Mostki cieplne

Przedstawione w numerze 1/2020 A&B zasady obliczania przenikania ciepła w warunkach niezmiennej w czasie wymiany ciepła dotyczą przegród budowlanych składających się z równoległych do siebie warstw materiałów jednorodnych. Jak się to ma do warunków rzeczywistych?

Jerzy Bogdan ZEMBROWSKI

Projektowane i wznoszone budynki każdego typu i wielkości składają się z elementów o różnych wymiarach, kształtach i zestawach materiałowych. Najczęściej mamy do czynienia z przegrodami płaskimi, wklęsłymi lub wypukłymi, takimi jak: ściany, podłogi, stropy, stropodachy, tarasy, oszklenia okien i drzwi, w których warstwy poszczególnych materiałów są do siebie równoległe. W warstwach równoległych podczas przepływu ciepła równoległe do siebie są także pola temperatur. W takich przypadkach współczynniki przenikania ciepła $\boldsymbol{U}$ oraz ilości ciepła $\boldsymbol{Q}$ przenikającego przez takie przegrody oblicza się, stosując równania podane w [2].

Przegrody te są jednak wzbogacane balkonami, ościeżami okien i drzwi, kominami i kanałami, słupami i rdzeniami, podciągami i żebrami, nadprożami, attykami, zdobieniami elewacji i innymi elementami. Są też miejsca, gdzie stykają się z sobą ściany czy ściany ze stropami. Mamy też mnóstwo przegród, których warstwy składają się z różnych elementów, na przykład mury z bloczków czy pustaków, stropy gęstożebrowe, dachy pochyłe z więźbą z krokwi lub wiązarów, ściany szkieletowe czy podłogi podniesione. Wszystkie takie i podobne przegrody nazywamy niejednorodnymi, występujące w nich pola temperatur nie są zaś do siebie równoległe, lecz silnie zniekształcone. Oznacza to, że dla takich przegród nie można stosować wspomnianych wzorów na obliczanie wartości $\boldsymbol{U}$ oraz $\boldsymbol{Q}$. Miejsca lub strefy takich zniekształceń rozkładów temperatur nazywa się mostkami cieplnymi, z tym że zniekształcenia mające charakter ciągły na pewnej długości nazywa się **liniowymi mostkami cieplnymi**, zniekształcenia lokalne bez wyraźnego ukierunkowania zaś **miejscowymi mostkami cieplnymi**.

Wymagania techniczne [3] nakazują przy projektowaniu budynków ogrzewanych stosowanie obliczeń $\boldsymbol{Q}$ według normy [4]. Ilość ciepła $\boldsymbol{Q}$ przenikającego między dwoma ośrodkami o temperaturach $\boldsymbol{t_i}$ (wewnątrz budynku) oraz $\boldsymbol{t_e}$ (na zewnątrz) przez przegrodę o powierzchni $\boldsymbol{A}$ zawierającą mostki cieplne liniowe i punktowe — w stanie stacjonarnym — oblicza się ze wzoru:

$$Q = L\left(t_i - t_e\right), \quad \text{W}$$

gdzie:

$\boldsymbol{L}$ jest współczynnikiem sprzężenia cieplnego, obliczanym z wzoru:

$$L = \sum_1^n \chi_n + \sum_1^m \Psi_m \cdot l_m + \sum_1^k U_k \cdot A_k, \quad \text{W/K}$$

gdzie:

$\boldsymbol{\chi_n}$ jest punktowym współczynnikiem przenikania ciepła *n-tego* punktowego mostka cieplnego, W/K

$\boldsymbol{\Psi_m}$ jest liniowym współczynnikiem przenikania ciepła *m-tego* liniowego mostka cieplnego, W/mK

$\boldsymbol{l_m}$ jest długością *m-tego* liniowego mostka cieplnego, m

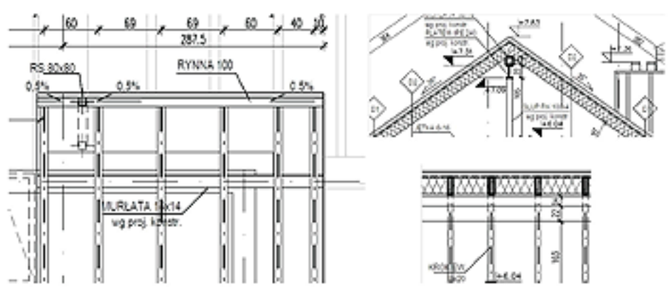
$\boldsymbol{U_k}$ jest współczynnikiem przenikania ciepła *k-tej* części przegrody jakby mostków cieplnych nie było (obliczanym wg [2]), W/m²K

$\boldsymbol{A_k}$ jest *k-tą* częścią powierzchni przegrody obejmującą także mostki cieplne, m²

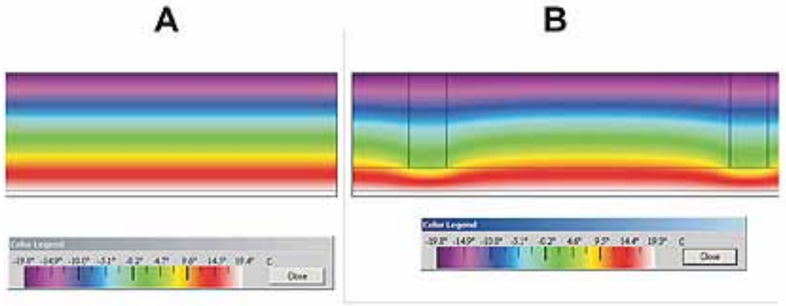
Uwaga: $\sum_1^k A_k = A$

Ponieważ mostki cieplne mogą występować w układzie płaskim (2D) lub przestrzennym (3D), to norma [4] nakazuje uzyskiwanie wartości współczynników χ oraz Ψ, stosując tryb tzw. dokładny, bazujący na komputerowych obliczeniach numerycznych przegród metodą różnic skończonych MRS (ang. FDM) lub metodą elementów skończonych MES (ang. FEM). W praktyce, niestety, często nie przestrzega się tego wymogu fizyki budowli i popełnia rażące błędy w projektach. Co ciekawe, metoda FDM została wynaleziona i opisana matematycznie już w roku 1812, zaś metoda FEM w roku 1956 [1]. Obie metody nie nadają się do obliczeń algebraicznych, a wyłącznie z zastosowaniem komputerów. Rzecz w tym, że dokładność uzyskiwanych wyników jest tym większa, im więcej się utworzy elementów różnicowych — to jednak potęgowo wydłuża czas obliczeń. Mimo istnienia w latach 90. XX wieku komputerów, były one w stanie obliczać tylko proste mostki cieplne zbudowane z niewielu materiałów. Dopiero komputery o szybkich procesorach i dużych pamięciach RAM, powstałe po roku 2000, pozwalają projektantom obliczać każdy rodzaj mostka cieplnego o dowolnym kształcie i dowolnym zestawieniu materiałów. Wykorzystywanie komputerów do obliczeń ruchu ciepła przez przegrody z mostkami ciepła w krajach zachodnich od dwudziestu lat jest codziennością, Polska jednak ma sporo do nadrobienia w tym temacie.

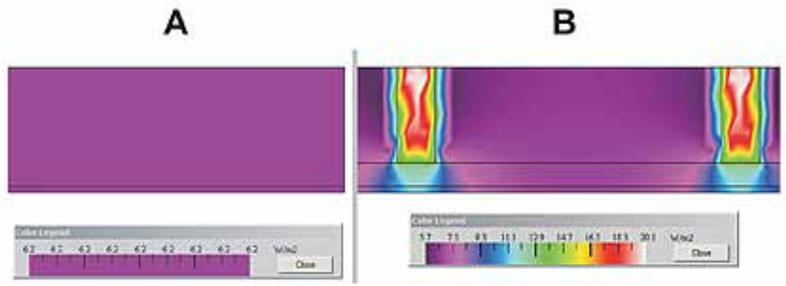
Jako przykład weźmy zaprojektowany w roku 2019 dach domu jednorodzinnego pod Krakowem wskazany na *rysunku 1*. Jest to więźba z krokwi o przekroju 20×8 cm w rozstawie od 60 do 60 cm z pełnym wypełnieniem między nimi wełną mineralną o współczynniku przewodzenia ciepła $\boldsymbol{\lambda}$=0,043 W/mK oraz dodatkowo pod krokwiami tą samą wełną grubości 5 cm. W projekcie widnieje zapis, iż współczynnik przenikania ciepła tego dachu wynosi $\boldsymbol{U}$=0,167 W/m²K, co z zapasem spełnia aktualne wymagania WT [3]. Było to podstawą doboru grzejników dla pomieszczeń poddasza oraz podstawą do sporządzenia charakterystyki energetycznej domu i obliczenia wymaganej dla niego mocy źródła ciepła. Z obliczonej wartości współczynnika $\boldsymbol{U}$ wynika, iż projektant obliczając go nie wziął pod uwagę istnienia krokwi, a jedynie płytę GK oraz warstwę wełny mineralnej grubości 25 cm — czyli postąpił niezgodnie z wymaganiami, bo nie uwzględnił liniowych mostków ciepła. Dla



Rysunek 1
rzut z góry i przekroje więźby dachowej wg projektu



Rysunek 2
rozkład temperatur w przekroju dachu:
A — wg projektu, B — wg obliczeń z uwzględnieniem liniowych mostków ciepła



Rysunek 3
rozkład gęstości strumieni przenikającego ciepła w przekroju dachu:
A — wg projektu, B — wg obliczeń z uwzględnieniem liniowych mostków ciepła

fotografia 1 — widok domu jednorodzinnego tuż przed naniesieniem wyprawy elewacyjnej i przed rozpoczęciem ocieplania

porównania, obliczona wartość tego współczynnika metodą dokładną z uwzględnieniem liniowych mostków cieplnych na każdej krokwi wynosi ***U***=0,210 W/m²K i jest o 26% wyższa niż widniejąca w projekcie. Wartość ta niestety nie spełnia WT co do ***U*** dachów — zakazujących przekroczenia wartości 0,18 W/m²K.

Wyniki błędnie obliczonej w projekcie wartości ***U*** dachu działają niestety na niekorzyść inwestora domu, bo musi on ponieść zwiększone roczne koszty na ogrzewanie poddasza (utrzymując wewnątrz projektowaną temperaturę powietrza) albo utrzyma roczne koszty eksploatacji nie zapewniając wymaganych warunków komfortu cieplnego (utrzymując poddasze w stanie permanentnego wychłodzenia). Zatem, rodzina inwestora będzie albo co rok niepotrzebnie ponosić zwiększone wydatki na utrzymanie domu, albo będzie przebywać na poddaszu w warunkach chorobotwórczych.

Wyniki obliczeń rozkładu temperatur w przekroju dachu bez uwzględnienia mostków cieplnych (wg projektu) oraz z ich uwzględnieniem przedstawia *rysunek 2*. Widać, że istnienie krokwi niszczy równoległość izoterm w strefie nawet kilku szerokości krokwi. Powodem tego jest fakt, iż współczynnik przewodzenia ciepła krokwi wynosi ***λ***=0,16 W/mK — czyli jest 4 razy większy niż wełny. Wyniki obliczeń gęstości strumieni przenikającego ciepła w obu przypadkach przedstawia *rysunek 3*. Widać, że główna ucieczka strumieni ciepła dokonuje się przez krokwie, mimo iż pod nimi jest przeciwdziałająca warstwa wełny grubości 5 cm. Jasne jest, że gdyby krokwie miały ten sam współczynnik przewodzenia ciepła ***λ*** jak wełna, to liniowych mostków ciepła by nie było, a rozkład temperatur byłby zgodny z *rysunkiem 2A*, zaś gęstość strumienia byłaby zgodna z *rysunkiem 3A*.

Podobne wnioski wyciąga się także z obliczeń współczynników przenikania ciepła ***U*** murowanych ścian zawierających słupy, rdzenie, wieńce lub nadproża. Oto kolejny przykład z życia pokazany na *fotografii 1*. Na lewym zdjęciu końcowa faza ocieplania domu metodą BSO — na podkładzie będzie nanoszona wyprawa cienkowarstwowa. Oklejona styropianem elewacja ukrywa liczne mostki cieplne, co widać na prawym zdjęciu pokazującym stan przed ociepleniem. Obliczony w projekcie budowlanym domu współczynnik przenikania ciepła ściany frontowej wynosi ***U***=0,184 W/m²K i z zapasem spełnia wymagania WT. Na bazie tej wartości zaprojektowano ogrzewanie podłogowe w całym domu oraz określono wymaganą moc kotła 9,6 kW kondensacyjnego zasilanego gazem ziemnym. Jednakże, podczas procesu sądowego, gdy inwestor wystąpił z roszczeniami, kontrola

fotografia 2 — po lewej: punktowy mostek cieplny na przecięciu stropodachu z kanałem wentylacyjnym; po prawej: liniowy mostek cieplny na stropie gęstożebrowym w linii oparcia ścianki ażurowej stropodachu

fotografia 3 — po lewej: liniowy mostek cieplny w nadprożu okna w łazience; po prawej: mostek cieplny 3D w narożu między ścianami a stropodachem z attyką murowaną

projektu wykazała, iż zawarty w nim współczynnik przenikania ciepła tej ściany obliczono z pominięciem mostków ciepła. Z uwzględnieniem wszystkich liniowych mostków cieplnych (słupy, rdzenie, podciągi, nadproża, balkon i daszek) oraz punktowych mostków cieplnych kotwienia warstwy ocieplenia współczynnik ten wynosi ***U***=0,310 W/m²K. Jest więc większy aż o 68% od wskazanego w projekcie. Podobne relacje wystąpiły także w obliczeniach ***U*** stropodachu oraz podłogi na gruncie. Wymagana moc cieplna kotła dla tego domu z uwzględnieniem wszystkich mostków cieplnych wynosi 17,3 kW.

Warto podkreślić, iż powszechnie wśród projektantów bagatelizowany jest niepozorny wymóg zawarty w §321.1. WT [3]: „Na wewnętrznej powierzchni nieprzezroczystej przegrody zewnętrznej nie może występować kondensacja pary wodnej umożliwiająca rozwój grzybów pleśniowych". Otóż, w zdaniu tym ukryta jest konieczność podczas sporządzania projektów budowlanych dokładnego obliczania cieplnego przegród tracących ciepło, a zawierających mostki cieplne. Na tę konieczność jednoznacznie wskazuje norma [4], ponieważ właśnie mostki cieplne powodują zwiększone przenikanie ciepła i silne obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni tych miejsc. Jeśli temperatura powierzchni obniży się do wartości temperatury punktu rosy, dojdzie do pojawienia się pleśni i grzybów pleśniowych oraz zabronionej korozji biologicznej w strefach mostków cieplnych.

Na *fotografiach 2, 3 i 4* przedstawione są skutki istnienia liniowych i punktowych mostków cieplnych — spowodowanych pominięciem ich podczas obliczeń cieplnych przy sporządzaniu projektów budowlanych. Podkreślić trzeba, iż poprawnie sporządzony projekt budowlany oraz poprawne wg takiego projektu wykonawstwo skutecznie eliminują zagrożenia powstania korozji biologicznej elementów budynku.

Jerzy Bogdan **ZEMBROWSKI**

ilustracje: © Autor

Bibliografia:

1. Zembrowski Jerzy Bogdan „Sekrety tworzenia murowanych domów bez błędów". BDB. Białystok 2017 r.
2. Zembrowski Jerzy Bogdan „Wymiana ciepła". Architektura & Biznes 01'20. AiB sp. z o.o. Kraków 2020
3. ROZPORZĄDZENIE Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie
4. PN-EN ISO 10211-1:2005 Mostki cieplne w budynkach. Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni.

fotografia 4 — po lewej: liniowy mostek cieplny na ścianie zewnętrznej w miejscu płyty balkonowej; po prawej: mostek cieplny w nadprożu okna