

DIAGNOSTYKA TERMOWIZYJNA PRZEGRÓD W ZMIENNYCH WARUNKACH BRZEGOWYCH

Tomasz KISILEWICZ*, Alina WRÓBEL**

* Politechnika Krakowska, Zakład Budownictwa Ogólnego i Przemysłowego
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: tkisilew@pk.edu.pl

** Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa,
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: alibel@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, których głównym celem jest określenie możliwości i warunków koniecznych jakie muszą być spełnione przy termowizyjnej diagnostyce ilościowej przegród budowlanych w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: fizyka budowli, diagnostyka termowizyjna, opór cieplny.

1. WPROWADZENIE

Istotne obniżenie cen kamer termowizyjnych sprawia, że sprzęt ten znajduje się w zasięgu coraz większej liczby użytkowników. Badania przegród budowlanych należą do znanego od dawna obszaru zastosowań tej techniki badawczej. W ostatnich latach ich znaczenie zostało dodatkowo wzmocnione poprzez akcje prowadzące do ograniczenia energochłonności polskiego budownictwa. Od dawna już w ramach standardowego programu szkolenia audytora znajdują się zasady prowadzenia i interpretacji badań termowizyjnych. Obecnie, ta tematyka jest przedmiotem wykładu na kursach przygotowujących specjalistów do wykonywania świadectw energetycznych budynków. Łatwiejszy dostęp do sprzętu i większe zapotrzebowanie na badania nie idzie jednak w parze z lepszym rozumieniem zasad, a także wszystkich trudności i ograniczeń związanych z tą techniką badawczą. Łatwość wykonywania pomiaru może zachęcać do zbyt pobieżnej interpretacji termogramów i stwarza okazję do popełnienia szeregu istotnych błędów diagnostycznych. Stąd też w normie dotyczącej detekcji wad cieplnych w budynkach metodą podczerwieni dopuszcza się jedynie diagnostykę jakościową [1].

2. DIAGNOSTYKA PRZEGRÓD IN-SITU

Zastosowanie techniki termowizyjnej w budownictwie jest najczęściej związane z próbą pomierzenia termicznych właściwości przegrody, wyrażanych poprzez współczynnik przenikania ciepła U . W tym przypadku istotną zaletą badania termowizyjnego, jaką jest niemal natychmiastowe obrazowanie rozkładu temperatur na powierzchni obudowy, pozostaje w sprzeczności z założeniem przyjętym przy wyprowadzeniu tego współczynnika. W warunkach rzeczywistych nie ma nigdy w pełni stacjonarnych warunków ani we wnętrzu budynku, ani tym bardziej w jego otoczeniu. Przegrody tworzące zewnętrzną obudowę poddane są warunkom permanentnej zmienności temperatur brzegowych i strumieni cieplnych. Chwilowe, zastane podczas pomiaru, wartości temperatury na powierzchni mogą znacząco odbiegać od tych, które byłyby rezultatem warunków stacjonarnych. Wyliczona na tej podstawie wartość współczynnika przenikania ciepła będzie więc także zdecydowanie różnić się od wartości poszukiwanej.

Najpewniejsze efekty w badaniach budynków istniejących pozwala uzyskać procedura przedłużonych obserwacji i obliczania oporu cieplnego na podstawie uśrednionych, w odpowiednio długim w stosunku do pojemności cieplnej przegrody okresie czasu, wartości różnic temperatury i strumienia cieplnego [2].

Dobra praktyka badawcza pozwala w pewnym stopniu zmniejszyć błąd pomiarowy związany z niestacjonarnością warunków brzegowych w pomiarach chwilowych, poprzez właściwy wybór okresu badań [3]. Ciągła obserwacja warunków meteorologicznych (temperatury powietrza i zachmurzenia) podczas przygotowań do badań umożliwia wybranie właściwego momentu i wykonanie

pomiaru w trakcie okresu o minimalnej zmienności temperatury i braku bezpośredniego nasłonecznienia w trakcie doby [4].

W ramach grantu badawczego pt. "Metodyka określania właściwości cieplnych przegród budowlanych metodą termowizyjną" nr NN526119133, realizowanego przez zespół z AGH we współpracy z Politechniką Krakowską, prowadzone są bardzo obszerne badania doświadczalne dotyczące tej tematyki. Ukończony w styczniu 2009 roku, pierwszy etap badań realizowany był w komorze klimatycznej PK. Przedmiotem badań były trzy, silnie zróżnicowane pod względem pojemności cieplnej rodzaje przegród. W trakcie badań odtwarzano stałe i zmienne warunki brzegowe po obydwu stronach przegrody, rejestrując jednocześnie temperaturę na obydwu jej powierzchniach i w ich otoczeniu, oraz strumień ciepły na powierzchni wewnętrznej. Przy użyciu kamer termowizyjnych rejestrowano obrazy termograficzne obydwu powierzchni oraz temperaturę powietrza, dzięki umieszczeniu w polu widzenia kamery zawieszanej na statywie kartki papieru. Wyrzutowo badana była także prędkość ruchu powietrza przy powierzchni przegrody.

Następny etap badań obejmuje długookresowe obserwacje zachowania analogicznych przegród w warunkach rzeczywistych. Celem badań jest określenie możliwości, ograniczeń, warunków koniecznych oraz błędów w ocenie ilościowej przegród na podstawie badań termowizyjnych.

3. BADANIA W KOMORZE KLIMATYCZNEJ

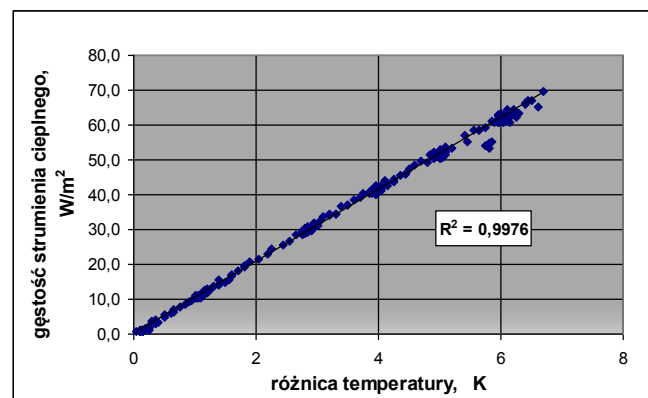
Program badań prowadzonych w komorze klimatycznej obejmował kilka rodzajów zmian temperatury po stronie zimnej i ciepłej. Były wśród nich gwałtowne zmiany temperatury powyżej i poniżej ustalonego poziomu wyjściowego, a także zmiany periodyczne. Celem tych zmian było odtworzenie sytuacji jakie mogą wystąpić w warunkach rzeczywistych. Warunki odniesienia w prowadzonych badaniach to oczywiście warunki stacjonarne. Pozwalają one na ustalenie z wymaganą dokładnością rzeczywistego oporu cieplnego badanych przegród. Poszczególne etapy badań w komorze klimatycznej były też zwykle rozdzielane okresem dojścia przegrody do stanu ustalonego. Dopiero wtedy rozpoczynano kolejny cykl zmian warunków brzegowych.

Poniżej zostaną przedstawione wyniki badań ściany dwuwarstwowej. Składała się ona z silikatowej warstwy konstrukcyjnej o grubości 18 cm (Silka E18), murowanej na cienkiej zaprawie klejowej i warstwy izolacji termicznej w postaci styropianu o grubości 12 cm, przyklejonej do muru konstrukcyjnego. Od zewnątrz warstwa izolacyjna była osłonięta typowymi warstwami osłonowymi bezspoinowego systemu ociepleń ETICS.

Korzystając z możliwości jakie powstały podczas wzniesienia ścianki badawczej w komorze klimatycznej, wykonano wcześniej także komplet badań nieocieplonej silikatowej warstwy konstrukcyjnej.

Na podstawie pomiarów w warunkach stacjonarnych po obydwu stronach izolowanej termicznie przegrody ($T_i = +30,20^\circ\text{C}$, $T_e = +2,05^\circ\text{C}$) obliczono opór cieplny warstw przegrody: $2,68 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Należy dodać, że zarówno po zimnej jak i ciepłej stronie przegrody obserwuje się zawsze rozwarstwienie temperatury powierzchni sięgające $0,2^\circ\text{K}$.

Na rys. 1 pokazano bardzo ścisłą korelację pomierzonej gęstości strumienia ciepłego i zarejestrowanej przez kamerę termowizyjną różnicy temperatury powietrza i powierzchni ścianki po stronie ciepłej. Nachylenie uzyskanej w ten sposób prostej odpowiada wartości współczynnika przejmowania ciepła w komorze ciepłej.



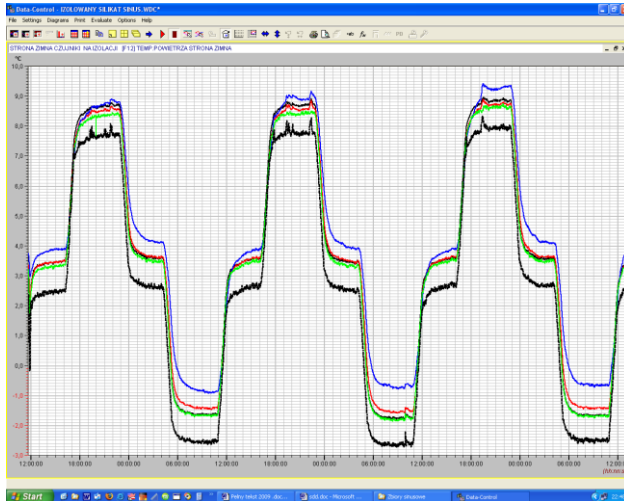
Rys.1 Korelacja pomierzonej gęstości strumienia ciepłego i zarejestrowanych przez kamerę termowizyjną różnicy temperatury powietrza i powierzchni przegrody po stronie ciepłej

Fig. 1 Correlation of the heat flux density and recorded by the thermal camera temperature difference of air and wall surface in the warm chamber

Pomierzona w bezpośrednim sąsiedztwie ściany (5 cm) prędkość powietrza, wymuszona przez wentylatory w komorze ciepłej, wynosiła podczas badań $0,3 \text{ m/s}$. Wyliczona w sposób teoretyczny, na podstawie załącznika A do normy PN-EN ISO 6946 [5], wartość współczynnika h_{si} jako suma współczynników przejmowania ciepła przez promieniowanie i wymuszoną konwekcję wyniosła $10,87 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

4. UZYSKANE REZULTATY

Największe znaczenie użytkowe wiązano z badaniami przegrody w warunkach periodycznie zmiennych z okresem 24 h. Podjęto próbę zrealizowania tego typu zmian w komorze zimnej przy użyciu programowalnego sterownika nadzorującego warunki w komorze.



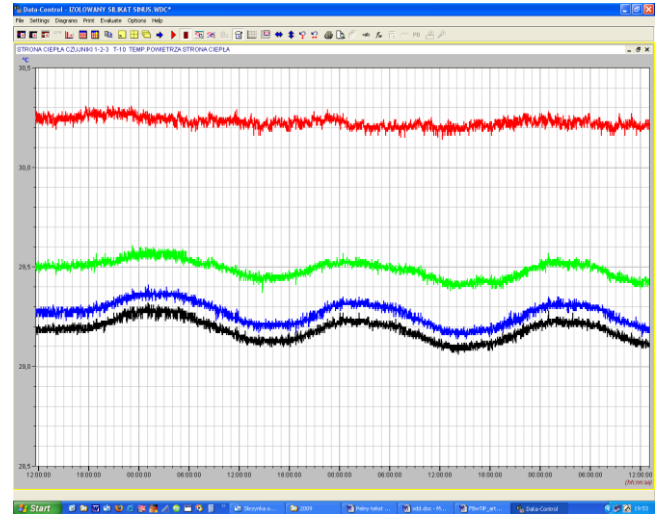
Rys.2 Periodyczne zmiany temperatury powietrza i powierzchni ściany po stronie zimnej
Fig. 2 Periodic temperature fluctuations of air and wall surface in the cold chamber

Najniższe wartości na rys. 2 to temperatura powietrza, pozostałe wykresy odpowiadają temperaturze powierzchni ściany na różnych wysokościach w stosunku do podłogi komory. Maksymalna wartość dobowych oscylacji temperatury powietrza w komorze zimnej wynosiła $+8^{\circ}\text{C}$, a wartość minimalna -2.5°C . Temperatura powierzchni ściany podąża bardzo dokładnie za zmianami temperatury powietrza, praktycznie bez przesunięcia czasowego. Wahania temperatury ściany mieszczą się w zakresie 10 K.

Na rys. 3 pokazano przebieg zmian temperatury powietrza (górny wykres) i powierzchni badanej ściany po stronie ciepłej (3 wykresy poniżej). Dla właściwej interpretacji obydwu wykresów należy dodać, że na rys. 2 cała oś pionowa obejmuje zakres 13 K, a na rys. 3 zaledwie 2 K. Dobrze widoczne w przyjętej skali fluktuacje pojedynczego wykresu temperatury mieszczą się faktycznie w trudnym do obserwowania zakresie 0,2 K.

Przesunięcie czasowe fali temperatury nie może być określone dokładnie ze względu na płaskie wykresy zmian w obszarze wartości ekstremalnych oraz duży wpływ zakłóceń w przyjętej skali. Orientacyjna wartość przesunięcia wynosi 6 h. Natomiast współczynnik tłumienia przez przegrodę fali temperatury (bez oporów przejmowania ciepła) przekracza wartość 50.

Ograniczona do 8 ilość niezależnych kroków jakie można było programować w urządzeniu znajdującym się na wyposażeniu komory sprawiła, że zmiany wymuszenia po stronie zimnej tylko w przybliżony sposób przypominają krzywą harmoniczną, rys. 2.

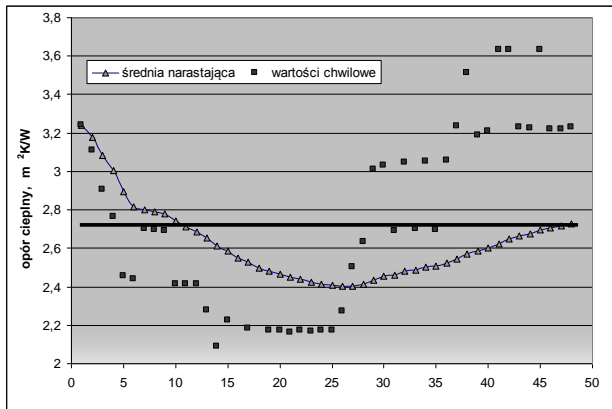


Rys.3 Periodyczne zmiany temperatury powietrza i powierzchni ściany po stronie ciepłej
Fig. 3 Periodic temperature fluctuations of air and wall surface in the warm chamber

Dla wybranej doby regularnych wahań, na podstawie uśrednionych wartości różnicy temperatury obydwu powierzchni przegrody oraz gęstości strumienia ciepłego obliczono opór cieplny. Jego wartość jest równa $2.77 \text{ m}^2\text{K/W}$, a więc jest wyższa o 3.3 % od wartości oporu cieplnego tej przegrody wyliczonego w warunkach stacjonarnych.

Przy użyciu kamery termowizyjnej uzyskano pomiar temperatury powietrza i powierzchni przegrody w komorze ciepłej z krokiem czasowym 30 min. Dla tej samej doby, o której była mowa wcześniej, obliczono średnie dobowe wartości temperatury powietrza i powierzchni, a następnie średnią gęstość strumienia ciepłego przejmowanego na powierzchni przegrody. Do tych obliczeń przyjęto wartość współczynnika przejmowania ciepła h_{si} równą $10.87 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, jak wyliczona w rozdz. 3. W następnym kroku obliczono opór cieplny warstw przegrody na podstawie ilorazu powierzchniowej różnicy temperatur T_{si} i T_{se} oraz gęstości strumienia przejmowanego na powierzchni. Wartość obliczonego w ten sposób oporu cieplnego ściany wynosi $2,72 \text{ m}^2\text{K/W}$ i różni się zaledwie o 1.5% od wartości uzyskanej w warunkach stacjonarnych. Biorąc pod uwagę rozrzut temperatury na obydwu powierzchniach przegrody można się spodziewać, że przy wybraniu innego punktu pomiarowego odchyłka obliczeniowa może się nieco zwiększyć. Nawet jednak kilkuprocentowa różnica pomiędzy wynikiem uzyskanym dla warunków stacjonarnych i wynikiem uzyskanym przy użyciu kamery termowizyjnej w warunkach periodycznie zmiennych będzie rezultatem bardzo zadowalającym. Wskazuje bowiem na możliwość uzyskiwania przy użyciu kamery dobrej oceny ilościowej oporu cieplnego [6].

Na rys. 3 pokazano wartości oporu cieplnego wyliczone na podstawie pomiaru chwilowego temperatury powietrza na stronie ciepłej i obydwu powierzchni przegrody (pojedyncze punkty) oraz narastającą średnią wartość oporu. Gruba pozioma kreska to wartość oporu cieplnego ściany uzyskana w warunkach stacjonarnych.



Rys.4 Wartość oporu cieplnego wyliczona na podstawie pomiaru chwilowego oraz na podstawie narastającej średniej
Fig. 4 Thermal resistance calculated on the basis of momentary reading and accumulated average

Pojedyncze punkty na wykresie odpowiadają wartościom oporu jakie można uzyskać wykonując chwilowy pomiar termowizyjny w zmiennych warunkach atmosferycznych. Maksymalna odchyłka pomiarowa może tu sięgać nawet $\pm 35\%$. Szybkie pomiary termowizyjne, realizowane w przypadkowych warunkach brzegowych są obecnie dość często praktykowane.

Wykres krzywoliniowy pokazuje zmiany wartości oporu cieplnego obliczonego na podstawie średnich narastających wartości temperatury powietrza i obydwu powierzchni ściany. Zgodnie z harmonicznym charakterem zmian temperatury zewnętrznej zmienia się także wartość oporu cieplnego. Najlepszą dokładność wyniku uzyskuje się dla zbioru wartości pomiarowych pokrywających pełny okres zmian warunków brzegowych, tj. 24 godziny (48 odczytów z krokiem 30 minut). Ta obserwacja jest w pełni zgodna z warunkami jakie zaleca się przy prowadzeniu ilościowych pomiarów oporu cieplnego przegród w warunkach rzeczywistych [2].

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule wyniki badań przegrody w komorze klimatycznej pozwalają ocenić wstępnie przydatność badań termowizyjnych do diagnostyki ilościowej przegród. Interpretacja ilościowa pojedynczych termogramów w warunkach niestacjonarnych prowadzi do błędnej oceny izolacyjności termicznej przegród. Uzyska-

nie poprawnych rezultatów jest możliwe na podstawie długotrwałych pomiarów, pokrywających przynajmniej jeden okres zmian warunków. Ograniczenie błędu pomiaru chwilowego jest natomiast możliwe poprzez wykonanie badań w starannie wybranym okresie małej zmienności warunków.

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

THERMAL IMAGING DIAGNOSTICS IN NONSTATIONARY BOUNDARY CONDITIONS

Summary: Results of the experimental testing of the walls in climatic chamber are presented. The main aim of conducted testing is to precise the chances and the necessary conditions for quantitative thermal imaging diagnostics in the non-stationary boundary conditions.

Literatura

- [1] PN-EN 13187 : 2001 Właściwości cieplne budynków – Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni
- [2] prEN 12494 Building components and elements - In-situ measurement of the surface-to-surface thermal resistance
- [3] Jaworski J, „Termografia budynków”, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000
- [4] Praca zbiorowa pod redakcją Henryka Madury, „Pomiary termowizyjne w praktyce”, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2004
- [5] PN-EN ISO 6946 : 2007 Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania
- [6] Wróbel A: „Termowizyjna kontrola budynków mieszkalnych”; Pomiary Automat. Kontrola nr. 3/06, str. 23-27