

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 697.148; 699.86

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.012>**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДАЧІ ЗІ СКЛОПАКЕТА З ЕЛЕКТРОНАГРІВОМ ЙОГО ПОВЕРХНІ****Б.І. Басок^{1*}**, чл.-кор. НАН України, **Б.В. Давиденко^{1**}**, докт. техн. наук,
С.М. Гончарук^{1*}**, канд. техн. наук, **А.М. Павленко^{1,2****}**, докт. техн. наук¹ – Інститут технічної теплофізики НАН України,

вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

² – Келецький Технологічний Університет,

ал. Тисячоліття Панства Польського-7, 25-314 Кельце, Польща

E-mail: goncharuk-s@ukr.net

Представлено результати експериментальних та теоретичних досліджень процесів теплоперенесення через двокамерний склопакет (4i-10-4M1-10-4i) з електронагрівом внутрішньої поверхні внутрішнього скла за рахунок подачі напруги на її низькоемісійне покриття. Створено теплофізичну модель теплоперенесення через такий склопакет з електронагрівом, яка дає змогу визначати характеристики його теплового режиму. Проведено верифікацію створеної чисельної моделі з використанням даних експериментальних досліджень. Проаналізовано отримані розподіли теплових потоків та температур на зовнішній і внутрішній поверхнях склопакета з електронагрівом. Бібл. 12, рис. 8.

Ключові слова: вікно з електронагрівом, теплоперенесення, тепловий режим.

Однією з найважливіших енергетичних проблем країни є раціональне використання палива та енергії. До 90 % життєвого часу людина проводить у приміщеннях. Енергоспоживання будівель значною мірою залежить від параметрів мікроклімату приміщень (температура, склад повітря, освітлення тощо), яких дотримуються під час проектування та експлуатації будівель. Їхній мікроклімат має суттєвий вплив на стан здоров'я, продуктивність та комфорт людей, які в них перебувають. Тому для визначення можливостей зменшення теплових втрат і використання електроенергії для опалення будівель найбільшу увагу слід приділяти будівельним огорожувальним конструкціям, особливо віконним конструкціям, адже саме на світлопрозорі конструкції припадають найбільші питомі тепловтрати будівлі в цілому.

Підвищити теплоізоляційну спроможність віконних конструкцій та покращити тепловий режим приміщення будівлі можливо за рахунок впровадження різних заходів. Зокрема зменшити кількість теплової енергії, що втрачається за рахунок радіаційної складової теплового потоку через склопакет, можливо, внаслідок використання в склопакеті скла з низькоемісійним покриттям [1-3] або завдяки застосуванню спеціальних енергозберігаючих плівок [4]. На опір теплопередачі віконної конструкції впливає відстань між склом та товщина скла в склопакеті. Важливими факторами щодо зменшення тепловтрат є також багатокамерність в склопакеті чи в профілі рами, застосування в склопакетах алюмінієвих, пластикових чи спеціальних «тепліх» дистанційних рамок, заповнення прошарку між склом інертним газом (аргоном, криптоном тощо) або вакуумування цього прошарку [5-7]. Крім того, покращення теплового режиму приміщення будівлі можливо шляхом реалізації теплової завіси перед віконною конструкцією (або створення можливості вентиляції внутрішнього прошарку між склом, підігрітим повітрям) [8], а також використання склопакетів з електронагрівом (СЕ) [9-12]. Суть електричного нагріву, здебільшого внутрішньої поверхні (що направлена всередину камери пакету) з низькоемісійним теплозберігаючим покриттям внутрішнього скла (з боку приміщення), полягає в тому, що вказане покриття створюється напиленням на поверхню



чи подачею в тонкий приповерхневий шар скла іонів деяких металів. Основне призначення покриття – це створення термічного опору перешкоджання поширенню електромагнітного випромінювання короткого інфрачервоного діапазону в довкілля і в такий спосіб зменшення дисипативних теплових втрат із приміщення назовні. Однак таку поверхню можна використати як нагрівальний резистивний елемент, якщо подати напругу на рівновіддалені місця поверхні, наприклад, у протилежні кути прямокутного скла. Внаслідок протіканню струму й створюється ефект нагрівання. Саме тому для встановлення особливостей теплоперенесення через склопакет з електронагрівом було проведено відповідні експериментальні та чисельні дослідження, результати яких наведено в цій роботі.

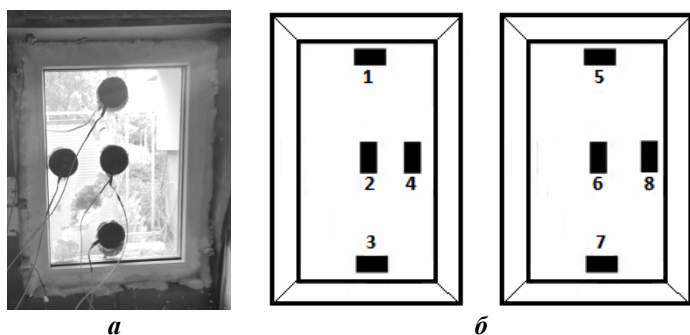


Рис. 1



Рис. 2

Із використанням встановлених датчиків теплового потоку та температури було отримано розподіли густин теплового потоку (рис. 3 а) та температури (рис. 3 б) на внутрішній та зовнішній поверхнях СЕ для заданої температури задавача-терморегулятора СЕ $\approx 60^{\circ}\text{C}$ (за температури зовнішнього повітря: -3°C). Найбільші значення теплового потоку за висотою z СЕ на зовнішній (в середньому $\approx 67,5\text{ Вт/м}^2$) та внутрішній поверхнях ($\approx 350,5\text{ Вт/м}^2$) СЕ в заданому режимі спостерігаються зверху СЕ, а найменші (відповідно $\approx 47,3\text{ Вт/м}^2$ та $\approx 288,2\text{ Вт/м}^2$) – знизу. На внутрішній поверхні СЕ максимальний розподіл температури спостерігається зверху склопакета (в середньому $\approx 60,4^{\circ}\text{C}$), а мінімальний ($\approx 51,8^{\circ}\text{C}$) – знизу, в той час як на зовнішній поверхні СЕ середні значення температур складають відповідно $\approx 11,6^{\circ}\text{C}$ зверху та $\approx 9,3^{\circ}\text{C}$ знизу.

Одночасно й незалежно від експерименту процес перенесення теплоти через двокамерний СЕ висотою $H=1\text{ м}$ та шириною $L=0,75\text{ м}$ досліджувався методом чисельного моделювання. Товщина скла в СЕ $\delta_c=4\text{ мм}$. Відстань між поверхнями скла в пакеті $\delta_a=10\text{ мм}$. Камери заповнені повітрям. На внутрішній поверхні внутрішнього скла та на внутрішній поверхні зовнішнього скла нанесені низькоемісійні і покриття. Внутрішня поверхня внутрішнього скла – з електронагрівом. Частина теплоти, що виділяється, передається в приміщення, а інша частина переноситься в зовнішній простір.

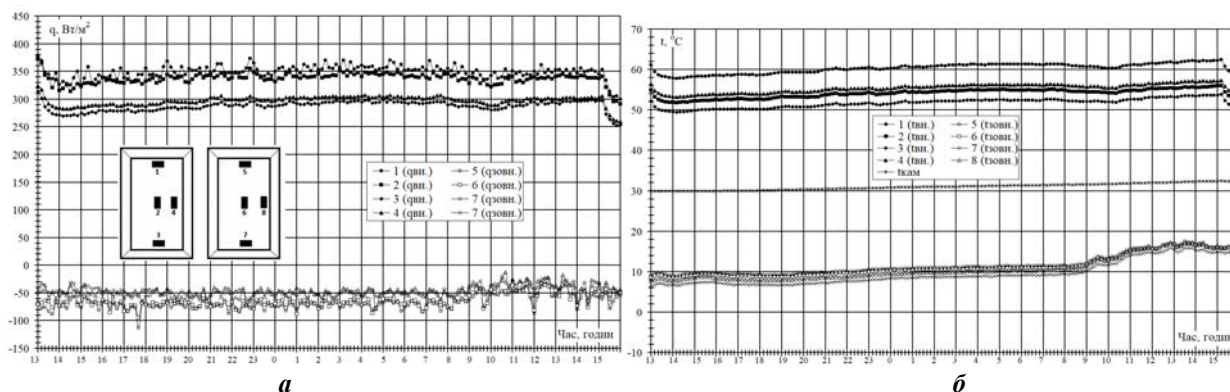


Рис. 3

Чисельне моделювання перенесення теплоти через двокамерний СЕ виконується шляхом розв'язання системи рівнянь, до якої входять рівняння нерозривності, рівняння перенесення імпульсу та енергії для газового середовища, що міститься в камерах склопакета, та рівняння теплопровідності для скла. Задача розв'язується в двовимірній постановці для вертикального перерізу склопакета. На внутрішніх поверхнях камер склопакета задавалися граничні умови четвертого роду, що враховують кондуктивний теплообмін між склом та газовим середовищем, а також радіаційний теплообмін між сусідніми поверхнями скла в камерах СЕ. Детальна постановка цієї задачі та метод її розв'язання наведені в [5]. На відміну від постановки задачі, що представлена в [5], вважається, що на внутрішній поверхні внутрішнього скла міститься додатковий тонкий шар, в якому відбувається виділення теплоти заданої потужності. Рівняння енергії для цього шару містить додатковий член, що виражає електричну потужність тепловиділення. На внутрішній і зовнішній поверхнях склопакета задаються змінні в часі значення температури, що були визначені з експерименту. Експериментальні значення температури, що визначалися за допомогою вмонтованих у датчик теплового потоку термометрів опору й розміщувались на внутрішній поверхні СЕ, наведені на рис. 4 а (1: $z=0,95$ м; 2: $z=0,5$ м; 3: $z=0,05$ м), а на зовнішній поверхні СЕ – на рис. 4 б (5: $z=0,95$ м; 6: $z=0,5$ м; 7: $z=0,05$ м). Розподіл температури по зовнішній та внутрішній поверхнях склопакета визначався з інтерполяційних квадратичних залежностей за трьома значеннями температури на відповідній поверхні. За результатами розрахунків визначалися залежності від часу густин теплових потоків на зовнішній та внутрішній поверхнях склопакета, які порівнювалися з даними, отриманими з експерименту. Приймалося, що коефіцієнт випромінювання поверхонь скла з i -покриттям складає $\varepsilon_i=0,15$, а поверхонь скла без покриття – $\varepsilon_M=0,86$. Потужність електричного нагріву – $Q=300$ Вт.

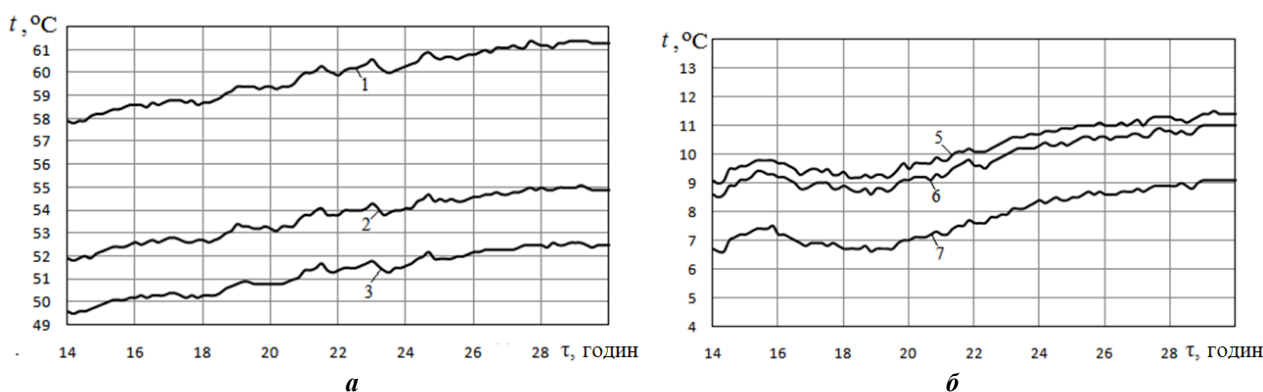


Рис. 4

За результатами чисельних досліджень одержано характеристики теплового режиму двокамерного СЕ.

Залежності від часу інтегрованих по поверхнях склопакета теплових потоків, що над-

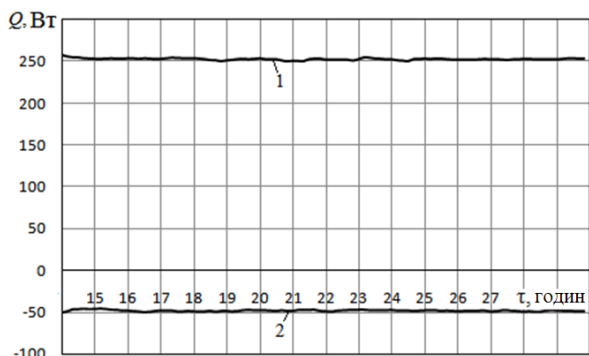


Рис. 5

ходять у приміщення (1) та видаляються назовні (2), наведено на рис. 5. Як видно з цього рисунка, на часовому інтервалі $14 \text{ год} < \tau < 30 \text{ год}$ зазначені величини теплових потоків складають $250,7 \dots 258,1$ Вт (тепловий потік, що надходить всередину приміщення і вважається позитивним) та $-50,6 \dots -46,19$ Вт (негативний тепловий потік, що видаляється назовні й вважається негативним). Таким чином, $83 \dots 85$ % виділеної завдяки електронагріву теплоти передається в приміщення. Відповідно $17 \dots 15$ % теплоти виділяється в зовнішній простір.

Розподіли густин теплових потоків за висотою на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхнях СЕ для моменту часу $\tau=30$ год наведено на рис. 6 (суцільні лінії – результати розрахунку; квадрати – дані експерименту). З рисунка видно, що в середній частині склопакета густини теплових потоків розподіляються достатньо рівномірно і складають приблизно $339...342 \text{ Вт/м}^2$ на внутрішній поверхні склопакета та $-68 \dots -60 \text{ Вт/м}^2$ – на зовнішній поверхні. У нижній частині склопакета ($z < 0,05 \text{ м}$) густина теплового потоку на його внутрішній поверхні значно зменшується (до 227 Вт/м^2), а на зовнішній поверхні – збільшується (до $-25,7 \text{ Вт/м}^2$). У верхній частині склопакета ($z > 0,95 \text{ м}$) густина теплового потоку на внутрішній поверхні підвищується (до 365 Вт/м^2), а на зовнішній поверхні суттєво зменшується (до -220 Вт/м^2). Точками на цьому рисунку відображено величини густин теплових потоків, що отримані з незалежного експерименту. Видно, що розрахункові та експериментальні дані достатньо задовільно узгоджуються.

Розподіли за шириною СЕ температури (2) і швидкості руху газового середовища (1) за умови $z=0,5 \text{ м}$ для моменту часу $\tau=30$ год наведено на рис. 7. Вісь OX спрямована від зовнішньої поверхні склопакета до внутрішньої.

Як видно з рисунку, максимальна швидкість природно конвекційного руху повітря в зовнішній камері склопакета складає $v_z=0,04 \text{ м/с}$, а у внутрішній камері – $v_z=0,03 \text{ м/с}$. Максимальна температура всередині склопакета спостерігається біля внутрішньої поверхні внутрішнього скла, де відбувається виділення теплоти. Для $z=0,5 \text{ м}$ ця температура складає $56,6^\circ \text{ С}$. Водночас температура на зовнішній поверхні внутрішнього скла дорівнює $55,0^\circ \text{ С}$. З розподілу температури за товщиною газового середовища склопакета випливає, що він близький до лінійного. Це свідчить про незначний вплив конвекції на загальний рівень перенесення теплоти в склопакеті цієї конструкції.

Залежності від часу густин теплових потоків на тих ділянках внутрішньої [$a: z=0,05 \text{ м}; b: z=0,5 \text{ м}; d: z=0,95 \text{ м}$] і зовнішньої [$b: z=0,05 \text{ м}; c: z=0,5 \text{ м}; e: z=0,95 \text{ м}$] поверхонь склопакета, на яких встановлено датчики теплових потоків, наведено на рис. 8 (1 – результати розрахунку; 2 – дані експерименту). Розглядається часовий інтервал $14 \text{ год} < \tau < 30 \text{ год}$.

Як видно з рис. 8, дані чисельного моделювання в цілому задовільно узгоджуються з даними експерименту. Найкраще ці результати узгоджуються для середньої частини внутрішньої поверхні (рис. *в*) та для верхньої ділянки зовнішньої поверхні (рис. *е*). На нижній і середній ділянках зовнішньої поверхні склопакета (рис. *б* та *г*) розрахункові дані перевищують експериментальні в середньому на $10...15 \text{ Вт}$. Для нижньої ділянки внутрішньої поверхні (рис. *а*) розрахункові значення густини теплового потоку на часовому інтервалі $14...18$ год вищі, ніж експериментальні, а на інтервалі $18...30$ год – нижчі. Порівняння отриманих експериментальних даних та чисельних досліджень дає задовільний результат і узгодження. Незначне зростання значень теплового потоку, одержаних з експерименту (рис. 8, *а, в, д*), пояснюється початком включення й роботи задавача-терморегулятора, що вбудований в СЕ для заданої температури на внутрішній поверхні склопакета в установленому діапазоні.

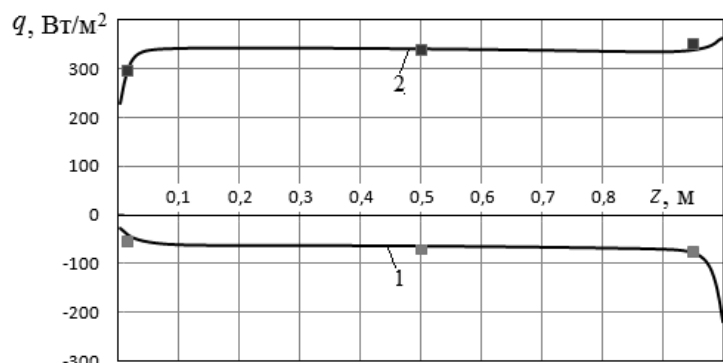


Рис. 6

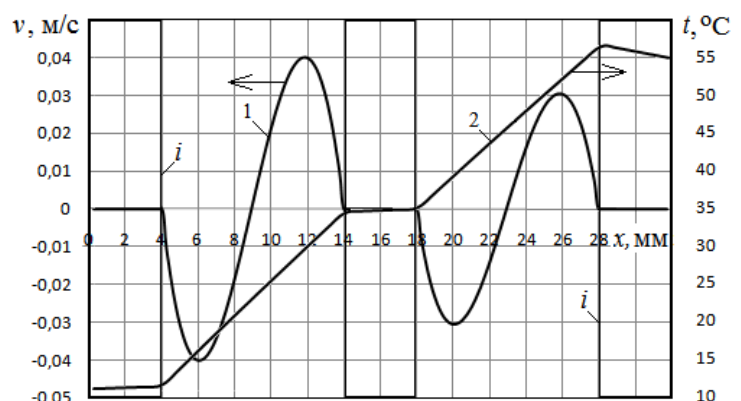


Рис. 7

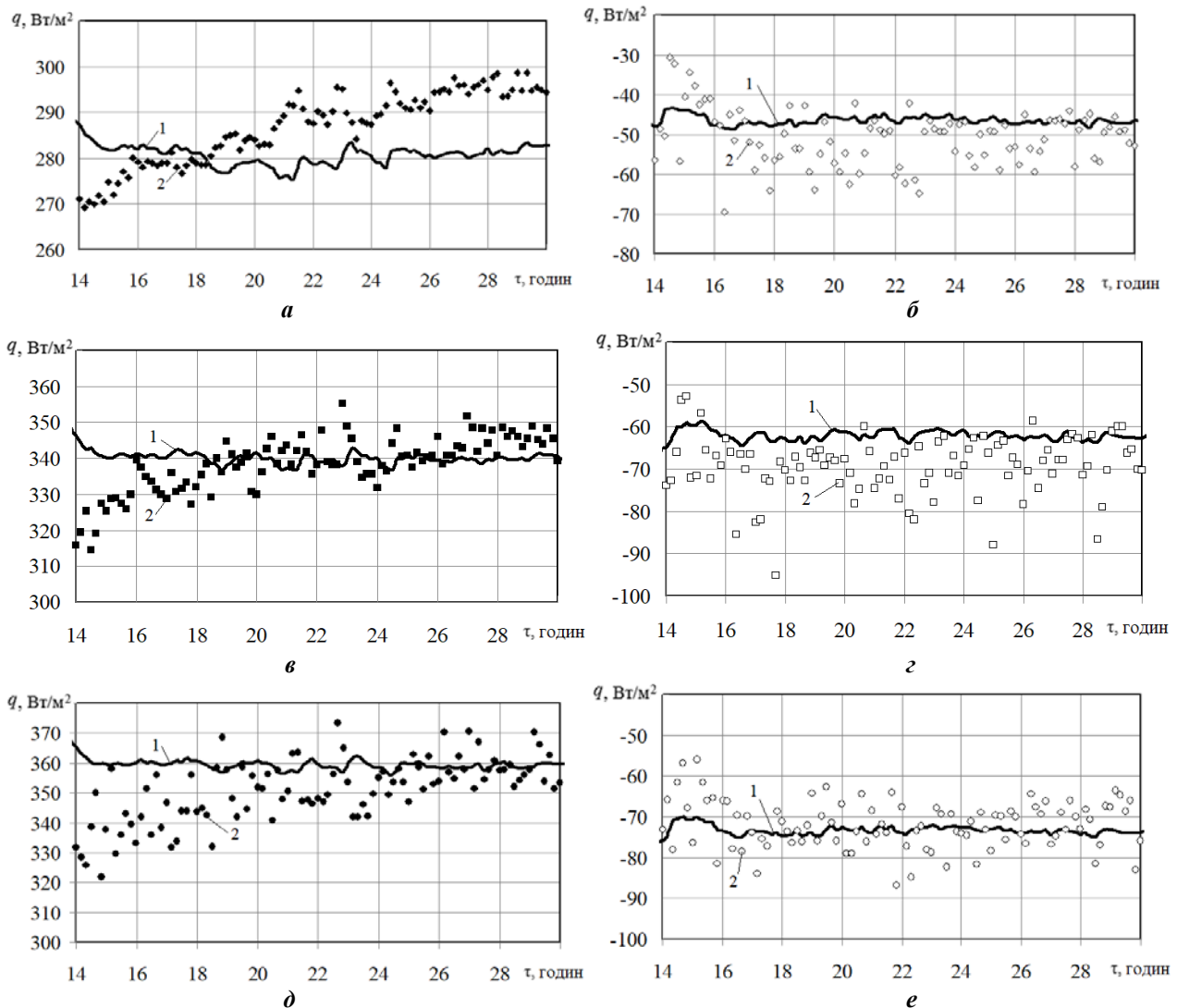


Рис. 8

Висновки. У результаті проведених досліджень процесів теплоперенесення через енергозберігаючий двокамерний СЕ було проаналізовано розподіли теплових потоків та температур на його зовнішній і внутрішній поверхнях. Встановлено, що 83...85% виділеної за рахунок електронагріву теплоти передається в приміщення, а 15...17% – у зовнішній простір. Використання вікон з електронагрівом дає можливість збільшити радіаційну складову теплового потоку від світлопрозорої огорожувальної конструкції в середину приміщення і таким чином покращити тепловий комфорт у приміщенні з таким вікном. Вмонтований задавач-терморегулятор в СЕ дає змогу задавати необхідну температуру відповідно до потреб користувачів. Застосування вікон з електронагрівом перешкоджає утворенню конденсату чи інею на поверхні такої віконної конструкції.

1. Guowen Ding, César Clavero. Silver-Based Low-Emissivity Coating Technology for Energy-Saving Window Applications. In book: *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings*. InTech, 2017. Pp. 409–431. DOI: <https://doi.org/10.5772/67085>.
2. Basok B., Davydenko B., Kuzhel L., Voznyak O., Novikov V., Goncharuk S. Heat Transfer Through a Triple Glazed Window with Low Emission Coating in Unsteady Conditions. *No Conference Proceedings of Scientific Papers, «CASSOTHERM 2018» Technical University of Kosice*. 2018. Pp. 1–9.
3. Basok B., Davydenko B., Zhelykh V., Goncharuk S., Kuzhel L. Influence of low-emissivity coating on heat transfer through the double-glazing windows. *Building physics in theory and practice (Fizyka budowlі w teorii i praktyce)*. Vol. VIII. No 4. 2016. Pp. 5–8.

4. Xiao-Hong Rong, Wen-Liang Wang. Design of energy saving film used in residential buildings. 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017). 2018. Pp. 1698–1701. DOI: <https://doi.org/10.2991/ifeesm-17.2018.309>.
5. Basok B.I., Davydenko B.V., Isaev S.A., Goncharuk S.M., Kuzhel L.N. Numerical Modeling of Heat Transfer Through a Triple-Pane Window. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. Vol. 89 (5). Pp. 1277–1283. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1492-7>.
6. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Новицкая М.П., Гончарук С.М., Недбайло А.Н. Влияние толщины газовой прослойки на термическое сопротивление однокамерного стеклопакета. *Промышленная теплотехника*. 2012. Т. 34. № 1. С. 100–107.
7. Yafang Han. Advanced Functional Materials. *Proceedings of Chinese Materials Conference 2017*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. 456 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0110-0>.
8. Gloriant François, Joulin Annabelle, Tittlein Pierre, Lassue Stéphane. Using heat flux sensors for a contribution to experimental analysis of heat transfers on a tripleglazed supply-air window. *Energy*. 2021. Vol. 215. Pp. 119–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119154>.
9. Moreau Alain, Sansregret Simon, Fournier Michael. Modeling and Study of the Impacts of Electrically Heated Windows on the Energy Needs of Buildings. *6th IASME/WSEAS International Conference on heat transfer, thermal engineering and environment (HTE'08)*. Rhodes, Greece, August 20–22, 2008. Pp. 76–83.
10. Balázs Cakó, Dalma Lovig, András Ózdi. Measuring the effects of heated windows on thermal comfort. *Pollack Periodica*. 2021. Vol. 16(3). Pp. 114–119. DOI: <https://doi.org/10.1556/606.2021.00361>.
11. Lee R., Kang E., Lee H., Yoon J. Heat Flux and Thermal Characteristics of Electrically Heated Windows: A Case Study. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(1). 481. Pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14010481>.
12. Круковський П.Г., Смольченко Д.А., Круковський Г.П., Дейнеко А.І. Аналіз опалювальної здатності вікон з електропідігрівом. *Теплофізика та Теплоенергетика*. Т. 43 (4). С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.7>.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES OF HEAT TRANSFER FROM A DOUBLE-GLAZED WINDOW WITH ELECTRIC HEATING OF ITS SURFACE

B.I. Basok¹, B.V. Davydenko¹, S.M. Goncharuk¹, A.M. Pavlenko^{1,2}

¹ – Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine.

² – Department of Building Physics and Renewable Energy, Kielce University of Technology, aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Kielce, 25-314, Poland.

E-mail: goncharuk-s@ukr.net

The results of experimental and theoretical studies of heat transfer processes through a two-chamber double-glazed window (4i-10-4M1-10-4i) with electric heating are presented. Electric heating was carried out on the inner surface of the inner glass by applying a voltage to its low-emission coating. A thermophysical heat transfer model has been created through an electrically heated double-glazed window. This made it possible to determine the characteristics of the thermal regime of double-glazed windows with electric heating. Verification of the created numerical model was carried out using the data of experimental studies. The obtained distributions of heat fluxes and temperatures on the outer and inner surfaces of a double-glazed window with electric heating are analyzed. Ref. 12, fig. 8.

Keywords: window with electric heating, heat transfer, thermal regime.

1. Guowen Ding, César Clavero. Silver-Based Low-Emissivity Coating Technology for Energy-Saving Window Applications. In book: *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings*. InTech, 2017. Pp. 409–431. DOI: <https://doi.org/10.5772/67085>.
2. Basok B., Davydenko B., Kuzhel L., Voznyak O., Novikov V., Goncharuk S. Heat Transfer Through a Triple Glazed Window with Low Emission Coating in Unsteady Conditions. *No Conference Proceedings of Scientific Papers, «CASSOTHERM 2018» Technical University of Kosice*. 2018. Pp. 1–9.
3. Basok B., Davydenko B., Zhelykh V., Goncharuk S., Kuzhel L. Influence of low-emissivity coating on heat transfer through the double-glazing windows. *Building physics in theory and practice (Fizyka budowli w teorii i praktyce)*. Vol. VIII. No 4. 2016. Pp. 5–8.
4. Xiao-Hong Rong, Wen-Liang Wang. Design of energy saving film used in residential buildings. 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017). 2018. Pp. 1698–1701. DOI: <https://doi.org/10.2991/ifeesm-17.2018.309>.
5. Basok B.I., Davydenko B.V., Isaev S.A., Goncharuk S.M., Kuzhel L.N. Numerical Modeling of Heat Transfer Through a Triple-Pane Window. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. Vol. 89 (5). Pp. 1277–1283. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1492-7>.
6. Basok B.I., Davydenko B.V., Novitska M.P., Goncharuk S.M., Nedbailo A.N. Influence of the thickness of the gas layer on the thermal resistance of a single-chamber double-glazed window. *Promyshlennaia teplotekhnika*. 2012. Vol. 34. No 1. Pp. 100–107. (Rus)

7. Yafang Han. *Advanced Functional Materials. Proceedings of Chinese Materials Conference 2017*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. 456 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0110-0>.
8. Gloriant François, Joulin Annabelle, Tittlein Pierre, Lassue Stéphane. Using heat flux sensors for a contribution to experimental analysis of heat transfers on a tripleglazed supply-air window. *Energy*. 2021. Vol. 215. Pp. 119–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119154>.
9. Moreau Alain, Sansregret Simon, Fournier Michael. Modeling and Study of the Impacts of Electrically Heated Windows on the Energy Needs of Buildings. 6th IASME/WSEAS International Conference on *heat transfer, thermal engineering and environment (HTE'08)*. Rhodes, Greece, August 20-22, 2008. Pp. 76–83.
10. Balázs Cakó, Dalma Lovig, András Ózdi. Measuring the effects of heated windows on thermal comfort. *Pollack Periodica*. 2021. Vol. 16(3). Pp. 114–119. DOI: <https://doi.org/1556/606.2021.00361>.
11. Lee R., Kang E., Lee H., Yoon J. Heat Flux and Thermal Characteristics of Electrically Heated Windows: A Case Study. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(1). 481. Pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14010481>.
12. Krukovskiy P.G., Smolchenko D.A., Krukovskiy G.P., Deineko A.I. Analysis of the heating capacity of electrically heated windows. *Teplofizyka ta teploenerhetyka*. Vol. 43(4). Pp. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.7>. (Ukr)

Надійшла: 01.06.2022

Прийнята: 08.08.2022

Submitted: 01.06.2022

Accepted: 08.08.2022