

Jakub JURA, Janina ADAMUS
Politechnika Częstochowska

ZASTOSOWANIE TERMOGRAFII DO OCENY IZOLACYJNOŚCI CIEPLNEJ BUDYNKU

W artykule przedstawiono wykorzystanie pomiarów termowizyjnych do oceny izolacyjności cieplnej budynku użyteczności publicznej. Omówiono zagadnienia związane z pomiarami temperatury, zwracając szczególną uwagę na termografię, wykorzystującą promieniowanie podczerwone. Omówiono działanie kamery termowizyjnej ze wskazaniem czynników wpływających na dokładność pomiarów. Na podstawie wykonanych pomiarów określono przyczyny nadmiernej utraty ciepła oraz możliwości poprawy parametrów badanej przegrody.

Słowa kluczowe: termografia, kamera termowizyjna, promieniowanie podczerwone, ocena izolacyjności cieplnej

WPROWADZENIE

W ostatnim czasie coraz ważniejsze stają się tematy związane z oszczędzaniem energii. W związku z tym poszukiwane są nowe materiały i metody, które w jak najlepszym stopniu będą izolowały budynek od otoczenia i będą pozwalały na uniknięcie strat energii przez mostki cieplne w obudowie budynku. Coraz częściej do oceny energooszczędności budynku wykorzystuje się termografię [1, 2]. Z użyciem nowoczesnych kamer termowizyjnych w szybki i prosty sposób można zlokalizować miejsca źle zaizolowane. Efektem niedostatecznej izolacji lub niewłaściwego wykonania ocieplenia obiektu są straty ciepła, które bardzo dobrze uwidoczniają zdjęcia termowizyjne [3].

Termografia, zwana popularnie termowizją, wykorzystuje detekcję promieniowania podczerwonego IR (infrared radiation). Obecnie jest to najpopularniejsza metoda obrazowania i rejestrowania rozkładu temperatury w obiektach. Dzięki niej można nie tylko wykrywać wiele usterek czy awarii, ale również im zapobiegać [4]. Poza budownictwem termografia wykorzystywana jest w ciepłownictwie, diagnostyce układów energoelektronicznych i urządzeń mechanicznych, w medycynie itp. [5].

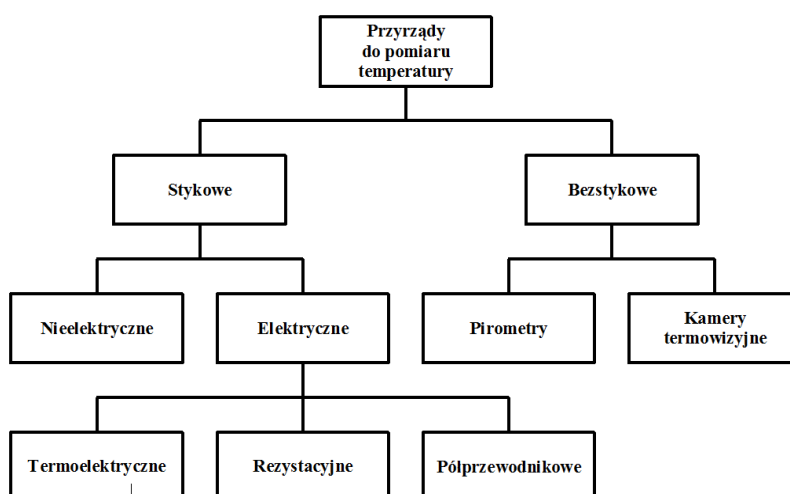
W artykule przedstawiono zastosowanie kamery termowizyjnej do oceny budynku pod względem przenikania ciepła przez dach budynku.

1. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest analiza technik pomiaru temperatury ze szczególnym uwzględnieniem termografii oraz przeprowadzenie badań termowizyjnych w celu określenia prawidłowości wykonania izolacji cieplnej dachu budynku użyteczności publicznej, znajdującego się w Częstochowie. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem kamery termowizyjnej serii V-20 firmy VIGO - System.

2. POMIARY TEMPERATURY

Pomiarów temperatury dokonuje się w sposób stykowy lub bezstykowy (rys. 1). Jest to podział według sposobu przejmowania ciepła między czujnikiem pomiarowym a ciałem lub ośrodkiem, którego temperatura jest mierzona. Podstawowym rodzajem przyrządów pomiarowych są termometry, czyli urządzenia, w których czujnik pomiarowy znajduje się w bezpośrednim styku z badanym ciałem lub ośrodkiem. Podczas wykonywania pomiaru temperatury zachodzi wymiana ciepła głównie na drodze konwekcji i przewodzenia.

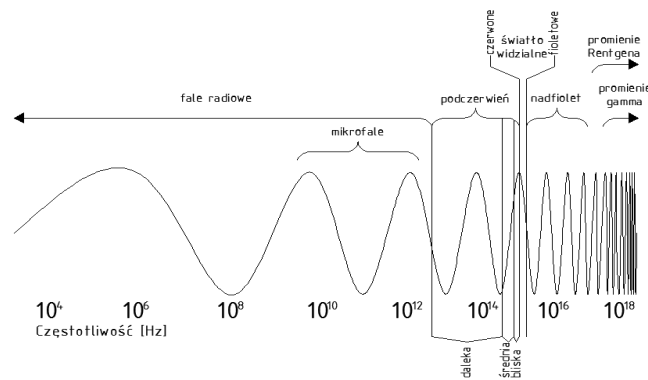


Rys. 1. Podział przyrządów do pomiaru temperatury

Bezstykowymi przyrządami do pomiaru temperatury są pirometry i kamery termowizyjne, które wykorzystują zjawisko wysyłania promieniowania cieplnego przez ciało lub ośrodek, którego temperatura jest mierzona. Czujnik pirometru/kamery termowizyjnej przetwarza określoną część wysyłanego promieniowania cieplnego na wielkość fizyczną, która daje możliwość pomiaru na drodze elektrycznej. Różnica w pomiarach między piometrem a kamerą termowizyjną jest taka, że piometr mierzy temperaturę w określonym punkcie, natomiast kamera termowizyjna przedstawia rozkład temperatur na powierzchni badanego obiektu w postaci termogramu [6].

Głównym i najważniejszym pojęciem w termografii jest promieniowanie podczerwone. Zostało ono odkryte przypadkowo, w 1800 roku, przez Williama Herschela, przy okazji badania różnych części widma światła słonecznego. Herschel poszukiwał materiału filtrującego, który mógłby zredukować ilość przepuszczanego ciepła i jasność słońca w teleskopie. Podczas badania temperatury poszczególnych barw spektrum światła widzialnego, utworzonych w czasie przechodzenia światła białego przez pryzmat, doszedł do wniosku, że światło przy czerwonym krańcu widma grzeje i że efekt ten jest jeszcze silniejszy poza tym krańcem. Odkryte promieniowanie nazwał podczerwonym. Jest ono niewidzialne dla ludzkiego oka, ale odczuwalne w postaci ciepła. Od momentu odkrycia dokonanego przez Herschela zastanawiano się, w jaki sposób można wykorzystać promieniowanie podczerwone. Jako pierwsze powstały wojskowe systemy obserwacyjne. W 1960 roku na zlecenie wojska wyprodukowano pierwszą kamerę termowizyjną AGA 600. Przez wiele lat próbowano rozwiązać problemy związane z dużymi gabarytami, ciężarem i chłodzeniem kamery. Istotny postęp nastąpił w latach siedemdziesiątych XX wieku. Wiek XXI to dynamiczny rozwój technik komputerowych, a co za tym idzie - obróbki obrazów termograficznych oraz nowych technologii, co prowadzi do ciągłego unowocześniania zarówno kamer termowizyjnych, jak i dokładności uzyskiwania wyników [7].

Promieniowanie podczerwone jest promieniowaniem elektromagnetycznym o długości fali od 700 nm do 100 μm . Dzieli się je na promieniowanie bliskie o długości fali 0,7÷1,5 μm (near infrared radiation NIR), promieniowanie średniofalowe o długości fali 1,5÷5 μm (mid infrared radiation MIR) oraz promieniowanie długofalowe, tzw. dalekie 5÷100 μm (far infrared radiation FIR) [8]. Z uwagi na widmo fal elektromagnetycznych usytuowane jest ono między czerwonym światłem widzialnym a falami radiowymi (rys. 2).



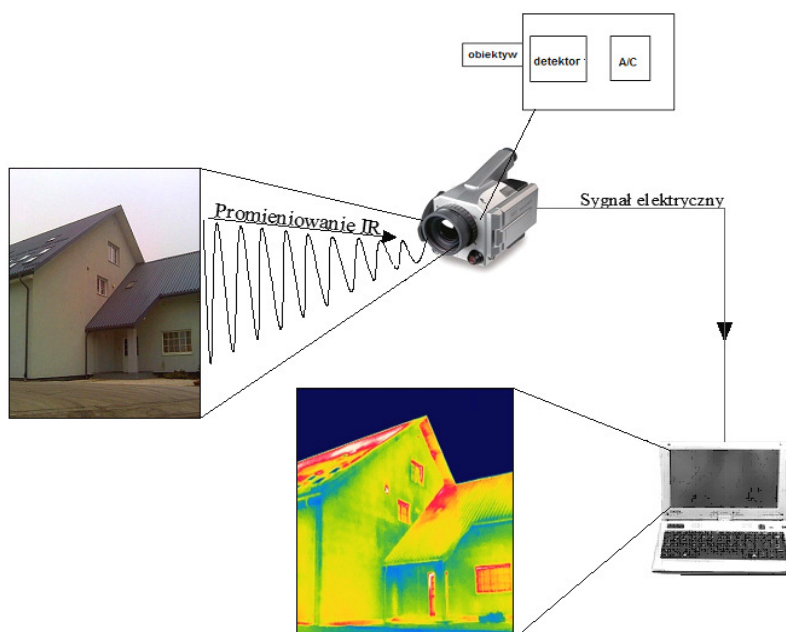
Rys. 2. Widmo fal elektromagnetycznych

Działanie kamery termowizyjnej opiera się na zjawisku promieniowania podczerwonego, a więc detekcji energii fal elektromagnetycznych. Każde ciało posiadające temperaturę wyższą od zera bezwzględnego, tj. 0 K, jest źródłem promieniowania podczerwonego. Intensywność tego promieniowania uzależniona jest od temperatury oraz cech powierzchni danego ciała.

Termowizja jest więc rodzajem termometru działającego na odległość, który poprzez rejestrację różnic promieniowania podczerwonego pozwala stworzyć obraz temperaturowy badanego obiektu, nazywany termogramem. Rozkład temperatury na powierzchni badanych obiektów przedstawiany jest w postaci barwnych izoterm, gdzie jeden kolor odpowiada punktom o tej samej temperaturze [9].

Termowizja

Badanie temperatury danego obiektu z wykorzystaniem podczerwieni jest badaniem bezkontaktowym, nie zakłócającym jego działania i w żaden sposób w niego nie ingerującym. Badanie termowizyjne jest dwuwymiarowe, co oznacza, że uzyskany obraz pozwala na przegląd obiektu. Badane obiekty skanowane są w czasie rzeczywistym, a wynik badania znany jest natychmiast. Efektem badań wykonywanych kamerą termowizyjną jest termogram, czyli obraz rozkładu temperatur na powierzchni badanego obiektu. Termogram, podobnie jak zdjęcie fotograficzne, jest obrazem powierzchni obiektów, otrzymanym w określonym przedziale promieniowania elektromagnetycznego. Zdjęcie, wykonane zwykłym aparatem fotograficznym, najczęściej powstaje wskutek odbicia od obiektu promieniowania widzialnego. Termogram natomiast powstaje na podstawie wysyłanego przez obiekt oraz odbijanego od niego, niewidzialnego dla człowieka, promieniowania podczerwonego. Termografia została włączona do technik teledetekcyjnych z uwagi na możliwość otrzymania w krótkim czasie powierzchniowego rozkładu temperatur. Do rejestrowania temperatur nie jest wymagane oświetlenie. Każdy obiekt wysyłający promieniowanie podczerwone jest widoczny na termogramie (rys. 3) [10].



Rys. 3. Schemat działania termografu

Promieniowanie podczerwone, wysyłane przez badany obiekt, pada na obiektyw kamery termowizyjnej. Po przejściu przez układ optyczny otrzymuje się obraz zogniskowany na termoczułym detektorze, przetwarzającym promieniowanie podczerwone na sygnały elektryczne, które w przetworniku analogowo-cyfrowym (A/C) są zamieniane na postać cyfrową. Ostatecznie, na ekranie monitora wyświetlany jest obraz badanego obiektu w postaci termogramu.

3. LOKALIZACJA STRAT CIEPŁA ZA POMOCĄ TERMOWIZJI

Szczególnym zastosowaniem termowizji jest diagnostyka izolacyjności cieplnej nowych obiektów budowlanych, jak i tych, które podlegają modernizacji. Można zatem stwierdzić, że do procesu budowlanego wprowadzany jest nowy etap, który można nazwać powykonawczą diagnostyką cieplną budynku. Za pomocą zdjęć termowizyjnych dokonywana jest jakościowa i ilościowa ocena izolacji, w tym występowania mostków cieplnych, a więc miejsc niepożądanych, których właściwości termoizolacyjne są gorsze od pozostałej części przegrody. W miejscach tych występuje zwiększona emisja ciepła z obiektu.

Jeżeli badania kamerą termowizyjną mają być wiarygodne, muszą być spełnione określone warunki. Podstawowym warunkiem jest przepływ ciepła przez przegrodę badanego obiektu budowlanego [11]. Najlepszym czasem do wykonywania badań termowizyjnych jest okres grzewczy. Wynika to z dużej różnicy temperatur we wnętrzu i na zewnątrz budynku. Różnica temperatur powinna wynosić co najmniej $\sim 15^{\circ}\text{C}$. Przykładowo przy temperaturze zewnętrznej oscylującej w okolicach 5°C wewnątrz obiektu powinno być nie mniej niż 20°C . Kolejnym istotnym warunkiem, który może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki jest stopień nasłonecznienia obiektu. Najdokładniejsze wyniki uzyskuje się przy jak najmniejszym nasłonecznieniu, ponieważ wtedy na termogramie ciepło pochodzące od słońca nie zakłóca wyników. Wychodząc z tych założeń, najczęściej badania termowizyjne wykonywane są w dni pochmurne, przed wschodem słońca, późnym wieczorem lub w nocy.

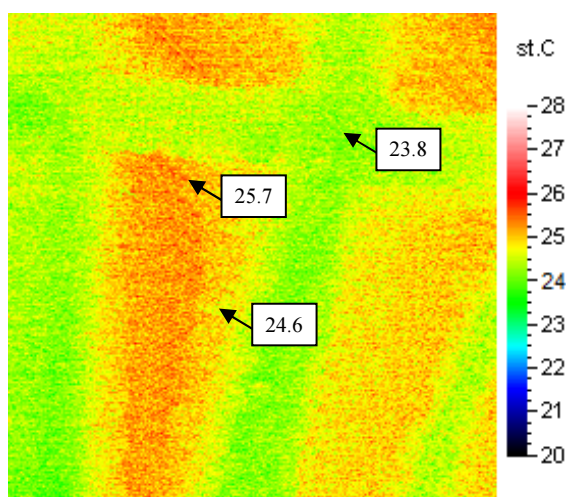
Ponadto przed przystąpieniem do badań należy ustalić materiał, z jakiego wykonany jest obiekt. Jest to potrzebne do wyznaczenia emisyjności materiału. Emisyjność jest miarą szacującą intensywność promieniowania z badanego obiektu w stosunku do intensywności promieniowania z ciała doskonale czarnego o tej samej temperaturze. Emisyjność obiektów waha się od 0,1 do 0,95 (np. dla cegły zwykłej wynosi $0,85 \div 0,94$, a dla aluminium $0,07 \div 0,25$) (tab. 1) [12].

Wartość emisyjności zależy również od temperatury obiektu. W mniej zaawansowanych kamerach termowizyjnych należy ustalić odległość kamery od analizowanego obiektu, gdyż część promieniowania obiektu jest pochłaniana przez atmosferę znajdującą się pomiędzy obiektem i kamerą termowizyjną. Ponadto transmisja promieniowania zależy w dużym stopniu od wilgotności powietrza. Dla skompensowania tego zjawiska należy określić właściwą wartość względnej wilgotności powietrza. Przy małych odległościach i normalnej wilgotności powietrza względną wilgotność powietrza można określić na poziomie 50%.

Tabela 1. Współczynniki emisyjności wybranych materiałów wg [12]

Materiał	Współczynnik emisyjności ϵ
Cement	0,54
Glina	0,91
Lakier biały	0,87
Miedź	0,07÷0,88
Stal	0,11÷0,69

W bardziej zaawansowanych kamerach termowizyjnych istnieje możliwość zapisu termogramu w karcie pamięci lub przesyłania bezpośrednio do komputera. Istnieje również możliwość jednoczesnego wykonywania termogramu i zdjęcia, takiego jakiego wykonuje się za pomocą zwykłego aparatu fotograficznego. Dzięki temu podczas analizy realizowanej na komputerze można dokonać zestawienia tych obrazów i w łatwy sposób zobrazować rozkład temperatur w badanym obiekcie.



Rys. 4. Przykładowy termogram z możliwością bezpośredniego odczytu temperatur lub odczytu za pomocą skali barw

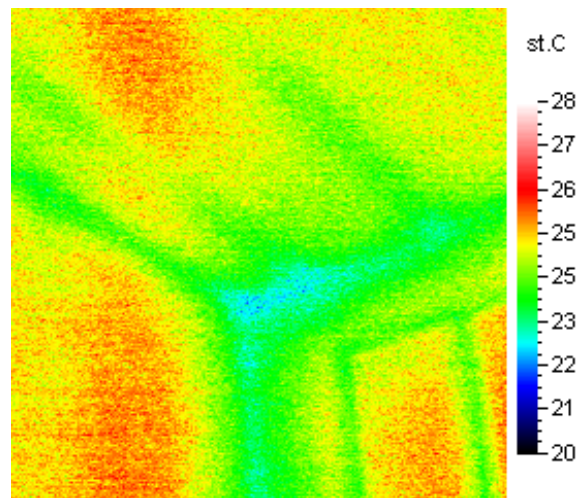
Analizy temperatury badanego obiektu można dokonać na podstawie skali barw dołączonej do termogramu lub poprzez wskazanie danego miejsca i sczytanie jego temperatury (rys. 4).

4. WYNIKI BADAŃ

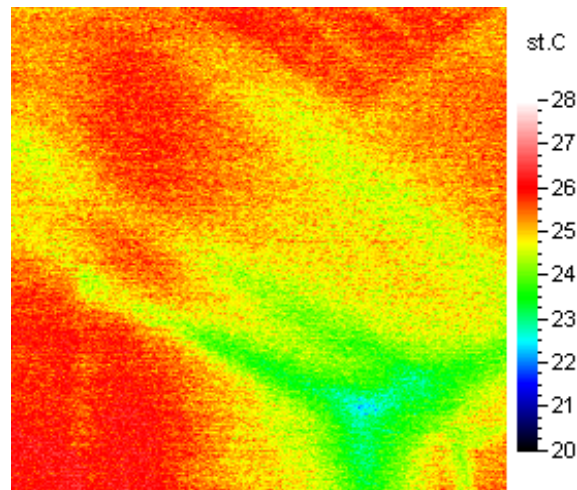
Analizowano rozkład temperatury na wewnętrznej powierzchni stropu ostatniej kondygnacji oraz ściany zewnętrznej budynku. Badania wykonano przy temperaturze zewnętrznej oscylującej w okolicach 10°C oraz temperaturze wewnętrznej 25°C.

Elementem konstrukcyjnym stropodachu są belki stalowe. Strop wypełniony jest żelbetowymi płytami prefabrykowanymi i ocieplony pięciocentymetrową warstwą styropianu. Warstwę wierzchnią stanowi papa bitumiczna. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 5-7.

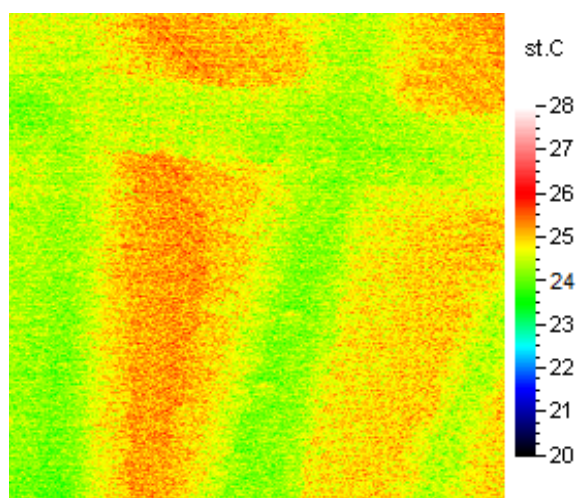
Analizując przedstawione termogramy (rys. 5-7), widać wyraźną różnicę barw, co oznacza zróżnicowanie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody. Z rysunków 5 oraz 6 widać, że temperatura na powierzchni naroża łączącego ścianę zewnętrzną, wewnętrzną oraz dach wynosi około 21°C i jest niższa od temperatury pozostałych elementów, gdzie średnia temperatura wynosi około $22,5^{\circ}\text{C}$. Im powierzchnia badanego obiektu jest bardziej oddalona od połączenia ścian z dachem, tym temperatura jest wyższa i waha się w przedziale od 23 do 26°C .



Rys. 5. Termogram połączenia ściany zewnętrznej ze stropem



Rys. 6. Termogram analizowanego naroża budynku



Rys. 7. Termogram konstrukcji dachowej ocenianego budynku

Analizując termogramy pod względem izolacyjności dachu, zauważyć można, że stalowe belki, będące elementem konstrukcyjnym dachu, mają niższą temperaturę od reszty powierzchni wewnętrznej dachu. Belki stropowe mają temperaturę około $23\div 24^{\circ}\text{C}$. Pozostała powierzchnia dachu posiada temperaturę zbliżoną do $25,5\div 26^{\circ}\text{C}$. Pokazuje to, że warstwa izolacyjna konstrukcji dachowej jest niewystarczająca. Jedną z przyczyn strat ciepła w pomieszczeniu jest przenikanie przez belki stropowe.

WNIOSKI

Analiza uzyskanych w trakcie badań termogramów wykazała niedostateczną izolację dachu ocenianego budynku. W celu zapewnienia budynkowi lepszych parametrów energetycznych zalecane jest docieplenie konstrukcji dachowej, tj. zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła przegrody zewnętrznej, przez którą badany budynek, i każdy inny, narażony jest na największe straty ciepła. Termomodernizacja zmniejszy ubytki ciepła i zmniejszy koszty ogrzewania budynku w okresie grzewczym.

LITERATURA

- [1] Molin A., Rohdin P., Moshfegh B., Investigation of energy performance of newly built low-energy buildings in Sweden, *Energy & Buildings*, October 2011, 43, 10, 2822-2831.
- [2] Garcez N., Lopes N., Brito J., Silvestre J., System of inspection, diagnosis and repair of external claddings of pitched roofs, *Construction and Building Materials*, October 2012, 35, Complete, 1034-1044.

- [3] Ocaña S.M., Guerrero I.C., Requena I.G., Thermographic survey of two rural buildings in Spain, *Energy and Buildings*, June 2004, 36, 6, 515-520.
- [4] Fokaides P., Kalogirou S., Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, *Applied Energy*, December 2011, 88, 12, 4358-4365.
- [5] Herve P., Cedelle J., Negreanu I., Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity, *Infrared Physics and Technology*, January 2012, 55, 1, 1-10.
- [6] Piotrowski J., Buchczik J., Illewicz W., *Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, WNT, Warszawa 2009.
- [7] Teterwak K., *Termowizja w teorii i praktyce - praca magisterska pod kierunkiem dr hab. inż. J. Adamus*, Częstochowa 2004, praca niepublikowana.
- [8] Naskręcki R., *Fale elektromagnetyczne czyli czym naprawdę jest światło?* Izoptyka nr 37 czerwiec 2006.
- [9] Nowak H., *Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie*, Oficyna Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [10] Pichniarczyk P., Zduniewicz T., *Wykorzystanie w budownictwie metody termowizji w podczerwieni*, *Izolacje* 7/8/2010.
- [11] Avdelidisam N.P., Moropoulou A., Emissivity considerations in building thermography, *Energy and Buildings*, August 2003, 35, 7, 663-667.
- [12] Katalog MERA Sp. z o.o. - Tabela emisyjności najpopularniejszych materiałów.

THERMOGRAPHY APPLICATION FOR ASSESSMENT OF BUILDING THERMAL INSULATION

The paper presents the use of thermography to evaluate the thermal insulation of public buildings. Some issues related to temperature measurements, especially thermography using infrared radiation, are discussed. The principles of operating a thermographic camera with indication of the factors affecting the accuracy of the measurements are presented. On the basis of the conducted measurements, the causes of excessive heat loss and the possibility of improving the performance of the tested structures are specified.

Keywords: thermography, thermal imaging camera, infrared radiation, evaluation of thermal insulation