

**INWENTARYZACJA RZECZYWISTYCH STRAT CIEPŁA PRZEZ
PRZEGRODY BUDYNKÓW Z WYKORZYSTANIEM TERMOGRAFII**

**ASSESSMENT OF THE ACTUAL HEAT LOSS THROUGH BUILDING WALLS
BY MEANS OF THERMAL IMAGING**

Tomasz Kisilewicz¹, Alina Wróbel², Andrzej Wróbel³

¹ Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechnika Krakowska

² Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

³ Katedra Geoinformacji Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: termografia, certyfikat energetyczny, budownictwo mieszkaniowe, straty ciepłe, przenikanie ciepła

STRESZCZENIE: Prawo budowlane nakłada od 1 stycznia 2009 roku obowiązek certyfikacji energetycznej budynków i mieszkań. Certyfikat winien opisywać aktualną efektywność energetyczną budynku. Do ilościowego określenia rzeczywistych własności cieplnych przegród budowlanych można zastosować termografię. Wykorzystanie badań termograficznych jest ograniczone jednak pewnymi warunkami, które muszą być spełnione, aby w wyniku badań można było wyznaczyć prawdziwą wartość izolacyjności cieplnej przegrody. Budynek musi być zamknięty i ogrzewany. Temperatura powietrza na zewnątrz budynku powinna być znacznie niższa od temperatury wewnątrz budynku. Warunki atmosferyczne przed i w czasie pomiaru powinny zapewniać z wystarczającą dokładnością przepływ ciepła zbliżony do ustalonego, a pomiar termograficzny musi być dokonywany od wnętrza budynku. Określenie strat ciepła poprzez przegrody wymaga nie tylko znajomości parametrów cieplnych ściany, ale i wielkości powierzchni odpowiadającej określonej wartości izolacyjności cieplnej. Wykonane termogramy powinny być, zatem zmontowane w jedną mapę rozkładu temperatury na powierzchni badanej przegrody. Do tego celu można wykorzystać stosowane w fotogrametrii programy do przetwarzania rzutowego. W artykule prezentowane są wyniki badań przeprowadzonych z wykorzystaniem kamery TermaCAM firmy FLIR. Na mapach termograficznych badanych ścian widoczne są zarówno mostki cieplne konstrukcyjne jak i spowodowane błędami wykonania. Straty ciepła obliczono jako sumę iloczynów elementarnych powierzchni izotermicznych i przyporządkowanych do nich strumieni ciepła. Stwierdzono, że rzeczywiste straty ciepła przez zewnętrzne ściany budynków są nawet prawie dwukrotnie większe niż wynikałoby to z projektu

1. WSTĘP

Obowiązkowa certyfikacja energetyczna budynków w krajach Unii Europejskiej jest wynikiem bardzo rozpropagowanej już dyrektywy 2002/91/EC. Chociaż bezpośrednim celem dyrektywy jest jedynie znakowanie energetyczne budynków, to oczekuje się, że przyczyni się ona w istotny sposób do poprawy izolacyjności termicznej budynków i ograniczenia strat energii związanych z ich ogrzewaniem oraz przygotowaniem ciepłej wody użytkowej.

Oceny energetyczne mogą działać w sposób stymulujący oszczędzanie energii tylko wtedy, gdy będą w sposób zbliżony do warunków rzeczywistych opisywać właściwości budynków. Spełnienie tego dość oczywistego w gruncie rzeczy wymagania nie jest jednak łatwe. Istotne trudności są związane np. z oceną rzeczywistej wymiany powietrza lub uwzględnieniem wielowymiarowego przepływu ciepła, nawet przez poprawnie zaprojektowane i zrealizowane przegrody zewnętrzne. Czynnikiem, który całkowicie wymyka się teoretycznym analizom i prostym oszacowaniom jest sposób faktycznej realizacji przegród i węzłów konstrukcyjnych budynku. Tylko badania termowizyjne pozwalają na całościową ocenę termicznych właściwości obudowy budynku. Oprócz termowizyjnej analizy jakościowej, której sposób wykonania jest opisany w normie PN-EN 13187, możliwe jest uzyskiwanie w podobny sposób wiarygodnych informacji ilościowych. W tym celu jednak należy spełnić szereg koniecznych warunków, opisanych w dalszej części artykułu.

2. POMIARY TERMOGRAFICZNE PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

Termografia to technika pozwalająca na otrzymanie obrazu rozkładu promieniowania podczerwonego wysyłanego z powierzchni ciał. Promieniowanie to wysyłają ciała stałe i ciecze mające temperaturę wyższą od temperatury zera bezwzględnego.

Najważniejszą zaletą termografii jest otrzymanie wyniku w postaci obrazu zwanego termogramem. Termogram zawiera informacje zarówno o wartości temperatury jak również o geometrii jej rozkładu, możliwe jest, zatem wykorzystanie jego cech radiometrycznych i geometrycznych. W odniesieniu do termogramów można stwierdzić, że cechą ważniejszą, niż jakość i rozdzielczość geometryczna, jest ich radiometryczność i na podniesienie jej dokładności ukierunkowane są wysiłki konstruktorów i producentów sprzętu termograficznego.

2.1. Określenie rzeczywistych własności cieplnych przegród budowlanych

Jeśli dla budynku będzie opracowywane świadectwo charakterystyki energetycznej, to powinno ono uwzględniać faktyczny stan jego izolacyjności cieplnej. Nie można opracować rzetelnego zapotrzebowania na ciepło tylko na podstawie dokumentacji projektowej. Między projektem budynku a rzeczywistą realizacją mogą występować spore rozbieżności. Trudności te nasilają się dodatkowo w przypadku budynków, dla których dokumentacji nie ma. Staranne obserwacje termowizyjne, wykonane zarówno od zewnętrznej jak i wewnętrznej strony przegród budowlanych są jedyną praktycznie podstawą do pełnej, rzeczywistej oceny cieplnej przegród budynków (Kisilewicz, 1997).

Na podstawie termogramów wykonanych wewnątrz budynków w warunkach zbliżonych do ustalonego przepływu ciepła, oraz pomierzonych temperatur powietrza wewnętrznego i zewnętrznego można obliczyć współczynnik przenikania ciepła przez przegrodę (Wróbel, 2000).

Zakładając ustalony przepływ ciepła przez ścianę, co w przybliżeniu jest spełnione, gdy jest zachmurzenie i niewielkie dobowe zmiany temperatury. Współczynnik przenikania ciepła U obliczyć można z zależności:

$$U = \frac{h_{si}(T_i - T_{si})}{T_i - T_e} \quad (1)$$

gdzie:

T_i - temperatura powietrza w pomieszczeniu

T_{si} - temperatura na wewnętrznej powierzchni ściany

T_e - temperatura powietrza na zewnątrz budynku

h_{si} - współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni ściany

Dla wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła U wartość współczynnika h_{si} można wyznaczyć empirycznie lub przyjąć na podstawie normy PN-EN ISO 6946, jako odwrotność oporów przejmowania ciepła. Temperaturę wewnętrznej powierzchni ściany otrzymuje się z termogramów, natomiast temperaturę powietrza w pomieszczeniu można pomierzyć termometrem lub odczytać z termogramu, jako równą temperaturze przedmiotów o małej pojemności cieplnej znajdujących się wewnątrz pomieszczenia.

Wyznaczenie współczynnika przenikania ciepła jest również możliwe z wykorzystaniem rozkładu temperatury na zewnętrznej stronie przegrody, jednak jest ono obarczone dużo większym błędem, ponieważ:

- po zewnętrznej stronie przegrody jest dużo większa zmienność temperatury powietrza niż wewnątrz pomieszczeń,
- po zewnętrznej stronie przegrody wraz ze zmienną prędkością wiatru zmienia się w dużym zakresie współczynnik odpływu ciepła,
- temperatury powierzchni zewnętrznej przegród są wynikiem nie tylko przenikania ciepła przez ścianę, ale zakłócających wpływów wiatru, promieniowania otoczenia, nasłonecznienia, itp., które to czynniki są tłumione w przegrodzie,
- do pomiaru należałoby wykorzystać obszary przegród obustronnie odkrytych (bez mebli znajdujących się przy ścianach), co nie jest widoczne z zewnątrz.

2.2. Określenie rzeczywistych strat ciepła przez przegrody budowlane.

Określenie strat ciepła poprzez przegrody wymaga nie tylko znajomości parametrów cieplnych ściany (powierzchniowego rozkładu temperatury lub współczynnika przenikania ciepła), ale i wielkości powierzchni odpowiadającej określonej wartości izolacyjności cieplnej. Wykonane termogramy powinny być, zatem przetworzone i zmontowane w jedną mapę rozkładu temperatury na powierzchni badanej przegrody. Termogramy mają stosunkowo niską rozdzielczość (w porównaniu do fotografii) a granice pól izotermicznych z natury są rozmyte. Ponadto przegrody budowlane z reguły są płaskie, a pożądana dokładność wyznaczenia pól poszczególnych powierzchni izotermicznych przy obliczeniach strat ciepła nie jest bardzo wysoka. Do przetwarzania termogramów wystarczy więc wykorzystać przekształcenie rzutowe, a w niektórych przypadkach (równe powierzchnie ścian o jednakowej w przybliżeniu temperaturze) wystarczą nawet metody uproszczone. Należy pamiętać, aby przy przepróbkowaniu (*resampling*) obrazu wykorzystywać metodę najbliższego sąsiada, bowiem ta nie powoduje wprowadzania do przetworzonego obrazu nieistniejących na nieprzetworzonym obrazie wartości temperatur.

Straty ciepła z jednostkowej powierzchni przegrody [W/m^2], dla rzeczywistego rozkładu temperatury na powierzchni przegrody T_{si} i temperatury powietrza w pomieszczeniu T_i , obliczone ze wzoru Newtona (2) wynoszą:

$$q = h_{si} \cdot (T_i - T_{si}) \quad (2)$$

Dla ściany o znanym i jednakowym na całej powierzchni współczynniku przenikania ciepła U straty ciepła z jednostkowej powierzchni określone są wzorem (3)

$$q = U \cdot (T_i - T_e) \quad (3)$$

Do określenia rzeczywistych strat ciepła z całej powierzchni przegrody wyznacza się z mapy rozkładu temperatury pola powierzchni izotermicznych na badanym obszarze, a następnie na podstawie wzoru (4) oblicza się sumaryczną wartość.

$$Q = h_{si} \cdot \sum_1^n A_n (T_i - T_{si}) \quad (4)$$

gdzie: A_n – pole powierzchni o średniej temperaturze T_{si}

3. OBLICZENIE STRAT CIEPŁA DLA RZECZYWISTYCH PRZEGRÓD

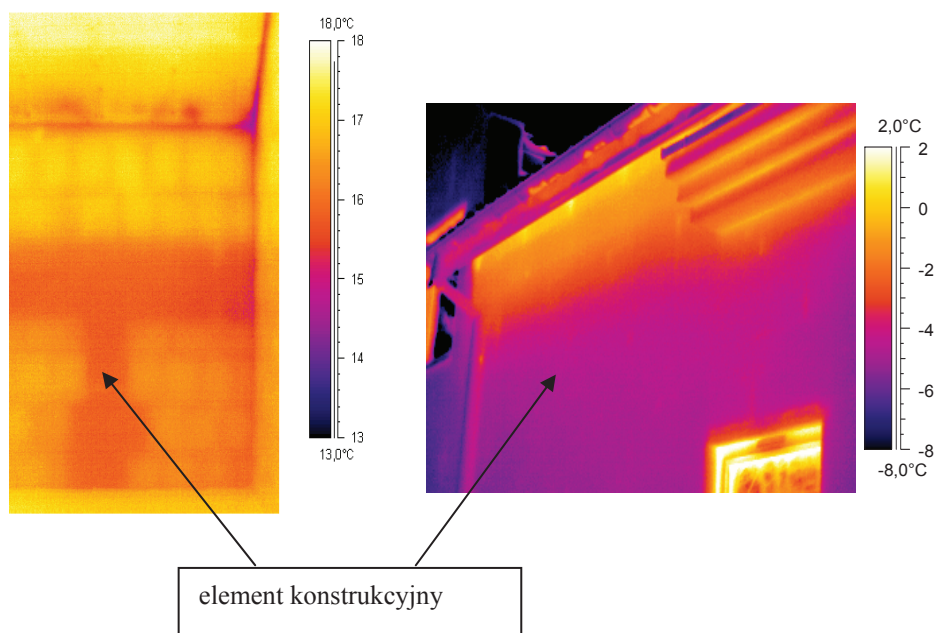
Obliczenie rzeczywistych strat ciepła na podstawie pomiarów termograficznych wykonane zostało dla dwóch ścian zewnętrznych, wykonanych w różnych technologiach budowlanych.

3.1. Ściana dwuwarstwowa

Badana ściana dwuwarstwowa wykonana została z pustaków ceramicznych drażonych o grubości 19 cm i ocieplona 8 centymetrową warstwą styropianu. Dla takiej ściany obliczeniowy współczynnik przenikania ciepła wynosi $0.332 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$. Właściciel nie dysponował szczegółowym projektem budowlanym. Nie była prowadzona szczegółowa inwentaryzacja zawierająca informacje o rozwiązaniach technicznych takich detali jak: wieniec, nadproża, ścianka kolankowa, ocieplenie połączenia dachowej. Nie wiadomo, więc jakie są przekroje i rozmiary liniowe mostków termicznych w tym budynku. Nie posiadano też żadnych informacji o staranności wykonania ocieplenia.

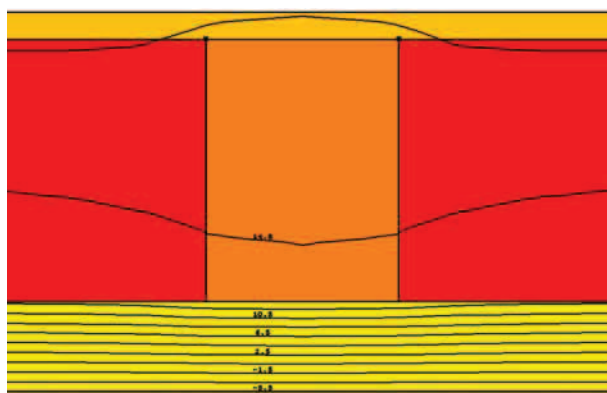
Dla analizowanej ściany wykonano pomiary termograficzne w porze nocnej, przy małych dobowych zmianach temperatury powietrza zewnętrznego w trakcie dwóch dni poprzedzających pomiar. Obserwacje termograficzne prowadzono zarówno od zewnątrz jak też od strony wewnętrznej budynku. Wykorzystano kamerę TermaCAM S60 firmy FLIR oraz firmowy program TermaCAM Reporter 2000 do analizy termogramów. Przykładowe termogramy fragmentu badanej ściany pokazane są na rysunku 1. Na termogramie wykonanym od wnętrza budynku widoczne są wyraźne mostki termiczne na wieńcu oraz pionowych słupkach. Mostki te nie są widoczne na termogramie wykonanym od zewnętrznej strony budynku. To warstwa ocieplenia powoduje wyrównanie temperatury na zewnętrznej powierzchni, co potwierdza również komputerowa symulacja rozkładu temperatury w przekroju ściany, przedstawiona

na rysunku 2. Do jej przeprowadzenia wykorzystano program do dwuwymiarowej symulacji przepływu ciepła.

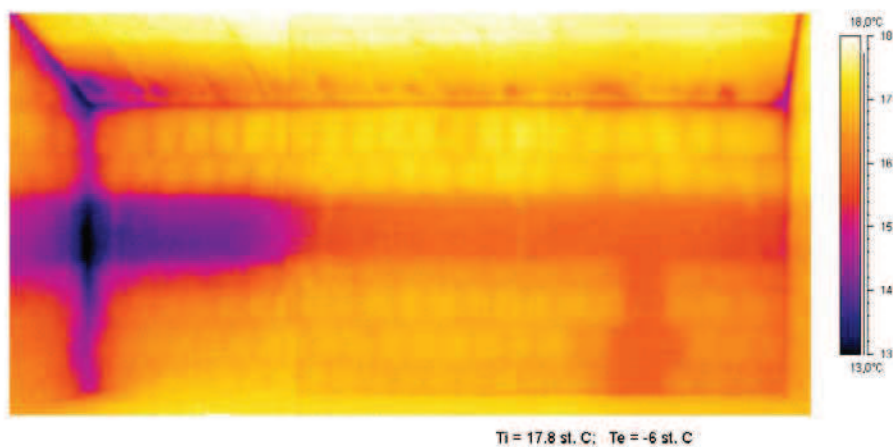


Rys. 1. Termogramy wykonane od wewnętrznej i zewnętrznej strony ściany dwuwarstwowej

Do przetworzenia geometrycznego termogramów wykorzystano przekształcenie rzutowe i program ImageAnalyst firmy Intergraph. Po przetworzeniu geometrycznym trzech termogramów i ich zmontowaniu otrzymano mapę rozkładu temperatury na powierzchni przegrody, pokazaną na rysunku 3. Zawiera ona dane o wartości temperatury oraz odpowiadającej jej powierzchni. Na podstawie mapy rozkładu temperatury na wewnętrznej powierzchni ściany oraz pomierzonych wartości temperatury powietrza po obu stronach przegrody obliczono z wzorów (2, 3 i 4) jednostkowe i całkowite straty ciepła oraz rzeczywisty współczynnik przenikania ciepła. Cała powierzchnia przegrody została w obliczeniach podzielona na 19 obszarów izotermicznych, których rozmiar wyrażono w pikselach. Wartość współczynnika h_{si} przyjęto na podstawie normy PN-EN ISO 6946. Wyniki obliczeń zestawione są w tabeli 1.



Rys. 2. Symulacja rozkładu temperatury w ścianie dwuwarstwowej z betonowym słupkiem



Rys. 3. Mapa rozkładu temperatury na powierzchni ściany dwuwarstwowej

Pełną zgodność wartości obliczeniowej i pomiarowej współczynnika przenikania ciepła uzyskano w obszarach wolnych od mostków termicznych, zlokalizowanych w środkowej części przegrody. Stanowi to dowód poprawności określania współczynnika przenikania ciepła metodą termograficzną. Na uwagę zasługuje jednak fakt, że około 60% powierzchni ściany charakteryzuje się izolacyjnością gorszą od teoretycznej. Ocieplenie ciągłą warstwą izolacji po zewnętrznej stronie nie zlikwidowało mostków cieplnych na elementach konstrukcyjnych. W tych miejscach gdzie na elewacji są gzymsy następuje wyraźny spadek temperatury powierzchni po wewnętrznej stronie – może tam pojawiać się zawilgocenie w okresie silnych mrozów i nadmierne osadzanie kurzu. Całkowite rzeczywiste straty ciepła są 1.65 razy większe od teoretycznych strat dla projektowanej dwuwarstwowej ściany, obliczonych bez uwzględnienia mostków termicznych. Stosowane w projektowaniu uproszczone metody uwzględniania mostków cieplnych, dopuszczają w przypadku przegród pełnych o ciągłej izolacji termicznej zaniedbanie wpływu mostków lub dodatek na poziomie zaledwie $0.05 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabela 1. Straty ciepła (Q) i współczynnik przenikania ciepła (U)

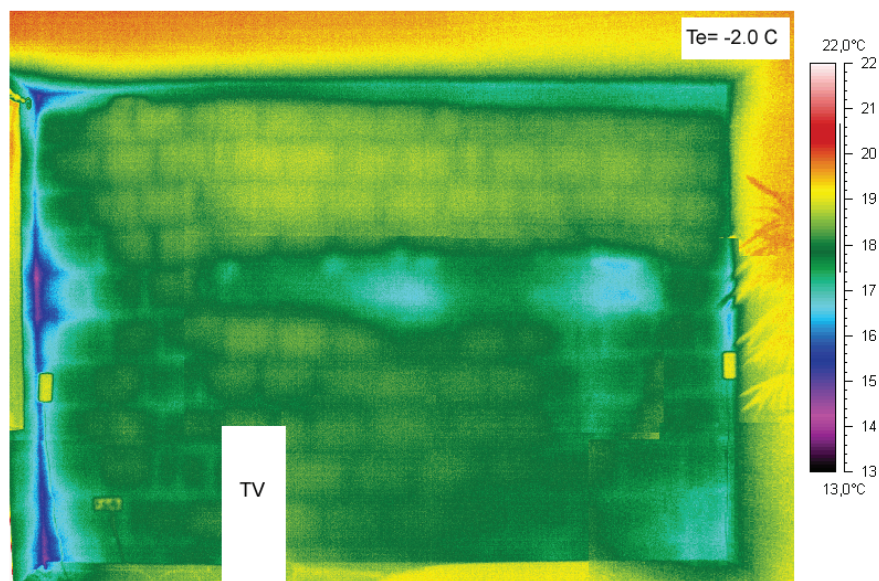
Powierzchnia [pix]	% pow sciany	T _{si} ściany [°C]	q [W/m ²]	Q _{rzecz} [W]	U _{rzecz} [W/m ² *K]	U _{rzecz} / U _{teoret}
466	0.2	13.03	38.68	0.43	1.625	4.9
1191	0.4	13.30	36.45	1.02	1.532	4.6
3648	1.3	13.70	33.21	2.86	1.395	4.2
7891	2.8	14.10	29.97	5.58	1.259	3.8
8623	3.1	14.50	26.73	5.44	1.123	3.4
6563	2.3	14.95	23.09	3.57	0.970	2.9
5009	1.8	15.35	19.85	2.35	0.834	2.5
16086	5.7	15.60	17.82	6.76	0.749	2.3
39573	14.1	15.88	15.59	14.56	0.655	2.0
24354	8.7	16.10	13.77	7.91	0.579	1.7
29693	10.6	16.29	12.23	8.57	0.514	1.5
24986	8.9	16.47	10.81	6.37	0.454	1.4
25302	9.0	16.60	9.72	5.80	0.408	1.2
45754	16.3	16.75	8.51	9.18	0.357	1.1
21102	7.5	16.95	6.89	3.43	0.289	0.9
15275	5.4	17.13	5.47	1.97	0.230	0.7
3734	1.3	17.25	4.46	0.39	0.187	0.6
1789	0.6	17.36	3.56	0.15	0.150	0.5
283	0.1	17.51	2.35	0.02	0.099	0.3
3	0.0	17.65	1.22	0.00	0.051	0.2
	T _i	17.8	Σ Q _{rzecz}	86.36		
	T _e	-6.0	Q _{teoret.}	52.44		
			U _{teoret}		0.332	

3.2. Ściana trójwarstwowa

Badana ściana trójwarstwowa zbudowana była z następujących warstw: cegła ceramiczna kratówka – 12 cm, styropian – 7 cm, pustak ceramiczny drażony – 19 cm; obustronnie tynkowana tynkiem o grubości 1 cm. Dla takiej ściany współczynnik przenikania ciepła oszacowany na podstawie materiału tworzącego przegrodę wynosi 0.361 [W/m²K].

Pomiary termograficzne wykonano w późnych godzinach wieczornych, w porze zimowej przy małych dobowych zmianach temperatury w dniach poprzedzających pomiar. Wykorzystano kamerę ThermaCAM S60 firmy FLIR oraz firmowy program ThermaCAM Reporter 2000 do analizy termogramów. Wykonano dla tej ściany dwanaście termogramów. Na ścianie, z wyjątkiem jej narożników, nie było prawie żadnych naturalnych elementów, które mogłyby być wykorzystane jako fotopunkty do przetwarzania termogramów a sygnalizacja sztucznych raczej nie była możliwa. Przetwarzanie geometryczne termogramów przeprowadzono więc metodą przybliżoną z wykorzystaniem programu Photoshop firmy Adobe, wpasowując obraz ściany w prostokąt, którego wymiary wyznaczono w czasie pomiaru. Takie postępowanie uzasadnia dodatkowo fakt, że rozkład temperatury na ścianie zmieniał się dość płynnie. Mapę rozkładu temperatury na wewnętrznej powierzchni ściany pokazano na rysunku 4. Widoczne jest wyraźne obniżenie temperatury na wieńcu, w narożnikach oraz na sporym obszarze w środkowej części ściany. W środkowej części ściany współczynnik przenikania ciepła jest trzykrotnie większy od obliczonego teoretycznie; jego wartość

wskazuje na brak styropianu w tym rejonie ściany. Straty ciepła z powierzchni całej ściany są 1.90 razy większe od strat obliczonych teoretycznie dla badanej ściany bez uwzględnienia mostków termicznych. Na podstawie projektu można spodziewać się wystąpienia mostków cieplnych w narożnikach i na wieńcu, ale brak izolacji w środkowym rejonie ściany zaskakuje. Wykryć go można w sposób nieniszczący jedynie techniką termografii.



Rys. 4. Mapa rozkładu temperatury w ścianie trójwarstwowej

4. WNIOSKI

1. Z przeprowadzonych badań wynika, że pomiary termograficzne przegród zewnętrznych budynków wykonane od wewnętrznej strony w warunkach zbliżonych do stanu ustalonego pozwalają na oszacowanie rzeczywistej izolacyjności i strat ciepła.
2. Obrazy termograficzne umożliwiają wykrycie i lokalizację wszystkich mostków termicznych, także i tych, których istnienie nie wynika z projektu budynku (wady budowlane).
3. W badanych budynkach rzeczywiste straty ciepła były znacząco większe od strat wynikających z analizy projektu, zatem oparcie świadectw energetycznych budynków tylko na danych projektowych może spowodować znaczne rozbieżności pomiędzy teoretyczną oceną a faktycznym stanem budynku.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego: NN526119133 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

5. LITERATURA

Kisilewicz T., 1997. Termowizyjne badania przegród zewnętrznych budynków mieszkalnych. *VI Konferencja Naukowo-Techniczna: Fizyka budowli w teorii i praktyce*, Łódź.

PN-EN 13187. Właściwości cieplne budynków – Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 75, poz. 690).

Wróbel Al., 2000. Termograficzne badanie izolacyjności cieplnej budynków. *V konferencja termografii i termometrii w podczerwieni*, Łódź, s. 84– 89.

Wróbel Al., Kisilewicz T., 2008. Detection of thermal bridges – aims, possibilities and conditions. *QIRT 2008 9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*, Kraków, Poland, s. 227-232.

ASSESSMENT OF THE ACTUAL HEAT LOSS THROUGH BUILDING WALLS BY MEANS OF THERMAL IMAGING

KEY WORDS: thermography, energy performance certificate, housing industry, heat losses, heat transfer

Summary

According to the new Polish regulations in force as of 1 January 2009, the energy performance certificate will be required on the construction, sale or rent of buildings and dwellings. The certificate should describe the actual energy performance of the building and should provide information regarding, i.a., thermal resistance of the building shell and air exchange. Calculations based only on a building design - if it exists - may lead to unrealistic results due to changes introduced during construction process, a faulty construction or to insulation ageing.

Thermography may be used for quantitative investigation of actual thermal features of a building. To assess the real thermal resistance of the wall, a few vital conditions have to be met. The building examined has to be closed and heated. The indoor air temperature should be significantly higher than the temperature outside. Weather conditions before and during the examination should be stable enough to approximate stationary heat flow through the building shell. Thermal inspection must be done inside the building.

It is possible To calculate the total heat loss, it is necessary to know both the wall thermal characteristics (surface temperature distribution or heat transfer coefficient) and the wall area. Thermal images have to be set up into a single temperature distribution map. Computer programmes applied in photogrammetry for projective transformation may be used to draw up the temperature distribution maps.

The examples of the actual heat loss assessment for walls of different building systems by means of thermal imaging are presented. The analysis was performed with the ThermaCAM S60 camera and FLIR software. Thermal images of the walls examined revealed not only the presence of structural thermal bridges, but also showed defects due to poor workmanship. Total heat losses were calculated as the sum of the products of the elementary isothermal areas and assigned heat flows. It was shown that the real heat losses through the building outer shell may be even two times higher than the values put forth in the designs.

dr inż. Tomasz Kisilewicz
e-mail: tkisilew@pk.edu.pl
tel. 12-628-23-06

dr inż. Alina Wróbel
e-mail: alibel@agh.edu.pl
tel. 12-617-22-69

dr inż. Andrzej Wróbel
e-mail: awrobel@agh.edu.pl
tel. 12-617-38-26