

ANDRZEJ DYLLA, KRZYSZTOF PAWŁOWSKI*

WADY W PROCEDURZE OBLICZANIA WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA

DEFECT IN PROCEDURE OF CALCULATION OF COEFFICIENT OF PENETRATION OF WARMTH

Streszczenie

Głównym celem niniejszego artykułu jest analiza błędów i niejasności w obliczeniach współczynnika przenikania ciepła ścian zewnętrznych U_k , z uwzględnieniem mostków cieplnych oraz zaproponowanie nowej procedury obliczeń.

Słowa kluczowe: współczynnik przenikania ciepła, mostek cieplny

Abstract

The analysis of mistakes and vagueness are a main purpose of the work in calculations of permeating the rate warmths of outside walls U_k considering thermal small bridges and suggesting the new procedure of calculations.

Keywords: coefficient of penetration of warmth, thermal bridge

* Dr hab. inż. Andrzej Dylla, prof. UTP, mgr inż. Krzysztof Pawłowski, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

1. Wstęp

W niniejszym artykule podjęto próbę oceny procedury obliczania współczynnika przenikania ciepła U_k ścian zewnętrznych budynku z uwzględnieniem mostków cieplnych.

Wymagania w zakresie ochrony cieplnej sformułowano w Rozporządzeniu [11]. Zagadnieniem cieplnym poświęcono dział X – Oszczędność energii i izolacyjność cieplna, w którym podano szczegółowe i ogólne wymagania w tym zakresie. Uzupełnieniem działu X [11] jest załącznik 2 podający graniczne wartości współczynników przenikania ciepła U oraz odpowiednich oporów cieplnych R przegród w poszczególnych budynkach. Ponadto, w załączniku 1 podano wykaz norm przedmiotowych, które powinny się stosować w procedurach obliczeń.

Wymagania cieplne określono szczegółowo dla czterech grup budynków: mieszkalnych wielorodzinnych i zamieszkania zbiorowego, jednorodzinnych, użyteczności publicznej, produkcyjnych. Podstawowymi parametrami obliczeniowymi w zakresie ochrony cieplnej w [11] są: wskaźnik zapotrzebowania na ciepło E oraz współczynnik przenikania ciepła U .

Norma PN-EN ISO 6946 [5], przywoływana w załączniku 1 [11], jest podstawową normą dotyczącą obliczania współczynnika przenikania ciepła U . Po wycofaniu załączników krajowych normy [5], sposób uwzględniania liniowych mostków cieplnych podają następujące normy: PN-EN ISO 10211-1 [6], PN-EN ISO 10211-2 [7], PN-EN ISO 14683 [8], PN-EN ISO 13789 [9]. W myśl procedur przedstawionych w [6–9] wprowadzono pojęcie współczynnika sprężenia cieplnego – L , [$W \cdot K^{-1}$] – określającego całkowity strumień cieplny z budynku lub przegrody do środowiska, przenikający w ciągu 1 h przez powierzchnię A i odniesiony do różnicy temperatur zewnętrznej i wewnętrznej wynoszącej 1 deg, i obliczanego według wzoru (1)

$$L = \sum U_i \cdot A_i + \sum \Psi_k \cdot l_k + \sum \chi_j \quad [W \cdot K^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

- U_i – współczynnik przenikania ciepła zewnętrznych przegród budowlanych, [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],
- A_i – pole powierzchni przegród uczestniczących w przenikaniu, [m^2],
- Ψ_k – liniowy współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka cieplnego, [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],
- l_k – długość liniowego mostka cieplnego, [m],
- χ_j – punktowy (przestrzenny) współczynnik przenikania ciepła punktowego (przestrzennego) mostka cieplnego, [$W \cdot K^{-1}$].

Człony równania oznaczają kolejno: straty ciepła przez obudowę budynku (złożoną z i części), straty przez liniowe mostki cieplne (złożone z k części) oraz sumę strat przez punktowe mostki cieplne w obudowie (j – mostków).

Interpretacja przedstawionego równania jest różna. Pojawiają się pytania, niejasności i wątpliwości. Na przykład: dla jakiej ściany (jak wybranej) należy przeprowadzać obliczenia cieplne danego budynku?, czy też: jak przyjmować wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła mostka cieplnego? Brak także „kart katalogowych” wielu, często stosowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych ścian zewnętrznych budynku. Wiele wątpliwości budzą już opublikowane „katalogi”, a szczególnie brak informacji, jakie przyjmowano warunki brzegowe do obliczeń strat ciepła (współczynniki L^{2D} , Ψ_i) oraz minimalnych temperatur krytycznych w rozpatrywanych węzłach. W związku z wątpliwościami przeprowadzono analizę procedury obliczeń cieplnych, w szczególności obliczeń współczynnika przenikania ciepła ścian zewnętrznych U_k , z uwzględnieniem liniowych mostków cieplnych.

2. Badania i obliczenia

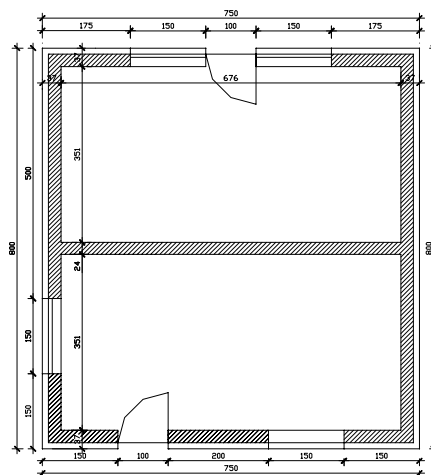
Przeprowadzono obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_k ściany zewnętrznej budynku w kilku etapach. Do obliczeń wytypowano ściany dwuwarstwowe: cegła kratówka o grubości 25 cm i współczynniku $\lambda = 0,56$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], styropian o grubości 12 cm i współczynniku $\lambda = 0,042$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] w hipotetycznym budynku o czterech elewacjach. Budynek parterowy z ogrzewanym poddaszem użytkowym, podłoga na gruncie. Izolacja podłogi styka się bezpośrednio z izolacją ściany zewnętrznej (liniowy współczynnik przenikania ciepła w styku podłoga–ściana przyjęto równy 0,0 według tabelicy 3 normy PN-EN ISO 13370 [10]).

W pierwszym etapie dokonano obliczeń według procedury podanej w literaturze przedmiotowej [2–4]. Rozpatrzono 4 fragmenty ścian zewnętrznych i wykonano obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_k ze wzoru (2) zamieszczonego w [2–4]:

$$U_k = U_c + \frac{\sum_i \Psi_i \cdot l_i}{A_i} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}] \quad (2)$$

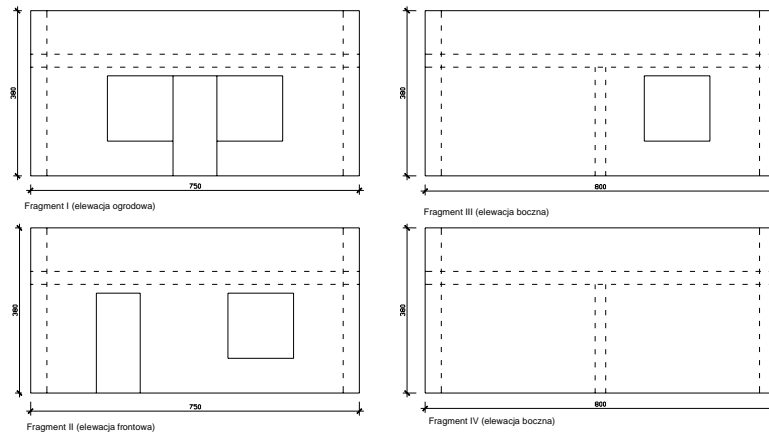
gdzie:

- U_c – współczynnik przenikania ciepła przegrody obliczony zgodnie z PN-EN ISO6946, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],
- Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka cieplnego o indeksie „i”, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
- l_i – długość liniowego mostka cieplnego o indeksie „i”, [m],
- A_i – pole powierzchni przegrody w świetle przegród do niej prostopadłych, pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych okien i drzwi, obliczone w świetle ościeży, [m^2].



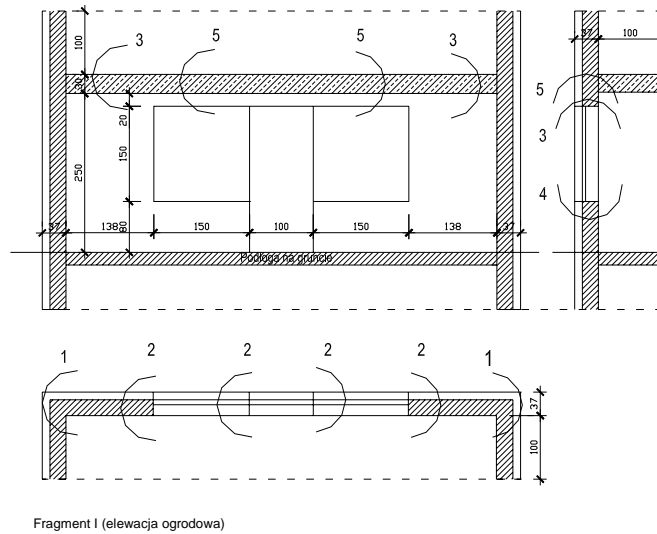
Ryc. 1. Rzut przyziemia analizowanego budynku

Fig. 1. Trow analysed building



Ryc. 2. Elewacje budynku

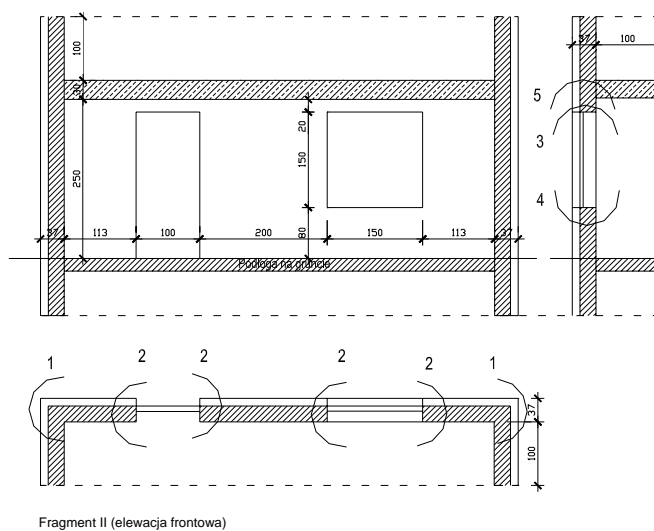
Fig. 2. Elevations of building



Fragment I (elewacja ogrodowa)

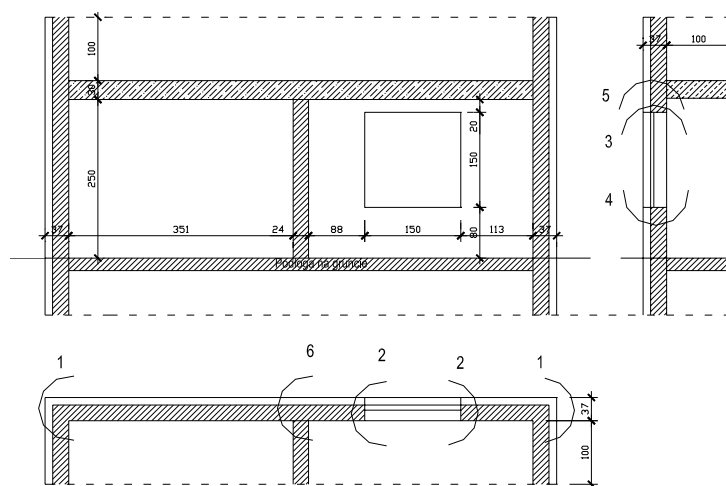
Ryc. 3. Identyfikacja mostków cieplnych – elewacja ogrodowa

Fig. 3. The identification of thermal bridges – the garden elevation



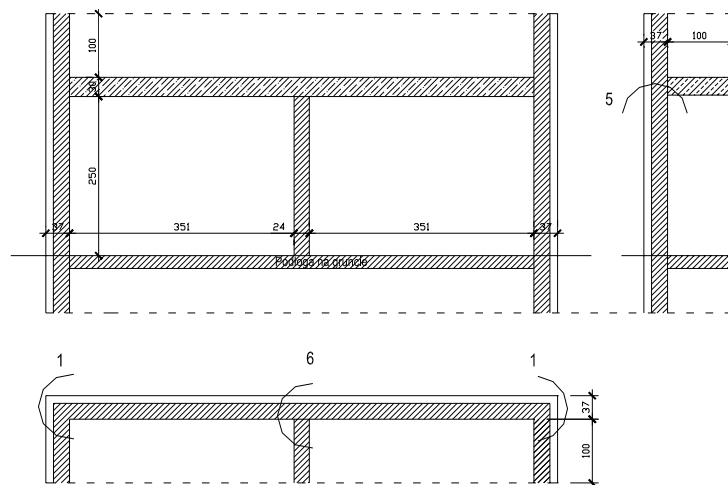
Ryc. 4. Identyfikacja mostków cieplnych – elewacja frontowa

Fig. 4. The identification of thermal bridges – the front elevation



Ryc. 5. Identyfikacja mostków cieplnych – elewacja boczna

Fig. 5. The identification of thermal bridges – the side elevation



Fragment IV (elewacja boczna)

Ryc. 6. Identyfikacja mostków cieplnych – elewacja boczna

Fig. 6. The identification of thermal bridges – the side elevation

W obliczeniach, zgodnie z przykładami obliczeniowymi podanymi w [2–4], uwzględniono tylko wpływ liniowych mostków cieplnych wynikających z występowania okien i drzwi. Wartości liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ_i przyjęto na podstawie [2] – tabl. 1. Wyniki obliczeń zestawiono w tabl. 2.

Nieuwzględnienie wpływu mostków na krawędziach przegród (ściany i stropy dowiązujące) prowadzi do niedoszacowania wartości współczynnika U_k . Następnie dokonano obliczeń współczynnika przenikania ciepła, uwzględniając wszystkie liniowe mostki cieplne (dotyczące ścian zewnętrznych) występujące w analizowanym budynku, przedstawione w tabl. 1.

Tablica 1

Identyfikacja mostków cieplnych ścian parteru w analizowanym budynku

Lp.	Liniowy mostek cieplny	Karta katalogowa	Ψ_i [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
1	naroże ściany zewnętrznej	Z/S-4	0,13
2	połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	Z/O-1	0,14
3	połączenie ściany z oknem w przekroju przez nadproże	Z/N-1	0,05
4	połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik	Z/P-1	0,25
5	połączenie ściany ze stropem w przekroju przez wieniec	Z/W-7	0,09
6	połączenie ściany zewnętrznej z wewnętrzną	Z/S-1	0,36

Wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k z uwzględnieniem liniowych mostków cieplnych przeprowadzonych zgodnie z procedurami przedstawionymi w literaturze

Fragment ściany	Obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
I	$U_k = 0,289 + \frac{0,14 \cdot 4,6 + 0,25 \cdot 3,0 + 0,05 \cdot 4,0}{10,10} = 0,289 + 0,158 = 0,447$
II	$U_k = 0,289 + \frac{0,14 \cdot 7,6 + 0,25 \cdot 1,5 + 0,05 \cdot 2,5}{12,35} = 0,289 + 0,127 = 0,416$
III	$U_k = 0,289 + \frac{0,14 \cdot 3,0 + 0,25 \cdot 1,5 + 0,05 \cdot 1,5}{15,30} = 0,289 + 0,057 = 0,346$
IV	$U_k = 0,289 + 0 = 0,289$
$l_{1i} = 2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5 = 10,00 \text{ m}$ $l_{2i} = (2,30 + 2,30) + (2,30 + 2,30 + 1,50 + 1,50) + (1,50 + 1,50) = 4,60 + 7,60 + 3,00 = 15,20 \text{ m}$ $l_{3i} = 4,00 + 2,50 + 1,50 = 8,00 \text{ m}$ $l_{4i} = 3,00 + 1,50 + 1,50 = 6,00 \text{ m}$ $l_{5i} = 6,76 + 6,76 + 7,26 + 7,26 = 28,04 \text{ m}$ $l_{6i} = 2,50 + 2,50 = 5,00 \text{ m}$ $A_{1i} = (6,76 \cdot 2,50) - (2 \cdot 1,50 \cdot 1,50 + 1,00 \cdot 2,30) = 10,10 \text{ m}^2$ $A_{2i} = (6,67 \cdot 2,50) - (1,50 \cdot 1,50 + 1,00 \cdot 2,30) = 12,35 \text{ m}^2$ $A_{3i} = ((3,51 + 3,51) \cdot 2,50) - (1,50 \cdot 1,50) = 15,30 \text{ m}^2$ $A_{4i} = ((3,51 + 3,51) \cdot 2,50) = 17,55 \text{ m}^2$	

Przedstawione obliczenia budzą wiele wątpliwości. Dla jednego budynku uzyskujemy kilka współczynników przenikania ciepła różnych dla poszczególnych ścian. Opisana powyżej procedura budzi istotne zastrzeżenie, jest trudna w racjonalnym stosowaniu i niejasna. Współczynnik Ψ_i podaje liniowe (na 1 mb) straty ciepła przez mostek „i”, przyjmowane zwykle w założeniu rozciągnięcia obszaru na odległość 1 m od krawędzi mostka w obie strony od jego rdzenia [2]. Częsty jest wobec tego przypadek nakładania się w przegrodzie kilku mostków. W takim przypadku nie jest możliwe sumowanie współczynników Ψ dla konkretnej geometrii, np. filarka: okno–ściana dołączająca. W opracowaniach mających służyć profesjonalnym obliczeniom cieplno-wilgotnościowym przegród budowlanych z reguły podawane są wartości współczynników Ψ_i (L_i) w odniesieniu do całego złącza z mostkiem cieplnym uczestniczącym w przepływie ciepła [2, 8]. Określenie ilościowego udziału poszczególnych mostków w łącznych stratach ciepła przez przegrodę wymaga wyodrębnienia częściowych wartości współczynników Ψ_i (L_i), odpowiadających gałęziom w obrębie badanej przegrody. Można to uzyskać w wyniku dodatkowych obliczeń numerycznych [1]. Otrzymane wyniki (tabl. 3) są więc znacznie zawyżone.

Wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła dla poszczególnych fragmentów ścian

Lp.	Liniowy mostek ciepły	Karta katalogowa	Ψ_i [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Analizowane fragmenty ścian zewnętrznych							
				fragment I		fragment II		fragment III		fragment IV	
				l_i [m]	$\Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]	l_i [m]	$\Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]	l_i [m]	$\Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]	l_i [m]	$\Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]
1	naroże ściany zewnętrznej	Z/S-4	0,13	5,00	0,650	5,00	0,650	5,00	0,650	5,00	0,650
2	połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	Z/O-1	0,14	4,60	0,644	7,60	1,064	3,00	0,420	–	–
3	połączenie ściany z oknem w przekroju przez nadproże	Z/N-1	0,05	4,00	0,200	2,50	0,125	1,50	0,075	–	–
4	połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik	Z/P-1	0,25	3,00	0,750	1,50	0,375	1,50	0,375	–	–
5	połączenie ściany ze stropem w przekroju przez wieniec	Z/W-7	0,09	6,76	0,609	6,76	0,608	7,26	0,653	7,26	0,653
6	połączenie ściany zewnętrznej z wewnętrzną	Z/S-1	0,36	–	–	–	–	2,50	0,900	2,50	0,900
$\sum \Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]				2,852		2,822		3,073		2,203	
A_i [m ²]				10,10		12,35		15,30		17,55	
U_c [W·m ⁻² ·K ⁻¹]				0,289							
$\frac{\sum \Psi_i \cdot l_i}{A_i}$ [W·m ⁻² ·K ⁻¹]				0,282		0,229		0,201		0,126	
$U_k = U_c + \frac{\sum \Psi_i \cdot l_i}{A_i}$ [W·m ⁻² ·K ⁻¹]				0,571		0,518		0,490		0,415	

Wyniki obliczeń średniego współczynnika przenikania ciepła $U_{k,śr.}$

Lp.	Liniowy mostek cieplny	Ψ_i [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	l_i [m]	$\Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]
1	narożnik ścian zewnętrznych	0,125	10,00	1,750
2	połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	0,117	15,20	1,778
3(*)	połączenie ściany zewnętrznej ze stropem z nadprożem	0,121	8,00	2,960
4	połączenie ściany z oknem przez podokiennik	0,059	6,00	0,472
5(*)	połączenie ściany zewnętrznej ze stropem	0,047	20,04	2,244
6	połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrzną	0,079	5,00	0,395
$\sum \Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]				5,692
$A_i = A_{i1} + A_{i2} + A_{i3} + A_{i4}$ [m ²]				55,300
U_c [W·m ⁻² ·K ⁻¹]				0,289
$U_c \cdot A_i$ [W·K ⁻¹]				15,982
$L_D = U_c \cdot A_i + \sum \Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]				21,674
$U_{k,śr.} = \frac{L_D}{A_i}$ [W·m ⁻² ·K ⁻¹]				0,392
(*) w przypadku mostka 3 i 5 przyjęto gałęziowe współczynniki Ψ_i wyznaczone dla części złącza pod stropem parteru $l_{1i} = 2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5 = 10,00$ m, $l_{2i} = (2,30 + 2,30) + (2,30 + 2,30 + 1,50 + 1,50) + (1,50 + 1,50) = 4,60 + 7,60 + 3,00 = 15,20$ m $l_{3i} = 4,00 + 2,50 + 1,50 = 8,00$ m $l_{4i} = 3,00 + 1,50 + 1,50 = 6,00$ m $l_{5i} = 6,76 + 6,76 + 7,26 + 7,26 = 28,04 - 8,00 = 20,04$ m (częściowy wpływ stropu uwzględniono w mostku 3) $l_{6i} = 2,50 + 2,50 = 5,00$ m				

W ostatnim etapie obliczeń przeprowadzono obliczenia według własnego algorytmu obliczania współczynnika przenikania ciepła z uwzględnieniem liniowych mostków cieplnych U_k , wykorzystując współczynnik strat ciepła przez przenikanie między przestrzenią ogrzewaną i nieogrzewaną L_D . Efektem końcowym jest obliczenie średniego współczynnika przenikania ciepła ściany zewnętrznej na podstawie zależności (3)

$$U_{k, \text{śr.}} = \frac{L_D}{A_i} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3)$$

gdzie:

- L_D – współczynnik sprężenia cieplnego między atmosferą a ścianami parteru budynku, $[\text{W} \cdot \text{K}^{-1}]$,
- A_i – pole powierzchni ścian zewnętrznych z zastosowaniem wymiarów wewnętrznych, pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych okien i drzwi, obliczone w świetle ościeży, $[\text{m}^2]$.

Stosując taki algorytm obliczeń, otrzymujemy jeden średni współczynnik przenikania ciepła dla ścian parteru rozpatrywanego budynku.

Wartości linowych współczynników przenikania ciepła przyjęto na podstawie obliczeń własnych przeprowadzonych z zastosowaniem programu komputerowego TRISCO. Warunki modelowania analizowanych detali i warunki brzegowe przyjęto według norm [6, 7]. Przyjęto krok siatki podziałowej równy 1 cm oraz następujące warunki:

- $t_i = 20^\circ\text{C}$, $R_{si} = 0,13 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$, $h_i = 7,69 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$,
- $t_e = -20^\circ\text{C}$, $R_{se} = 0,04 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$, $h_e = 25,0 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$.

W obliczeniach współczynnika przenikania ciepła $U_{k, \text{śr.}}$ przyjęto węzły konstrukcyjne dokładnie tak samo jak dla przyjętych w [2].

3. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano różne wartości parametrów cieplnych dla ścian zewnętrznych budynku (L_D , U_k) – tabl. 5. Otrzymane wyniki współczynnika L_D wyznaczonego według procedur podanych w [2–4] są niedoszacowane lub zawyżone. Wynika to z błędów prezentowanych w pracy.

Tablica 5

Porównanie otrzymanych wyników obliczeń

Metoda obliczeń	U_c [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	A_i [m ²]	$L_D = U_c \cdot A_i + \sum \Psi_i \cdot l_i \text{ [W} \cdot \text{K}^{-1}]$		
			$U_c \cdot A_i$ [W·K ⁻¹]	$\sum \Psi_i \cdot l_i$ [W·K ⁻¹]	L_D [W·K ⁻¹]
Wg: [2, 3, 4] ¹⁾	0,289	55,300	15,982	4,028	20,010
Wg: [2, 3, 4] ²⁾	0,289	55,300	15,982	10,950	26,932
Obliczenia własne	0,289	55,300	15,982	5,692	21,674

¹⁾ bez uwzględnienia wpływu mostków na krawędziach przegród (ściany i stropy dowiązujące – tabl. 2)
²⁾ bez wyodrębnienia częściowych wartości współczynnika Ψ_i – tabl. 3

Wartość współczynnika przenikania ciepła U_k przegrody jest jednym z jej podstawowych parametrów technicznych. Prezentowane w literaturze przedmiotowej procedury obliczania

współczynnika przenikania ciepła U_k budzą wiele wątpliwości. Dokładne obliczenia współczynników U_k , odniesione do poszczególnych elementów obudowy budynku, nie są możliwe bez wyodrębnienia gałęziowych współczynników Ψ_i złączy. Przedstawiona procedura usuwa niedogodności stosowanych sposobów obliczania oraz proponuje ujednoczenie kryterium doboru termoizolacyjności przegrody dla całego budynku.

Literatura

- [1] Dylla A., Pawłowski K., *Współczynnik kształtu mostka cieplnego*, Budownictwo Ogólne, Zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i cieplno-wilgotnościowe w budownictwie, Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2005.
- [2] Pogorzelski J.A., Awksientjuk J., *Katalog mostków cieplnych. Budownictwo tradycyjne*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2003.
- [3] Pogorzelski J.A., *Fizyka budowli*, część VII, *Uwzględnianie liniowych mostków cieplnych*, Materiały Budowlane, 12/2004.
- [4] Praca zbior. pod kier. prof. dr. hab. inż. Piotra Klęmę, *Budownictwo ogólne*, t. 2, *Fizyka budowli*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2005.
- [5] PN-EN ISO 6946 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [6] PN-EN ISO 10211-1 Mostki cieplne w budynkach. Strumień cieplny i temperatura powierzchni. Ogólne metody obliczania.
- [7] PN-EN ISO 10211-2 Mostki cieplne w budynkach. Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni. Liniowe mostki cieplne.
- [8] PN-EN ISO 14683 Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne.
- [9] PN-EN ISO 13789 Ciepłe właściwości użytkowe budynków. Współczynnik strat ciepła przez przenikanie. Metoda obliczania.
- [10] PN-EN ISO 13370 Ciepłe właściwości użytkowe budynków. Wymiana ciepła przez grunt. Metoda obliczania.
- [11] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 7 kwietnia 2004 r. zmieniające Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, DzU nr 109, poz. 1156.