

Dr. Eng. Krzysztof Pawłowski¹⁾
ORCID: 0000-0002-6738-5764

Analysis of physical parameters of joints of building partitions insulated from the inside

Analiza parametrów fizykalnych złączy przegród budowlanych ocieplonych od wewnątrz

DOI: 10.15199/33.2024.07.11

Abstract. Shaping the systems of material layers of external partitions and joints of buildings insulated from the internal ones should not be random, but developed on the basis of detailed calculations and analyzes of physical parameters, taking into account heat flow in a two-dimensional (2D) field. The article presents an analysis of the physical parameters of the joints of the partitions of a building insulated from the inside in the case of various material systems.

Keywords: external building partitions; internal insulation; construction joints; physical parameters.

Streszczenie. Kształtowanie układów warstw materiałowych przegród zewnętrznych i złączy budynków ocieplonych od wewnątrz nie powinno być przypadkowe, lecz opracowane na podstawie szczegółowych obliczeń i analiz parametrów fizykalnych z uwzględnieniem przepływu ciepła w polu dwuwymiarowym (2D). W artykule przedstawiono analizę parametrów fizykalnych złączy przegród budynku ocieplonego od wewnątrz w przypadku różnych układów materiałowych.

Słowa kluczowe: przegrody zewnętrzne budynków; ocieplenie od wewnątrz; złącza budowlane; parametry fizykalne.

Insulating the external partitions from the inside has been designed and carried out for many years for buildings that, for various reasons, cannot or should not be insulated from the outside. These include, inter alia, historic buildings (buildings entered in the register of historic monuments or under conservation protection), buildings of architectural value (interesting façade character or original appearance of the building), buildings with part of their external walls located within the plot boundary, buildings in temporary use (temporary heating at irregular times).

The order in which the individual layers are placed has no effect on the thermal insulation of the entire partition, as this is only due to the sum of the thermal resistance of the materials used. In contrast to external thermal insulation, however, insulation on the inside requires a more detailed analysis of the partitions, primarily due to moisture phenomena (surface and interlayer condensation). For this reason, the selection of insulation material when insulating from the inside should be preceded by reliable calculations and analyses of the physical parameters of the external partitions and their joints. In order to meet the criterion $U_c \leq U_{c(max)}$ [1], the appropriate thickness of the recommended thermal insulation material must be selected. However, insulation from the inside is associated with the phenomenon of water vapor penetrating into the structure of the partition and condensing. As a result of the low ambient temperature, the temperature inside the partition decreases significantly and condensation occurs at the interface between the structural layer and the thermal insulation, which on the inside of the partition separates the masonry structure

Ocieplenie przegród zewnętrznych od wewnątrz jest projektowane i wykonywane od wielu lat w przypadku budynków, które z różnych względów nie mogą lub nie powinny być ocieplone od zewnątrz. Należą do nich m.in. obiekty zabytkowe (budynki wpisane do rejestru zabytków lub objęte ochroną konserwatorską), obiekty o wartości architektonicznej (ciekawy charakter elewacji lub oryginalny wygląd budynku), budynki, których część ścian zewnętrznych znajduje się w granicy działki, obiekty użytkowane czasowo (ogrzewanie czasowe w nieregularnych okresach).

Kolejność położenia poszczególnych warstw nie ma wpływu na izolacyjność termiczną całej przegrody, gdyż wynika ona jedynie z sumy oporu cieplnego użytych materiałów. W przeciwieństwie do zewnętrznej izolacji termicznej, ocieplenie od wewnątrz wymaga jednak bardziej szczegółowej analizy przegród, przede wszystkim ze względu na zjawiska wilgotnościowe (kondensacja powierzchniowa oraz międzywarstwowa). Z tego powodu dobór materiału izolacyjnego przy dociepleniu od wewnątrz powinien być poprzedzony miarodajnymi obliczeniami i analizami parametrów fizycznych przegród zewnętrznych i ich złączy. W celu spełnienia kryterium $U_c \leq U_{c(max)}$ [1] należy dobrać odpowiednią grubość zalecanego materiału termoizolacyjnego. Ocieplenie od wewnątrz wiąże się jednak ze zjawiskiem wnikania pary wodnej w strukturę przegrody i jej kondensacją. Na skutek niskiej temperatury otoczenia zmniejsza się znacznie temperatura wewnątrz przegrody i następuje kondensacja pary wodnej na styku warstwy konstrukcyjnej i izolacji cieplnej, która od strony wewnętrznej przegrody oddziela konstrukcję muru od środowiska wewnętrznego. Wpływa to na zmniejszenie pojemności cieplnej całego budynku i powoduje wprowadzenie całej war-

¹⁾ J. J. Śniadecki Bydgoszcz University of Science and Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering and Architecture: krzypaw@pbs.edu.pl

from the internal environment. This has the effect of reducing the heat capacity of the entire building and brings the entire structural layer into the frost zone. The main advantage of insulating from the inside is to reduce the amount of energy required to heat the room to the desired temperature and to reduce the heating time.

The group of materials for internal insulation used in Poland includes, among others: lightweight cellular concrete blocks; resol sheets; perlite panels; wood wool panels. The physical performance values of the building external partitions and their joints depend primarily on the thermal conductivity coefficient λ [W/(m·K)], the diffusion resistance coefficient μ [-] and the diffusion-equivalent air layer thickness $s_d = \mu \cdot d$ [m] of the insulation materials.

According to [2], **the methods of insulation on the inside** are as follows:

- preventing the occurrence of interlayer condensation (a solution is recommended where the diffusion-equivalent air layer thickness s_d of the insulation or vapor barrier used exceeds 1,500 m; the use of an airtight insulation layer prevents vapor diffusion and completely eliminates the risk of condensation);
- minimizing the occurrence of condensation (it is permissible to use materials with a diffusion-equivalent air layer thickness s_d of 0.5 – 1,500 m, such as expanded polystyrene (EPS) panels with gypsum plasterboard or insulation materials with a vapor-barrier foil; such a large variation in s_d has an ambiguous effect on the assessment of the correctness of the insulation);
- allowing condensation to occur (a solution where materials are used whose diffusion-equivalent air layer thickness s_d is less than 0.5 m, such as lightweight concrete blocks);
- limited thermal resistance, i.e., the choice of the thickness of thermal insulation depending on its vapor permeability expressed by s_d and the water absorption capacity of the substrate (outer shell) expressed by the water absorption coefficient W_w .

The procedure for designing insulation on the inside according to [2] includes:

- evaluation of the existing condition (determination of the moisture level, determination of the presence of salts, determination of the capillary absorption of the masonry);
- design criteria (frost resistance, interlayer condensation and increased moisture in the components of the insulated system, critical surface moisture and risk of mold growth, influence of thermal bridges).

Good quality insulation from the inside is guaranteed by: a professionally prepared design (reliable calculations, detailed architectural and construction drawings with particular attention to detail); the execution of the work by qualified workers; the phased control of the work and the use of very good quality insulation materials.

The main advantage of insulating from the inside is that weather conditions do not affect the execution of the work, while disadvantages include a reduction in the usable area of the rooms in the building and poorer sound insulation than

stwy konstrukcyjnej w strefę przemarzania. Podstawową zaletą ocieplenia od wewnątrz jest zmniejszenie ilości energii niezbędnej do ogrzania pomieszczeń o żądanej temperaturze oraz skrócenie czasu nagrzewania.

Do grupy materiałów do ocieplenia od wewnątrz, stosowanych w Polsce, można zaliczyć m.in.: bloczki z lekkiej odmiany betonu komórkowego; płyty rezolowe; płyty perlitowe; płyty z wełny drzewnej. Wartości parametrów fizykalnych przegród zewnętrznych i ich złączy zależą przede wszystkim od współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)], współczynnika oporu dyfuzyjnego μ [-] oraz dyfuzyjnie równoważnej grubości warstwy powietrza $s_d = \mu \cdot d$ [m] materiałów izolacyjnych.

Zgodnie z [2] **metody ocieplenia od strony wewnętrznej** są następujące:

- zapobiegająca wystąpieniu kondensacji międzywarstwowej (zaleca się rozwiązanie, w którym wartość dyfuzyjnie równoważnej grubości warstwy powietrza s_d izolacji lub zastosowanej paroizolacji przekracza 1500 m; zastosowanie szczelnej warstwy izolacji uniemożliwia dyfuzję pary wodnej i całkowicie eliminuje ryzyko kondensacji pary wodnej);
- minimalizująca wystąpienie kondensacji (dopuszcza się stosowanie materiałów, w przypadku których dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza s_d wynosi 0,5 – 1500 m, takich jak np. płyty z polistyrenu ekspandowanego (EPS) z płytą gipsowo-kartonową lub materiały izolacyjne z folią paroizolacyjną; tak duże zróżnicowanie wielkości s_d wpływa niejednoznacznie na ocenę poprawności ocieplenia);
- dopuszczająca wystąpienie kondensacji (rozwiązanie, w którym stosowane są materiały, których dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza s_d jest mniejsza od 0,5 m, jak np. bloczki z lekkiego betonu komórkowego);
- limitowanego oporu cieplnego, tj. dobór grubości izolacji termicznej w zależności od jej paroprzepuszczalności wyrażonej przez s_d oraz wodochłonności podłoża (powłoki zewnętrznej) wyrażonej współczynnikiem absorpcji wody W_w .

Procedura projektowania ocieplenia od wewnątrz wg [2] obejmuje:

- ocenę stanu istniejącego (określenie poziomu zawilgoceń, oznaczenie obecności soli, oznaczenie chłonności kapilarnej muru);
- kryteria projektowe (mrozoodporność, kondensacja międzywarstwowa i wzrost zawilgoceń składowych izolowanego układu, krytyczna wilgotność powierzchni i ryzyko rozwoju pleśni, wpływ mostków cieplnych).

Dobrą jakość ocieplenia od wewnątrz gwarantuje: profesjonalnie przygotowany projekt (miarodajne obliczenia, szczegółowe rysunki architektoniczno-budowlane ze szczególnym zwróceniem uwagi na detale); wykonanie prac przez wykwalifikowanych pracowników; etapowe kontrolowanie prac i zastosowanie bardzo dobrej jakości materiałów do ocieplenia.

Podstawową zaletą ocieplenia od wewnątrz jest to, że warunki pogodowe nie mają wpływu na realizację prac, natomiast do wad można zaliczyć m.in. zmniejszenie powierzchni użytkowej pomieszczeń w budynku oraz gorszą izolacyjność akustyczną niż w przypadku ocieplenia od strony ze-

insulation from the outside. Detailed analyses of the design and execution of thermal insulation of partitions from the inside are presented, among others, in publications [2, 3, 4, 5].

General rules for the calculation of physical parameters of construction joints

A comprehensive assessment of the thermal quality of building elements insulated from the inside involves the analysis of many parameters. The joint calculation procedure according to the proprietary algorithm [6] includes the following steps:

- adopting the material arrangement of the construction joint;
- performing numerical calculations: modelling the joints; assuming boundary conditions (internal air temperature t_i , external air temperature t_e and heat transfer resistance on the internal side R_{si} and external side R_{se}); assuming the value of the heat transfer coefficient λ of the materials of the joint;
- determination of the physical parameters of the joints, such as: heat flux Φ ; linear heat transfer coefficient Ψ ; minimum temperature at the internal surface of the partition at the thermal bridge t_{min} , temperature factor f_{Rsi} ;
- criteria for assessing construction joints: thermal criterion (heat transfer coefficient U , linear heat transfer coefficient Ψ); humidity criterion (temperature factor f_{Rsi});
- selection of the correct material arrangement for the construction joint.

The resulting values for the physical parameters of the construction joints depend on the construction products used (among other things structural), including the type and thickness of thermal insulation and the shape of the material structure of the joint under analysis. The use of approximate and indicative values, e.g., in accordance with PN-EN ISO 14683:2008 [7], becomes unjustified, as they do not take into account variations in material arrangements and the type and thickness of thermal insulation. According to [8], the accuracy of the calculation methods for thermal bridges is respectively:

- numerical calculations: $\pm 5\%$;
- catalogue of thermal bridges $\pm 20\%$;
- manual calculations $\pm 20\%$;
- indicative values 0.50%.

It is advisable to carry out individual numerical calculations of the construction joints in order to obtain reliable calculation results for the insulation design and to select the correct material solution taking into account the thermal and moisture requirements.

Examples of construction joints before and after thermal insulation on the inside

The calculation examples concern the design of material arrangements for two joints: the external wall connection at the corner and the external wall/ceiling connection in the section through the tie beam. Achieving a low U_c value for the external wall does not guarantee the effect of minimizing heat loss by H_{Tr} penetration and reducing the occurrence of surface condensation (temperature reduction at the internal surface of the partition) and interlayer condensation. For the calculations in the TRISCO-KOBRU 86 computer software [9], the following assumptions were made:

wewnętrznej. Szczegółowe analizy dotyczące projektowania i wykonywania ocieplenia przegród od wewnątrz przedstawiono m.in. w publikacjach [2, 3, 4, 5].

Ogólne zasady wykonywania obliczeń parametrów fizycznych złączy budowlanych

Kompleksowa ocena jakości cieplnej elementów budynków ocieplonych od wewnątrz obejmuje analizę wielu parametrów. Procedura obliczeń złączy wg autorskiego algorytmu [6] obejmuje następujące etapy:

- przyjęcie układu materiałowego złącza budowlanego;
- wykonanie obliczeń numerycznych: modelowanie złączy; przyjmowanie warunków brzegowych (temperatury powietrza wewnętrznego t_i i zewnętrznego t_e oraz oporu przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej R_{si} i zewnętrznej R_{se}); przyjęcie wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ materiałów złącza;
- określenie parametrów fizycznych złączy, takich jak: strumień ciepły Φ ; liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ ; temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego t_{min} , czynnik temperaturowy f_{Rsi} ;
- kryteria oceny złączy budowlanych: kryterium cieplne (współczynnik przenikania ciepła U , liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ); kryterium wilgotnościowe (czynnik temperaturowy f_{Rsi});
- wybór poprawnego układu materiałowego złącza budowlanego.

Uzyskane wartości parametrów fizycznych złączy budowlanych zależą od zastosowanych wyrobów budowlanych (m.in. konstrukcyjnych), w tym rodzaju i grubości izolacji cieplnej oraz ukształtowania struktury materiałowej analizowanego złącza. Posługiwanie się wartościami przybliżonymi i orientacyjnymi, np. zgodnie z PN-EN ISO 14683:2008 [7], staje się nieuzasadnione, ponieważ nie uwzględniają one zmiany układów materiałowych oraz rodzaju i grubości termoizolacji. Zgodnie z [8] dokładność metod obliczeń mostków cieplnych wynosi odpowiednio:

- obliczenia numeryczne: $\pm 5\%$;
- katalog mostków cieplnych $\pm 20\%$;
- obliczenia ręczne $\pm 20\%$;
- wartości orientacyjne 0,50%.

Zaleca się wykonywanie indywidualnych obliczeń numerycznych złączy budowlanych, aby uzyskać miarodajne wyniki obliczeń do opracowania projektu ocieplenia i wybrać poprawne rozwiązanie materiałowe z uwzględnieniem wymagań cieplno-wilgotnościowych.

Przykładowe złącza budynków przed i po dociepleniu od strony wewnętrznej

Przykłady obliczeniowe dotyczą kształtowania układów materiałowych dwóch złączy: połączenia ścian zewnętrznych w narożniku oraz połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec. Osiągnięcie niewielkiej wartości współczynnika przenikania ciepła U_c ściany zewnętrznej nie gwarantuje efektu minimalizacji strat ciepła przez przenikanie H_{Tr} oraz ograniczenia występowania kondensacji powierzchniowej (obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody) i międzywarstwowej. Do obliczeń w programie komputerowym TRISCO-KOBRU 86 [9], przyjęto następujące założenia:

- 37 cm thick solid brick external wall ($\lambda = 0.77 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) with $U = 1.54 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, insulated with 12 cm thick lightweight cellular concrete blocks ($\lambda = 0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) with $U = 0.27 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ or 12 cm thick polyurethane foam boards ($\lambda = 0.022 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) with $U = 0.16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

- floating floor: 12 cm thick reinforced concrete floor ($\lambda = 1.80 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 3 cm thick hardboard ($X = 0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 3 cm thick concrete screed ($X = 1.00 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 2 cm thick wooden parquet ($\lambda = 0.18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$);

- 3 cm thick insulation of the underside of the ceiling (lightweight cellular concrete or polyurethane foam boards);

- joint modelling was performed according to the principles presented in PN-EN ISO 10211:2017 [10];

- heat transfer resistances (R_{si} , R_{se}) are adopted in accordance with EN ISO 6946 [11] for the calculation of heat fluxes ($R_{si} = 0.13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$ – for horizontal heat flow; $R_{si} = 0.10 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$ – for upward heat flow; $R_{si} = 0.17 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$ – downward heat flow; $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$) and PN-EN ISO 13788 [12] for the calculation of temperature and temperature medium distribution ($R_{si} = 0.25 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$; $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$);

- indoor air temperature $t_i = 20^\circ\text{C}$ (living room); outdoor air temperature $t_e = -20^\circ\text{C}$ (zone III);

- the values for the thermal conductivity coefficient of building materials $\lambda \text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ were taken from the tables presented in [13].

The first joint (connection of homogeneous external walls at the corner) was analyzed in three design variants (Figure 1):

- **variant I** – 37 cm thick solid brick corner without insulation;

- **variant II** – 37 cm thick solid brick corner insulated on the inside (insulation of two branches):

- a) with 12 cm thick lightweight cellular concrete blocks;

- b) with 12 cm thick polyurethane foam boards;

- **variant III** – 37 cm thick solid brick corner insulated on the inside (insulation of only one branch):

- ściana zewnętrzna z cegły pełnej grubości 37 cm ($\lambda = 0.77 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) o $U = 1.54 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, ocieplona bloczkami z lekkiej odmiany betonu komórkowego grubości 12 cm ($\lambda = 0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) o $U = 0.27 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ lub płytami z pianki poliuretanowej grubości 12 cm ($\lambda = 0.022 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) o $U = 0.16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

- podłoga pływająca: strop żelbetowy grubości 12 cm ($\lambda = 1.80 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), płyta pilśniowa twarda grubości 3 cm ($\lambda = 0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), wylewka betonowa grubości 3 cm ($\lambda = 1.00 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), parkiet drewniany grubości 2 cm ($\lambda = 0.18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$);

- ocieplenie dolnej powierzchni stropu grubości 3 cm (lekka odmiana betonu komórkowego lub płyty z pianki poliuretanowej);

- modelowanie złączy wykonano zgodnie z zasadami przedstawionymi w PN-EN ISO 10211:2017 [10];

- opory przejmowania ciepła (R_{si} , R_{se}) przyjęto zgodnie z PN-EN ISO 6946 [11] przy obliczeniach strumieni ciepłych ($R_{si} = 0.13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$ – w przypadku poziomego przepływu ciepła; $R_{si} = 0.10 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$ – przepływ ciepła w górę; $R_{si} = 0.17 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$ – przepływ ciepła w dół; $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$) oraz PN-EN ISO 13788 [12] przy obliczeniach rozkładu temperatury i czynnika temperaturowego ($R_{si} = 0.25 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$; $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$);

- temperatura powietrza wewnętrznego $t_i = 20^\circ\text{C}$ (pokój dzienny); temperatura powietrza zewnętrznego $t_e = -20^\circ\text{C}$ (III strefa);

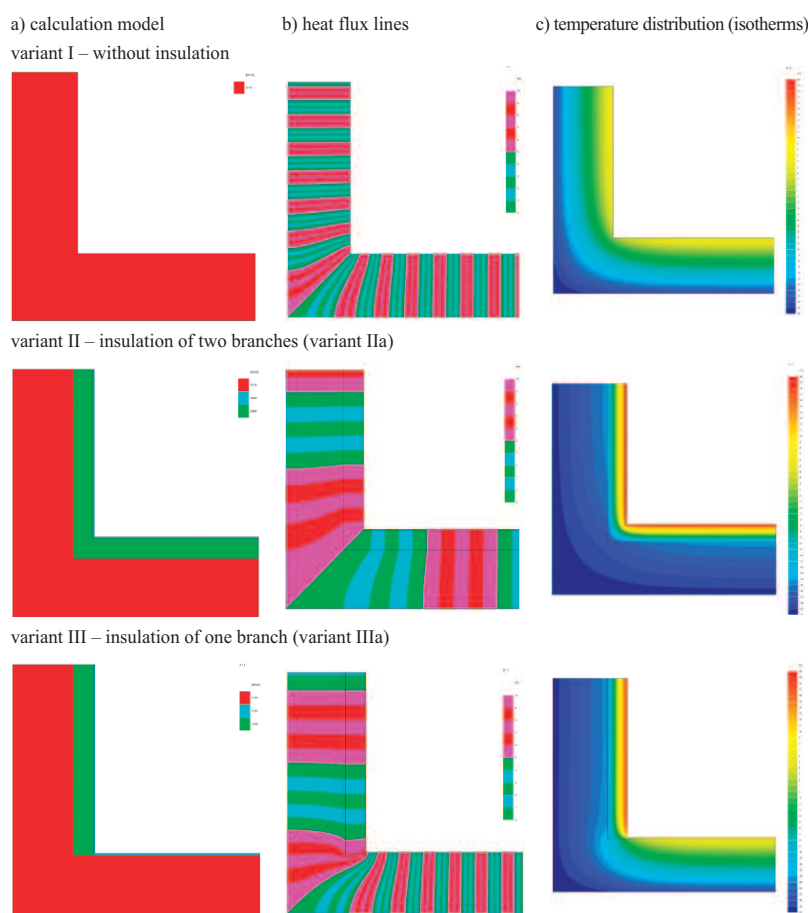


Fig. 1. Results of computer simulation of the external wall connection in the corner
Rys. 1. Wyniki symulacji komputerowej połączenia ściany zewnętrznej w narożniku

- wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych $\lambda \text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ przyjęto na podstawie tabel prezentowanych w [13].

Pierwsze złącze (połączenie jednorodnych ścian zewnętrznych w narożniku) analizowano w trzech wariantach obliczeniowych (rysunek 1):

- **wariant I** – narożnik z cegły pełnej grubości 37 cm bez ocieplenia;

- **wariant II** – narożnik z cegły pełnej grubości 37 cm ocieplony od wewnątrz (ocieplenie dwóch gałęzi):

- a) bloczkami z lekkiej odmiany betonu komórkowego grubości 12 cm;

- b) płytami z pianki poliuretanowej grubości 12 cm;

- **wariant III** – narożnik z cegły pełnej grubości 37 cm ocieplony od wewnątrz (ocieplenie tylko jednej gałęzi):

a) with 12 cm thick lightweight cellular concrete blocks;

b) with 12 cm thick polyurethane foam boards.

The results of the calculation of the physical parameters of the analyzed corners using the computer software [9] are summarized in Table 1. **The connection between the external wall and the ceiling** in the section through the tie beam was also analyzed in three design variants (Figure 2):

- **variant I** – without external wall insulation;

- **variant II** – insulation of walls on the inside:

a) with 12 cm thick lightweight cellular concrete blocks;

b) with 12 cm thick polyurethane foam boards;

- **variant III** – insulation on the inside:

a) with lightweight cellular concrete blocks for the 12 cm thick walls of the lower floor area with a thickness of 3 cm;

b) with polyurethane foam boards for the 12 cm thick walls of the lower floor area with a thickness of 3 cm.

Results of calculations using the computer software [9] are presented in Table 2. The physical parameters of the joints analyzed depend on their individual arrangement of material layers. The location of the insulation (the layer of thermal insulation material) is important. Inadequate shaping of the material layers (lack of thermal insulation or lack of continuity) results in increased heat loss in the form of heat flux Φ [W] and linear heat transfer coefficient Ψ_i [W/(m·K)], as well as reduced temperature at the internal surface of the partition at the thermal bridge location, which may lead to the risk

Table 1. Results of calculations of the physical parameters of the connection of external walls in the corner (own study)

Tabela 1. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych połączenia ścian zewnętrznych w narożniku (opracowanie własne)

Calculation variant /Wariant obliczeniowy	U [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	Ψ _i [W/(m·K)]	t _{min} [°C]	f _{Rsi} [-]
I	1,54	132,79	0,245	0,88	0,522
II a	0,27	22,97	0,030	14,77	0,869
II b	0,16	13,71	0,017	16,74	0,919
III a	0,27/1,48	79,29	0,197	2,01	0,550
III b	0,16/1,48	74,52	0,200	1,94	0,548

U – heat transfer coefficient of the external wall; Φ – heat flux through the joint; Ψ_i – linear heat transfer coefficient (along internal dimensions); t_{min} – minimum temperature on the internal surface of the partition; f_{Rsi} – temperature factor
 U – współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej; Φ – strumień ciepły przepływający przez złącze; Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach wewnętrznych); t_{min} – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody; f_{Rsi} – czynnik temperaturowy

- **variant II** – ocieplenie ścian od wewnątrz:

a) blokami z lekkiej odmiany betonu komórkowego grubości 12 cm;

a) blokami z lekkiej odmiany betonu komórkowego grubości 12 cm;

b) płytami z pianki poliuretanowej grubości 12 cm.

Wyniki obliczeń parametrów fizycznych analizowanych narożników z zastosowaniem programu komputerowego [9] zestawiono w tabeli 1. **Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem** w przekroju przez wieniec analizowano również w trzech wariantach obliczeniowych (rysunek 2):

- **variant I** – bez ocieplenia ścian zewnętrznych;

- **variant II** – ocieplenie ścian od wewnątrz:

a) blokami z lekkiej odmiany betonu komórkowego grubości 12 cm;

b) płytami z pianki poliuretanowej grubości 12 cm;

- **variant III** – ocieplenie od wewnątrz:

a) blokami z lekkiej odmiany betonu komórkowego ściany grubości 12 cm dolnej powierzchni stropu grubości 3 cm;

b) płytami z pianki poliuretanowej ściany grubości 12 cm dolnej powierzchni stropu grubości 3 cm.

Wyniki obliczeń z zastosowaniem programu komputerowego [9] zestawiono w tabeli 2. Parametry fizyczne analizowanych złączy zależą od ich indywidualnego układu warstw materiałowych. Istotne znaczenie ma usytuowanie ocieplenia (warstwy materiału termoizolacyjnego). Niewłaściwe kształtowanie warstw materiałowych (brak izolacji cieplnej lub brak jej ciągłości) powoduje zwiększone straty ciepła w postaci strumienia ciepła Φ [W] i liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_i [W/(m·K)] oraz obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego, co może prowadzić do ryzyka występowania

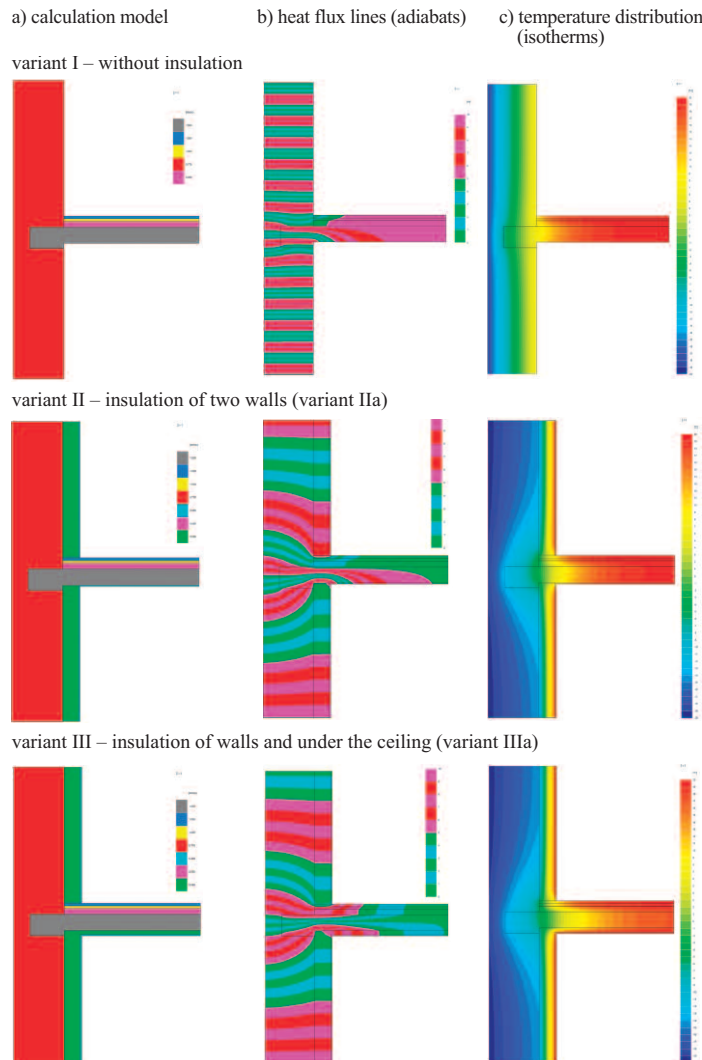


Fig. 2. Results of computer simulation of the connection of the external wall with the ceiling

Rys. 2. Wyniki symulacji komputerowej połączenia ściany zewnętrznej ze stropem

of surface condensation (Tables 1 and 2) and interlayer condensation.

On the basis of the calculations carried out (Table 1), it was found that insulating only one branch of the corner from the inside increases the heat loss and lowers the temperature on the internal surface of the partition at the point of the thermal bridge. On the other hand, in the case of the second joint, application of wall insulation from the inside results in reduction of heat loss (heat flux Φ), but in the lower joint between the external wall and the ceiling the temperature is significantly reduced to the level of 8.27 – 8.52°C, which leads to the risk of occurrence of surface condensation (risk of biological corrosion). Additional insulation of the lower surface of the ceiling with thermal insulation material 3 – 5 cm thick minimizes this phenomenon (Table 2). A high Ψ value does not automatically imply the existence of a thermal bridge. As defined, the Ψ values are treated as correction factors for the calculation of one-dimensional heat losses, by means of which the geometrical aspect (determined by the adoption of dimensions) should be taken into account as much as the increase in heat flux. An example classification of the impact of thermal bridges, depending on the value of the linear heat transfer coefficient [8], is as follows:

- very high impact if $\Psi \geq 0.50$ W/(m·K);
- high impact if $\Psi = 0.25 \div 0.50$ W/(m·K);
- low impact if $\Psi = 0.10 \div 0.25$ W/(m·K);
- negligible impact if $\Psi < 0.10$ W/(m·K).

Based on the calculations and analyses carried out for heat loss in the two-dimensional (2D) field, it was found that **the introduction of thermal insulation on the inside results in a significant reduction in the heat flux value Φ of the joints** compared to joints without insulation. For this reason, the assessment of the joint on the basis of the linear heat transfer coefficient Ψ alone is unjustified.

Table 3 summarizes the calculation results and assumed values of the linear heat transfer coefficient based on the standard [7], together with the classification of thermal bridges. It should be noted that there are large discrepancies between the values for the linear heat transfer coefficient Ψ obtained from the authors' own calculations and those derived from the standard [7]. For this reason, the data according to [7] should only be used for the so-called thermal bridge impact estimation. On the other hand, for calculations and thermal-moisture and energy analyses, one should use their own calculations or professional thermal bridge catalogues.

The check for the risk of mold growth at the thermal bridge location is carried out by comparing the design value of the temperature factor at the thermal bridge location f_{Rsi} (Tables 1

Table 2. Results of calculations of the physical parameters of the connection between the external wall and the ceiling (own study)

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych połączenia ściany zewnętrznej ze stropem (opracowanie własne)

Calculation variant/ Wariant obliczeniowy	U [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	Ψ _i [W/(m·K)]	t _{min} [°C]	f _{Rsi} [-]
I	1,54	140,66	0,418	6,16/8,73	0,654
II a	0,27	41,47	0,492	8,52/10,53	0,713
II b	0,16	33,90	0,521	8,27/10,38	0,707
III a	0,27	37,49	0,404	14,70/9,44	0,736
III b	0,16	28,87	0,402	16,35/8,91	0,723

U – heat transfer coefficient of the external wall; Φ – heat flux through the joint; Ψ_i – linear heat transfer coefficient (along internal dimensions); t_{min} – minimum temperature on the internal surface of the partition; f_{Rsi} – temperature factor
 U – współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej; Φ – strumień ciepły przepływający przez złącze; Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach wewnętrznych); t_{min} – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody; f_{Rsi} – czynnik temperaturowy

nia kondensacji powierzchniowej (tabela 1 i 2) oraz kondensacji międzywarstwowej.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń (tabela 1) stwierdzono, że ocieplenie od wewnątrz tylko jednej gałęzi narożnika powoduje zwiększenie strat ciepła oraz obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego. Natomiast w przypadku drugiego złącza zastosowanie ocieplenia ścian od wewnątrz powoduje zmniejszenie strat ciepła (strumienia ciepłego Φ), lecz w dolnym styku połączenia ściany zewnętrznej ze stropem następuje

znaczne obniżenie temperatury do poziomu 8,27 – 8,52°C, co prowadzi do ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej (ryzyko korozji biologicznej). Dodatkowo ocieplenie dolnej powierzchni stropu materiałem termoizolacyjnym grubości 3 – 5 cm powoduje minimalizację tego zjawiska (tabela 2). Duża wartość współczynnika Ψ nie oznacza automatycznie istnienia mostka cieplnego. Zgodnie z definicją, wartości Ψ traktowane są jako współczynniki korekcyjne do obliczeń jednowymiarowych strat ciepła, za pomocą których aspekt geometryczny (określony przez przyjęcie wymiarów) powinien być tak samo uwzględniony, jak zwiększenie strumienia ciepłego. Przykładowa klasyfikacja wpływu mostków cieplnych, w zależności od wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła [8], przedstawia się następująco:

- bardzo duży wpływ, jeżeli $\Psi \geq 0,50$ W/(m·K);
- duży wpływ, jeżeli $\Psi = 0,25 \div 0,50$ W/(m·K);
- mały wpływ, jeżeli $\Psi = 0,10 \div 0,25$ W/(m·K);
- pomijalny wpływ, jeżeli $\Psi < 0,10$ W/(m·K).

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz dotyczących strat ciepła w polu dwuwymiarowym (2D) stwierdzono, że **wprowadzenie izolacji cieplnej od strony wewnętrznej powoduje znaczne zmniejszenie wartości strumienia ciepła Φ złączy** w porównaniu ze złączami bez ocieplenia. Z tego powodu ocena złącza tylko na podstawie liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ jest nieuzasadniona.

W tabeli 3 zestawiono wyniki obliczeń oraz przyjmowane wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła na podstawie normy [7] wraz z klasyfikacją mostków cieplnych. Należy zauważyć duże rozbieżności pomiędzy wartościami liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ otrzymanymi na podstawie obliczeń własnych oraz wynikającymi z normy [7]. Z tego powodu dane wg [7] powinny być stosowane tylko w przypadku tzw. szacowania wpływu mostka cieplnego. Natomiast podczas obliczeń oraz analiz ciepłno-wilgotnościowych i energetycznych należy korzystać z obliczeń własnych lub profesjonalnych katalogów mostków cieplnych.

Sprawdzenie ryzyka rozwoju pleśni w miejscu mostka cieplnego przeprowadza się za pomocą porównania wartości obliczeniowej czynnika temperaturowego w miejscu mostka cieplnego f_{Rsi} (tabela 1 i 2) z wartością graniczną (krytyczną)

Table 3. Comparative analysis of the results of calculations of physical parameters and assessment of the impact of selected internally insulated joints

Tabela 3. Analiza porównawcza wyników obliczeń parametrów fizycznych oraz ocena wybranych złączy ocieplonych od wewnątrz

The analyzed construction joint/Analizowane złącze budowlane	Linear heat transfer coefficient Ψ_i [W/(m ² ·K)]/ Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ_i [W/(m ² ·K)]	
	author's calculations/ obliczenia własne	according to PN-EN ISO 14683 [7]/ wg PN-EN ISO 14683 [7]
Connection of external walls in a corner (without insulation) – variant I/ Połączenie ścian zewnętrznych w narożniku (bez ocieplenia) – wariant I	0,245 (low impact/mały wpływ)	(C4) 0,10 (low impact/mały wpływ)
Connection of external walls in a corner (insulation of two branches) – variant IIa/ Połączenie ścian zewnętrznych w narożniku (ocieplenie dwóch gałęzi) – wariant IIa	0,030 (negligible impact/pomijalny wpływ)	(C3) 0,05 (negligible impact/pomijalny wpływ)
Connection of external walls in a corner (insulation of two branches) – variant IIb/ Połączenie ścian zewnętrznych w narożniku (ocieplenie dwóch gałęzi) – wariant IIb	0,017 (negligible impact/pomijalny wpływ)	(C3) 0,05 (negligible impact/pomijalny wpływ)
Connection of external walls in a corner (insulation of one branch) – variant IIIb/ Połączenie ścian zewnętrznych w narożniku (ocieplenie jednej gałęzi) – wariant IIIa	0,197 (low impact/mały wpływ)	no data
Connection of external walls in a corner (insulation of one branch) – variant IIIb/ Połączenie ścian zewnętrznych w narożniku (ocieplenie jednej gałęzi) – wariant IIIb	0,200 (low impact/mały wpływ)	no data
Connection of an external wall with the ceiling – variant I/ Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem (bez ocieplenia) – wariant I	0,418 (high impact/duży wpływ)	(IF4) 0,80 (very high impact/bardzo duży wpływ)
Connection of an external wall with the ceiling (wall insulation) – variant IIa/ Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem (ocieplenie ścian) – wariant IIa	0,492 (high impact/duży wpływ)	(IF3) 1,00 (very high impact/bardzo duży wpływ)
Connection of an external wall with the ceiling (wall insulation) – variant IIb/ Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem (ocieplenie ścian) – wariant IIb	0,521 (high impact/duży wpływ)	(IF3) 1,00 (very high impact/bardzo duży wpływ)
Connection of an external wall with the ceiling (insulation of the walls and the ceiling) – variant IIIa/Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem (ocieplenie ścian i stropu) – wariant IIIa	0,404 (high impact/duży wpływ)	no data
Connection of an external wall with the ceiling (insulation of the walls and the ceiling) – variant IIIb/Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem (ocieplenie ścian i stropu) – wariant IIIb	0,402 (high impact/duży wpływ)	no data

and 2) with the limit (critical) value $f_{Rsi(crit)}$. If the inequality $f_{Rsi} \geq f_{Rsi(crit)}$ is passed, there is no risk of surface condensation (risk of mold growth).

The critical temperature factor $f_{Rsi(crit)}$ can be determined:

- in a simplified manner for $t_i = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\%$ $f_{Rsi(crit)} = 0.72$;
- in an accurate manner (taking into account outdoor and indoor air parameters).

The procedures for its calculation are outlined in [13], among others. The critical value of the temperature factor $f_{Rsi(crit)}$ for the third humidity class in the room at $t_i = 20^\circ\text{C}$ is: in Bydgoszcz $f_{Rsi(crit)} = 0.785$; in Warsaw $f_{Rsi(crit)} = 0.789$, respectively. On the basis of the calculations carried out (Tables 1 and 2), it was concluded that there was a risk of surface condensation in some of the calculation variants, as the inequality $f_{Rsi} \geq f_{Rsi(crit)}$ was not met. Furthermore, by analyzing the temperature distribution diagrams (isotherm distribution) in the joints analyzed (Figures 1 and 2), it was found that the brick masonry layer is at a temperature below 0°C . This phenomenon contributes to the risk of condensation inside the partition (inside the construction joint).

Checking the risk of interlayer condensation in the construction external partitions and joints requires computer simulations taking into account the parameters of the external and internal air in accordance with the standard [12]. Detailed calculations and analyses are presented in [2, 4], among others.

The calculation examples presented are not exhaustive of all the characteristic joints in a building after insulation from the inside. In the appendix to [14], datasheets for thermal bridges were compiled, taking into account the type and thickness of the thermal insulation material.

$f_{Rsi(kryt)}$. W przypadku, gdy spełniona jest nierówność $f_{Rsi} \geq f_{Rsi(kryt)}$ nie występuje ryzyko kondensacji powierzchniowej (ryzyko rozwoju pleśni).

Krytyczny czynnik temperaturowy $f_{Rsi(kryt)}$ można określić:

- w sposób uproszczony dla $t_i = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\%$, $f_{Rsi(kryt)} = 0,72$;
- w sposób dokładny (uwzględniając parametry powietrza zewnętrznego i wewnętrznego).

Procedury jego obliczania przedstawiono m.in. w [13]. Wartość krytyczna czynnika temperaturowego $f_{Rsi(kryt)}$ w przypadku trzeciej klasy wilgotności w pomieszczeniu przy $t_i = 20^\circ\text{C}$ wynosi odpowiednio: w Bydgoszczy $f_{Rsi(kryt)} = 0,785$; w Warszawie $f_{Rsi(kryt)} = 0,789$. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń (tabele 1 i 2) stwierdzono, że w niektórych wariantach obliczeniowych istnieje ryzyko kondensacji powierzchniowej, ponieważ nie została spełniona nierówność $f_{Rsi} \geq f_{Rsi(kryt)}$. Ponadto analizując wykresy rozkładu temperatury (rozkład izoterm) w analizowanych złączach (rysunki 1 i 2) stwierdzono, że warstwa muru z cegły znajduje się w temperaturze poniżej 0°C . Takie zjawisko przyczynia się do ryzyka kondensacji wewnątrz przegrody (wewnątrz złącza budowlanego).

Sprawdzenie ryzyka występowania kondensacji międzywarstwowej w przegrodach zewnętrznych i złączach budowlanych wymaga przeprowadzania symulacji komputerowej z uwzględnieniem parametrów powietrza zewnętrznego i wewnętrznego zgodnie z normą [12]. Szczegółowe obliczenia i analizy zaprezentowano m.in. w [2, 4].

Przedstawione przykłady obliczeniowe nie wyczerpują wszystkich charakterystycznych złączy w budynku po ociepleniu od wewnątrz. W załączniku do [14] zestawiano karty katalogowe mostków cieplnych z uwzględnieniem rodzaju i grubości materiału termoizolacyjnego.

Summary and conclusions

The large range of materials to insulate from the inside does not guarantee an improvement in the thermal quality of the cladding elements of retrofitted buildings. This can only be achieved if the designer and the contractor have adequate knowledge of the thermal and moisture phenomena in the insulation, and if the insulation design is professionally prepared and the work carried out in accordance with the design. The material solution for insulating the building partitions on the interior side depends on the following factors: the use of the premises; the type of wall construction material and the material used for insulation; the technology of fixing additional thermal insulation.

Taking into account the **thermal criterion** (minimizing heat loss through the building partitions, taking into account stationary heat flow in 2D and 3D fields) and the **humidity criterion** (limiting the occurrence of surface condensation), it is possible to correctly shape the arrangements of the material layers of the envelope of retrofitted buildings. It is becoming necessary to develop construction joint charters for insulation on the inside. In addition, the regulation [1] should specify a maximum value for the linear heat transfer coefficient Ψ_{\max} of 2D joints. It is also proposed that the temperature factor limit of 0.72 be withdrawn from the regulation [1] and that (critical) limits be defined for the chosen building location and conditions of use. This will allow the elimination of erroneously designed structural joints taking into account thermal and moisture requirements, and ultimately improve the quality of the proposed structural and material solutions for the building envelope elements (construction partitions and joints).

Received: 22.04.2024
Revised: 07.06.2024

Podsumowanie i wnioski

Duża gama materiałów do ocieplenia od wewnątrz nie gwarantuje poprawy jakości cieplnej elementów obudowy modernizowanego budynku. Można ją uzyskać jedynie w przypadku odpowiedniej wiedzy projektanta i wykonawcy dotyczącej zjawisk ciepło-wilgotnościowych przy ociepleniu oraz profesjonalnie przygotowanego projektu ocieplenia i wykonania prac zgodnie z projektem. Rozwiązanie materiałowe ocieplenia przegród budynku od strony wewnętrznej zależy od następujących czynników: eksploatacja pomieszczeń; rodzaj materiału konstrukcyjnego ścian oraz materiału użytego do ocieplenia; technologia zamocowania dodatkowej termoizolacji.

Uwzględniając **kryterium cieplne** (minimalizacja strat ciepła przez przegrody budowlane z uwzględnieniem stacjonarnego przepływu ciepła w polu 2D i 3D) oraz **kryterium wilgotnościowe** (ograniczenie występowania kondensacji powierzchniowej), istnieje możliwość poprawnego ukształtowania układów warstw materiałowych obudowy budynków modernizowanych. Niezbędne staje się opracowanie kart złączy budowlanych z zastosowaniem ocieplenia od wewnątrz. Ponadto w rozporządzeniu [1] powinna być określona wartość maksymalna liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_{\max} złączy dwuwymiarowych 2D. Proponuje się także wycofanie wartości granicznej czynnika temperaturowego na poziomie 0,72 z rozporządzenia [1] oraz określenie wartości granicznych (krytycznych) w przypadku wybranej lokalizacji budynku oraz warunków jego użytkowania. Pozwoli to na wyeliminowanie błędnie zaprojektowanych węzłów konstrukcyjnych z uwzględnieniem wymagań ciepło-wilgotnościowych, a w efekcie poprawi jakość proponowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych elementów obudowy budynku (przegród i złączy budowlanych).

Wpłynął do redakcji: 22.04.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 07.06.2024 r.

Literature

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 14 listopada 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2017 r. poz. 2285 z późn. zmianami; Dz.U. z 2022 r., poz. 248).
- [2] Orlik-Koźdoń B. Projektowanie izolacji termicznej ścian zewnętrznych od wewnątrz w budynkach historycznych. W: Naprawy i wzmocnienia konstrukcji. Budownictwo ogólne. XXXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 9-12 kwietnia 2024. T. 1, Wykłady/Drobiec Łukasz (red.), 2024, Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa. Oddział w Bielsku-Białej, s. 375-426.
- [3] Orlik-Koźdoń B. Prognozowanie stanu wilgotnościowego ścian ocieplanych od wewnątrz w budynkach historycznych z cegły. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2022.
- [4] Orlik-Koźdoń B. Interior Insulation of Masonry Walls – Selected Problems in the Design. *Energies*. 2019, 12, 3895, s. 1-22.
- [5] Wójcik R. Docieplenie budynków od wewnątrz. Grupa Wydawnicza Medium Warszawa 2017.
- [6] Pawłowski K. Przykład kształtowania układów materiałowych elementów obudowy budynków niskoenergetycznych. *Materiały Budowlane*. 2023; 4: 41 – 44.

- [7] PN-EN ISO 14683:2017 Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne.
- [8] Wouters P, Schietecata J, Standaert P, Kasperkiewicz K. Ciepło-wilgotnościowa ocena mostków cieplnych. Wydawnictwo ITB, Warszawa 2004.
- [9] Program komputerowy TRISCO-KOBRU 86.
- [10] PN-EN ISO 10211:2017 Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe.
- [11] PN-EN ISO 6946:2017 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [12] PN-EN ISO 13788:2003 Ciepło-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej umożliwiająca uniknięcie krytycznej wilgotności powierzchni wewnętrznej kondensacji. Metody obliczania.
- [13] Pawłowski K. Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków. Obliczenia ciepło-wilgotnościowe przegród zewnętrznych i ich złączy. Grupa MEDIUM, Warszawa 2016.
- [14] Pawłowski K. Kształtowanie układów materiałowych przegród zewnętrznych i ich złączy w aspekcie ciepło-wilgotnościowym. Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2020 r.