

dr hab. inż. Tomasz Kisilewicz¹⁾
ORCID: 0000-0002-1668-6444

Termowizyjny pomiar izolacyjności termicznej ściany w budynku istniejącym

Infrared measurement of thermal resistance of a wall in an existing building

DOI: 10.15199/33.2022.01.04

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, których celem było określenie możliwości i warunków koniecznych, jakie muszą być spełnione przy termowizyjnej diagnostyce ilościowej przegród budowlanych w warunkach rzeczywistych. Duża zmienność warunków brzegowych wymaga niezwykle wnikliwej selekcji warunków prowadzenia pomiarów. W związku z tym, że meteorologiczne prognozowanie warunków klimatycznych dłuższe niż 24 h jest obciążone dużą niepewnością, to w celu uzyskania poprawnych wyników konieczne jest prowadzenie pomiarów przez długi czas. Możliwość wybrania z długiego okresu badań warunków właściwych do obliczeń decyduje o dobrej dokładności wyników pomiaru. Duże znaczenie mają także warunki wewnętrzne w budynku podczas pomiaru. Wymagane jest całkowite wyłączenie pomieszczenia z użytkowania oraz stabilizacja warunków termicznych we wnętrzu. Niezależnie od rodzaju metody pomiarowej (termowizyjna lub przy użyciu przetwornika strumienia cieplnego), nie jest możliwy szybki pomiar in situ izolacyjności budynków istniejących

Słowa kluczowe: współczynnik przenikania ciepła; izolacyjność termiczna; pomiar termowizyjny; warunki stacjonarne.

Abstract. The article presents the results of experimental research, the purpose of which was to determine the possibilities and necessary conditions that must be met in the quantitative thermographic diagnostics of building partitions in real conditions. Strong variability of boundary conditions requires an extremely careful selection of measurement conditions. Since meteorological forecasting of climatic conditions longer than 24 hours is subject to high uncertainty, in order to obtain correct results, it is necessary to carry out measurements for a long period of time. The internal conditions in the building during the measurement are also of great importance. It is required to completely exclude the room from use and stabilize the thermal conditions inside. Regardless of the type of measurement method, infrared or heat flux transducer, it is not possible to quickly evaluate in-situ thermal resistance of existing buildings.

Keywords: thermal transmittance; thermal resistance; thermal imaging measurements; stationary conditions.

W ostatnich latach diagnostyka cieplna przegród w budynkach istniejących zyskała ponownie na znaczeniu ze względu na wymuszoną i uświadomioną konieczność ograniczenia ich energochłonności i emisji CO₂. Badania izolacyjności termicznej przegród w warunkach naturalnych (tzw. badania in situ) są jednak wykonywane rzadko. Chętniej korzysta się z szybkiego i trudnego do zweryfikowania oszacowania charakterystyki cieplnej przegród w sposób obliczeniowy. W przypadku sięgnięcia po metody pomiarowe poszukuje się zwykle rozwiązań, które pozwolą uzyskać wyniki jak najprościej i jak najszybciej, nie zdejść obie sprawy z wpływu rzeczywistych warunków klimatycznych na transport ciepła przez

przegrody budowlane. Pomiar izolacyjności termicznej przegrody budowlanej w warunkach naturalnych może być realizowany z zastosowaniem tzw. przetworników strumienia cieplnego oraz kamery termowizyjnej. Niezależnie jednak od zastosowanej metody, pomiary muszą spełniać wiele trudnych warunków, decydujących o jakości uzyskiwanego wyniku. Jednym z nich jest długi czas pomiaru, co zwykle jest trudne do zaakceptowania zarówno przez wykonawców pomiaru, jak i użytkowników badanego budynku. W artykule przedstawiono zasady i problemy związane z badaniem ściany dwuwarstwowej w budynku istniejącym przy użyciu kamery termowizyjnej.

Ilościowa diagnostyka cieplna przegród

Współczynnik przenikania ciepła U, to najchętniej używany parametr charakterystyki cieplnej przegród budow-

lanych. Prosty sposób jego określania wynika z przyjętych założeń. Jednym z nich jest niezmiennosc i stacjonarnosc warunków brzegowych w czasie. W takich warunkach nie zachodzi zmiana temperatury w żadnym miejscu przegrody, nie ma więc podgrzewania ani schładzania materiałów przegrody, a strumień cieplny przenikający przez przegrodę jest w każdej płaszczyźnie taki sam. Warunki zbliżone do stacjonarnych są realizowane podczas badań laboratoryjnych materiałów i przegród. Ich uzyskanie wymaga jednak nie tylko odpowiedniej aparatury, ale także bardzo długiego czasu (wielu dni), potrzebnego do uzyskania stacjonarnego rozkładu temperatury w grubej i masywnej przegrodzie. Po uzyskaniu takich warunków, pomiar jest już bardzo prosty i szybki. Wystarczy bowiem chwilowy pomiar gęstości strumienia cieplnego przenikającego przez badaną

¹⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Łądowej; tkisilew@pk.edu.pl

przegrodę oraz różnicy temperatury na obu powierzchniach.

Warunki, jakie występują w budynkach istniejących, pozostają w sprzeczności z założeniami przyjętymi przy wprowadzeniu współczynnika U . Nie ma stałości warunków termicznych we wnętrzu budynku, zawsze występują wahania związane ze zmiennością ogrzewania, wentylacji, promieniowania słonecznego, zysków wewnętrznych itd. Warunki zewnętrzne ulegają ogromnym i nieregularnym zmianom temperatury powietrza zewnętrznego, promieniowania słonecznego, działania wiatru i wilgoci. Zmienność warunków brzegowych pociąga za sobą zmiany temperatury i energii wewnętrznej materiałów przegrody. Jej reakcja na zmiany warunków brzegowych zależy nie tylko od przewodności cieplnej materiałów, ale także od ciepła właściwego i gęstości poszczególnych materiałów. W tych warunkach pomiar chwilowych wartości strumienia ciepłego i powierzchniowej temperatury nie odpowiada warunkom stacjonarnym i nie może być podstawą do obliczenia wartości współczynnika U .

Badania termowizyjne przegród budowlanych, wykonane zgodnie ze specyficznymi dla tego rodzaju pomiaru zasadami, są słusznie kojarzone z możliwością pozyskania obszernych informacji o całej obudowie zewnętrznej budynku w bardzo krótkim czasie. Są to jednak informacje o charakterze jakościowym, a nie ilościowym. Pozwalają na ocenę jednorodności przegród, detekcję mostków termicznych i innych zaburzeń w przepływie ciepła [2, 5]. Szybka inspekcja termowizyjna nie może być jednak podstawą do oceny ilościowej przegrody, tj. do obliczenia jej oporu cieplnego czy współczynnika przenikania ciepła.

Najprostszą metodą badania izolacyjności termicznej przegród w rzeczywistości, silnie zmiennych warunkach jest metoda uśredniania wyników [3]. Wartość współczynnika przenikania ciepła U oblicza się jako iloraz sumy chwilowych wartości gęstości strumienia ciepłego przewodzonego przez tę przegrodę i sumy chwilowych różnic temperatury na brzegach przegrody w długim okresie wg równania (1):

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{i,j} - T_{e,j})} \quad (1)$$

gdzie:

q_j – gęstość strumienia ciepłego w chwili j ;
 $T_{i,j}$ oraz $T_{e,j}$ – temperatura powietrza wewnętrznego i zewnętrznego w chwili j .

Zastosowanie tak prostych obliczeń jest możliwe jednak dopiero po spełnieniu następujących dodatkowych warunków [3]:

a) energia wewnętrzna badanego elementu jest taka sama podczas rozpoczęcia i zakończenia pomiarów (ten sam rozkład temperatury wewnętrznej i wilgotności), a przewodność cieplna materiałów nie ulega zmianie w trakcie pomiaru;

b) czujniki pomiarowe ani powierzchnia przegrody nie mogą być narażone na bezpośrednie oddziaływanie promieniowania słonecznego;

c) w przypadku przegród masywnych, o pojemności cieplnej powyżej 20 kJ/(m²K), pomiary powinny być prowadzone przez okres równy całkowitej wielokrotności 24 h, a czas trwania pomiarów nie może być krótszy niż 72 h;

d) końcowa wartość oporu cieplnego nie może się różnić o więcej niż 5% od wartości uzyskanej dobie wcześniej;

e) jeśli zmiana energii wewnętrznej mierzonego elementu podczas trwania pomiaru jest większa niż 5% przepływającego strumienia ciepłego, to należy w obliczeniach uwzględnić efekt akumulacji ciepła przez wprowadzenie tzw. współczynników strukturalnych lub współczynników masy termicznej.

W celu zyskania wymaganych warunków pomiaru niezbędne są: długi i stabilny okres silnego zachmurzenia oraz mała zmienność temperatury zewnętrznej. Zaplanowanie takiego okresu badań na podstawie prognoz meteorologicznych jest zwykle mało skuteczne. W praktyce więc badania prowadzi się znacznie dłużej niż minimalny wymagany okres badań i dopiero po ich zakończeniu wybiera okres obliczeniowy w największym stopniu spełniający stawiane warunki.

Do pomiaru gęstości strumienia ciepłego zamiast ciepłomierza (czujnika elektrycznego) może być użyta kamera

termowizyjna [2, 4]. Na podstawie pomiaru różnicy temperatury powietrza we wnętrzu T_i oraz na wewnętrznej powierzchni przegrody T_{si} i w znanych warunkach przejmowania ciepła na powierzchni h_{si} , gęstość strumienia ciepłego q przenikającego przez przegrodę może być obliczona wg równania Newtona (3):

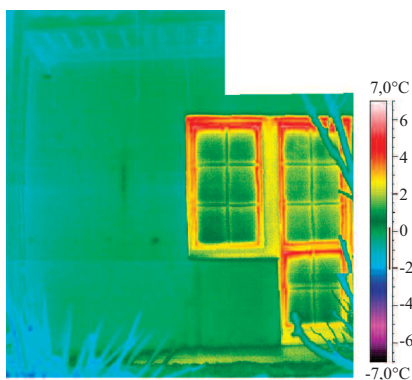
$$q_{si} = h_{si} \cdot (T_i - T_{si}) \quad (2)$$

Ilościowe określenie współczynnika przejmowania ciepła h_{si} można wykonać zgodnie z algorytmem zawartym w normie PN-EN ISO 6946 lub z wykorzystaniem gotowych standardowych wartości tego współczynnika, jeśli spełnione są warunki dotyczące ruchu powietrza i emisyjności termicznej powierzchni. Wszystkie wyliczone wymagania dotyczące warunków klimatycznych oraz czasu trwania okresu pomiarowego są w przypadku badania termowizyjnego takie same, jak w przypadku czujnika gęstości strumienia ciepłego.

Przebieg badań

Pomiary termowizyjne przegrody budowlanej zrealizowano na wschodniej ścianie domu jednorodzinnej w Krakowie, w okresie 11 – 21 stycznia. Badana ściana składa się z (od zewnątrz): 0,005 m tynku cienkowarstwowego oraz kleju wzmocnionego siatką szklaną, 0,13 m styropianu, 0,25 m muru silikatowego i 0,02 m tynku wapiennego wewnętrznego. Zgodnie z dokumentacją projektu budowlanego teoretyczną wartość współczynnika przenikania ciepła oszacowano na 0,244 W/(m²K). Na fotografii 1 pokazano wyniki pomiaru termowizyjnego fragmentu ściany południowej tego budynku. Napromieniowanie słoneczne ściany wschodniej jest w styczniu bardzo małe. Kąt padania bezpośredniego promieniowania słonecznego na tę ścianę, mierzony w stosunku do normalnej do powierzchni, jest w zimie mniejszy niż 60° tylko przez ok. 2 h dziennie. Przy kącie większym od tej wartości absorpcja promieniowania gwałtownie spada.

Podczas pomiarów pomieszczenie zostało całkowicie wyłączone z normalnego użytkowania, a okna były stale zasłonięte ciemnymi bawełnianymi zasłonami. Cały budynek wyposażony jest

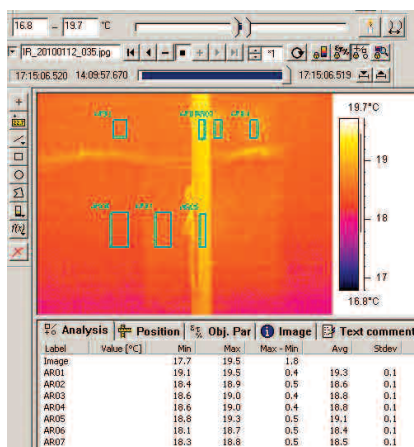


Fot. 1. Zdjęcie termowizyjne ściany dwuwarstwowej. Widoczne są połączenia między płytami izolacji oraz łączniki mechaniczne
Photo 1. Thermal image of a two-layer wall. The connections between the insulation boards and the mechanical connectors are visible

w centralną instalacją wodną, zasilaną kotłem gazowym i sterowaną termostatem. Mimo to na powierzchni ściany wykryto już na początku pomiarów zauważalne wahania strumienia ciepła. Z tego powodu konwencjonalny system grzewczy został w tym pomieszczeniu zastąpiony lokalnym grzejnikiem elektrycznym o stałej mocy [6].

Temperaturę powietrza wewnętrznego i temperaturę powierzchni ściany mierzono za pomocą kamery termowizyjnej IR ThermaCam S60, z obiektywem o polu widzenia 20° i równoważnej różnicy temperatury (NEDT) równej 0,07 K. Temperaturę powietrza wewnętrznego mierzono kamerą, rejestrując temperaturę paska papieru zawieszono w odległości ok. 40 cm od ściany (fotografia 2). Emisyjność ściany i papieru została skorygowana przez porównawczy pomiar przy użyciu termopar. W celu zminimalizowania szumu sygnału, temperatura ściany i papieru była mierzona jako średnia wartość kilku wybranych obszarów pomiarowych (fotografia 2). Jednocześnie z badaniami termowizyjnymi, do oceny wartości U zastosowano wielkogabarytowy przetwornik strumienia ciepłego Ahlborn W150-2 o wymiarach 0,5 x 0,5 m i dokładności pomiaru ±5%, natomiast dokładność termopar, to ±0,3°C. Do porównawczego pomiaru z użyciem przetwornika strumienia ciepłego zastosowano procedurę zgodną z normą ISO 9869-1:2014 [3]. Warunki panujące w pomieszczeniu spełniały wymagania PN-EN ISO 6946:2012,

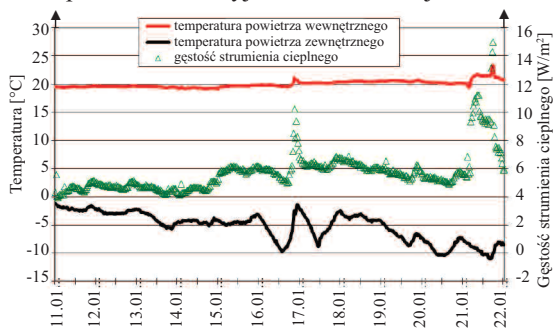
dotyczące powierzchniowej wymiany ciepła. Emisyjność powierzchni ściany wynosiła $\epsilon = 0,9$, a prędkość ruchu powietrza nie przekraczała 0,1 m/s. Zgodnie z normą 7,7 W/(m²K) przyjęto jako wartość współczynnika przejmowania ciepła. Takie podejście znacznie upraszcza procedurę pomiarową i zmniejsza liczbę mierzonych parametrów [1, 4, 6].



Fot. 2. Zdjęcie termowizyjne pola pomiarowego – pionowy pasek w centrum fotografii to taśma papierowa zawieszona przed ścianą; zaznaczono pola uśredniania temperatury powietrza i powierzchni ściany
Photo 2. Thermal image of the measurement field – the vertical strip in the center of the photo is a paper tape suspended in front of the wall, the fields of air and wall temperature averaging are marked

Wyniki pomiarów

Wszystkie pomierzone wartości temperatury powietrza obu środowisk i gęstości strumienia ciepła przedstawiono na rysunku 1. Przez pierwsze pięć dni pomiarów niebo skłon był pokryty chmurami. Wahania temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego nie przekraczały odpowiednio 3 K i 0,5 K. Był to więc, jak się wydaje, stosowny okres do pomiaru izolacyjności termicznej



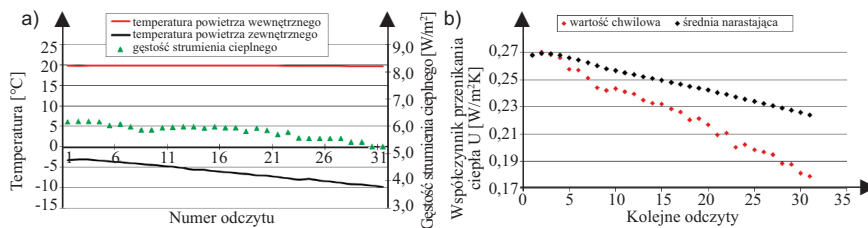
Rys. 1. Wyniki badań w całym okresie trwania pomiarów – od 11.01 do 22.01 [6]

Fig. 1. Test results during the entire period of measurements – from 11.01 to 22.01 [6]

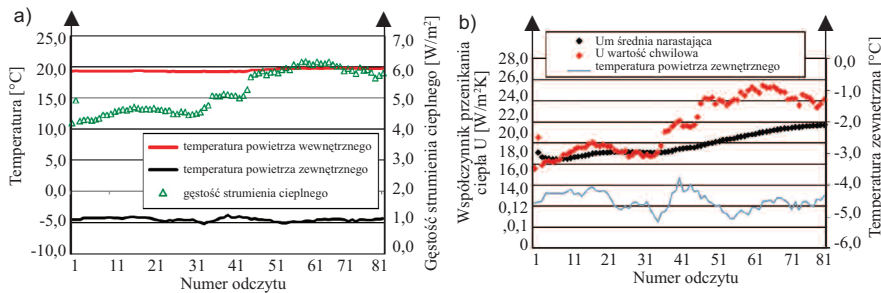
ściany w warunkach naturalnych. Bezchmurny nieboskłon 16 stycznia spowodował silniejsze wahania temperatury zewnętrznej (w górę i w dół). Mimo zasłoniętych okien, przepuszczane promieniowanie słoneczne spowodowało także niewielki wzrost temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz większą wartość strumienia ciepła. W kolejnych dniach dobowe wahania temperatury zewnętrznej były mniejsze. Kolejny szczyt miał miejsce w słoneczne dni 21 i 22 stycznia.

W celu ilustracji rozbieżności pomiarowych, wynikających ze źle dobranych warunków klimatycznych, przyjęto okres obliczeniowy trwający od 16.01 godzina 13.15 do 17.01 godzina 4.15. W tym okresie wystąpił jednostajny spadek temperatury zewnętrznej od -3°C do -10°C. Na rysunku 2 pokazano wyniki obliczeń chwilowych wartości współczynnika przenikania ciepła U oraz średniej narastającej w okresie jednostajnie spadającej temperatury powietrza zewnętrznego. Rozrzut wartości chwilowych w warunkach jednostajnego spadku temperatury zewnętrznej jest bardzo duży, od wartości 0,18 do 0,27 W/(m²K). W takich warunkach pomiar nawet trwający kilkadziesiąt godzin nie dałby wiarygodnych rezultatów. Wartość średniej narastającej współczynnika przenikania ciepła, obliczanej w przypadku kolejnych odczytów wg wzoru (1), zmienia się w sposób monotoniczny i nie ma charakteru asymptoty zmierzającej do wartości oczekiwanej. Uzyskany w ten sposób wynik pomiaru byłby więc silnie zależny od wybranego okresu i czasu trwania pomiarów. Końcowa wartość średniej narastającej, pokazana na rysunku 2, jest przypadkowo bliska wartości oczekiwanej, ale wcześniejsze zakończenie lub wydłużenie pomiarów w tych warunkach prowadziłyby do uzyskania zupełnie innej wartości końcowej. Przebieg pomiaru nie spełnia podanych wcześniej wymagań dotyczących dobowych zmian wyników.

Na rysunku 3 pokazano wyniki pomiarów i obliczeń w okresie od 14.01 do 16.01, kiedy temperatura zewnętrzna zmienia się w relatywnie niewielkim stopniu, co mogłoby sugerować istnienie korzyst-



Rys. 2. Wyniki pomiarów (a) i obliczeń (b) w okresie 16 – 17 stycznia
Fig. 2. Measurement (a) and calculation results (b) for the period January 16 – 17



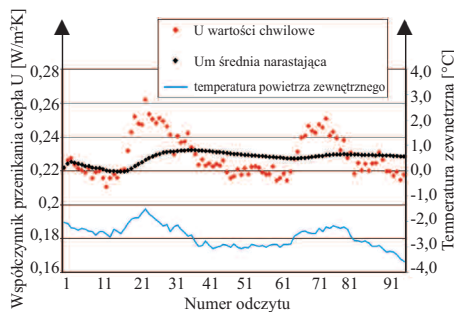
Rys. 3. Wyniki pomiarów (a) i obliczeń (b) w okresie 14 – 16 stycznia
Fig. 3. Measurement (a) and calculation results (b) for the period January 14 – 16

nych do obliczeń warunków zewnętrznych. Gęstość strumienia ciepłego rejestrowanego na wewnętrznej powierzchni ściany zmieniła się jednak wyraźnie w tym okresie, bez powrotu do stanu początkowego. W efekcie, obserwowany jest znaczny rozrzut wartości chwilowych współczynnika U , ale co istotniejsze, silna zmienność i monotoniczny wzrost wartości średniej narastającej współczynnika U_m , dyskwalifikują uzyskany wynik.

Kolejną analizę przeprowadzono w okresie z dużym zachmurzeniem, tj. od 12 stycznia do 14 stycznia (rysunek 4). Temperatura zewnętrzna wahała się w tym czasie w zakresie 2 K, z tendencją do niewielkiego spadku na koniec okresu. Na rysunku 4 przedstawiono chwilowe wartości U i narastające średnie wartości współczynnika przenikania ciepła U_m , obliczone na podstawie pomiarów termowizyjnych począwszy od

12 stycznia, godzina 00:15. Wyraźnie widoczny jest zmienny charakter chwilowych wartości U . Temperatura powietrza na zewnątrz w tym okresie wahała się od $-1,5^{\circ}\text{C}$ do $-3,6^{\circ}\text{C}$, natomiast chwilowe wartości U oscylowały od $0,262 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ do $0,211 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, ze średnią dla całego okresu $0,229 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Po pierwszym dniu badanego okresu obliczona wartość U_m wynosiła ok. $0,229 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, a jej zmienność była bardzo mała. Odchylenie standardowe chwilowej wartości U wynosiło $0,012 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, natomiast odchylenie średniej narastającej średniej U_m było sześciokrotnie mniejsze i równe $0,002 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Wynika z tego, że nawet przy wyborze dogodnego okresu pomiarowego losowe wartości chwilowe mogą nadal znacznie odbiegać od rzeczywistej przenikalności cieplnej badanego elementu.

Średnia wartość U uzyskana z pomiarów przy użyciu przetwornika strumienia ciepłego wynosiła $0,221 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, a odchylenie między obiema metodami pomiarowymi 3,6%. Obie zmierzone wartości różnią się natomiast o 6% od wartości nominalnej, wyliczonej jako $0,244 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Błąd obliczonej wartości nominalnej nie jest znany, ponieważ właściwości materiałów, z których wzniesiono budynek w 1995 r., nie były mierzone, ani też nie zostały podane przez producenta. Do obliczeń przyjęto je na podstawie średnich wartości tabliczycznych produktów rynkowych.



Rys. 4. Wyniki pomiarów i obliczeń w okresie 12 – 14 stycznia [6]
Fig. 4. Results of measurements and calculations for the period – January 12 – 14 [6]

Podsumowanie

Głównym celem przedstawionych badań była analiza wpływu dynamicznych warunków klimatycznych na wynik pomiaru współczynnika przenikania ciepła ścian, mierzonego metodą ilościowej termografii w podczerwieni. Zmienność warunków brzegowych wymaga niezwykle wnikliwej selekcji warunków prowadzenia pomiarów. Możliwość wybrania warunków właściwych do obliczeń z długiego okresu badań decyduje o dobrej dokładności wyników pomiaru. Preferowany okres pomiaru odpowiada silnemu zachmurzeniu, bardzo małym wahaniom temperatury zewnętrznej i umiarkowanej prędkości wiatru. Zapewnia to zarówno redukcję wahań strumienia ciepłego, jak i zakłóceń od promieniowania słonecznego na zewnątrz i wewnątrz budynku. Dzięki specjalnie dobranym warunkom atmosferycznym pomiaru in situ można uniknąć błędów związanych z akumulacją energii w masywnych materiałach budowlanych. Korygowanie wyników pomiarów prowadzonych w silnie zmiennych warunkach jest znacznie trudniejsze i wymaga wielu szczegółowych informacji materiałowych, a takie dane zwykle nie są dostępne podczas testowania istniejących obiektów. Duży wpływ na wyniki pomiarów mogą mieć również wahania warunków cieplnych w pomieszczeniu.

Literatura

- [1] „Ilościowe określanie cieplnych właściwości przegród budowlanych z wykorzystaniem techniki termograficznej”. 2011. Praca pod redakcją Aliny Wróbel, Wydawnictwo AGH, Kraków.
- [2] ISO/DIS 6781-1. Draft international standard. Performance of buildings – Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods – Part 1: General procedures.
- [3] ISO 9869. 1994. Thermal Insulation – Building Elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.
- [4] Kisilewicz Tomasz, Alina Wróbel. 2010. „Quantitative infrared wall inspection”. *Proceedings of the 10-th edition of the Quantitative InfraRed Thermography – International Conference*, red.: X. P. Maldague, July 27-30, Québec-City, Canada, ISBN 978-2-9809199-1-6, s. 589 – 594.
- [5] PN-EN 13187. 2001. Właściwości cieplne budynków – Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni.
- [6] Tejedor Blanca, Eva Barreira, Vasco Peixoto de Freitas, Tomasz Kisilewicz, Katarzyna Nowak-Dziesko, Umberto Berardi. 2020. „Impact of Stationary and Dynamic Conditions on the U-Value Measurements of Heavy-Multi Leaf Walls by Quantitative IRT”. *Energies* 13 (6611).

Przyjęto do druku: 27.12.2021 r.