

Obliczenia numeryczne wybranych mostków termicznych w ścianach z betonu komórkowego

The numeric calculation of selected thermal bridges in the walls of AAC

1. Wprowadzenie

Terminem mostek cieplny (termiczny) określa się takie miejsce w obudowie zewnętrznej budynku, w którym w wskutek zmiany właściwości wchodzących w jej skład składników dochodzi do zwiększenia strumienia ciepła. W miejscach objętych takim zaburzeniem najczęściej obserwuje się zmianę temperatury na powierzchni wewnętrznej, co ma ważne znaczenie dla uniknięcia ryzyka kondensacji pary wodnej na powierzchni lub we wnętrzu ściany. Ze względu na możliwość zwiększenia strat ciepła przez przegrody zewnętrzne budynku oraz kondensacji pary wodnej na ich wewnętrznej powierzchni mostek termiczny jest zjawiskiem niepożądanym. Specyfika przepływu ciepła w elementach budowlanych powoduje, iż nie ma możliwości uniknięcia tego zjawiska. Rolą projektanta jest taki dobór rozwiązań materiałowych, konstrukcyjnych i technologicznych, aby minimalizować negatywny wpływ mostków cieplnych. Obecnie dostępne są liczne narzędzia, szczególnie w postaci programów komputerowych, które pozwalają na analizę transportu ciepła w przegrodach budowlanych. Opisywana sytuacja pozwala na wykonanie szczegółowych obliczeń numerycznych i analiz przy projektowaniu detali budowlanych, co w końcu powinno doprowadzić do ograniczenia niekorzystnych skutków, związanych z mostkami termicznymi. Analiza uzyskanych wyników obliczeń numerycznych dotyczących mostków termicznych pozwala na wybór najlepszego wariantu spośród dopuszczalnych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych. Kryterium wyboru może być na przykład temperatura krytyczna na wewnętrznej powierzchni przegrody, wielkość liniowego współczynnika przenikania ciepła lub czynnika temperaturowego f_{Rsi} . W niniejszym artykule przedstawiono analizę rozwiązań projektowych wybranych fragmentów budynku, wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego.

2. Wymagania w zakresie mostków termicznych

Prawidłowo przeprowadzony proces projektowania detali budowlanych wymaga przyjęcia odpowiednich ograniczeń, które pozwolą

1. Introduction

Thermal bridges are the places in external walls of building, in which due to physical changes of its components the heat flow is increased. In the places where these changes had occurred the temperature change on the internal wall surface is observed, which is important in avoiding the risk of water vapour condensation on this surface or in the interior of wall. Because of the heat losses increase possibility by the external partition of the building and the possibility of vapour condensation the thermal bridge is a undesirable phenomenon. The heat transport specifics in building elements is the reason that there is no possibility to avoid this problem. The designer duty is the materials, constructions and technological parameters selection in order to minimise the negative influence of thermal bridges. Currently there are several tools, chiefly the computer programmes, which are permitting to analyse the heat transport in building partitions. Several numeric calculations and analyses in the designing of construction elements are possible, which on the end can limit the undesirable effects linked with thermal bridges. The results of these numeric calculations analyses give the possibility to select the best variant among the admissible materials and construction solutions. As the selection criterion can be for example the critical temperature on the internal surface of partition, the coefficient of heat transfer or the value of temperature factor f_{Rsi} .

In the paper the analyse of the designing solutions of the selected building fragments, made from AAC is presented.

2. The thermal bridges demands

The correctly designing process, concerning the construction elements, must adopt the appropriate restrictions which define the admissible range of future solution. These restrictions are expressed the most frequently on the basis of legal and standard requirements. The starting point in the case of architectural and construction designing is the Construction Law (1). According to

nakreślić dopuszczalne ramy przyszłego rozwiązania. Są one formułowane najczęściej w oparciu o obowiązujące wymagania prawne oraz wymogi normatywne. Punktem wyjścia w przypadku projektowania architektoniczno-budowlanego jest ustawa Prawo Budowlane (1). W myśl art. 5 tej ustawy obiekty budowlane powinny spełniać wymagania podstawowe, do których należą między innymi dotyczące „oszczędności energii i izolacyjności cieplnej” oraz „higieny, zdrowia i środowiska”. Aktem prawnym, w którym pojawia się określenie „mostek cieplny”, jest rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (2). W punkcie 2.2.3. załącznika nr. 2 tego rozporządzenia wskazuje się na konieczność obliczenia bezwymiarowego czynnika temperatury na powierzchni wewnętrznej f_{Rsi} mostków cieplnych oraz przyrównania go z wartością graniczną, podaną w punkcie 2.2.2. załącznika nr. 2 rozporządzenia (2). Sprawdzenie tego warunku pozwala określić, czy analizowany detal budowlany został zaprojektowany w sposób umożliwiający uniknięcie ryzyka kondensacji na jego wewnętrznej powierzchni. Według normy PN-EN ISO 13788 (7) ryzyko wystąpienia kondensacji pary wodnej określa obliczeniowy czynnik temperaturowy na wewnętrznej powierzchni przegrody, który określa wzór [1]:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad [1]$$

gdzie:

f_{Rsi} – czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej [-],

θ_{si} – temperatura na powierzchni wewnętrznej [°C],

θ_i – temperatura powietrza wewnętrznego [°C],

θ_e – temperatura powietrza zewnętrznego [°C].

W przypadku określania strat ciepła przez obudowę budynku oblicza się współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie, zgodnie z poniższym równaniem:

$$H_D = \sum AU_c + \sum \psi_i l_i + \sum \chi_j \quad [2]$$

gdzie:

U_c – skorygowany współczynnik przenikania ciepła elementu i obudowy bez uwzględnienia wpływu liniowych i punktowych mostków termicznych [W/(m²·K)],

ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła i-tego liniowego mostka termicznego [W/(m·K)],

l_i – długość i-tego liniowego mostka termicznego [m],

χ_j – punktowy współczynnik przenikania ciepła j-tego punktowego mostka termicznego [W/K],

A – pole powierzchni przegrody [m²].

Pojawiający się we wzorze [2] liniowy współczynnik przenikania ciepła oblicza się z wzoru:

$$\psi = L^{2D} - \sum_{j=1}^N U_j l_j \quad [3]$$

the article 5 of this Law the construction works should meet the basic requirements, among which the energy saving and thermal insulation as well as “hygiene, health and environment” are given. Legal act, in which the expression „thermal bridge”, is mentioned is the regulation of the Minister of Infrastructure of the 12 April 2002 regarding the technical conditions which should fulfil the buildings and their locations (2). In the point 2.2.3. of attachment number 2 to this regulation (2) the calculation necessity of dimensionless temperature factor on the external surface f_{Rsi} for thermal bridges is given and comparing it with the threshold value – given in point 2.2.2. of the attachment number 2 of aforementioned regulation (2). The verification of this condition permit to define if the analysed construction detail was designed in the manner to avoid the risk of vapour condensation on its internal surface. According to the standard PN-EN ISO 13788 (7) the risk of water vapour condensation is determining the temperature factor on the internal surface of the partition, which is calculated according the formula [1]:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad [1]$$

where:

f_{Rsi} – temperature factor on internal surface [-],

θ_{si} – temperature on internal surface [°C],

θ_i – temperature of internal air [°C],

θ_e – temperature of external air [°C].

In the case of heat loss of the building external walls the coefficient of heat transfer is calculated according to the following formula:

$$H_D = \sum AU_c + \sum \psi_i l_i + \sum \chi_j \quad [2]$$

where:

U_c – corrected coefficient of heat transfer through element and wall without taking account of the linear and point thermal bridges [W/(m²·K)],

ψ_i – linear coefficient of heat transfer of ith linear thermal bridge [W/(m·K)],

l_i – length of ith linear thermal bridge [m],

χ_j – point coefficient of heat transfer of jth point thermal bridge [W/K],

A – the partition area [m²].

The appearing in the formula [2] the linear coefficient of heat transfer can be calculated from the following formula:

$$\psi = L^{2D} - \sum_{j=1}^N U_j l_j \quad [3]$$

where:

L^{2D} – the coefficient of thermal coupling obtained on the basis of the two-dimensional thermal transport of the component separating the two analysed environment [W/(m·K)],

U_j – the coefficient of heat transfer of one-dimensional jth component separating the two analysed environment [W/(m²·K)],

w którym:

L^{2D} – współczynnik sprężenia cieplnego otrzymany na podstawie obliczeń dwuwymiarowego przepływu ciepła elementu oddzielającego dwa analizowane środowiska [$W/(m \cdot K)$],

U_j – współczynnik przenikania ciepła jednowymiarowego j-tego elementu oddzielającego dwa analizowane środowiska [$W/(m^2 \cdot K)$],

l_j – długość odnosząca się do U_j [m],

N – liczba jednowymiarowych składników.

Wymagania dla mostków termicznych znajdują się także w programach dopłat do budowanych obiektów mieszkalnych. Przykładem może być program priorytetowy dopłat do kredytów na budowę lub kupno domów bądź mieszkań w standardzie o małym zużyciu energii ze środków NFOŚiGW (3). W programie tym sformułowano szereg wymagań dla nowych budynków przewidzianych do realizacji, w jednym z dwóch standardów energetycznych: NF40 – budynki o małym zużyciu energii oraz NF15, do których zalicza się budynki pasywne. Jedno z wymagań odnosi się do mostków termicznych, stwierdzając że dla każdego należy obliczyć liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ [$W/(m \cdot K)$], który nie może przekraczać wartości granicznej dla konkretnej kategorii mostka w danym standardzie energetycznym. W procesie projektowania budynków i ich poszczególnych elementów stosowane są także inne wymagania uwzględniające mostki termiczne. Ciekawym przykładem są tutaj wymagania niemieckie, zawarte w rozporządzeniu EnEV 2014/2016 (6). Dopuszczają one trzy możliwe sposoby uwzględniania mostków termicznych. Po pierwsze w postaci dodatku uwzględniającego mostki do skorygowanego współczynnika przenikania ciepła przez przegrody. Po drugie wykonując obliczenia w oparciu o normę DIN 4108 Beiblatt 2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele (5). Ostatnią możliwością jest wykonanie obliczeń szczegółowych, przy zastosowaniu programów numerycznych.

3. Wariantowe rozwiązania projektowe

Rozważa się mostki termiczne dla ściany zewnętrznej wykonanej w technologii tradycyjnej w obrębie stolarki okiennej oraz dachu. Jako elementy drobnowymiarowe ścian przyjęto bloczki z betonu komórkowego o grubości 30 cm. Ściany zewnętrzne ocieplono za pomocą styropianu w systemie ETICS. Grubość ocieplenia została dobrana w taki sposób, aby współczynnik przenikania ciepła ściany pełnej U_c spełniał wymagania rozporządzenia (2) = 0,23 $W/(m^2 \cdot K)$. Ocenę ryzyka kondensacji na powierzchni przegrody i temperatury na wewnętrznych powierzchniach ścian wykonano dla obliczeniowej temperatury wewnętrznej $t_i=+20^\circ C$ i obliczonej temperatury zewnętrznej $t_e=-20^\circ C$. W wytypowanych do obliczeń detalach architektonicznych przyjęto następujące dane materiałowe oraz charakteryzujące je współczynniki przewodzenia ciepła:

beton lekki - bloczki 400 kg/m ³	$\lambda = 0,110 W/(m \cdot K)$
zaprawa klejąca w systemie ETICS	$\lambda = 1,000 W/(m \cdot K)$
tynek cienkowarstwowy w systemie ETICS	$\lambda = 1,000 W/(m \cdot K)$

l_j – the length to which it is applied U_j [m],

N – the number of one-dimensional components.

The requirements for thermal bridges were also formulated in subsidy program to the new constructed residential building. As an example it could be the priority subsidy program to the building or purchase loans of houses or flats in low-energy standard from the funds of National Fund for Environmental Protection and Water Management (3). In this program several requirements for new houses foreseen for building were established, in one of two energetic standards: NF40 = low-energy buildings and NF15 = passive buildings. One of the requirements is defining that each thermal bridge should be characterised by linear coefficient of heat transfer ψ [$W/(m \cdot K)$] and this coefficient should not exceed the threshold value, for designated bridge category in given energetic standard. In the designing process of buildings and their individual elements other requirements are also applied regarding also thermal bridges. In this case the interesting examples are the German requirements, contained in the ordinance EnEV 2014/2016 (6). They allow three possibilities of thermal bridges to be included. Firstly in the form of addition taking into account the bridges in corrected coefficient of heat transfer of partition. Secondly calculating on the basis of the method from the standard DIN 4108 Beiblatt 2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele (5). The last possibility is to make the detailed calculations, for example using the numeric program.

3. Variant design solutions

The thermal bridges for external wall constructed in traditional technology in the precinct of the window frames or the roof. As the small sized elements of walls the blocks of aerated concrete of 30 cm thickness were chosen. The external walls were warmed with Styrofoam in the ETICS system. The thickness of warming was chosen in such manner that the coefficient of heat transfer of the full wall U_c was fulfilled the requirements of regulation (2) e.a. 0,23 $W/(m^2 \cdot K)$. The evaluation of the risk of surface condensation and temperature on walls internal surfaces was calculated for internal temperature $t_i=+20^\circ C$ and calculated external temperature $t_e=-20^\circ C$. In the selected for calculation architectural details the following materials were adopted, having the coefficient of heat transfer:

lightweight concrete - blocks 400 kg/m ³	$\lambda = 0,110 W/(m \cdot K)$
adhesive mortar in ETICS system	$\lambda = 1,000 W/(m \cdot K)$
thin-layer plaster in ETICS system	$\lambda = 1,000 W/(m \cdot K)$
machine plaster /internal	$\lambda = 0,300 W/(m \cdot K)$
styrofoam EPS	$\lambda = 0,040 W/(m \cdot K)$
screed cement	$\lambda = 1,000 W/(m \cdot K)$
concrete C 16/20	$\lambda = 2,300 W/(m \cdot K)$
wood	$\lambda = 0,180 W/(m \cdot K)$
wood window frame thickness 68 mm	$\lambda = 0,180 W/(m \cdot K)$
foil/tar paper	$\lambda = 0,180 W/(m \cdot K)$

tynek gipsowy maszynowy/wewnętrzny	$\lambda = 0,300 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	plate OSB	$\lambda = 0,230 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
styropian EPS	$\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	gk plate	$\lambda = 0,250 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
jastrych cementowy	$\lambda = 1,000 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	mineral wool	$\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
beton C 16/20	$\lambda = 2,300 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
drewno	$\lambda = 0,180 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
rama okienna drewniana gr. 68 mm	$\lambda = 0,180 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
folia/papa	$\lambda = 0,180 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
plyta OSB	$\lambda = 0,230 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
plyta g-k	$\lambda = 0,250 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
welna mineralna	$\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		

3.1. Detale ściana - stolarka okienna

Detal projektowy połączenia drewnianej stolarki okiennej ze ścianą zewnętrzną jest rozwiązywany w różny sposób. Okna mogą być montowane: bezpośrednio w warstwie ocieplenia, równo z licem konstrukcji ściany przylegając do jej ocieplenia lub mogą być dodatkowo cofnięte. W przypadku połączenia stolarki okiennej z monolitycznym nadprożem żelbetowym przyjęto trzy warianty modeli obliczeniowych. Rozpatrywano trzy różne przypadki osadzenia stolarki okiennej. Rozkład grup oraz wariantów w poszczególnych grupach przedstawia się następująco:

- model A1 – stolarka mocowana w warstwie ocieplenia,
- model A2 – stolarka mocowana w licu zewnętrznym warstwy konstrukcyjnej ściany,
- model A3 – stolarka mocowana w osi warstwy konstrukcyjnej ściany.

Przyjęte modele pozwolą określić wpływ osadzenia stolarki okiennej na wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła ψ oraz na temperatury na wewnętrznej powierzchni połączenia okna ze ścianą. Na rysunku 1 pokazano rozwiązania materiałowe poszczególnych detali projektowych.

3.1. Details wall – window frames

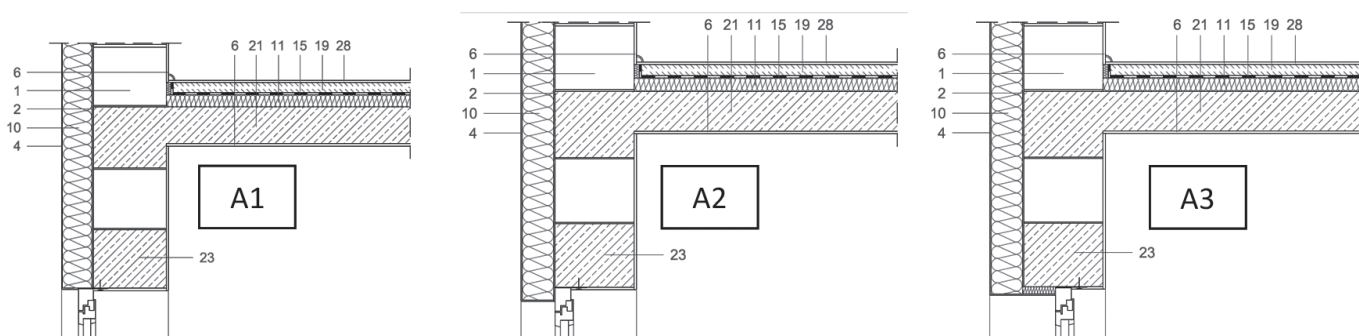
Design detail – connections of wood window frames with exterior wall is solved in differential manner. The windows can be assembled: directly in the warming layer, equally with face of wall construction adjacent to its warming or can be additionally shifted. In the case of window joinery connection with reinforced concrete monolithic lintel three variants of calculation models were applied. The three different cases of window joinery judgments were considered. The groups arrangement and variants in individual groups were as follows:

- model A1 – the joinery fixed in warming layer,
- model A2 – the joinery fixed in outer face of construction wall layer,
- model A3 – the joinery fixed in axis of wall construction layer;

The adopted models will permit to determine the influence of window joinery fixing on linear coefficient of heat transfer ψ and on temperature on internal surface of the window with wall connection. The solutions of particularly designing details are presented on Fig. 1.

3.2. Design solution of selected details of wall – roof joints

Within the paper varied solutions of exterior wall and roof were also analysed. The variant solutions of flat roof with upside-down layers, oblique and duple flat roof were established. The calculation analyse will permit to compare of the roof construction solutions effect on the value of coefficient ψ and on the temperatures schedule of the corner wall-roof. The variants group was designed as „D”. The following cases were analysed:



1 - bloczek betonu komórkowego gr. 30 cm, 2 - zaprawa klejowa (ETICS), 4 - tynk cienkowarstwowy (ETICS), 6 - Tynk gipsowy, 10 - styropian EPS 040, 11 - styropian akustyczny, 15 - folia PCV, 19 - jastrych podłogowy, 21 - strop żelbetowy C 16/20, 22 - wieniec żelbetowy C 16/20, 23 - nadproże żelbetowe C 16/20, 28 - podłoga drewniana 15 mm

1 - blocs of AAC thickness 30 cm, 2 - adhesive mortar, ETICS system, 4 - thin-layer plaster in ETICS system, 6 – plaster mortar, 10 – styrofoam EPS 040, 11 – styrofoam acoustic, 15 – PCV foil, 19 - floor screed, 21 – reinforced concrete ceiling C 16/20, 22 – reinforced concrete wreath C 16/20, 23 – reinforced lintel C 16/20, 28 – wood floor 15 mm

Rys. 1. Detale projektowe dla analizowanych wariantów połączenia stolarki okiennej z nadprożem (4)

Fig. 1. Designing details for analysed variants of window joinery with lintel (4)

3.2. Rozwiązania projektowe wybranych detali połączenia ściany i dachu

W ramach niniejszego opracowania przeanalizowano również różne rozwiązania połączenia ściany zewnętrznej i dachu. Założono alternatywne rozwiązanie stropodachu o odwróconym układzie warstw, dachu skośnego i stropodachu dwudzielnego. Analiza obliczeniowa pozwoliła na porównanie sposobu rozwiązania konstrukcji dachu na wartość współczynnika ψ oraz na rozkład temperatur naroża ściana-dach. Grupę opisywanych wariantów oznaczono symbolem „D”. Wzięto pod uwagę następujące przypadki:

- grupa D – połączenie ściana zewnętrzna-dach:
 - model D1 – stropodach płaski odwrócony,
 - model D2 – dach skośny,
 - model D3 – stropodach dwudzielny.

Na rysunku 2 pokazano szczegóły rozwiązań dla poszczególnych wariantów.

4. Obliczenia numeryczne

4.1. Założenia ogólne

Do wykonania obliczeń i analiz przepływu ciepła dla przyjętych modeli wykorzystano program komputerowy THERM 7.4. Uzyskane wyniki pozwalają na ocenę efektywności energetycznej detali budowlanych oraz na ich podstawie określenie ryzyka wystąpienia powierzchniowej kondensacji wilgoci. Program umożliwia bezpośrednie rysowanie składników jak i wprowadzanie podkładów,

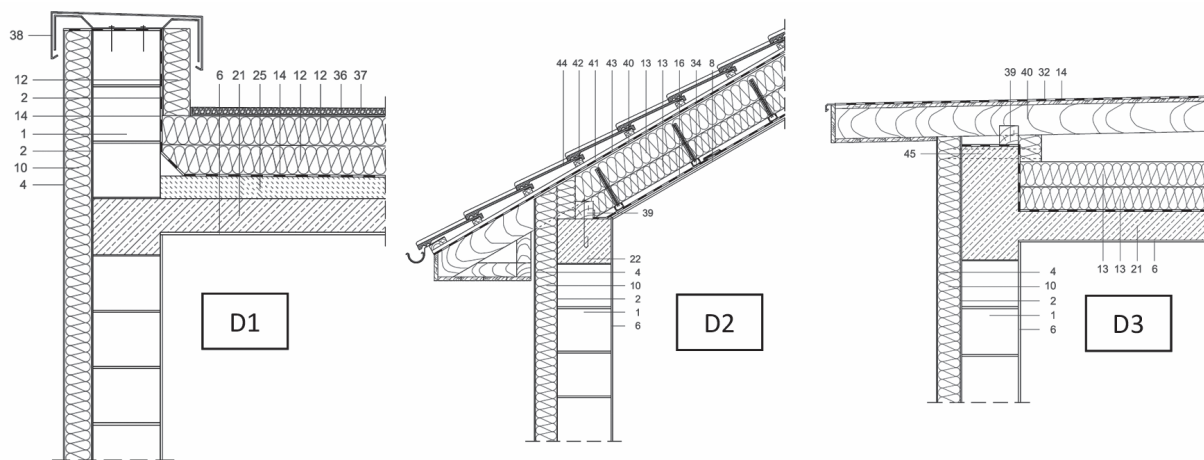
- group D – connection external wall -roof:
 - model D1 – upside-down flat roof,
 - model D2 – pitched roof,
 - model D3 – duple flat roof.

These models for different variants are shown in Fig. 2

4. Numerical calculations

4.1. General assumptions

For calculations and analyses of heat transport for accepted models the computer program Therm 7.4. was applied. The obtained results give the possibility to assess the energetic efficiency of construction details and on this basis the risks of surface condensation can be identified. The program gives the possibility to direct drawing of components as well as the introduction of backing material which is representing the graphic skeleton of interest to us detail. Therm 7.4., using methods of finite elements, performs model discretization. The results of calculations are obtained in graphical form – for example as isotherms in the section of modelled element, section of colour field of temperature, colour field of heat flux density, and in numerical form, including coefficient of heat transfer and density of heat flux. The program enable the temperature reading in given point- i.e. in dividing grid nodes, division preview on finite elements, indication of places of the maximum and minimum temperature as well as the system of heat flux vectors. For individual models the heat flux was defined Φ [W], coefficient of heat thermal coupling L_{12D} i L_{e2D} [W/(m·K)], linear coefficient of heat transfer ψ_e i ψ_i [W/(m·K)], temperature of inner surface in three characteristic places



1 - bloczek z betonu komórkowego gr. 30 cm, 2 - zaprawa klejowa (ETICS), 4 - tynk cienkowarstwowy (ETICS), 6 - tynk gipsowy, 10 - styropian EPS 040, 12 - styropian akustyczny, 13 - wełna mineralna, 14 - hydroizolacja, 15 - hydroizolacja, 16 - folia paroszczelna, 21 - strop żelbetowy C 16/20, 22 - wieniec żelbetowy, 25 - podkład betonowy C12/15, 32 - płyta OSB, 34 - płyta g-k, 36 - geowłóknina, 37 - żwir, 38 - obróbka blacharska, 39 - murłata, 40 - krokiew, 41 - kontrłata, 42 - łąta, 43 - folia dachowa, 44 - dachówka, 45 - szczelina wentylacyjna

1 - blocs of AAC thickness 30 cm, 2 - adhesive mortar, ETICS system, 4 - thin-layer plaster in ETICS system, 6 – plaster mortar, 10 – styrofoam EPS 040, 12 – styrofoam acustic, 13 – mineral wool, 14 – hydro-insulation, 15 – hydro-insulation, 16 – foil vapour barrier, 21 – reinforced concrete ceiling C 16/20, 22 – reinforced concrete wreath C 12/15, 32 – OSB plate, 34 – gk plate, 36 – geotextile, 37 – gravel, 38 – flashing, 39 – wall plate, 40 – rafter, 41 – counter-laths, 42 – laths, 43 – roof foil, 44 – tile, 45 – ventilation gap.

Rys. 2. Detale projektowe analizowanych wariantów połączenia ściany zewnętrznej z dachem (4)

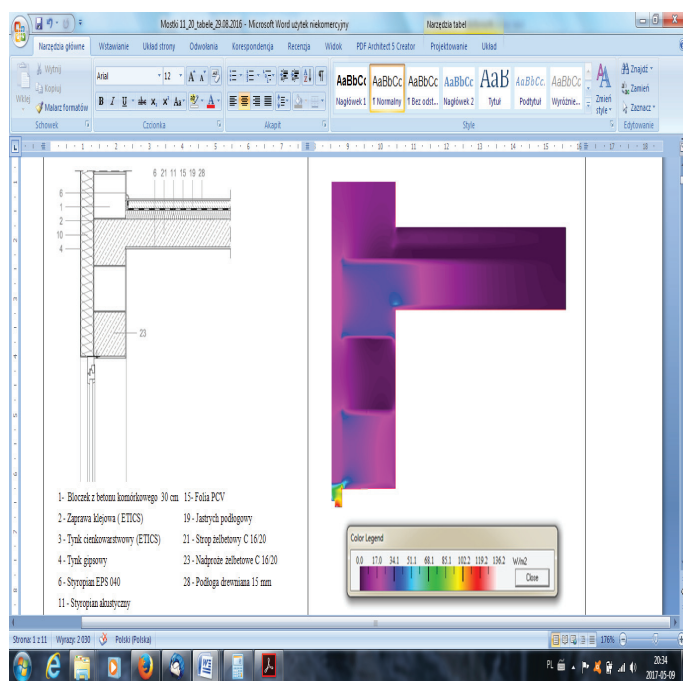
Fig. 2. Designing details of analysed variants of the wall exterior with roof connetion (4)

stanowiących graficzny szkielet interesującego nas detalu. THERM 7.4., korzystając z metody elementów skończonych, dokonuje dyskretyzacji modelu. Wyniki obliczeń otrzymuje się w postaci graficznej, na przykład rozkładu izoterm w przekroju modelowanego elementu, barwnego pola temperatury w przekroju tego elementu, barwnego pola gęstości strumienia ciepła i liczbowej, w tym: współczynników przenikania ciepła, strumienia ciepła i gęstości strumienia ciepła. Program umożliwia odczyt temperatury w danym punkcie – w węzłach siatki podziału, podgląd podziału detalu na elementy skończone, wskazanie miejsc o maksymalnej i minimalnej temperaturze oraz układ wektorów strumienia ciepłego. Dla poszczególnych modeli określono strumień ciepła Φ [W], współczynniki sprzężenia cieplnego L_{i2D} i L_{e2D} [W/(m·K)], liniowe współczynniki przenikania ciepła ψ_e i ψ_i [W/(m·K)], temperatury na powierzchni wewnętrznej w trzech charakterystycznych miejscach t_i [°C], minimalną temperaturę na powierzchni wewnętrznej w obrębie analizowanego detalu $\theta_{si,min}$ [°C], bezwymiarowy czynnik temperatury na powierzchni wewnętrznej f_{Rsi} oraz procentowy błąd obliczeń numerycznych.

4.2. Wyniki obliczeń dla detali stolarki okiennej

Na rysunku 3 zamieszczono przykładowy wynik obliczeń z zastosowaniem programu Therm 7.4 w postaci barwnego rozkładu gęstości strumienia ciepła w przekroju modelu obliczeniowego dla detalu A1. Rysunek 4 przedstawia przykładowy wynik w postaci rozkładu pola temperatury w przekroju tego detalu w barwniej skali. Wszystkie obliczenia wykonywano przy ilości iteracji $n=10$, uzyskując błąd obliczeń numerycznych $< 3\%$.

W tabelicy 1 przedstawiono szczegółowe wyniki obliczeń dla wszystkich wariantów połączenia stolarki okiennej z nadprożem.



Rys. 3. Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu A1 – skala barw (4)
Fig. 3. Density of heat flux on cross - section of A1 model – colour scale (4)

t_i [°C], minimum temperature of inner surface within the analysed detail $\theta_{si,min}$ [°C], dimensionless temperature factor on the inner surface f_{Rsi} and the error of numerical calculation in %.

4.2. The results of calculation of the details of window frames

On the Fig. 3 the example of the result of Therm 7.4 program is shown in the form of colour heat distribution flux on the section of calculation model of the detail A1. On Fig. 4 the example of the result in the form of temperature field distribution section as a colour scale. All calculations were done using the number of iterations $n = 10$, with the error of numerical calculations $< 3\%$.

Table 1 presents detailed results for all alternative designs of window joinery judgments.

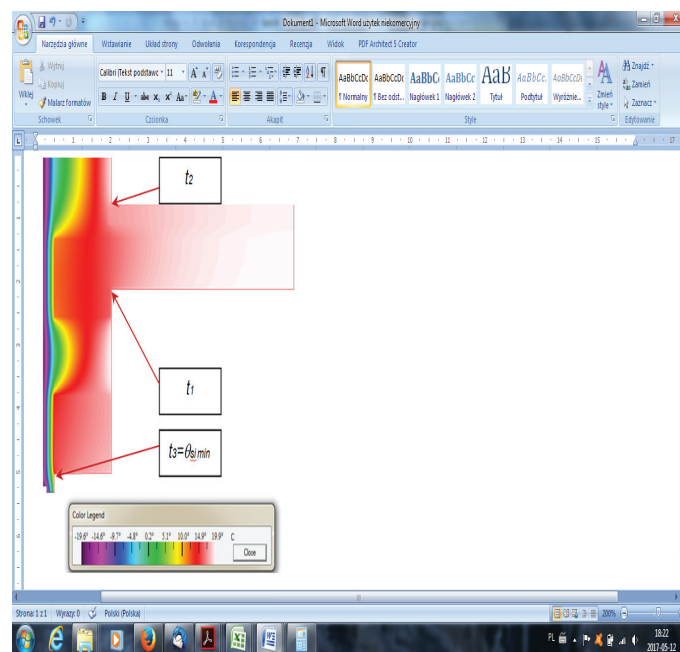
Minimum temperature on the internal surface together with dimensionless temperature factor f_{Rsi} will decide on the quality of particular solutions. Distribution of $\theta_{si,min}$ and f_{Rsi} are presented in Figs. 5 and 6.

4.3. Results of calculations for wall – roof joints

In Fig. 7 an example result of numerical modeling is presented in the form of heat flux density distribution in the cross – section of the model for D3 design detail. Fig. 8 presents an example result in the form of temperature field distribution in the cross-section (colour scale). All calculations were performed for number of iterations $n=10$. Obtained calculations error was $< 2.9\%$.

Table 2 presents detailed results for all alternative designs of wall – roof joint.

Similarly as in case of details of group A, for models of group D minimum temperature on the internal surface [Fig. 9] as well as



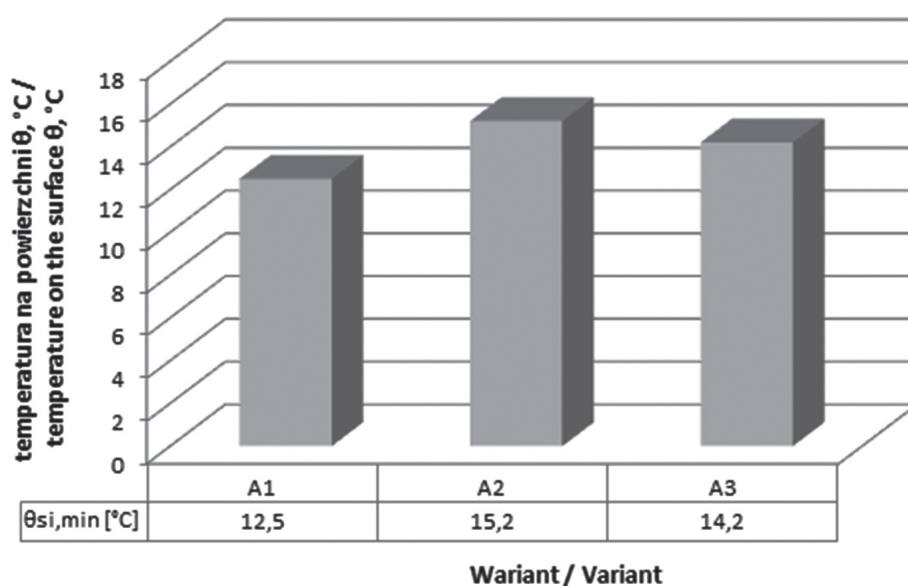
Rys. 4. Pole temperatur w przekroju modelu A1 - skala barw (4)
Fig. 4. Temperature field on cross-section of model A1 – colour scale (4)

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI OBLICZEŃ DLA DETALI Z GRUPY A

RESULTS OF CALCULATIONS FOR DETAILS OF GROUP A

Właściwość/Property A1		Wariant/Variant		
		A2	A3	
Współczynnik przenikania ciepła / Thermal conductivity	U W/(m ² ·K)	0,23		
Strumień ciepła / Heat flux	Φ , W	12,19	18,24	18,65
Współczynnik sprzężenia cieplnego / Thermal coupling coefficient	L_{e2D} W/(m·K)	0,3048	0,4560	0,4664
Współczynnik sprzężenia cieplnego / Thermal coupling coefficient	L_{i2D} W/(m·K)	0,3355	0,2240	0,6245
Liniowy współczynnik przenikania ciepła / Linear overall heat-transfer coefficient	Ψ_e W/(m·K)	0,0095	0,2187	0,2341
Liniowy współczynnik przenikania ciepła / Linear overall heat-transfer coefficient	Ψ_i W/(m·K)	0,0989	0,1571	0,3680
Temperatura na powierzchni w punkcie 1 / Temperature on the surface in point 1	t_1 , °C	16,6	16,7	18,2
Temperatura na powierzchni w punkcie 2 / Temperature on the surface in point 2	t_2 , °C	18,0	18,2	16,8
Temperatura na powierzchni w punkcie 3 / Temperature on the surface in point 3	t_3 , °C	12,5	15,2	14,2
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody / Minimum temperature on the partition surface	$\theta_{si, min}$, °C	12,5	15,2	14,2
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej / Temperature factor on the internal surface	f_{Rsi} , -	0,81	0,88	0,86
Błąd obliczeń / Calculation error	%	2,23	2,36	2,90



Rys. 5. Minimalna temperatura na powierzchni wewnętrznej dla poszczególnych detali połączenia stolarki okiennej z nadprożem.

Fig. 5. Minimum temperature on the internal surface for design details of window joinery judgements

O jakości poszczególnych rozwiązań decydować będzie minimalna temperatura na powierzchni wewnętrznej elementu oraz bezwymiarowy czynnik temperatury f_{Rsi} . Rozkład $\theta_{si, min}$ oraz f_{Rsi} dla poszczególnych detali pokazano na rysunkach 5 i 6.

4.3. Wyniki obliczeń dla połączenia ściany i dachu

Na rysunku 7 pokazano przykładowy wynik modelowania numerycznego w postaci rozkładu gęstości strumienia ciepła w przekroju modelu obliczeniowego dla detalu D3. Rysunek 8 przedstawia przykładowy wynik w postaci rozkładu pola temperatury w prze-

dimensionless temperature factor f_{Rsi} [Fig. 10] were presented in graphical manner. It will allow to find the optimal solution for the group of joints discussed.

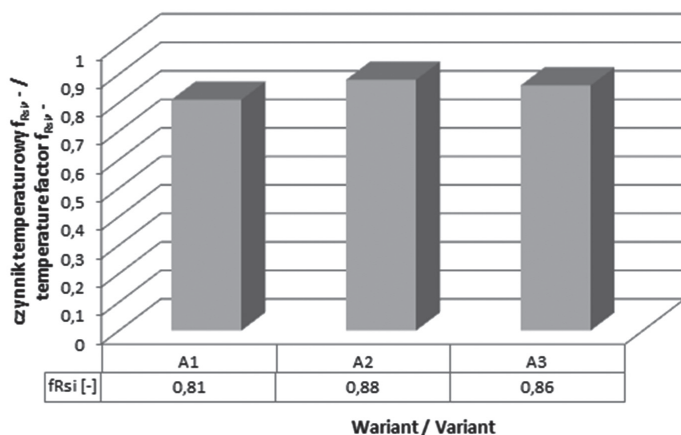
5. Summary

On the basis of the calculations of different variants of solutions of combination of window frames in the wall with monolithic lintel and the combination of the roof with external wall, in terms of heat protection it should be stated that:

- in the case of details of window joinery judgements, window mounting element placement in respect to insulation layer plays an important role from the point of view of temperature on the internal surface of joinery. Among solutions considered, A1 was the one which exhibited the lowest temperature on the internal joinery surface.

It is connected with adopted window frames

type. It fulfills all the requirements of current regulations (2). Thermal conductivity of the window on the level of $U_w=1.3$ W/(m²·K), with glass set of $U_g=0.5$ W/(m²·K) allowed to use window frame of relatively high thermal conductivity U_f , exceeding 1.6 W/(m²·K). Due to the fact, that this type of frame was adopted for calculations, temperature on the joint of the window and external wall was lower comparing other solutions. Highest minimal temperature was obtained for A2 variant, in which thermal insulation of the wall was overlapping the window frame for 2 cm,



Rys. 6. Czynniki temperaturowe na powierzchni wewnętrznej f_{Rsi} dla poszczególnych detali połączenia stolarki okiennej z nadprożem.

Fig. 6. Temperature factor on the internal surface f_{Rsi} for particular details of windows joinery judgements

Tablica 2 / Table 2

WYNIKI OBLICZEŃ DLA DETALI Z GRUPY D

RESULTS OF CALCULATIONS FOR DETAILS OF GROUP D

Parametr <i>D1</i>		Wariant		
		<i>D2</i>	<i>D3</i>	
Współczynnik przenikania ciepła / Thermal conductivity	U W/(m ² ·K)	0,23		
Strumień ciepła / Heat flux	Φ , W	10,87	16,19	17,38
Współczynnik sprzężenia cieplnego / Thermal coupling coefficient	L_{e2D} W/(m·K)	0,4383	0,3673	0,4345
Współczynnik sprzężenia cieplnego / Thermal coupling coefficient	L_{i2D} W/(m·K)	0,2718	0,4048	0,3263
Liniowy współczynnik przenikania ciepła / Linear overall heat-transfer coefficient	Ψ_e W/(m·K)	0,0117	0,0898	0,1241
Liniowy współczynnik przenikania ciepła / Linear overall heat-transfer coefficient	Ψ_i W/(m·K)	0,0489	0,1233	0,1359
Temperatura na powierzchni w punkcie 1 / Temperature on the surface in point 1	t_1 , °C	15,7	16,6	13,6
Temperatura na powierzchni w punkcie 2 / Temperature on the surface in point 2	t_2 , °C	18,8	18,8	18,8
Temperatura na powierzchni w punkcie 3 / Temperature on the surface in point 3	$\theta_{si\ min}$, °C	15,7	16,6	13,6
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody / Minimum temperature on the partition surface	f_{Rsi} -	0,89	0,92	0,84
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej / Temperature factor on the internal surface	%	2,17	2,20	2,81

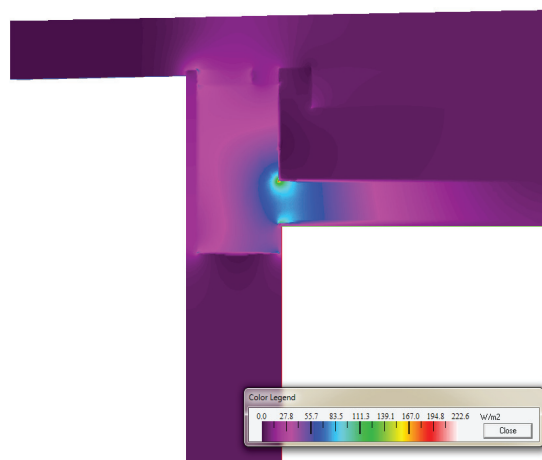
kroju, w barwnej skali. Wszystkie obliczenia wykonywano przy ilości iteracji $n=10$, uzyskując błąd obliczeń numerycznych $< 2,9\%$.

W tablicy 2 podano szczegółowe wyniki dla wariantów połączenia ściany zewnętrznej z dachem (grupa D).

Analogicznie, jak w przypadku detali z grupy A, dla modeli z grupy D na rysunku 9 pokazano zestawienie wartości minimalnej temperatury $\theta_{si\ min}$ oraz czynnika temperaturowego f_{Rsi} na rysunku 10. Pozwoli to na określenie optymalnego rozwiązania dla omawianej grupy połączeń budowlanych z punktu widzenia przyjętych założeń.

5. Podsumowanie

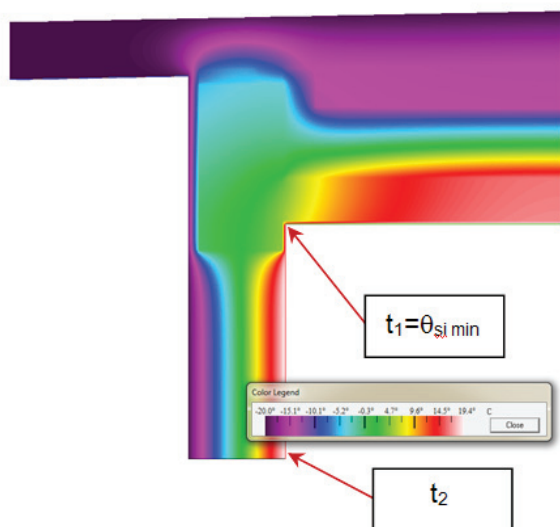
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń różnych wariantów rozwiązań połączenia stolarki okiennej w ścianie z monolitycznym



Rys. 7. Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu D3 – skala barw (4)

Fig. 7. Density of heat flux on cross - section of D3 model – colour scale (4)

- value of linear thermal conductivity is the lowest for A1 variant, while it is the highest for A3 variant,
- all alternative designs fulfills regulations (2) in terms of temperature coefficient f_{Rsi} values, and are higher than limit value, thus minimizing the surface condensation risk,
- relatively high temperatures on the internal surface within wall – roof joints are connected among others with thermal conductivity of AAC blocks used,
- in the case of details of group D [wall – roof joint] highest values of f_{Rsi} factor was noted for D2 variant [wooden sloping roof]. This solution is the most beneficial from the point of view of surface condensation avoidance. The requirement in terms of surface condensation are fulfilled by all solutions from that group. D1 variant exhibit the lowest value of linear thermal conductivity. This is flat roof with attic insulated from both sides [optimal solution from the point of view of heat loss],

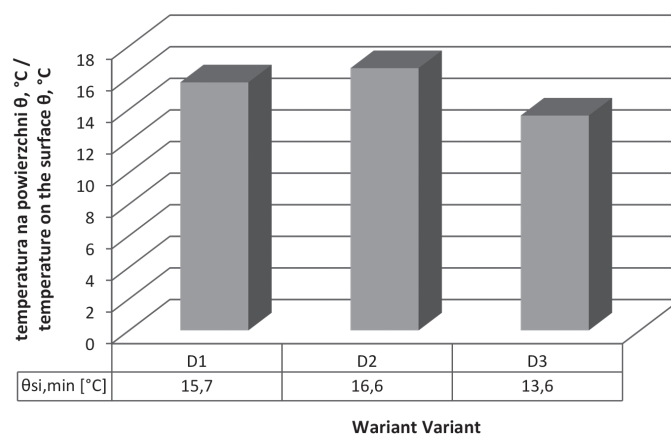


Rys. 8. Pole temperatur w przekroju modelu D3 - skala barw (4)

Fig. 8. Temperature field on cross-section of model D3 – colour scale (4)

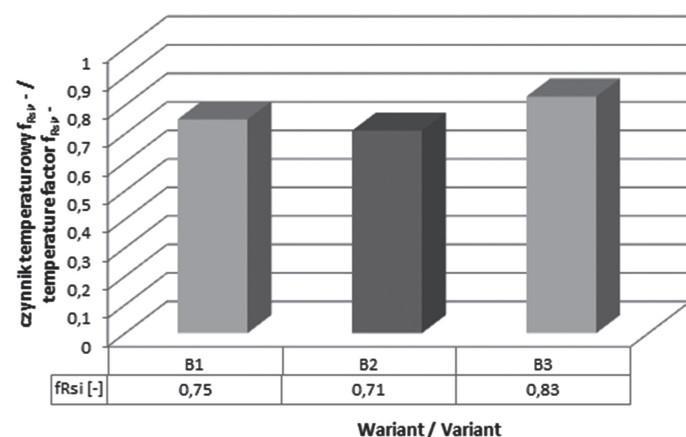
nadprożem oraz połączenia dachu ze ścianą zewnętrzną, z punktu widzenia ochrony cieplnej można wyciągnąć następujące wnioski:

- w przypadku detali połączenia stolarki okiennej z nadprożem lokalizacja mocowania okiennej ościeżnicy względem warstwy ocieplenia ma ważne znaczenie dla temperatury na powierzchni wewnętrznej połączenia budowlanego. Spośród przyjętych rozwiązań projektowych najniższą temperaturę na wewnętrznej powierzchni styku ściany z oknem uzyskano dla detalu A1. Jest to związane z przyjętym rodzajem stolarki okiennej. Spełnia ono wymagania w zakresie obowiązujących przepisów (2). Współczynnik przenikania ciepła dla okna na poziomie $U_w=1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, przy zastosowanym pakiecie szybowego o $U_g=0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ umożliwi zastosowanie ramy okiennej o stosunkowo dużym współczynniku przenikania ciepła U_f , przekraczającym wartość $1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Ze względu na przyjęcie takiej ramy okiennej w obliczeniach temperatura na połączeniu okna ze ścianą zewnętrzną jest niższa, niż w przypadku pozostałych dwóch rozwiązań. Najwyższą minimalną temperaturę uzyskano dla wariantu A2, w którym izolacja cieplna ściany zachodzi 2 cm na ramę okienną.
- liniowy współczynnik przenikania ciepła jest najmniejszy dla wariantu A1, zaś największy dla wariantu A3,
- wszystkie rozwiązania projektowe spełniają wymagania rozporządzenia (2) w zakresie wartości czynnika temperaturowego f_{Rsi} i są większe od wartości granicznej, minimalizując ryzyko wystąpienia kondensacji powierzchniowej,
- stosunkowo wysokie temperatury na wewnętrznej powierzchni w miejscach połączenia ściany i stropu związane są między innymi z izolacyjnością termiczną zastosowanych bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego,
- w przypadku detali z grupy D w połączeniu ściana-dach największą wartość czynnika f_{Rsi} odnotowano dla wariantu D2



Rys. 9. Minimalna temperatura na powierzchni wewnętrznej dla poszczególnych detali połączenia ściany z dachem

Fig. 9. Minimum temperature on the internal surface for design details of wall – roof joint



Rys. 10. Czynniki temperatury na powierzchni wewnętrznej f_{Rsi} dla poszczególnych detali połączenia ściany z dachem.

Fig. 10. Temperature factor on the internal surface f_{Rsi} for particular details of wall – roof joint

- all considered solutions ensure high protection against thermal bridges, due to incorporation of walls made of AAC of low thermal conductivity and high thermal resistance,
- examples of design details considered in present paper indicates, that there is a need for incorporation of detailed thermal calculations into building design process. It allows to compare various solutions in terms of their linear thermal conductivity and/or temperature coefficient f_{Rsi} .

- dach drewniany skośny. Stwierdza się, że wariant ten jest najkorzystniejszy pod względem uniknięcia kondensacji powierzchniowej. Warunek uniknięcia kondensacji powierzchniowej spełniają wszystkie detale omawianej grupy. Najmniejsze wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła, w omawianej grupie, wykazuje wariant D1 – stropodach o odwróconym układzie warstw z atyką ocieploną po obu jej stronach. Jest to optymalny wariant ze względu na wielkość strat ciepła;
- wszystkie rozważane warianty cechują się dużą ochroną ciepłą w zakresie minimalizowania mostków cieplnych, ze względu na zastosowane rozwiązania ścian z autoklawizowanego betonu komórkowego o małym współczynniku przewodzenia ciepła i dużym oporze cieplnym,
- rozważane w niniejszym artykule przykłady detali budowlanych wskazują wyraźnie na konieczność przeprowadzania w projektach budowlanych szczegółowych obliczeń cieplnych, pozwalających na porównanie różnych koncepcji rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych z punktu widzenia wielkości liniowych współczynników przenikania ciepła, bądź czynnika temperaturowego f_{Rsi} .

Literatura / References

1. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz. U. 1994 nr 89 poz. 414) wraz z późniejszymi zmianami.
2. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 75, poz. 690) z późniejszymi zmianami.
3. Poprawa efektywności energetycznej. Część 3) Dopłaty do kredytów na budowę domów energooszczędnych. Program priorytetowy NFOŚiGW [online]. 2014. [dostęp 15 kwietnia 2014 r.]. Dostępny w Internecie: <http://www.nfosigw.gov.pl/srodki-krajowe/programy/doplaty-do-kredytow-na-domy-energooszczedne/wytyczne-do-programu-priorytpt/>
4. P. Krause, T. Steidl, B. Orlik-Koźdoń, Ciepłno-wilgotnościowe projektowanie ścian z betonu komórkowego. Zeszyt 3 Część 2 Mostki termiczne. SPB, Warszawa 2016.
5. DIN 4108 Beiblatt 2: 2004-01 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele.
6. Energiesparverordnung EnEV 2014/2016.
7. PN-EN ISO 13788:2003 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości składników budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa. Metody obliczania.