

## **WYKORZYSTANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW PRZEJMOWANIA CIEPŁA W PROJEKTOWANIU I BADANIACH TERMICZNYCH PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH BUDYNKÓW**

Mariusz Sobolewski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W projektowaniu przegród zewnętrznych budynków z uwagi na ich izolacyjność cieplną zachodzi konieczność wyznaczenia całkowitego oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła. Składnikiem obydwu tych parametrów są opory przejmowania ciepła po wewnętrznej i zewnętrznej stronie przegród. Opory te wynikają z różnych wartości współczynników przejmowania ciepła. Wykonywanie obliczeń cieplno-wilgotnościowych dla elementów budynków z wykorzystaniem obliczeniowych wartości oporów przejmowania ciepła może prowadzić do błędnych wniosków wynikających z uproszczonych założeń warunków przejmowania ciepła. Stosowanie uproszczenia do określenia tych oporów w zdecydowanej większości przypadków jest niedopuszczalne [Nowak i Wawrzynek 2002, za Wróbel 2010]. Celem prowadzonych prac eksperymentalnych jest określenie uśrednionych wartości współczynników i oporów przejmowania ciepła dla całych okresów chłodzenia lub ocieplania przegród w sezonie grzewczym, które mogą być przydatne na potrzeby projektowania. W dalszej kolejności – opracowanie efektywnego sposobu określenia uśrednionych wartości współczynników i oporów przejmowania ciepła w rzeczywistych warunkach pracy różnych typów przegród budowlanych, który mógłby być wykorzystywany przez osoby zajmujące się badaniami przegród budowlanych. Celem drugorzędny artykułu jest przybliżenie projektantom sporządzającym świadectwa energetyczne budynków problematyki związanej z wykorzystywaniem obliczeniowych wartości współczynników i oporów przejmowania ciepła dla przegród budowlanych. W artykule zamieszczono wstępne wyniki badań uzyskane dla jednej z badanych przegród – jednowarstwowej ściany murowanej z cegły. Przedstawiono eksperymentalny sposób określenia współczynnika przejmowania ciepła po wewnętrznej i zewnętrznej stronie przegrody. Wartości tych współczynników i oporów uzyskane z badań różnią się względem wartości obliczeniowych. Artykuł wyjaśnia znaczenie współczynników i oporów przejmowania ciepła w elementach budynków o zróżnicowanej izolacyjności cieplnej.

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Mariusz Sobolewski, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Budowlanej, Laboratorium Centrum Wodne, ul. Ciszewskiego 6, 02-776 Warszawa, e-mail: mariusz\_sobolewski@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

**Słowa kluczowe:** współczynnik przejmowania ciepła, współczynnik wnikania ciepła, współczynnik napływu ciepła, opory przejmowania ciepła, izolacyjność cieplna przegród, współczynnik przenikania ciepła

## WSTĘP

Wymagania techniczne na potrzeby projektowania i ochrony cieplnej budynków są wyrażane między innymi wskaźnikiem *EP* określającym roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji i przygotowania c.w.u. oraz chłodzenia. Drugim istotnym parametrem oceny efektywności energetycznej budynków, wykorzystywanym w obliczeniach ich bilansu energetycznego, jest współczynnik przenikania ciepła (*U*) przegród budowlanych. Współczynnik ten uwzględnia właściwości przewodzenia ciepła materiałów i warunki przejmowania ciepła po obu stronach przegrody. Warunki przejmowania ciepła charakteryzowane są przez współczynniki przejmowania ciepła.

Wszystkie znane sposoby określenia współczynnika *U* wymagają więc znajomości przynajmniej współczynnika przejmowania ciepła po jednej stronie przegrody. Metoda obliczania na podstawie całkowitego oporu cieplnego (*R<sub>T</sub>*) [PN EN ISO 6946: 2004 i 2008] wykorzystuje wartości dwóch współczynników przejmowania ciepła. W metodzie ścianki pomocniczej z zastosowaniem ciepłomierzy w badaniach laboratoryjnych, w zależności od tego, czy pomiary prowadzone są z obu stron, czy tylko od strony wewnętrznej, stosuje się odpowiednio dwie lub jedną wartość współczynnika. Metoda termograficzna wymaga znajomości jednej wartości – po stronie wewnętrznej.

Współczynniki przejmowania ciepła mają znaczenie praktyczne przy obliczaniu zapotrzebowania na ciepło pomieszczeń ogrzewanych, przy obliczaniu zapotrzebowania energii na chłodzenie oraz w przypadku wymiany ciepła przegród z otoczeniem o wyrównanej temperaturze.

## PODSTAWY TEORETYCZNE

Przenikanie ciepła przez płaską przegrodę w przypadku wystąpienia różnicy temperatury odbywa się przez konwekcję, promieniowanie i przewodzenie. Biorąc pod uwagę jedynie przepływ ciepła na granicy dwóch ośrodków (środowiska wewnętrznego z przegrodą oraz przegrody ze środowiskiem zewnętrznym), przekazywanie ciepła odbywa się tylko przez konwekcję i promieniowanie. Na powierzchni przegrody budowlanej strumień ciepła jest równy sumie strumieni cieplnych przekazywanych przez konwekcję i promieniowanie. W praktyce używane są współczynniki przejmowania ciepła, będące sumą współczynników przejmowania ciepła przez konwekcję i promieniowanie. Mówi się wówczas o całkowitych strumieniach ciepła i całkowitych współczynnikach przejmowania ciepła. Współczynniki te występują w równaniu Newtona adekwatnym dla obu stron elementu budynku:

$$\varphi_i = h_{si} A (T_i - T_{si}) \text{ oraz } \varphi_e = h_{se} A (T_{se} - T_e) \quad (1)$$

gdzie:  $q_i$  – strumień ciepła napływającego po stronie wewnętrznej [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  
 $q_e$  – strumień ciepła odpływającego po stronie zewnętrznej [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  
 $h_{si}$  – współczynnik przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej [ $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ],  
 $h_{se}$  – współczynnik przejmowania ciepła po stronie zewnętrznej [ $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ],  
 $A$  – pole powierzchni przegrody [ $\text{m}^2$ ],  
 $T_i$  – temperatura powietrza wewnętrznego [K],  
 $T_{si}$  – temperatura powierzchni ściany po stronie wewnętrznej [K],  
 $T_{se}$  – temperatura powierzchni ściany po stronie zewnętrznej [K],  
 $T_e$  – temperatura powietrza zewnętrznego [K].

Zgodnie z PN EN ISO 7345:1998 współczynnik przejmowania ciepła zdefiniowany jest jako gęstość strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnię w stanie ustalonym podzielona przez różnicę temperatury pomiędzy powierzchnią a otoczeniem. Można zatem zapisać:

$$h_{si} = \frac{q_i}{T_i - T_{si}} \quad \text{oraz} \quad h_{se} = \frac{q_e}{T_{se} - T_e} \quad (2)$$

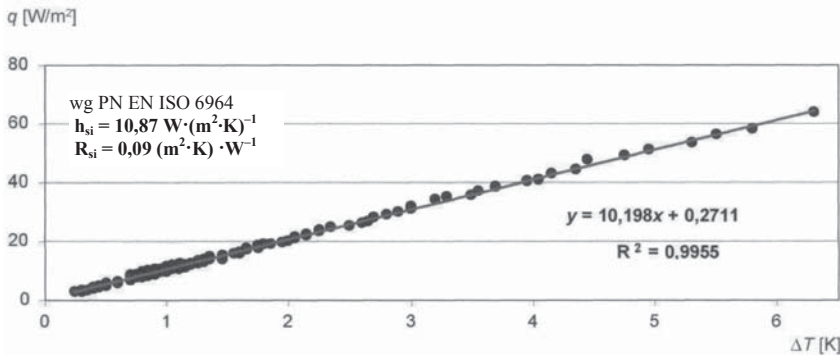
Określenie wartości współczynnika przejmowania ciepła, zwłaszcza po stronie zewnętrznej, nadal stanowi wyzwanie dla inżynierów. Problematyka tego zagadnienia wynika głównie ze zmian warunków otoczenia przegród zewnętrznych w budynkach (dobowe wahania oraz zmiany sezonowe temperatury powietrza, wpływ zachmurzenia, nasłonecznienia i prędkości wiatru). Zmiany termiczne środowiska naturalnego, decydujące o odpływie ciepła z powierzchni przegrody zewnętrznej do otoczenia, mogą determinować również intensywność wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni w pomieszczeniu.

Analityczny sposób wyznaczenia współczynników przejmowania ciepła na podstawie równań różniczkowych opisujących konwekcyjny przepływ ciepła okazał się bardzo trudny, a istniejące rozwiązania dotyczą w zasadzie prostych przypadków przy uproszczeniu założeń [Hobler 1986, za Wróbel 2010]. W dodatku uzyskane z teorii podobieństwa i analizy wymiarowej równania kryterialne charakteryzują się niewielką dokładnością, około 20–30% [Nowak i Wawrzynek 2002, za Wróbel 2010]. Dlatego w praktyce wartość współczynnika przejmowania ciepła oblicza się z uproszczonych, empirycznych zależności lub przyjmuje wartości obliczeniowe dla typowych warunków przenikania ciepła z PN EN ISO 6946:2004 i 2008 lub PN-EN ISO 10211:2008. Wzory empiryczne uzależniają wartość współczynnika  $h_{si}$  od różnicy temperatury powietrza i powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, a współczynnika  $h_{se}$  jedynie od prędkości wiatru. Przyjmuje się, że wielkość  $\Delta T$  jest różnicą średniej temperatury przegrody i powietrza. We wzorach uwzględniana jest jeszcze długość przegrody. Liczne rozwiązania w tym zakresie dotyczą współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję i osobno przez promieniowanie. Dalszy podział wzorów empirycznych wynika z rodzaju konwekcji (swobodna od wewnątrz, wymuszona od zewnątrz), kierunku strumienia ciepła dla konwekcji swobodnej (do góry, poziomy, do dołu) oraz charakteru przepływu powietrza (ruch laminarny lub burzliwy). Osobne rozwiązania dla powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej dotyczą również współczynnika przejmowania ciepła przez promieniowanie. Za pomocą wzorów wykazano, że udział promieniowania we współczynniku  $h_{si}$  wynosi

około 60%, natomiast we współczynniku  $h_{se}$  – około 15%. Wartości te mogą się zmieniać [Kisilewicz i in. 1998]. Udział składowych zależy od warunków wymiany ciepła [Kostowski 2006]. Obliczenia współczynników przejmowania ciepła  $h_{si}$  oraz  $h_{se}$  na podstawie wzorów empirycznych dla najczęściej spotykanych przypadków w budownictwie ujętych również normą PN EN ISO 6946:2004 i 2008 można znaleźć między innymi u Kozierskiego [1971].

Podstawowym jednak sposobem określenia wartości współczynnika przejmowania ciepła są eksperymentalne badania w komorach klimatycznych metodą ścianki pomocniczej. W tym celu wykonywane są symulacje dwóch różnych klimatów po obu stronach modelowej przegrody wraz z pomiarami gęstości strumienia ciepła ( $q$ ) i różnicy temperatury pomiędzy powietrzem a powierzchnią przegrody ( $\Delta T$ ). Według prawa Newtona oba parametry ( $q$  i  $\Delta T$ ) są proporcjonalne, a współczynnik przejmowania ciepła jest współczynnikiem proporcjonalności [Kostowski 2006]. Dlatego w warunkach ustalonego przepływu ciepła obserwuje się bardzo silną korelację pomiędzy wartościami gęstości strumienia ciepła i różnicy temperatury powietrza i powierzchni przegrody. Nachylenie prostej uzyskanej z regresji liniowej obu mierzonych wielkości  $q$  i  $\Delta T$  odpowiada wartości współczynnika przejmowania ciepła [Orzechowski 2000, za Wróbel 2010]. Sens fizyczny w równaniu regresji posiada jedynie współczynnik kierunkowy prostej.

Przykładowe wyniki badań laboratoryjnych w komorze klimatycznej ściany z bloczków silikatowych grubości 0,18 m, ocieplonej w systemie ETICS (styropian 0,12 m), o współczynniku  $U = 0,36 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$  (prędkość ruchu powietrza  $V = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Zależność gęstości strumienia ciepła od różnicy temperatury dla ocieplonego muru z bloczków silikatowych [Wróbel 2010]

Fig. 1. The dependence of the heat flux density, as a function of the temperature difference for insulated walls made of silicate blocks [Wróbel 2010]

Z porównania przegród pionowych o zróżnicowanej izolacyjności cieplnej przy jednakowej dokładności pomiarów wynika, że w przegrodach o małej izolacyjności cieplnej ( $U \geq 1,3 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ) największe znaczenie w pomiarach odgrywa dokładność określenia współczynnika przejmowania ciepła oraz różnicy temperatury powietrza po obu stronach przegrody. Natomiast w przegrodach o dużej izolacyjności cieplnej ( $U \leq 0,3 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ) największe znaczenie w pomiarach ma jedynie dokładność określenia różnicy temperatury powietrza i powierzchni przegrody od strony wewnętrznej [Wróbel 2010].

W diagnostyce cieplnej budynków wartość współczynnika przejmowania ciepła dla konkretnej przegrody w quasi-ustalonych warunkach wymiany ciepła wyznacza się eksperymentalnie za pomocą ciepłomierzy oraz termografii. W ilościowych badaniach termograficznych budynków współczynnik  $h_{si}$  może być wyznaczany przez pomiar odpowiednich wartości temperatury powietrza i powierzchni przegrody za pomocą kamery i dodatkowych czujników temperatury oraz precyzyjny pomiar anemometrem prędkości ruchu powietrza przy wewnętrznej powierzchni przegrody [Nowak 2012].

Aktualne informacje na temat badań terenowych na rzeczywistych przegrodach w budynkach można znaleźć w pracach: Kisilewicz [2011], Nowoświata i innych [2011], Beloka i innych [2011], Kucypery i Nowaka [2011], Basińskiej i Koczyk [2011], Steidla i innych [2013]. Obecne dociekania skierowane są na opracowanie szybkiego i niezależnego od zewnętrznych warunków atmosferycznych sposobu określenia współczynnika przenikania ciepła ( $U$ ). Ze względu na niestabilny przepływ ciepła przez rzeczywiste przegrody budynków prowadzenie badań oraz interpretacja wyników pomiarów są bardzo złożone, gdyż wymagają rejestracji i analizy danych odpowiadających quasi-ustalonej wymianie ciepła.

Przy wyznaczaniu strat ciepła według PN-EN ISO 6946:2004 i 2008 oraz PN-EN ISO 10211:2008 obliczeniowa wartość współczynnika  $h_{se}$  wynosi  $25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Natomiast obliczeniowa wartość współczynnika  $h_{si}$  dla przegród pionowych wynosi  $7,7 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . W przypadku przegród poziomych, zależnie od kierunku strumienia w dół lub w górę, obliczeniowa wartość współczynnika  $h_{si}$  wynosi odpowiednio  $5,9 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$  lub  $10 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Wartość współczynnika  $h_{se}$  znajduje uzasadnienie w średnich rocznych prędkościach wiatru występujących w Polsce (dominują prędkości do  $3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  prawie na całym obszarze) [Kozierski 1971, Pogorzelski 2005]. Cammerer [1967] podaje, że jest ona najczęściej spotykana i odpowiada budynkom usytuowanym na peryferiach miast. Dla budynków znajdujących się wewnątrz miast  $h_{se} = 20 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Wartość współczynnika  $h_{se}$  w warunkach panującej ciszy wynosi około  $13 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ , a przy występującej burzy (prędkość wiatru  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) współczynnik  $h_{se}$  osiąga  $100 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Według Cammerera [1967] współczynnik  $h_{si}$  dla przegród pionowych wynosi około  $6\text{--}8 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ , a dla poziomych  $4\text{--}6 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Zdaniem Nowaka [2012] w rzeczywistych warunkach wartość współczynnika  $h_{si}$  może się zmieniać w granicach od około  $7,5$  do około  $11,5 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Natomiast wartość współczynnika  $h_{se}$  może się zmieniać od wartości około  $14$  (warunki bezwietrzne) do około  $35 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$  przy występującym wietrze. Z kolei Dylla [2015] podaje, że obliczeniowe wartości współczynnika  $h_{si}$  mogą wynosić od  $4,5$  do  $8,5 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ , a współczynnika  $h_{se}$  tylko dla konwekcji – od  $15$  do  $115 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Natomiast Kostowski [2006] zwraca uwagę, że wartość współczynnika  $h_{si}$  tylko dla konwekcji swobodnej wynosi od  $1$  do  $10 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ .

Powstaje więc pytanie, w jakim stopniu wartości współczynników przejmowania ciepła determinują wartość współczynnika przenikania ciepła? Odpowiedzi na to pytanie można poszukiwać, rozważając definicję współczynnika przenikania ciepła ( $U$ ).

Współczynnik  $U$  w warunkach ustalonej wymiany ciepła jest ilorazem gęstości strumienia ciepła ( $q$ ) przenikającego przez przegrodę budowlaną i różnicy temperatury powietrza po obu jej stronach:

$$U = \frac{q}{T_i - T_e} \quad (3)$$

W ustalonych warunkach przenikania ciepła, przy różnych wartościach temperatury powietrza wewnątrz i na zewnątrz pomieszczenia ( $T_i > T_e$ ), wartości strumienia ciepła: napływającego na wewnętrzną powierzchnię, przewodzonego przez przegrodę oraz odpływającego od zewnętrznej powierzchni przegrody są sobie równe. Dlatego wartość współczynnika  $U$  można wyrazić za pomocą współczynnika przejmowania ciepła, temperatury powietrza i powierzchni przegrody odpowiednio: po wewnętrznej stronie, po obu stronach lub po zewnętrznej stronie przegrody w następujący sposób [Wróbel 2010]:

$$U = \frac{h_{si}(T_i - T_{si})}{T_i - T_e} = \frac{h_{si}h_{se}(T_i - T_{si})}{h_{se}(T_i - T_{se}) + h_{si}(T_i - T_{si})} = \frac{h_{se}(T_{se} - T_e)}{T_i - T_e} \quad (4)$$

Powyższe wzory przedstawiają tylko pozorną wrażliwość współczynnika  $U$  na wartości współczynników  $h_{si}$  oraz  $h_{se}$ . O ile wartości temperatury powietrza po obu stronach przegrody oraz temperatury powierzchni przegrody można pomierzyć dokładnie, o tyle powstaje problem przy wyznaczaniu lub przyjęciu wartości współczynników przejmowania ciepła. Zakładanie do obliczeń normowych wartości opisanych współczynników  $h_{si}$  oraz  $h_{se}$  powoduje wyznaczenie jedynie wartości przybliżonej współczynnika przenikania ciepła przegrody budowlanej [Nowak 2012].

Znaczenie współczynników przejmowania ciepła zostało omówione w dalszej części pracy. Warto jeszcze zaznaczyć, że odwrotnością współczynnika przejmowania ciepła jest opór przejmowania ciepła. Opory przejmowania ciepła odpowiednio w przypadku wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody wynoszą:

$$R_{si} = \frac{1}{h_{si}} \quad \text{oraz} \quad R_{se} = \frac{1}{h_{se}} \quad (5)$$

Opory przejmowania ciepła służą do określenia całkowitego oporu cieplnego elementu budynku ( $R_T$ ), który zawiera również opór cieplny przegrody ( $R_\lambda$ ), wynikający z przewodzenia ciepła przez przegrodę. Odwrotnością całkowitego oporu cieplnego ( $R_T$ ) jest współczynnik przenikania ciepła ( $U$ ).

## METODYKA BADAŃ

Badania terenowe izolacyjności cieplnej elementów istniejących budynków wykonywane metodą ścianki pomocniczej pozwalają na wyznaczenie wartości współczynników i oporów przejmowania ciepła po obu stronach przegrody. Pomiaru gęstości strumienia ciepła ( $q$ ) i różnicy temperatury pomiędzy powietrzem a powierzchnią przegrody ( $\Delta T$ ) odbywają się analogicznie jak w badaniach laboratoryjnych. Podobnie wartość współczynnika przejmowania ciepła może być wyznaczona z regresji liniowej mierzonych wielkości  $q$  i  $\Delta T$ . Z uwagi na fakt, że warunki termiczne oraz prędkość przepływu powietrza tuż przy powierzchni przegród w pomieszczeniach są bardziej stabilne niż na zewnątrz budynków (lepiej odwzorowują warunki ustalone), bardziej wiarygodne jest określanie w powyższy sposób współczynnika przejmowania ciepła po wewnętrznej



stronie przegrody. Miarodajną temperaturą powietrza do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła od strony wewnętrznej jest temperatura powietrza z warstwy o grubości 15–20 mm od powierzchni przegrody [Cammerer 1967]. W badaniach należy zapewnić stabilność warunków termicznych w pomieszczeniu, które najlepiej wyłączyć z użytkowania na czas pomiarów. Z praktyki wynika, że w pomieszczeniach ogrzewanych w okresie grzewczym wartości temperatury powietrza i powierzchni przegród od wewnątrz są sobie bliskie. Nawet w przypadku przegród o bardzo małej izolacyjności cieplnej w pomieszczeniach zamkniętych różnica tych wartości jest najczęściej rzędu 3–8°C, średnio 5°C, i rzadko przekracza 10°C [Cammerer 1967, Pogorzelski 1976].

Współczynnik przejmowania ciepła po stronie zewnętrznej należy określać na podstawie znajomości oporu  $R_{se}$ . Opór przejmowania ciepła ( $R_{se}$ ) oblicza się z różnicy pomiędzy całkowitym oporem cieplnym przegrody ( $R_T$ ) a oporem przewodzenia przegrody ( $R_\lambda$ ) oraz przejmowania ciepła ( $R_{si}$ ), które dają się wyznaczać w zastosowanej metodzie pomiaru. Należy zaznaczyć, że najmniejszą niepewność wyznaczenia oporów  $R_T$  oraz  $R_\lambda$ , niezależnie od izolacyjności przegrody, uzyskuje się przy prowadzeniu pomiarów ciepłomierzami z obu stron. Prowadzenie pomiarów gęstości strumienia ciepła tylko od strony cieplej (wewnętrznej) dostarcza większej niepewności.

Określenie współczynnika i oporu przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej przegrody w warunkach *in situ* możliwe jest na podstawie wyselekcjonowanych pomiarów z kilku okresów zbliżonych do stanu ustalonego lub w warunkach periodycznych, które odpowiadają stabilnym warunkom pogodowym na zewnątrz budynku. Same zaś określenie izolacyjności cieplnej przegrody uzyskuje się już na podstawie uśrednionych wartości chwilowych całkowitego oporu cieplnego ( $R_T$ ) lub współczynnika przenikania ciepła ( $U$ ) z kilkudniowych stabilnych termicznie okresów. Ze względu na zmienność warunków panujących wokół przegród występuje spory przedział wartości współczynników i oporów przejmowania ciepła. Można je potraktować jako wartości chwilowe, które są przypisane do zastanych warunków w otoczeniu przegrody budowlanej w trakcie prowadzenia pomiarów. Jednak biorąc pod uwagę cały okres chłodzenia przegrody lub jej ocieplania w sezonie grzewczym, możliwe jest wyznaczenie uśrednionej wartości współczynnika przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej przegrody ( $h_{si}$ ). Odpowiadającą jej wartość średnią współczynnika przejmowania ciepła ( $h_{se}$ ) po stronie zewnętrznej przegrody można wyznaczyć przy znajomości oporów cieplnych  $R_T$  oraz  $R_\lambda$ . Posługiwanie się uśrednionymi wartościami współczynników i oporów przejmowania ciepła z powodzeniem może być wykorzystywane na potrzeby projektowania budynków.

## WYNIKI BADAŃ

Badania izolacyjności cieplnej, których celem było określenie wartości współczynnika przenikania ciepła oraz współczynników przejmowania ciepła, wykonano dla ściany jednowarstwowej z cegły pełnej o grubości 0,58 m, obustronnie otynkowanej. W czasie pomiarów pomieszczenie było ogrzewane grzejnikiem centralnego ogrzewania i wyłączone z normalnego użytkowania. W badaniach zastosowano zestaw pomiarowy oporu cieplnego przegród budowlanych firmy HUKSEFLUX, wielokanałowy rejestrator firmy APEK obsługujący czujniki oporowe temperatury i ciepłomierze firmy AHLBORN

o dokładności kalibracji 5%. Dodatkowo zastosowano zestaw monitoringu klimatu LB-487 obsługujący termohigrometry LB-710 firmy LAB-EL. Zapis pomiarów wykonano z interwałem 10-minutowym. Rejestrowano gęstość strumienia ciepłego przez ścianę, temperaturę powietrza zewnętrznego i powierzchni zewnętrznej, natężenie promieniowania słonecznego, temperaturę powietrza wewnątrz pomieszczenia, temperaturę powietrza przy powierzchni wewnętrznej oraz temperaturę powierzchni wewnętrznej. Prędkość ruchu powietrza w pobliżu ściany sprawdzano wyrywkowo termooanemometrem Kestrel 4500NV firmy NIELSEN-KELLERMAN. Analizowany okres badań ściany murowanej obejmował 103 dni i trwał od 20.10.2012 r. do 30.01.2013 r. Do analizy wybrano okresy nocne o stabilnych, powtarzających się warunkach atmosferycznych, które zapewniają quasi-ustalony przepływ ciepła. Wyniki uśredniano, biorąc pod uwagę tylko wielokrotność części doby dla periodycznych zmian warunków wokół przegrody. Pojemność cieplna badanej ściany jest duża i wynosi  $915,93 \text{ kJ}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Obliczona wartość współczynnika przenikania ciepła tej przegrody wynosi  $1,02 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Wartość otrzymana z badań bardzo dobrze odpowiada teoretycznej wartości obliczeniowej współczynnika  $U$ , wynoszącej  $1,00 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Ponieważ badania prowadzono na obiekcie historycznym, więc w obliczeniach wartości teoretycznej współczynnika  $U$  przyjęto przewodność cieplną muru ceglanego  $0,69 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ , określoną jako średnia ważona dla muru o grubości  $2 \frac{1}{2}$  cegły, przy współczynnikach przewodzenia ciepła cegły pełnej dla wyrobu ręcznego  $0,60 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ , oraz zaprawy cementowo-piaskowej –  $1,00 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ , zaczerpniętych z literatury [Kitajcew i Chrienow 1954]. Przyjętą w obliczeniach wartość współczynnika przewodzenia ciepła cegły pełnej potwierdzają również wyniki współcześnie wykonywanych badań laboratoryjnych cegieł (np. w pracy Garbalińskiej i Siwińskiej [2008]). Posługiwanie się wartościami przewodności cieplnej muru z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej z obustronnym tynkiem –  $0,78 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$  [PN-82/B-02020] lub takiego muru bez tynku –  $0,77 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$  [PN-91/B-02020] prowadzi do uzyskania współczynnika  $U$ , równego  $1,09 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ . Wynik taki w obu przypadkach odpowiada współczynnikowi przewodzenia ciepła cegły pełnej, równemu  $0,70 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ . Wartość ta jest większa od współczynnika przewodzenia ciepła wynoszącego  $0,66 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$  podawanego przez Kitajcewa i Chrienowa [1954] dla cegły czerwonej, ale nie dla wyrobu ręcznego. Dlatego w analizowanym przypadku powoływanie się na normę PN-82/B-02020 lub PN-91/B-02020 zdaniem autora nie jest w pełni adekwatne.

Określona wartość uśrednionego współczynnika przejmowania ciepła dla okresu chłodzenia muru (obniżania się temperatury powietrza zewnętrznego) po stronie wewnętrznej przegrody wynosi  $h_{si} = 10,7 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$  i nie odbiega od podawanych w literaturze. Wynik ten uzyskano na podstawie bardzo silnego związku liniowego ( $r = 0,925$ ) pomiędzy gęstością strumienia ciepła i różnicą temperatury powietrza i powierzchni przegrody. W analizie wyników uwzględniono temperaturę powietrza wewnętrznego mierzoną poza zasięgiem warstwy przyściennej. Obliczony opór przejmowania ciepła po stronie we-



wewnętrznej wynosi  $R_{si} = 0,093 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)} \cdot \text{W}^{-1}$ . Wartość ta stanowi 9,5% całkowitego oporu cieplnego przegrody ( $R_T$ ) i jednocześnie współczynnika przenikania ciepła ( $U$ ). Na podstawie różnicy temperatury powietrza po obu stronach przegrody i wartości gęstości strumienia cieplnego wyznaczono wartość całkowitego oporu cieplnego przegrody ( $R_T$ ). Natomiast na podstawie różnicy temperatury powierzchni przegrody po obu jej stronach i wartości gęstości strumienia cieplnego wyznaczono wartość oporu cieplnego przewodzenia przegrody  $R_\lambda$ .

W dalszym etapie określono wartość oporu  $R_{se}$  z różnicy pomiędzy całkowitym oporem cieplnym przegrody ( $R_T$ ) a oporami  $R_\lambda$  oraz  $R_{si}$ . Obliczenia wykonywano na wartościach średnich uzyskanych z wartości chwilowych dla tych samych okresów, na podstawie których została określona wartość współczynnika  $U$ . W analizowanym przypadku opór cieplny przejmowania ciepła po stronie zewnętrznej przegrody wynosi:

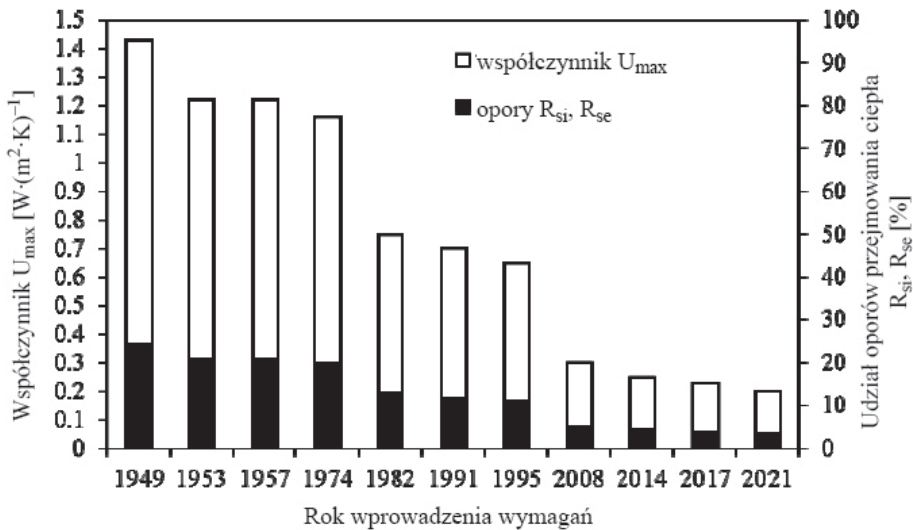
$$R_{se} = R_T - R_\lambda - R_{si} = 0,98 - 0,83 - 0,093 = 0,057 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)} \cdot \text{W}^{-1}$$

Zatem wartość uśrednionego współczynnika przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej wynosi  $h_{se} = 17,5 \text{ W} \cdot \text{(m}^2 \cdot \text{K)}^{-1}$ . Jest to wynik mieszczący się w przedziale cytowanych wartości literaturowych. Opór  $R_{se}$  stanowi 5,8% całkowitego oporu cieplnego przegrody ( $R_T$ ) i tym samym współczynnika przenikania ciepła ( $U$ ). Łączny udział oporów przejmowania ciepła w całkowitym oporze cieplnym oraz współczynniku przejmowania ciepła wynosi 15,3%.

Cammerer [1967] stwierdził, że wpływ współczynnika przejmowania ciepła na współczynnik przenikania ciepła jest nieznaczny. Wynik badania ściany jednowarstwowej o średniej izolacyjności cieplnej nie do końca potwierdza słuszność powyższego stwierdzenia, biorąc pod uwagę oba współczynniki przejmowania ciepła (wpływ rzędu 15% nie jest do pominięcia). Kołodziejczyk [1958] stwierdził, że opór  $R_{si}$  w obliczeniach cieplnych ścian zewnętrznych uwzględniany jest jako wartość stała, zatem im mniejszy jest opór całkowity przegrody, tym większy jest w nim procentowy udział oporu  $R_{si}$  oraz większy spadek temperatury powierzchni wewnętrznej przegrody w stosunku do temperatury powietrza.

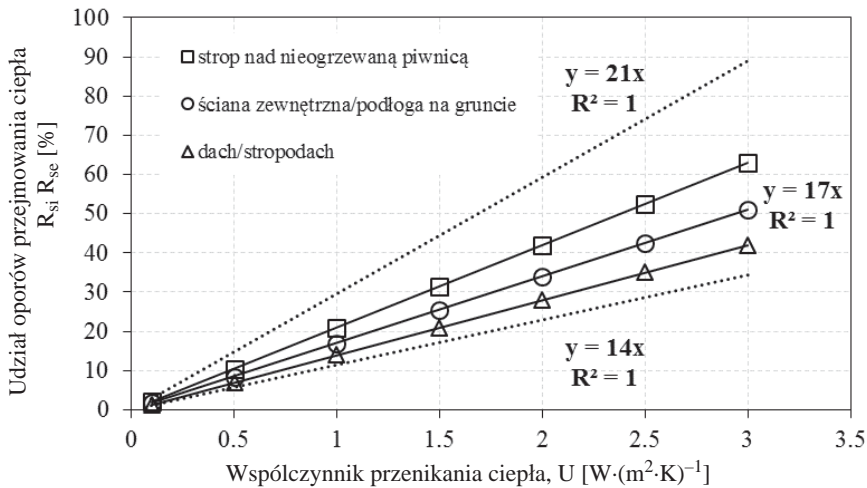
Warto więc spojrzeć na problem w skali globalnej, posługując się zmianami wymagań izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych, które dobrze odzwierciedlają zróżnicowanie przegród budowlanych pod względem termicznym. Maksymalne wartości współczynnika przenikania ciepła ( $U$ ) w Polsce dla przegród pomieszczeń przeznaczonych na stały pobyt ludzi ustalono pierwotnie w 1949 roku na podstawie warunku uniknięcia kondensacji pary wodnej [Pogorzelski 1976, 2005]. Od 1953 roku obserwuje się zaostrzenie postawionych wymagań.

Rysunek 2 przedstawia udział aktualnych obliczeniowych oporów przejmowania ciepła na tle zmian wymaganego współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych. Natomiast rysunek 3 ilustruje zależność udziału aktualnych obliczeniowych oporów przejmowania ciepła od współczynnika przenikania ciepła dla różnych przegród zewnętrznych.



Rys. 2. Udział obliczeniowych oporów przejmowania ciepła ( $R_{si}$  oraz  $R_{se}$ ) w świetle wymaganych dopuszczalnych wartości skorygowanego współczynnika przenikania ciepła ścian zewnętrznych w budynkach ( $U_{max}$ )

Fig. 2. Participation internal and external surface resistances in the light of the required limit values thermal transmittance of external walls in buildings ( $U_{max}$ )



Rys. 3. Zależność udziału obliczeniowych wartości oporów przejmowania ciepła od współczynnika przenikania ciepła dla różnych przegród zewnętrznych (linią przerywaną zaznaczono granice określone na podstawie najmniejszych i największych realnych wartości współczynników przejmowania ciepła cytowanych z literatury)

Fig. 3. The dependence of participation of internal and external surface resistances of thermal transmittance for different external envelopes (the dashed line indicates the limits determined by the smallest and the largest real values of the surface resistances which are cited in the literature)

## PODSUMOWANIE

Sposób określenia uśrednionych współczynników przejmowania ciepła w warunkach *in situ* jest obiecujący i może być wykorzystywany w praktyce przez badaczy. Z wytypowanych odcinków czasu reprezentujących stabilne warunki pogodowe uzyskano wiarygodne wartości współczynników i oporów przejmowania ciepła po obu stronach przegrody oraz wartość współczynnika przenikania ciepła, całkowitego oporu cieplnego i oporu przewodzenia przegrody. Interpretacja wyników wymaga w dalszym ciągu opracowania sposobu wyznaczenia parametrów cieplnych przegrody na podstawie krótkiego przedziału czasu, niezależnego od warunków środowiska zewnętrznego. Współczynniki przejmowania ciepła przestają odgrywać znaczącą rolę w przegrodach o dużej izolacyjności cieplnej. Dlatego w budownictwie energooszczędnym, a także w szeroko pojętym budownictwie w bliskiej przyszłości współczynniki przejmowania ciepła będą miały marginalne znaczenie. W dobrze zaizolowanych przegrodach zewnętrznych, wykonanych zgodnie z prognozowanymi wymaganiami, udział oporów przejmowania ciepła we współczynniku  $U$  przedstawia się następująco: ściany zewnętrzne – 3,4%, dach i stropodach – 2,1%, strop nad nieogrzewaną piwnicą – 5,2%, podłoga na gruncie – 5,1%. W przypadku tylko oporu  $R_{si}$  jego udział wynosi: ściany zewnętrzne – 2,6%, dach i stropodach – 1,5%, strop nad nieogrzewaną piwnicą – 4,25%, podłoga na gruncie – 5,1%. W budynkach pasywnych, gdzie dopuszczalna wartość współczynnika  $U$  przegród wynosi  $0,10 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ , kwestia wpływu współczynników przejmowania ciepła jest pomijalna (od 1,4 do 2,5% całkowitego oporu cieplnego). W tego rodzaju przegrodach budowlanych zastosowanie metod termografii ilościowej, bez konieczności eksperymentalnego wyznaczania oporów (współczynników) przejmowania ciepła, nabiera dużego znaczenia. Otwarta jest więc droga, aby w prosty sposób móc ocenić izolacyjność cieplną przegród zewnętrznych, stosując termografię ilościową na szeroką skalę. Wyznaczanie współczynników przejmowania ciepła będzie nadal wskazane w diagnostyce cieplnej budynków, które będą wykazywać wady termiczne przegród budowlanych.

Osobną kwestią jest ocena stanu izolacyjności cieplnej budynków istniejących, które podlegają termomodernizacji. Struktura wiekowa takich budynków i mieszkań w Polsce wykazuje silne zróżnicowanie pod względem poziomu zapotrzebowania na energię, co jest podyktowane zmieniającymi się, obowiązującymi w różnych okresach budowy, przepisami [Gałązka 2015]. Stare budynki (około 85% zasobów krajowych) nadal w zdecydowanej większości charakteryzują się średnią, a nawet małą izolacyjnością cieplną przegród zewnętrznych, w których współczynniki przejmowania ciepła odgrywają istotną rolę przy wyznaczaniu całkowitego oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła.

Przeprowadzone badanie ściany jednowarstwowej oraz analiza teoretyczna współczynników i oporów przejmowania ciepła pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków. Wyznaczone w warunkach *in situ* opory przejmowania ciepła różnią się od wartości obliczeniowych z PN-EN ISO 6964:2004 i 2008. Opór po stronie wewnętrznej jest mniejszy, a po zewnętrznej większy od ustalonych w normie. Suma oporów przejmowania ciepła wyznaczona eksperymentalnie okazała się mniejsza. Wraz ze zwiększaniem się izolacyjności cieplnej przegród budowlanych istotnie maleje udział oporów przejmowania ciepła w całkowitym oporze cieplnym przegrody i konsekwentnie we

współczynnika przenikania ciepła. Trend tych zmian dotyczy jednocześnie współczynników przejmowania ciepła, których rola zmienia się w szerokich granicach. W każdym przypadku współczynnik przejmowania ciepła po wewnętrznej stronie przegrody miał większe znaczenie niż po stronie zewnętrznej. W ścianach zewnętrznych, o małej izolacyjności cieplnej, wpływ współczynników przejmowania ciepła na współczynnik  $U$  wynosi 20–50%. W ścianach o średniej izolacyjności cieplnej wpływ ten wynosi 5–20%, a o dużej izolacyjności – 3,4–5%.

## PIŚMIENNICTWO

- Basińska, M., Koczyk, H. (2011). Ocena jakości termicznej przegród budowlanych w budynku pasywnym Politechniki Poznańskiej. XIII Polska Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka budowlanej w teorii i praktyce”, Łódź, 7–12.
- Belok, J., Steidl, T., Wojewódka, D. (2011). Pomiary in-situ charakterystyk izolacyjności cieplnej przegród budowlanych. XIII Polska Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka budowlanej w teorii i praktyce”, Łódź, 17–22.
- Commerer, J.S. (1967). Izolacje ciepłochronne w przemyśle. Tłum. z 1962 r. Arkady, Warszawa.
- Dylla, A. (2015). Fizyka ciepła budowlanej w praktyce. Obliczenia ciepłno-wilgotnościowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Gałązka, T. (2015). Krajowy plan mający na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii. Budownictwo energooszczędne w Polsce – stan i perspektywy. Wydawnictwo UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz.
- Garbalińska, H., Siwińska, A. (2008). Ocena porównawcza stacjonarnej i niestacjonarnej techniki pomiaru przewodności cieplnej. II Konferencja „Energia odnawialna. Innowacyjne rozwiązania, materiały i technologie dla budownictwa”. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 47, 123–130.
- Hobler, T. (1986). Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa.
- Kisilewicz, T. (2011). Pomiar izolacyjności termicznej ścian w budynkach istniejących. XIII Polska Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka budowlanej w teorii i praktyce”, Łódź, 173–178.
- Kisilewicz, T., Królak, E., Pieniążek, Z. (1998). Fizyka ciepła budowlanej. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 17–30.
- Kitajcew, W.A., Chrienow, G.S. (1954). Izolacje cieplne. Poradnik izolatora. PWT, Warszawa.
- Kołodziejczyk, S. (1958). Fizyka konstrukcji budowlanych. PWN, Warszawa.
- Kostowski, E. (2006). Przepływ ciepła. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Kozierski, J. 1971. Zagadnienia fizyczne w budownictwie i instalacjach. PWN, Łódź.
- Kucypera, M., Nowak, H. (2011). Zastosowanie termografii do wyznaczania oporu cieplnego przegród budowlanych w warunkach rzeczywistych. XIII Polska Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka budowlanej w teorii i praktyce”, Łódź, 219–223.
- Nowak, A.J., Wawrzynek, A. (2002). Transport ciepła w ciałach stałych – zagadnienia bezpośrednie i odwrotne. Cz. I. V Konferencja „Termografia i termometria w podczerwieni”, Ustroń.
- Nowak, H. (2012). Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Nowosiwiat, A., Krause, P., Steidl, T. (2011). Próba oszacowania izolacyjności termicznej przegród budowlanych na podstawie pomiarów temperatury. XIII Polska Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka budowlanej w teorii i praktyce”, Łódź, 285–287.
- Orzechowski, T. (2000). Wykorzystanie rozkładu pola temperatury do określenia lokalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła. IV Konferencja „Termografia i termometria w podczerwieni”, Łódź.
- PN-82/B-02020 oraz PN-91/B-02020 Ochrona ciepła budynków. Wymagania i obliczenia.

- PN-EN ISO 6946:2004 i 2008 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- PN-EN ISO 7345:1998 Izolacja cieplna. Wielkości fizyczne i definicje.
- PN-EN ISO 10211:2008 Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe.
- Pogorzelski, J.A. (1976). Fizyka cieplna budowli. PWN, Warszawa.
- Pogorzelski, J.A. (2005). Zagadnienia cieplno-wilgotnościowe przegród budowlanych. W: Budownictwo ogólne. T. 2. Fizyka budowli. Arkady, Warszawa, 112–139, 302–324.
- Steidl, T., Belok, T., Krause, P., Nowoświat, A., Orlik-Koźdoń, B., Wojewódka, D. (2013). Poradnik diagnostyki cieplnej budynków. T. 1. Diagnostyka in situ izolacyjności cieplnej budynków. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Wróbel, A. (2010). Termografia w pomiarach inwentaryzacyjnych obiektów budowlanych. Rozprawy i Monografie 209, Wyd. AGH, Kraków.

### THE APPLICATION AND MEASUREMENT OF THE SURFACE HEAT TRANSFER COEFFICIENTS IN DESIGN AND THERMAL TESTS OF BUILDING PARTITIONS

**Abstract.** The article is directed to the researchers of building partitions, designers and people, who prepare certificates of building energy performance. The preliminary results of experimental test obtained for a single-layer brick wall are described. The experimental determination of the surface heat transfer coefficients inside and outside the building partitions is presented. The values of surface resistances and heat transfer coefficients obtained from test are differ from values included in PN-EN ISO 6964. The influence of the surface heat transfer coefficients on thermal transmittance is described. The article explains the importance of the surface heat transfers and resistances at the building partitions of different thermal resistances.

**Key words:** surface heat transfer coefficient, internal surface resistance, external surface resistance, total thermal resistance, thermal transmittance

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.03.2016

Cytowanie: Sobolewski, M. (2016). Wykorzystanie współczynników przejmowania ciepła w projektowaniu i badaniach termicznych przegród zewnętrznych budynków. Acta. Sci. Pol. Architectura 15 (1), 41–53.