

TERMORENOWACJA STOLARKI OKIENNEJ



mgr inż. Romana Antczak-Jarząbska
dr hab. Maciej Niedostatkiwicz, prof. PG

W artykule przedstawiono wyniki wstępnych obliczeń współczynnika przenikania ciepła dla zabytkowych okien skrzynekowych, wykonanych dla stanu przed i po ich renowacji. Celem analizy było uzyskanie żądanych przepisami szczegółowymi wartości parametrów termoizolacyjnych przy jednoczesnym braku utraty wartości historycznej stolarki okiennej.

Stolarka okienna stanowiąca element wyposażenia budynku podlega ochronie konserwatorskiej, podobnie jak jego pozostała część, w przypadku gdy budynek jako całość objęty jest ochroną konserwatorską lub znajduje się w strefie osłony konserwatorskiej. W zależności od decyzji konserwatora zabytków uwarunkowanej wymaganiami przepisów szczegółowych w obiektach zabytkowych możliwa jest całkowita wymiana istniejącej stolarki na nową z zachowaniem podziału funkcjonalnego lub modernizacja istniejącej stolarki. Główną zaletą tego drugiego podejścia jest fakt, że prawidłowo odnowiona stolarka okienna nie zaburzy zabytkowego charakteru założeń architektonicznych budynku, a oryginalne okna będą potwierdzać wartość historyczną obiektu [1, 2]. Celem artykułu jest przedstawienie wyników próby określenia współczynnika przenikania ciepła U dla istniejącej w obiekcie zabytkowym stolarki okiennej, która została poddana termorenowacji. Analizie poddano najczęściej występujący w obiekcie rodzaj stolarki okiennej, nazywany w dalszej części artykułu Typem 1. Przypadek stolarki okiennej poddanej termorenowacji określony został jako Typ 2.

Przedmiot analizy

Stolarka przed termomodernizacją – Typ 1

Do analizy wybrano okno o wymiarach $2,16 \times 2,18$ m (rys. 1.). Grubość poszczególnych warstw wynosiła odpowiednio: 0,005 m (szyba), 0,1 m (pustka) oraz 0,005 m (szyba).

Stolarka po termomodernizacji – Typ 2

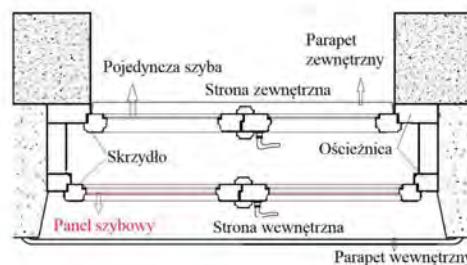
Stolarka okienna Typ 2 dotyczy okna skrzynekowego opisanego powyżej, w którym dodatkowo umieszczono panel szybowy wewnątrz skrzydła okiennego. Panel szybowy składał się ze szkła bez powłoki niskoemisyjnej (0,004 m)/pustki powietrznej (0,016 m)/szkła (0,004 m). Łącznie okno w przekroju składało się (od strony wewnętrznej) z panelu szybowego, pustki (0,1 m) oraz szyby (0,005 mm). Schemat okna skrzynekowego po dodaniu pakietu szybowego został pokazany na przekroju poziomym (rys. 2.).

Proces wymiany ciepła

Przebieg procesu wymiany ciepła w stolarkie okiennej opisano za pomocą symulacji numerycznej wykorzystującej metodę objętości



Rys. 1. Okno w budynku zabytkowym: Typ 1 – stan przed i po termorenowacji



Rys. 2. Przekrój poziomy okna – rama okienna z dodatkowym panelem szybowym (Typ 2)

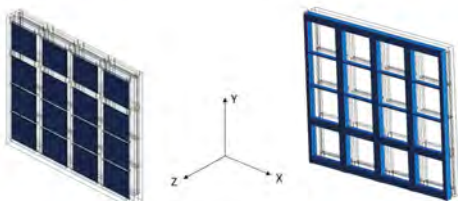
skończonych (MOS). Jest ona wykorzystywana w różnych dziedzinach nauki oraz pozwala na znaczne ograniczenie w procesie konstruowania kosztownego i czasochłonnego etapu budowania oraz badania prototypu [3]. Obliczenia wykonano za pomocą programu ANSYS CFX 16.2 [4]. Do analizy numerycznej przyjęto dane materiałowe według [5], podane w tablicy 1. Warunki klimatu zewnętrznego przyjęto

według [6], dla pierwszej strefy klimatycznej (Gdańsk): $T_e = -16,0^{\circ}\text{C}$. Warunki klimatu wewnętrznego przyjęto według rozporządzenia Ministra Infrastruktury [7], dla pomieszczeń biurowych $T_i = 20,0^{\circ}\text{C}$. Wartości oporów przejmowania ciepła od strony wewnętrznej i zewnętrznej przyjęto według [8] i dla nich wyznaczono wartości współczynników przejmowania ciepła:

$h_i = 8,00 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej,

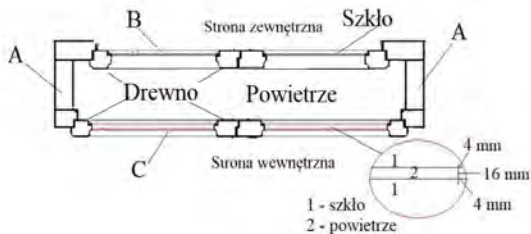
$h_e = 23,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej.

Jak powszechnie wiadomo, proces wymiany ciepła zachodzi poprzez promieniowanie, konwekcję i przewodzenie. Bardzo często te trzy zjawiska występują jednocześnie, jednak w praktyce inżynierskiej na ogół jedno z nich przeważa i może być rozpatrywane odrębnie [9]. W artykule wzięto pod uwagę wyłącznie wymianę ciepła poprzez przewodzenie z uwzględnieniem warunku konwekcyjnego na brzegach zewnętrznych. Geometria układu fizycznego, w którym analizowany był proces wymiany ciepła, była uproszczonym modelem rzeczywistego okna. Poczynione uproszczenia w postaci wyodrębnienia ramy okiennej ze szkłem i występującą w oknach skrzynekowych pustką powietrzną bez fragmentu muru nie miały istotnego wpływu na przebieg wymiany ciepła oraz na pole temperatury w analizowanym układzie fizycznym [10]. Wszystkie istotne termicznie elementy okna zostały uwzględnione w modelu, dzięki czemu warunki termiczne modelu powinny być zbliżone do rzeczywistych (rys. 3).



Rys. 3. Model numeryczny stolarki okiennej: a – szyba, b – rama

W celu wyznaczenia rozkładu temperatury i gęstości strumienia ciepła przewodzenie ciepła opisano równaniami matematycznymi, uwzględniając przy tym odpowiednie warunki brzegowe (rys. 4).



Rys. 4. Model obliczeniowy z zaznaczonymi powierzchniami do warunków brzegowych

Chcąc dokonać przyspieszenia obliczeń, modele „wycięto” z rzeczywistego układu fizycznego za pomocą płaszczyzn adiabatycznych (A), czyli płaszczyzn, gdzie przyjmuje się, że wartość gęstości strumienia ciepłego jest równa zero:

$$q|_s = 0 \quad (1)$$

W symulacji komputerowej przyjęto model przewodnictwa cieplnego, opisanego równaniem Laplace’a dla trójwymiarowego stacjonarnego zjawiska przewodzenia ciepła:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

z warunkami brzegowymi trzeciego rodzaju (B,C):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_F - T_p) \quad (3)$$

gdzie:

T – temperatura ($^{\circ}\text{C}$),

λ – współczynnik przewodzenia ciała [$\text{W}/\text{m K}$],

x – wektor określający położenie,

h – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni ciała [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$],

T_F – temperatura powierzchni ciała ($^{\circ}\text{C}$),

T_p – temperatura płynu z dala od powierzchni ciała stałego ($^{\circ}\text{C}$).

Dla badanego zjawiska przyjęto następujące założenia oraz związane z nimi uproszczenia: założono kartezjański układ współrzędnych X, Y, Z; pominięto wpływ sił grawitacji; gaz w środku okna potraktowano jako element, w którym ciepło przekazywane jest jedynie przez przewodzenie (ze względu na czas obliczeń); rozwiązanie obliczono dla stanu ustalonego.

Ze względu na zastosowane w obliczeniach dane materiałowe (tab. 1.) dla stanu ustalonego przyjęto następujące współczynniki przewodzenia ciepła λ . W artykule pominięto takie współczynniki, jak współczynnik przepuszczalności, pochłaniania czy emisyjności.

Tab. 1. Właściwości cieplne materiałów

Nazwa materiału	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [$\text{W}/\text{m K}$]
Powietrze (z uwzględnieniem konwekcji)	0,026
Szkło	1,00
Drewno sosnowe	0,20

Dla analizowanego modelu przyjęto siatkę objętości skończonych. Do obliczeń wykorzystano elementy trójkątne i czworokątne o różnym stopniu zagęszczenia w zależności od wielkości modelowanych obszarów.

Wyniki obliczeń

Przyjęty model numeryczny do obliczeń zawierał wiele uproszczeń, takich jak pominięcie mostka termicznego wzdłuż ościeża okiennego czy infiltracji powietrza zewnętrznego. Przyjęte uproszczenia miały na celu przyspieszyć czas obliczeń, a uzyskane wyniki miały posłużyć do porównania skali zmian własności termoizolacyjnych stolarki po wprowadzeniu dodatkowego panelu szybowego. W celu wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła U dla stolarki Typu 1 na podstawie symulacji numerycznej należało najpierw określić następujące wielkości:

A. Temperaturę – wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 5a, b, c, d.

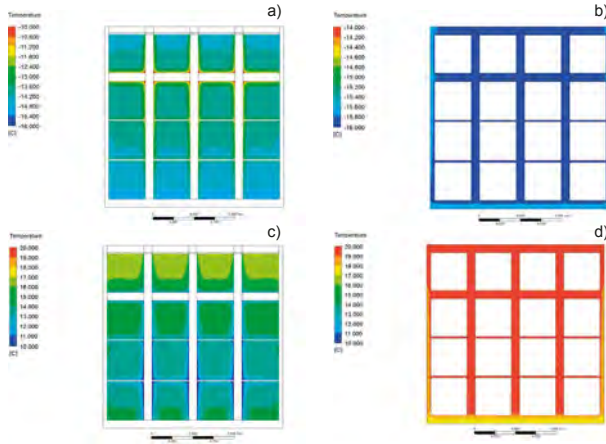
B. Gęstość strumienia ciepła – wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 6a, b, c, d.

Na rys. 5. i 6. przedstawiono rozkład temperatury oraz gęstość strumienia ciepła dla szyby i ramy okiennej w zależności od rodzaju kontaktu z powietrzem ciepłym lub zimnym. Uzyskano następujące wartości:

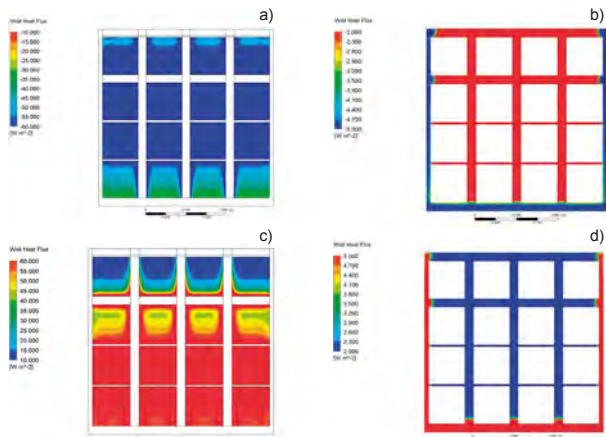
Typ nr 1	
Temperatura szyby:	Gęstość strumienia ciepła szyby:
$T_{\min, \text{szyba_zew}} = -15,1 [^{\circ}\text{C}]$	$q_{\min, \text{szyba_zew}} = -60 [\text{W}/\text{m}^2]$
$T_{\max, \text{szyba_zew}} = -10,7 [^{\circ}\text{C}]$	$q_{\max, \text{szyba_zew}} = -10 [\text{W}/\text{m}^2]$
$T_{\min, \text{szyba_wew}} = 10,8 [^{\circ}\text{C}]$	$q_{\min, \text{szyba_wew}} = 10 [\text{W}/\text{m}^2]$
$T_{\max, \text{szyba_wew}} = 17,7 [^{\circ}\text{C}]$	$q_{\max, \text{szyba_wew}} = 60 [\text{W}/\text{m}^2]$
Temperatura ramy:	Gęstość strumienia ciepła ramy:
$T_{\min, \text{rama_zew}} = -15,9 [^{\circ}\text{C}]$	$q_{\min, \text{rama_zew}} = -2 [\text{W}/\text{m}^2]$
$T_{\max, \text{rama_zew}} = -15,4 [^{\circ}\text{C}]$	$q_{\max, \text{rama_zew}} = -5 [\text{W}/\text{m}^2]$
$T_{\min, \text{rama_wew}} = 17,1 [^{\circ}\text{C}]$	$q_{\min, \text{rama_wew}} = 2 [\text{W}/\text{m}^2]$
$T_{\max, \text{rama_wew}} = 19,7 [^{\circ}\text{C}]$	$q_{\max, \text{rama_wew}} = 5 [\text{W}/\text{m}^2]$

Ponieważ do analizy przyjęto warunki klimatu zewnętrznego dla pierwszej strefy klimatycznej (Gdańsk): $T_e = -16,0^{\circ}\text{C}$, pomierzona gęstość strumienia ciepła po zewnętrznej stronie jest ze znakiem minus. A jak wiadomo, wektory gęstości strumienia ciepła skierowane

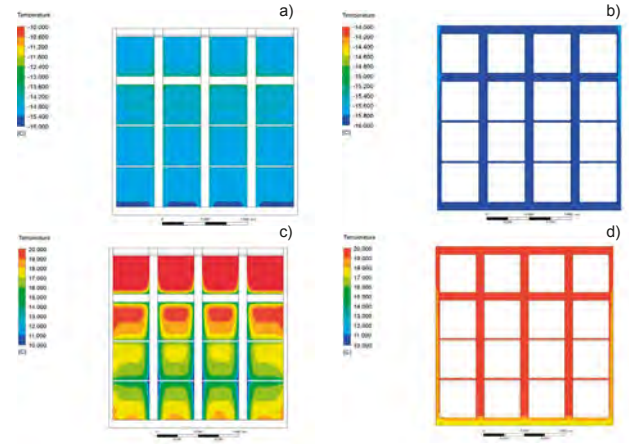




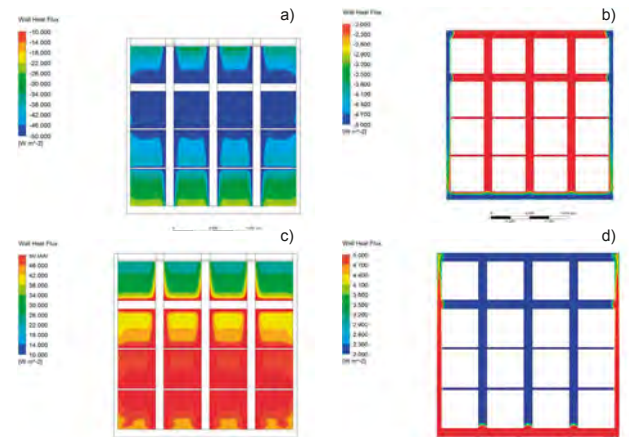
Rys. 5: Pole rozkładu temperatury dla szyby oraz dla ramy w kontakcie z powietrzem: a), b) zewnętrznym, c), d) wewnętrznym (Typ 1)



Rys. 6: Gęstość strumienia ciepła dla szyby oraz dla ramy w kontakcie z powietrzem: a), b) zewnętrznym, c), d) wewnętrznym (Typ1)



Rys. 7: Pole rozkładu temperatury dla szyby oraz dla ramy w kontakcie z powietrzem: a), b) zewnętrznym, c), d) wewnętrznym (Typ 2)



Rys. 8: Gęstość strumienia ciepła dla szyby oraz dla ramy w kontakcie z powietrzem: a), b) zewnętrznym, c), d) wewnętrznym (Typ 2)

są zawsze prostopadłe do izoterm (czyli zawsze zgodnie z kierunkiem największych zmian temperatury) i mają zwrot zgodny ze spadkiem temperatury (czyli odwrotny do jej gradientu). Ten sam algorytm postępowania powtórzono dla okna po termomodernizacji – Typ 2. W celu wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła U należało najpierw określić następujące wielkości:

- A. Temperaturę – wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 7a, b, c, d.
- B. Gęstość strumienia ciepła – wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 8a, b, c, d.

Na rys. 7 i 8. przedstawiono rozkład temperatury oraz gęstość strumienia ciepła dla szyby i ramy okiennej w zależności od rodzaju kontaktu z powietrzem ciepłym lub zimnym. Uzyskano następujące wartości:

Typ nr 2	
Temperatura szyby:	Gęstość strumienia ciepła szyby:
$T_{min,szyba_zew} = -16,0 [^{\circ}C]$	$q_{min,szyba_zew} = -50 [W/m^2]$
$T_{max,szyba_zew} = -13,1 [^{\circ}C]$	$q_{max,szyba_zew} = -21 [W/m^2]$
$T_{min,szyba_wew} = 12,2 [^{\circ}C]$	$q_{min,szyba_wew} = 26 [W/m^2]$
$T_{max,szyba_wew} = 20,0 [^{\circ}C]$	$q_{max,szyba_wew} = 50 [W/m^2]$
Temperatura ramy:	Gęstość strumienia ciepła ramy:
$T_{min,rama_zew} = -16,0 [^{\circ}C]$	$q_{min,rama_zew} = -5 [W/m^2]$
$T_{max,rama_zew} = -15,4 [^{\circ}C]$	$q_{max,rama_zew} = -2 [W/m^2]$
$T_{min,rama_wew} = 17,4 [^{\circ}C]$	$q_{min,rama_wew} = 2 [W/m^2]$
$T_{max,rama_wew} = 19,8 [^{\circ}C]$	$q_{max,rama_wew} = 5 [W/m^2]$

Na podstawie analizy numerycznej wyznaczono średnie temperatury T powierzchni stolarki okiennej (rys. 9.) oraz średnie wartości gęstości strumienia ciepła q (rys. 10.). Na rys. 5. oraz rys. 7. widać wpływ zastosowanego panelu na przepływ temperatury. Na rys. 7c z pane-

lem szybowym w analizie numerycznej pole rozkładu temperatury charakteryzuje się wyższymi wartościami temperatury na powierzchni niż na rys. 5c, co wskazuje na zwiększenie izolacyjności termicznej w stosunku do okna bez panelu szybowego. Dodatkowo temperatura powierzchni okna z panelem od wewnątrz (rys. 7c) w dolnych częściach osiąga wysokie wartości $\sim 19 [^{\circ}C]$, co korzystnie wpływa na wyeliminowanie możliwości występowania zjawiska skraplania się pary wodnej na zimnej powierzchni okien. Uzyskane wartości średnie temperatury T powierzchni stolarki okiennej oraz średnie wartości gęstości strumienia ciepła q z analizy numerycznej posłużyły do wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła U .

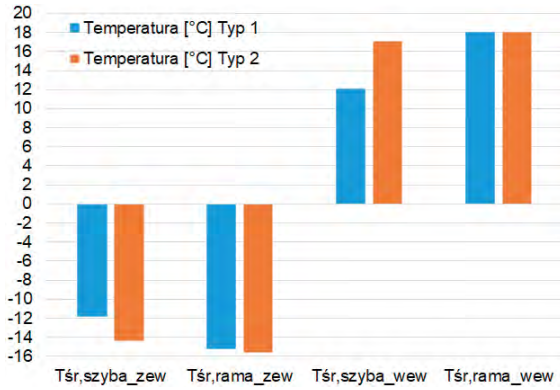
Obliczeniowy współczynnik przenikania ciepła obliczono jako równoważny, a kryterium równoważności jest gęstość strumienia ciepła dla modelu jedno- i trójwymiarowego:

$$U_{3D} = \frac{1}{R_{eqv}} \quad (4)$$

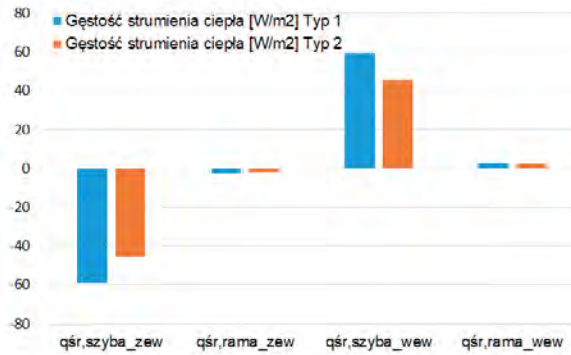
gdzie:
 R_{eqv} – równoważny opór cieplny przegrody termicznej w modelu 3D [m^2K/W],

$$R_{eqv} = R_i + R_e + R_{peqv} \quad (5)$$

gdzie:
 R_i – opór przyjmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody [m^2K/W],
 R_e – opór przyjmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody [m^2K/W],
 R_{peqv} – równoważny opór cieplny wszystkich warstw przegrody [m^2K/W].



Rys. 9. Zbiorcze zestawienie obliczonych wartości temperatury



Rys. 10. Zbiorcze zestawienie obliczonych wartości gęstości strumienia ciepła

Równoważny opór cieplny R_{peqv} obliczono dla modelu trójwymiarowego stacjonarnego i średnich ważonych wartości temperatur powierzchni oraz gęstości strumienia cieplnego:

$$R_{peqv} = \frac{(T_1 - T_2)}{q_{avr}} \quad (6)$$

gdzie:

T_1 – średnia temperatura powierzchni wewnętrznej przegrody [°C],
 T_2 – średnia temperatura powierzchni zewnętrznej przegrody [°C],
 q_{avr} – średnia wartość gęstości strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnię wewnętrzną przegrody [W/m²].

Średnie ważne wartości temperatur powierzchni i gęstości strumienia cieplnego zdefiniowano jako:

$$q_{avr} = \frac{\int_{S_1} q dS}{S_1} \quad (7)$$

$$T_1 = \frac{\int_{S_1} T dS}{S_1} \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{\int_{S_2} T dS}{S_2} \quad (9)$$

gdzie:

S_1 – powierzchnia wewnętrzna płyty
 S_2 – powierzchnia zewnętrzna płyty.

Na podstawie powyższych założeń wyznaczono wartość współczynnika przenikania ciepła U dla dwóch typów stolarki okiennej:

Typ 1:	Typ 2:
$R_{eqv} = 0,13 + 0,04 + 0,4 = 0,57$	$R_{eqv} = 0,13 + 0,04 + 0,64 = 0,81$
$U_{typ1} = 1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_{typ2} = 1,19 \text{ W/m}^2\text{K}$

Od roku 2017 zaczęły obowiązywać nowe warunki techniczne [7]. Wprowadzone zostały zaostrzone wymagania, w tym te odnoszące się do stolarki okiennej, które miały na celu poprawę energooszczędności obiektów. Zaproponowany do wykonania dodatkowy panel szybowy w oknie skrzynkowym spowodował dopasowanie się istniejącej stolarki okna do obowiązujących przepisów technicznych [7], które od 01.01.2017 roku przewidują wartość współczynnika przenikania ciepła na poziomie $U_{max} = 1,6 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$. Od 01.01.2021 wymagania zaostrzone zostaną do wartości $U_{max} = 1,4 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$.

Wnioski

Celem termorenowacji okien w obiektach zabytkowych jest poprawa ich parametrów technicznych w celu dostosowania do wymagań aktualnie obowiązujących przepisów szczegółowych, oraz przywrócenie ich stanu sprawności technicznej w sposób zapewniający brak utraty walorów historycznych zarówno samych okien, jak i obiektów budowlanych jako całości. W poddanej analizie przypadku okien skrzynkowych montaż dodatkowego panelu szybowego poprawił współczynnik przenikania ciepła U o prawie 30%. W przedstawionych w artykule obliczeniach celowo wprowadzono szereg uproszczeń, dzięki którym czas obliczeń numerycznych metodą objętości skończonych (MOS) był znacząco krótszy, co jest bardzo istotne, gdyż docelowo programy oparte na tej metodzie mogą stanowić przydatne narzędzie dla projektantów przy realizacji wstępnych obliczeń związanych z termomodernizacją obiektów. Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych należałoby także zweryfikować na drodze eksperymentu. W dalszych badaniach wskazuje byłoby zbudować bardziej złożony numeryczny model trójwymiarowy oraz uwzględnić wszystkie sposoby wymiany ciepła, a także ruch cząstek wewnątrz gazów. Uzyskane wyniki należałoby porównać z zaprezentowanym powyżej modelem uproszczonym w aspekcie dokładności oraz czasu obliczeń. Na etapie montażu panelu szybowego zalecane byłoby wstawienie szyb zespolonych z powłoką niskoemisyjną od strony pomieszczeń w celu uzyskania jeszcze większego efektu termomodernizacyjnego. ■

Abstract. The paper presents the results of preliminary calculations of the heat transfer coefficient for historic windows made for the state before and after their renovation. The aim of the analysis was to obtain the values of thermal insulation parameters demanded by the regulations, while not losing the historical value of the window. The described example of the thermo-renovation concept of the existing window consisted in installing an additional window panel from the inside.

Key words: thermo-modernization of windows, window panel, historic window

Bibliografia

- [1] L. Santoli, F. Mancini, S. Rossetti, B. Nastasi, Energy and system renovation plan for Galleria Borghese, Rome, „Energy and Buildings”, October 2016, doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.030.
- [2] E. Lucchi, Simplified assessment method for environmental and energy quality in museum buildings, „Energy and Buildings”, April 2016, doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.037.
- [3] Arpino F., Buonanno G., Giovinco G., Thermal conductance measurement of windows: An innovative radiative method, “Experimental Thermal and Fluid Science” 2008, Vol. 32, Issue 8, p. 1731-1739.
- [4] ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 15.0, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, November 2013.
- [5] PN-EN ISO 10456:2009 Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych właściwości cieplnych.
- [6] PN-EN 12831:2006 Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 ze zmianami z roku 2017.
- [8] PN-EN ISO 6946:2008 Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania.
- [9] Wiśniewski S., Wiśniewski T., Wymiana ciepła, WNT Warszawa 1994.
- [10] J. Adamus, M. Pomada, Analysis of heat flow in composite structures used in window installation, „Composite Structures”, 29 December 2017, doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.077.