

prof. dr hab. inż. Anatolij Pavlenko¹⁾

ORCID: 0000-0002-8103-2578

prof. dr hab. inż. Jerzy Zb. Piotrowski^{1)*}

ORCID: 0000-0002-8479-1406

dr inż. Anna Stepień²⁾

ORCID: 0000-0001-7937-8804

mgr inż. Anita Ciosek³⁾

mgr inż. Karolina Sadko³⁾

Wpływ bariery termicznej na efektywność energetyczną zestawu szybowego

Influence of the thermal barrier on the energy efficiency of double glazing

DOI: 10.15199/33.2023.09.13

Streszczenie. Mimo postępu technologicznego okno i najważniejszy jego składnik – zestaw szybowy to najsłabsze ogniwo izolacyjne przegrody budynku. W Politechnice Świętokrzyskiej rozpoczęto badania nad poprawą izolacyjności zestawów szybowych przez zastosowanie elementów grzewczych w komorze wewnętrznej międzyszybowej, tworząc tzw. barierę termiczną. Przedmiotem artykułu jest pokazanie możliwości podwyższenia temperatury zestawu, przeprowadzenie analizy numerycznej i eksperymentalnej, ocena bilansu energetycznego, przy założeniu, że bariera termiczna zasilana zostanie energią odnawialną.

Słowa kluczowe: bariera termiczna; zestawy szklane okienne; wspomaganie energetyczne.

Abstract. Despite technological progress, the window and its most important component – double glazing – is the weakest insulating link of the entire building envelope. At the Technology University of Kielce, research has begun on improving the insulation of double glazing through the use of heating elements in the inner chamber between the panes, creating the so-called thermal barrier. The focus of the article is to show the possibility of increasing the temperature of the glazing unit, to carry out numerical and experimental analysis, to assess the energy balance, assuming that the thermal barrier will be powered by renewable energy.

Keywords: thermal barrier; double glazing; energy support.

W ścianach nieprzeziernych wymaganą przepisami [1] ochronę cieplną można uzyskać, zwiększając grubość zastosowanej izolacji termicznej, ograniczając mostki termiczne oraz stosując specjalne rozwiązanie materiałowe [2, 3]. W przypadku okien i przegród przeziernych trudno jest osiągnąć parametry porównywalne z przegrodami nieprzeziernymi. Stąd, poszukiwania sposobu poprawienia efektywności energetycznej okien [4]. O ile można poprawić izolacyjność cieplną ościeżnic okiennych, to w przypadku zestawów szybowych takie możliwości ograniczone są szybą, która przede wszystkim musi być przezierna. Izolacyjność cieplną szyb można zwiększyć przez wypełnienie przestrzeni między nimi gazem szlachetnym [5 ÷ 7], umieszczając folię ograniczającą emisyjność [8 ÷ 10] czy zwiększając liczbę komór w zestawie szybowym [11 ÷ 13]. Efektem jest możliwość uzyskania wymaganego przepisami współczynnika przenikania ciepła okien $U_o = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ [1].

Obecnie w kilku ośrodkach w Polsce badane są możliwości poprawy izolacyjności cieplnej okien. W Politechnice Świętokrzyskiej wybudowano stanowisko badawcze do prowadzenia eksperymentów oceniających różne rozwiązania szyb wielokomorowych mające na celu m.in. podwyższenie temperatury w komorze od strony wewnętrznej w zestawach

szyb okiennych, co stworzy barierę termiczną ograniczającą przepływ ciepła od strony wewnętrznej. Jest to zgodne z zasadą, że im mniejsza różnica temperatury między środowiskiem wewnętrznym i zestawem szybowym, tym mniejszy przepływ, co pozwala uzyskać poprawę efektywności energetycznej zestawu szybowego. Aby skompensować różnicę temperatury między zestawem szybowym a środowiskiem zewnętrznym, konieczna jest większa ilość ciepła np. ze źródeł odnawialnych. W artykule przedstawiono analizę możliwości podwyższenia temperatury w komorze zestawu szybowego, ocenę bilansu energetycznego, przy założeniu, że barierę termiczną powodującą wzrost temperatury w zestawie uzyska się przy minimalnych kosztach zasilania w energię.

Przepływ ciepła przez zestaw szybowy

Równania analityczne. W badaniu jednowymiarowym współczynnik przenikania ciepła U [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] zestawu szybowego wyrażony jest wzorem:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \sum_{s=1}^n \frac{d_s}{\lambda_s} + \sum_{s=1}^{n-1} \frac{1}{h_{gap}} + \frac{1}{h_{se}}} \quad (1)$$

gdzie:

R_T – całkowity opór cieplny zestawu szybowego [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$];

h_{si} , h_{gap} i h_{se} – współczynniki przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni szyby w szczelinie między szybami i zewnętrznej powierzchni [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$];

$h_{gap} = h_{rad,gap} + h_{conv,gap}$ – suma współczynników przejmowania ciepła przez promieniowanie i konwekcję [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$];

λ_s – przewodność cieplna szyby [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$];

d_s – grubość szyby [m];

n – liczba płaszczyzn szklanych.

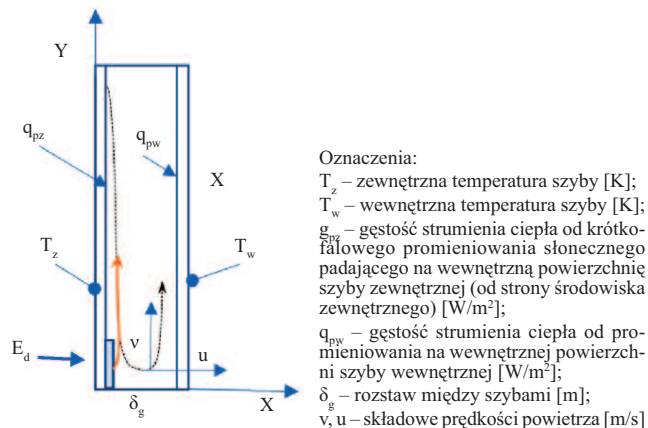
¹⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energii Odnawialnej

²⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury

³⁾ Politechnika Świętokrzyska, Szkoła Doktorska

^{*} Adres do korespondencji: piotrowski@tu.kielce.pl

W przestrzeni między szybami ruchy konwekcyjne zdecydowanie zmieniają się pod wpływem zwiększenia dopływającej energii z dodatkowego zasilania energetycznego E_d [W/m²] (rysunek 1). Przenoszenie ciepła przez konwekcję ma wpływ na parametry fizyczne gazu wypełniającego przestrzeń międzyszybową: m.in. jego ciepło właściwe, gęstość, lepkość. To powoduje, że współczynniki przejmowania ciepła (tj. h_{si} , h_{gap} i h_{sc}) są funkcją temperatury powierzchni, wymiany ciepła oraz prędkości, temperatury i właściwości fizycznych ośrodka gazowego.



Rys. 1. Schemat procesu wymiany ciepła przy dodatkowym zasilaniu energetycznym E_d [W/m²]

Fig. 1. Diagram of the heat exchange process with additional energy supply E_d [W/m²]

Przepływ ciepła w modelu dwuwymiarowym określany jest bilansami:

• masy: $\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0$ (2)

• pędu

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T_1 - T_2)$$

• energetycznym

$$C_p \rho \left(\frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} \right) = h_{gap} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S_h + E_d \quad (4)$$

gdzie:

u – składowa prędkości w kierunku x [m/s];
 v – składowa prędkości w kierunku y [m/s]; p – ciśnienie [Pa];
 ρ – gęstość powietrza [kg/m³]; C_p – pojemność cieplna powietrza [J/(kg·K)];
 T – temperatura powietrza [K]; S_h – radiacyjny przepływ ciepła [W/m²];
 E_d – dodatkowe zasilanie energetyczne [W/m²].

Warunki brzegowe do obliczania wymiany ciepła:

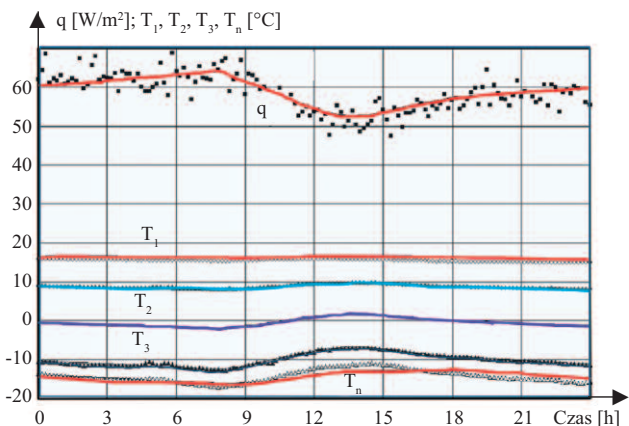
$$x = 0: T = T_o, \quad x = H: T = T_z, \quad y = 0, L: \partial T / \partial y = 0 \quad (5)$$

Przyjmuje się, że na powierzchni zewnętrznej szyb składowe prędkości v i u są równe zero. Na powierzchni wewnętrznej szyb określono warunki czwartego rodzaju, biorąc pod uwagę strumień ciepła wynikający z promieniowania:

$$\begin{cases} \text{do szkła zew-} & -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=ds} = -\lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=ds} - q_{pz} \\ \text{nętrznego:} & \\ \text{do szkła wew-} & -\lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=ds+\delta_g} - q_{pw} = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=2ds+\delta_g} \\ \text{nętrznego:} & \end{cases} \quad (6)$$

gdzie: d_s – grubość szkła [m]; δ_g – rozstaw między szybami [m].

Rozwiązanie numeryczne. Równania (1) – (4) z warunkami brzegowymi (5) – (6) rozwiązano metodą objętości skończonych [14, 15]. Analizowano dwukomorowy zestaw szyb, proces zmienności gradientu temperatury i strumienia ciepła (rysunek 2). Przyjęto, że szerokość rozstawu między szybami wynosi $\delta_g = 0,16$ m, grubość szyb $d_s = 0,004$ m, wysokość zestawu $L = 1,0$ m i szerokość $H = 0,80$ m, odpowiadające wymiarom ramy badawczej (fotografia 1). Przyjęto emisyjność powierzchni szklanych $\varepsilon = 0,9$, temperaturę powierzchni szyb od zewnątrz $T_z = 273$ K, a od wewnątrz $T_w = 293$ K.



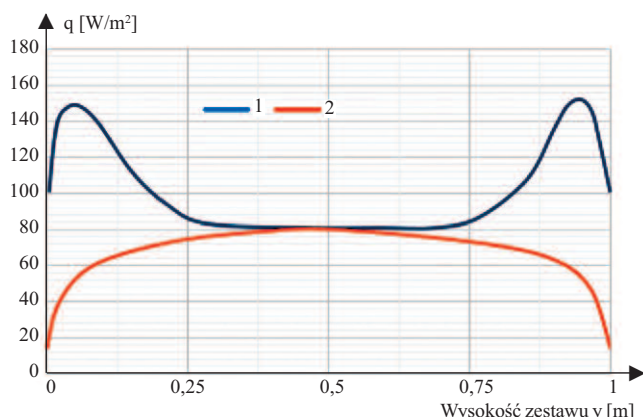
Rys. 2. Zmiana temperatury T na powierzchniach szklanych i strumienia ciepła q w przypadku wybranego okresu dobowego

Fig. 2. Change of temperature T on glass surfaces and heat flux q for a selected daily period



Fot. 1. Przegroda z badanymi zestawami szybowymi
Photo 1. Partition with tested double glazing

Rozkład gęstości strumienia ciepła uzyskany w wyniku rozwiązania równań przedstawiono na rysunku 3, z pominięciem zakłóceń termicznych w strefie brzegowej (ościeżnicy) zestawu szybowego. Zaobserwować można dużą zmienność gęstości strumienia ciepła w zależności od wysokości zestawu (y). Gaz, unosząc się i obmywając powierzchnię wewnętrzną szyby (T_w) nagrzewa się dodatkowo za pomocą źródła ciepła (E_d) i w tym obszarze występuje największe zróżnicowanie gradientu temperatury oraz największa gęstość strumienia ciepła. Analogicznie jest w górnej części zestawu, gdzie gaz kieruje



Rys. 3. Gęstość strumienia ciepła z powietrza między szybami do powierzchni szklanych: 1 – szyba zewnętrzna; 2 – szyba wewnętrzna

Fig. 3. Heat flux density from the air between the panes to the glass surfaces: 1 – outer pane; 2 – inner pane

się w stronę szyby zewnętrznej (T_z), w wyniku czego gradient temperatury między szybami jest maksymalny. W rezultacie w górnej części okna obserwuje się maksymalną gęstość strumienia ciepła w pobliżu szyby zewnętrznej (T_z), a minimalną w pobliżu szyby wewnętrznej (T_w) (rysunek 3). W środkowej części zestawu gradient temperatury jest najmniejszy i występuje wyrównanie gęstości strumienia ciepła między szybą wewnętrzną (T_w) i zewnętrzną (T_z). Analizując przebieg procesu w aspekcie bilansu energetycznego, należy stwierdzić, że wprowadzenie źródła ciepła (E_d) zintensyfikowało konwekcję gazu, co jednak zaznaczyło się zmniejszeniem uśrednionego przepływu ciepła. Jednocześnie w bilansie ważne jest pochodzenie energii E_d i w przypadku zasilania z OZE oszczędność energetyczna jest znaczna.

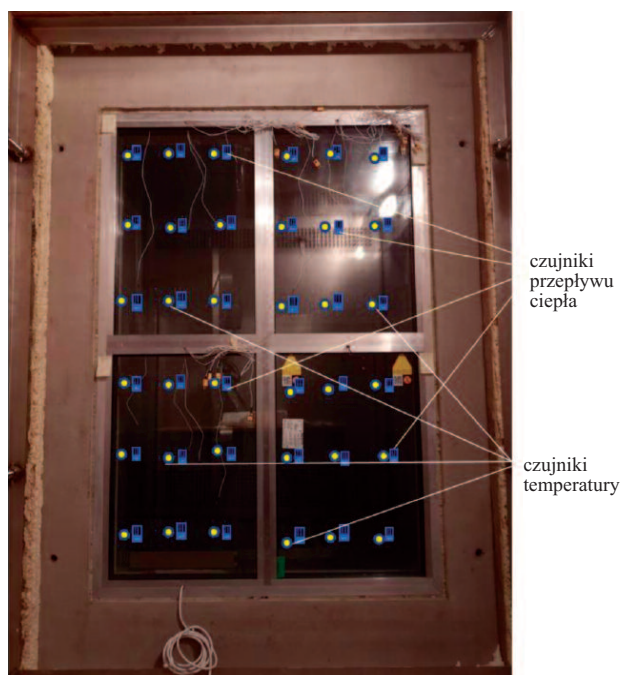
Badania eksperymentalne

Badania przeprowadzone zostały w komorze klimatycznej (fotografia 2) rozdzielonej przegrodą wykonaną z czterech opomiarowanych elementów szklanych (fotografia 3). Szyby w zestawach podwójnych przedzielone zostały ramką 16 mm, a przestrzeń między szybami wypełniona argonem. Elementy szkowe to:



Fot. 2. Komora klimatyczna do badań przegród pełnowymiarowych

Photo 2. Climatic chamber for testing full-size partitions



Fot. 3. Przegroda szklana z rozmieszczonymi czujnikami pomiarowymi

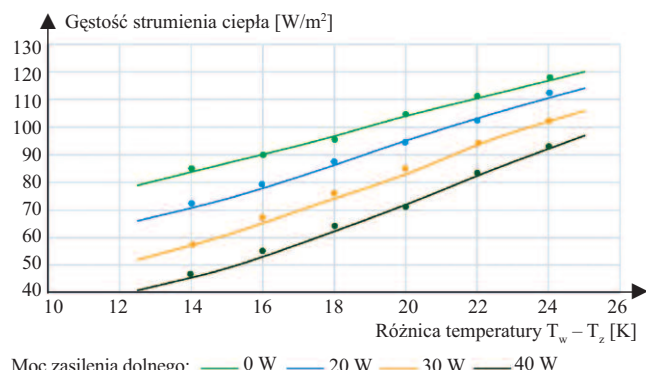
Photo 3. Glass partition with arranged measuring sensors

- standardowy (porównawczy) z szybami float;
- z szybą niskoemisyjną ($\epsilon = 0,5$);
- z systemem grzewczym w dole zestawu, mocowanym na szybie od strony wewnętrznej;
- z płytą grzewczą w postaci maty na powierzchni wewnętrznej.

W zależności od zadanych warunków w komorze zmieniała się temperatura, wilgotność i prędkość powietrza. Podczas badań uwzględniono stan ustalony mikroklimatu w komorze od wewnątrz i na zewnątrz, kalibrację części grzewczej i chłodzącej komory oraz pomiar temperatury i gęstości strumienia ciepła. Badaniu poddano zestaw z elementem grzewczym (E_d) umieszczonym na szybie rozdzielającej dwa zestawy, w przestrzeni międzyszybowej od strony wyższej temperatury (T_w). Tam również umieszczono czujniki temperatury o zakresie $T = 243 \text{ K} \div 313 \text{ K}$ ($-30 \div +40^\circ\text{C}$) i dokładności 0,1 K. Gęstość strumienia ciepła mierzono za pomocą foliowych czujników strumienia ciepła umieszczonych na dostępnej stronie zestawu szybowego. Do rejestracji wyników pomiarów wykorzystano czterokanałowy rejestrator termopary TM-947SD oraz rejestrator danych gęstości strumienia ciepła Hukseflux LI19. Nie generowano radiacji pochodzącej od promieniowania słonecznego.

Analiza wyników

Z uwagi na zasilenie zestawu w energię zewnętrzną (E_d), porównanie wyników nastąpiło przez zestawienie ilościowe przepływającego strumienia ciepła. Na rysunku 4 zaprezentowano wykres gęstości strumienia ciepła q w standardowym zestawieniu w różnych przedziałach temperatury występującej od strony zewnętrznej. Uruchomienie elementu grzewczego (E_d) u dołu zestawu szklanego spowodowało zintensyfikowanie ruchu konwekcyjnego, zwiększyło wy-



Rys. 4. Gęstość strumienia ciepła q [W/m^2] z dolnym zasilaniem energetycznym

Fig. 4. Heat flux density q [W/m^2] with lower energy supply

mianę ciepła, jednak w ogólnym bilansie straty ciepła były mniejsze w porównaniu z przeliczoną wielkością wprowadzonego zasilania.

Rysunek 4 przedstawia rozkład gęstości strumienia ciepła w przypadku dostarczenia energii o mocy 20, 30 i 40 W oraz przy braku zasilania zewnętrznego 0 W. Zasilanie zewnętrzne spowodowało, po uwzględnieniu bilansu energetycznego, średnio o 30% zmniejszenie przepływu strumienia ciepła. Można więc wnioskować, że podgrzewanie szyby i przestrzeni w zestawie szklanym od strony wewnętrznej, mimo zakłóceń związanych z konwekcją, jest opłacalne szczególnie w przypadku, jeżeli dostarczanie dodatkowej energii odbędzie się ze źródeł odnawialnych, np. z ogniw fotowoltaicznych. Można przyjąć, że taka instalacja z barierą termiczną, zasilaną z OZE, zmniejszy w ogólnym bilansie przepływ strumienia ciepła od strony wewnętrznej do 45%, mimo wzmożonego ruchu konwekcyjnego wewnątrz zestawu. Można to stwierdzić m.in. na podstawie wykresu (rysunek 4) przy zasilaniu 40 W. Przedstawione wyniki pomijają wpływ pozostałych elementów występujących w oknach, np. ościeżnicy, ramiaków itp.

Znaczne oszczędności energetyczne uzyskuje się, wprowadzając do zestawu tylko ramkę dystansową pokrytą warstwą termiczną, zgodnie z patentem [16]. W tej sytuacji, pomijając koszt wykonania warstwy termicznej, zysk energetyczny wynosi ok. 25%. Zwiększa się on w miesiącach z dużą radiacją słoneczną (także w okresie zimowym).

Wnioski

W wyniku symulacji numerycznej wymiany ciepła przez zestaw szybowy z komorą wypełnioną gazem, z dodatkowym zasilaniem zewnętrznym, znaleziono charakterystyki tego procesu: zróżnicowanie gradientów temperatury i gęstości strumienia ciepła. Zastosowanie elementu grzejnego może doprowadzić do powstania wielowarstwowej struktury strumienia gazu i zwiększenia wymiany ciepła. W ogólnym bilansie energetycznym, z właściwie dobraną wielkością zasilania zewnętrznego, nastąpi zminimalizowanie wymiany ciepła, a tym samym zmniejszenie strat ciepła.

W wyniku przeprowadzonych badań i otrzymanych danych eksperymentalnych potwierdzono, że wprowadzenie bariery termicznej w postaci elementu grzewczego podwyż-

sza temperaturę przestrzeni zestawu wewnętrznego i mimo że intensyfikuje ruch konwekcyjny w przestrzeni międzyszybowej, pozwala na średnio 30% oszczędności energetycznej.

W celu uzyskania wyraźnego efektu energetycznego konieczne jest zasilanie elementu grzewczego źródłami odnawialnymi. W przypadku wykorzystania OZE oszczędności energetyczne mogą dochodzić do 45% w odniesieniu do badanych zestawów szybowych.

Fotografie: J. Zb. Piotrowski

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. – Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie Dz. U. 2022 poz. 1225 t. j.
- [2] Biernacki K, Piotrowski JZ. Aktywne fasadowe systemy ociepleń. Materiały Budowlane. 2017; <https://doi.org/10.15199/33.2017.01.07>.
- [3] Piotrowski JZ, Orman LJ i inni. Test of thermal resistance of simulated walls with the reflective insulation. EFM13 – Experimental Fluid Mechanics 2013 67. 2014; 569 – 572.
- [4] Krechowicz M, Piotrowski JZ. Comprehensive risk management in passive buildings projects. Energies. 2021; <https://doi.org/10.3390/en14206830>.
- [5] Sun Y, Wu Y, Wilson R. A review of thermal and optical characterisation of complex window systems and their building performance prediction. Appl. Energy. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.144>.
- [6] Gorantla K, Shaik S, Setty AB. Effects of single, double, triple and quadruple window glazing of various glass materials on heat gain in green energy buildings. Energy and Environment Engineering. 2017; https://doi.org/10.1007/978-981-10-2675-1_5.
- [7] Arıcı M, Karabay H, Kan M. Flow and heat transfer in double, triple and quadruple pane windows. Energy Build. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.043>.
- [8] Arıcı M, Kan M. An investigation of flow and conjugate heat transfer in multiple pane windows with respect to gap width, emissivity and gas filling. Renewable Energy. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.004>.
- [9] Ismail KA, Salinas CT, Henríquez JR. A comparative study of naturally ventilated and gas filled windows for hot climates. Energy Convers. Manage. 2009; <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.026>.
- [10] Park S, Song S-Y. Evaluation of Alternatives for Improving the Thermal Resistance of Window Glazing Edges. Energies. 2019; <https://doi.org/10.3390/en12020244>.
- [11] Pal S, Roy B, Neogi S. Heat transfer modelling on windows and glazing under the exposure of solar radiation. Energy and Buildings. 2009; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.01.003>.
- [12] Pereira J, Gomes MG, Rodrigues AM, Almeida M. Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making. Energy Building. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.003>.
- [13] Teixeira H, Gomes MG, Rodrigues AM, Pereira J. Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films. Build. Environ. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106474>.
- [14] Basok B, Davydenko B i inni. Numerical modeling of heat transfer through a triple-pane window. Journal of Engineering Physics and Thermophysics 2016; 89 (5); 1277–1283.
- [15] Basok B, Davydenko B, Novikov VG i inni. Evaluation of Heat Transfer Rates through Transparent Dividing Structures. Energies. 2022; <https://doi.org/10.3390/en15134910>.
- [16] Piotrowski JZ, Szewczyk S i inni. Sposób nanoszenia powłoki fototermicznej na ramkę dystansową, zwłaszcza do zestawu szyb zespolonych. Politechnika Świętokrzyska; 2022; Patent Nr 241306.

Przyjęto do druku: 22.08.2023 r.