

**Andrzej WRÓBEL, Alina WRÓBEL**AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ GEODEZJI GÓRNICZEJ I INŻYNIERII ŚRODOWISKA,  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków**Uwagi o dokładności pomiarów termograficznych w budownictwie****Dr inż. Andrzej WRÓBEL**

Absolwent Wydziału Geodezji Górniczej Akademii Górniczo-Hutniczej (1977). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1987 roku. Adiunkt w Katedrze Geoinformacji Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska. Główne zainteresowania zawodowe: fotogrametria zwłaszcza zastosowania fotogrametrii w inwentaryzacji zabytków, geodezja, teledetekcja, termografia. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 40 publikacji. Hobby: fotografia.



e-mail: awrobel@agh.edu.pl

**Dr hab. inż. Alina WRÓBEL**

Absolwentka Wydziału Geodezji Górniczej Akademii Górniczo-Hutniczej (1979). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskała w 1988, a doktora habilitowanego w 2011 roku. Adiunkt w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa. Zainteresowania naukowe to: termografia, geodezja inżynierska, teledetekcja, budownictwo. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 60 publikacji. Wiele z nich dotyczy zastosowania termografii w budownictwie. Hobby: ogrodnictwo.



e-mail: alibel@agh.edu.pl

**Streszczenie**

Ilościowe pomiary termograficzne w budownictwie wymagają bardzo dokładnego określenia różnicy temperatury powierzchni ściany i powietrza w jej sąsiedztwie. Autorzy analizują czynniki mające wpływ na dokładność pomiarów. Przedstawiają dokładności pomiarów termograficznych uzyskane w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych budynkach mieszkalnych.

**Słowa kluczowe:** różnica temperatury, dokładność pomiaru, współczynnik przenikania ciepła.

**Remarks on the accuracy of thermovision measurements in building engineering****Abstract**

Determination of a wall thermal transmittance requires precise measurements of the difference between temperatures of air and wall surface. One of possible ways to do it is a thermographic survey. In this paper the authors present factors that affect accuracy of such measurements. Two thermographic cameras manufactured by FLIR – ThermaCAM S60 and ThermaCAM P620 were examined. The following values were measured (100 measurements at 3-minute intervals): temperatures of the wall surface and a sheet of paper in a room under stable conditions (Figs. 2 and 3). The results of single measurements were compared with the average values from the measurement period. The standard deviation was:  $\sigma = 0.035 \div 0.045$  K – temperature measured in the area on a thermogram;  $\sigma = 0.01$  K – difference between temperatures of two areas on the same thermogram;  $\sigma = 0.065 \div 0.08$  K – temperature measured in a single point on a thermogram;  $\sigma = 0.08$  K – difference between temperatures of two points on the same thermogram (Tab. 1). The temperatures of the air and wall surface change vertically, therefore they should be measured on the same height. It is very important to maintain stable conditions in a room where the measurements are taken. The measured values are noticeably disturbed in the following circumstances: when people enter the room (Fig. 8), when light is turned on (Fig. 9), when diffused sunlight falls through a curtained window (Fig. 10).

**Keywords:** temperature difference, measurement accuracy, thermal transmittance.

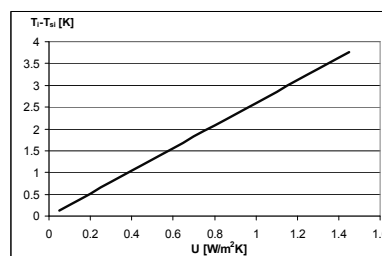
**1. Wprowadzenie**

W ostatnich kilkudziesięciu latach istotnym zmianom uległy wymagania z zakresu ochrony cieplnej budynków i budowl. Zmianom podlegały również narzucające przez odpowiednie przepisy wartości współczynnika przenikania ciepła [1]. W praktyce wynosiły około  $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  w przypadku ścian budynków z lat 60. XX wieku, a  $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$  współcześnie.

W ostatnich latach zauważa się dążenie do wznoszenia budynków o coraz lepiej izolowanych przegrodach (w budynkach pasywnych wartość  $U$  jest mniejsza od wymaganej przepisami) i do kontroli jakości ich wykonania. Kontrola jakości może być przeprowadzana na etapie projektu (łatwa) oraz po realizacji budynku (znacznie trudniejsza). W celu wyznaczenia wartości współczynnika  $U$  w rzeczywistych budynkach metodą termograficzną,

opisaną w [2], należy jak najdokładniej zmierzyć różnicę temperatury pomiędzy powierzchnią ściany i powietrzem w jej sąsiedztwie.

Różnica temperatury pomiędzy powietrzem wewnątrz budynku i wewnętrzną powierzchnią przegrody budowlanej jest tym mniejsza im mniejsza jest wartość współczynnika  $U$ . Ta zależność w warunkach 20 stopniowej różnicy temperatury powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku pokazana jest na rysunku 1.



Rys. 1. Wartość współczynnika  $U$  a różnica temperatury powietrza i wewnętrznej powierzchni ściany

Fig. 1. Relationship between the thermal transmittance and difference between temperatures of air and wall surface at the interior side of the wall

**2. Doświadczalne badania dokładności pomiaru kamerą termograficzną**

W latach 2007 – 2010 prowadzono badania na temat ilościowych pomiarów termograficznych w budownictwie. W ramach tych badań przeprowadzono również analizę dokładności pomiaru temperatury i różnicy temperatury kamerą termograficzną ThermaCAM S60 firmy FLIR [2].

Pomiar wykonywano w komorze klimatycznej oraz w rzeczywistych budynkach. Mierzono temperaturę na powierzchni ściany oraz na powierzchni kartki papieru, która przyjmowała temperaturę powietrza. Temperaturę wynikową przyjmowano jako średnią wartość z pół pomiarowych, mierzono także temperaturę w kilku punktach pomiarowych. Pomiar w komorze klimatycznej wykonywano po ciepłej stronie przegrody a w budynkach rzeczywistych od strony wewnętrznej.

Badania niepewności pomiaru termowizyjnego metodami analitycznymi zwłaszcza z uwzględnieniem specyficznych warunków pomiarów ilościowych w budownictwie są utrudnione [3]. Dlatego też ocenę dokładności pomiaru temperatury i różnicy temperatury przeprowadzono przez obliczenie niepewności standardowej typu A [4] z wykorzystaniem dużej liczby praktycznych pomiarów. Do analizy dokładności wybierano okresy, w których temperatura powietrza po obu stronach przegrody niewiele się wahała a mierzona ciepłomierzem gęstość strumienia ciepła była stabilna. Tak dobrane warunki umożliwiały uzyskanie quasi-ustalonego przepływu ciepła, uzyskanie w pełni ustalonego przepływu ciepła w warunkach rzeczywistych było w zasadzie niemożliwe.

Średnią wartość temperatury w danym polu pomiarowym lub punkcie pomiarowym w badanym okresie przyjmowano jako poziom odniesienia i z odchyżeń chwilowych wartości temperatury od tego poziomu odniesienia obliczano odchylenie standardowe. Analizowano również dokładność różnicy temperatury obliczonej z pól pomiarowych pomierzonych na tym samym termogramie, co w dużej mierze uniezależniało wyniki pomiaru i ocenę jego dokładności od ewentualnych błędów miejsca zera i błędów kalibracji kamery.

Do określania wartości temperatury i różnicy temperatury wykorzystywano, program ThermaCAM Researcher, który umożliwił odczyt z rozdzielczością 0,001 K a nie tylko standardową 0,1 K.

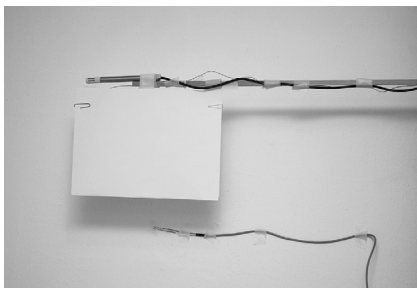
Z badań prowadzonych w rzeczywistych budynkach przeanalizowano 136 termogramów rejestrowanych co jedną minutę. Odchylenie standardowe temperatury pól pomiarowych wyniosło około 0,06 K. Dla różnicy temperatury odchylenie standardowe wyniosło natomiast około 0,017 K.

W komorze klimatycznej badano kilka różnych przegród. Założoną temperaturę powietrza po obu stronach przegrody utrzymywał automatyczny sterownik. Rzeczywista wartość temperatury powietrza wahała się nieco wokół wartości średniej, co powodowało zmienność średniej temperatury pól pomiarowych. Wykonano więc jedynie ocenę dokładności pomiaru różnicy temperatury pomiędzy polami.

Analizie poddano sześć okresów pomiarowych, w których rejestrowano od 57 do 118 termogramów. Odchylenie standardowe różnic temperatury dla pięciu okresów wyniosło od 0,014 K do 0,025 K, natomiast dla jednej z przegród wyniosło 0,042 K.

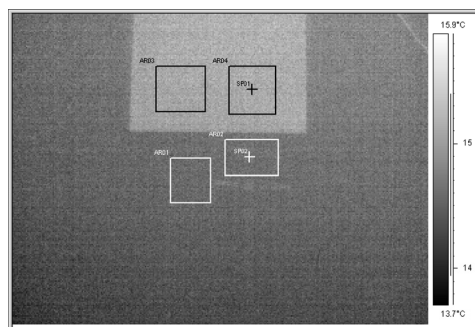
W opisanych wyżej pomiarach wykorzystywano przez cały czas tą samą kamerę. Postanowiono przeprowadzić jeszcze jeden eksperyment wykonując pomiar równoległe dwoma kamerami.

Do badań wybrano pomieszczenie o ustabilizowanej temperaturze w piwnicy domu jednorodzinnego. Dwoma kamerami termograficznymi firmy FLIR ThermaCAM S60 (o matrycy 320 x 240 pikseli) oraz ThermaCAM P620 (o matrycy 640 x 480 pikseli) rejestrowano powierzchnię ściany, przed którą umieszczono kartkę papieru przyjmującą temperaturę otaczającego powietrza (rys. 2). Pomiar wykonywano co trzy minuty. Dodatkowo rejestrowano temperaturę powietrza i ściany czujnikami Almemo firmy AHLBORN. Na termogramach temperaturę mierzono w czterech polach i dwóch punktach pomiarowych, których lokalizację przedstawia rysunek 3. Pola pomiarowe miały wielkość około 1000 pikseli na termogramach z kamery S60 i odpowiednio około 4000 pikseli na termogramach z kamery P620.



Rys. 2. Pole testowe do badania dokładności kamery  
Fig. 2. Test field used to examine the camera accuracy

Z całego okresu pomiarowego do analizy dokładności pomiaru przyjęto termogramy zarejestrowane od godziny 2:35 do godziny 7:50, w którym to okresie temperatura ściany i powietrza była ustabilizowana. Fakt stabilizacji temperatury potwierdziły pomiary zrealizowane za pomocą zestawu czujników Almemo, temperatura powietrza wahała się w tym czasie nie więcej niż 0,02 K. Z analizy wyłączono termogramy o zarejestrowanej naglej zmianie temperatury powstałej z przyczyn zewnętrznych. Ostatecznie z kamery S65 wykorzystano 104 termogramy, a z P620 - 105 termogramów. Uzyskane wyniki analizy statystycznej przedstawiono w tabeli 1.



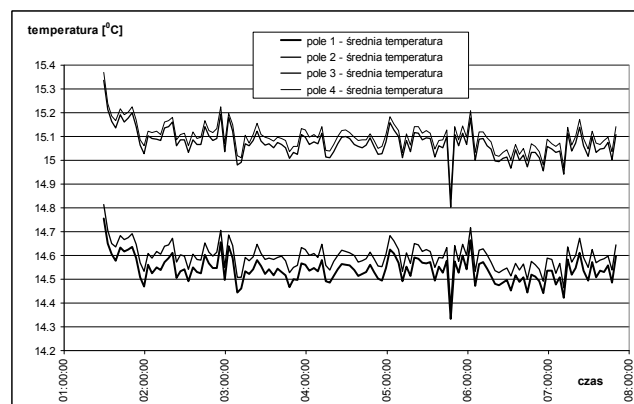
Rys. 3. Rozmieszczenie pól i punktów pomiarowych na termogramie  
Fig. 3. Location of measurement points and areas on the thermogram

Tab. 1. Odchylenie standardowe i maksymalne odchylenie wartości chwilowych od wartości średnich

Tab. 1. Standard and maximum deviation of single measurements from average values

Kamera	Analizowana wielkość	Odchylenie standardowe od średniej z badanego okresu [K]	Maksymalne odchylenie od średniej [K]
ThermaCAM S60	średnia temperatura pole 1	0,045	0,128
	średnia temperatura pole 2	0,045	0,128
	średnia temperatura pole 3	0,047	0,132
	średnia temperatura pole 4	0,047	0,133
	różnica temp. pole 3 – pole 1	<b>0,009</b>	<b>0,020</b>
	różnica temp. pole 3 – pole 1	<b>0,008</b>	<b>0,020</b>
	temperatura punkt 1	0,080	0,199
	temperatura punkt 2	0,066	0,205
ThermaCAM P620	średnia temperatura pole 1	0,034	0,076
	średnia temperatura pole 2	0,036	0,081
	średnia temperatura pole 3	0,036	0,087
	średnia temperatura pole 4	0,038	0,084
	różnica temp. pole 3 – pole 1	<b>0,008</b>	<b>0,022</b>
	różnica temp. pole 3 – pole 1	<b>0,008</b>	<b>0,022</b>
	temperatura punkt 1	0,066	0,222
	temperatura punkt 2	0,065	0,191
różnica: temper. punkt 1 – punkt 2	<b>0,078</b>	<b>0,191</b>	

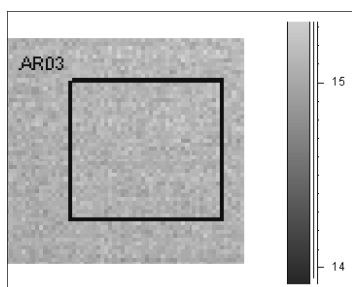
Odchylenie standardowe chwilowej wartości temperatury pola pomiarowego jest cztery do pięciu razy większe niż odchylenie standardowe różnicy temperatury tych samych pól. Uzasadnienie tego faktu obrazuje wykres temperatury czterech pól pomiarowych mierzonych na tym samym termogramie (rys. 4).



Rys. 4. Średnia temperatura pól pomiarowych w badanym okresie  
Fig. 4. Average temperature of measurement areas in the measurement period

Niestabilności pracy kamery powodują zmiany bezwzględnej wartości temperatury tych pól, ale te zmiany są podobne dla nich wszystkich. W związku z tym różnica temperatury dwóch pól pomierzona na tym samym termogramie nie jest tymi skutkami niestabilności obciążona. Wynika z tego jednoznacznie, że przy badaniach ilościowych w budownictwie należy mierzyć na jednym termogramie różnicę temperatury powietrze – powierzchnia ściany.

Odchylenie standardowe pomiaru temperatury w punktach jest około dwukrotnie wyższe niż dla pól pomiarowych. Przyczynę tego obrazuje rysunek 5. Pola pomiarowe obejmowały fragmenty obiektu o jednakowej temperaturze. Poszczególne piksele pól pomiarowych mają jednak różnicę temperatury co wynika m.in. z szumu i dryftu chwilowej wartości sygnału pojedynczych detektorów matrycy [5]. To zróżnicowanie temperatury w polu pomiarowym można scharakteryzować odchyleniem standardowym wyznaczonym przez program TermaCAM Researcher podczas pomiaru termogramów (tab. 2).

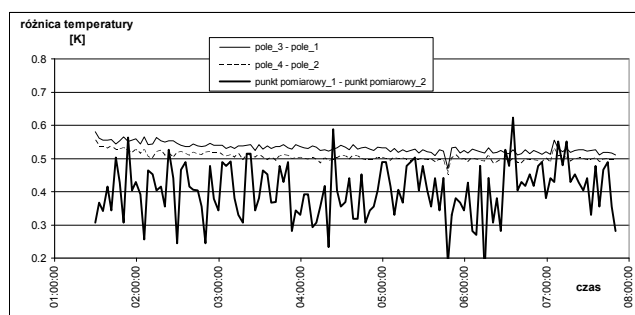


Rys. 5. Zróżnicowanie temperatury w polu pomiarowym na termogramie  
Fig. 5. Differences of temperature in a measurement area on a thermogram

Tab. 2. Odchylenie standardowe opisujące zróżnicowanie temperatury w polu pomiarowym  
Tab. 2. Standard deviation describing temperature differences in the measurement area

Kamera	Przeciętne odchylenie standardowe wartości temperatury poszczególnych pikseli od średniej wartości temperatury pola pomiarow. [K]			
	Pole 1	Pole 2	Pole 3	Pole 4
ThermaCAM S65	0,085	0,084	0,087	0,084
ThermaCAM P620	0,066	0,068	0,068	0,066

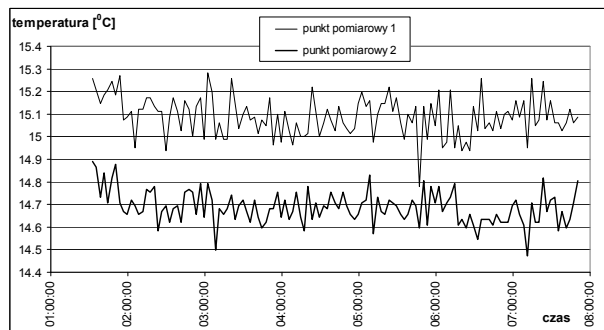
Odchylenie standardowe różnicy temperatury punktów pomiarowych jest kilka razy większe niż odchylenie standardowe różnicy temperatury pól pomiarowych (tab. 1).



Rys. 6. Różnice temperatury pomiędzy polami i pomiędzy punktami pomiarowymi  
Fig. 6. Temperature differences between the measurement areas and between the measurement points

Maksymalne odchylenia od średniej różnicy temperatury punktów pomiarowych są nawet dziesięć razy większe niż różnice temperatury pól pomiarowych. Widać to wyraźnie na rysunku 6, na którym przedstawiono rozkłady wartości różnic temperatury pól pomiarowych i punktów pomiarowych w badanym okresie.

O ile wahania temperatury pól pomiarowych były identyczne dla wszystkich pól pomiarowych o tyle wahania temperatury punktów pomiarowych są w dużej mierze niezależne (rys. 7). Wahania te się nie znoszą i odchylenie standardowe różnicy temperatury punktów pomiarowych ma podobną wartość jak odchylenie standardowe temperatury samych punktów (tab. 1).

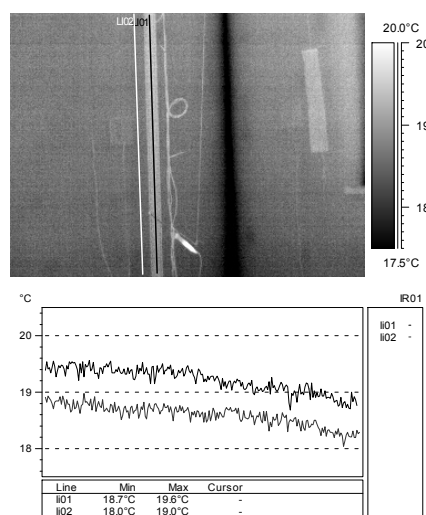


Rys. 7. Temperatura punktów pomiarowych w badanym okresie  
Fig. 7. Temperature of measurement points in the measurement period

### 3. Dodatkowe czynniki wpływające na dokładność pomiaru termograficznego

Dokładność pomiaru różnicy temperatury potrzebnej do wyznaczenia współczynnika U nie zależy jedynie od dokładności kamery. Bardzo duży wpływ mają dodatkowe „zewnętrzne” czynniki.

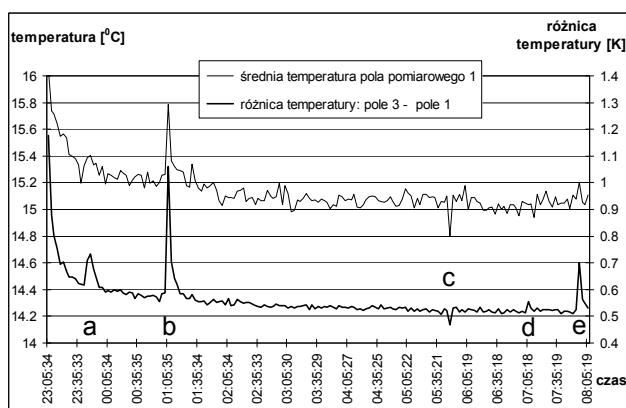
Temperatura powietrza w pomieszczeniu jest znacznie zróżnicowana. Na rysunku 8 pokazano termogram fragmentu powierzchni ściany i bawełnianej taśmy zawieszanej u sufitu. Taśma przyjmowała temperaturę otaczającego ją powietrza. Na zobrazowanym na termogramie fragmencie taśmy różnica temperatury „górną-dół” wynosi około 0,7°C. Podobnie zmienia się temperatura powierzchni ściany. Jeżeli celem pomiaru termograficznego ma być obliczanie współczynnika U, czy też strat ciepła, należy mierzyć temperaturę powierzchni ściany i powietrza na tej samej wysokości i w odpowiedniej odległości. Pomiar temperatury powietrza w innym miejscu lub innym niezależnym od kamery urządzeniem może prowadzić do bardzo dużych błędów.



Rys. 8. Pionowy profil temperatury powietrza i powierzchni ściany  
Fig. 8. Vertical profile of air and wall surface temperature

W czasie wykonywania pomiaru termograficznego należy starać się w jak najmniejszym stopniu zakłócać warunki panujące w pomieszczeniu, w którym wykonuje się pomiar. Przez pewien czas przed oraz w czasie pomiaru pomieszczenie powinno być wyłączone z użytkowania, nie powinien tam nikt przebywać ani

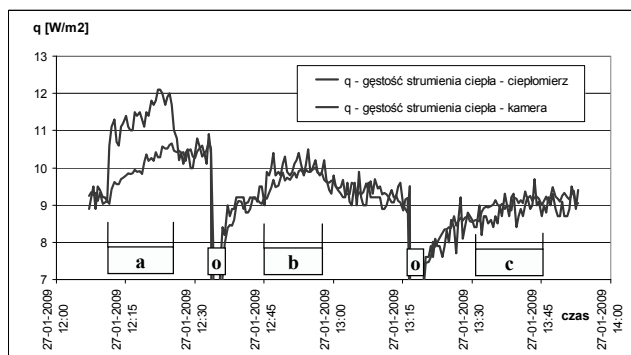
nie należy włączać światła. Ilustrację skutków przebywania osób w pomieszczeniu przedstawiono na rysunku 9. Pomieszczenie, w którym prowadzono badania dokładności kamer miało o wcześniej ustabilizowaną temperaturę. Po ustawieniu kamer włączono automatyczną rejestrację termogramów i opuszczono pomieszczenie. Instalacja kamer znacznie zmieniła warunki w pomieszczeniu i ustabilizowały się one dopiero po około trzech godzinach. Kilukrotnie wejście do piwnicy zaowocowało natychmiastowym podniesieniem rejestrowanej przez kamerę temperatury kartki papieru (rysunek 9 punkty a, b, d, e). Dłuższy pobyt w pomieszczeniu, zwłaszcza w okolicy rejestrowanego fragmentu ściany (punkt b) spowodował zmianę różnicy temperatur powietrza o kilka dziesiątych stopnia. Krótka wizyta w pomieszczeniu (punkt d) spowodowała niewielką, co prawda zmianę różnicy temperatur (około 0,04 K), ale już zauważoną przez kamerę. Obniżenie temperatury widoczne w punkcie c zarejestrowała tylko jedna kamera i można przypuszczać, że wynikało ono z chwilowej niestabilności pracy tej kamery.



Rys. 9. Rozkład temperatury pola pomiarowego i różnicy temperatur pól w całym okresie pomiarowym

Fig. 9. Average temperature of measurement area and difference between temperatures of measurement areas in the entire measurement period

We wcześniejszych badaniach [2], w których wykonywano równocześnie pomiar kamerą termograficzną oraz ciepłomierzem zauważono mocną reakcję obu mierników nawet na fakt włączenia światła w pomieszczeniu (rys. 10).

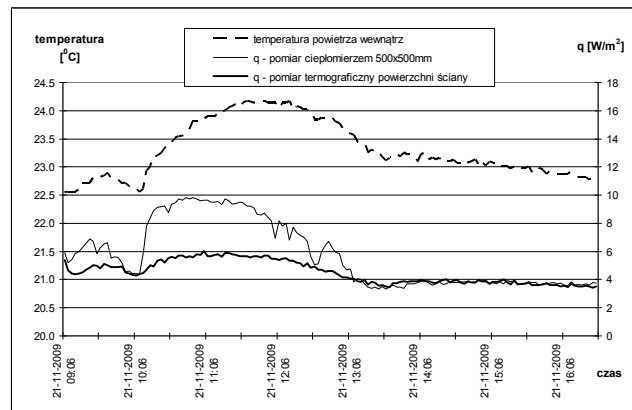


Rys. 10. Wpływ oświetlenia na pomiar gęstości strumienia ciepła: a – oświetlenie zwykłą żarówką, b – oświetleni żarówką halogenową, c – oświetlenie lampą fluorescencyjną, o – otwarcie drzwi komory [2]

Fig. 10. Influence of lighting on measurement of heat flux density: a – traditional light bulb, b – halogen lamp, c – fluorescent lamp, o – chamber door opened [2]

Mając na uwadze te wszystkie uwarunkowania prowadzono opisane w artykule badania pozostawiając kamerę na statywie z włączoną automatyczną rejestracją (bez operatora).

Istotnym czynnikiem zmieniającym warunki w pomieszczeniu jest również światło słoneczne. Rozproszone promieniowanie słoneczne wpadające przez okno zasłonięte podwójną płócienną zasłoną powodowało duże zmiany wskazań kamery a jeszcze większe ciepłomierza (rys.11), mimo że promienie słoneczne nie padały bezpośrednio na obserwowaną ścianę.



Rys. 11. Gęstość strumienia ciepła rejestrowana przez ciepłomierz i wyznaczona z pomiaru termograficznego w dzień słoneczny [2]

Fig. 11. Heat flux density measured using a heat flux meter and determined from thermographic measurement on a sunny day [2]

## 4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest termograficzne wyznaczenie różnicy temperatury z dokładnością rzędu kilku setnych Kelwina. Używane w opisanych pomiarach kamery ThermoCAM S60 i ThermoCAM P620 mają wartość NEDT odpowiednio 0,07 K i 0,06 K. Pomiar różnicy średniej temperatury pól pomiarowych obydwojma kamerami ma odchylenie standardowe poniżej 0,01 K a maksymalne odchyłki od średniej wynoszą około 0,02 K.

W czasie ilościowych pomiarów termograficznych należy unikać wpływu wszelkich czynników zakłócających. Mogą one znacznie obniżyć dokładność wyznaczenia różnicy temperatury powietrza i powierzchni ściany.

Praca niniejsza została wykonana w ramach badań statutowych nr AGH 11.11.150.949; 11.11.150.005.

## 5. Literatura

- [1] Steidl T.: Zmiany izolacyjności cieplnej przegród budowlanych na tle modyfikacji obowiązujących norm i przepisów. Energia i Budynek 2/2008.
- [2] Wróbel A. Praca zbiorowa: Ilościowe określanie cieplnych właściwości przegród budowlanych z wykorzystaniem techniki termograficznej. Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.
- [3] Minkina W. Dudzik S.: Termografia w podczerwieni – błędy i niepewności. PAK 11/2009.
- [4] Wyrażanie niepewności pomiaru – przewodnik. Główny Urząd Miar, 1999.
- [5] Więcek B. De Mey G.: Termowizja w podczerwieni. Wydawnictwo PAK 2011.

otrzymano / received: 02.08.2011  
przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany