewskiego i Turlejskiego [108] uwzględniającego różnorodność poboru ciepłej wody w kolejnych dniach tygodnia [60]. Na wykresie, widoczne jest bardzo duże schłodzenie wody sieciowej w godzinach nocnych wynoszące nawet 12 - 15 K. W rzeczywistości nie dochodzi do tak dużego wychłodzenia wody, ponieważ stosowane są obejścia w węzłach cieplnych, zapewniające minimalny przepływ wody w sieci przy braku rozbioru c.w.u. Obecność zasobników ciepła, które są nagrzewane w porze nocnej, także powoduje zwiększenie przepływu wody sieciowej.



Rys. 9–6 Wykres dobowej zmienności strat ciepła i schłodzenia wody sieciowej w okresie letnim.

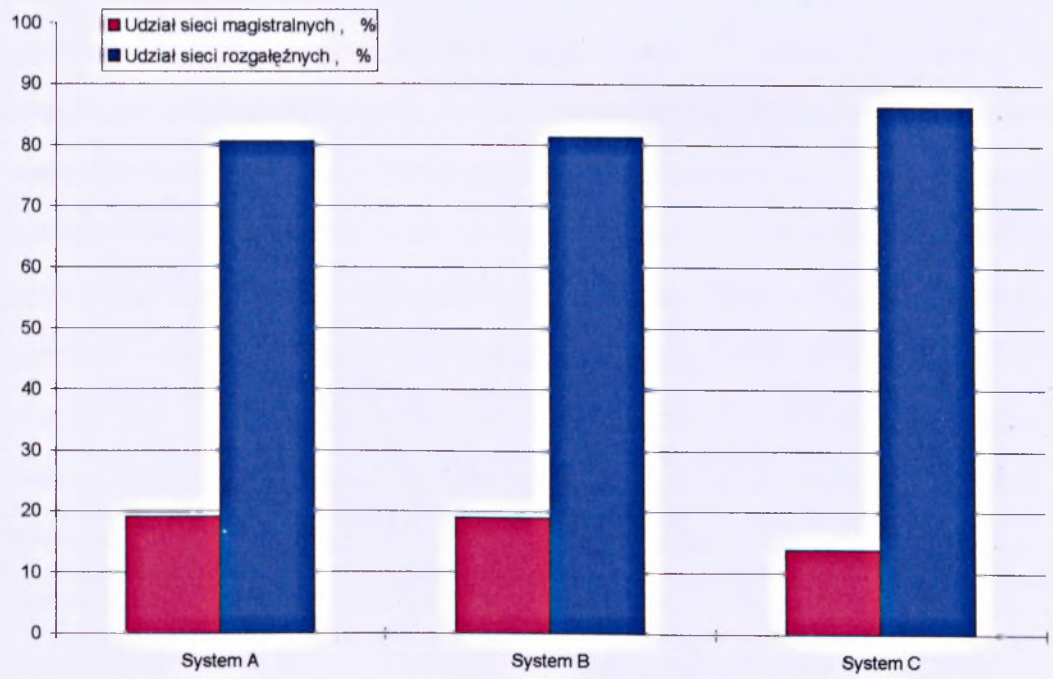
9.4 Udział sieci magistralnych i rozdzielczych w całkowitych stratach ciepła

Rurociągi systemów ciepłowniczych dzielone są na dwie grupy: sieci magistralne i rozdzielcze. Nie ma reguły wyodrębniającej odcinki magistralne z ogółu odcinków sieci. Podział na magistrale jest podziałem administracyjnym ustalanym w przedsiębiorstwach ciepłowniczych, ułatwiający eksploatację systemów. Dla ujednolicenia kryteriów, w pracy przyjęto następującą zasadę podziału sieci ciepłowniczej:

- sieć magistralna: odcinki, w których wielkość przepływu wody (w warunkach obliczeniowych) jest większa od 25 % przepływu w ciepłowni,
- sieć rozgałęźna - gdzie przepływ wody jest mniejszy od 25 % przepływu w ciepłowni.

Taki sposób podziału sieci w większości przypadków odpowiada przyjmowanym podziałom sieci w przedsiębiorstwach ciepłowniczych.

Jak wynika z obliczeń, sieci rozgałęźne mają około 80-90 % udziału w całkowitych stratach ciepła (Rys. 9–7). Zatem stan techniczny rurociągów rozgałęźnych decyduje o poziomie strat ciepła całego systemu ciepłowniczego.



Rys. 9–7 Udział sieci magistralnych i rozdzielczych w całkowitych stratach ciepła

9.5 Wnioski

Przedstawione w rozdziale przykłady świadczą o celowości wykorzystywania przedstawionych w pracy modeli procesów cieplno-hydraulicznych w rozpoznawaniu właściwości systemów ciepłowniczych. Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski:

1. Straty ciepła systemów ciepłowniczych zależą od ich obciążenia cieplnego i wzrastają przy zmniejszaniu się zapotrzebowania na energię cieplną.
2. Udział strat ciepła w całkowitej produkcji energii cieplnej latem jest około 2 - 3 razy większy niż w okresie ogrzewczym.
3. W okresie letnim dochodzi do dużego (kilkanaście stopni) schłodzenia wody w rurociągach zasilających, wywołanego brakiem poboru ciepła w godzinach nocnych.
4. Stan techniczny powłok izolacji termicznej sieci rozdzielczych w 80 - 90 % decyduje o poziomie strat ciepła całego systemu ciepłowniczego.

10. Wnioski końcowe

1. W pracy przedstawiono sposoby modelowania dynamiki procesów cieplnych i hydraulicznych w zastosowaniu do obliczeń symulacyjnych pracę systemów ciepłowniczych. Wykazano, że zaproponowane modele wystarczająco dokładnie aproksymują przebieg zjawisk cieplno-hydraulicznych przy zmiennych warunkach brzegowych.
2. Analizy przepustowości przykładowych systemów sieci ciepłowniczych w Polsce wykazały ich przewymiarowanie oraz niedociążenie hydraulicznie, będące przyczyną występowania przepływów wody sieciowej w obszarze odpowiadającym ruchowi turbulentnemu w strefie przejściowej. Wniosek ten zaprzecza ogólnej opinii mówiącej o występowaniu w większości rurociągach ciepłowniczych przepływu turbulentnego w strefie kwadratowej zależności oporów liniowych.
3. Z uwagi na stosowanie w ciepłownictwie rur o dużej średnicy nominalnej, jest małe prawdopodobieństwo wystąpienia przepływu laminarnego wody sieciowej w rurociągach ciepłowniczych. Ruch laminarny występuje przy prędkościach przepływu wody wynoszącej poniżej 0,02 m/s. Takie małe prędkości mogą wystąpić jedynie w okresie letnim, w godzinach nocnych gdzie występuje minimalny pobór energii cieplnej węzłów ciepłowniczych.
4. Modelując procesy cieplno-hydrauliczne należy zwrócić uwagę na optymalne wykorzystanie pamięci komputerów. W tym celu zalecane jest stosowanie zapisu macierzy zgodnie z opisanymi w pracy zasadami zapisu macierzy rzadkich, co w znaczny sposób wpływa na racjonalne wykorzystanie pamięci komputera oraz poszerza zakres zastosowania programów symulacyjnych. Drugim bardzo ważnym powodem dla, którego należy stosować tą technikę zapisu elementów niezerowych w macierzy, jest znaczne skrócenie czasu wykonywania operacji macierzowych i rozwiązywania układów równań.
5. Dokładne modelowanie nieustalonych procesów strat ciepła wymaga wykonania bardzo dużej ilości obliczeń, co w znacznym stopniu spowalnia cykl obliczeniowy. W symulacjach pracy systemów ciepłowniczych celowe jest korzystanie

z uproszczonych modeli, które nie wymagają przeprowadzania tak wielu obliczeń. Przedstawiony w pracy model spełnia powyższe wymagania zapewniając jednocześnie 5% dokładność otrzymywanych wyników.

6. Modelowanie strat ciepła z wykorzystaniem wzorów Forchheimera i Krischera wymaga wprowadzenia współczynnika poprawkowego w definicji średnicy zastępczej dla kształtu kanału ciepłowniczego.
7. W pracy zajmowano się nieizotermicznym przepływem wody w sieci ciepłowniczej. Zastosowana metoda elementów, wystarczająco dokładnie przybliża procesy przepływu fali temperaturowej w rurociągach ciepłowniczych wywołanej rzeczywistymi wymuszeniami temperaturowymi. Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały, że dokładność aproksymacji zmienności temperatury wody maleje przy wzroście szybkości zmian temperatury wody sieciowej oraz przy niskich wartościach liczby Couranta.
8. Przedstawione w pracy przykłady obliczeniowe wykazały przydatność i celowość stosowania symulacji dynamiki procesów cieplno-hydraulicznych w rozpoznawaniu właściwości systemów ciepłowniczych, które bardzo często są niemożliwe do określenia przy stosowaniu tradycyjnych metod pomiarowych.
9. Przeprowadzone badania poligonowe wykazały zbieżność wyników pomiarów z wynikami obliczeń symulacyjnych przeprowadzonych z wykorzystaniem przedstawionych w pracy modeli matematycznych procesów cieplno-hydraulicznych, co dowodzi o ich poprawności.

11. Piśmiennictwo

[1] Althaus W., Faulenbach D., BoFit - Software for Simulation and Optimization of District Heating Systems, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[2] Andersson, S. Ekonomisk isoleringstjocklek for direktskummande fjarrvarmeledingar , Buggforskningsrldet 1984 ,

[3] Arvastson L., Holst J., A State-Space Model of a District Heating Network, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[4] Bachańska A. Ocena stanu kanałów i izolacji sieci cieplnych w świetle badań odkrywkowych COW 7/1970;

[5] Baron B., Metody numeryczne w Turbo Pascalu, Helion 1994,

[6] Benonysson A., Dynamic Modelling and Operational Optimization of District Heating Systems, Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark, 1991,

[7] Biedugnis S., Smolarkiewicz M. Metoda Newtona w obliczeniach zewnętrznych sieci wodociągowych. VII Seminarium Instytutu Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.

[8] Bohm B., Torslev Jensen P. Energiokonomisk drift af eksisterende fjernvarmenet. Energiministerients fjernvarmeprogram. Raport nr 2, 1981

[9] Bohm B., Determination of heat loss from district heating pipes, Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark, 1996,

[10] Bohm B., Zinko H., The TX-Model a Quantitative Heat Loss Analysis of District Heating Pipes by Means of IR - Surface Temperature Measurements and Simulations, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[11] Calvert Ch., Borland C++Builder Unleashed, Sams Publishing, Borland Press 1997

[12] Clark D.R., Hurley C.W., Hill C.R., Dynamic models for HVAC system components. ASHREA Transactions, Vol. 91, Part 1B, 1985.

[13] Chmielnicki W. Metodyka określania strat przesyłu ciepła, Warszawa 1975, Praca doktorska

[14] Christensen, K., Petersen B. Fjernvarme. Polyteknisk Forlag 1987.

[15] Cross H., Analysis of flow in networks of conduits or conductors, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana 1936,

[16] Chua L.O., Pen-Min Lin, Komputerowa analiza układów elektronicznych - algorytmy i metody obliczeniowe, WNT Warszawa 1981,

[17] Czemplik A., Interakcja międzypoziomowa w rozproszonych układach regulacji elestycznych systemów ciepłowniczych, Praca doktorska, Instytut Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999,

[18] Deo N. Teoria grafów i jej zastosowanie w technice i informatyce, PWN Warszawa 1980

[19] Diestel R., Graph Theory, Springer Verlag, New York 1997,

[20] Dolan A., Networks and Algorims, Chichester, John Wiley & Sons 1993,

[21] Drozdek A., Simon D., Struktury danych w języku C, WNT, Warszawa 1996

[22] Duff Iain, User's Guide for the Harwell-Boeing Sparse Matrix Collection, CERFACS 1992

[23] Durnaś M., Szwed P., Symulacja predykcyjnego sterowania siecią ciepłowniczą, Rynek Energii 1/1998

[24] Dzierzgowski M., Praca systemu ciepłowniczego przy rosnącym stopniu automatyzacji węzłów oraz zmniejszaniu się zużycia energii u odbiorców w warunkach regulacji ilościowo-jakościowej, VI Krajowa Konferencja „Modernizacja Miejskich Systemów Ciepłowniczych w Polsce" Międzyzdroje 1997,

[25] Farouki, Omar T. „Thermal properties of soils" monograph 81-1 , United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory. (CRREL) , Hanover, New Hampshire, USA , 1981

[26] Finpol Rohr Ltd., Rury preizolowane - Poradnik projektanta, Warszawa 1995,

[27] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J., Metody numeryczne, WNT Warszawa 1993

[28] Gartner J.R., Harrison H.L., Frequency response transfer functions for tube in crossflow. ASHREA Transactions, Vol. 69, Part 1B, 1963.

[29] Gill P., Murray W., Practical Optimization, Academic Press 1981,

[30] Gdula J. Przewodzenie ciepła, PWN Warszawa 1984,

[31] Glück B. Heizwassernetze für Wohn-und Industriegebiete -Berlin 1985,

[32] Glück B. Hydrodynamische und Gasdynamische Rohrströmung, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1988,

[33] Glück B. Wärmeübertragung Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren - Berlin 1989,

[34] Grabarczyk Cz., Przepływy cieczy w przewodach - metody obliczeniowe, Envirotech, Poznań 1997

[35] Grabarczyk Cz., Szymaczek E., Wyznaczanie wartości współczynnika liniowego oporu hydraulicznego dla przejściowej strefy burzliwego przepływu w rurach chropowatych, GWiTS 2/1974,

[36] Groselj J., Jaksic N., Numerical Simulation of a District Heating Station „Toplarna Siska" as an Operational Tool, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[37] Хасилев В., Меренков А., Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей, Москва 1978

[38] Hobler T., Ruch ciepła i wymienniki, WNT Warszawa 1986;

[39] Homonney G. Modelling the History of District Heating, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[40] Horlacher H., Lüdecke H., Strömungsberechnung für Rohrsysteme, Expert Verlag 1992

[41] Huovilainen, R. „Factors Affecting District Heating Line Heat Losses". CH-85-10, No 2. ASHREA Transactions, Vol. 91, Part 1B, 1985.

[42] Inprise Corporation. Borland C++Builder - Developer's Guide. Borland Press 2000

[43] Jeppson R., Analysis of Flow in Pipe Networks, Ann Arbor Science 1976,

[44] Kamler W. Ciepłownictwo PWN - Warszawa 1979

[45] Khoury Farid, Efficient Parallel Triangular System Solver for Preconditioning Large Sparse Linear Systems, New South Wales Centre for Parallel Computing 1994

[46] Kiełbasiński A., Schwetlick H., Numeryczna algebra liniowa, WNT, Warszawa 1992

[47] Koutitas Ch., Elements of Computational Hydraulics, Pentech Press, London 1993,

[48] Krischer, O. Die Wärmeverluste von Rohrleitungen im Erdreich, W.S.W. Mitteilungen d.Fa. Rheinhold & Co., nr.1, 1930, Berlin.

[49] Krygier K., Sadkowski W., Zastosowanie przekształceń konforemnych w zagadnieniach określania pola temperatur i strumienia cieplnego dla sieci cieplnych układanych bezkanałowo, Prace Naukowe P.W. Nr 33, Warszawa 1974,

[50] Krygier K., Określanie oporu cieplnego instalacji wykonanych z mas zasypowych dla czynnych wodnych sieci ciepłowniczych. Praca daktorska. P.W. 1974

[51] Krygier K., Metoda określania oporu cieplnego izolacji termicznej dla czynnych sieci ciepłowniczych układanych systemem bezkanałowym, Prace Naukowe P.W., Nr 51, Warszawa 1976,

[52] Krygier K., Kulągowski S., Mieszkowski T., Sieci ciepłownicze-obliczenia hydrauliczne z zastosowaniem komputera, WPW Warszawa 1991

[53] Krygier K., Sieci cieplne, WPW Warszawa 1993,

[54] Kusuda, T., Fang, J.B. & Ellis, W.M. A Method for Estimating Heat Loss from Under-ground Heat Distribution Systems. National Bureau of Standards, ASTM Symposium on thermal insulation, materials and systems, Dallas 1984, Texas.

[55] Kwiatkowski J., Cholewa L. Centralne ogrzewanie - pomoce projektanta Arkady Warszawa 1980

[56] Kvisgaard B., Hadvig S. Varmetab fra fjernvarmeledninger. 1980

[57] Lamont P. British National Report on forlulea for pipeline calculations, 2-nd International Water Supply Congress, Paris 1952,

[58] Larsson G., On dynamic behavior in district heating networks, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[59] Magnusson J., Boysen H., A Simulation program for demonstrating the operation of house heating control equipment, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[60] Mańkowski S., Projektowanie instalacji ciepłej wody użytkowej, Arkady, Warszawa 1981

[61] Mańkowski S., Moc źródeł zasilających miejskie systemy ciepłownicze, Seminarium: Problemy Ciepłownictwa Komunalnego, Krzeszna 1996

[62] Mańkowski S., i zespół, Ocena stanu technicznego systemu ciepłowniczego dzielnicy Ostroróg II w Raciborzu, Praca niepublikowana, PW Warszawa 1997

[63] Mańkowski S., i zespół, Określanie skutków technicznych i ekonomicznych powodzi dla systemu ciepłowniczego miasta Wrocławia, Praca niepublikowana, PW Warszawa 1998

[64] Marciniak A., Gregulec D., Kaczmarek J., Podstawowe procedury numeryczne w języku Turbo Pascal, Nakom, Poznań 1997

[65] Matwiejuk P., Ochładzanie się czynnika sieciowego w magistralach ciepłowniczych w warunkach zredukowanego zapotrzebowania na ciepło, COW 5/1997

[66] Niemyjski O., Graficzno-numeryczna baza danych sieci ciepłowniczych - NetzCAD SCW. Lupus CADCAM Forum 4/1994,

[67] Niemyjski O., Narowski P., Osobliwości w budowie i stosowaniu graficzno-numerycznych baz danych dla systemów ciepłowniczych, Seminarium: Problemy Ciepłownictwa Komunalnego, Krzeszna 1996

[68] Niemyjski O., Komputerowa symulacja dynamiki procesów rozchodzenia się fali temperaturowej w systemach sieci ciepłowniczej, V Krajowa Konferencja „Modernizacja Miejskich Systemów Ciepłowniczych w Polsce" Międzyzdroje 1996

[69] Niemyjski O., Metodyka obliczania strat ciepła w systemie ciepłowniczym z uwzględnieniem okresu letniego, VI Krajowa Konferencja „Modernizacja Miejskich Systemów Ciepłowniczych w Polsce" Międzyzdroje 1997

[70] Niemyjski O., Wojdyga K., Metodyka określania strat ciepła i mocy miejskich systemów ciepłowniczych, XII Konferencja Ciepłowników, Solina 2000

[71] Ogrodzki Jan, Komputerowa analiza układów elektronicznych,PWN Warszawa 1994

[72] Osiadacz A., Porównanie oczkowych i węzłowych metod symulacji sieci gazowych, GWiTS 9/1981

[73] Osiadacz A., Komputerowe metody obliczania sieci gazowych, GWiTS 10/1992

[74] Osiadacz A., Metody symulacji sieci gazowych w stanach ustalonych, GWiTS 7/1993

[75] Osiadacz A., Algorytm optymalizacji statycznej sieci gazowej wysokociśnieniowej, GWiTS 1/1994

[76] Osiadacz A., Zelman H., Krawczyński T., Pakiet do symulacji statycznej sieci gazowych o dowolnej konfiguracji, GWiTS 10/1994

[77] Osiadacz A., Zwoliński M., Derlicka-Czaja M., Badania symulacyjne miejskiej sieci gazowej, GWiTS 5/1995

[78] Osiadacz A., Zelman H., Krawczyński T., Pakiet do symulacji statycznej sieci gazowych o dowolnej konfiguracji - SIMNETSSV v. 1.1, GWiTS 6/1995

[79] Pancewicz A. Symulacja nieizotermicznego, nieustalonego przepływu gazu w sieci gazowej. Praca doktorska. Politechnika Warszawska 2000

[80] Palsson H. Analysis of numerical methods for simulating temperature dynamics in district heating pipes, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[81] Petela R. Przepływ ciepła, PWN Warszawa 1983,

[82] Pieńkowski C., Zastosowanie metody brzegowych równań całkowych do rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła. Praca doktorska. Białystok 2000

[83] Pissanetzky Sergio, Sparse Matrix Technology, Academic Press Inc 1984

[84] Popiel Cz., Wojtkowiak J., Wzory aproksymujące właściwości fizyczne wody przeznaczone do obliczeń wymiany ciepła na komputerach PC, COW 2/1995

[85] Pozo Roldan,Remington Karin, SparseLib++ - Sparse Matrix Class Library, National Institute of Standards and Technology 1996

[86] Press W., Teukolsky A., Vetterling W., Flannery B., Numerical Recipes in C, Cambridge University Press 1992

[87] Recknagel, Sprenger Ogrzewanie, Klimatyzacja - poradnik, EWFE Gdańsk 1994

[88] Richardson D., Fluid flow and heat transfer in pipework systems: I Mathemetical model for dynamic modular simulation, Building Serv. Eng. Res. Technol. 1989,

[89] Richardson D., Fluid flow and heat transfer in pipework systems: II Design example, Building Serv. Eng. Res. Technol. 1990,

[90] Rybska G. Dynamika strat ciepła wodnych sieci cieplnych układanych w kanałach, Praca doktorska Warszawa 1984,

[91] Sheabaan M., Airflow and Thermal Comfort Estimation in Multifamily Buildings in Hot Climate Conditions, Phd thesis, Warszawa 1994

[92] Stefański W. Wyszkowski K., Tablice i wykresy do obliczeń z mechaniki płynów, WPW Warszawa 1988

[93] Stephenson D., Pipeflow analysis, Elsevier Science Publishers B.V. 1984

[94] Sysło M., Deo N., Kowalik J., Algorytmy optymalizacji dyskretnej, PWN Warszawa 1993,

[95] Szargut J., Modelowanie numeryczne pól temperatury, WNT Warszawa 1992,

[96] Śnieżyk R. Symulacja numeryczna zjawisk hydraulicznych w sieciach ciepłowniczych przy stopniowym automatyzawaniu węzłów cieplnych i w stanach awaryjnych, Praca doktorska PW, Warszawa 1984,

[97] Telles M., Borland C++Builder - High Performance, Coriolis Group Books 1997

[98] Tin-Tai Chow, Dunn A., Numerical Modeling of Thermal Behavior of Fluid Conduit Flow with Transport Delay. ASHREA Transactions, , 1996

[99] Tobias J.R., Simplified transfer function for temperature response of fluids flowing through coils, pipes or ducts. ASHREA Transactions, Vol. 79, Part 2, 1973

[100] TRNSYS - The Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. http://www.sel.me.wisc.edu/TRNSYS

[101] Turlejski S., Analiza stanów ustalonych przepływu wody i wymiany ciepła w sieciach, Raport IOW PW, Warszawa 1982

[102] Turlejski S., Metodyka optymalizacji strat ciśnienia i strumieni wody w systemach ciepłowniczych, PW Rozprawa doktorska, Warszawa 1985

[103] Turlejski S., Algorytmy i komputerowe programy analizy ustalonych procesów wymiany ciepła w budynkach i systemach ogrzewczych, Raport IOW PW, Warszawa 1989

[104] Turlejski S., Optymalizacja parametrów termodynamicznych komunalnych systemów ciepłowniczych, Seminarium: Problemy Ciepłownictwa Komunalnego, Krzeszna 1996

[105] Turlejski S., Niemyjski O., Narowski P., Komputerowe wspomaganie eksploatacji i planowania rozwoju systemów ciepłowniczych. III Krajowa Konferencja „Modernizacja Miejskich Systemów Ciepłowniczych w Polsce" Międzyzdroje 1994,

[106] Turlejski S., Niemyjski O., Narowski P., Bazy danych miejskich systemów ciepłowniczych z wykorzystaniem programów komputerowego wspomagania projektowania - CAD oraz systemów informacji geograficznej - GIS. IV Krajowa Konferencja „Modernizacja Miejskich Systemów Ciepłowniczych w Polsce" Międzyzdroje 1995,

[107] Walden H., Mechanika płynów, WPW Warszawa 1988,

[108] Wasilewski W., Turlejski S., Komputerowa symulacja procesu czerpania ciepłej wody, Politechnika Warszawska PR-8/4, Raport D-1/83, Warszawa 1983,

[109] Wasilewski W., Straty ciepła rur preizolowanych zagłębionych w gruncie. COW 1999/5

[110] Wolters A., Zielke W., Simulation of the transient behaviour of district heating systems - validation of a thermo-hydraulic numerical model, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[111] Wojdyga K., Niemyjski O., Badania poligonowe i symulacyjne strat ciepła w sieciach ciepłowniczych, III Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje 1999,

[112] Wiśniewski S. Wymiana ciepła WNT Warszawa 2000,

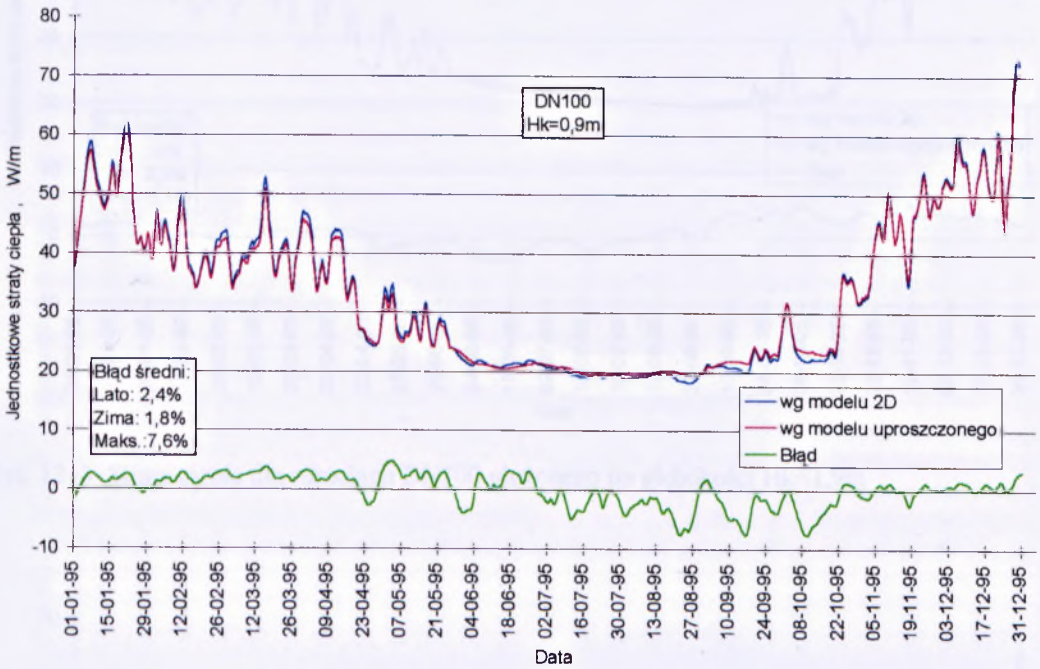
[113] Valdimarsson P., Korsman J., Use of a graph-theoretical calculation model for water flow in district heating systems - experience from Nuon, Holland, 6-th International Symposium on District Heating and Cooling Simulation, Reykjavik 1997,

[114] Żukowski M., Zastosowanie metody oczkowej do symulacji przepływów w pierścieniowych układach hydraulicznych na przykładzie sieci cieplnej w Suwałkach, VI Krajowa Konferencja „Modernizacja Miejskich Systemów Ciepłowniczych w Polsce" Międzyzdroje 1997

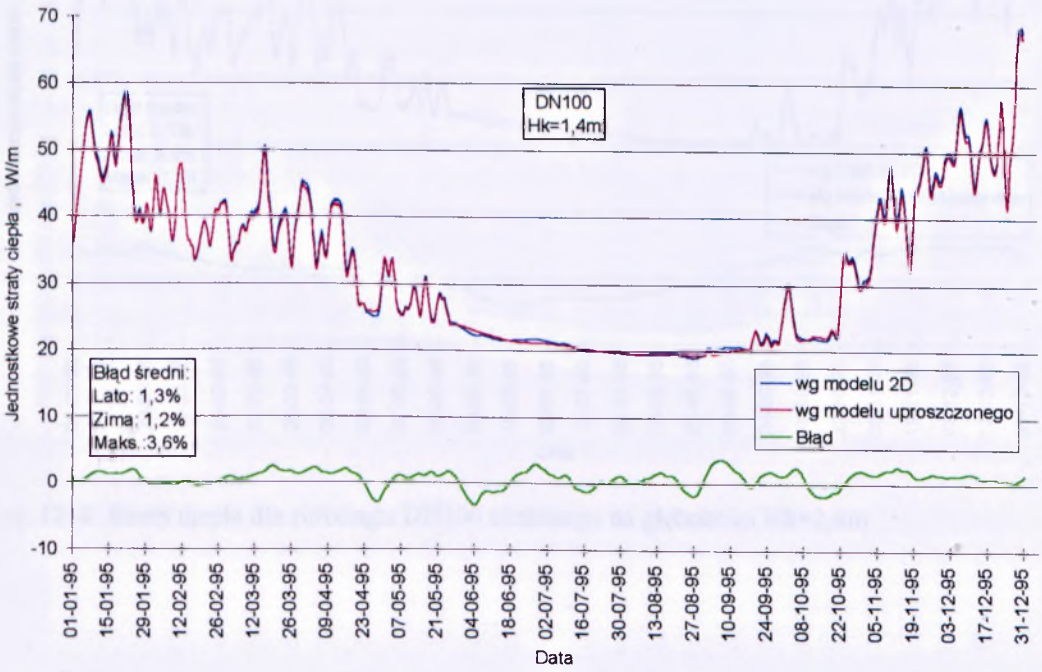
[115] Żukowski M., Zastosowanie metody oczkowej symulacji rozpływu wody w pierścieniowej sieci przewodów w stanach ustalonych w ogrzewnictwie, COW 7/1998

12. Załączniki

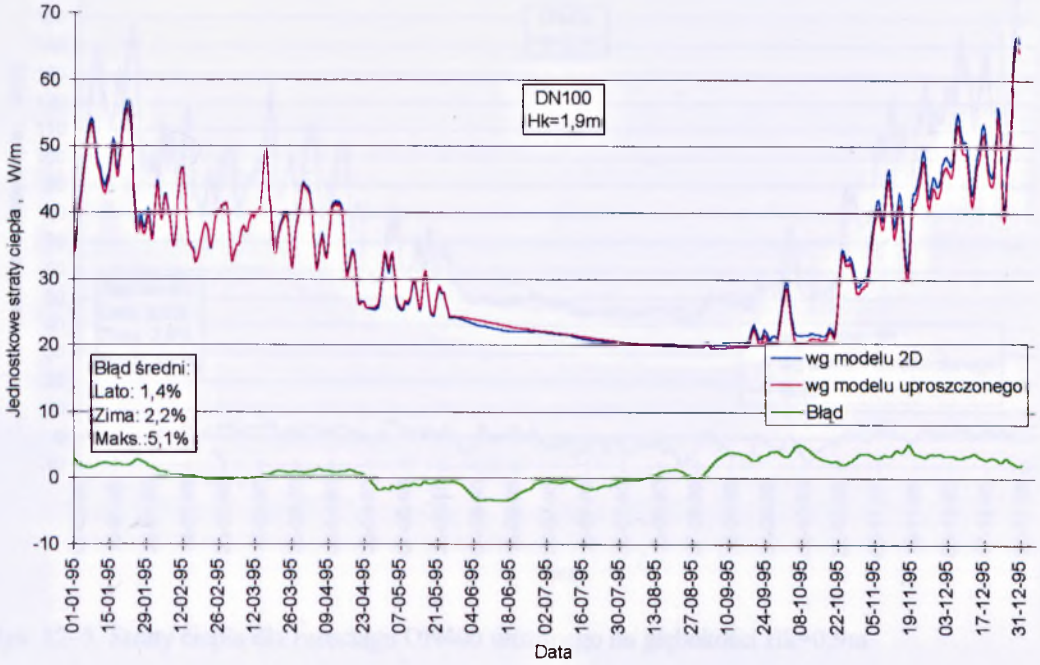
12.1 Wyniki obliczeń testowych zbieżności modelu dwuwymiarowego z modelem uproszczonym.



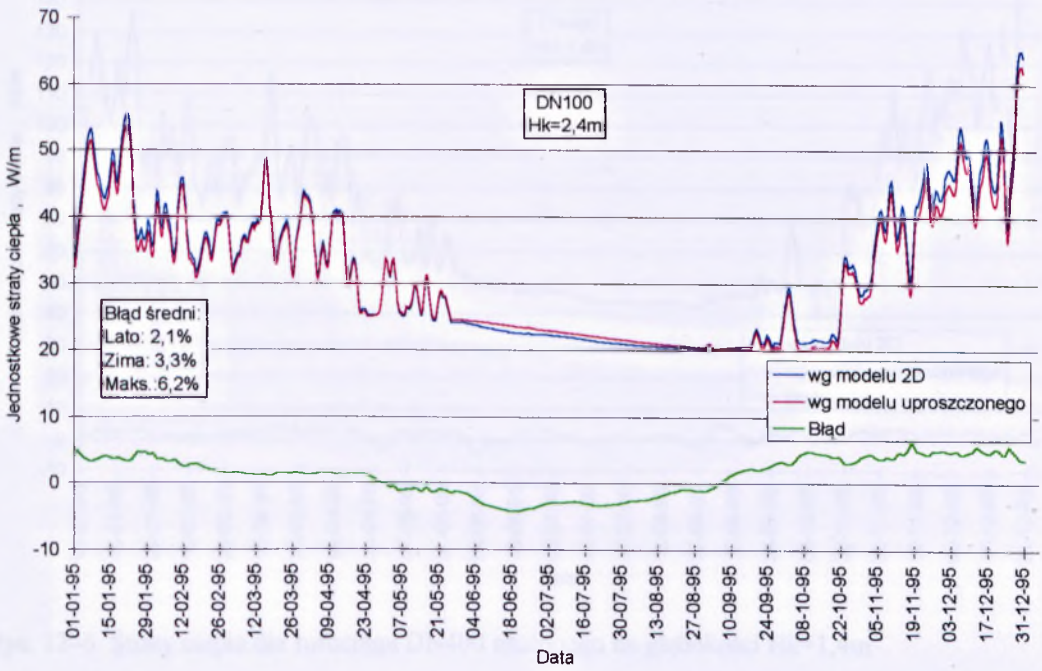
Rys. 12–1 Straty ciepła dla rurociągu DN100 ułożonego na głębokości Hk=0,9m



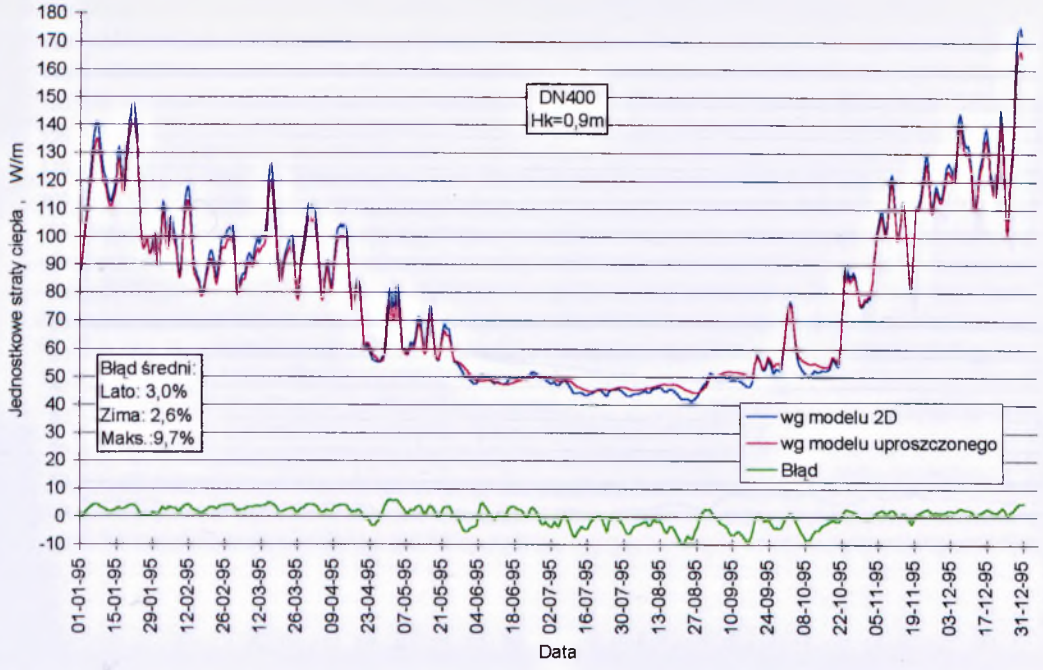
Rys. 12–2 Straty ciepła dla rurociągu DN100 ułożonego na głębokości Hk=1,4m



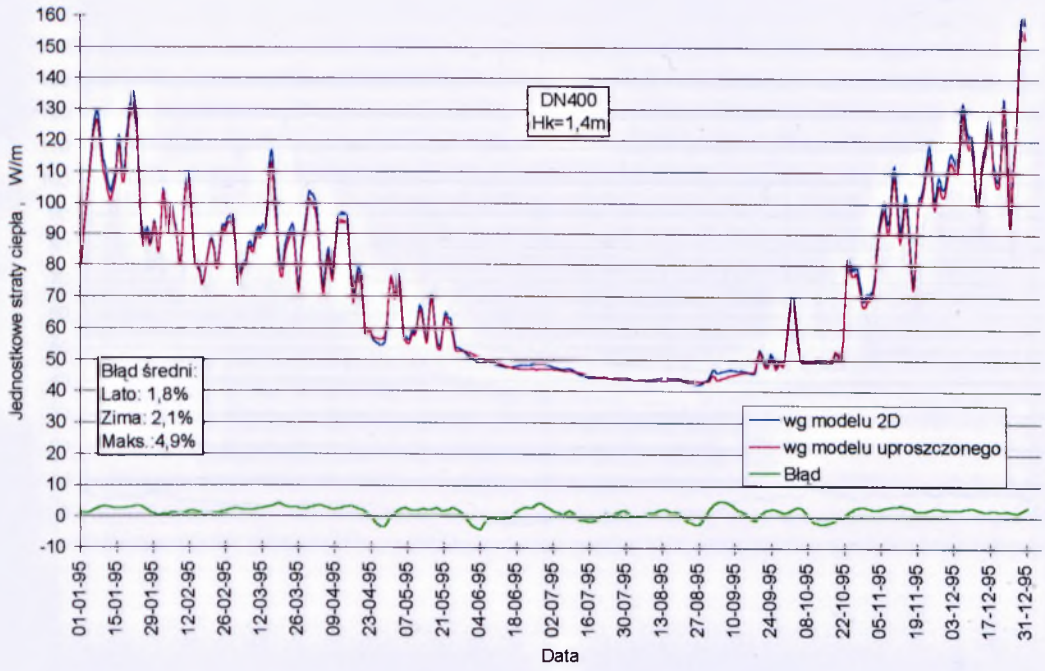
Rys. 12–3 Straty ciepła dla rurociągu DN100 ułożonego na głębokości Hk=1,9m



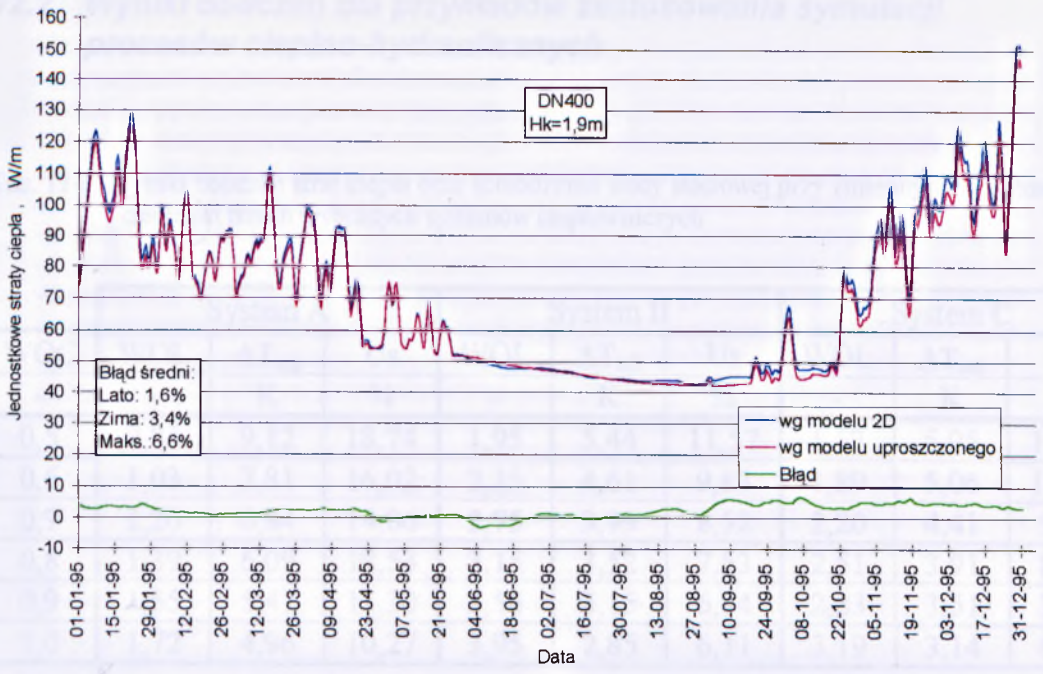
Rys. 12–4 Straty ciepła dla rurociągu DN100 ułożonego na głębokości Hk=2,4m



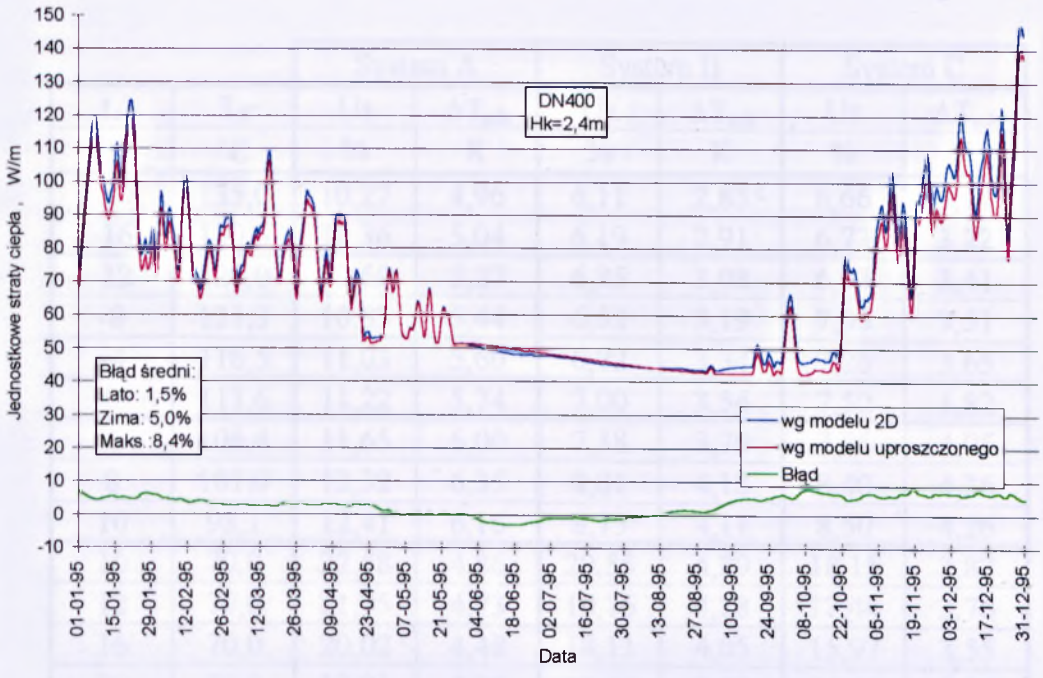
Rys. 12–5 Straty ciepła dla rurociągu DN400 ułożonego na głębokości Hk=0,9m



Rys. 12–6 Straty ciepła dla rurociągu DN400 ułożonego na głębokości Hk=1,4m



Rys. 12–7 Straty ciepła dla rurociągu DN400 ułożonego na głębokości Hk=1,9m



Rys. 12–8 Straty ciepła dla rurociągu DN400 ułożonego na głębokości Hk=2,4m

12.2 Wyniki obliczeń dla przykładów zastosowania symulacji procesów cieplno-hydraulicznych

Tab. 12-1 Wyniki obliczeń strat ciepła oraz schłodzenia wody sieciowej przy zmiennym obciążeniu cieplnym trzech wybranych systemów ciepłowniczych

	System A			System B			System C		
WOC	WOL	ΔT_{sch}	Us	WOL	ΔT_{sch}	Us	WOL	ΔT_{sch}	Us
-	-	K	%	-	K	%	-	K	%
0,5	0,85	9,12	18,74	1,95	5,44	11,57	1,57	5,95	12,62
0,6	1,03	7,81	16,02	2,35	4,61	9,83	1,89	5,06	10,73
0,7	1,20	6,84	14,06	2,75	3,99	8,52	2,20	4,41	9,34
0,8	1,39	6,09	12,53	3,15	3,52	7,53	2,51	3,91	8,28
0,9	1,55	5,47	11,30	3,56	3,15	6,74	2,83	3,51	7,43
1,0	1,72	4,96	10,27	3,95	2,85	6,11	3,19	3,14	6,66

Tab. 12-2 Wyniki obliczeń strat ciepła oraz schłodzenia wody sieciowej w ciągu roku

		System A		System B		System C	
t_e	T_Z	Us	ΔT_{sch}	Us	ΔT_{sch}	Us	ΔT_{sch}
°C	°C	%	K	%	K	%	K
-20	135,0	10,27	4,96	6,11	2,85	6,66	3,14
-16	130,6	10,36	5,04	6,19	2,91	6,73	3,22
-12	126,0	10,59	5,27	6,35	3,08	6,93	3,41
-8	121,3	10,83	5,44	6,52	3,19	7,08	3,51
-4	116,5	11,03	5,60	6,72	3,34	7,26	3,65
0	111,6	11,22	5,74	7,00	3,54	7,50	3,82
4	106,4	11,65	6,00	7,38	3,79	7,86	4,05
8	101,0	12,32	6,35	8,01	4,18	8,40	4,36
10	98,1	12,41	6,16	8,15	4,11	8,50	4,26
10	70,0	22,58	4,86	20,55	4,39	18,15	3,87
12	70,0	21,75	4,73	19,76	4,28	17,44	3,76
16	70,0	20,02	4,48	18,13	4,05	15,97	3,55
20	70,0	18,21	4,22	16,45	3,82	14,45	3,34

WOC - współczynnik obciążenia cieplnego,
WOL - współczynnik obciążenia liniowego,
ΔT_{sch} - schłodzenie wody sieciowej , K
Us - udział strat ciepła w produkcji energii cieplnej , %
t_e - temperatura powietrza zewnętrznego , °C
T_Z - temperatura wody sieciowej (zasilanie) , °C

12.3 Wyniki pomiarów fali temperaturowej

Tab. 12-3 Wyniki pomiarów fali temperaturowej w komorze K1 (24-06-1998)

Data/Czas	Temp.
	°C
24-06-98 9:05	63,10
24-06-98 9:07	63,30
24-06-98 9:13	63,70
24-06-98 9:15	63,80
24-06-98 9:22	63,90
24-06-98 9:26	63,90
24-06-98 9:30	63,90
24-06-98 9:40	64,00
24-06-98 9:45	64,10
24-06-98 9:51	64,20
24-06-98 9:56	64,20
24-06-98 10:00	64,30
24-06-98 10:12	64,60
24-06-98 10:33	63,20
24-06-98 10:40	64,00
24-06-98 10:48	64,30
24-06-98 11:01	64,30
24-06-98 11:05	64,30
24-06-98 11:25	62,70
24-06-98 11:41	62,70
24-06-98 11:42	63,00
24-06-98 11:43	63,20
24-06-98 11:44	63,40
24-06-98 11:45	63,80
24-06-98 11:46	64,10
24-06-98 11:47	64,30
24-06-98 11:48	64,40
24-06-98 11:50	64,50
24-06-98 11:52	64,70
24-06-98 11:55	64,80
24-06-98 12:03	64,50
24-06-98 12:05	64,40
24-06-98 12:10	64,00
24-06-98 12:15	63,80
24-06-98 12:23	64,00
24-06-98 12:35	64,20
24-06-98 12:38	64,50
24-06-98 12:42	64,70
24-06-98 12:43	64,80
24-06-98 12:45	65,00
24-06-98 12:47	65,10

Data/Czas	Temp.
	°C
24-06-98 12:50	65,20
24-06-98 12:55	65,40
24-06-98 13:08	65,50
24-06-98 13:13	65,70
24-06-98 13:18	65,80
24-06-98 13:22	65,90
24-06-98 13:25	65,70
24-06-98 13:29	65,60
24-06-98 13:33	65,40
24-06-98 13:40	65,70
24-06-98 13:42	65,90
24-06-98 13:43	66,00
24-06-98 13:44	66,20
24-06-98 13:45	66,50
24-06-98 13:46	66,80
24-06-98 13:47	67,00
24-06-98 13:48	67,40
24-06-98 13:49	67,70
24-06-98 13:50	68,00
24-06-98 13:51	68,30
24-06-98 13:53	69,00
24-06-98 13:54	69,30
24-06-98 13:55	69,70
24-06-98 13:56	70,00
24-06-98 13:57	70,40
24-06-98 13:59	71,00
24-06-98 14:00	71,30
24-06-98 14:01	71,60
24-06-98 14:02	72,10
24-06-98 14:03	72,50
24-06-98 14:04	72,80
24-06-98 14:05	73,00
24-06-98 14:08	73,50
24-06-98 14:09	73,80
24-06-98 14:10	73,90
24-06-98 14:11	74,10
24-06-98 14:13	74,40
24-06-98 14:14	74,50
24-06-98 14:15	74,60
24-06-98 14:16	74,70
24-06-98 14:17	74,80

Data/Czas	Temp.
	°C
24-06-98 14:18	74,90
24-06-98 14:19	74,90
24-06-98 14:20	75,00
24-06-98 14:22	75,00
24-06-98 14:24	74,90
24-06-98 14:27	74,90
24-06-98 14:29	74,80
24-06-98 14:31	74,70
24-06-98 14:33	74,60
24-06-98 14:35	74,50
24-06-98 14:36	74,50
24-06-98 14:37	74,40
24-06-98 14:39	74,30
24-06-98 14:40	74,30
24-06-98 14:41	74,20
24-06-98 14:42	74,20
24-06-98 14:43	74,10
24-06-98 14:45	74,10
24-06-98 14:46	74,00
24-06-98 14:49	74,00
24-06-98 14:50	73,90
24-06-98 14:52	73,90
24-06-98 14:53	74,00
24-06-98 14:59	74,20
24-06-98 15:03	74,30
24-06-98 15:04	74,30
24-06-98 15:07	74,40
24-06-98 15:10	74,50
24-06-98 15:15	74,40
24-06-98 15:17	74,50
24-06-98 15:23	74,30
24-06-98 15:26	74,30
24-06-98 15:30	74,30
24-06-98 15:33	74,20
24-06-98 15:35	74,10
24-06-98 15:36	73,90
24-06-98 15:37	73,80
24-06-98 15:38	73,60
24-06-98 15:39	73,30
24-06-98 15:40	73,00
24-06-98 15:41	72,60
24-06-98 15:42	72,30
24-06-98 15:43	71,80

Data/Czas	Temp.
	°C
24-06-98 15:44	71,40
24-06-98 15:45	71,10
24-06-98 15:46	70,80
24-06-98 15:47	70,30
24-06-98 15:48	70,10
24-06-98 15:49	69,70
24-06-98 15:50	69,40
24-06-98 15:51	69,10
24-06-98 15:52	68,80
24-06-98 15:54	68,40
24-06-98 15:56	68,00
24-06-98 15:58	67,70
24-06-98 15:59	67,50
24-06-98 16:00	67,30
24-06-98 16:01	67,20
24-06-98 16:02	67,00
24-06-98 16:03	66,90
24-06-98 16:04	66,70
24-06-98 16:05	66,70
24-06-98 16:06	66,60
24-06-98 16:07	66,40
24-06-98 16:08	66,40
24-06-98 16:09	66,30
24-06-98 16:10	66,20
24-06-98 16:11	66,10
24-06-98 16:12	66,10
24-06-98 16:13	66,00
24-06-98 16:14	66,00
24-06-98 16:15	65,90
24-06-98 16:16	65,90
24-06-98 16:17	65,80
24-06-98 16:18	65,70
24-06-98 16:20	65,60
24-06-98 16:21	65,50
24-06-98 16:22	65,50
24-06-98 16:23	65,50
24-06-98 16:24	65,40
24-06-98 16:25	65,40
24-06-98 16:28	65,30
24-06-98 16:33	65,10
24-06-98 16:40	65,00

Tab. 12-4 Wyniki pomiarów przepływu wody sieciowej w komorze K1 (24-06-1998)

Data/Czas	Przepływ
	kg/s
24-06-98 9:05	102,2
24-06-98 9:31	101,3
24-06-98 9:45	102,2
24-06-98 10:41	101,2
24-06-98 10:48	94,4
24-06-98 11:01	94,4
24-06-98 11:05	95,8
24-06-98 11:43	95,0
24-06-98 11:50	95,0
24-06-98 12:43	95,8
24-06-98 13:06	96,3
24-06-98 13:22	98,6
24-06-98 13:38	100,3
24-06-98 13:49	102,2
24-06-98 13:53	102,2
24-06-98 13:59	102,2
24-06-98 14:10	97,1
24-06-98 14:13	102,2
24-06-98 14:20	99,7
24-06-98 14:22	102,2
24-06-98 14:31	102,2
24-06-98 14:33	99,7
24-06-98 14:42	99,7
24-06-98 14:52	98,4
24-06-98 14:59	101,0
24-06-98 15:03	101,0
24-06-98 15:07	99,7
24-06-98 15:15	99,7
24-06-98 15:30	99,7
24-06-98 15:33	98,4
24-06-98 15:44	98,4
24-06-98 15:46	93,3
24-06-98 15:49	93,3
24-06-98 15:57	92,7
24-06-98 16:00	92,0
24-06-98 16:05	93,3
24-06-98 16:20	94,6
24-06-98 16:23	98,4
24-06-98 16:40	94,6
Średnio	98,2

Tab. 12-5 Wyniki pomiarów fali temperaturowej w komorze K2 (24-06-1998)

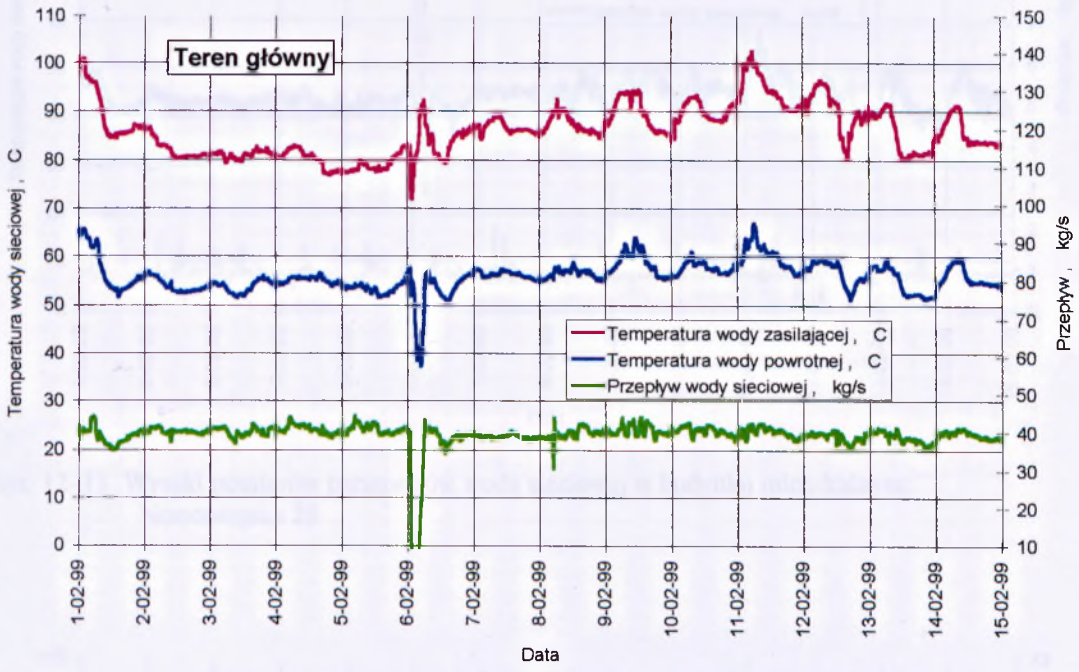
Data/Czas	Temp. (pomiar)	Temp. (korekta)
	°C	°C
24-06-98 9:30	63,60	60,98
24-06-98 9:40	64,10	61,48
24-06-98 9:50	64,60	61,97
24-06-98 10:00	64,90	62,27
24-06-98 10:10	65,00	62,37
24-06-98 10:20	65,20	62,56
24-06-98 10:30	65,50	62,86
24-06-98 10:40	65,50	62,86
24-06-98 10:50	65,70	63,06
24-06-98 11:00	65,60	62,96
24-06-98 11:05	65,50	62,86
24-06-98 11:10	65,40	62,76
24-06-98 11:15	65,30	62,66
24-06-98 11:20	65,10	62,46
24-06-98 11:25	65,00	62,37
24-06-98 11:30	65,00	62,37
24-06-98 11:35	65,00	62,37
24-06-98 11:40	65,10	62,46
24-06-98 11:45	65,20	62,56
24-06-98 11:50	65,60	62,96
24-06-98 11:55	65,80	63,16
24-06-98 12:00	65,90	63,26
24-06-98 12:05	65,90	63,26
24-06-98 12:10	66,40	63,75
24-06-98 12:15	66,40	63,75
24-06-98 12:20	66,50	63,85
24-06-98 12:25	66,40	63,75
24-06-98 12:30	66,10	63,46
24-06-98 12:35	66,40	63,75
24-06-98 12:40	66,40	63,75
24-06-98 12:45	66,50	63,85
24-06-98 12:50	66,60	63,95
24-06-98 12:55	66,90	64,25
24-06-98 13:00	67,20	64,55
24-06-98 13:05	67,60	64,95
24-06-98 13:10	67,80	65,15
24-06-98 13:15	67,80	65,15
24-06-98 13:20	67,80	65,15
24-06-98 13:25	67,90	65,24
24-06-98 13:30	68,20	65,54
24-06-98 13:35	68,30	65,64
24-06-98 13:40	68,30	65,64
24-06-98 13:45	68,20	65,54
24-06-98 13:50	68,00	65,34

Data/Czas	Temp. (pomiar)	Temp. (korekta)
	°C	°C
24-06-98 13:55	68,00	65,34
24-06-98 14:00	68,50	65,84
24-06-98 14:01	68,70	66,04
24-06-98 14:02	69,00	66,34
24-06-98 14:03	69,20	66,54
24-06-98 14:04	69,50	66,84
24-06-98 14:05	69,80	67,14
24-06-98 14:06	70,10	67,44
24-06-98 14:07	70,30	67,64
24-06-98 14:08	70,70	68,04
24-06-98 14:09	71,00	68,34
24-06-98 14:10	71,40	68,74
24-06-98 14:11	71,60	68,94
24-06-98 14:12	72,00	69,34
24-06-98 14:13	72,30	69,65
24-06-98 14:14	72,70	70,05
24-06-98 14:15	73,00	70,35
24-06-98 14:16	73,20	70,55
24-06-98 14:17	73,50	70,85
24-06-98 14:18	73,90	71,25
24-06-98 14:19	74,20	71,56
24-06-98 14:20	74,80	72,16
24-06-98 14:21	75,00	72,36
24-06-98 14:22	75,10	72,47
24-06-98 14:23	75,20	72,57
24-06-98 14:24	75,30	72,67
24-06-98 14:25	75,60	72,97
24-06-98 14:26	75,80	73,17
24-06-98 14:27	75,90	73,27
24-06-98 14:28	76,00	73,38
24-06-98 14:29	76,10	73,48
24-06-98 14:30	76,40	73,78
24-06-98 14:31	76,60	73,98
24-06-98 14:32	76,90	74,29
24-06-98 14:33	77,00	74,39
24-06-98 14:34	77,10	74,49
24-06-98 14:35	77,10	74,49
24-06-98 14:36	77,20	74,59
24-06-98 14:37	77,20	74,59
24-06-98 14:38	77,30	74,69
24-06-98 14:39	77,30	74,69
24-06-98 14:40	77,30	74,69
24-06-98 14:41	77,30	74,69
24-06-98 14:42	77,30	74,69

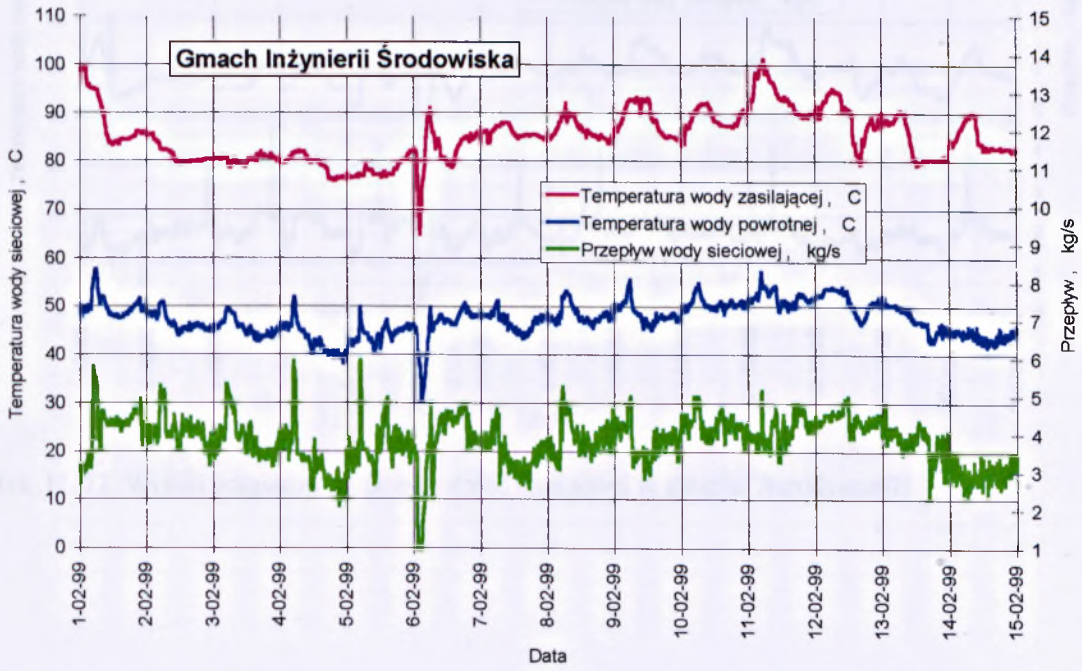
Data/Czas	Temp. (pomiar)	Temp. (korekta)
	°C	°C
24-06-98 14:43	77,30	74,69
24-06-98 14:44	77,30	74,69
24-06-98 14:45	77,30	74,69
24-06-98 14:46	77,20	74,59
24-06-98 14:47	77,20	74,59
24-06-98 14:48	77,10	74,49
24-06-98 14:49	77,10	74,49
24-06-98 14:50	77,00	74,39
24-06-98 14:55	76,90	74,29
24-06-98 15:00	76,60	73,98
24-06-98 15:05	76,50	73,88
24-06-98 15:10	76,50	73,88
24-06-98 15:15	76,50	73,88
24-06-98 15:20	76,90	74,29
24-06-98 15:25	77,00	74,39
24-06-98 15:30	77,00	74,39
24-06-98 15:35	77,00	74,39
24-06-98 15:40	76,90	74,29
24-06-98 15:45	76,90	74,29
24-06-98 15:47	76,80	74,19
24-06-98 15:50	76,80	74,19
24-06-98 15:52	76,70	74,08
24-06-98 15:53	76,60	73,98

Data/Czas	Temp. (pomiar)	Temp. (korekta)
	°C	°C
24-06-98 15:54	76,50	73,88
24-06-98 15:55	76,40	73,78
24-06-98 15:56	76,20	73,58
24-06-98 15:57	76,00	73,38
24-06-98 15:58	75,80	73,17
24-06-98 15:59	75,40	72,77
24-06-98 16:00	75,00	72,36
24-06-98 16:01	74,90	72,26
24-06-98 16:02	74,50	71,86
24-06-98 16:03	74,00	71,36
24-06-98 16:04	73,70	71,05
24-06-98 16:05	73,10	70,45
24-06-98 16:06	72,50	69,85
24-06-98 16:07	72,30	69,65
24-06-98 16:08	72,00	69,34
24-06-98 16:09	71,70	69,04
24-06-98 16:10	71,40	68,74
24-06-98 16:11	71,20	68,54
24-06-98 16:12	70,90	68,24
24-06-98 16:13	70,70	68,04
24-06-98 16:14	70,50	67,84
24-06-98 16:15	70,20	67,54

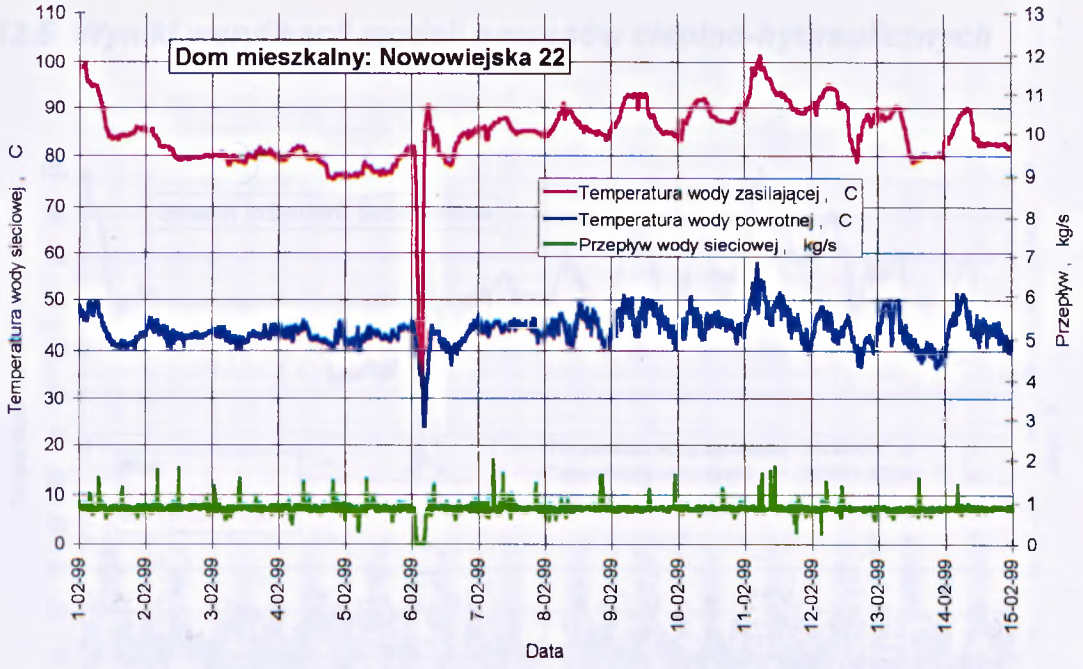
12.4 Wyniki rejestracji parametrów wody sieciowej na terenie Politechniki Warszawskiej w dniach: 1.02.1999 - 14.02.1999



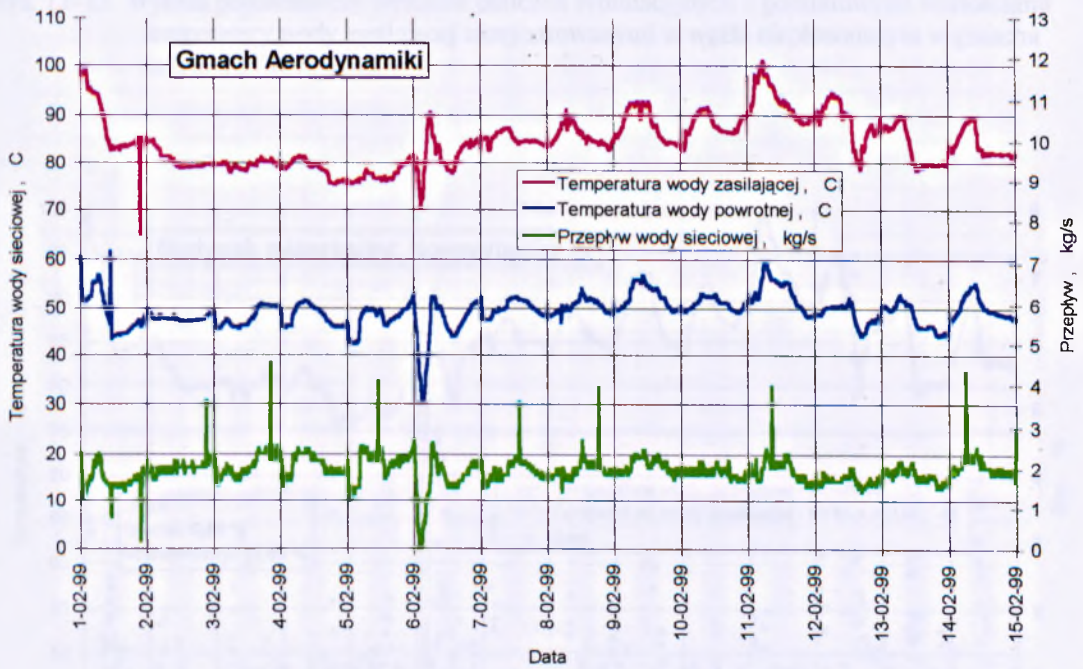
Rys. 12–9 Wyniki pomiarów parametrów wody sieciowej na terenie głównym Politechniki Warszawskiej



Rys. 12–10 Wyniki pomiarów parametrów wody sieciowej w gmachu Inżynierii Środowiska

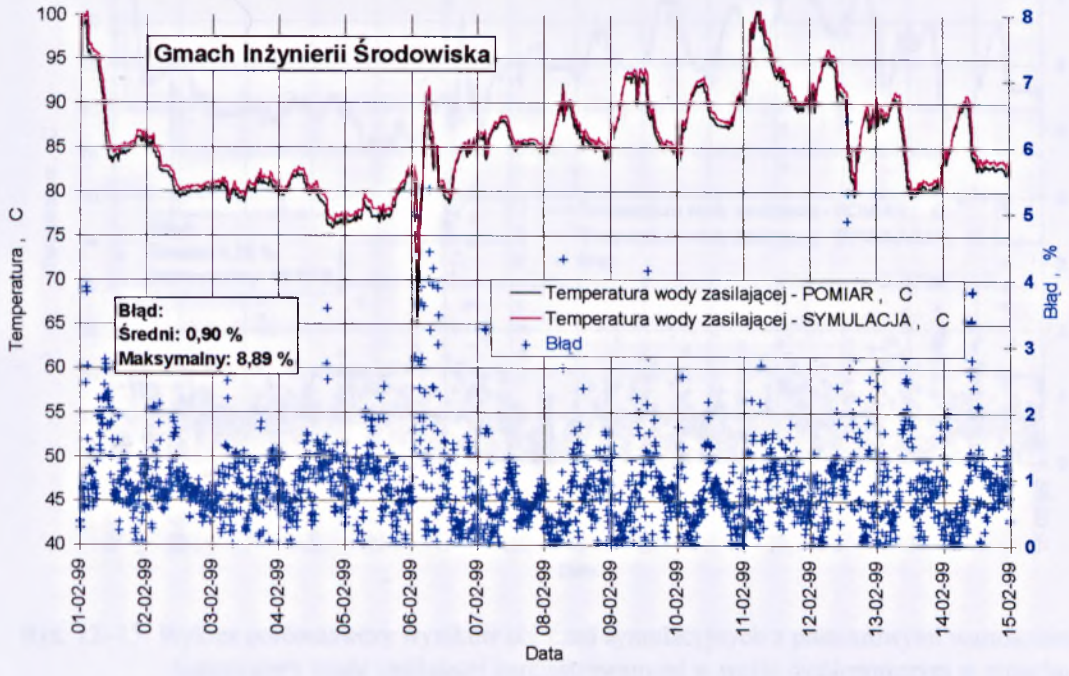


Rys. 12–11 Wyniki pomiarów parametrów wody sieciowej w budynku mieszkalnym: Nowowiejska 22

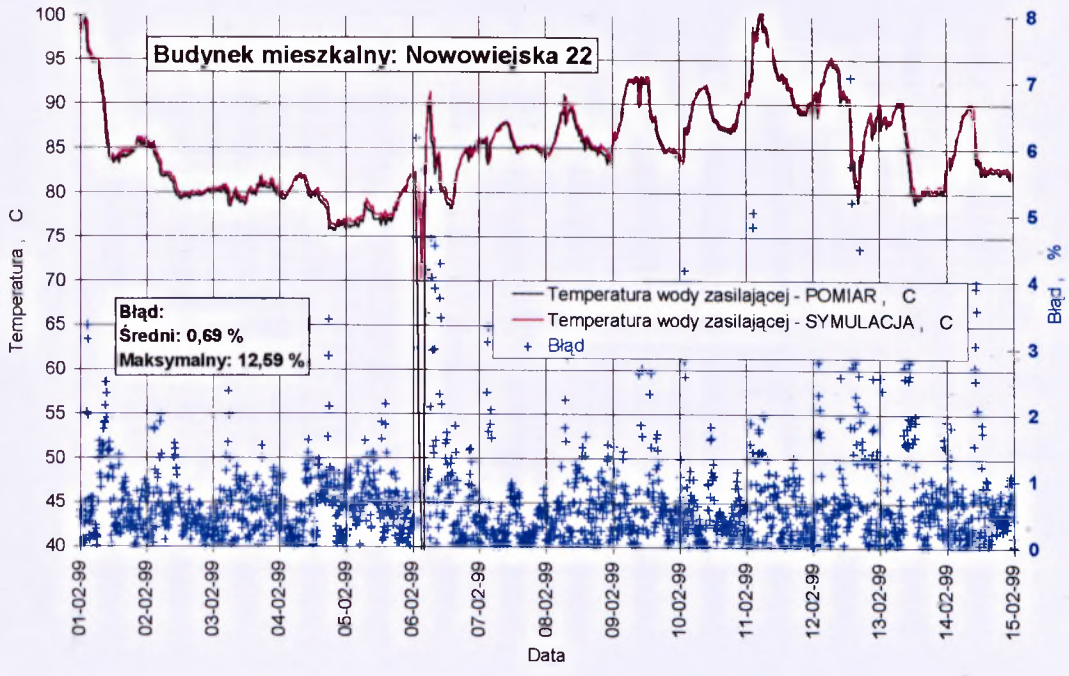


Rys. 12–12 Wyniki pomiarów parametrów wody sieciowej w gmachu Aerodynamiki

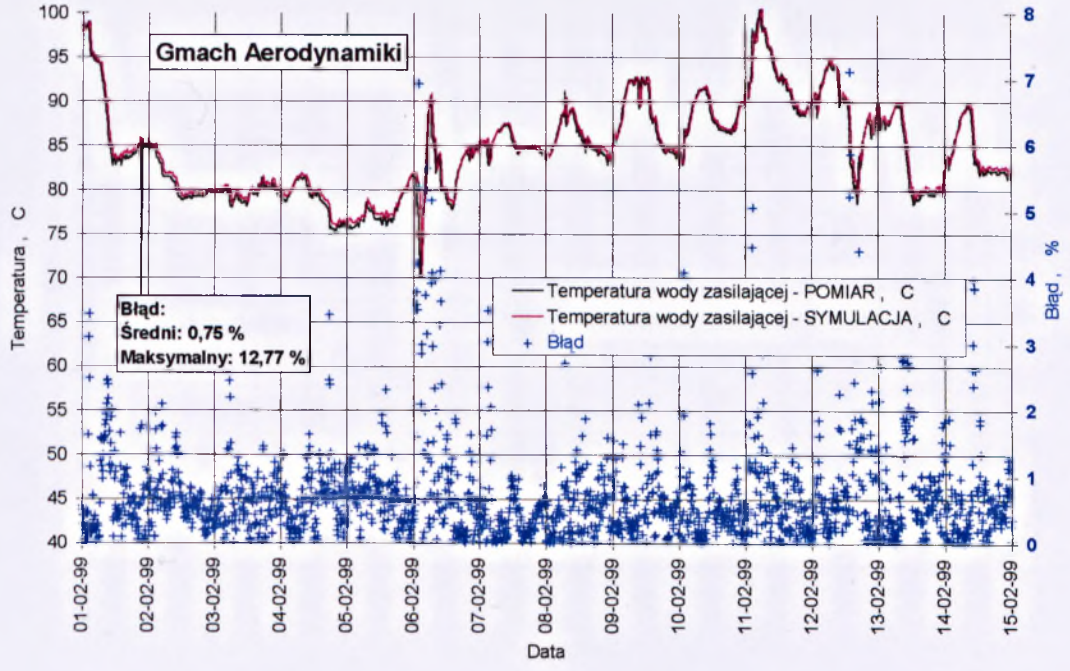
12.5 Wyniki weryfikacji modeli procesów cieplno-hydraulicznych



Rys. 12–13 Wykres porównawczy wyników obliczeń symulacyjnych z pomiarowymi wartościami temperatury wody zasilającej zarejestrowanymi w węźle ciepłowniczym w gmachu Inżynierii Środowiska.



Rys. 12–14 Wykres porównawczy wyników obliczeń symulacyjnych z pomiarowymi wartościami temperatury wody zasilającej zarejestrowanymi w węźle ciepłowniczym w budynku mieszkalnym przy ulicy Nowowiejskiej 22.



Rys. 12–15 Wykres porównawczy wyników obliczeń symulacyjnych z pomiarowymi wartościami temperatury wody zasilającej zarejestrowanymi w węźle ciepłowniczym w gmachu Aerodynamiki.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Warszawskiej
R.005503
4000000000064839

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy: Modelowanie procesów cieplno-hydraulicznych w sieciach ciepłowniczych

Liczba stron: 171
tablic: 12
wykresów:84

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
R.005503
Biblioteka Główna

Nazwisko i imię autora: Olgierd Niemyjski

Streszczenie

Tezą pracy jest modelowanie dynamicznych procesów cieplnych i hydraulicznych zachodzących w sieciach ciepłowniczych. Obejmuje ona swym zakresem trzy tematy stanowiące odrębne rozdziały pracy:

1. modelowanie zjawisk przepływu wody w pierścieniowych sieciach ciepłowniczych,
2. modelowanie procesów cieplnych związanych ze stratami ciepła sieci kanałowych,
3. modelowanie stanów dynamicznych pracy sieci.

W rozdziale 4 zamieszczono opis modelu przepływu wody w sieciach ciepłowniczych począwszy od analizy strukturalnej sieci z wykorzystaniem teorii grafu a kończąc na metodach numerycznych obliczania przepływu wody w układach pierścieniowych sieci. Przedstawiono sposoby optymalizacji algorytmów zapisu macierzy w pamięci komputera z zastosowaniem technologii macierzy rzadkich. Na podstawie danych o kilkunastu systemach ciepłowniczych w Polsce wykonano analizę efektywności stosowania tej technologii pod względem wykorzystania pamięci komputera oraz szybkości wykonywania operacji macierzowych.

Model strat ciepła sieci kanałowych zbudowano w oparciu o metodę „źródła i upustu" z uwzględnieniem bezwładności cieplnej gruntu (rozdział 5). Przeprowadzono analizę porównawczą z modelem dwuwymiarowym określającą jego wrażliwość na błąd określenia danych wejściowych takich jak: współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu, wielkość oporu przenikania ciepła dla izolacji rurociągu, głębokość prowadzenia kanału ciepłowniczego.

Trzecią część pracy stanowi opis modelu procesów transportu ciepła, ściśle związanego z poprzednimi modelami a opartego na metodzie elementów. Umożliwia on przeprowadzenia symulacji pracy sieci ciepłowniczej przy dynamicznie zmieniających się warunkach brzegowych (temperatura wody sieciowej, temperatura powietrza zewnętrznego).

Opracowane modele zostały zweryfikowane pomiarami empirycznymi, które wykazały dobrą zgodność wyników uzyskanych z obliczeń symulacyjnych z wynikami pomiarów.

W ostatniej części pracy przedstawiono przykłady zastosowania symulacji procesów cieplno-hydraulicznych w rozpoznawaniu właściwości systemów ciepłowniczych takich jak:

- wpływ niedociążenia systemu ciepłowniczego na wielkość strat ciepła oraz schłodzenie wody sieciowej w rurociągach,
- zmiany strat ciepła w ciągu roku,
- wpływ dobowych zmian zapotrzebowania ciepła na wartość strat ciepła w okresie letnim,
- udział procentowy sieci magistralnych i rozdzielczych w całkowitych stratach ciepła.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA
00-653 Warszawa, Nowowiejska 20, tel. 621-45-60, fax 625-73-77

Warszawa, dnia 19.03..2001 r

Nr WIŚ - 29/19 /2001

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
R.005503
Biblioteka Główna

Biblioteka Główna
Politechniki Warszawskiej
00-661 Warszawa
ul. Plac Politechniki 1

Przesyłam w załączeniu 2 egzemplarze rozprawy doktorskiej

mgr inż. Olgierda NIEMYJSKIEGO

na temat: ***„Modelowanie procesów cieplno-hydraulicznych w sieciach ciepłowniczych"***

z prośbą o udostępnienie rozprawy zainteresowanym w związku z dyskusją publiczną, która odbędzie się w dniu 10 kwietnia 2001 r. o godz. 12^{00} w Sali Rady Wydziału nr 115 w Warszawie ul. Nowowiejska 20.

Załącznik

DZIEKAN

prof. dr hab. inż. Janusz Kindler