

Artur Łebek –SPEC S.A. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Ciepłownictwa
Adam Smyk – SPEC S.A. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Ciepłownictwa,
Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej

WYZNACZANIE STRAT CIEPŁA W SIECI CIEPŁOWNICZEJ DLA POTRZEB AUDYTU ENERGETYCZNEGO

Streszczenie: *Straty przesyłania w sieci ciepłowniczej wyznaczane są dla różnych potrzeb, m.in. do optymalizacji pracy systemu, typowania odcinków sieci do wymiany, dla potrzeb sporządzania wykresów regulacyjnych. Pozyskiwanie środków europejskich na przedsięwzięcia modernizacyjne w ciepłownictwie wiąże się z wykonaniem audytu energetycznego sieci, wskazującego m.in. efekty energetyczne projekt, co również wymaga obliczenia strat w sieci ciepłowniczej. W artykule przedstawiono dwa sposoby obliczania strat ciepła dla potrzeb realizacji projektu przebudowy i modernizacji systemu ciepłowniczego opartego na węzłach grupowych na system węzłów indywidualnych zasilanych wyłącznie z sieci wysokoparametrowej.*

1.Wstęp

W odniesieniu do przedsięwzięć modernizacyjnych dla elementów systemu ciepłowniczego jednym z wymagań jest oszacowanie efektów energetycznych, ekologicznych i ekonomicznych wynikających z zastosowania nowych rozwiązań i technologii. Elementem oceny jest m.in. oszacowanie zmiany strat przesyłania ciepła. W tym celu należy wyznaczyć wartość strat przed i po modernizacji. Do tego celu można wykorzystać formuły obliczeniowe. Warto, o ile to możliwe, dokonać również pomiaru strumienia strat ciepła, co zwiększa wiarygodność wyników obliczeń.

W ramach realizacji projektu przebudowy i modernizacji systemu ciepłowniczego opartego na węzłach grupowych na system węzłów indywidualnych OBRC wykonał audyt energetyczny w tym szacowanie strat ciepła w sieci przynależnej do istniejących około 100 węzłów grupowych. Następnie oszacowano straty jakie będą miały miejsce po w/w modernizacji tj przy zasilaniu węzłów indywidualnych z sieci wysokoparametrowej.

Istotnym problemem okazał się wybór metody szacowania jednostkowych strat ciepła w sieci, gdyż nie było jednoznacznej instrukcji wykonywania obliczeń. Jediną wskazówką jest zapis w [1] mówiący, że jednostkowe straty ciepła należy obliczać wg „ogólnych zasad obliczania strat ciepła w sieciach”. W nawiązaniu do tego zalecenia OBRC opracował własne arkusze obliczania strat ciepła w sieciach ciepłowniczych (kanałowych, w budynkach, preizolowanych), bazujące na formułach podawanych w literaturze, m.in. [3-6,12] Według tej metodyki (nazwanej metodą LOSC) wykonano obliczenia strat ciepła w sieci ciepłowniczej objętej audytem. W krótkim czasie po wykonaniu przez OBRC obliczeń strat ciepła, NFOSiGW wydał załącznik [2] w którym podał własną metodykę szacowania strat ciepła w różnych typach sieci ciepłowniczych (nazwaną metodą NFOSiGW). Dokonano zatem ponownie obliczenia jednostkowych strat ciepła w sieci ciepłowniczej objętej audytem, a następnie porównano różnice w wynikach obliczeń wykonanych obydwiema metodami.

W metodzie NFOSiGW wartość jednostkowych strat q wyliczana jest z uwzględnieniem współczynnika strat oraz wskaźnika pogorszenia się izolacji w wyniku jej starzenia.

Zmiany współczynnika przewodzenia ciepła oraz grubości izolacji uwzględnione są w sposób pośredni. W metodzie LOSC w sposób bezpośredni uwzględnia się zmianę współczynnika przewodzenia ciepła i zmianę grubości izolacji.

2. Zakres analizy

Mając na względzie minimalizację nakładu pracy oraz fakt, iż sieć zasilająca poszczególne węzły grupowe była budowana w zbliżonym okresie czasu, po konsultacjach z NFOŚiGW, wykonano jeden „reprezentatywny” audyt sieci ciepłowniczej przynależnej do wszystkich węzłów grupowych, a następnie wyznaczono efekty energetyczne i ekonomiczne dla całej sieci.

Sieć ciepłownicza objęta audytem przed i po modernizacji doprowadza ciepło wyłącznie na potrzeby c.o. do węzłów objętych projektem i składała się z odcinków sieci o różnych średnicach nominalnych o zbliżonym wieku i podobnym stanie technicznym. Przed modernizacją sieć o średnicach nominalnych poszczególnych odcinków w zakresie DN 32 – DN400 miała całkowitą długość ok. 50 km, po modernizacji sieć składa się z odcinków o średnicach nominalnych DN32-DN300 i ma całkowitą długość ok. 42 km. Moc zamówiona przez odbiorców zasilanych siecią wynosi około 150 MW. Ze względu na miejsce i sposób prowadzenia sieci podzielono na:

- kanałowe,
- preizolowane ułożone bezpośrednio w gruncie,
- przechodzące tranzytem przez pomieszczenia.

Przyjęto założenie, że stan techniczny rurociągów na każdym z wymienionych typów sieci eksploatowanych w tym samym okresie był do siebie zbliżony (ponieważ były budowane w tym samym okresie co potwierdzają dane z inwentaryzacji sieci). Z tego względu wyliczenie strat ciepła w wyniku realizacji projektu modernizacji sieci ciepłowniczej doprowadzającej ciepło do węzłów objęło odcinki sieci przed i po modernizacji sieci: kanałowej, preizolowanej ułożonej bezpośrednio w gruncie, przechodzącej tranzytem przez pomieszczenie, dla zsumowanych długości odcinków rurociągów w poszczególnych średnicach nominalnych.

3. Wyznaczanie strat ciepła w sieciach ciepłowniczych

Całkowite straty ciepła i mocy w sieciach ciepłowniczych liczone były tylko na potrzeby c.o. (gdyż takie były założenia dotyczące projektu). Wzór wykorzystany do obliczania rocznych strat dla obydwu omawianych metodyk był ten sam i ma postać [1]:

$$E_s = 10^{-5} \cdot 8,64 \cdot q_s \cdot L_i \cdot D_s \quad (1)$$

gdzie:

- q_s - średnie jednostkowe straty ciepła w sezonie grzewczym, W/m,
- L_i - długość odcinka sieci, m,
- D_s - liczba dni trwania sezonu grzewczego,
- E_s - straty w sezonie grzewczym, GJ/a,

Straty mocy cieplnej w warunkach obliczeniowych Q_o opisane są wzorem:

$$Q_o = q_o \cdot L_i \quad (2)$$

gdzie:

- q_o - jednostkowe straty ciepła w warunkach obliczeniowych., W/m,
 L_i - długość odcinka sieci, m.

3.1. Metoda LOSC

Sieci kanałowe

Wyznaczanie jednostkowych strat ciepła oparte było o metodę „źródła i upustu” [3], która zakładała kołowy przekrój badanego obiektu, gdzie jednostkowe straty ciepła q_k w kanale obliczane są ze wzoru:

$$q_k = \frac{t_k - t_o}{R_k + R_g + R_{g-o}} \quad (3)$$

gdzie:

- t_k - temperatura powietrza w kanale ciepłowniczym, °C ,
 t_o - temperatura otoczenia (powietrza zewnętrznego), °C,
 R_k - opór cieplny ścianki kanału, mK/W,
 R_g - opór cieplny gruntu, mK/W,
 R_{g-o} - opór cieplny od gruntu do otoczenia (powietrza zewnętrznego), mK/W.

Temperatura w kanale t_k określana jest z wzorów podanych w [3]

Sieci przechodzące tranzytem przez budynki

Jednostkowe straty ciepła dla sieci biegnącej tranzytem przez budynki q_r czyli straty między rurociągiem, w którym przepływa czynnik grzewczy a otoczeniem/pomieszczeniem, w którym się te rurociągi znajdują) obliczono z wzoru:

$$q_r = \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i - t_o}{R_i} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- t_i - temperatura czynnika grzewczego w i-tej rurze, °C,
 t_o - temperatura otoczenia (powietrza) w budynku, przez który przechodzi i-ta rura, °C,
 R_i - opór przewodzenia ciepła zaizolowanego rurociągu na i-tej rurze, mK/W.

Sieci preizolowane

Jednostkowe straty ciepła w sieciach preizolowanych q_p obliczone zostały w oparciu o wytyczne zawarte w [5] wg wzoru:

$$q_p = 2 \cdot (U_1 - U_2) \cdot \left(\frac{t_z + t_p}{2} - t_g \right) \quad (5)$$

gdzie:

- t_z, t_p - temperatury czynnika grzewczego w rurociągu zasilającym i powrotnym, °C,
 U_1, U_2 - współczynniki straty, W/(m²K),
 t_g - temperatura gruntu na poziomie osi rurociągów, °C.

Współczynniki strat ciepła U_1 i U_2 (w których zostały uwzględnione opory cieplne izolacji właściwej, opór cieplny gruntu R_g oraz opór od wzajemnego oddziaływania na siebie rurociągów R_h zasilającego i powrotnego) wyznaczono w oparciu o wzory:

$$U_1 = \frac{R_g + R_i}{(R_g + R_i)^2 - R_h^2} \quad (6)$$

$$U_2 = \frac{R_h}{(R_g + R_i)^2 - R_h^2} \quad (7)$$

gdzie:

R_g - opór cieplny gruntu, mK/W,

R_i - opór cieplny izolacji, mK/W,

R_h - dodatkowy opór od wzajemnego oddziaływania rurociągów zasilającego i powrotnego, mK/W.

Poszczególne składowe oporu cieplnego zostały wyznaczone ze wzorów podanych w [1, 3, 4, 5]. Przy obliczaniu poszczególnych oporów uwzględniono projektowe grubości izolacji dla sieci budowanych w latach 70 i 80-tych (tabela 1) oraz jej średnie 20% (wariant A) i 30% (wariant B) jej zmniejszenie po 30 latach eksploatacji (dla sieci kanałowych i w budynkach). Współczynnik przewodzenia ciepła przez izolację dla nowych sieci kanałowych i preizolowanych przyjęto w wysokości odpowiednio 0,05 i 0,033 [W/mK]. Uwzględniając wiek sieci przyjęto wzrost współczynnika przewodzenia ciepła o 100 % w wariantcie A oraz 120 % w wariantcie B. Średnią temperaturę gruntu dla sieci preizolowanych przyjęto w wysokości 8 °C, współczynnik przejmowania ciepła od gruntu do powietrza założono na poziomie 20 [W/m²K]. Podane w tabeli 1 wartości grubości izolacji odpowiadają maksymalnym dopuszczalnym jednostkowym stratom ciepła wg obowiązującej przed laty normy [11].

Tabela 1. Dane wyjściowe modernizowanej sieci (kanałowej i w budynkach).

DN	D _z rury stalowej [mm]	Grubość izolacji [mm]		Maksymalne dopuszczalne jednostkowe straty ciepła [W/m]	
		Zasilanie	Powrót	Zasilanie (90°C)	Powrót (70°C)
32	42,4	40	40	26	20
40	48,3	50	40	28	22
50	60,3	50	40	31	24
65	76,1	50	40	34	26
80	88,9	50	40	36	29
100	114,3	60	40	39	33
125	139,7	70	50	41	35
150	168,3	70	50	46	39
200	219,1	80	60	52	41
250	273	80	60	60	48
300	323,9	90	70	65	55
400	406,4	100	70	69	59

3.2. Metoda NFOŚiGW

Metodyka zaproponowana przez NFOŚiGW pozwala na określenie rocznych oraz jednostkowych strat ciepła w sieciach ciepłowniczych, dla potrzeb projektów realizowanych w Programie Operacyjnym Infrastruktura i Środowisko [2]. Została ona również wykorzystana w omawianym tutaj audycie. Jednostkowe straty ciepła q_n wyznaczane są wg wzoru stosowanego często dla sieci preizolowanych:

$$q_n = u \cdot (t_{1sr} + t_{2sr} - 2 \cdot t_s) \quad (8)$$

gdzie:

t_{1sr} – średnia temperatura wody w sezonie grzewczym w rurociągu zasilającym, °C,

t_{2sr} – średnia temperatura wody w sezonie grzewczym w rurociągu powrotnym, °C,

t_s – temperatura na zewnątrz rurociągu; w przypadku, gdy rurociąg położony jest w gruncie (preizolowany) $t_s = 8$ °C, dla rurociągów umieszczonych w kanałach t_s zależy od nominalnych temperatur sieci podanych w normie PN EN 85/B-02421,

u – współczynnik strat ciepła wyznaczony wg wzoru:

$$u = a \cdot u_0 \quad (9)$$

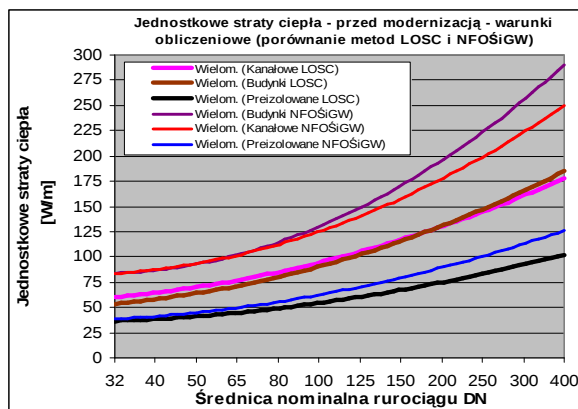
gdzie:

u_0 – współczynnik bazowy strat ciepła uwzględniający średnicę rurociągu, W/(mK),

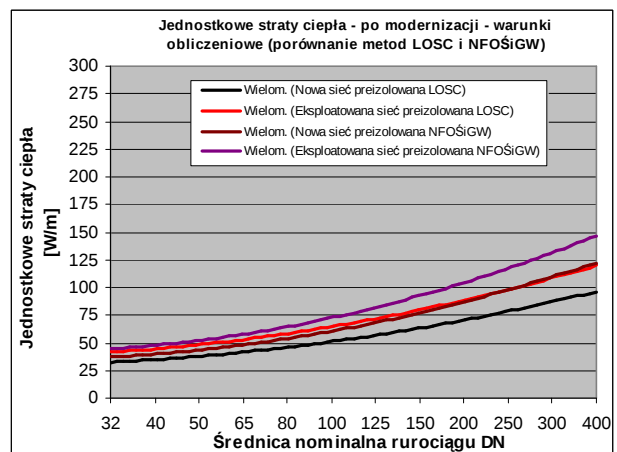
a – wskaźnik pogorszenia izolacji rurociągu w wyniku jej starzenia (wg[2], uzależniony od wieku sieci).

4. Wyniki obliczeń

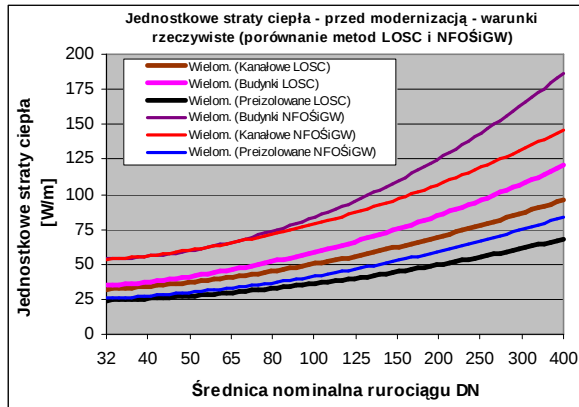
Na rys. 1 i 2 podane są straty jednostkowe dla warunków obliczeniowych a na rys. 3÷4 dla warunków średnich w sezonie grzewczym (rzeczywistych), przed i po modernizacji. Podane wartości strat odnoszą się do średnic sieci od DN32 do Dn400 mm. Podane na rys 2 i 4 straty jednostkowe po modernizacji są znacznie niższe (blisko dwukrotnie) niż przed modernizacją.



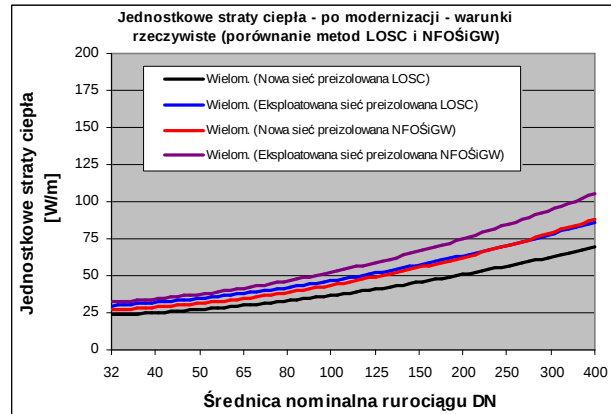
Rys.1. Jednostkowe straty przesyłania ciepła dla sieci ciepłowniczej przed modernizacją dla warunków obliczeniowych.



Rys.2. Jednostkowe straty przesyłania ciepła dla sieci ciepłowniczej po modernizacji dla warunków obliczeniowych.

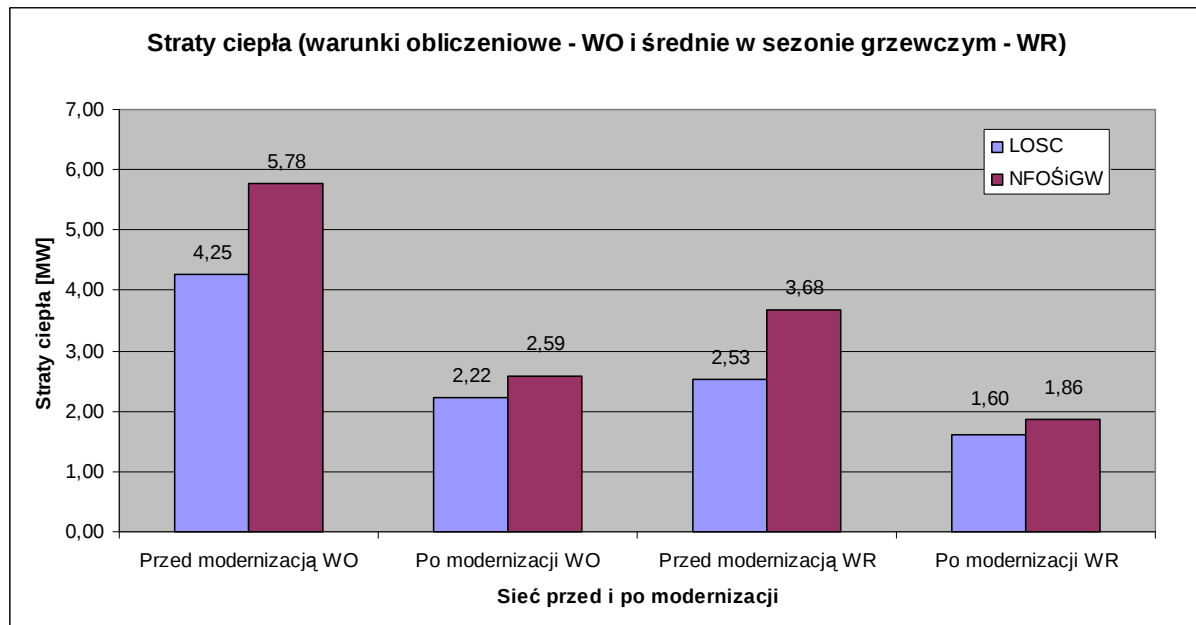


Rys.3. Jednostkowe straty przesyłania ciepła dla sieci ciepłowniczej przed modernizacją dla warunków rzeczywistych



Rys.4. Jednostkowe straty przesyłania ciepła dla sieci ciepłowniczej po modernizacji dla warunków rzeczywistych

Na rys. 5 przedstawiono całkowite straty mocy w sieci ciepłowniczej w warunkach obliczeniowych (WO) i średnich w sezonie grzewczym (rzeczywistych-WR) przy wykorzystaniu metodyki LOSC i NFOŚiGW. W tabelach 2 i 3 podano zestawienie strat mocy cieplnej w sezonie oraz rocznych strat ciepła odpowiednio przed i po modernizacji. Istotne różnice występują w ocenie strat przed modernizacją. Straty wg metody NFOŚiGW są o 48 % większe niż w wariancie A i o 32 % większe niż w wariancie B dla metody LOSC. Wg obu sposobów liczenia strat zmiana węzłów grupowych na indywidualne przynosi znaczne zmniejszenie strat ciepła. W wielu przypadkach, jeśli z węzłów grupowych dostarczana jest również ciepła woda użytkowa ich zmiana na węzły indywidualne przynosi znacznie większe zmniejszenie strat przesyłania.



Rys 5. Zestawienie strat mocy w obu metodykach dla warunków obliczeniowych i rzeczywistych przed i po modernizacji węzłów grupowych

Tabela 2. Straty ciepła w sieci ciepłowniczej przed modernizacją

Całkowite straty ciepła w sezonie grzewczym w warunkach rzeczywistych PRZED MODERNIZACJĄ						
Typ sieci	Metoda LOSC - A		Metoda LOSC – B		Metoda NFOŚiGW	
	Straty mocy [kW]	Straty ciepła [GJ/rok]	Straty mocy [kW]	Straty ciepła [GJ/rok]	Straty mocy [kW]	Straty ciepła [GJ/rok]
Kanałowa	1080	20910	1187	22969	1688	32828
W budynkach	1059	20365	1216	23374	1539	29659
Preizolowana	392	7518	392	7518	453	8690
SUMARYCZNE	2531	48793	2795	53861	3679	71177

Tabela 3. Straty ciepła w sieci ciepłowniczej po modernizacji

Całkowite straty ciepła w sezonie grzewczym w warunkach rzeczywistych PO MODERNIZACJI				
Typ sieci	Metoda LOSC		Metoda NFOŚiGW	
	Straty mocy [kW]	Straty ciepła [GJ/rok]	Straty mocy [kW]	Straty ciepła [GJ/rok]
Nowa sieć preizo.	966	18520	1137	21809
Ekspluatowana sieć preizo.	632	12129	723	13859
SUMARYCZNE	1597	30649	1860	35668

5. Podsumowanie i wnioski

Straty ciepła dla sieci modernizowanych (po wieloletniej eksploatacji) obliczone metodą NFOŚiGW przewyższają straty wyznaczone metodą LOSC, zarówno w warunkach obliczeniowych jak i średnich w sezonie grzewczym. Większy będzie również efekt energetyczny modernizacji i dla potrzeb ubiegania się o dotacje ze środków UE można uważać za zasadne skorzystanie z tej metodyki. Metoda ta wprowadza ponadto jednolite formuły obliczania strat w sieci po wieloletniej eksploatacji, co również jest jej pozytywną cechą.

Zaletą metodyki NFOŚiGW jest wykorzystanie prostych formuł i to, że znacznie szybciej można wykonać obliczenia, przy jednoczesnym mniejszym prawdopodobieństwie popełnienia błędu (przy wprowadzaniu formuł wzorów w arkuszu kalkulacyjnym, etc.) niż w przypadku innych metodyk. Wadą tej metody jest brak bezpośredniego odniesienia do stanu i grubości izolacji, które to parametry decydują o wielkości jednostkowych strat przesyłania ciepła.

Dla potrzeb dokładnej analizy strat ciepła w sieci ciepłowniczej, w szczególności przy badaniu wpływu temperatur wody sieciowej na straty, należy stosować dokładniejsze formuły, uwzględniające grubości izolacji, wiek sieci, rodzaj sieci i jej wymiary

geometryczne, zmianę temperatury gruntu w funkcji temperatury zewnętrznej oraz bezwładność tych zmian. Przykład takiej analizy z wykorzystaniem MES podany jest np w [9] .

Każda z metod obliczania strat ciepła w sieciach ciepłowniczych ze względu na złożone zjawiska wymiany ciepła obarczona jest mniejszym lub większym błędem. Dlatego warto jest zweryfikować obliczenia poprzez pomiar strumienia ciepła, stosując dostępne przyrządy pomiarowe. Przykłady wyników takich pomiarów podano w [9].

6. Bibliografia

- [1] „Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy audytu energetycznego”, Dz.U. Nr. 43, poz. 346.
- [2] Załącznik do Regulaminu Konkursu nr 1/POIiŚ/9.2/2009 „Program Operacyjny Infrastruktura i Środowisko 2007÷2013 – Priorytet IX - Działanie 9.2. – Szacowanie strat ciepła w wyniku realizacji projektu”.
- [3] Niemyski O.: „Metodyka obliczania strat ciepła w systemie ciepłowniczym z uwzględnieniem okresu letniego” . Materiały Konferencyjne FCP, Międzyzdroje 1997r.
- [4] Górzyński J.: „Przemysłowe izolacje cieplne” . Wydawnictwo Sorus S.C.,
- [5] Polska Norma PN-EN 13941: 2003 „Projektowanie i budowa sieci ciepłowniczych z systemu preizolowanych rur zespolonych”.
- [6] Żarski K.:” Wspomagane komputerowo obliczenia strat ciepła w sieciach ciepłowniczych”. Instal, 4/2003.
- [7] Straty ciepła sieci ciepłowniczych przy zmiennym obciążeniu systemów ciepłowniczych. Instal 12/2003
- [8] Mickiewicz I.: „Rzeczywista głębokość przemarzania gruntu a wymagania normowe”. Izolacje II 2008.
- [9] Falba Ł. Pietrzyk Z., Smyk A., Twarowski A.: „ Wykorzystanie metody numerycznej MES oraz pomiarów strumienia ciepła do obliczania strat ciepła w miejskiej sieci ciepłowniczej”. Instal, 4/2009.
- [10] Siennicki M., Sikora S., Bachańska A.: „Tymczasowe zasady zmniejszania strat ciepła przesyłanego w sieciach cieplnych”, Instal, Warszawa 1988.
- [11] Norma PN-85/B-02421 Izolacja cieplna rurociągów , armatury i urządzeń. Wymagania i badania.
- [12] Norma PN-EN ISO 12241 Izolacja cieplna wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych. Zasady obliczania.