

POMIAR IZOLACYJNOŚCI TERMICZNEJ ŚCIAN W BUDYNKACH ISTNIEJĄCYCH

Tomasz KISILEWICZ*

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

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

Słowa kluczowe: fizyka budowli, diagnostyka cieplna, współczynnik przenikania ciepła.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach diagnostyka cieplna przegród w budynkach istniejących zyskała ponownie na znaczeniu ze względu na wymuszoną i uświadomioną konieczność ograniczenia energochłonności polskiego budownictwa. Badania izolacyjności termicznej przegród in-situ są jednak wykonywane stosunkowo rzadko. Wynika to z jednej strony z możliwości łatwiejszego zwykle oszacowania charakterystyki cieplnej przegród tylko w sposób obliczeniowy, z drugiej zaś jest to związane z dużymi trudnościami pomiarowymi. W artykule przedstawione są wyniki badań ścian w budynkach istniejących przy użyciu miernika gęstości strumienia cieplnego. Dla różnych okresów zmienności warunków zewnętrznych pokazano sposób doboru modelu obliczeniowego tak, aby wyniki pomiaru były poprawne.

2. ILOŚCIOWA DIAGNOSTYKA CIEPLNA PRZEGRÓD

Warunki jakie występują w budynkach istniejących pozostają często w sprzeczności z założeniami przyjętymi przy wyprowadzeniu tego współczynnika. Podczas pomiarów nie zawsze jest możliwe oczekiwanie na okres warunków atmosferycznych zbliżonych do stacjonarnych lub przynajmniej periodycznych. Stąd więc możliwości wykorzy-

stania w diagnostyce wyników pomiarów uzyskanych w innych, nawet przypadkowych warunkach są bardzo istotne dla użytkownika.

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 były bardzo obszerne badania doświadczalne dotyczące tej tematyki. W artykule [1] pokazano już rezultaty części tych badań, prowadzone w komorze klimatycznej w warunkach stacjonarnych i niestacjonarnych. Natomiast w niniejszym artykule mowa jest o badaniach ścian w budynkach istniejących przy użyciu ciepłomierza. Celem tych badań było określenie możliwości, ograniczeń oraz metodyki obliczeń koniecznych do diagnostyki ilościowej przegród w warunkach rzeczywistych.

3. PRZEBIEG BADAŃ

Pomiary mające na celu wyznaczenie wartości współczynnika przenikania ciepła wykonano dla ścian:

- **jednowarstwowej**, z betonu komórkowego o gęstości 400 kg/m³ i grubości 36,5 cm, obustronnie otynkowanej,
- **dwuwarstwowej**, złożonej z cegły silikatowej o grubości 25 cm i styropianu o grubości 13 cm, tynk zewnętrzny pocieniony na siatce, tynk wewnętrzny wapienny,
- **szkieletowej**, ze szkieletem drewnianym o rozstawie 60 cm wypełnionym wełną mineralną z dodatkową, od strony wnętrza paroizolacją i płytą suchego tynku, od zewnątrz płyta OSB, do której zamocowano ciągłą izolacją termiczną w postaci płyty styropianowej o grubości 10 cm, od zewnątrz tynk cienkowarstwowy na siatce.

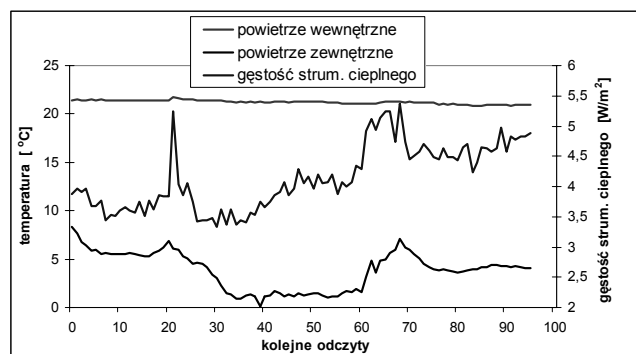
Na czas pomiarów pomieszczenia były wyłączone z normalnego użytkowania. Wyłączono grzejniki centralnego

ogrzewania, a pomieszczenia były ogrzewane w sposób jednostajny grzejnikiem elektrycznym. W interwałach 30-minutowych zapisywano:

- gęstość strumienia ciepłego przepływającego przez ściany ciepłomierzami firmy AHLBORN o dokładności kalibracji 5%,
 - temperaturę powietrza zewnętrznego i powierzchni zewnętrznej przy użyciu termoparami typu T,
 - temperaturę powietrza wewnątrz pomieszczenia i powierzchni wewnętrznej termoparami typu T,
 - prędkość ruchu powietrza w pobliżu ściany (wrywkowo) termoanemometrami:
- TA 440 firmy AirFlow i FVA935-TH4 firmy Ahlborn.

4. ŚCIANA JEDNOWARSTWOWA

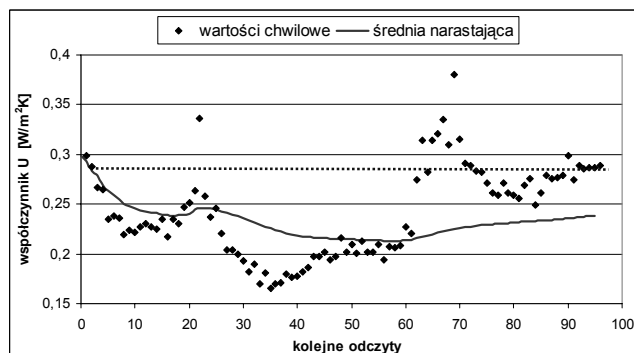
Pełny okres badań ściany jednowarstwowej obejmował 33 dni i trwał od 10.02.2009 do 15.03.2009 r. Mając do dyspozycji dużą ilość danych pomiarowych, wybrano z nich okresy o małej zmienności warunków brzegowych i wyliczono, zgodnie z zasadami podanymi w projekcie normy [2], wartość współczynnika przenikania ciepła tej przegrody równą $0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$. W tym przypadku, jak również w przypadku dalszych analiz tak obliczona wartość pomiarowa jest w dalszym ciągu traktowana jako wartość referencyjna. Referencyjna wartość współczynnika U ściany jednowarstwowej znakomicie odpowiada teoretycznej wartości obliczeniowej wynoszącej $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pojemność cieplna ściany jednowarstwowej jest nieduża i wynosi zaledwie $139,02 \text{ kJ/m}^2\text{K}$.



Rys. 1. Temperatura powietrza wewnętrznego i zewnętrznego oraz gęstość strumienia ciepłego w 2-dobowym okresie pomiarowym.
Fig. 1. Internal and external air temperature and heat flux density during two days

Na rys. 1 pokazano warunki brzegowe oraz gęstość strumienia ciepłego w trakcie nieregularnego dwudobowego okresu. Temperatura powietrza we wnętrzu była praktycznie ustabilizowana, natomiast amplituda temperatury zewnętrznej była równa $4,54 \text{ K}$. Na wykresie gęstości strumienia ciepłego widoczne są dwa obszary gwałtownego wzrostu związane z promieniowaniem słonecznym absor-

bowanym na powierzchni ciepłomierza, mimo ciemnej zasłony na oknie. Oprócz tego można zaobserwować także rozciągniętą w czasie reakcję strumienia ciepłego na spadek temperatury zewnętrznej.

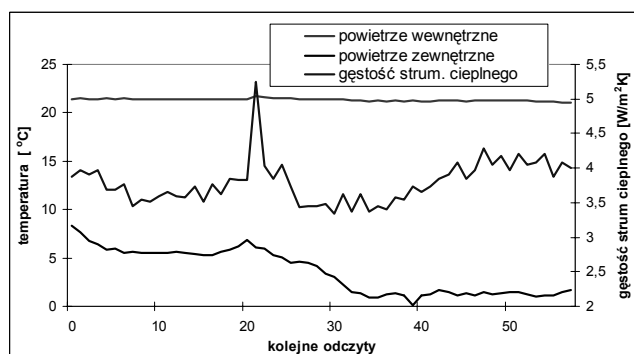


Rys. 2. Wartości chwilowe (pojedyncze punkty) oraz średnia narastająca wartość (linia ciągła) współczynnika przenikania ciepła U . Linia przerywana to wartość obliczeniowa U .

Fig. 2. Momentary (points) and aggregated mean value (continuous line) of thermal transmittance coefficient U . Dotted line is equal to reference U value.

Na rys. 2 przedstawiono wyniki obliczeń wartości współczynnika przenikania ciepła na podstawie danych pomiarowych wybranego dwudobowego okresu.

Warto ponownie zauważyć jak dalece od wartości oczekiwanej odbiegają wartości współczynnika U , obliczone na podstawie chwilowego pomiaru strumienia ciepłego i temperatury po obydwu stronach przegrody. W tym przypadku jednak i długookresowe uśrednienie pomiarów nie przekłada się na dokładny wynik. Mimo pełnej krotności okresu zmian (48 godzin) średnia narastająca wartości współczynnika U różni się w tym przypadku od wartości oczekiwanej o prawie 15%. Tak więc niewłaściwie wybrany okres pomiarowy, mimo relatywnie niewielkiej pojemności cieplnej tej przegrody, nie gwarantuje uzyskania poprawnych wyników ilościowych.

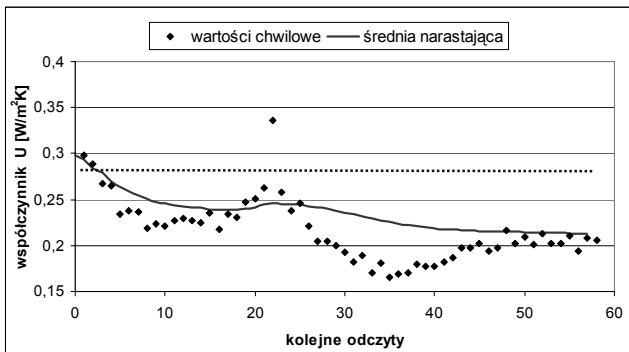


Rys. 3. Temperatura powietrza wewnętrznego i zewnętrznego oraz gęstość strumienia ciepłego w okresie ochłodzenia.

Fig. 3. Internal and external air temperature and heat flux density during the cool down period.

Na rys. 3 pokazano dane pomiarowe zarejestrowane podczas spadku temperatury zewnętrznej od wartości początkowej 8,38 °C do 1,66 °C. Przy niemal stałej temperaturze powietrza wewnętrznego, spadek temperatury zewnętrznej wywołuje wzrost gęstości strumienia ciepłego, rejestrowanego przez ciepłomierz na wewnętrznej powierzchni ściany. Cały okres pomiarowy obejmuje w tym przypadku jedynie 26 godzin.

Wartość współczynnika przenikania ciepła, obliczona jako iloraz średnich narastających gęstości strumienia ciepłego i różnicy temperatury obydwu środowisk, wynosi na końcu analizowanego okresu 0,213 W/m²K, rys. 4 i różni się od wartości referencyjnej aż o 24 %.



Rys. 4. Okres ochłodzenia. Wartości chwilowe (pojedyncze punkty) oraz średnia narastająca wartość (linia ciągła) współczynnika przenikania ciepła U. Linia przerywana - wartość obliczeniowa U. Fig. 4. Cool down period. Momentary (points) and aggregated mean value (continuous line) of thermal transmittance coefficient U. Dotted line is equal to reference U value.

Wybrane do obliczeń dane pomiarowe nie spełniają warunków wymaganych w projekcie normy [1, 2] i nie jest to, jak widać z przebiegu ciągłej linii, tylko kwestia czasu pomiarów. Nie można więc na ich podstawie dokonywać ilościowej analizy przegrody metoda uśredniania temperatury i strumienia ciepłego. Nieco lepsze rezultaty można uzyskać dysponując tymi samymi danymi pomiarowymi, ale uwzględniając zmianę energii wewnętrznej wywołaną ochłodzeniem.

Opór cieplny komponentu, związany z przejściem z jednego stanu ustalonego w drugi, może być obliczony wg następującego wzoru [4, 5, 6]:

$$R = \frac{\Delta t [\theta_{m,i} - \theta_{m,e}]}{Q(0) - Q_{Co}} \quad (1)$$

gdzie: $\Delta t = t - t_o$, $\theta_{m,i}$ – średnia temperatura powierzchni wewnętrznej w okresie Δt i $\theta_{m,e}$ – średnia temperatura powierzchni zewnętrznej, $Q(0)$ – ciepło przenikające przez wewnętrzną powierzchnię przegrody w całym okresie obliczeniowym oraz :

$$Q_{Co} = \Delta\theta_i \cdot C \cdot \varphi_{ii} + \Delta\theta_e \cdot C \cdot \varphi_{ie} \quad (3)$$

gdzie: $\Delta\theta_i = \theta_i(t) - \theta_i(t_o)$, $\Delta\theta_e = \theta_e(t) - \theta_e(t_o)$,

C – pojemność cieplna, φ_{ii} i φ_{ie} to współczynniki strukturalne przegrody. W przypadku przegrody jednorodnej: $\varphi_{ii} = 1/3$, a $\varphi_{ie} = 1/6$.

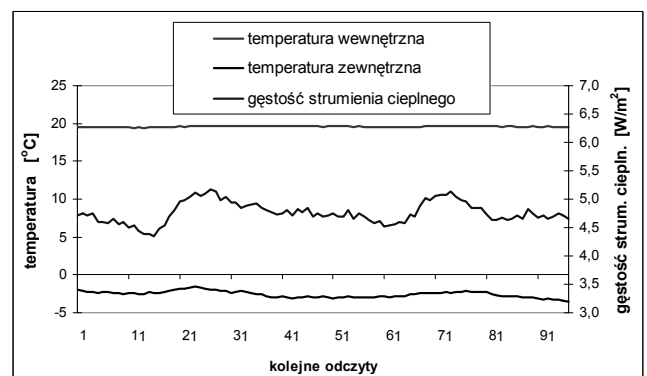
Wyliczona wg wzoru (1) wartość oporu cieplnego jednowarstwowej przegrody wyniosła 3,222 m²K/W, a współczynnik przenikania po uwzględnieniu standardowych wartości oporów przejmowania ciepła, wyniósł 0,310 W/m²K. Mimo znacznego przybliżenia jakie wiąże się z przyjętym modelem obliczeniowym, a faktycznymi warunkami funkcjonowania przegrody oraz krótkim okresem pomiarowym, błąd przybliżenia jest mniejszy niż poprzednio i wynosi 10,8 %.

5. ŚCIANA DWUWARSTWOWA

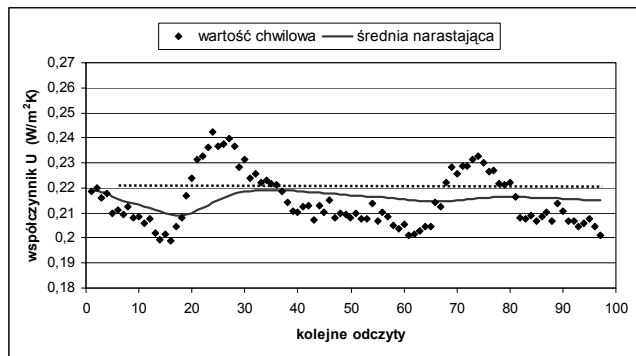
Całkowity czas pomiarów w przypadku ściany dwuwarstwowej wyniósł 11 dni. Na podstawie wyselekcjonowanych okresów quasi-ustalonego stanu obliczono wartość referencyjnego współczynnika U tej przegrody równą 0,222 W/m²K. Pojemność cieplna tej ściany jest znacznie większa niż w przypadku opisanej poprzednio ściany jednowarstwowej i wynosi 390,65 kJ/m²K.

Na rys. 5 pokazano, dla okresu pomiarowego z niewielkimi zmianami warunków brzegowych, temperaturę wokół przegrody dwuwarstwowej oraz gęstość strumienia ciepłego w trakcie wybranego, dwudobowego okresu pomiarowego.

Końcowa wartość średniej narastającej w trakcie całego, dwudobowego okresu pokazanego na rys. 5 i 6 różni się od wartości referencyjnej tylko o 3,16 %. Jest to więc błąd mniejszy od dokładności zastosowanego do pomiarów ciepłomierza. W tym wyjątkowo korzystnym dla pomiarów okresie stabilnych warunków pogodowych, pomiary uśrednione w okresie tylko pierwszej doby dałyby także bardzo dobrą zgodność wyników z wartością oczekiwaną.



Rys. 5 Temperatura otoczenia oraz gęstość strumienia ciepłego w trakcie dwudobowego okresu o małej zmienności warunków Fig. 5 Temperature and heat flux density in two-day period of the small environmental fluctuations



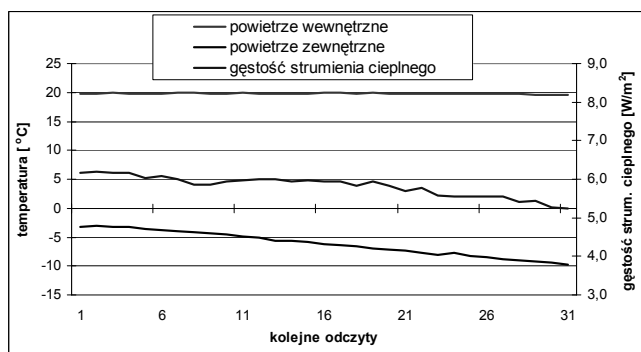
Rys. 6. Wartości chwilowe (pojedyncze punkty) oraz średnia narastająca wartość (linia ciągła) współczynnika przenikania ciepła U. Linia przerywana - wartość obliczeniowa U.

Fig. 6. Momentary (points) and aggregated mean value (continuous line) of thermal transmittance coefficient U. Dotted line is equal to reference U value.

Natomiast przykładem bardzo niekorzystnych warunków do wykonywania pomiarów współczynnika przenikania ciepła są dane przedstawione na rys. 7.

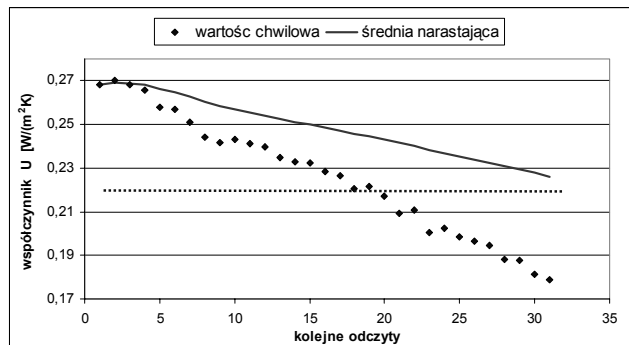
W trakcie tego krótkiego, kilkunastogodzinnego pochmurnego okresu pomiarowego temperatura powietrza wewnętrznego jest praktycznie stała, natomiast temperatura powietrza zewnętrznego spada o około 7 K. Ze względu jednak na znaczną pojemność cieplną i grubą, zewnętrzną warstwę izolacji termicznej, gęstość strumienia ciepłego również spada w tym okresie. Jest to jeszcze wynikiem wcześniejszego wzrostu temperatury zewnętrznej, poprzedzającego okres pokazany na rys. 7.

Na rys. 8 pokazano wyniki obliczeń współczynnika U, uzyskane, tak jak poprzednio, na podstawie wartości chwilowych temperatury i strumienia ciepłego oraz w postaci średniej narastającej.



Rys. 7. Temperatura otoczenia oraz gęstość strumienia ciepłego w trakcie krótkiego okresu malejącej temperatury zewnętrznej.

Fig. 7. Temperature and heat flux density within the short period of decreasing ambient temperature.



Rys. 8. Wartości chwilowe (pojedyncze punkty) oraz średnia narastająca wartość (linia ciągła) współczynnika przenikania ciepła U. Linia przerywana - wartość obliczeniowa U.

Fig. 8. Momentary (points) and aggregated mean value (continuous line) of thermal transmittance coefficient U. Dotted line is equal to reference U value.

Wartości współczynnika U wyliczone na podstawie pomiarów chwilowych odchylają się od wartości oczekiwanej nawet o 21 %. Tymczasem błąd obliczenia na podstawie narastających średnich wartości różnicy temperatury i gęstości strumienia ciepłego na końcu analizowanego okresu wynosi zaledwie 1,87 %. Dobra dokładność jest, w przypadku rosnącej w sposób ciągły różnicy temperatury i malejącego w tym samym czasie strumienia ciepłego, zupełnie zaskakująca. Może być ona w jakimś stopniu wynikiem przypadku, związanego z przyjętą długością okresu obliczeniowego. Tak jak bowiem istnieją wartości odpowiadające pomiarom chwilowym idealnie zgodne z rezultatem oczekiwanym (pojedyncze punkty na rys. 8 leżące na linii przerywanej), podobnie wybrany moment zakończenia może stanowić o uzyskaniu w sposób przypadkowy poprawnego wyniku.

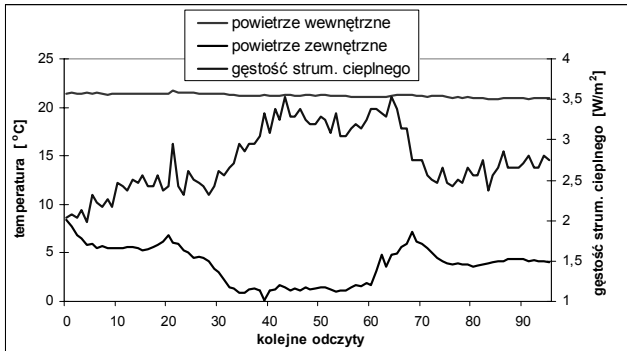
Prawie liniowa zmiana temperatury zewnętrznej może skłaniać do potraktowania rozpatrywanego okresu jako przejścia z jednego stanu ustalonego w drugi, tak jak to zrobiono w rozdz. 4. Tym razem jednak takie podejście jest niewłaściwe. Błąd takich obliczeń byłby w tym przypadku ogromny.

5. ŚCIANA SZKIELETOWA

Obliczeniowa wartość współczynnika przenikania ciepła U ściany szkieletowej wynosi 0.167 W/m²K. Referencyjna wartość pomiarowa jest bardzo zbliżona i wynosi 0.160 W/m²K.

Opisana wcześniej ściana jednowarstwowa oraz ściana szkieletowa były zlokalizowane w jednym budynku. Na rys. 9 pokazano wartości temperatury i gęstości strumienia ciepłego płynącego przez przegrodę w tym samym okresie jak przedstawiony na rys. 1 dla przegrody jednowarstwowej. W przypadku bardzo lekkiej przegrody zmiana tempe-

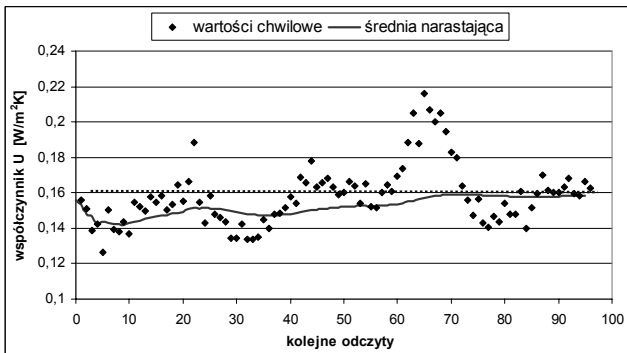
ratury zewnętrznej tylko z niewielkim przesunięciem powoduje zmianę gęstości strumienia ciepłego.



Rys. 9. Temperatura otoczenia oraz gęstość strumienia ciepłego płynącego przez lekką ściankę szkieletową.

Fig. 9. Temperature and heat flux density in lightweight skeleton wall.

Mimo małej pojemności cieplnej ilościowa ocena izolacyjnych właściwości tej przegrody na podstawie pomiaru chwilowego wiązałyby się z bardzo dużymi błędami (nawet 36%), rys. 10. Natomiast wartość współczynnika przenikania ciepła, obliczona jako średnia narastająca, odchyła się na koniec okresu obliczeniowego zaledwie o 1 % od wartości referencyjnej. W tych samych warunkach brzegowych, rys. 1, błąd oceny ilościowej przegrody z betonu komórkowego wyniósł aż 15 %.



Rys. 10. Wartości chwilowe (pojedyncze punkty) oraz średnia narastająca wartość (linia ciągła) współczynnika przenikania ciepła U. Linia przerywana - wartość obliczeniowa U.

Fig. 10. Momentary (points) and aggregated mean value (continuous line) of thermal transmittance coefficient U. Dotted line is equal to computational U value.

Tak więc pomiar izolacyjności termicznej bardzo lekkiej przegrody w zmiennych i nieokresowych warunkach brzegowych jest możliwy, ale wymaga również długiego okresu rejestracji i uśredniania wyników.

7. PODSUMOWANIE

Długotrwałe badania trzech rodzajów przegród w budynkach istniejących, pozwalają wskazać zasady praktycznego postępowania przy pomiarach izolacyjności termicznej in-situ. Możliwość wybrania z całego okresu badań warunków właściwych do wyliczenia z dobrą dokładnością wartości współczynnika U sprawiła, że uzyskano wiarygodne wartości referencyjne. W artykule przedstawiono natomiast próby pomierzenia charakterystyki izolacyjnej przegród na podstawie przypadkowych i dość krótkich okresów wybranych z całego zbioru wyników badań.

Jeden z istotnych rezultatów pokazanych w artykule przykładów pomiarów i obliczeń to relatywnie mała wrażliwość wyników na nieregularne fluktuacje temperatury zewnętrznej. Obserwacja ta jest zgodna ze spostrzeżeniami zawartymi w pracy [6]. Duże znaczenie dla wyników pomiarów mają natomiast wahania warunków cieplnych w pomieszczeniu. Nie pokazywane w tym artykule okresy pomiarów w warunkach wahań temperatury, spowodowanych pulsacyjnym działaniem kotła w indywidualnej instalacji grzewczej i głowicy termostatycznej na grzejniku, były związane z dużymi błędami pomiarowymi. Stąd więc po początkowych próbach, prowadzonych przy normalnie sterowanym ogrzewaniu, zdecydowano się na użycie grzejnika elektrycznego o ręcznie dobieranym, stałym poziomie mocy.

Pokazane powyżej przykładowe wyniki pomiarów znakomicie potwierdzają zależność błędu pomiaru od struktury i czasu trwania pomiarów, zaprezentowaną w pracy Kosseckiej [6], rys 5.1.

W przypadku ściany jednowarstwowej z betonu komórkowego o relatywnie małej pojemności cieplnej, rozdz. 4, błąd dwudobowego pomiaru w przypadkowych warunkach zewnętrznych jest wysoki. Dalsze skrócenie czasu pomiaru prowadzi do gwałtownego wzrostu błędu. Nieco lepsze rezultaty w przypadku tej ściany można uzyskać w warunkach wyraźnego spadku temperatury zewnętrznej, uwzględniając w obliczeniach zmianę energii wewnętrznej ściany. Dokładność pokazanego w rozdz. 4 obliczenia nie jest jednak wysoka, ponieważ ilość ciepła jakie przeniknęło przez przegrodę w analizowanym, zbyt krótkim, okresie była zaledwie dwa razy większa od zmiany ilości ciepła zakumulowanego w przegrodzie.

W przypadku przegrody dwuwarstwowej, z wewnętrzną warstwą o dużej pojemności cieplnej, dwudobowy, korzystny okres uśredniania wyników pozwala na uzyskanie dobrego rezultatu. Obliczony w rozdz. 5 błąd pomiaru wynosił 3.16%, a odczytany z wykresu zawartego w pracy [6] ok. 2.5 %.

W przypadku bardzo lekkiej przegrody szkieletowej, korzystna relacja pomiędzy ciepłem zakumulowanym a przenikającym przez ścianę sprawia, że błąd obliczeń przy dwudobowym okresie pomiarowym jest niewielki. Nawet jednak w tym przypadku okres trwania pomiarów nie powinien być krótszy niż dwie doby.

MEASUREMENT OF THE WALL THERMAL RESISTANCE IN EXISTING BUILDINGS

Summary: Results of the experimental measurements of the walls in real climate conditions are presented. The aim of testing was to precise the possibilities and the necessary conditions for quantitative thermal diagnostics of the walls in the non-stationary boundary conditions.

Literatura

[1] Kisilewicz T., Wróbel A., Diagnostyka termowizyjna przegród w zmiennych warunkach brzegowych, Materiały konferencyjne – streszczenia XII *Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, Łódź 2009, s.71-72, ISBN 978-83-88499-26-5.

[2] prEN 12494 Building components and elements - In-situ measurement of the surface-to-surface thermal resistance.

[3] *Ilościowe określanie cieplnych właściwości przegród budowlanych z wykorzystaniem techniki termograficznej*, praca pod redakcją Aliny Wróbel, złożona do druku w roku 2011 w Uczelnianym wydawnictwie naukowo-dydaktycznym AGH w Krakowie.

[4] ISO 9869, 1994. International Standard. *Thermal Insulation – Building Elements* – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.

[5] Kisilewicz T., Kisilewicz T., *Thermal resistance of a wall determined in non-stationary boundary conditions*, Proceedings of the 1st Central European Symposium on Building Physics, Research on Building Physics, redaktorzy: D. Gawin & T. Kisilewicz, 13-15 September 2010, Kraków-Łódź, ISBN 978-83-7283-367-9. s. 171-176

[6] Kossecka E.: *Wybrane zagadnienia dynamiki cieplnej ścian budynków*, IPPT PAN, Studia z zakresu inżynierii, Nr 45, Warszawa 1998.