

## POMIARY IN-SITU CHARAKTERYSTYK IZOLACYJNOŚCI CIEPLNEJ PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

Janusz BELOK\*, Tomasz STEIDL\*\*, Dominik WOJEWÓDKA\*\*\*

*\*\* Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa ogólnego i Fizyki Budowli  
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice,  
e-mail: Janusz.Belok@polsl.pl,  
Tomasz.Steidl@polsl.pl,  
Dominik.Wojewodka@polsl.pl*

**Streszczenie:** Pomiar izolacyjności cieplnej przegród budowlanych in-situ są istotne dla prawidłowej oceny jakości energetycznej budynków istniejących. W poniższym artykule przedstawiono problemy pojawiające się przy pomiarach in-situ współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  oraz charakterystyk izolacyjności cieplnej R i U przegród budowlanych.

**Słowa kluczowe:** pomiary in-situ, charakterystyki izolacyjności cieplnej, pojemność cieplna.

### 1. WPROWADZENIE

W określaniu charakterystyki energetycznej budynku istniejącego, inżynier często spotyka się z problemem prawidłowego oszacowania jakości cieplnej przegród budowlanych. Przy ocenie jakości cieplnej obudowy budynku w warunkach polowych, stosowanych może być szereg urządzeń pomiarowych. Inżynier obecnie posiada szeroki dostęp do profesjonalnej aparatury pomiarowej i w zasadzie jedynym czynnikiem ograniczającym jego działania są możliwości finansowe. Jak się jednak okazuje w praktyce, poza umiejętnością technicznej obsługi urządzeń niezbędne jest opracowanie stosownej procedury pomiarowej oraz dobranie odpowiedniej metody obróbki uzyskanych danych, dającej w finale rzetelne wyniki.

W artykule przedstawiono problemy pojawiające się przy pomiarach in-situ współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  oraz charakterystyk izolacyjności cieplnej R i U przegród budowlanych.

### 2. CHAREKTERYSTYKA STANOWISKA BADAWCZEGO I APARATURY POMIAROWEJ

W diagnostyce cieplnej znane są metody oceny jakości przegrody, wykorzystujące pomiar temperatury i gęstości strumienia ciepła. Pomiary te z reguły [1] traktuje się jako uciążliwe i długotrwałe. Wymagają wykonania stosownego stanowiska pomiarowego wraz z zestawem odpowiednich czujników i urządzeniem rejestrującym.

W pomiarach na stanowisku badawczym dysponowano następującą aparaturą pomiarową (rys. 1):

- Multisensor meteorologiczny z podgrzewaniem (typ FMA510H, Ahlborn) – pomiar wybranych parametrów klimatu lokalnego (temperatura powietrza zewnętrznego, wilgotność względna powietrza, ciśnienie atmosferyczne, kierunek wiatru, prędkość wiatru, wielkość opadów i inne);
- Rejestrator wielokanałowy (39 wejść pomiarowych z wyświetlaczem, typ MA56902M09TG3, Ahlborn) wraz z zestawem czujników do pomiaru temperatury (PT100) i ciepłomierzem (typ FQ90119, Ahlborn);
- THERM 2227-2 (Ahlborn) z sondą do pomiarów współczynnika  $\lambda$  dla materiałów izolacyjnych włóknistych i nasypowych;
- TESTO 435-4 - pomiar współczynnika U;



Rys. 1. Urządzenia wykorzystane w pomiarach.  
Fig. 1. Devices used in measurements.

Urządzenie typu THERM 2227-2 z sondą do pomiarów współczynnika  $\lambda$  jest dostępne na rynku od dłuższego czasu i jest wykorzystywane do oceny przewodności cieplnej materiałów izolacyjnych.

W ostatnim czasie na rynku pojawiło się niemieckie urządzenie do szybkich pomiarów współczynnika ciepła  $U$  (TESTO 635- 4). Wyposażone jest w trzy termopary i sondę do pomiaru temperatury zewnętrznej. Zgodnie z danymi producenta urządzenie nie ma ograniczenia co do wielkości mierzonej. Obecnie urządzenie jest testowane przez autorów artykułu na stanowisku badawczym, wyposażonym w tradycyjny stacjonarny zestaw pomiarowy z ciepłomierzem (opisany poniżej). Wyniki dotychczas przeprowadzonych testów dają podstawę do zaakceptowania urządzenia z pewnymi ograniczeniami, oraz ze stosowną procedurą pomiarową niezbędną w tym przypadku do otrzymania wiarygodnych wyników końcowych. Producent nie dołącza do urządzenia szczegółowych wytycznych pomiarowych – stosowna procedura jest opracowywana i zostanie zaproponowana przez autorów artykułu w ramach prowadzonego grantu.

## 2.1. Opis stanowiska badawczego

W celu określenia rzeczywistego oporu cieplnego/współczynnika przenikania ciepła  $U$  stworzone zostało stosowne stanowisko pomiarowe (rys. 2). W komorze badawczej zabudowana została przegroda o typowej budowie: pustaki z ceramiki poryzowanej ocieplone od strony zewnętrznej styropianem. Badana próbka miała 1.3 m szerokości i 2.5 m wysokości. Aby określić wartość pomiarową współczynnika  $U$  niezbędne jest rejestrowanie dwóch parametrów – gęstości strumienia ciepła  $q$  ( $W/m^2$ ) oraz różnicy temperatur  $\Delta T$  ( $^{\circ}C$ ) po obu stronach przegrody. Pomiar są długotrwałe bowiem proces wymiany ciepła jest zwykle

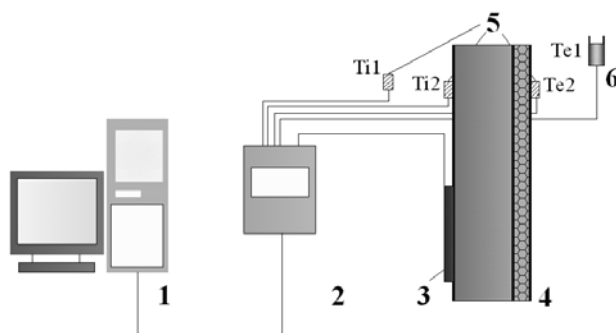
niestacjonarny i nie jest możliwe zastosowanie równania (1) bezpośrednio dla bieżąco otrzymywanych wyników.

$$U = \frac{q}{\Delta T} \quad (1)$$

Aby zebrać niezbędną ilość danych pomiarowych niezbędne jest urządzenie rejestrujące uzyskane wyniki i umożliwiające przechowywanie danych. W tym celu zastosowano rejestrator wielokanałowy o specyfikacji opisanej wcześniej.

Pomiar strumienia ciepła realizowany jest za pomocą ciepłomierza FQ90119 (Ahlaborn) o powierzchni  $0.25 \times 0.25$  m. Czujnik ten umieszczony został w na wewnętrznej powierzchni ściany w jej środku geometrycznym. Aby zapewnić odpowiednią jakość pomiarów konieczny jest dobry kontakt termiczny między czujnikiem a przegrodą. W przypadku prowadzonych badań przegroda miała nierówną powierzchnię (pustaki z ceramiki poryzowanej bez warstwy wykończeniowej z tynku) i w tym przypadku (z uwagi na koszt) jako materiał kontaktowy zastosowany został bezbarwny silikon. W przypadku równej, gładkiej powierzchni zaleca się stosowanie pasty klejąco-przewodzącej.

Pomiar temperatury realizowany był dwojako: temperatura wewnętrzna w pomieszczeniu badawczym oraz na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody – z wykorzystaniem czujników PT100, pomiar temperatury powietrza zewnętrznego – stacja meteorologiczna opisana wcześniej.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe: 1-komputer z oprogramowaniem, 2-rejestrator wielokanałowy, 3-ciepłomierz, 4-przegroda badawcza, 5-czujniki temperatury, 6-stacja meteo.

Fig. 2. The measurement equipment: 1-computer with software, 2-multi channel data recorder, 3-heat flow sensor, 4-wall, 5-temperature sensors, 6-weather station.

## 3. WYNIKI BADAŃ

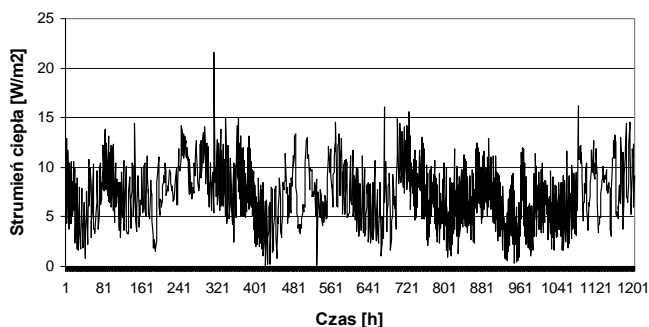
Przedmiotem badań była przegroda z ceramiki poryzowanej z izolacją termiczną ze styropianu od strony zewnętrznej. Parametry cieplne przegrody oraz opory termiczne poszczególnych warstw wyznaczone w sposób teoretyczny [2] zawiera tabela 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry termiczne przegrody.  
Table 1. The main thermal parameters of the wall.

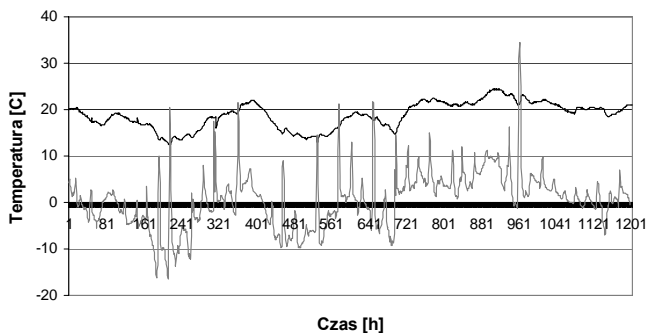
L.p.	Warstwa	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
1.	R <sub>si</sub>	-	-	0.040
2.	Ceramika poryzowana	0.25	-	0.833
3.	Styropian	0.10	0.04	2.500
4.	R <sub>se</sub>	-	-	0.130
Suma:				3.503

Badania prowadzone były w okresie od 8.12.2010 do 27.01.2011r. W komorze badawczej przez cały czas trwania pomiarów czynne było ogrzewanie gwarantujące różnicę temperatur między wnętrzem komory a otoczeniem na minimalnym poziomie 10 K. Badania prowadzone są w dalszym ciągu, a ich rezultaty będą publikowane w miarę uzyskiwania wyników.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów parametrów cząstkowych: strumienia ciepła (rys. 3) oraz temperatur (rys. 4). Rejestrowanie wyników następowało z krokiem czasowym równym 1 godzinie.



Rys. 3. Graficzna prezentacja pomiarów strumienia ciepła.  
Fig. 3. Results of heat flow measurements.



Rys. 4. Pomiary temperatury: na wewnętrznej powierzchni przegrody (Ti2) i zewnętrznej powierzchni przegrody (Te2).  
Fig. 4. Temperature measurements: on the inside surface of the wall (Ti2) and on the outside surface of the wall (Te2).

W celu określenia pomiarowej wartości współczynnika przenikania ciepła zastosować można dwa podejścia. W pierwszym przypadku niezbędny jest pomiar gęstości strumienia ciepła  $q$  oraz różnicy temperatur powietrza wewnętrznego i zewnętrznego ( $T_{i1}$  i  $T_{e1}$  - rys. 2). Zaletą tej metody jest możliwość bezpośredniego wyznaczenia współczynnika  $U$  (z uwzględnionymi współczynnikami napływu i odpływu ciepła  $\alpha$ ) z uzyskanych wartości pomiarowych. Wadą – duża wrażliwość wyników na warunki otoczenia – w zależności od wahań temperatury wartość współczynnika przenikania ciepła  $U$  będzie różna co zmusza do prowadzenia długotrwałych pomiarów i utrudnia możliwość porównywania wyników między stanowiskami zlokalizowanymi w różnych miejscach.

Drugie podejście wymaga pomiaru wartości strumienia ciepła  $q$  oraz różnicy temperatur na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej przegrody ( $T_{i2}$  i  $T_{e2}$  - rys. 2). Dodatkowo przy wyznaczaniu oporu cieplnego przegrody należy dodać współczynniki napływu ( $\alpha_i$ ) oraz odpływu ( $\alpha_e$ ) ciepła na podstawie normy [2] dla warunków krajowych. Metoda ta daje większą powtarzalność rezultatów i możliwość łatwiejszego porównywania wyników między stanowiskami badawczymi o różnej lokalizacji.

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Do analizy wyników badań polowych w celu uzyskania wartości  $R$  lub  $U$ , obecnie najczęściej wykorzystywana jest metodyka opisana w normie ISO 9869 [3].

Na podstawie zgromadzonych danych pomiarowych istnieje możliwość wyznaczenia izolacyjności termicznej przegrody stosując metodykę normy [3]. W normie dostępne są następujące procedury analizy wyników:

- metoda prostego sumowania wartości gęstości strumienia ciepła i różnicy temperatur,
- metoda z zastosowaniem współczynników korekcyjnych

##### 4.1. Metoda prostego obliczania pomiarowego oporu cieplnego.

W metodzie tej opór cieplny przegrody może zostać wyznaczony poprzez podzielenie średniej wartości różnicy temperatur przez średnią wartość gęstości strumienia ciepła:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (2)$$

Podstawowe cechy i ograniczenia metody:

- duży wpływ pojemności cieplnej warstw przegrody na poprawność wyniku końcowego,
- konieczność długotrwałych pomiarów - uwzględnienie właściwości akumulacyjnych przegrody,
- możliwość fałszywych wyników dla przegród wyeksponowanych na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego,
- dla elementów lekkich do analizy wykorzystywane powinny być wyniki jedynie z okresu nocnego – od 1 godziny po zachodzie słońca – test może być zakończony gdy dla 3 kolejnych nocy różnice w wynikach nie przekraczają 5%,
- dla elementów ciężkich pomiary przekraczać muszą 72 h (wielokrotność okresu 24 h), analizę można zakończyć gdy różnice w wynikach pomiędzy kolejnymi okresami nie przekraczają 5%.

#### 4.2. Metoda z zastosowaniem współczynników korekcyjnych.

Metoda stosowana jest w celu uwzględnienia efektów pojemności cieplnej materiałów. Wykorzystana może być dla analizy danych nie spełniających wymagań procedury podstawowej przedstawionej w punkcie 4.1.

Metoda bazuje na zastosowaniu współczynników korekcyjnych  $F_i$  oraz  $F_e$  dla pomiarowych wartości gęstości strumienia ciepła [3]. W efekcie w równaniu (2) suma  $\sum q_j$  zastąpiona jest poprzez:

$$\sum_{j=1}^n q_j - \frac{F_i \cdot \delta \cdot T_i + F_e \cdot \delta \cdot T_e}{\Delta t} \quad (3)$$

gdzie:

- $\Delta t$  - odstęp między pomiarami [s],
- $\delta T_i$  - różnica między wewnętrzną średnią temperaturą z 24 h poprzedzających pomiar i wewnętrzną średnią temperaturą z pierwszych 24 h pomiarów,
- $\delta T_e$  - różnica między zewnętrzną średnią temperaturą z 24 h poprzedzających pomiar i zewnętrzną średnią temperaturą z pierwszych 24 h pomiarów.

Dla danych zgromadzonych w ciągu pierwszych 24 godzin pomiaru poprawki nie dodaje się. Następnie stosuje się już poprawkę jak we wzorze (3).

Współczynniki korekcyjne wyznacza się dla każdej warstwy przegrody osobno (4), (5), poczynając od strony wewnętrznej a następnie sumuje w celu określenia wartości całkowitych (6). Wymagane jest obliczenie lub znajomość oporu cieplnego dla każdej warstwy  $R_k$ , pojemności cieplnej każdej warstwy  $C_k$  oraz oporu cieplnego dla całego komponentu  $R$ . Dokładna procedura obliczeniowa opisana jest w normie [4].

$$F_{ek} = C_k \left[ \frac{R_k}{R} \left\{ \frac{1}{6} + \frac{R_{ik} + R_{ek}}{3R} \right\} + \frac{R_{ik} R_{ek}}{R^2} \right] \quad (4)$$

$$F_{ik} = C_k \left[ \frac{R_{ek}}{R} + \frac{R_k^2}{3R^2} - \frac{R_{ik} R_{ek}}{R^2} \right] \quad (5)$$

Dodatkowo należy wyznaczyć dla każdej warstwy opory po wewnętrznej ( $R_{ik}$ ) i zewnętrznej ( $R_{ek}$ ) stronie warstwy:

$$R_{ik} = \sum_{j=1}^{k-1} R_j \quad R_{ek} = \sum_{j=k+1}^N R_j \quad (6)$$

Współczynniki korygujące dla całego elementu są więc dane przez:

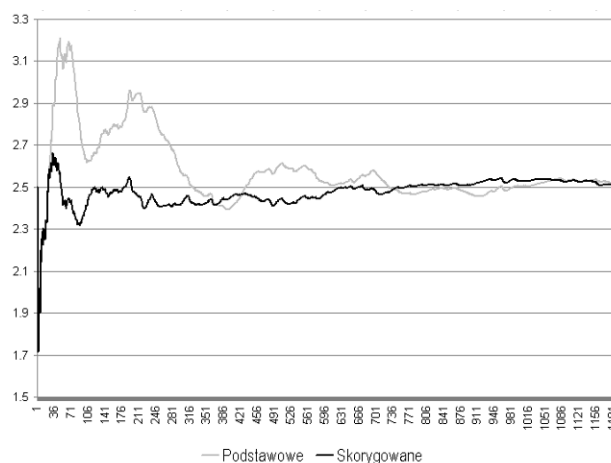
$$F_i = \sum_{k=1}^N F_{ik} \quad \text{oraz} \quad F_e = \sum_{k=1}^N F_{ek} \quad (7)$$

Norma [3] przedstawia także pewne wskazówki dla inżyniera co do prawidłowej interpretacji wyników dla metody z wykorzystaniem współczynników skorygowanych.

Podstawowe cechy i ograniczenia metody:

- bardziej skomplikowana procedura obróbki danych pomiarowych,
- znaczne skrócenie czasu pomiarów dzięki zastosowaniu współczynników korekcyjnych.

Powyższą metodę zastosowano do analizy zbioru wyników poddanego wcześniej obróbce danych metodą podstawową przedstawioną w punkcie 4.1. Otrzymana w ten skorygowana suma gęstości strumienia ciepła pozwala na obliczenie wartości oporu cieplnego po korekcie (rys. 2 – skorygowane) i porównanie z metodą podstawową (rys. 2 - podstawowe).



Rys. 5. Obliczone wartości oporu cieplnego  $R$  [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ] bazujące na pomiarach własnych autorów.

Fig. 5. Calculated values of thermal resistance  $R$  [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ] based on authors own measurements.

Można zauważyć, że zastosowanie współczynników korygujących znacznie wygładza wykres przedstawiający obliczeniowe wartości oporu  $R$  dla całości komponentu, bazujące na pomiarach. Pozwala to na znaczne skrócenie czasu prowadzonych badań. Początkowe duże wahania wartości tłumaczyć można koniecznością ustabilizowania cieplnego przegrody – widać tu dla metody podstawowej jak znacząco wpływa brak uwzględnienia procesów związanych z magazynowaniem ciepła.

Odrębną grupę analizy wyników stanowi analiza dynamiczna opisana między innymi w przywołanej normie [3] i rozwinięta w literaturze [4]. Zaleca się ją stosować, gdy obserwowane są duże rozbieżności między pomierzonymi wartościami temperatur i gęstości strumienia ciepła. Patrząc na wykresy (rys. 3 i 4) można zaobserwować taką właśnie sytuację. Autorzy celowo prowadzili badania na przegrodzie o orientacji południowej by pokazać jak chwilowe skoki wartości natężenia promieniowania słonecznego wpływają na wielkości pomiarowe i późniejszą interpretację wyników. Wyniki analizy dynamicznej przedstawione zostaną w odrębnym artykule.

#### 4.3. Porównywanie wyników teoretycznych i bazujących na pomiarach

Wartości teoretyczne oporu cieplnego przegrody obliczane są za pomocą metodyki znanej w środowisku inżynierskim normy [2]. Wyniki mogą być porównywane z wielkościami obliczonymi na podstawie pomiarów. Inżynier musi mieć jednak świadomość, że mogą wystąpić znaczące różnice w wynikach (większe nawet niż 20%), co może być spowodowane przez następujące czynniki lub ich kombinację:

- wartości współczynników przewodności cieplnej przyjęte do obliczeń teoretycznych często nie są wartościami rzeczywistymi – szczególnie dla materiałów izolacyjnych w budynkach istniejących – nie uwzględniają aktualnych cech, które mogły się zmienić wskutek procesów starzeniowych czy zawilgocenia;
- dokładność w określeniu grubości warstw (szczególnie izolacyjnych) w budynkach istniejących – brak zgodności projektu z rzeczywistą grubością warstwy przegrody = fałszywy wynik obliczeń teoretycznych,
- błędy podczas prowadzenia badań pomiarowych - nieprawidłowo przyjęta procedura, źle wykonane i zabudowane próbki, niewłaściwie przymocowanie czujników do powierzchni przegrody, źle określone/stworzone warunki brzegowe,
- zaburzenia spowodowane konwekcyjnym przepływem powietrza występującym w badanym elemencie, nie rozpoznany przez inżyniera i nie wzięty pod uwagę w obliczeniach teoretycznych,
- nieprawidłowo przyjęte w obliczeniach bazujących na badaniach połowych temperatury otoczenia.

Listę czynników wpływających na końcową wartość wyniku, można by uzupełnić o kolejne punkty – istotna jest świadomość błędu, jaki można popełnić w obu podejściach.

W przypadku rozważanej przegrody wartość teoretyczna oporu cieplnego wynosi  $R = 3.503 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Wartość bazująca na pomiarach w granicach  $R = 2.54 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Różnica w wyniku wynosi więc ok. 27,5%.

Wynik ten jest spowodowany głównie przez warunki przeprowadzania pomiaru – elewacja południowa poddana dużym, chwilowym wpływom natężenia promieniowania słonecznego – chwilowe zaburzenia pomiaru. Znaczący wpływ ma też metodyka wykonywanych obliczeń – nie wyklucza pomiarów prowadzonych w trakcie silnej ekspozycji słońca na elewacje.

Następnym krokiem będzie wykonanie obliczeń na podstawie metody dynamicznej i ponowne porównanie określonych wartości.

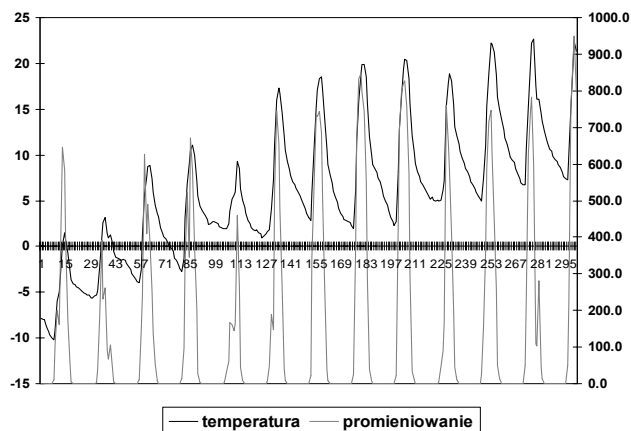
## 5. PODSUMOWANIE

Autorzy w artykule analizowali wpływ czasu trwania pomiarów i metody opracowywania danych na końcowy wynik charakterystyk cieplnych.

Uzyskane wyniki zwracają uwagę na konieczność każdorazowego przygotowania stosownej procedury pomiarowej i doboru metodyki obróbki danych w celu uzyskania miarodajnych wartości charakterystyk cieplnych przegród budowlanych.

Zdaniem autorów aktualnie głównym problemem podczas prowadzenia badań przedstawionych w artykule, są nie tyle możliwości sprzętowe a wybrana metodologia obróbki uzyskanych wyników. Na szczególną uwagę zasługuje w tym przypadku uwzględnienie pojemności cieplnej poszczególnych warstw i ich ułożenia w strukturze przegrody.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że pomiary prowadzone po stronie południowej przy silnym nasłonecznieniu nie odzwierciedlają prawidłowej izolacyjności termicznej przegrody, bowiem występują znaczne zaburzenia spowodowane chwilową absorpcją promieniowania słonecznego. Jest to istotna wskazówka praktyczna dla inżynierów prowadzących pomiary polowe. Sytuacja taka może znacznie ograniczyć możliwości badawcze – niektóre budynki bowiem posiadają jedynie fasadę o wystawie południowej – przykładowo budynki typu earth-sheltered (częściowo zagłębione w gruncie) [5]. Konieczna jest więc świadomość takiej sytuacji i prawidłowe uwzględnienie w procedurze pomiarowej czynników zakłócających.



Rys. 6. Chwilowe wartości promieniowania słonecznego i temperatury na powierzchni zewnętrznej przegrody - okres zimowy.  
 Fig. 6. Momentary values of solar radiation and temperatures on the external surface of the wall – winter period.

Ich wpływ zaobserwować można na rys. 6 (dla wybranego okresu) – krótkotrwały impuls temperatury spowodowany wysokim promieniowaniem słonecznym nie pojawia się po stronie wewnętrznej przegrody i nie ujawnia się w zmianie gęstości strumienia ciepła. Powoduje tylko chwilowe zaburzenie pomiaru na zewnętrznej powierzchni przegrody. Jak widać z przeprowadzonych analiz pomiar aparaturowo może być przeprowadzony prawidłowo ale nieumiejętna interpretacja zgromadzonych wyników daje duże rozbieżności z wartością teoretyczną. Stosowanie w takim przypadku procedury dynamicznej [3,4] mogłoby wpłynąć pozytywnie na wyniki końcowe.

#### IN-SITU MEASUREMENTS OF THERMAL CHARACTERISTICS OF BUILDING PARTITIONS

**Summary:** In-situ measurements of thermal quality of building partitions are necessary for correct energy performance evaluation of existing buildings. Article describes problems which can occur during in-situ measurements of thermal conductivity ( $\lambda$ ) and thermal characteristics like thermal resistance (R) and heat transfer coefficient (U).

#### Literatura

- [1] Taler J. *Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła*. Ossolineum, Wrocław-Warszawa-Kraków, 1995.
- [2] PN EN ISO 6946. *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania*.
- [3] ISO 9869:1994. *Thermal insulation – Building elements – In- situ measurement ...*
- [4] Bloem J.J. *Dynamic Analysis and Modelling Techniques for Energy in Buildings.*, ISBN 92-894-7794-6, EUR 21187 EN, 2004.

[5] Staniec M., Nowak H. Budynki typu earth sheltered jako niekonwencjonalna odpowiedź na wymagania budownictwa zrównoważonego. *Energia i Budynek* 02 (2011) 16-21.