

BADANIE METODĄ RADIOMETRYCZNĄ SPRAWNOŚCI CIEPLNEJ BUDYNKÓW

JAWORSKI Jan ¹
IWANOW Zdzisław ²

¹ Zakład Ekobudownictwa, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

² Zakład Metod Komputerowych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

ABSTRACT

The aim of this work is to discuss methods of evaluation building thermal performance by using radiometric method of measuring. The work presents formal description of thermal imaging of buildings in thermal scene taking into account radiation of the environment. In application of thermal imaging of the buildings the difference between temperatures of the building and the environment is rather low in comparison with other applications of radiometry. Therefore, amount of radiation of the environment plays crucial role in conducting building thermography. The work poses an important question, namely, whether for evaluation of building thermal performance it is needed to measure the amount of heat flux from building wall. The work presents methods of evaluation of building thermal performance on the basis of their thermal images. Also a program is discussed for determination of such thermal performance within the analyzed part of the building thermal image made by scanner AGEMA series 880.

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono zagadnienie określania metodą radiometryczną sprawności cieplnej budynków w otoczeniu. Przedstawiono formalny opis obrazowania termalnego obiektów w scenie termicznej z uwzględnieniem promieniowania otoczenia. Przy obrazowaniu termalnym budynków różnica temperatur między budynkiem a otoczeniem jest niewielka w porównaniu do innych zastosowań radiometrii. Stąd wielkość i rozkład promieniowania otoczenia jest bardzo ważnym czynnikiem w termografii budynków. W pracy postawiono istotne pytanie: czy dla potrzeb oceny sprawności cieplnej budynków potrzebna i niezbędna jest ocena wielkości emitowanego strumienia ciepła? Przedstawiono sposoby szacowania sprawności cieplnej budynków z ich termogramów w scenie termicznej. Wykonano program określania tej sprawności w analizowanym obszarze termogramu budynku wykonywanego skanerem AGEMA serii 880.

1.WSTĘP

Badanie emisji długofalowego promieniowania cieplnego z budynku, znajdującego się w zmiennych stanach cieplnych, nadążających za stanami cieplnymi otoczenia, oraz obrazowanie tej chwilowej wielkości metodą termografii jest coraz bardziej powszechne [Holst(3), Jaworski(4,5)]. Badania te mają na celu z jednej strony ocenę sprawności cieplnej budynku, bezpośrednio wpływającej na wielkość zapotrzebowania przez budynek

energii do celów grzewczych. Z drugiej strony, badanie otaczającego pola promieniowania ciepłego umożliwi głębsze poznanie relacji zachodzących między człowiekiem, jego budynkami i otaczającą biosferą.

2. RADIOMETRYCZNY POMIAR EMISJI PROMIENIOWANIA CIEPŁEGO Z OBIEKTU DO OTOCZENIA.

Obrazowanie emisji promieniowania ciepłego wykonywane za pomocą termografii, nie przezroczystych obiektów jakim są różne budynki, znajdujących się w chłodniejszym lub cieplejszym od nich otoczeniu, jest zależne od temperatury powierzchni obiektów T_T , emisyjności ε_T i refleksyjności ρ_T powierzchni tych obiektów, oraz emisji otoczenia E_0 . Specyfiką badań radiometrycznych budynków jest relatywnie mała, w porównaniu do przemysłowych zastosowań termografii, różnica temperatur między budynkiem a jego otoczeniem. Wykonanie poprawnego obrazowania ciepłego, dobrze izolowanego cieplnie budynku jest trudniejsze w porównaniu z obrazowaniem budynku o mniejszej izolacji cieplnej. Stąd też wynikają ograniczenia temperaturowe nakładane na warunki wykonywania termografii budynków [4]. Budynek i jego otoczenie tworzy obrazowaną scenę termiczną składającą z nieprzeźroczystych ciał rzeczywistych w różnych położeniach. Zakładamy, że ciała te są szare, mają powierzchnie dyfuzyjne, a ich charakterystyki radiometryczne spełniają prawo Kirchhoffa. Otoczeniem budynku jest przede wszystkim nieboskon i otaczający teren wraz ze znajdującą się na nim roślinnością i zabudową. Powierzchnie otoczenia będące w temperaturze T_0 emitują emisję własną $\varepsilon_0 L_{B0}$.

Na emisję długofalowego promieniowania ciepłego z obiektu składa się jego emisja własna $\varepsilon_T L_{BT}$ gdzie ε_T jest emisyjnością obiektu, a L_{BT} jest emisją ciała czarnego i odbita od obiektu emisja pochodząca od otoczenia E_0 zwana emisją opromieniowania-irradiacji obiektu [Kostowski(6)]. Ta sumaryczna emisja promieniowania ciepłego nazywana jest jasnością B_T obiektu.

$$B_T = \varepsilon_T L_{BT} + \rho_T E_0 \quad (1)$$

gdzie ρ_T jest refleksyjnością obiektu.

Emisja opromieniowania-irradiacji obiektu E_0 jest sumą iloczynów jasności B_{0i} poszczególnych „i” powierzchni otoczenia i stosunków konfiguracji $F_{i-T} \leq 1$ nazywanych inaczej współczynnikami "widzenia" wyrażającymi stosunek całkowitej ilości energii wypromieniowywanej z powierzchni "i" do ilości energii z powyższej powierzchni opromieniowującej ten obiekt.

Bilans emisji promieniowania ciepłego nad powierzchnią obiektu określa ilość energii netto Δq_T wypromieniowywanej z obiektu do otoczenia. Ta energia netto Δq_T jest równa jasności B_T obiektu minus opromieniowanie-irradiacja tego obiektu od otoczenia E_0 :

$$\Delta q_T = B_T - E_0 = \varepsilon_T L_{BT}(T) + \rho_T \sum_i B_{i0}(T_{i0}) F_{i-T} - \sum_i B_{i0}(T_{i0}) F_{i-T} = \varepsilon_T [L_{BT}(T) - \sum_i B_{i0}(T_{i0}) F_{i-T}] \quad (2)$$

gdzie:

Δq_T - strumień energii netto wypromieniowywany z obiektu,

B_T - emisja jasności obiektu,

E_0 - emisja opromieniowania - iradiacji obiektu,
 F_{i-T} - współczynnik widzenia, lub stosunek konfiguracji powierzchni otoczenia i obiektu,
 $\sum_i B_{i_0}(T_0)$ - suma jasności "i" powierzchni otoczenia,
 ε_T, ρ_T - emisyjność i refleksyjność powierzchni obiektu.

Równanie

$$\Delta q_T = \varepsilon_T [L_{BT}(T) - \sum_i B_{i_0}(T_{0i}) F_{i-T}] \quad (3).$$

jest podstawowym równaniem obrazowania termalnego obiektów.

Detektory do radiometrycznego pomiaru emisji promieniowania cieplnego, w tym detektory systemów termograficznych, są czułe i reagują na ilość promieniowania cieplnego będącego różnicą jasności B_T obrazowanego obiektu i opromieniowania-irradiacji od otoczenia E_D tych detektorów.

$$\Delta q_D = B_T - E_D \quad (4)$$

W standardowych pomiarach radiometrycznych przyjmuje się, że spełniona jest równość emisji opromieniowania-irradiacji otoczenia E_0 padającą na obrazowany obiekt i emisji opromieniowania-irradiacji otoczenia E_D padającą na obrazujący detektor.

$$E_D = E_0 \quad (5).$$

Jest to warunek konieczny poprawności prowadzonych badań radiometrycznych. Ma to miejsce gdy obiekt i detektor znajdują się w tym samym otoczeniu. Tylko wtedy występuje równość emisji netto obiektu padającej i mierzonej przez detektor z rzeczywistą wielkością tej emisji netto z obiektu.

W standardowych badaniach radiometrycznych przyjmuje się, że przestrzenny rozkład emisji otoczenia jest stałym rozkładem emisji ciała czarnego i określany jest jedną wartością temperatury otoczenia T_0 :

$$\sum_i B_{i_0}(T_{0i}) F_{i-T} \approx \sigma T_0^4 \quad (6).$$

Jest to podstawowe założenie termografii pomiarowej. Uproszczenie to jest niezwykle istotne, i szczególnie w przypadku termografii budynków musi być starannie przedyskutowane. Dla ścian wysokich budynków i dachów otoczeniem jest nieboskłon, którego temperatura przy braku zachmurzenia może być rzędu 210K, a ponadto geometryczny stosunek konfiguracji powierzchni nieboskłonu i dachu jest bliski jedności. Stąd elementy te mogą mieć znaczną emisję wypromieniowywanej energii do otoczenia. Dla ścian niskich budynków otoczeniem jest przylegający do budynku teren i sąsiadująca zabudowa, gdzie temperatury są wyższe i stosunki konfiguracji powierzchni otoczenia i obiektu są mniejsze.

Uwzględniając podstawowe założenie termografii, o stałej emisji otoczenia jako emisji promieniowania czarnego, mierzona radiometrem emisja obiektu netto wynosi:

$$\Delta q_T = B_T - E_0 = \varepsilon_T (L_{BT}(T) - \sum_i B_{i_0}(T_{0i}) F_{i-T}) \approx \varepsilon_T \sigma (T_T^4 - T_0^4) \quad (7).$$

Wielkość emisji promieniowania cieplnego netto Δq_T musi być dostatecznie duża by mogłaby być zmierzona danym radiometrem, którego czułość określana jest parametrem NEDT [Holst(3)] wyrażającym najmniejszą różnicę temperatur, względem temperatury

otoczenia mierzalną tym radiometrem. Zwykle dla konkretnego radiometru producent podaje NEDT dla 300K. Im niższe temperatury otoczenia tym większy jest parametr NEDT.

3. OKREŚLANIE SPRAWNOŚCI CIEPLNEJ BUDYNKÓW

Termodynamika, nauka o zjawiskach cieplnych i ich przebiegu wspiera się na trzech ogólnych zasadach z których pierwsza określa istotę ciepła jako zdolność wykonania pracy przez układ makroskopowy przy warunku zachowania całkowitej energii w tym układzie. Takimi interesującymi układami makroskopowymi mogącymi wykonywać pracę są silniki cieplne. Sprawność cieplna silnika określa jego zdolność wymiany, pozostającego w nim ciepła, na pracę i wyrażana jest przez stosunek otrzymanej z silnika pracy do wielkości doprowadzonego do silnika ciepła.

$$\eta = \frac{W}{Q_0} = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \quad (8).$$

Gdzie:

ciepło początkowo doprowadzane do obiektu - Q_0 [J],

ciepło oddawane z obiektu do otoczenia - Q [J],

ciepło pozostające w obiekcie wynosi - $Q_0 - Q$ [J].

praca otrzymywana z zamiany ciepła pozostającego w silniku - W [J]

W zagadnieniach cieplnych budynków rozważania odnosimy jednak do ciepła oddawanego z obiektu do otoczenia gdyż nie rozważamy żadnej pracy otrzymywanej z ciepła pozostającego w budynku, a jedynie mierzymy i ograniczamy ciepło oddawane. W tak postawionym zagadnieniu sprawność budynku jest dopełnieniem do jedności sprawności odpowiadającego silnika.

Przyjmijmy, że radiometr, którym wykonujemy obrazowania ma następującą czułość na ilość emitowanego ciepła δQ_0 [J], przy czym δ jest parametrem czułości.

Rozważmy ciepło oddawane z obiektu do otoczenia Q i ciepło pozostające w obiekcie $Q_0 - Q$ oraz dwa skrajne przypadki doboru parametru δ czułości przyrządu mające duże znaczenie w ocenie sprawności cieplnej budynków:

1. - Jeżeli $Q \ll \delta Q_0$ czyli ciepło oddawane z obiektu do otoczenia jest znacznie mniejsze od czułości przyrządu i stąd jest $Q/Q_0 \ll \delta$. Obiekt w całości jest niewidoczny na tle otoczenia, i jest nierozróżnialny z otoczeniem. Ale w tym przypadku jest również, że $Q_0 - Q \geq \delta Q_0$ czyli ciepło pozostające w obiekcie jest nieznacznie większe lub równe czułości przyrządu i stąd jest $Q/Q_0 \leq 1 - \delta$.
2. - Jeżeli $Q_0 - Q \ll \delta Q_0$ czyli ciepło pozostające w obiekcie jest znacznie mniejsze od czułości przyrządu i stąd jest $Q/Q_0 \gg 1 - \delta$. Powoduje to, że obiekt w całości silnie kontrastuje z otoczeniem, natomiast obraz termalny obiektu nie jest zróżnicowany temperaturowo. Ale w tym przypadku jest również, że $Q \geq \delta Q_0$ czyli ciepło oddawane z obiektu do otoczenia jest równe lub nieznacznie większe od czułości przyrządu i stąd jest $Q/Q_0 \geq \delta$.

Do przyjęcia parametru czułości przyrządu przyjmujemy nierówności mniej ostre i tak dla ciepła oddawanego z obiektu (war.2) i jednocześnie dla ciepła pozostającego w obiekcie (war.1) otrzymujemy :

$$\delta \leq Q/Q_0 \leq 1 - \delta. \quad (9)$$

Jest to warunek doboru właściwej wartości parametru czułości radiometru dla poprawnego obrazowania tego obiektu.

Jeżeli poszczególne wielkości ciepła oddawanego do otoczenia Q i ciepła dostarczanego do budynku wyrazimy w następujący sposób

$$Q = Q(T_T) - Q(T_o) = Q(T_o + \Delta T) - Q(T_o) \approx \left. \frac{\partial Q(T_o)}{\partial T} \right|_{T=T_o} \times (T_T - T_o) \quad (10)$$

$$Q_0 = Q_0(T_{IN}) - Q_0(T_o) = Q_0(T_o + \Delta T) - Q_0(T_o) \approx \left. \frac{\partial Q_0(T_o)}{\partial T} \right|_{T=T_o} \times (T_{IN} - T_o) \quad (11)$$

to sprawność cieplna budynku wyrażona [rów.9] przez parametr czułości jest następującej postaci:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\left. \frac{\partial Q(T_o)}{\partial T} \right|_{T=T_o} \times (T_T - T_o)}{\left. \frac{\partial Q_0(T_o)}{\partial T} \right|_{T=T_o} \times (T_{IN} - T_o)} \quad (12)$$

Stąd sprawność cieplna budynku wyraża się jako funkcja stosunku różnicy temperatur powierzchni ściany i otoczenia do różnicy temperatur wnętrza budynku i otoczenia. Jeżeli rzeczywisty parametr czułości skanera przyjąć jako

$$\delta' = \delta \times \frac{\left. \frac{\partial Q(T_o)}{\partial T} \right|_{T=T_o}}{\left. \frac{\partial Q_0(T_o)}{\partial T} \right|_{T=T_o}} \quad (13)$$

to sprawność budynku może być wyrażona przez ten nowy parametr czułości skanera

$$\delta' \leq \frac{T_T - T_o}{T_{IN} - T_o} \leq 1 - \delta' \quad (14)$$

W przypadku obrazowania budynku radiometrem o określonym parametrze czułości dla którego spełnione są nierówności (14) to wykonany obraz termalny jest najlepszy z możliwych, jest zróżnicowany termicznie i kontrastuje z otoczeniem, a parametr czułości radiometru daje oszacowanie sprawności cieplnej budynku.

W stosowanym skanerze termalnym AGEMA 880 LW, dla rozpiętości mierzonych temperatur (-20°C — +200°C) na poszczególnych termogramach, występują następujące parametry czułości skanera δ' - 0.4%, 1%, 2%, 4%, 10%, 20%, 40%, 100% całego powyższego zakresu pomiaru temperatur obejmującego 500 umownych jednostek nazywanych wartościami termalnymi. W badaniach budynków dla budynków o dobrej izolacyjności stosowane są parametry czułości 0.4%-2%, dla budynków o średniej izolacyjności parametr czułości 4% a dla budynków, o niewystarczającej izolacyjności, czułości 10% -40%.

Na podstawie tych rozważań można przyjąć poniższe orientacyjne zakresy sprawności cieplnej dla poszczególnych budynków

$$0.005 \leq \frac{T_T - T_O}{T_{IN} - T_O} \leq 0.025 \quad \text{Budynki bardzo dobre}$$

$$\frac{T_T - T_O}{T_{IN} - T_O} \approx 0.05 \quad \text{Budynki stare jeszcze dopuszczane}$$

$$0.1 \leq \frac{T_T - T_O}{T_{IN} - T_O} \leq 0.4 \quad \text{Budynki zle, do ocieplenia}$$

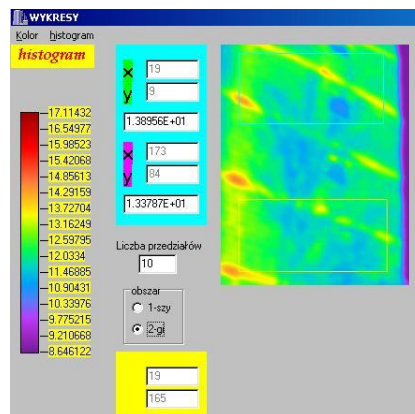
Tak określona sprawność cieplna odniesiona może być również do wartości izolacyjności cieplnej przegrody budynku scharakteryzowanej powszechnie stosowaną wielkością U , nazywaną współczynnikiem przenikania ciepła i mającą swoje dopuszczalne wartości określone w normach budowlanych, np.: PN-91/B, PN - EN ISO 6946:1998 czy DIN 4108.

$$U = h_e(T_T - T_O) / (T_{IN} - T_O). \quad (15)$$

Współczynnik przejmowania ciepła przez powierzchnię ścian budynków $h_e = h_{cv} + h_r$ składa się z dwóch składników: części konwekcyjnej h_{cv} , oraz z części związanej z promieniowaniem h_r . Przy analizowaniu termogramów budynków przyjmowane są wartości h_e w granicach $11.4 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$ do $25 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$. Przyjęcie wartości tego współczynnika z powyższego przedziału pozwala na oszacowanie chwilowego strumienia z termogramu przy określonej z termogramu sprawności cieplnej obudowy budynku.

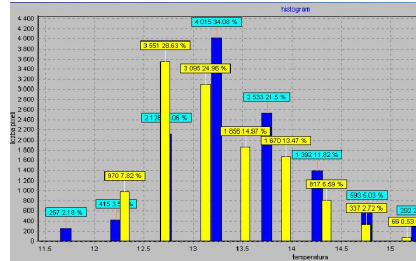
W celu określania szczegółowych wartości sprawności cieplnej dla całych obrazowanych budynków lub ich części został przygotowany program dla którego danymi wejściowymi są:

1. rozkład temperatury obiektu-termogram budynku lub jego części T_T ,
2. temperatura otoczenia budynku T_O
3. temperatura jego ściany wewnętrznej T_{IN}



Rys.1 Termogram ściany szczytowej budynku z wybranymi dwom podobszarami dla których określano sprawności cieplne.

Fig.1 Thermal image of the building wall with two subareas on it. In this places was evaluating thermal performance.



Rys.2 Histogramy temperatury powyższych dwóch podobszarów obrazu termalnego (Agema 880LWB)

Fig.2 Temperature histograms for two above subareas of thermal image (Agema880LWB)

4. WNIOSKI

1. Sprawność cieplna budynku charakteryzuje cieplne własności budynku w określonym stanie cieplnym otoczenia w chwili wykonywania obrazowania,
2. sprawność cieplna budynku jest określana odnośnie ciepła oddawanego do otoczenia z obrazowanego obiektu i może być identyfikowana z parametrem czułości stosowanego do tego obrazowania urządzenia,
3. do określenia wielkości sprawności cieplnej budynku nie konieczne jest wyznaczanie wielkości strumienia ciepła oddawanego z obiektu do otoczenia .

5. LITERATURA

- [1] Grzeszczyk W., Jaworski J., Badania termograficzne właściwości emisyjnych akrylowo-ceramicznych powłok fakturowych. Inżynieria i Budownictwo LVII,9,2001
- [2] Iwanow Z., Jaworski J. "Strumień ciepła z budynków do otoczenia".VI konferencja krajowa "Termografia i termometria w podczerwieni." Ustroń Listopad 2004. ss.259-263
- [3] Holst G. Common sense approach to thermal imaging. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham 2000
- [4] Jaworski J. Termografia budynków. Dolnośląskie Wydaw. Edukacyjne. Wrocław 2000.
- [5] Jaworski J. Thermal images of building walls. Archives of civil engineering, XLII, 3, 1997,
- [6] Kostowski E. Promieniowanie cieplne. PWN, Warszawa 1993,



Dr inż.
Zakład Ekobudownictwa
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
e-mail: JanJaworski@ippt.gov.pl



Dr
Zakład Metod Komputerowych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
e-mail: ZdzislawIwanow@ippt.gov.pl