

Łukasz Falba¹⁾, Zbigniew Pietrzyk¹⁾, Adam Smyk^{1,2)}, Adam Twarowski^{1,2)}

¹⁾ *Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Ciepłownictwa SPEC S.A.*

²⁾ *Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej*

WYKORZYSTANIE METODY NUMERYCZNEJ MES ORAZ POMIARÓW STRUMIENIA CIEPŁA DO OBLICZANIA STRAT CIEPŁA W MIEJSKIEJ SIECI CIEPŁOWNICZEJ

Słowa kluczowe: Metoda Elementów Skończonych (MES), straty ciepła, miejska sieć ciepłownicza.

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienie wyznaczania strat ciepła w sieci ciepłowniczej (m.s.c.). Wyniki obliczeń strat przesyłania ciepła z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES) dla przykładowych sieci kanałowych porównano z wynikami uzyskanymi innymi metodami. Przedstawiono również wybrane wyniki pomiarów strat ciepła. Zmienność strat przesyłania ciepła w funkcji temperatur wody sieciowej ma istotne znaczenie przy optymalizacji wykresów regulacyjnych. Jest również niezbędna dla oceny konsekwencji wzrostu temperatur wody sieciowej w okresie letnim dla potrzeb wytwarzania chłodu z wykorzystaniem ciepła sieciowego.

1. Wstęp

Straty ciepła w miejskich sieciach ciepłowniczych są istotnym problemem zarówno ze względów energetycznych jak i ekonomicznych. Obecne wytyczne Unii Europejskiej nakładają, bądź wręcz zmuszają do podnoszenia efektywności energetycznej, a więc ograniczania strat energii, zarówno w trakcie jej konwersji jak i przesyłania. Natomiast z punktu widzenia ekonomii każda strata energii to dodatkowy koszt produktu końcowego, czyli ciepła w budynku klienta. Ciepłownictwo konkuruje cenowo z innymi źródłami energii, przede wszystkim z gazem ziemnym, olejem opałowym oraz energią elektryczną, tak więc w celu utrzymywania konkurencyjnych cen musi starać się ograniczać koszty, w tym straty ciepła.

Ograniczanie strat ciepła w trakcie jego przesyłania jest coraz trudniejsze, ponieważ cały czas następuje zmniejszanie ilości energii zużywanej przez klientów, natomiast długość sieci ciepłowniczej się nie zmienia lub nawet wzrasta. Wzrost zużycia ciepła i mocy zamówionej, bądź przynajmniej zahamowanie trendów spadkowych tych wielkości, jest obecnie możliwe tylko poprzez przyłączanie do sieci nowych odbiorców. Wynika z tego, że w celu pozostania konkurencyjnym na coraz trudniejszym i różnorodnym rynku dostawców energii, ciepłownictwo musi starać się ograniczać straty ciepła wszelkimi możliwymi sposobami.

Minimalizowanie strat ciepła w trakcie przesyłu możliwe jest na kilka sposobów. Pierwszym z nich jest obniżanie temperatur wody sieciowej, zarówno zasilającej jak i powrotnej. Jednak nie jest możliwe dowolne obniżanie temperatury zasilania, ponieważ konieczne jest dotrzymanie odpowiedniej jakości ciepła dostarczanego do każdego klienta. Drugą możliwością ograniczania strat ciepła jest wymiana sieci zdegradowanych na sieci nowe o zwiększonej grubości izolacji. Niestety wzrost grubości izolacji ciągnie za sobą wzrost kosztów sieci, a także może powodować problemy techniczne związane ze sztywnością izolacji oraz przenoszeniem sił wywołanych naprężeniami termicznymi. Konieczne jest więc optymalizowanie grubości i jakości izolacji z uwagi koszty i ograniczenia techniczne, nie można dowolnie zwiększać warstwy izolacji. Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na straty ciepła jest usytuowanie sieci. W przypadku sieci podziemnych o stratach energii nie decyduje bezpośrednio temperatura zewnętrzna, ale temperatura gruntu, która jest zależna od pory roku i głębokości. Tak więc istnieje możliwość optymalnego ułożenia sieci w zależności od temperatur wody sieciowej i ilości ciepła przesyłanego danym fragmentem sieci w poszczególnych okresach roku.

Do określenia strat ciepła wykorzystuje się różne modele analityczne i numeryczne. Niektóre z nich tylko w przybliżony sposób pozwalają określić wielkość strat w całym systemie. Część metod pozwala określić straty ciepła dla uproszczonego modelu sieci, a nie w jej rzeczywistej postaci. W przedstawionej analizie zastosowano Metodę Elementów Skończonych (MES), pozwalającą na

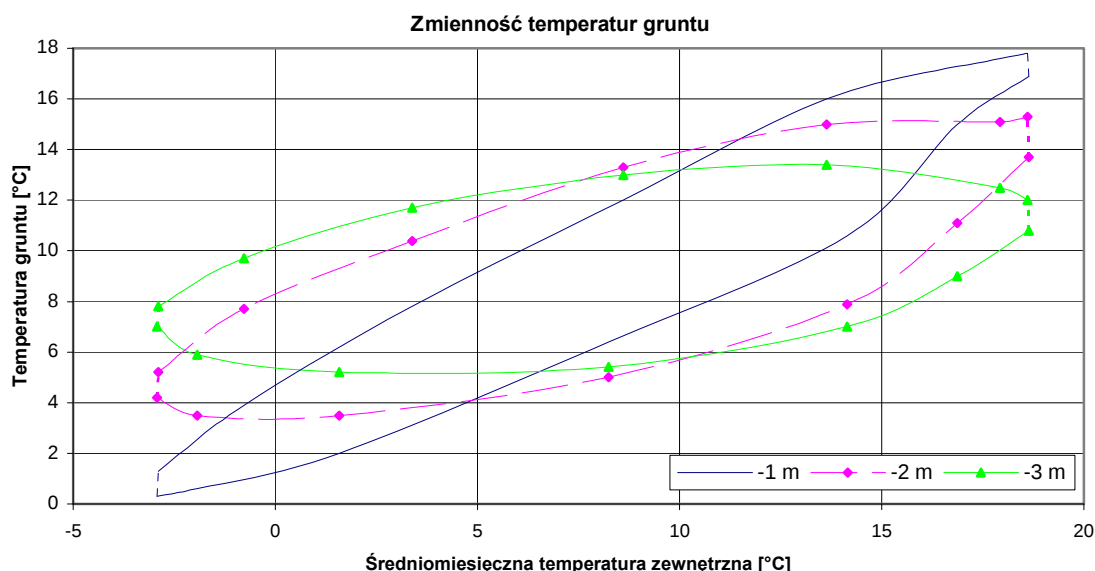
obliczenia przy rzeczywistej geometrii sieci. Charakterystykę obliczania strat metodą MES oraz rolę danych materiałowych i warunków brzegowych przedstawiono w [10]. W zaprezentowanych poniżej przykładach jako warunki brzegowe na bokach obszaru przyjęto konkretne wartości temperatury, która jest charakterystyczna dla konkretnego miesiąca i zależna od głębokości. Wartości tych temperatur zostały opracowane na podstawie danych zawartych w [4].

W celu weryfikacji wyników uzyskanych przy pomocy przyjętego modelu obliczeniowego wykonano pomiary kontrolne strumieni ciepła i rozkładu temperatur wewnątrz kanałowej sieci ciepłowniczej.

2. Założenia do obliczeń

Dobranie właściwych danych wejściowych jest bardzo ważne, ze względu na uzyskanie poprawnych wyników. Niektóre wielkości fizyczne opisujące substancje występujące w rozpatrywanym zagadnieniu obciążone są dużą niepewnością, a mogą one w istotny sposób wpływać na wyniki obliczeń. W przedstawionych w dalszej części artykułu przykładach przyjęto dane zaczerpnięte z wielu źródeł, zawarto je w tabeli 1.

Znacznie trudniejsze jest zadanie właściwego warunku brzegowego na bokach obszaru obliczeniowego. W publikowanych dotychczas metodach obliczania strat ciepła przyjmowano zerowy strumień ciepła w gruncie w kierunku prostopadłym do boków obszaru obliczeniowego. Jest to założenie upraszczające, które nieznacznie wpływa na sam strumień ciepła, ale zabuża prawidłowy rozkład temperatur w gruncie. W zaprezentowanych poniżej przykładach jako warunki brzegowe na bokach obszaru przyjęto konkretne wartości temperatury, która jest charakterystyczna dla konkretnego miesiąca i zależna od głębokości. Wartości tych temperatur zostały opracowane na podstawie danych zawartych w [4] i przedstawione w pracy [10]. Natomiast poniższy wykres pokazuje gradient temperatury gruntu przy takich samych średniomiesięcznych temperaturach zewnętrznych. Oczywiście temperatury chwilowe powietrza często odbiegają, nawet znacznie, od temperatur średniomiesięcznych, jednak nie przekładają się one bezpośrednio na temperaturę pod powierzchnią gruntu, ze względu na jego dużą bezwładność cieplną.



Wykres 1. Zakresy zmienności temperatur gruntu na różnych głębokościach w funkcji średnich miesięcznych temperatur zewnętrznych.

3. Wyniki obliczeń i ich porównanie z innymi metodami

Obliczenia strat ciepła metodą numeryczną wykonano przy pomocy programu wykorzystującego MES. W celu porównania wyników uzyskiwanych tą metodą wykonano również obliczenia dla sieci kanałowej przy takich samych założeniach dla dwóch metod źródła i upustu. Jedna z nich została przedstawiona w pracy [8], oznaczona została jako „metoda ZU1”, druga metoda, oznaczona jako „metoda ZU2.”, jest bardzo zbliżona, ale są w niej rozdzielone opory izolacji i

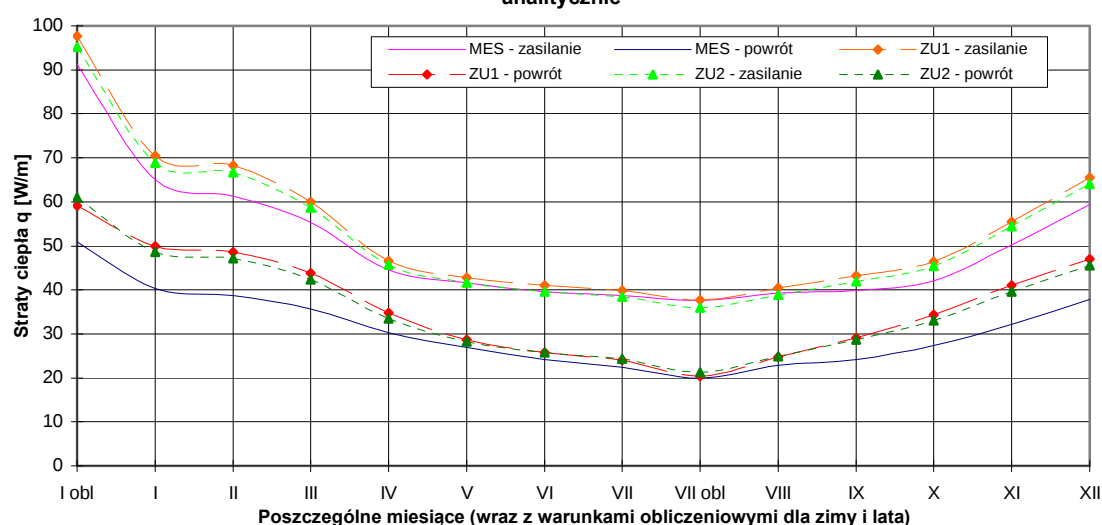
powierza w kanale, a opór powietrza w kanale jest wyliczany za pomocą wzorów kryterialnych [9]. Natomiast dla sieci preizolowanej wyniki z programu MES porównano z metodą analityczną, oznaczoną „MA” [11] oraz z wynikami z programu Heat Loss Calculation oznaczonymi jako „HLC”.

Na wykresach 2 i 3 przedstawiono porównanie strumieni ciepła obliczone przy pomocy metody MES oraz pozostałymi metodami.

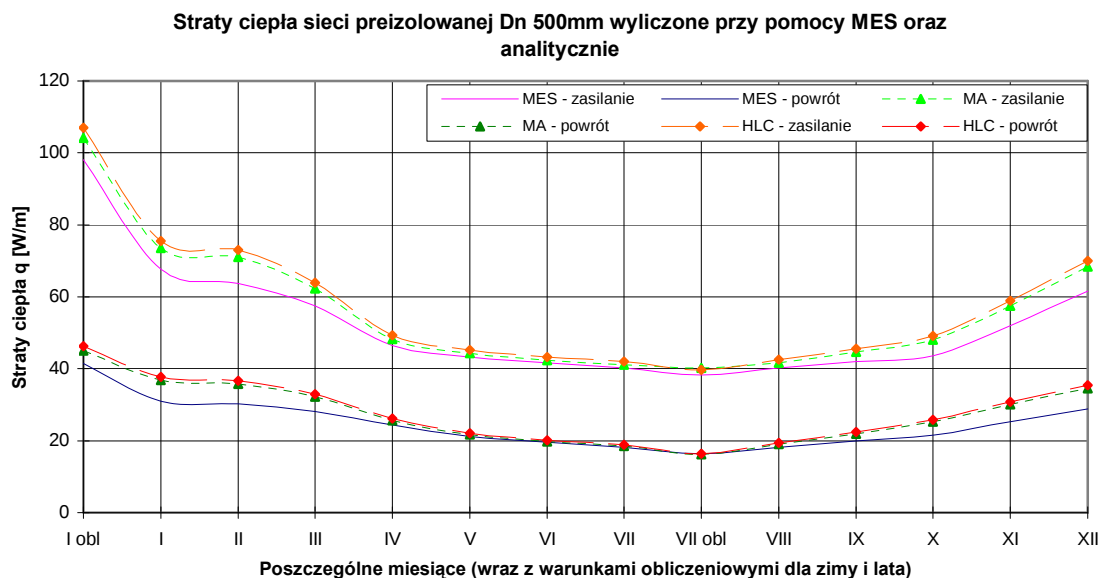
Tabela 1. Najważniejsze dane wejściowe wykorzystane w przedstawionych obliczeniach.

Wielkość	Symbol	Wartość	Jednostka	Źródło
Średnica rurociągu	Dn	500	mm	5
Średnia (pierwotna) grubość izolacji na zasilaniu / powrocie	θ_z / θ_p	165 / 85	mm	5
Właściwości fizyczne powietrza (ρ_p , C_{p_p} , λ_p , ν_p)	-	Prog. MES	-	6
Przewodność cieplna izolacji sieci kanałowej	λ_{i_k}	0,07÷0,08	W/(m*K)	5
Przewodność cieplna izolacji sieci preizolowanej	λ_{i_p}	0,025÷0,0375	W/(m*K)	5
Gęstość izolacji	ρ_i	100	kg/m ³	3
Ciepło właściwe izolacji	C_i	840	J/(kg*K)	3
Przewodność cieplna gruntu	λ_{gr}	1,7÷1,8	W/(m*K)	3
Gęstość gruntu	ρ_{gr}	1900	kg/m ³	3
Przewodność cieplna betonu	λ_b	1,5	W/(m*K)	3
Ciepło właściwe gruntu	C_{gr}	1000	J/(kg*K)	3
Gęstość betonu	ρ_b	2200	kg/m ³	3
Ciepło właściwe betonu	C_b	800	J/(kg*K)	3
Geometria kanału	-	-	-	5
Współczynnik przejmowania ciepła od gruntu do powietrza atmosferycznego	α_{gr}	5	W/(m ² *K)	obliczenia
Temperatury gruntu na bokach i dole modelu obliczeniowego (indywidualne dla każdego miesiąca)	T_{gr}	Wg. [4]	°C	4
Temperatura wody sieciowej na zasilaniu w styczniu / kwietniu / październiku	T_{wz_I} T_{wz_IV} T_{wz_X}	92 72 72	°C	7
Temperatura wody sieciowej na powrocie w styczniu / kwietniu / październiku	T_{wp_I} T_{wp_IV} T_{wp_X}	52 46 46	°C	7
Temperatura średnio-miesięczna powietrza atmosferycznego w styczniu / kwietniu / październiku	T_{pa_I} T_{pa_IV} T_{pa_X}	-2,9 8,2 8,6	°C	pomiary
Głębokość usytuowania kanału pod powierzchnią gruntu	G_k	1	m	pomiary

Straty ciepła dla kanału elowego Dn 500mm wyliczone przy pomocy MES oraz analitycznie



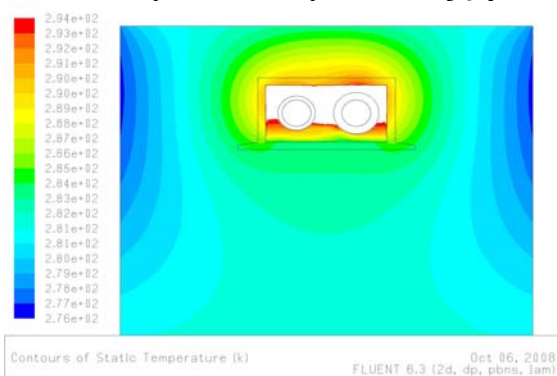
Wykres 2. Porównanie wyników obliczeń strumienia ciepła z sieci kanałowej Dn 500 obliczonych różnymi metodami.



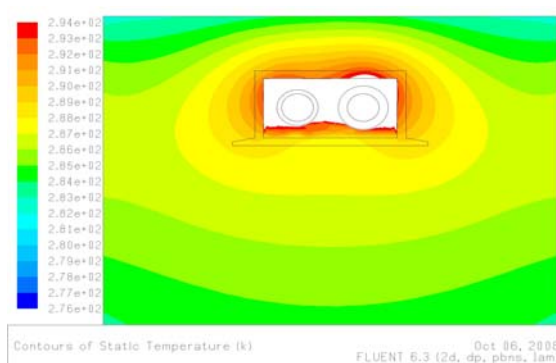
Wykres 3. Porównanie wyników obliczeń strumienia ciepła z sieci preizolowanej Dn 500 obliczonych różnymi metodami.

Dla potwierdzenia słuszności wprowadzenia profili temperatur gruntu na bokach obszaru obliczeniowego przedstawiono rysunki temperatur gruntu dla dwóch miesięcy: kwietnia i października. Wybrano te dwa miesiące, ponieważ temperatury powietrza w tych miesiącach są do siebie bardzo zbliżone ($8,2^{\circ}\text{C}$ w kwietniu i $8,6^{\circ}\text{C}$ w październiku), a temperatury wody sieciowej takie same (wg tabeli regulacyjnej). Różnica wyników dla tych dwóch miesięcy wyliczona metodami uproszczonymi, czyli z pominięciem akumulacji ciepła w gruncie wynosi ok. $0,6 \div 0,7 \text{ W/m}_b$. Natomiast różnica wyników uzyskanych przy wykorzystaniu MES wynosi $4,5 \text{ W/m}_b$ co stanowi ok. 7% strat ciepła w kwietniu. Przyczyną takich różnic jest właśnie uwzględnienie średnio-miesięcznych temperatur gruntu przy określaniu warunków brzegowych.

Z powodu akumulacji ciepła w gruncie zmienia się również temperatura powietrza w kanale, co przekłada się na różnice w wyliczanych stratach ciepła. Temperatury gruntu wokół kanału dla kwietnia i października przedstawiają rysunki 1 i 2.



Rys. 1. Rozkład temperatur w gruncie dla kwietnia.



Rys. 2. Rozkład temperatur w gruncie dla października

Dwa powyższe rysunki pokazują, że grunt w kwietniu jest wychłodzony i następuje jego nagrzewanie od góry, natomiast najniższą temperaturę ma wtedy na głębokości usytuowania kanału. W październiku, czyli po sezonie letnim, sytuacja jest całkowicie przeciwna. Na głębokości kanału grunt jest najcieplejszy, jego temperatura w tym miejscu jest wyższa o $9 \div 10^{\circ}\text{C}$ niż w kwietniu. Powoduje to słabsze chłodzenie ścian kanału i powietrza w jego wnętrzu, dzięki czemu straty ciepła są niższe o kilka procent. W październiku temperatura powietrza w kanale jak i ścian kanału jest o ok. 2°C wyższa niż w kwietniu. Przy takich samych temperaturach wody sieciowej dla obu miesięcy oczywiste jest, że strumień traconego ciepła jest wyższy w kwietniu.

Metoda numeryczna pozwalająca z większą swobodą wprowadzać zmienne warunki brzegowe i własności materiałowe bardziej dokładnie wylicza straty ciepła. Dodatkowo umożliwia ona generowanie map temperatur i innych wielkości oraz odczytywanie wielu parametrów w dowolnym miejscu obszaru obliczeniowego, np. współczynnika przejmowania ciepła.

4. Wykorzystanie pomiarów temperatury w kanale i strumieni ciepła przez izolację w celu weryfikacji obliczeń MES

Wyniki uzyskiwane wg metody MES są porównywalne z wynikami wg metod uproszczonych (metody źródła i upustu). Jednak najlepszą weryfikacją wyników obliczeń jest ich porównanie z pomiarami wykonanymi w terenie na pracującej sieci. Pomiary takie zostały specjalnie wykonane w lutym i sierpniu 2008 roku na magistrali Dn 1000mm położonej niedaleko warszawskiej elektrociepłowni „Siekierki”. Wewnątrz kanału zmierzono w ośmiu miejscach temperatury powierzchni płaszcza izolacji i ścian kanału oraz w siedmiu miejscach temperatury powietrza w kanale. Do określenia przewodności cieplnej izolacji (wraz z płaszczem) posłużono się pomiarami strumienia ciepła w czterech miejscach, na górze i z boku obu rurociągów. Pomiary te wykonano przy użyciu przenośnego zestawu z rejestratorem ALMEMO. Urządzenie to, do pomiaru strumienia ciepła wykorzystuje czujniki zawierające baterie termoelementów, które mierzą spadek temperatury na grubości czujnika. Strumień ciepła przepływającego przez czujnik jest proporcjonalny do spadku temperatury na nim.

Pomiar strumienia ciepła przenośnym rejestratorem jest dość dokładny, zgodność jego wyników z wynikami stanowiska do badań izolacji cieplnej znajdującego się w OBRC wynosi ok. 96%. Jednak istotnym problemem jest duża zmienność strumienia ciepła wzdłuż obwodu izolacji rurociągu. Pomiary wykonane na sieci o stosunkowo dobrym stanie technicznym, tzn. o dość równomiernej grubości izolacji, wykazały dużą zmienność strumienia ciepła, ponad dwukrotną pomiędzy górą a bokiem rurociągu. W przypadku rurociągów w złym stanie technicznym różnice strumienia ciepła są znacznie większe i do określenia strat ciepła z rurociągu konieczne jest wykonanie wielu punktowych pomiarów. Pomiary wykonywane przy pomocy przenośnego rejestratora wykonywane są punktowo i z tego powodu trudno jest z dużą dokładnością określić straty ciepła dla całego obwodu rurociągu ciepłowniczego.

Przykładowe wyniki strat ciepła z kilku rzeczywistych rurociągów uzyskane za pomocą pomiarów przedstawia poniższa tabela nr 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów strat ciepła na przykładzie kilku rzeczywistych rurociągów.

Średnica zewnętrzna rurociągu [mm]	Grubość izolacji [mm]				Temperatura czynnika		Zmierzony przepływ strumienia ciepła przez izolację rurociągu [W/m]		Dopuszczalna strata ciepła [W/m]	
	Normatywna dla 120/60°C	z	p		z	p	z	p	z	p
76,1	39	20	61	56	81,0	48,0	19,3	7,6	22,0	21,6
114,3	49	25	46	45	72,3	37,0	13,8	7,1	22,1	20,2
133	54	30	27	27	67,0	41,0	21,5	12,0	21,2	20,4
133	54	30	32	31	74,0	38,0	17,6	3,9	23,6	20,1
219,1	63	40	66	40	69,0	37,0	30,2	7,3	29,0	23,5
273	68	40	80	80	79,0	49,0	48,2	35,2	37,8	36,6
323,9	73	45	73	61	86,0	86,0	91,2	88,9	45,3	68,3
355,6	73	45	101	94	81,0	48,0	40,7	23,2	45,7	40,5
457	88	50	56	58	73,5	39,0	64,8	29,0	43,2	38,6
508	93	60	82	87	77,0	38,0	64,4	4,3	47,5	35,3
813	108	70	120	111	81,6	46,0	86,3	16,3	67,2	55,4

W celu wyliczenia przewodności cieplnej izolacji, która posłużyła do obliczeń numerycznych, konieczne było zmierzenie grubości izolacji w miejscu pomiaru, a także różnic temperatury pomiędzy wodą sieciową a powietrzem w kanale w miejscu pomiarów strumienia ciepła.

Pomimo pomiarów część wielkości potrzebnych do obliczeń metodą MES trzeba było założyć bądź uśrednić. Wielkości te zamieszczono w tabelach 1 i 3, odpowiadają one warunkom w jakich wykonano pomiary rzeczywiste.

Tabela 3. Zmiany danych wejściowych dla obliczeń porównywanych z pomiarami wykonanymi w lutym.

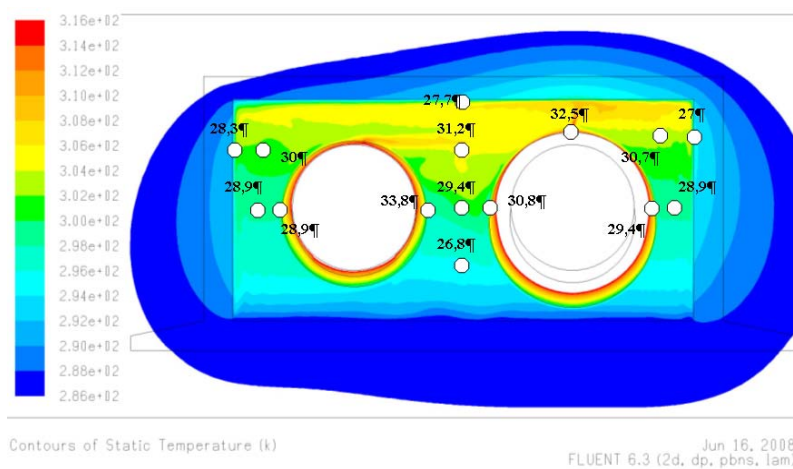
Wielkość	Symbol	Wartość	Jednostka	Źródło
Średnica rurociągu	Dn	1000	mm	5
Temperatura wody sieciowej na zasilaniu / powrocie	T_{wz} T_{wp}	76,6 44,5	°C	pomiary
Temperatura powietrza atmosferycznego	T_{pa}	5,2	°C	pomiary
Przewodność cieplna izolacji na zasilaniu / powrocie	λ_{iz} λ_{ip}	0,1 0,055	W/(m*K)	obliczenia
Zmiana (deformacja) grubości izolacji*	-	-	-	obliczenia
Głębokość usytuowania kanału pod powierzchnią gruntu	G_k	0,5	m	pomiary

* Zmniejszono grubość izolacji na górze rurociągu, z boku pozostawiono bez zmian, a na dole zamodelowano charakterystyczny zwis izolacji, a także nieznacznie zwiększono jej grubość.

Wyniki jakie uzyskano z obliczeń metodą MES oraz wartości z pomiarów zamieszczono w poniższej tabeli 4. Zawiera ona również całkowitą wyliczoną stratę ciepła odniesioną do 1m długości sieci. Metodę numeryczną wykorzystującą MES można uznać za przydatną do stosowania przy obliczaniu strat ciepła z sieci ciepłowniczej, otrzymane wyniki są zbliżone do wyników uzyskanych z pomiarów. Zmierzone temperatury powierza wewnątrz kanału również nieznacznie różnią się od wyników obliczeń (o ok. 2°C), które są przedstawione na poniższym rysunku 5.

Tabela 4. Wyniki pomiarów i obliczeń strumieni ciepła.

Miejsce	Pomiar	Obliczenia
Rurociąg zasilający – góra [W/m ²]	43	40
Rurociąg zasilający – bok [W/m ²]	25,7	26
Rurociąg powrotny – góra [W/m ²]	23,1	18
Rurociąg powrotny – bok [W/m ²]	9,2	10
Strumień ciepła z rurociągu zasilającego [W/m _b]		121,4
Strumień ciepła z rurociągu powrotnego [W/m _b]		42,5



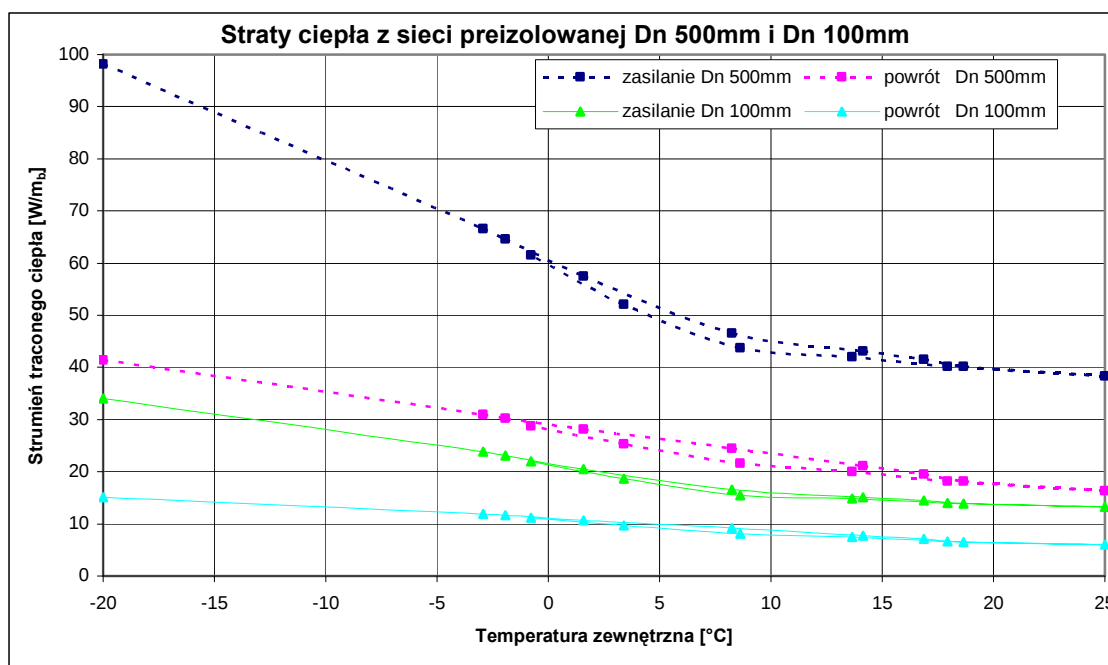
Rys. 5 Rozkład zmierzonych i wyliczonych temperatur w kanale w którym wykonano pomiary weryfikacyjne.

5. Wpływ temperatury wody sieciowej i temperatury otoczenia na straty ciepła.

Metodę MES wykorzystano do wyznaczenia wpływu temperatur wody sieciowej i temperatury otoczenia na straty ciepła z sieci ciepłowniczej. Przebieg rocznych zmian strat ciepła z przykładowych rurociągów pokazuje wykres 4, obrazuje on wyniki obliczeń wykonanych dla sieci ciepłowniczej preizolowanej Dn 500mm i Dn 100mm. Właściwości materiałowe oraz główne wymiary geometryczne zawiera tabela 1, natomiast przyjęte do obliczeń temperatury wody sieciowej zostały zaczerpnięte z tabeli regulacyjnej na sezon grzewczy 2007/2008. Uwzględniono również temperatury gruntu do głębokości 10m w poszczególnych miesiącach roku.

Na wykresie 4 wyraźnie widać, że straty zmniejszają się dość szybko wraz ze wzrostem temperatury zewnętrznej od -20°C do ok. 7°C , spowodowane jest to tym, że przy takich temperaturach zewnętrznych występuje w warszawskim systemie ciepłowniczym zmiana parametrów sieci. W dalszej części wykresu ($>7^{\circ}\text{C}$) straty ciepła zmniejszają się znacznie wolniej, ponieważ zależą już tylko od temperatur powietrza i gruntu (temperatury wody sieciowej są niemal stałe). „Rozwarstwienie” wykresów dla średnich temperatur powietrza ($-3\div 17^{\circ}\text{C}$) spowodowane jest różnicą temperatur gruntu przed i po sezonie grzewczym. Procentowe różnice strat ciepła wiosną i jesienią przy takich samych temperaturach zewnętrznych sięgają nawet 10%.

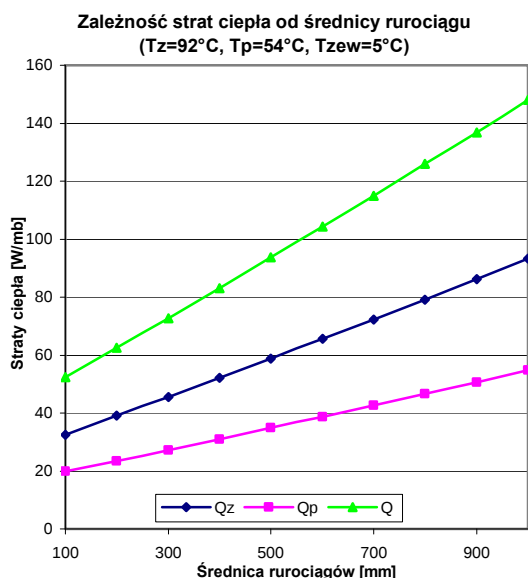
W dotychczasowych pracach wyznaczono również dość dokładny wpływ temperatur wody sieciowej i temperatury zewnętrznej oraz średnicy rurociągów na straty ciepła, dotyczy to tylko sieci kanałowej. Wpływ każdego z tych parametrów został przedstawiony na oddzielnym wykresie dla łatwiejszego odczytania wartości. Poniżej zamieszczono również wzory które pozwalają wyliczyć wielkość strat ciepła przy dowolnie dobranym zestawie czterech parametrów. Niestety podane wzory nie uwzględniają jeszcze przewodności cieplnej izolacji, grubości izolacji, temperatury gruntu i głębokości posadowienia sieci ciepłowniczej. Wpływ wymienionych wielkości również ma zostać wyznaczony, jednak w czasie pisania tego referatu nadal trwają prace obliczeniowe, więc przedstawiono tylko dotychczasowe wyniki. Wszystkie dane potrzebne do wyliczenia strat ciepła, a nie uwzględnione jeszcze w wyznaczonych wzorach przyjęto na średnim poziomie i podano ich wartości w tabeli 1.



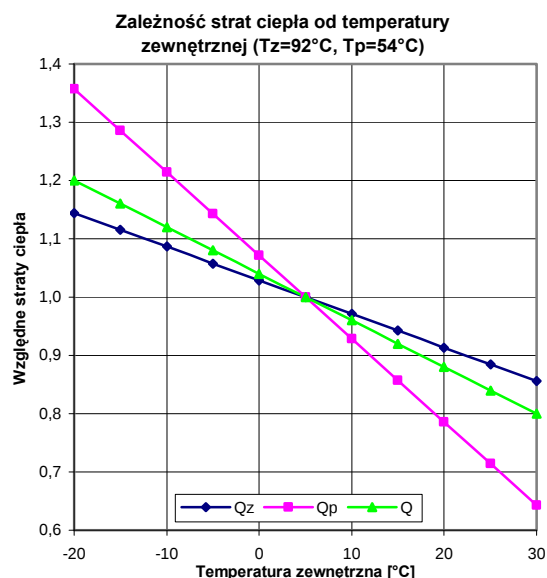
Wykres 4. Wielkość strat ciepła z sieci ciepłowniczej Dn 500mm i Dn 100mm w funkcji temperatury zewnętrznej dla założonych temperatur wody sieciowej.

Niżej podane wykresy zawierają konkretne wielkości strat ciepła w zależności od średnicy rurociągu (wykres 5) oraz zmiany tych wielkości przy zmianie którejś z temperatur (wykresy 6, 7, 8). Zgodnie z przewidywaniami wpływ temperatury zasilania na straty z rurociągu zasilającego jest

proporcjonalny a dla rurociągu powrotnego odwrotnie proporcjonalny. W przypadku temperatury powrotu zachodzi oczywiście podobna zależność choć z innymi proporcjami. Wzajemne oddziaływanie rurociągów nie jest duże, ale jednak występuje i powinno się je uwzględniać w obliczeniach.

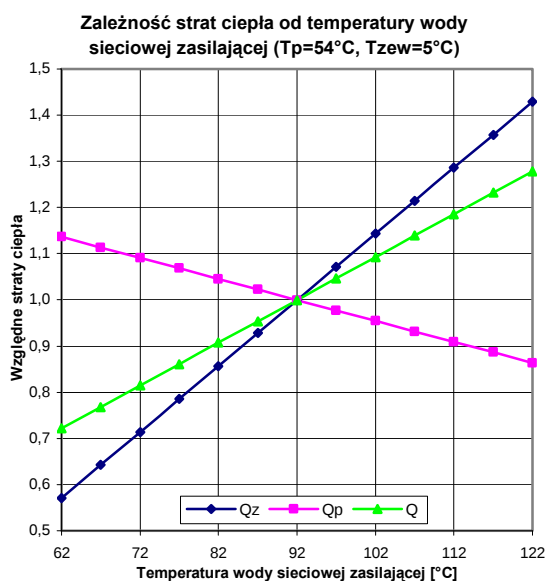


Wykres 5. Zależność jednostkowych strat ciepła od średnicy sieci (Q_z - dla rurociągu zasilającego, Q_p - dla rurociągu powrotnego, Q - łącznie dla sieci).

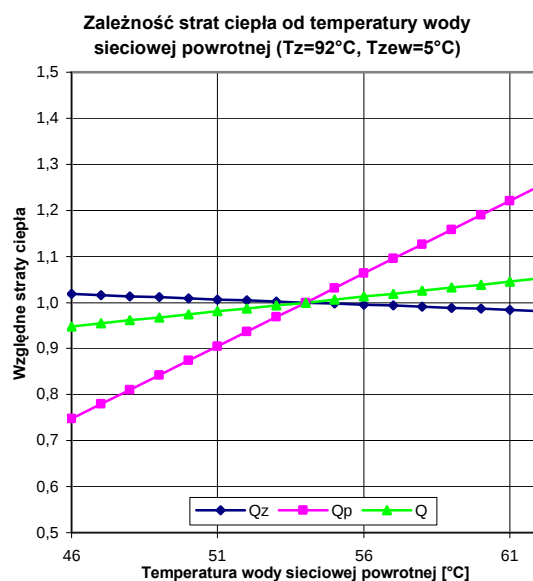


Wykres 6. Względna zależność strat ciepła od temperatury zewnętrznej.

Wszystkie przedstawione na wykresach zależności pochodzą ze wzorów zapisanych poniżej, które pozwalają obliczyć wielkość strat ciepła przy dowolnie dobranych parametrach. Stosowanie ich może być stosunkowo trudne ze względu na ich złożoną budowę, ale dzięki temu można swobodnie modyfikować każdy ich element składowy. Występujący we wzorach współczynnik korekcyjny „B” jest zależny od pory roku dla której wykonujemy obliczenia. Tymczasowo zastępuje on wpływ temperatury gruntu. Natomiast pozostałe współczynniki mówią o wpływie poszczególnych temperatur na wielkość strat ciepła z danych rurociągów.



Wykres 7. Względna zależność strat ciepła od temperatury zasilania.



Wykres 8. Względna zależność strat ciepła od temperatury powrotu.

Wzór do obliczenia strat ciepła z rurociągów sieci kanalowej:

Dla omawianych w artykule warunków i własności materiałowych (tabela 1) jednostkowe straty ciepła w rurociągu zasilającym, powrotnym oraz łączne w funkcji średnicy rurociągu, temperatur wody sieciowej oraz temperatury zewnętrznej można wyrazić przybliżoną zależnością:

$$q_x = B \cdot \left((K_{T_z} \cdot \frac{Dn}{1000} + L_{T_z}) \cdot T_z + (K_{T_p} \cdot \frac{Dn}{1000} + L_{T_p}) \cdot T_p + (K_{T_{zew}} \cdot \frac{Dn}{1000} + L_{T_{zew}}) \cdot T_{zew} + (K \cdot (\frac{Dn}{1000})^2 + L \cdot \frac{Dn}{1000} + M) \right)$$

Wartości współczynników występujących we wzorze na straty q_x podane są w tabelach 5 i 6.

Tabela 5. Wartości współczynników dla wzoru do obliczania strat ciepła.

Współczynnik	Wartości współczynników przy obliczaniu strat ciepła		
	q_z	q_p	q
K_{T_z}	0,9654	-0,1778	0,7876
L_{T_z}	0,3646	-0,0706	0,2940
K_{T_p}	-0,1555	1,2363	1,0808
L_{T_p}	-0,0587	0,4911	0,4324
$K_{T_{zew}}$	-0,3884	-0,5605	-0,9567
$L_{T_{zew}}$	-0,1467	-0,2226	-0,3682
K	3,5142	2,7483	6,2627
L	-14,994	-11,726	-26,721
M	-3,4643	-2,7093	-6,1737

Tabela 6. Wartość współczynników korekcyjnych B

Okres roku	Obliczana wielkość	Wartość współczynnika B
Okres zimowo-wiosenny (I ÷ V - średnie temperatury zewnętrzne)	q_z	1,02
	q_p	1,05
	q	1,03
Okres letnio-jesienny (VII ÷ XI - średnie temperatury zewnętrzne)	q_z	0,98
	q_p	0,96
	q	0,97
Pozostałe okresy roku	q_z, q_p, q	1

8. Podsumowanie

1. MES jest metodą przydatną do obliczania strat ciepła w miejskiej sieci ciepłowniczej. Wyniki uzyskane tą metodą są bardzo bliskie wynikom pomiarów w warunkach rzeczywistych. Warunkiem poprawności uzyskanych wyników jest przyjęcie właściwych danych wejściowych w tym danych materiałowych i geometrycznych. Ich wiarygodność należy weryfikować poprzez pomiary rozkładu temperatury i strumieni ciepła w rurociągach sieci cieplnej w warunkach eksploatacyjnych. Metoda MES pozwala dowolnie modyfikować własności materiałowe i korygować warunki brzegowe w celu jak najlepszego odwzorowania rzeczywistości. Program wykorzystujący MES pozwala obliczyć nie tylko strumień ciepła, ale także rozkład temperatur oraz wartości współczynników przejmowania ciepła.
2. Korzystając z programów bazujących na MES można określić wpływ poszczególnych wielkości występujących w zagadnieniu strat ciepła, jak również wpływ zestawów wielkości wzajemnie powiązanych. Posiadając taką wiedzę można wykorzystać tą metodę do optymalizacji parametrów pracy, w tym wykresów regulacyjnych dla sieci ciepłowniczej.
3. W artykule przedstawiono wpływ temperatur wody sieciowej i powietrza zewnętrznego oraz średnicy sieci na wielkość strat ciepła. Wpływ ten ilustrują wykresy 5-8 a ich podsumowaniem jest formuła pozwalająca na łatwe obliczenie strat jednostkowych w funkcji średnicy rurociągu, temperatur wody sieciowej i temperatury otoczenia.
4. W OBRC prowadzone są dalsze prace ukierunkowane na zmniejszenie strat ciepła w warszawskim systemie ciepłowniczym. W pracach tych wykorzystywane są m.in. dane uzyskane omawianą metodą oraz wyniki pomiarów strat w warunkach eksploatacyjnych.

LITERATURA

- [1] Janota M.: Badania i symulacyjne obliczenia strat ciepła w sezonach ogrzewczych PEC-u Katowice. Instal 3/2004.
- [2] Wojdyga K., Niemyjski O.: Badania poligonowe i symulacyjne strat ciepła w sieciach ciepłowniczych. Forum Ciepłowników Polskich 1999.
- [3] Raźniewski K.: Tablice cieplne z wykresami. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne Warszawa, rok 1966.
- [4] Rubik M.: Pompy ciepła – poradnik. Ośrodek informacji „Technika Instalacyjna w Budownictwie”. Warszawa 2006.
- [5] Krygier K.: Sieci ciepłownicze, materiały pomocnicze do ćwiczeń. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [6] Biblioteka danych programu Fluent.
- [7] Tabela regulacyjna temperatur wody sieciowej dla źródeł w.s.c. obowiązująca w sezonie 2006/2007.
- [8] Niemyjski O.: Metodyka obliczania strat ciepła w systemie ciepłowniczym z uwzględnieniem okresu letniego. VI Krajowa Konferencja Ciepłowników, Międzyzdroje 1997.
- [9] Gogół W.: Wymiana ciepła, tablice i wykresy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, rok 1976.
- [10] Falba Ł., Pietrzyk Z., Smyk A.: Wykorzystanie MES do obliczania strat ciepła w miejskiej sieci ciepłowniczej – XII Forum Ciepłowników Polskich 2008. Międzyzdroje, 14-17.09.2008 r., Materiały konferencyjne, s.180-191.
- [11] Wasilewski W.: Straty ciepła rur preizolowanych zagłębionych w gruncie. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, maj 1999.

APPLYING MES METHOD AND HEAT FLUX MEASUREMENT FOR EVALUATING THE HEAT LOSS IN DH NETWORKS

Key words: Finite-Element Method (FEM), loss of heat, municipal distribution systems of heat

Summary.

This article presents to solve problems for calculation of loss to municipal distribution systems of heat with the aid of numeric methods. Problem subject analysis of installation of correct condition edge. It compares results of accounts with use of finite-element method (FEM) for exemplary channel network with other results gotten methods and with real measurements. Influence of parameter of net water present on diagrams on largeness of individual loss warm. Variability of loss of transport heat in function of temperature of net water has great importance at optimization of regulating diagram warm. Essential is with utilization for estimate of consequence of incrementation of temperature of net water in summer period for requirements of fabricating cold net also warm.