

BADANIA I STUDIA – RESEARCH AND STUDIES

Zbigniew Owczarek\*

## OSŁONIĘTA SKRZYŃKA GRZEJNA DO BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA OKIEN I DRZWI

W artykule przedstawiono osłoniętą skrzynkę grzejną (GHB), używaną obecnie w Laboratorium Izolacji Termicznych Zakładu Fizyki Ciepłej ITB. Skrzynka ta jest przeznaczona do badań współczynnika przenikania ciepła kompletnych okien i drzwi, okien dachowych i innych okien wystających poza lico ścian, fragmentów fasad, ram okiennych lub drzwiowych, słupów, rygli itp. W odniesieniu do zmodernizowanego wyposażenia stanowiska GHB w ITB przedstawiono sposób kalibracji oraz badanie współczynnika przenikania ciepła i określanie niepewności pomiaru.

### 1. Wprowadzenie

Oslonięta skrzynka grzejna (GHB) jest najbardziej rozpowszechnioną w świecie metodą badania współczynnika przenikania ciepła komponentów przegród przezroczystych i nieprzezroczystych, w tym komponentów o niepłaskich powierzchniach i o zróżnicowanych właściwościach cieplnych. Metoda została opracowana zgodnie z podstawową zasadą bilansu cieplnego, ujmującego rzeczywistość i ściśle zdefiniowaną w warunkach laboratoryjnych stacjonarną wymianę ciepła przez badane próbki w skali naturalnej.

Metoda badań z zastosowaniem skrzynki grzejnej jest ujęta normami [1] i [2]. W celu jednoznacznego zdefiniowania warunków wymiany ciepła przez próbkę przeprowadzono badania międzylaboratoryjne [3] i opracowano normy rozszerzające metodę na badania kolejnych komponentów przegród budynków lub ich powtarzalnych modułów [4], [5].

W ITB stanowisko badawcze osłoniętej skrzynki grzejnej (GHB) powstało blisko 40 lat temu; od kilku lat podlegało doskonaleniu, a pod koniec 2002 r. zakończono jego modernizację połączoną z dostosowaniem do aktualnych norm.

W dalszej części artykułu przedstawiono w skrócie wyniki modernizacji i kalibracji stanowiska oraz określono niepewność pomiaru.

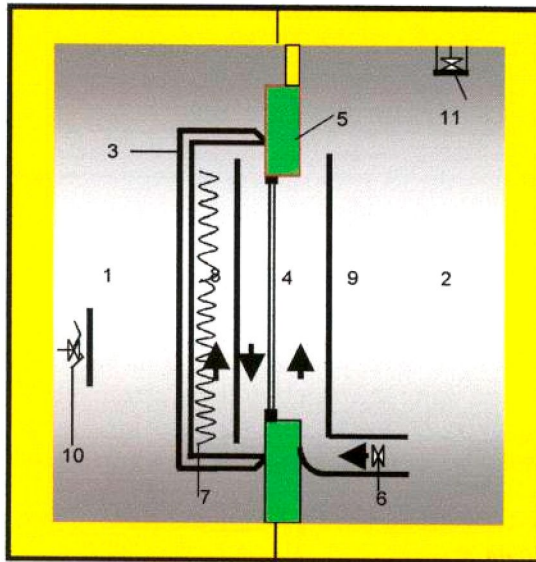
---

dr inż. – adiunkt w Zakładzie Fizyki Ciepłej ITB

## 2. Opis zmodernizowanego stanowiska GHB

Stanowisko GHB w Laboratorium Izolacji Termicznych Zakładu Fizyki Ciepłej ITB (rys. 1, 2 i 3) składa się z następujących części składowych:

- komory ciepłej (1) – rys. 1, o wymiarach około  $(3,3 \times 4,4)$  m i wysokości 4,0 m, ze skrzynką pomiarową (3) dostawianą do badanej próbki (rys. 2 a),
- skrzynki pomiarowej (3) o wymiarach około  $(2,25 \times 2,75 \times 0,60)$  m, z jednej strony otwartej (rys. 2 a) i tą stroną dostawianej do badanej próbki, której maksymalna szerokość może wynosić 1,60 m, a wysokość 2,15 m,
- ścianki – „maski” (5) ze styropianu, grubości 200 mm, z otworem do montażu badanej próbki (rys. 2),
- komory zimnej (2) z ekranem (9) z blachy szerokości około 2,8 i wysokości 2,65 m pomalowanej farbą o wysokiej emisyjności i usytuowanej pionowo na podwoziu jezdnym zintegrowanym z trzema wentylatorami (6) typu bębnowego (rys. 2 b),
- sześciu płyt kalibracyjnych pokazanych na rysunku 3 (oznaczonych numerami 1 ÷ 6, o wymiarach około  $(1,465 \times 1,435)$  m, o trzech różnych wartościach oporu cieplnego i grubości około 20 mm, 60 mm i 100 mm), składających się z dwóch tafli szkła grubości 4 mm każda, między którymi jest warstwa styropianu o znanej przewodności cieplnej,
- sterowni z systemem regulacji i stacją Keithley 500 zbierania i przetwarzania danych z kalibracji i pomiarów według specjalnie opracowanych programów komputerowych.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego GHB w ITB – przekrój pionowy  
1 – komora ciepła, 2 – komora zimna, 3 – pomiarowa skrzynka grzejna,  
4 – badana próbka (okno), 5 – ścianka („maska”) oddzielająca komorę ciepłą  
od zimnej, 6 – wentylator, 7 – grzejnik pomiarowy, 8 – ekran w skrzynce pomiarowej,  
9 – ekran w komorze zimnej, 10 – grzejnik regulacyjny w komorze ciepłej,  
11 – parownik z wentylatorem instalacji chłodniczej

Fig. 1. Scheme of test stand „GHB” in ITB – vertical cross section

a)



b)



Rys. 2. Widok komór: a – ciepłej, b – zimnej  
Fig. 2. View chambers: a – warm, b – cold



Rys. 3. Widok płyt kalibracyjnych na wózkach  
Fig. 3. View of calibration panels on carts

W komorze ciepłej stałą temperaturę powietrza, do  $(30 \pm 0,5)$  °C, utrzymuje się za pomocą grzejnika elektrycznego i czujnika temperatury podłączonych do regulatora, a w komorze zimnej, do  $(-15 \pm 1)$  °C, za pomocą agregatu chłodniczego o nastawnej regulacji sterowanej automatycznie mikroprocesorowym sterownikiem.

W ściankach skrzynki pomiarowej, wykonanych z ekstrudowanej pianki polistyrenowej o grubości 0,1 m, zainstalowano stos termoelektryczny (ciepłomierz regulacyjny) z drutów z miedzi i konstantanu, tworzących 304 spiny równomiernie rozmieszczone na powierzchniach. Końcówki stosu są podłączone do regulatora z algorytmem PID-FUZZY LOGIC, który steruje grzejnikiem pomiarowym tak, aby napięcie elektryczne na tych końcówkach wynosiło 0 V.

Wydatek ciepła Joule'a-Lenza grzejnika pomiarowego, odpowiadający strumieniowi cieplnemu przenikającemu przez badaną próbkę i ściankę „maskę” w obrębie skrzynki, wyznacza się przez pomiar napięcia i natężenia prądu na końcówkach tego grzejnika, podłączonych do stacji zbierania danych. Dokładność pomiaru napięcia i natężenia prądu (mocy) jest sprawdzana okresowo przy zastosowaniu przyrządów o wyższej klasie dokładności i wynosi około 0,5% wartości mierzonej.

Temperatury powietrza i powierzchni ekranu, ścianki „maski” i badanej próbki mierzy się termoparami podłączonymi także do stacji zbierania danych. Dokładność pomiaru temperatury, dokonywanego za pomocą termopar typu T i systemu zbierania danych Keithley 500, z uwzględnieniem pomiaru temperatury zimnych końców termopary, jest sprawdzana okresowo i wynosi  $\pm 0,25$  °C.

W celu uzyskiwania sumarycznego oporu przejmowania ciepła zbliżonego do wartości normowej prędkość obrotową wentylatorów zintegrowanych z ekranem reguluje się oddzielnie przetwornicami częstotliwości.

### 3. Testowanie stanowiska

Po zakończeniu urządzania stanowiska pomiarowego przeprowadzono testowanie zgodnie z wymaganiami określonymi w normie [2]. Najpierw dobierano nastawę regulatora z algorytmem PID-FUZZY LOGIC do ciepłomierza regulacyjnego, grzejnika pomiarowego, wentylatorów i całego wyposażenia, tak aby osiągać szybką i dokładną stabilizację zadanych warunków środowiskowych po obydwu stronach badanej próbki oraz aby uzyskać minimalny uchyb regulacji mocy dostarczonej, przy zadanej wartości wielkości regulowanej.

Następnie dobierano taką prędkość obrotową wentylatorów, aby całkowity opór przejmowania ciepła po stronie ciepłej i zimnej płyty kalibracyjnej grubości 20 mm, przy różnicy temperatury powietrza 20 K i prędkości powietrza nie mniejszej niż 1,5 m/s, wynosił  $(0,17 \pm 0,01)$  (m<sup>2</sup>·K)/W.

W kolejnym etapie przeprowadzono testy z próbkami jednorodnymi (płytami kalibracyjnymi) w zakresie dokładności, powtarzalności, stabilności oraz jednorodności wielkości wymienionych w normie [2] i dotyczących między innymi:

- błędów strumienia cieplnego przenikającego przez próbkę, spowodowanego stratami ciepła skrzynki pomiarowej i na obrzeżu próbki, układem sterującym oraz dokładnością mierników,

- zmienności temperatury powietrza na grubości i gradientu temperatury wzdłuż strumienia powietrza przylegającego do próbki,
- dokładności pomiarów różnic i temperatury absolutnej,
- różnicy między dwoma kolejnymi okresami pomiarowymi w odniesieniu do oporu, współczynnika przenikania ciepła, mocy i temperatury.

Wyniki pomiarów tych wielkości, ich analizę oraz ocenę zgodności z wymaganiami [2] wykorzystano do określenia niepewności pomiaru.

#### 4. Kalibracja stanowiska

Kalibrację stanowiska GHB przeprowadzono zgodnie z normą [4] w dwóch etapach obejmujących prace przygotowawcze oraz zasadnicze pomiary.

W etapie 1. przygotowano szklane płyty kalibracyjne (rys. 3) i określono ich opór cieplny. W tym celu aparatem płytowym według PN-EN ISO 8301 zmierzono przewodność cieplną rdzenia płyt kalibracyjnych ze styropianu w różnych średnich temperaturach. Na tej podstawie oraz zgodnie ze zmierzonymi wymiarami, w tym grubością rdzenia i całkowitą grubością płyt kalibracyjnych, obliczono opór cieplny w zależności od temperatury. Przykładowe wyniki obliczeń w odniesieniu do płyty nr 6 grubości 20 mm i płyty nr 3 grubości 60 mm wraz z przyporządkowanymi im liniami regresji przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

W etapie 2., obejmującym zasadnicze pomiary kalibracyjne, zastosowano płyty nr 6 i 3, tj. o oporze cieplnym zalecanym w normie [4] przy badaniu okien i drzwi. Płyty kalibracyjne montowano kolejno w „masce” stanowiska GHB i określono zgodnie z podaną normą:

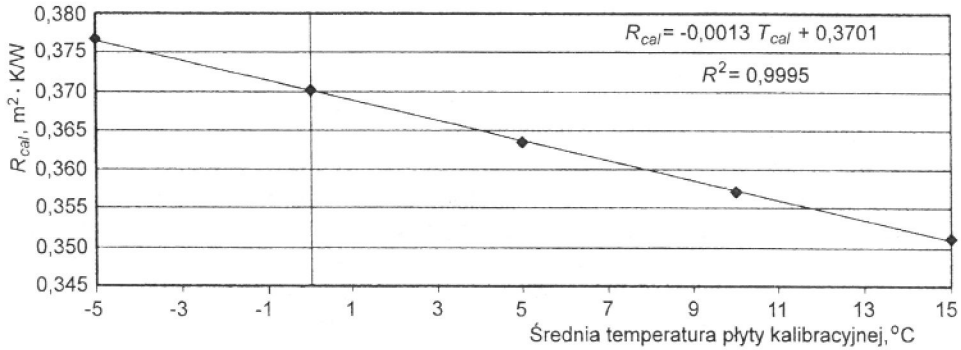
- wartości obliczone i wynikające z montażu (wymiary, liniowe współczynniki przenikania ciepła  $\psi_{edge}$ , kątowe współczynniki  $f$ , czynniki promieniowania  $\alpha$  i przewodność cieplną  $\lambda$ ) – tablica 1 i 2,
- temperaturę powietrza  $\theta_c$  oraz powierzchni  $\theta_s$  płyt kalibracyjnych, „maski” i ekranów zarówno po stronie ciepłej, jak i zimnej – tablica 2,
- energię cieplną  $\Phi_{in}$  wygenerowaną w skrzynce pomiarowej oraz prędkość powietrza  $v_e$  – tablica 2,
- opór przejmowania ciepła  $R_s$  i udział konwekcji  $F_c$  – tablica 3,
- opór cieplny „maski”  $R_{sur}$  – tablica 4.

Kalibrację stanowiska przeprowadzono przy stałej temperaturze powietrza po stronie ciepłej około 20 °C i przy średniej temperaturze powietrza po stronie zimnej i ciepłej wynoszącej około (5, 10, 15) °C.

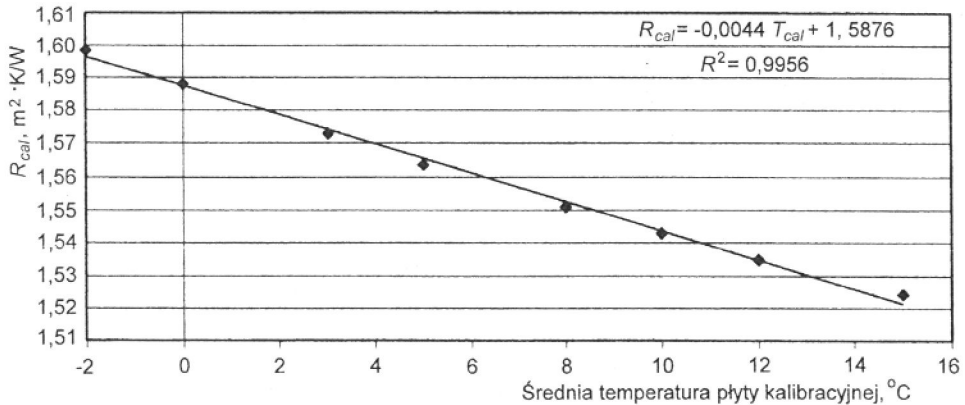
Pierwsze badanie z płytą kalibracyjną nr 6 grubości około 20 mm wykonano w średniej temperaturze 10 °C, przy różnicy temperatury powietrza między stroną ciepłą i zimną wynoszącą  $(20 \pm 2)$  K. Badanie to przeprowadzono przede wszystkim w celu takiego ustawienia prędkości obrotowej wentylatorów bębnowych, aby całkowity opór przejmowania ciepła wynosił  $(0,17 \pm 0,01)$  m<sup>2</sup>·K/W. Od tego momentu nastawienia prędkości wentylatorów pozostawiano stałe podczas realizacji dalszej kalibracji i pomiarów okien lub drzwi.

Drugie badanie kalibracyjne wykonano z grubszą płytą kalibracyjną nr 3 ( $d_{cal} \approx 60$  mm), co umożliwiło określenie między innymi oporu cieplnego ścianki „maski”.

Wyniki pomiarów kalibracyjnych stanowiska GHB, w formie przykładowego skróconego protokołu, przedstawiono w cytowanych wyżej tablicach 1–4. Ze względu na dużą ilość symboli oraz zależności, na podstawie których obliczano wartości wielkości występujących w tych tablicach, nie podano dokładnego ich znaczenia, gdyż są identyczne z przyjętymi w normie [4] oraz w punkcie 5.



Rys. 4. Zależność oporu cieplnego płyty kalibracyjnej,  $R_{cal}$ , nr 6 od temperatury – linia regresji  
Fig. 4. Dependence of thermal resistance of calibration panel,  $R_{cal}$ , No 6 on temperature – regression line



Rys. 5. Zależność oporu cieplnego płyty kalibracyjnej,  $R_{cal}$ , nr 3 od temperatury – linia regresji  
Fig. 5. Dependence of thermal resistance of calibration panel,  $R_{cal}$ , No 3 on temperature – regression line

Tablica 1. Liniowy współczynnik przenikania ciepła, kątowe współczynniki oraz czynniki promieniowania płyt kalibracyjnych

Table 1. Linear thermal transmittance, view factors and radiant factors of calibration panel

Wartości obliczone i wynikające z montażu		Numer tablicy lub wzoru	Płyta nr 6	Płyta nr 3
Całkowita grubość płyty kalibracyjnej	mm	–	18,78	57,60
Całkowita grubość „maski”	mm	–	200	200
Głębokość ościeża „maski” – strona ciepła	mm	–	40,15	39,97
Głębokość ościeża „maski” – strona zimna	mm	–	139,32	101,04
$\Psi_{edge}$ przy $\lambda = 0,0329$ W/(m·K)	W/(m·K)	tablica B.1	–	0,0097
– Strona ciepła kątowe współczynniki promieniowania $f$  czynniki promieniowania $\alpha$	$cb_i$	tablica A.2	0,947	0,948
	$pp_i$	tablica A.2	0,049	0,049
	$cp_i$	wzór (A.11)	0,0527	0,053
	$bp_i$	wzór (A.11)	0,053	0,053
	$pb_i$	wzór (A.12)	0,476	0,476
	$cb_i$	wzór (A.8)	0,740	0,740
	$cp_i$	wzór (A.9)	0,041	0,041
	– Strona zimna kątowe współczynniki promieniowania $f$  czynniki promieniowania $\alpha$	$cb_e$	tablica A.2	0,833
$pp_e$		tablica A.2	0,132	0,103
$cp_e$		wzór (A.11)	0,167	0,125
$bp_e$		wzór (A.11)	0,167	0,125
$pb_e$		wzór (A.12)	0,434	0,449
$cb_e$		wzór (A.8)	0,677	0,709
$cp_e$		wzór (A.9)	0,128	0,096
Uwaga: Kątowe współczynniki promieniowania obliczono przy: $\epsilon_{cal} = 0,834$ , $\epsilon_p = 0,87$ , $\epsilon_{be} = 0,96$ , $\epsilon_{bi} = 0,93$				

Tablica 2. Dane pomiarowe skrzynki grzejnej z płytami kalibracyjnymi  
 Table 2. Measurement data of hot box with calibration panel

Płyty kalibracyjne (wartości zmierzone)			Płyta nr 6			Płyta nr 3		
$d$	grubość całkowita	mm	18,78			57,60		
$A$	powierzchnia płyty	m <sup>2</sup>	2,10			2,10		
$A_{sur}$	powierzchnia „maski”	m <sup>2</sup>	3,17			3,17		
$A_{tot}$	powierzchnia pomiarowa skrzynki grzejnej	m <sup>2</sup>	5,27			5,27		
$L$	obwód płyty kalibracyjnej	m	5,8			5,8		
Numer badania			3	1*	2	6	5	4
Temperatury po stronie zimnej								
$\theta_{ce}$	(powietrza)	°C	-11,27	0,17	9,99	-10,39	0,15	9,27
$\theta_{se,b}$	(powierzchni ekranu)	°C	-11,09	-0,31	10,17	-10,30	0,27	9,37
$\theta_{se,cal}$	(powierzchni płyty kalibracyjnej)	°C	-8,45	1,37	11,00	-9,30	0,94	9,79
$\theta_{se,p}$	(powierzchni obrzeża „maski”)	°C	-10,41	0,22	10,51	-9,80	0,63	9,69
$\theta_{se,sur}$	(powierzchni „maski”)	°C	-11,09	-0,35	10,12	10,03	0,44	9,49
Temperatury po stronie ciepłej								
$\theta_{ci}$	(powietrza)	°C	19,82	20,16	20,75	20,71	20,94	21,12
		°C	18,10	18,95	20,01	19,99	20,42	20,80
$\theta_{si,cal}$	(powierzchni płyty kalibracyjnej)	°C	12,19	14,87	17,82	17,97	19,04	19,97
$\theta_{si,p}$	(powierzchni obrzeża „maski”)	°C	15,60	17,15	18,96	18,40	19,28	20,06
$\theta_{si,sur}$	(powierzchni „maski”)	°C	18,85	19,46	20,32	19,76	20,24	20,64
$\psi_{in}$	(moc dostarczona)	W	139,81	87,64	46,40	56,31	37,76	21,45
$v_e$	prędkość przepływu powietrza po stronie zimnej	m/s	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
* W przypadku tego badania ustalono nastawy wentylatorów po stronie zimnej								



Tablica 3. Obliczenie oporów przejmowania ciepła i udziału konwekcji  $F_c$   
 Table 3. Calculation of surface resistance and convective fraction  $F_c$

Dane	Nr wzoru wg [4]	Płyta kalibracyjna nr 6 (20 mm)			Płyta kalibracyjna nr 3 (60 mm)		
$\theta_{me,cal}$ °C	–	<b>1,87</b>	<b>8,12</b>	<b>14,41</b>	<b>4,34</b>	<b>9,99</b>	<b>14,88</b>
$\Delta\theta_{s,cal}$ K	–	1,87	13,50	6,82	27,27	18,10	10,18
$R_{cal}$ m <sup>2</sup> ·K/W	(3)	0,368	0,360	0,352	1,569	1,544	1,522
$q_{cal}$ W/m <sup>2</sup>	(2)	<b>56,10</b>	<b>37,53</b>	<b>19,40</b>	<b>17,39</b>	<b>11,73</b>	6,69
$H_{cb,i}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	(A.6)	5,44	5,54	5,65	5,65	5,70	5,74
$H_{cb,e}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	(A.6)	4,14	4,65	5,18	4,14	4,65	5,13
$H_{cp,i}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	(A.7)	5,36	5,48	5,62	5,61	5,66	5,72
$H_{cp,e}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	(A.7)	4,16	4,66	5,19	4,15	4,66	5,14
$h_{r,i}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	(A.5)	4,24	4,32	4,41	4,42	4,45	4,48
$h_{r,e}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	(A.5)	3,34	3,74	4,17	3,35	3,76	4,14
$\theta_{r,i}$ °C	(A.3)	18,10	18,95	20,01	19,99	20,42	20,80
$\theta_{r,e}$ °C	(A.2)	–10,98	–0,23	10,232	–10,24	0,31	9,41
$h_{c,i}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	(A.10)	4,07	3,76	3,33	3,09	2,92	2,61
$h_{c,e}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	(A.10)	16,88	16,69	16,06	13,09	11,86	9,70
$F_{c,i}$ –	(6)	<b>0,489</b>	<b>0,465</b>	<b>0,430</b>	<b>0,412</b>	<b>0,397</b>	<b>0,368</b>
$F_{c,e}$ –	(6)	<b>0,835</b>	<b>0,817</b>	<b>0,794</b>	<b>0,796</b>	<b>0,759</b>	<b>0,701</b>
$\theta_{ni,cal}$ °C	(7)	18,94	19,52	20,33	20,29	20,63	20,92
$\theta_{ne,cal}$ °C	(7)	–11,22	–0,47	10,04	–10,36	0,19	9,31
$\Delta\theta_{n,cal}$ K	–	–11,22	19,98	10,29	30,65	20,44	11,61
$R_{si}$ m <sup>2</sup> ·K/W	(4)	0,120	0,124	0,129	0,133	0,136	0,141
$R_{se}$ m <sup>2</sup> ·K/W	(5)	0,050	0,049	0,049	0,061	0,064	0,072
$R_{s,t}$ m <sup>2</sup> ·K/W	(1)	<b>0,170</b>	<b>0,173</b>	<b>0,179</b>	<b>0,194</b>	<b>0,200</b>	<b>0,213</b>

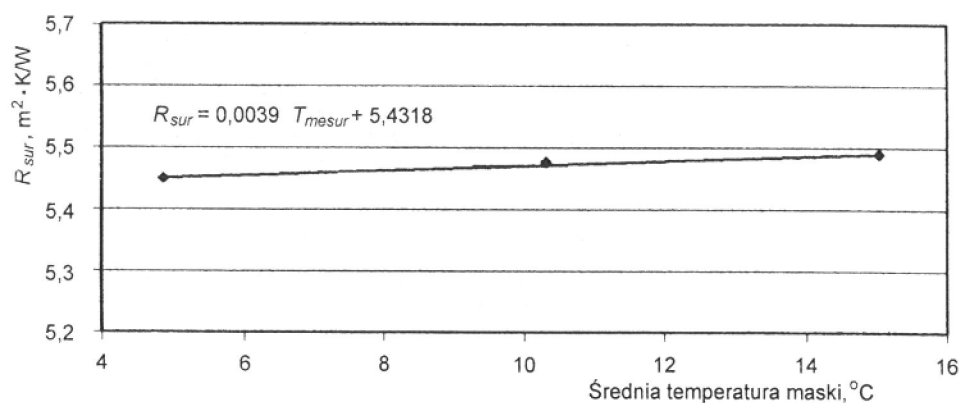
Tablica 4. Obliczenia oporu cieplnego  $R_{sur}$  „maski”.  
 Table 4. Calculation of „mask” thermal resistance  $R_{sur}$

Dane		Numer wzoru wg [4]	Płyta nr 3 (60 mm)		
$\Delta\theta_c$	K	–	31,10	20,80	11,85
$\Delta\theta_{s,sur}$	K	–	29,78	19,80	11,16
$\theta_{me,sur}$	°C	–	<b>4,87</b>	<b>10,34</b>	<b>15,06</b>
$\Phi_{in}$	W	–	56,314	37,756	21,450
$\Phi_{cal}$	W	wzór (9)	36,553	24,653	14,059
$\Phi_{edge}$	W	wzór (10)	1,75	1,17	0,68
$\Phi_{in} - \psi_{cal} - \Phi_{edge}$	W	–	18,01	11,93	6,71
$R_{sur}$	m <sup>2</sup> ·K/W	wzór (8)	<b>5,236</b>	<b>5,253</b>	<b>5,263</b>

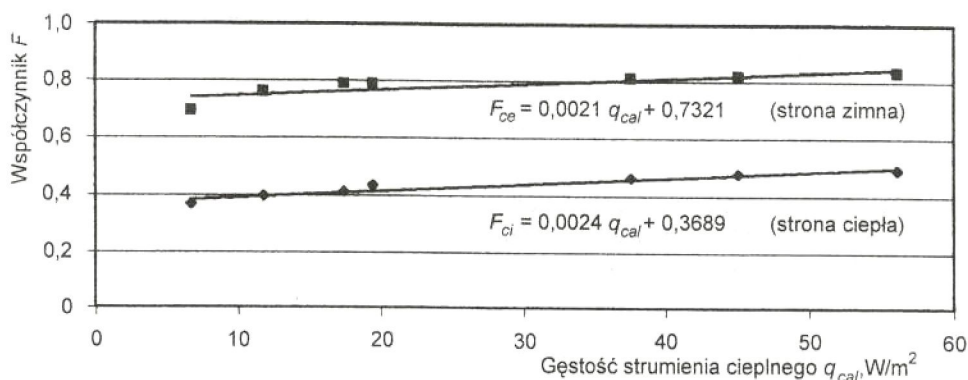
W celu ułatwienia zbierania i przetwarzania danych z pomiarów kalibracyjnych osłoniętej skrzynki grzejnej (GHB) opracowano program komputerowy.

Efekty końcowe kalibracji polegające na określeniu zależności:

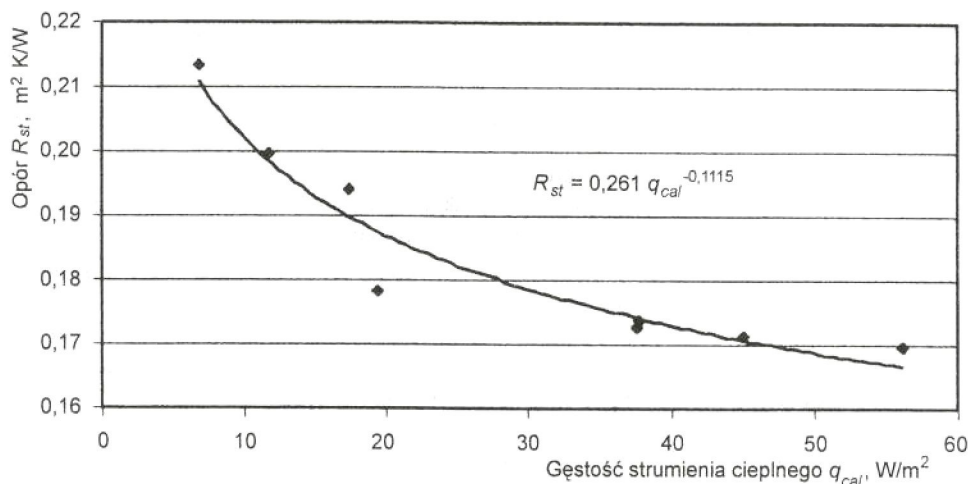
- oporu cieplnego „maski”  $R_{sur}$  w funkcji temperatury  $T_{mesur}$ ,
  - udziału konwekcji  $F_c$  w przyjmowaniu ciepła w funkcji gęstości strumienia cieplnego,  $q_{cal}$
  - całkowitego oporu przyjmowaniu ciepła  $R_{s,t}$  w funkcji gęstości strumienia cieplnego,  $q_{cal}$
- zilustrowano na rysunkach 6, 7 i 8.



Rys. 6. Zależność oporu cieplnego „maski”,  $R_{sur}$ , od temperatury,  $T_{me,sur}$   
 Fig. 6. Dependence of thermal resistance of „mask”,  $R_{sur}$ , on temperature,  $T_{me,sur}$



Rys. 7. Udział konwekcji w przyjmowaniu ciepła w zależności od gęstości strumienia,  $q_{cal}$   
 Fig. 7. Fraction of convection in surface thermal coefficient in dependence on density of heat flow rate,  $q_{cal}$



Rys. 8. Zależność całkowitego oporu przyjmowaniu ciepła,  $R_{st}$ , od gęstości strumienia,  $q_{cal}$   
 Fig. 8. Dependence of total surface resistance,  $R_{st}$ , on density of heat flow rate,  $q_{cal}$

## 5. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła

Współczynnik przenikania ciepła  $U_m$  oblicza się z zależności:

$$U_m = \frac{q_{sp}}{\Delta\theta_n} \quad (1)$$

w której:  $\Delta\theta_n$  – różnica temperatury środowiska po stronie ciepłej i zimnej wyznaczona na podstawie pomiarów przy określonych w procesie kalibracji współczynnikach udziału konwekcji po stronie ciepłej i zimnej dla danej wartości gęstości strumienia ciepłego  $q_{sp}$

$q_{sp}$  – gęstość strumienia ciepłego przepływającego przez badaną próbkę, wyznaczona z zależności:

$$q_{sp} = \frac{\Phi_{in} - \Phi_{sur} - \Phi_{edge}}{A_{sp}} \quad (2)$$

w której:  $A_{sp}$  – pole powierzchni próbki,  
 $\Phi_{in}$  – strumień ciepły wydzielony w skrzynce pomiarowej,  
 $\Phi_{sur}$  – strumień ciepły przenikający przez „maskę”, wyznaczony z zależności:

$$\Phi_{sur} = \frac{A_{sur} \Delta\theta_{s,sur}}{R_{sur}} \quad (3)$$

w której:  $A_{sur}$  – pole powierzchni „maski”,  
 $\Delta\theta_{s,sur}$  – różnica temperatury obydwu powierzchni „maski”,  
 $R_{sur}$  – opór cieplny „maski” przy średniej temperaturze, wyznaczony podczas kalibracji,  
 $\Phi_{edge}$  – strumień ciepły przenikający przez obszar brzegowy badanej próbki, wyznaczony z zależności:

$$\Phi_{edge} = L_{edge} \Psi_{edge} \Delta\theta_c \quad (4)$$

w której:  $L_{edge}$  – obwód badanej próbki,  
 $\Psi_{edge}$  – liniowy współczynnik przenikania ciepła, przyjęty z tablic normy [4],  
 $\Delta\theta_c$  – różnica temperatury powietrza po stronie cieplej i zimnej.

Współczynnik przenikania ciepła  $U_m$  według wzoru (1) w trakcie trwania pomiarów oblicza specjalny program komputerowy.

Zakończenie badania następuje automatycznie po równoczesnym spełnieniu warunków w odniesieniu do średnich wartości z kolejnych 3-godzinnych przedziałów pomiarowych, określonych na przykład następującymi zależnościami:

$$\frac{|U_m - U_{m1}|}{\frac{1}{2}(U_m + U_{m1})} < 0,0015; \quad \frac{|q_{sp} - q_{sp1}|}{\frac{1}{2}(q_{sp} + q_{sp1})} < 0,0015; \quad [\Delta\theta_n - \Delta\theta_{n1}] < 0,025 \quad (5)$$

## 6. Niepewność pomiaru

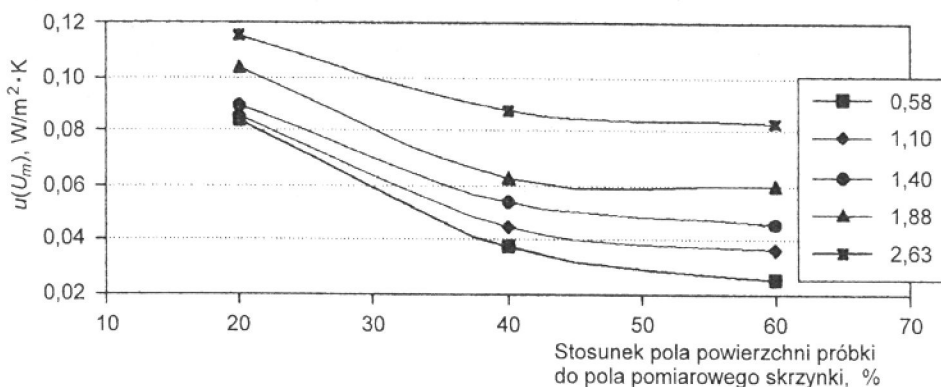
Niepewność pomiaru współczynnika przenikania ciepła w przypadku każdego badania oblicza program według wzorów (6) i (7), powstałych przez dodanie do wzoru (1) wartości związanej z niepewnością stabilizacji warunków badania określonych podczas testowania stanowiska oraz przez uwzględnienie niepewności składowych.

$$u(u_m) = \sqrt{\frac{1}{(\Delta\theta_n)^2} \left[ u^2(q_{sp}) + (U_m)^2 u^2(\Delta\theta_n) + u(d U_m) \right]} \quad (6)$$

$$u(q_{sp}) = \sqrt{\left[ \left( \frac{\Phi_{in}}{A_{sp}^2} \right)^2 u^2(A_{sp}) + \frac{1}{A_{sp}^2} \left[ u^2(\Phi_{in}) + \left( \frac{\Delta\theta_{sur}}{R_{sur}} \right) u^2(A_{sur}) + \left( \frac{A_{sur}}{R_{sur}} \right)^2 u^2(\Delta\theta_{sur}) + \left( \frac{\Delta\theta_{sur} A_{sur}}{(R_{sur})^2} \right)^2 u^2(R_{sur}) \right] + \right.} \quad (7)$$

$$\left. + \frac{1}{A_{sp}^2} \left[ (\Psi_{edge} \Delta\theta_c)^2 (L_{edge}) + (L_{edge} \Delta\theta_c)^2 u^2(\Psi_{edge}) + (\Psi_{edge} L_{edge})^2 u^2(\Delta\theta_c) \right] \right]}$$

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe wyniki komputerowych obliczeń niepewności rozszerzonej bezwzględnej, obliczonej według wzorów (6) i (7) dla poziomu ufności 90%, przy 5 wartościach współczynnika przenikania ciepła, w funkcji stosunku pola powierzchni próbki do pola powierzchni pomiarowej skrzynki grzejnej.



Rys. 9. Niepewność pomiaru  $u(U_m)$  współczynnika przenikania ciepła  
Fig. 9. Measurement uncertainty  $u(U_m)$  of thermal transmittance

Z rysunku 9 wynika, iż niepewność bezwzględna pomiaru wzrasta wraz ze wzrostem wartości współczynnika przenikania ciepła  $U$  okien i drzwi i ze zmniejszaniem się ich powierzchni w stosunku do pola pomiarowego skrzynki.

W przypadku próbek o współczynniku  $U = 0,58 \div 2,63 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , przy stosunku pola powierzchni okna do pola pomiarowego skrzynki większym od 0,4, niepewność pomiaru zawiera się w granicach od około 0,04 do 0,09  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  i nie przekracza 0,06 przy  $U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

## Bibliografia

- [1] PN-EN ISO 8990:98 Izolacja cieplna. Oznaczanie właściwości związanych z przenikaniem ciepła w stanie ustalonym. Kalibrowana i osłonięta skrzynka grzejna
- [2] PN-EN 1946-4:2002 Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła. Część 4: Pomiary metodami skrzynki grzejnej

- [3] Jonson B.: Intercalibration of Thermal Transmittance Measurements of Windows by Hot Box Method – SP Swedish National Testing and Research Institute Building Physics SP REPORT 1998:21
- [4] PN-EN ISO 12567-1:2002 Właściwości cieplne okien i drzwi. Określanie współczynnika przenikania ciepła metodą skrzynki grzejnej. Część 1: Kompletne okna i drzwi
- [5] ISO/CD 12567-2:2002 Thermal performance of roof windows and other projecting windows – Determination of thermal transmittance by hot box method

## GUARDED HOT BOX FOR TESTING THERMAL TRANSMITTANCE OF WINDOWS AND DOORS

### Summary

The paper deals with guarded hot box (GHB) used now in Laboratory of Thermal Insulation of Department of Thermal Physics ITB. GHB is used for determination of thermal transmittance of complete windows and doors, roof windows and other projecting windows beyond the outside wall surface, fragments of facades, frame of windows or doors, transoms, mullions etc. In reference to modernised equipment GHB, the ways of calibration and determination of thermal transmittance as well as the uncertainties of measurement are presented.

*Praca wpłynęła do Redakcji 24 VI 2003*