

BADANIA I STUDIA – RESEARCH AND STUDIES

Zbigniew Owczarek*

WPŁYW NACHYLENIA OKIEN I SZYB ZESPOLONYCH NA WSPÓŁCZYNNIK PRZENIKANIA CIEPŁA

Odchylenie okien i szyb zespolonych od pozycji pionowej pogarsza ich izolacyjność cieplną (współczynnik przenikania ciepła U_g i U_w). Ponieważ laboratoria zwykle są wyposażone w aparaturę umożliwiającą badanie szyb i okien usytuowanych w pozycji pionowej, dlatego w niniejszym artykule zaproponowano prosty sposób obliczania projektowej wartości współczynnika przenikania ciepła przez okna nachylone do poziomu pod kątem innym niż 90° . Sposób ten opracowano na podstawie wyników badań i obliczeń współczynnika przenikania ciepła przez szyby jedno- i dwukomorowe.

1. Wprowadzenie

Według PN-EN 14351-1:2006 [1] współczynnik przenikania ciepła U_w przez okna, w tym przez okna dachowe, należy wyznaczać:

- metodą obliczeniową zgodnie z PN-EN ISO 10077-1:2007 [2] i PN-EN ISO 10077-2:2005 [3], przyjmując wartości współczynnika przenikania ciepła U_g przez szyby według PN-EN 1279-5:2006 [4], tj. wartości deklarowanych przez producenta na podstawie wykonanych dokładnych obliczeń według PN-EN 673:1999 [5] lub sposobem uproszczonym ze wzoru (6) i Załącznika C do PN-EN ISO 10077-1:2007 dotyczącego szyb usytuowanych w pozycji pionowej, albo na podstawie badań podanych w PN-674:1999 [6] lub PN-675:1999 [7],
- metodą badawczą przy zastosowaniu skrzynki grzejnej według PN-EN ISO 12567-1:2004 [8] i PN-EN ISO 12567-2:2006 [9].

Metody obliczeniowe umożliwiają określenie wartości deklarowanych i projektowych współczynnika U_w przy znanych wartościach współczynnika U_g z uwzględnieniem (jeśli potrzeba) nachylenia oszklenia.

W normie PN-EN ISO 12567-2:2006 dotyczącej badań okien dachowych i innych okien wystających z płaszczyzny podkreśla się, że właściwości cieplne wyrobów zmieniają się z kierunkiem przepływu ciepła, dlatego jest ważne, aby badać te wyroby w położeniu, w którym będą wbudowane. Jednak norma ta, ze względu na istnienie tylko kilku skrzy-

* dr inż. – adiunkt w Zakładzie Fizyki Ciepłej, Instalacji Sanitarnych i Środowiska ITB

nek grzejnych (*hot box*) umożliwiającymi takie pomiary, w celu ułatwienia rzetelnego porównania wyrobów dopuszcza pomiary współczynnika przenikania ciepła przez okna dachowe zamontowane pionowo. Zwraca się przy tym uwagę, iż wartości wyników pomiarów współczynnika U_w będą zwykle najniższe dla próbki usytuowanej pionowo, dlatego do obliczenia zapotrzebowania budynku na energię wartość współczynnika U_w należy skorygować z zastosowaniem odpowiedniej procedury krajowej uwzględniającej nachylenie oszklenia.

Ponieważ większość laboratoriów, w tym Laboratorium Izolacji Termicznych ZLB ITB, wykonuje pomiary współczynnika przenikania ciepła U_w między innymi przez okna dachowe usytuowane w pozycji pionowej, to celowe jest opracowanie takiej procedury do przeprowadzenia korekty U_w , która uwzględniałaby różne nachylenie okna.

W związku z powyższym, w 2008 r. w Zakładzie Fizyki Ciepłej i Instalacji Sanitarnych ITB w ramach realizacji jednego z punktów tematu [10] wykonano następujące prace:

- opracowano program komputerowy obliczania współczynnika U_g szyb zespolonych jedno- i dwukomorowych według standardowych założeń podanych w PN-EN 673, rozszerzonych o dowolne warunki brzegowe wymiany ciepła z uwzględnieniem różnego nachylenia tych szyb,

- przeprowadzono badania współczynnika przenikania ciepła U_g przez najczęściej stosowane w Polsce szyby zespolone (jedno- i dwukomorowe wypełnione powietrzem, argonem lub kryptonem i nachylone do płaszczyzny poziomej pod kątem 0° , 20° , 45° , 70° i 90°) z zastosowaniem jednopróbkowego obrotowego aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejną według PN-EN 674, znajdującego się w wyposażeniu Laboratorium Izolacji Termicznych,

- testowano ww. program komputerowy przez porównanie wyników obliczeń współczynnika U_g z wartościami podanymi w tablicy C.2 PN-EN 10077-1 dla szyb jedno- i dwukomorowych (około 200 rodzajów szyb zespolonych usytuowanych pionowo) oraz z wynikami badań współczynnika przenikania ciepła U_g przez szyby zespolone o różnym nachyleniu przy użyciu obrotowego aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejną według PN-EN 674,

- przeprowadzono komputerowe obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_g najczęściej stosowanych szyb zespolonych jedno- i dwukomorowych o różnym nachyleniu i na tej podstawie podano uproszczony sposób obliczania,

- opracowano sposób obliczenia wartości współczynnika przenikania ciepła U_w okien nachylonych po zbadaniu ich w pozycji pionowej i określeniu wartości U_g szyb zespolonych (przy tym nachyleniu) ustalonej na podstawie badania lub obliczenia metodą uproszczoną.

Realizację wymienionych działań przedstawiono w następnych rozdziałach artykułu.

2. Założenia i testowanie programu obliczeniowego

Współczynnik przenikania ciepła centralnego pola powierzchni oszklenia U_g według PN-EN 673 oblicza się ze wzoru:

$$U_g = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_e}} \quad (1)$$

- gdzie: h_i i h_e – współczynniki przejmowania ciepła z powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej oszklenia, $W/(m^2 \cdot K)$,
 h_t – współczynnik przenikania ciepła przez oszklenie, $W/(m^2 \cdot K)$, obliczony ze wzoru (2), tj. od powierzchni wewnętrznej do zewnętrznej;

$$\frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j r_j \quad (2)$$

- gdzie: h_s – współczynnik przenikania ciepła przez międzyszybową przestrzeń gazową, $W/(m^2 \cdot K)$, obliczony ze wzoru (3),
 d_j – grubość każdej warstwy materiału, m,
 d_j / r_j – opór cieplny każdej warstwy materiału, $(m^2 \cdot K)/W$,
 N – liczba przestrzeni gazowych,
 M – liczba warstw materiałów;

$$h_s = h_r + h_g \quad (3)$$

- gdzie: h_r – współczynnik przenikania ciepła przez promieniowanie w międzyszybowej przestrzeni gazowej, $W/(m^2 \cdot K)$, obliczony ze wzoru (4),
 h_g – współczynnik przenikania ciepła przez przewodzenie gazu w przestrzeni międzyszybowej, $W/(m^2 \cdot K)$, obliczony ze wzoru (5);

$$h_r = \frac{4 \sigma T_m^3}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4)$$

- gdzie: σ – stała Stefana-Boltzmana,
 T_m – średnia temperatura absolutna przestrzeni gazowej, K,
 ϵ – skorygowane współczynniki emisyjności powierzchni szyb dla T_m ;

$$h_g = Nu \frac{\lambda}{s} \quad (5)$$

- gdzie: s – grubość przestrzeni gazowej, m,
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła, $W/(m \cdot K)$,
 Nu – liczba Nusselta obliczona ze wzoru (6);

$$Nu = A (Gr Pr)^n \quad (6)$$

- gdzie:
 $A = 0,035$ dla oszkleń pionowych, $A = 0,16$ dla oszkleń poziomych, $A = 0,10$ dla oszkleń nachylonych pod kątem 45° ,
 $n = 0,38$ dla oszkleń pionowych, $n = 0,28$ dla oszkleń poziomych i $n = 0,31$ dla oszkleń nachylonych pod kątem 45° ,
 Gr – liczba Grashofa obliczona ze wzoru (7),
 Pr – liczba Prandtla obliczona ze wzoru (8);

$$Gr = \frac{9,81 \text{ s}^3 \Delta T \rho^2}{T_m \mu^2} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda} \quad (8)$$

gdzie: ΔT – różnica temperatury między powierzchniami szklanymi wyznaczającymi warstwę przestrzeni gazowej, K,
 ρ – gęstość gazu, kg/m^3 ,
 μ – lepkość dynamiczna gazu, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,
 c – ciepło właściwe gazu, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,
 T_m – średnia temperatura gazu, K.

Temperaturę powierzchni warstw oszklenia, niezbędną między innymi do wyznaczenia temperatury gazów wypełniających przestrzenie międzyszybowe i określenia na tej podstawie właściwości tych gazów, oblicza się ze wzoru (9):

$$T_n = T_i - \frac{U_g}{U_n} (T_i - T_e) \quad (9)$$

gdzie: T_n – temperatura n -tej powierzchni tafli szklanych, licząc od strony zimnej, K,
 T_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, K,
 T_e – temperatura powietrza zewnętrznego, K,
 U_g – współczynnik przenikania ciepła przez oszklenie obliczony ze wzoru (1), $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.
 U_n – współczynnik przenikania ciepła przez część oszklenia – obliczony ze wzoru (1) – liczonego od strony zewnętrznej do n -tej powierzchni tafli szklanej, w odniesieniu do której określa się temperaturę, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

Opracowany program komputerowy według algorytmu podanego w PN-EN 673 umożliwia obliczenie współczynnika przenikania ciepła U_g przez szyby zespolone jedno- i dwukomorowe w sposób iteracyjny. Liczba iteracji jest zależna od trafności przyjęcia danych wejściowych dotyczących temperatury powierzchni szkła. Zwykle uzyskuje się zbieżność wyniku przy czwartej cyfrze znaczącej po czterech iteracjach. Program umożliwia wykonanie ośmiu iteracji, uwzględnia różną koncentrację 4 rodzajów gazów w powietrzu, dowolne nachylenie szyb oraz warunki brzegowe stacjonarnej wymiany ciepła określone temperaturą powietrza wewnętrznego i zewnętrznego oraz współczynnikami przejmowania ciepła z powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej oszklenia bez uwzględnienia promieniowania słonecznego.

Testowanie opracowanego programu komputerowego polegało na wykonaniu obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_g przez różne szyby zespolone i porównanie uzyskanych rezultatów z wartościami:

- podanymi w tabelicy C.2 PN-EN 10077-1 (patrz tablica 1 i 2) dotyczącymi szyb zespolonych usytuowanych w pozycji pionowej,
- zmierzonymi według PN-EN 674, dotyczącymi szyb zespolonych nachylnych jedno- i dwukomorowych, pokazanych na rysunku 1.

Badaniom zostało poddanych 6 rodzajów typowych szyb zespolonych nachylonych do płaszczyzny poziomej pod kątami wynoszącymi 90°, 70°, 45°, 20° i 0°:

- szyba nr 1 o strukturze 4/16/4, z przestrzenią międzyszybową wypełnioną argonem i z jedną powłoką niskoemisyjną o $\epsilon = 0,037$ usytuowaną na pozycji 3,
- szyba nr 2 jak szyba nr 1, z przestrzenią międzyszybową wypełnioną powietrzem,
- szyba nr 3 o strukturze 4/20/4, z przestrzenią międzyszybową wypełnioną argonem i z jedną powłoką niskoemisyjną o $\epsilon = 0,039$ usytuowaną na pozycji 3,
- szyba nr 4 jak szyba nr 3, z przestrzenią międzyszybową wypełnioną powietrzem,
- szyba nr 5 o strukturze 4/12/4/12/4, z przestrzeniami międzyszybowymi wypełnionymi kryptonem i z dwiema powłokami niskoemisyjnymi o $\epsilon = 0,0124$ usytuowanymi na pozycjach 2 i 5,
- szyba nr 6 jak szyba nr 5, ale z przestrzeniami międzyszybowymi wypełnionymi powietrzem.

Tablica 1. Porównanie wyników obliczeń współczynnika U_g szyb zespolonych jednokomorowych z wartościami podanymi w PN-EN 10077-1

Table 1. Comparison of calculations of thermal transmittance U_g of double glazing with the values given in PN-EN 10077-1

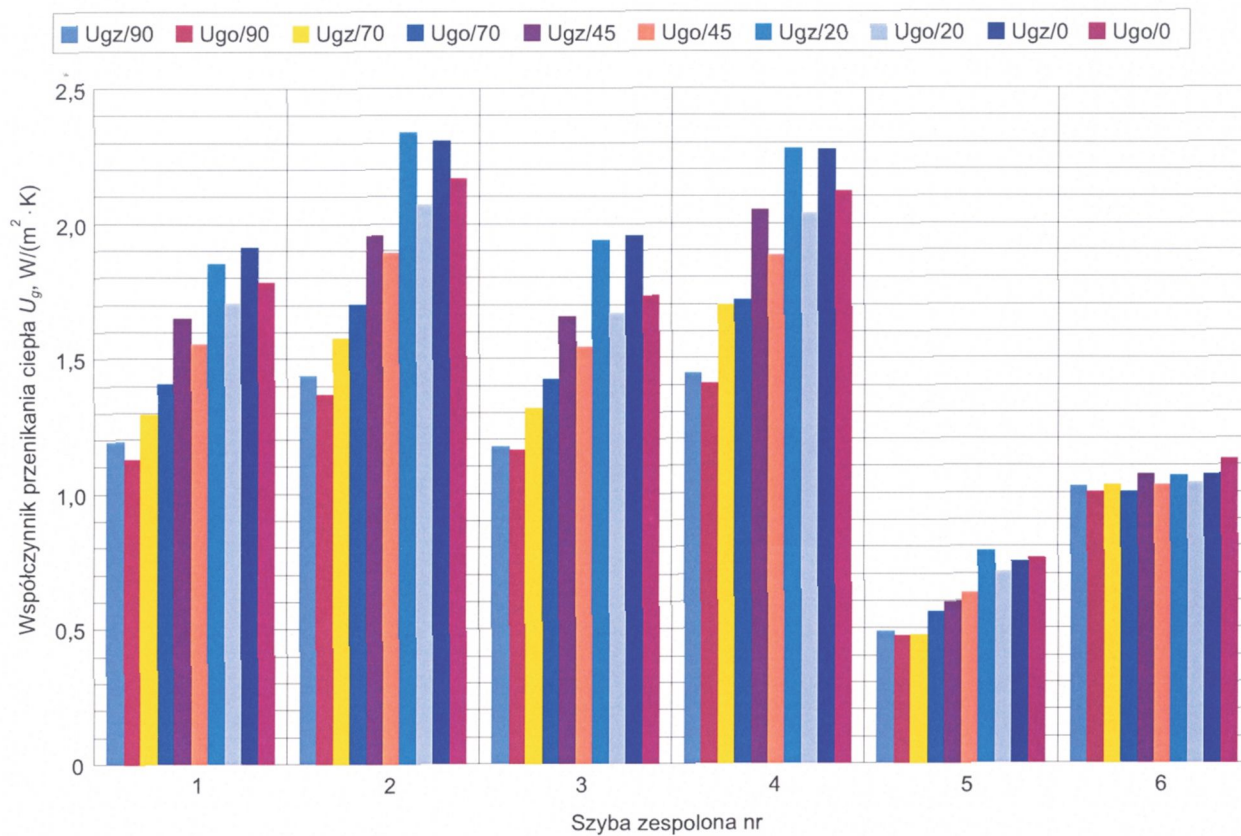
Oszklenie				Współczynnik U_g (wg PN-EN 10077-1/obliczony) dla różnych rodzajów gazów				
Typ	szkło	emisyjność normalna	wymiary mm	powietrze	argon	krypton	SF ₆	ksenon
Oszklenie podwójne	szkło niepowlekane (zwykłe szkło)	0,89	4-6-4	3,3 3,3	3,0 3,0	2,8 2,8	3,0 2,9	2,6 2,6
			4-8-4	3,1 3,1	2,9 2,9	2,7 2,6	3,1 3,0	2,6 2,6
			4-12-4	2,8 2,8	2,7 2,7	2,6 2,6	3,1 3,0	2,6 2,6
			4-16-4	2,7 2,7	2,6 2,6	2,6 2,6	3,1 3,0	2,6 2,6
			4-20-4	2,7 2,7	2,6 2,6	2,6 2,6	3,1 3,0	2,6 2,6
	jedna szyba powlekana	≤ 0,2	4-6-4	2,7 2,7	2,3 2,3	1,9 1,9	2,3 2,3	1,6 1,6
			4-8-4	2,4 2,4	2,1 2,1	1,7 1,7	2,4 2,3	1,6 1,6
			4-12-4	2,0 2,0	1,8 1,8	1,6 1,6	2,4 2,3	1,6 1,6
			4-16-4	1,8 1,8	1,6 1,6	1,6 1,6	2,5 2,4	1,6 1,6
			4-20-4	1,8 1,8	1,7 1,6	1,6 1,6	2,5 2,4	1,7 1,6

Oszklenie				Współczynnik U_g (wg PN-EN 10077-1/obliczony) dla różnych rodzajów gazów				
Typ	szkło	emisyjność normalna	wymiary mm	powietrze	argon	krypton	SF ₆	kсенon
Oszkle- nie podwój- ne	jedna szyba powlekana	$\leq 0,15$	4-6-4	2,6 2,6	2,3 2,3	1,8 1,8	2,2 2,2	1,5 1,5
			4-8-4	2,3 2,3	2,0 2,0	1,6 1,6	2,3 2,2	1,4 1,4
			4-12-4	1,9 1,9	1,6 1,6	1,5 1,5	2,3 2,3	1,5 1,5
			4-16-4	1,7 1,7	1,5 1,5	1,5 1,5	2,4 2,3	1,5 1,5
			4-20-4	1,7 1,7	1,5 1,5	1,5 1,5	2,4 2,3	1,5 1,5
	jedna szyba powlekana	$\leq 0,1$	4-6-4	2,6 2,6	2,2 2,2	1,7 1,7	2,1 2,1	1,4 1,4
			4-8-4	2,2 2,2	1,9 1,9	1,4 1,4	2,2 2,1	1,3 1,3
			4-12-4	1,8 1,8	1,5 1,5	1,3 1,3	2,3 2,2	1,3 1,3
			4-16-4	1,6 1,6	1,4 1,4	1,3 1,3	2,3 2,2	1,4 1,4
			4-20-4	1,6 1,6	1,4 1,4	1,4 1,4	2,3 2,3	1,4 1,4
	jedna szyba niepowle- kana	$\leq 0,05$	4-6-4	2,5 2,5	2,1 2,1	1,5 1,5	2,0 2,0	1,2 1,2
			4-8-4	2,1 2,1	1,7 1,7	1,3 1,3	2,1 2,0	1,1 1,1
			4-12-4	1,7 1,7	1,3 1,4	1,1 1,2	2,1 2,1	1,2 1,2
			4-16-4	1,4 1,4	1,2 1,2	1,2 1,2	2,2 2,1	1,2 1,2
			4-20-4	1,5 1,5	1,2 1,2	1,2 1,2	2,2 2,2	1,2 1,2

Tablica 2. Porównanie wyników obliczeń współczynnika U_g szyb zespolonych dwukomorowych z wartościami podanymi w PN-EN 10077-1

Table 1. Comparison of calculations of thermal transmittance U_g of triple glazing with the values given in PN-EN 10077-1

Oszklenie				Współczynnik U_g (wg PN-EN 10077-1/obliczony) dla różnych rodzajów gazów				
Typ	szkło	emisyjność normalna	wymiary mm	powietrze	argon	krypton	SF ₆	kсенon
Oszklenie podwójne	szkło niepowlekane (zwykłe szkło)	0,89	4-6-4-6-4	2,3 2,3	2,1 2,1	1,8 1,8	1,9 1,9	1,7 1,7
			4-8-4-8-4	2,1 2,1	1,9 1,9	1,7 1,7	1,9 1,9	1,6 1,6
			4-12-4-12-4	1,9 1,9	1,8 1,8	1,6 1,6	2,0 2,0	1,6 1,6
	dwie szyby powlekane	≤ 0,2	4-6-4-6-4	1,8 1,8	1,5 1,5	1,1 1,1	1,3 1,3	0,9 1,0
			4-8-4-8-4	1,5 1,5	1,3 1,3	1,0 1,0	1,3 1,3	0,8 0,8
			4-12-4-12-4	1,2 1,2	1,0 1,0	0,8 0,8	1,3 1,3	0,8 0,9
	dwie szyby powlekane	≤ 0,15	4-6-4-6-4	1,7 1,7	1,4 1,4	1,1 1,1	1,2 1,2	0,9 0,9
			4-8-4-8-4	1,5 1,5	1,2 1,2	0,9 0,9	1,2 1,2	0,8 0,8
			4-12-4-12-4	1,2 1,2	1,0 1,0	0,7 0,8	1,3 1,3	0,7 0,8
	dwie szyby powlekane	≤ 0,1	4-6-4-6-4	1,7 1,7	1,3 1,3	1,0 1,0	1,1 1,1	0,8 0,8
			4-8-4-8-4	1,4 1,4	1,1 1,1	0,8 0,8	1,1 1,2	0,7 0,7
			4-12-4-12-4	1,1 1,1	0,9 0,9	0,6 0,7	1,2 1,2	0,6 0,7
	dwie szyby powlekane	≤ 0,05	4-6-4-6-4	1,6 1,6	1,2 1,3	0,9 0,9	1,1 1,0	0,7 0,7
			4-8-4-8-4	1,3 1,3	1,0 1,0	0,7 0,7	1,1 1,1	0,5 0,5
			4-12-4-12-4	1,0 1,0	0,8 0,8	0,5 0,6	1,1 1,1	0,5 0,6



Rys. 1. Wyniki pomiarów i obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_g szyb o różnym nachyleniu
 Fig. 1. Results of measurements and calculations of thermal transmittance (U_g value) of glazing at different inclination

Ugz/90 – zmierzony wg PN-EN 674 współczynnik U_g szyby nachylonej do poziomu pod kątem 90°
 Ugo/90 – obliczony wg PN-EN 673 współczynnik U_g szyby nachylonej do poziomu pod kątem 90°

Z tablic 1 i 2 wynika dostateczna zgodność wyników komputerowych obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_g z wartościami podanymi w PN EN 10077-1, gdyż różnice wartości U_g (liczby pogrubione w tablicach) nie przekraczają 0,1 W/(m²·K) i dotyczą głównie szyb zespolonych jednokomorowych z przestrzenią międzyszybową wypełnioną sześćfluorkiem siarki, tj. gazem rzadko stosowanym.

Stwierdzono poza tym, iż wartości normowe U_g są nieco wyższe w odniesieniu do szyb zespolonych jednokomorowych i niższe w odniesieniu do szyb dwukomorowych usytuowanych w pozycji pionowej.

Z rysunku 1 wynika, że różnice obliczonych i zmierzonych wartości U_g szyb zespolonych przy tym samym nachyleniu nie przekraczają zwykle 10%, z wyjątkiem kilku przypadków występujących głównie przy nachyleniu 20° i 70°, w przypadku których różnica ta jest większa, ale nie przekracza 18%.

Badania i obliczenia wykazały istotny wzrost wartości współczynnika przenikania ciepła U_g przez szyby zespolone wraz ze zmniejszaniem się ich kąta nachylenia do płaszczyzny poziomej. Różnica między wartością U_g wyznaczoną dla szyb zespolonych jednokomorowych usytuowanych w pozycji poziomej i pionowej dochodzi do 0,87 W/(m²·K), a w przypadku szyb zespolonych dwukomorowych do 0,26 W/(m²·K).

W celu określenia wpływu nachylenia szyb zespolonych na wartość współczynnika U_g wykonano wariantowe obliczenia różnych szyb, które przedstawiono w następnym rozdziale.

3. Wariantowe obliczenia współczynnika U_g szyb zespolonych

Obliczenia współczynnika U_g wykonano w odniesieniu do najczęściej stosowanych w Polsce szyb zespolonych jedno- i dwukomorowych, charakteryzujących się:

- wartościami współczynnika przenikania ciepła U_g zawierającymi się w granicach od 0,45 do 3,50 W/(m²·K),
- różnym nachyleniem do płaszczyzny poziomej, wynoszącym 0°, 20°, 45°, 70° i 90°,
- różnym układem warstw i grubością przestrzeni międzyszybowych,
- przestrzeniami międzyszybowymi wypełnionymi powietrzem, argonem, kryptonem, ksenonem lub SF₆,
- jedną lub dwiema taflami szkła pokrytymi powłokami niskoemisyjnymi.

Do obliczeń przyjęto dane określone w PN-EN 673 i PN-EN 10077-1 oraz w tablicy 3.

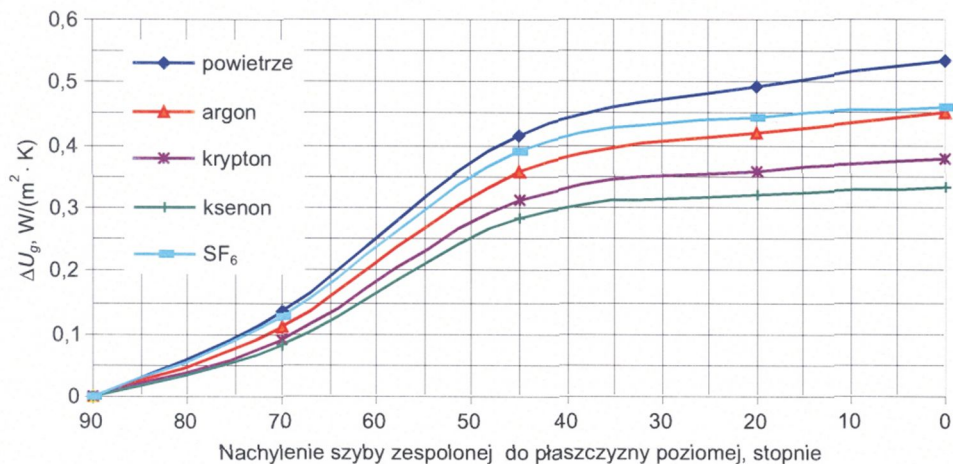
Obliczono wartości współczynnika U_g każdego rodzaju szyby zespolonej, a następnie różnice ΔU_g szyb zespolonych nachylonych i usytuowanych w pozycji pionowej.

Wyniki obliczeń ΔU_g przedstawiono na kolejnych rysunkach:

- na rysunku 2–7 w odniesieniu do szyb zespolonych jednokomorowych 4/20/4 i 4/16/4,
- na rysunku 8–10 w odniesieniu do szyb zespolonych dwukomorowych 4/12/4/12/4 i 4/20/4/20/4.

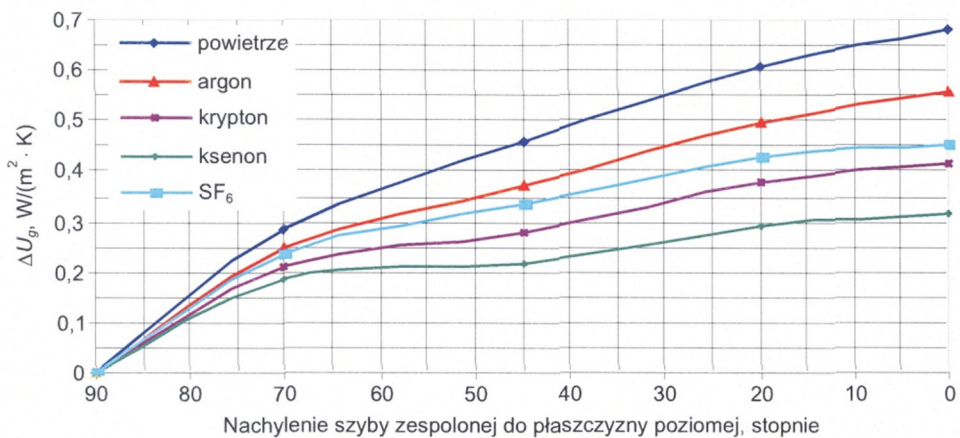
Tablica 3. Dane przyjęte do obliczeń
 Table 3. Data accepted for calculations

Symbol	Nazwa	Wartość
r	oporność cieplna szkła sodowo-wapniowego	1,0 (m·K)/W
ε	skorygowany współczynnik emisyjności dla: • niepowlekaney powierzchni szkła sodowo-wapniowego i boro-krzemianowego • powierzchni nr 3 szyby zespolonej 4/16/4 i 4/20/4 • powierzchni nr 2 i 5 szyb zespolonych 4/12/4/4 i 4/20/4/20/4	0,837 0,040 0,0124
T_i	temperatura powietrza wewnętrznego	20°C
T_e	temperatura powietrza zewnętrznego	0°C
ΔT	różnica między granicznymi powierzchniami szkła	wynikająca z warunków brzegowych wymiany ciepła, K
T_m	średnia temperatura przestrzeni gazowej	wynikająca z warunków brzegowych wymiany ciepła, K
σ	stała Stefana-Boltzmannna	$5,6 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
h_e	współczynnik przejmowania ciepła przez zewnętrzną niepowlekaną powierzchnię	23 W/(m ² ·K)
h_i	współczynnik przejmowania ciepła przez wewnętrzną niepowlekaną powierzchnię szkła sodowo-wapniowego przy kącie nachylenia α szyby do płaszczyzny poziomej wynoszącym: $90^\circ \geq \alpha > 60^\circ$ $60^\circ \geq \alpha \geq 0^\circ$	8 W/(m ² ·K) 10 W/(m ² ·K)
A	stała przy nachyleniu szyby wynoszącym: $\alpha = 0^\circ$ $\alpha = 20^\circ$ $\alpha = 45^\circ$ $\alpha = 70^\circ$ $\alpha = 90^\circ$	0,160 0,133 0,100 0,064 0,035
n	wykładnik potęgowy przy nachyleniu szyby wynoszącym: $\alpha = 0^\circ$ $\alpha = 20^\circ$ $\alpha = 45^\circ$ $\alpha = 70^\circ$ $\alpha = 90^\circ$	0,280 0,293 0,310 0,349 0,380
—	stężenie gazu wypełniającego przestrzeń międzyszybową	90%



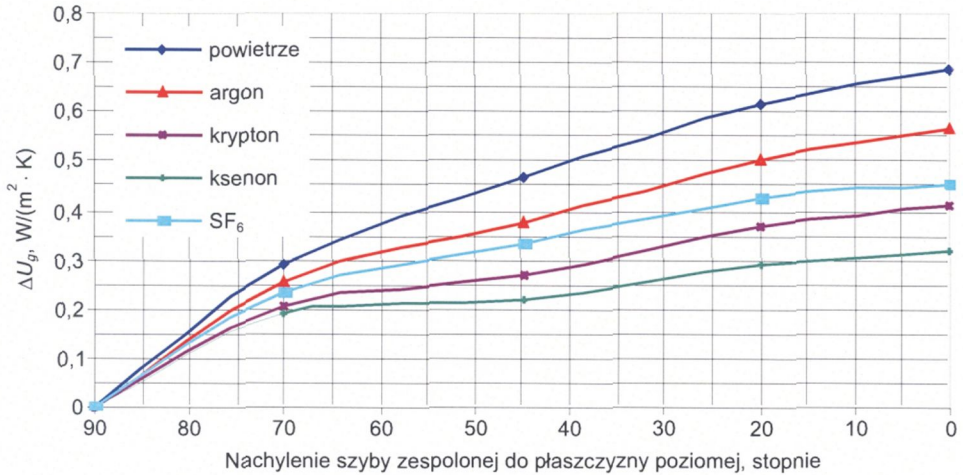
Rys. 2. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/20/4 (z powierzchniami szyb o $\epsilon = 0,837$)

Fig. 2. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/20/4 (with surfaces of panes about $\epsilon = 0,837$)



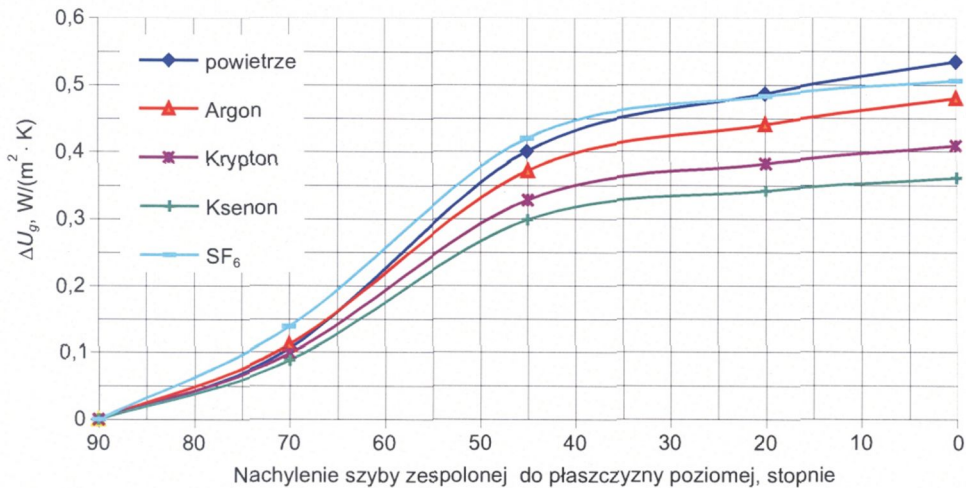
Rys. 3. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/20/4 (z jedną powierzchnią szyby o $\epsilon = 0,04$)

Fig. 3. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/20/4 (with one surface of pane about $\epsilon = 0,04$)



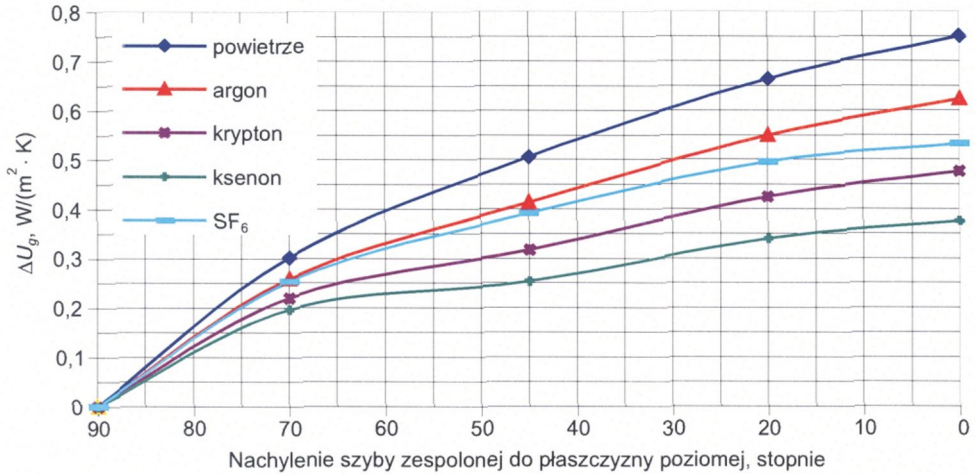
Rys. 4. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/20/4 (z dwiema powierzchniami szyb o $\epsilon = 0,04$)

Fig. 4. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/20/4 (with two surfaces of panes about $\epsilon = 0,04$)



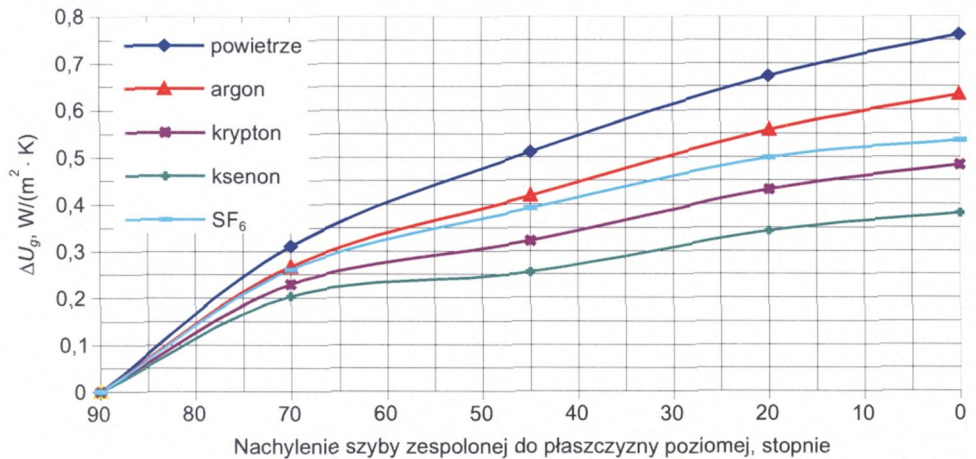
Rys. 5. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/16/4 (z powierzchniami szyby o $\epsilon = 0,837$)

Fig. 5. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/16/4 (with surfaces of pane about $\epsilon = 0,837$)



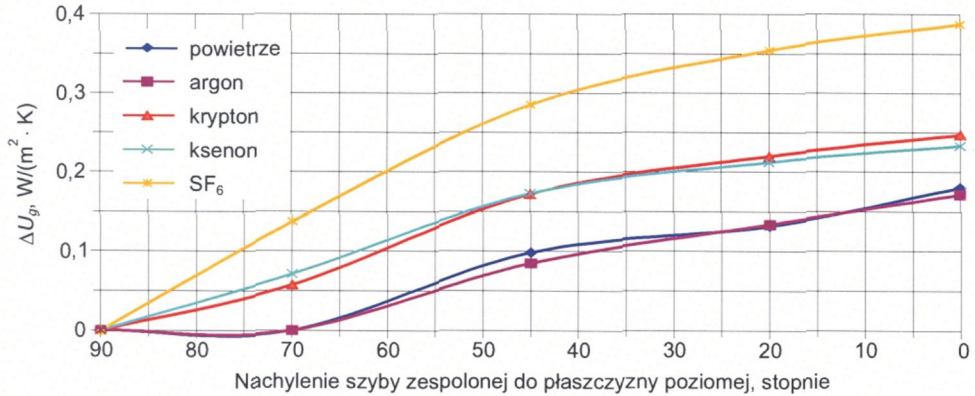
Rys. 6. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/16/4 (z jedną powierzchnią szyby o $\epsilon = 0,04$)

Fig. 6. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/16/4 (with one surface of pane about $\epsilon = 0,04$)

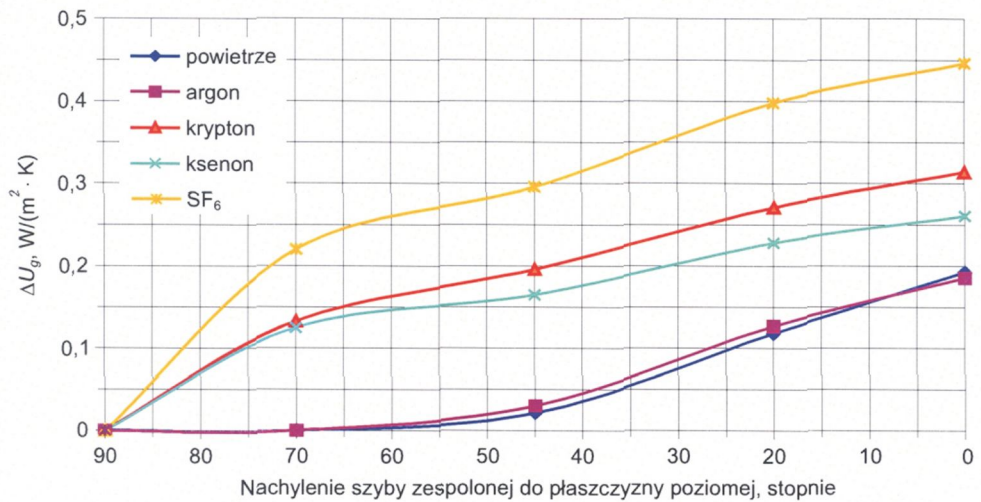


Rys. 7. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/16/4 (z dwiema powierzchniami szyby o $\epsilon = 0,04$)

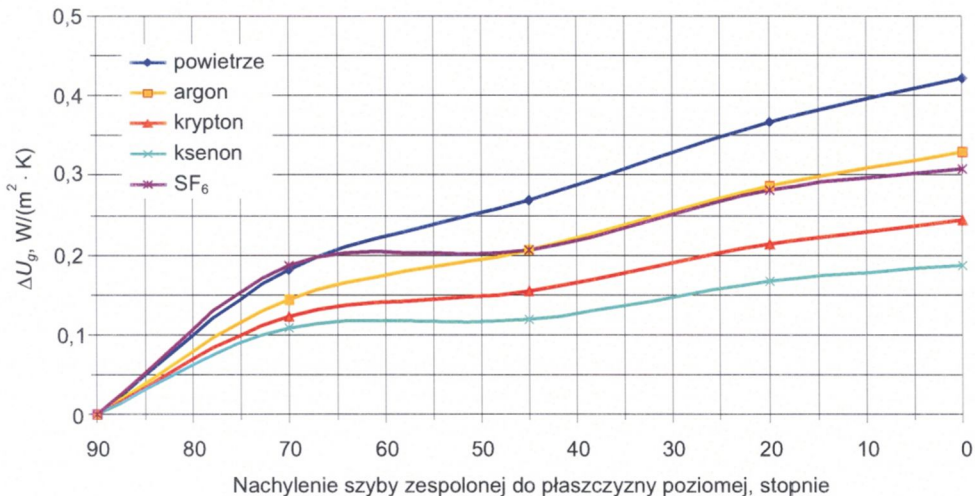
Fig. 7. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/16/4 (with two surfaces of pane about $\epsilon = 0,04$)



Rys. 8. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/12/4/12/4 (z powierzchniami szyby o $\varepsilon = 0,837$)
 Fig. 8. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/12/4/12/4 (with surfaces of pane about $\varepsilon = 0,837$)



Rys. 9. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/12/4/12/4 (z dwiema powierzchniami szyby o $\varepsilon = 0,0124$)
 Fig. 9. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/12/4/12/4 (with two surfaces of pane about $\varepsilon = 0,0124$)



Rys. 10. Zależność przyrostu współczynnika przenikania ciepła ΔU_g od nachylenia szyb zespolonych 4/20/4/20/4 (z dwiema powierzchniami szyby o $\varepsilon = 0,0124$)
 Fig. 10. Dependence of increase of thermal transmittance ΔU_g on inclinations of glazing 4/20/4/20/4 (with two surfaces of pane about $\varepsilon = 0,0124$)

Z rysunków 2–10 wynika duże pogarszanie się izolacyjności cieplnej typowych konstrukcji szyb zespolonych w miarę odchyłania ich od pozycji pionowej, gdyż wartość współczynnika przenikania ciepła może wzrosnąć nawet o 0,8 W/(m²·K) w przypadku szyb jednokomorowych i o 0,5 W/(m²·K) w przypadku szyb dwukomorowych.

Pogorszenie się izolacyjności cieplnej (wartości współczynnika U_g) szyb zespolonych nachylonych jest spowodowane przede wszystkim zwiększoną wymianą ciepła wskutek konwekcji gazu w przestrzeni międzyszybowej charakteryzowanej liczbą Nusselta, ale zależnej od grubości tej przestrzeni oraz właściwości gazu ją wypełniającego.

Z tego względu dokładne wartości współczynnika U_g należy określać na podstawie badań według PN-EN 674 lub obliczeń podanych w PN-EN 673. Alternatywnie można posłużyć się metodą uproszczoną, sformułowaną i omówioną w następnym rozdziale. Metoda ta może być przydatna przy określaniu charakterystyki cieplnej budynku podczas audytów energetycznych, gdyż mając obliczoną wartość U_g szyby nachylonej, można wyznaczyć wartość U_w okna, na przykład dachowego, zbadanego w pozycji pionowej.

4. Metoda uproszczona obliczania U_g szyby zespolonej

W tablicach 4 i 5 zestawiono graniczne różnice wartości współczynnika U_g dla poszczególnych rodzajów szyb zespolonych jedno- i dwukomorowych nachylonych w stosunku do usytuowanych pionowo (wynikające z rozdz. 3), a w tablicy 6 maksymalne graniczne wartości grupy szyb jednokomorowych i dwukomorowych.

Tablica 4. Zakres przyrostów współczynnika przenikania ciepła ΔU_g szyb zespolonych jednokomorowych nachylonych w stosunku do usytuowanych pionowo, z przestrzeniami międzyszybowymi wypełnionymi powietrzem, argonem, kryptonem, ksenonem lub SF₆

Table 4. Range of the increases of thermal transmittance ΔU_g of double glazing inclined in relation to situated vertically (glazing with air, argon, krypton, xenon or SF₆ spaces)

Rodzaj szyby	Graniczne różnice między wartościami U_g , W/(m ² ·K), szyb zespolonych usytuowanych pionowo i nachylonych do płaszczyzny poziomej pod kątem:			
	70°	45°	20°	0°
1	2	3	4	5
4/20/4 z powierzchniami o $\epsilon = 0,837$	0,08÷0,14	0,28÷0,42	0,32÷0,49	0,33÷0,53
4/20/4 jw., z jedną powierzchnią o $\epsilon = 0,04$	0,18÷0,29	0,22÷0,46	0,29÷0,60	0,32÷0,68
4/20/4 jw., z dwiema powierzchniami o $\epsilon = 0,04$	0,19÷0,29	0,22÷0,46	0,29÷0,61	0,32÷0,69
4/16/4 z powierzchniami o $\epsilon = 0,837$	0,09÷0,14	0,30÷0,40	0,34÷0,49	0,36÷0,54
4/16/4 jw., z jedną powierzchnią o $\epsilon = 0,04$	0,20÷0,30	0,25÷0,51	0,34÷0,66	0,38÷0,75
4/16/4 jw., z dwiema powierzchniami o $\epsilon = 0,04$	0,20÷0,31	0,26÷0,51	0,34÷0,67	0,38÷0,76
Jednokomorowe wg kol. 1 tabl. 4	0,31	0,51	0,67	0,76

Tablica 5. Zakres przyrostów współczynnika przenikania ciepła ΔU_g szyb zespolonych dwukomorowych nachylonych w stosunku do usytuowanych pionowo, z przestrzeniami międzyszybowymi wypełnionymi powietrzem, argonem, kryptonem, ksenonem lub SF₆

Table 5. Range of the increases of thermal transmittance ΔU_g of triple glazing inclined in relation to situated vertically (glazing with air, argon, krypton, xenon or SF₆ spaces)

Rodzaj szyby	Graniczne różnice między wartościami U_g , W/(m ² ·K), szyb zespolonych usytuowanych pionowo i nachylonych do płaszczyzny poziomej pod kątem:			
	70°	45°	20°	0°
1	2	3	4	5
4/12/4/12/4 z powierzchniami o $\epsilon = 0,037$	0,00÷0,14	0,10÷0,29	0,14÷0,35	0,18÷0,39
Jak wyżej 4/12/4/12/4, z dwiema powierzchniami o $\epsilon = 0,0124$	0,00÷0,22	0,03÷0,30	0,13÷0,40	0,19÷0,45
Jak wyżej 4/20/4/20/4, z dwiema powierzchniami o $\epsilon = 0,0124$	0,12÷0,19	0,16÷0,27	0,21÷0,37	0,24÷0,42
Dwukomorowe wg kol. 1 tabl. 5	0,22	0,30	0,40	0,45

Tablica 6. Maksymalne przyrosty współczynnika przenikania ciepła ΔU_g szyb zespolonych jedno- i dwukomorowych nachylonych w stosunku do usytuowanych pionowo, z przestrzeniami międzyszybowymi wypełnionymi powietrzem, argonem, kryptonem, ksenonem lub SF₆

Table 6. Maximum increases of thermal transmittance ΔU_g of double and triple glazing inclined in relation to situated vertically (glazing with air, argon, krypton, xenon or SF₆ spaces)

Rodzaj szyby	Graniczne różnice między wartościami U_g , W/(m ² ·K), szyb zespolonych usytuowanych pionowo i nachylonych do płaszczyzny poziomej pod kątem:			
	70°	45°	20°	0°
1	2	3	4	5
Jednokomorowe	0,31	0,51	0,67	0,76
Dwukomorowe	0,22	0,30	0,40	0,45

W celu uwzględnienia wpływu nachylenia typowych i często stosowanych w Polsce szyb zespolonych na ich izolacyjność cieplną należy do wartości współczynnika przenikania ciepła U_g , wyznaczonej dla szyby usytuowanej w pozycji pionowej, dodać wartość ΔU_g , wynikającą z tablicy 6. W przypadku pośrednich wartości kąta nachylenia szyby do płaszczyzny poziomej wartość ΔU_g należy interpolować.

Przykład obliczenia $U_{g,n}$

Wartość deklarowana współczynnika przenikania ciepła U_g przez centralną powierzchnię szyby zespolonej jednokomorowej usytuowanej w pozycji pionowej wynosi 1,2 W/(m²·K). Należy obliczyć projektową wartość współczynnika przenikania ciepła $U_{g,n}$ przez centralną powierzchnię tej szyby nachylonej do płaszczyzny poziomej pod kątem 45°.

W przypadku wymienionej szyby zespolonej jednokomorowej o nachyleniu 45°, z kolumny 3 tablicy 6 odczytujemy przyrost $\Delta U_g = 0,51$ W/(m²·K) w stosunku do wartości deklarowanej $U_g = 1,2$ W/(m²·K). Projektowa wartość współczynnika przenikania ciepła przez centralną powierzchnię szyby zespolonej jednokomorowej nachylonej do płaszczyzny poziomej pod kątem 45° wynosi $U_{g,n} = U_g + \Delta U_g = 1,2 + 0,51 = 1,71$ W/(m²·K).

5. Sposób określania U_w okna nachylonego po zbadaniu w pozycji pionowej

Z wyniku badania według PN-EN ISO 12567-1 lub PN-EN ISO 12567-2 kompletnego okna usytuowanego w pozycji pionowej otrzymuje się wartość współczynnika przenikania ciepła, U_w , określanego jednocześnie ze wzoru podanego w PN-EN ISO 10077-1:2007:

$$U_w = \frac{U_g \cdot A_g \cdot U_f \cdot A_f + \psi_g \cdot I_g}{A} \quad (10)$$

gdzie: U_w – współczynnik przenikania ciepła okna, W/(m²·K),
 A – pole całkowite powierzchni okna, m²,
 U_g – współczynnik przenikania ciepła środkowej części szyby, W/(m²·K),
 A_g – pole powierzchni szyby w danym oknie, m²,

- U_f – zmierzony współczynnik przenikania ciepła ramy, $W/(m^2 \cdot K)$,
- $A_f = A - A_g$ – pole powierzchni ramy okna, m^2 ,
- ψ_g – liniowy współczynnik przenikania ciepła w odniesieniu do mostka cieplnego na styku szyby z ramą okna, $W/(m \cdot K)$,
- l_g – długość, do której ma zastosowanie wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła ψ_g , m.

Według postanowień podanych w p. 6 PN-EN ISO 10077-1:2007 wartości projektowe U_w okien należy określać zgodnie z ich rzeczywistym usytuowaniem i warunkami brzegowymi. Jednakże wartości współczynników U_f i ψ_g określone dla okien w położeniu pionowym stosuje się w przypadku wszystkich pochyleń okna, co świadczy o pomijalnym wpływie tego pochylecia okna na wartości współczynników U_f i ψ_g .

Uwzględniając we wzorze (10) postanowienia normy, otrzymujemy wzór na $U_{w,n}$ okna nachylonego:

$$U_{w,n} = \frac{U_{g,n} \cdot A_g + U_f \cdot A_f \cdot \psi_g \cdot l_g}{A} \quad (11)$$

Ze wzoru (10) obliczamy:

$$\frac{U_f \cdot A_f + \psi_g \cdot l_g}{A} = U_w - \frac{U_g \cdot A_g}{A} \quad (12)$$

i po podstawieniu do wzoru (11) otrzymujemy:

$$U_{w,n} = U_w + \frac{(U_{g,n} - U_g) A_g}{A} \quad (13)$$

gdzie: U_w – zmierzony współczynnik przenikania ciepła przez okno usytuowane w pozycji pionowej, $W/(m^2 \cdot K)$,

$U_{g,n}$ – zbadany lub wyznaczony wg p. 3 współczynnik przenikania ciepła przez szybę nachyloną, $W/(m^2 \cdot K)$,

U_g – współczynnik przenikania ciepła przez szybę usytuowaną w pozycji pionowej określony na podstawie badań lub obliczeń, $W/(m^2 \cdot K)$.

Przykład obliczenia $U_{w,n}$

Wartość deklarowana współczynnika przenikania ciepła wynosi:

$U_w = 1,4 W/(m^2 \cdot K)$ – przez okno dachowe usytuowane w pozycji pionowej,

$U_g = 1,2 W/(m^2 \cdot K)$ – przez szybę zespoloną jednokomorową stanowiącą $A_g / A \times 100 = 60\%$ powierzchni całkowitej ww. okna.

Należy obliczyć projektową wartość współczynnika przenikania ciepła $U_{w,n}$ przez okno wbudowane w połac dachową o nachyleniu do płaszczyzny poziomej pod kątem 45° .

Podobnie jak w przykładzie poprzednim, w przypadku szyby zespolonej jednokomorowej o nachyleniu 45° , z kolumny 3 tablicy 6 odczytujemy przyrost ΔU_g wynoszący $0,51 W/(m^2 \cdot K)$. Projektowa wartość współczynnika przenikania ciepła przez okno wbu-

dowane w połąć dachową o nachyleniu do płaszczyzny poziomej pod kątem 45° , obliczone ze wzoru (13), wyniesie.

$$U_{w,n} = U_w + \frac{(U_{g,n} - U_g) A_g}{A} = 1,4 + 0,51 \cdot 0,60 = 1,4 + 0,3 + 1,7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

6. Podsumowanie

Badania i obliczenia wykazały duże pogarszanie się wartości współczynnika przenikania ciepła U_g szyb zespolonych w miarę ich odchylenia od pozycji pionowej, dochodzące przy poziomym usytuowaniu do $0,8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ w przypadku często stosowanych szyb zespolonych jednokomorowych i do $0,5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ w przypadku szyb dwukomorowych.

Orientacyjny wpływ nachylenia szyb zespolonych i okien na współczynnik przenikania ciepła można określić zgodnie z treścią rozdziałów 4 i 5.

Dokładne wartości współczynnika przenikania ciepła U_g należy wyznaczać na podstawie badań według PN-EN 674 przy zastosowaniu obrotowego aparatu płytowego lub na podstawie obliczeń podanych w PN-EN 673.

Bibliografia

- [1] PN-EN 14351-1:2006 Okna i drzwi. Norma wyrobu, właściwości eksploatacyjne. Część 1: Okna i drzwi zewnętrzne bez właściwości dotyczących odporności ogniowej i/lub dymoszczelności
- [2] PN-EN ISO 10077-1:2007 Ciepłne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła. Część 1: Postanowienia ogólne
- [3] PN-EN ISO 10077-2:2005 Ciepłne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła. Część 2: Metoda komputerowa dla ram
- [4] PN-EN 1279-5:2006 Szkło w budownictwie. Izolacyjne szyby zespolone. Część 5: Ocena zgodności wyrobu z normą
- [5] PN-EN 673:1999 Szkło w budownictwie. Określenie współczynnika przenikania ciepła U . Metoda obliczeniowa
- [6] PN-EN 674:1999 Szkło w budownictwie. Określenie współczynnika przenikania ciepła U . Metoda ostnionętej płyty grzejnej
- [7] PN-EN 675:1999 Szkło w budownictwie. Określenie współczynnika przenikania ciepła U . Metoda pomiaru przepływu ciepła miernikiem
- [8] PN-EN ISO 12567-1:2004 Ciepłne właściwości użytkowe okien i drzwi. Określanie współczynnika przenikania ciepła metodą skrzynki grzejnej. Część 1: Kompletnie okna i drzwi
- [9] PN-EN ISO 12567-2:2006 Ciepłne właściwości użytkowe okien i drzwi. Określenie współczynnika przenikania ciepła metodą skrzynki grzejnej. Część 2: Okna dachowe i inne okna wystające z płaszczyzny
- [10] Praca badawcza NF-56/08 Dostosowanie laboratorium badawczego do wymagań norm europejskich w zakresie izolacji termicznych. ITB, Warszawa 2008, maszyn., biblioteka ITB

INFLUENCE OF INCLINATION OF WINDOWS AND INSULATION GLASS UNITS ON THERMAL TRANSMITTANCE

Summary

Deviation of windows and insulation glass units from vertical position causes deterioration of their thermal insulation (thermal transmittance U_g and U_w). Because Laboratories are usually equipped with apparatus for testing glazing and windows in vertical position, therefore in this paper, the simplified method of calculation of design thermal transmittance (U_w – value) of windows inclined to the level at other angle than 90° was proposed. This method was based on the results of tests and calculations of thermal transmittance for double and triple glazing.

Praca wpłynęła do Redakcji 14 I 2009