

# Zastosowanie termografii do weryfikacji numerycznego modelu wymiany ciepła w przegrodach budowlanych z umieszczonymi przewodami centralnego ogrzewania

Z. Rymarczyk<sup>1</sup>, M. Strzeszewski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instytut Techniki Grzewczej i Sanitarnej, Radom,  
 ul. Wilcza 8, 26-600 Radom, email: Z.Rymarczyk@radom.medianet.pl*

<sup>2</sup>*Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20,  
 00-653 Warszawa, email: Michal.Strzeszewski@is.pw.edu.pl*

## Streszczenie

W referacie przedstawiono zastosowanie aparatury termowizyjnej AGEMA Thermovision 470 Pro do weryfikacji modelu numerycznego wymiany ciepła w stropie i w ścianie z umieszczonymi przewodami centralnego ogrzewania [11].

## 1. Wprowadzenie

W zagadnieniach związanych z fizyką cieplną budowli, projektowaniem i eksploatacją instalacji centralnego ogrzewania przydatna jest znajomość rozkładu temperatury w przekroju i na powierzchniach przegród budowlanych. Znajomość przewidywanego rozkładu temperatury może być wykorzystana także w diagnostyce przegród budowlanych pod kątem oceny strat lub zysków ciepła oraz w ocenie izolacji termicznej przewodów centralnego ogrzewania (ma to związek z trwałością konstrukcji i z aspektami higienicznymi eksploatacji centralnego ogrzewania). Ponadto, w wielu przypadkach, wykorzystując zweryfikowany model numeryczny unikamy kosztownych badań eksperymentalnych. Poniżej porównano przewidywania numerycznego modelu wymiany ciepła przez przegrody z elementami instalacji centralnego ogrzewania z wynikami badań termowizyjnych.

## 2. Teoria – Model numeryczny

Weryfikowany model numeryczny opracowano przy wykorzystaniu metody bilansów elementarnych. Polega ona na podziale przekroju stropu na elementy o małych rozmiarach i zastosowaniu prawa Fouriera oraz bilansu energii dla każdego z nich. W pracy wykorzystano elementy podziałowe o boku 2 mm. W ten sposób formułowany jest układ równań, który następnie zostaje rozwiązany przy pomocy iteracyjnej metody Czebyszewa. Prowadzi to do obliczenia pola temperatury w przekroju stropu oraz na jego powierzchniach.

Przyjęto dwuwymiarowy ustalony model wymiany ciepła w przekroju stropu. Jest to przekrój prostopadły do osi przewodów. W celu uproszczenia założono, że nie zachodzi przewodzenie ciepła w kierunku równoległym do osi przewodów. W praktyce założenie to jest spełnione z wystarczającą dokładnością z uwagi na znacznie większe gradienty temperatury w płaszczyźnie prostopadłej do osi przewodów w stosunku do gradientów w płaszczyźnie równoległej.

Szczegółowo model został opisany w artykule [11].

## 3. Praktyka

### 3.1. Wykorzystana aparatura

Do weryfikacji modelu numerycznego wykorzystano kamerę termowizyjną AGEMA Thermovision 470 Pro produkcji szwedzkiej. Weryfikację modelu przeprowadzono w warunkach zbliżonych do fabrycznych warunków kalibracji kamery.

Pomiary termowizyjne wykonano po uprzednim porównaniu wskazań kamery z temperaturą wzorca promieniowania. Wykorzystano wzorzec **Temperature Reference IR 1010** produkcji szwedzkiej, którego wskazania zostały wcześniej porównane ze źródłem promieniowania **DCN Infraroque System** [5].

Podstawowe warunki weryfikacji dokładności wskazań kamery przedstawiono w tabeli 1. Ponieważ wynik tej weryfikacji wypadł pomyślnie, założono, że dokładność użytej kamery w trakcie badań, odpowiada dokładności wskazań w trakcie analiz wykonanych w ramach pracy [5]. W ogólnym przypadku producent kamery deklaruje dokładność wskazań 2% zakresu pomiarowego lub 2°C. Dokładniejsze analizy zagadnień związanych z dokładnością pomiarów termowizyjnych zawarte są np. w pracach [2, 3, 7].

**Tabela 1. Warunki sprawdzenia kamery termowizyjnej**

emisyjność obiektu $\varepsilon$	0,96
temperatura otoczenia	22 °C
odległość	2 m
ustawiona temperatura wzorca	45,0 °C
odczytana temperatura wzorca	45,0÷45,1 °C

### 3.2. Profil temperatury na powierzchni podłogi

Emisyjność podłogi wynosiła 0,90 w widmowym zakresie czułości kamery (wartość wyznaczona doświadczalnie). Na rys. 1 zamieszczono zdjęcie fragmentu podłogi, z umieszczonymi wewnątrz przewodami centralnego ogrzewania, któremu odpowiada przedstawiony na rys. 2a termogram. Dla porównania, na rys. 2b, przedstawiono termogram symulacyjny uzyskany przy użyciu modelu numerycznego.

Na podstawie termogramu opracowano profil temperatury przy pomocy programu [1]. Rozkład temperatury, uzyskany przy pomocy metody termograficznej, porównano z wynikami programu komputerowego.

Porównanie to zamieszczono na rys. 3. Natomiast pole temperatury w przekroju stropu na podstawie modelu numerycznego przedstawiono w postaci izoterm na rys. 4 oraz w postaci symulowanego zdjęcia termowizyjnego na rys. 5.

Analizę przeprowadzono dla rury z tworzywa sztucznego ( $d_z/d_w=12,0/8,4$  mm) umieszczonej w rurze osłonowej (tzw. peszlu) o średnicy zewnętrznej 20,7 mm. Nad górną tworzącą peszla znajdowała się warstwa betonu o grubości 9 cm oraz terakota. Pod przewodami umieszczono warstwę styropianu o grubości 3 cm. Przewód zasilający i powrotny umieszczone były w odległości 10 cm (pomiędzy osiami). Temperatura wody w przewodzie zasilającym wynosiła 41°C, w powrotnym 32°C, a temperatura powietrza w pomieszczeniu 22,0°C. Prędkość wody w przewodach wynosiła 0,11 m/s.

Dla przeważającej części badanego obszaru model uzyskał wysoką zgodność z wynikami pomiarów. Jedynie w skrajnym zakresie ( $x = 0\div 10$  cm) zmierzono niższą temperaturę od wyników modelu. Wynikało to z chłodzącego oddziaływania ściany, co nie zostało uwzględnione w modelu. Natomiast w pozostałym zakresie zbieżność modelu z wynikami eksperymentu jest duża, a różnice mieszczą się w zakresie dokładności metody pomiarowej. Zestawienie statystyk przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2. Zestawienie statystyk zgodności modelu z wynikami pomiarów dla przewodów prowadzonych w peszlu (bez uwzględnienia przedziału 0÷10 cm).**

Współczynnik korelacji	0,996
Kwadrat współczynnika korelacji	0,991
Średnia modułu odchyień	0,088 K
Maksymalne odchylenie dodatnie	0,157 K
Maksymalne odchylenie ujemne	0,253 K
Suma kwadratów odchyień	0,796 K <sup>2</sup>

Jednocześnie warto zauważyć, że rozkład temperatury jest tylko nieznacznie niesymetryczny. Wynika to z warunków temperaturowo-geometrycznych, bowiem przewód powrotny znajduje się w takiej odległości od przewodu zasilającego, że w małym stopniu modyfikuje pole temperatury, w stosunku do sytuacji, gdyby w stropie znajdował się jedynie przewód zasilający, tzn. w miejscu przewodu powrotnego i tak panowałaby temperatura zbliżona do temperatury wody w przewodzie powrotnym. Taka sytuacja może zmniejszyć znacząco oddziaływanie cieplne przewodu powrotnego.

### 3.3. Profil temperatury na powierzchni ściany

Kolejnym etapem badań doświadczalnych było wyznaczenie profilu temperatury na powierzchni ściany i porównanie go z wynikami modelu matematycznego.

Podobnie jak w poprzednim przypadku, przedmiotem badań była para przewodów z tworzywa sztucznego ( $d_z/d_w=12,0/8,4$  mm), ułożona w rurach osłonowych (tzw. peszlu) o średnicy zewnętrznej 20,7 mm. Przewody umieszczone były pod tynkiem w odległości 5 cm (pomiędzy osiami). Całkowita grubość warstwy tynku wynosiła 3 cm. Temperatura wody w przewodzie zasilającym wynosiła 38,0°C, w powrotnym 30,5°C, a temperatura powietrza w pomieszczeniu 22,0°C. Prędkość wody w przewodach miała wartość 0,07 m/s.

Termogramy fragmentu ściany, wykonane przy użyciu kamery termowizyjnej oraz modelu numerycznego, przedstawiono na rys. 6. Rys. 7 przedstawia profil temperatury uzyskany za pomocą kamery termowizyjnej i wykorzystanego modelu. Zestawienie statystyk zgodności modelu z doświadczeniem przedstawiono w tabeli 3. Rozkład temperatury w przekroju przegrody przedstawiono na rys. 8, 9.

**Tabela. 3. Zestawienie statystyk zgodności modelu z wynikami pomiarów dla przewodów prowadzonych w ścianie**

Współczynnik korelacji	0,981
Kwadrat współczynnika korelacji	0,963
Średnia modułu odchyień	0,341 K
Maksymalne odchylenie dodatnie	0,687 K
Maksymalne odchylenie ujemne	0,911 K
Suma kwadratów odchyień	21,376 K <sup>2</sup>

Jak wynika z analizy profilu temperatury, wyniki modelu charakteryzują się wysoką zgodnością z wynikami pomiarów termowizyjnych. Można jednak zauważyć tendencję, że w obszarze poniżej przewodów temperatura, wyznaczona przy użyciu modelu, jest wyższa od danych doświadczalnych (średnio o 0,3 K), natomiast powyżej przewodów – niższa (średnio o 0,4 K). Tendencja ta wynika z przyjętych w modelu założeń upraszczających. Zgodnie z założeniami, temperatura powietrza w pomieszczeniu jest stała, tzn., że nie występuje pionowy gradient temperatury oraz całkowity współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni ściany jest stały i nie zależy od temperatury. Wyższą zgodność można by uzyskać, uwzględniając w modelu gradient temperatury oraz zmienność współczynnika przejmowania ciepła w funkcji temperatury.

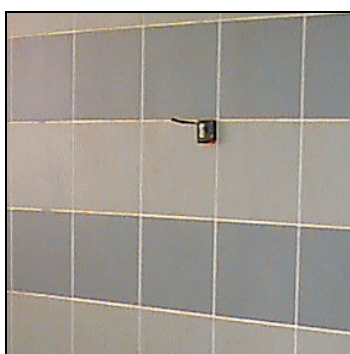
### 4. Wnioski

Badania doświadczalne potwierdziły przydatność metody termograficznej do weryfikacji pola temperatury wyznaczonego przy użyciu modelu numerycznego. W eksperymentach weryfikacyjnych zalecane jest także stosowanie czujników do pomiaru temperatury powierzchni. Wskazania tych czujników są przydatne w celu uściślenia obrazu termograficznego.

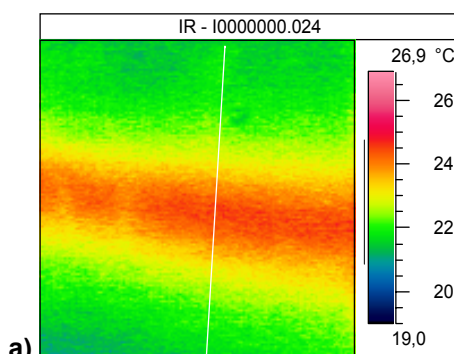
### Bibliografia

- [1] AGEMA Infrared Systems: Irwin 2.02 PRO. Program komputerowy do przetwarzania zdjęć termowizyjnych, Szwecja
- [2] Kruczek T.: Analiza wpływu czynników zewnętrznych na wyniki termowizyjnego pomiaru temperatury, V Konferencja Krajowa TERMOGRAFIA I TERMOMETRIA W PODCZERWIENI, Ustroń, 14-16 listopada 2002 r.
- [3] Minkina W., Bąbka R.: Wpływ składowych błędów metody na błąd wskazania temperatury w oparciu o model pomiarowy kamery ThermaCAM PM 595, V Konferencja Krajowa TERMOGRAFIA I TERMOMETRIA W PODCZERWIENI, Ustroń, 14-16 listopada 2002 r.
- [4] Rabjasz R., Dzierzgowski M., Turlejski St., Rymarczyk Zb.: Możliwość wykorzystania termografii do diagnostyki elementów instalacji centralnego ogrzewania, Rynek Instalacyjny nr 3/1999
- [5] Rymarczyk Zb.: Zastosowanie termografii do badania rozkładu temperatury na powierzchniach elementów instalacji centralnego ogrzewania (rozprawa doktorska), Politechnika Warszawska, Warszawa, 1999

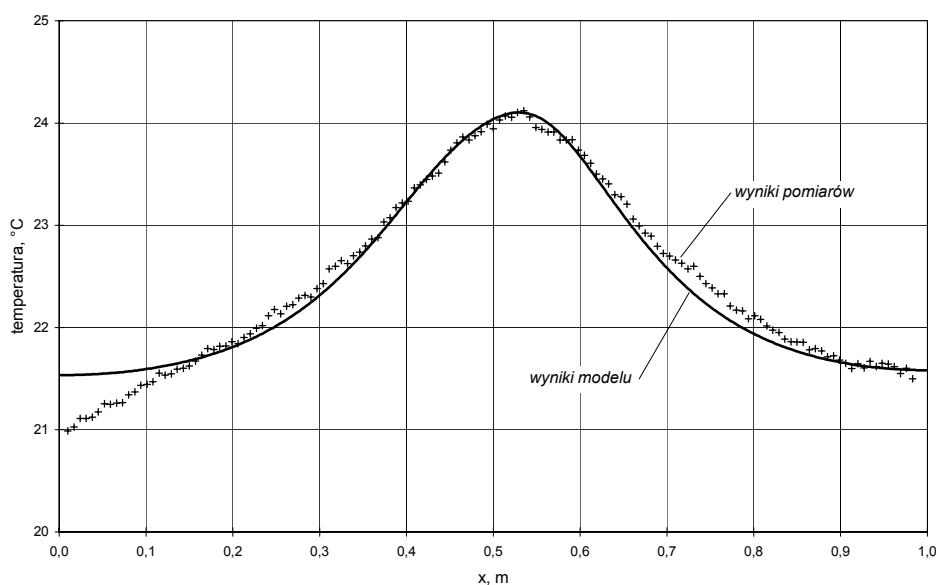
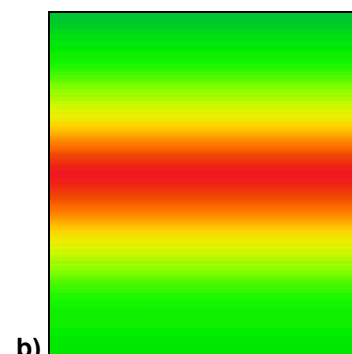
- [6] Rymarczyk Zb.: Use of Thermography for Estimation Water Flow of the Radiators in Central Heating System, Quantitative InfraRed Thermography 5, Qirt'2000, Proceedings of Eurotherm Seminar nr 64, Reims, France, July 18-21, 2000, p. 370–374
- [7] Rymarczyk Z.: Ocena wpływu błędu metody pomiaru na dokładność określenia temperatury za pomocą termografii, IV Konferencja Krajowa TERMOGRAFIA I TERMOMETRIA W PODCZERWIENI, Łódź, 16-18 listopada 2000 r.
- [8] Strzeszewski M.: Zasięg cieplny pojedynczego liniowego źródła ciepła w stropie na podstawie modelu numerycznego, wydawnictwo PZITS nr 793/2001, materiały konferencyjne XIII Konferencji Ciepłowników „Efektywność dystrybucji i wykorzystania ciepła” Solina 27-29 września 2001 ([http://www.is.pw.edu.pl/~michal.strzeszewski/articles/solina2001\\_zasieg.pdf](http://www.is.pw.edu.pl/~michal.strzeszewski/articles/solina2001_zasieg.pdf))
- [9] Strzeszewski M.: Straty ciepła pojedynczego przewodu wodnego w stropie, na podstawie modelu numerycznego, X International Conference Air Conditioning, Air Protection & District Heating, Wrocław–Szklarska Poręba, 27-30 czerwca 2002 ([http://www.is.pw.edu.pl/~michal.strzeszewski/articles/szklarska2002\\_straty.pdf](http://www.is.pw.edu.pl/~michal.strzeszewski/articles/szklarska2002_straty.pdf))
- [10] Strzeszewski M.: Model obliczeniowy ogrzewań mikroprzewodowych, Rozprawa Doktorska, IOiW PW, Warszawa 2002
- [11] Strzeszewski M.: Model numeryczny wymiany ciepła w przegrodzie budowlanej z przewodami centralnego ogrzewania, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Inżynieria Środowiska z. 42, Warszawa 2002
- [12] Strzeszewski M.: Weryfikacja empiryczna modelu numerycznego wymiany ciepła w przegrodzie budowlanej z przewodami centralnego ogrzewania, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Inżynieria Środowiska nr 45, Warszawa 2003



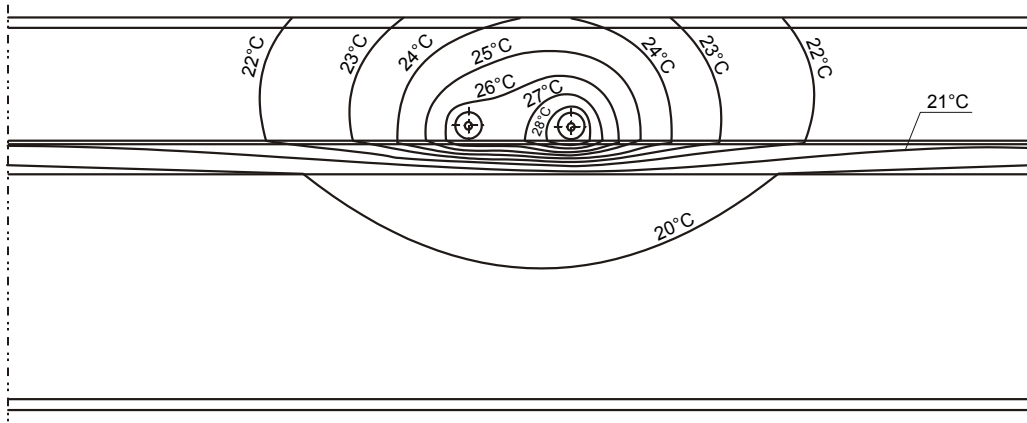
Rys. 1. Zdjęcie fragmentu podłogi



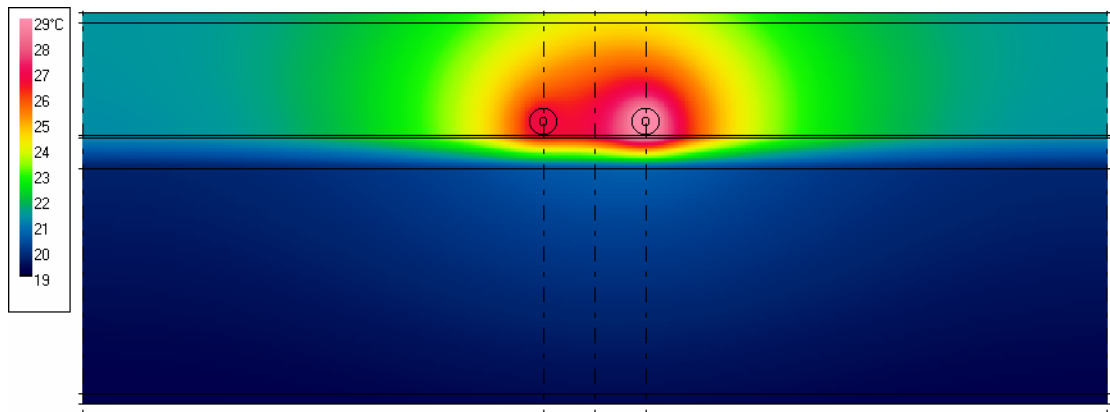
Rys. 2. Termogramy podłogi: a) termogram wykonany przy użyciu kamery termowizyjnej; b) termogram symulacyjny, uzyskany przy pomocy modelu numerycznego.



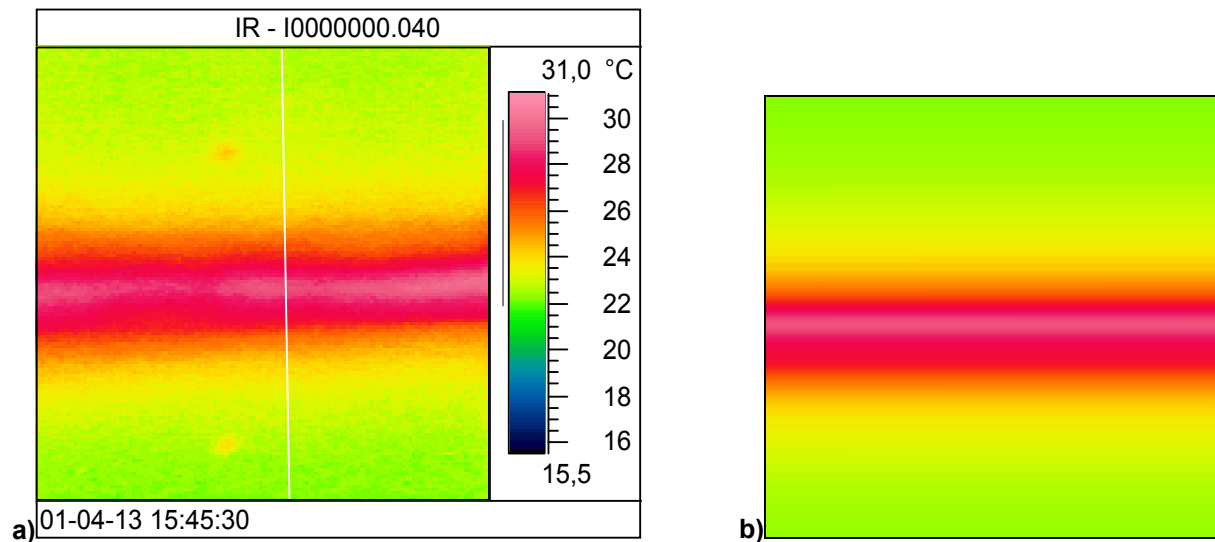
Rys. 3. Profil temperatury na powierzchni podłogi. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń modelu numerycznego;  $x$  – współrzędna geometryczna.



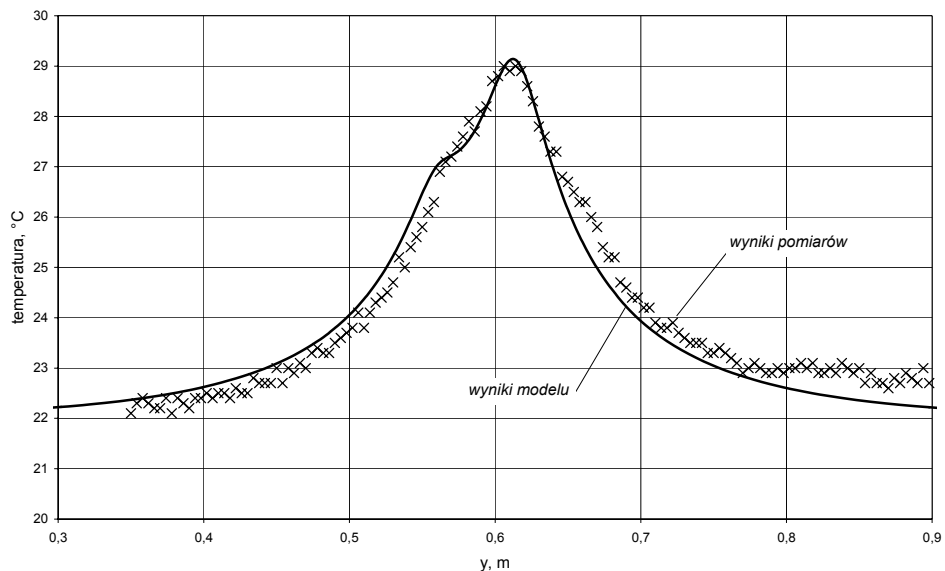
Rys. 4. Przebieg izoterm w przekroju stropu dla pary przewodów w peszlu w odstępie 10 cm. Fragment stropu o szerokości 1 m.



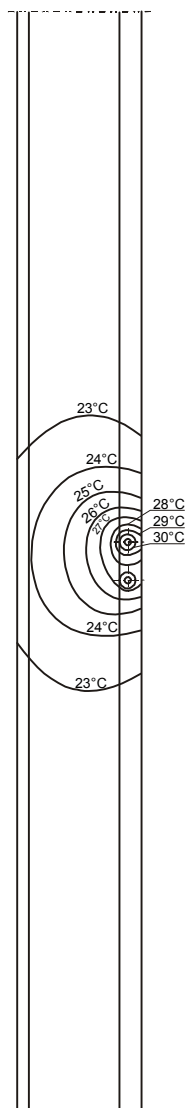
Rys. 5. Pole temperatury w przekroju stropu wg modelu numerycznego w postaci symulacyjnego zdjęcia termowizyjnego. Para przewodów w peszlu w odstępie 10 cm. Kolor wewnątrz rurek odpowiada temperaturze na zewnętrznej powierzchni peszla.



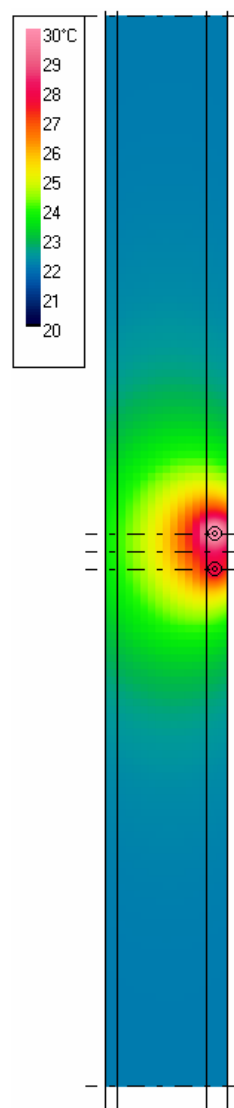
Rys. 6. Termogramy fragmentu ściany:  
 a) termogram wykonany przy użyciu kamery termowizyjnej;  
 b) termogram symulacyjny, uzyskany przy pomocy modelu numerycznego.



Rys. 7. Profil temperatury na powierzchni ściany. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń modelu numerycznego.  $y$  – współrzędna pionowa, licząc od powierzchni podłogi w górę.



Rys. 8. Przebieg izoterm w przekroju ściany wg modelu numerycznego. Para przewodów w peszlu w odstępnie 5 cm.



Rys. 9. Pole temperatury w przekroju ściany wg modelu numerycznego w postaci symulacyjnego zdjęcia termowizyjnego. Kolor wewnątrz rurek odpowiada temperaturze na zewnętrznej powierzchni peszla.