

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 536.24

DOI 10.20535/1813-5420.1.2026.352955

Б.І Басок^{1,2}, д-р техн. наук, проф., ORCID: 0000-0002-8935-4248

С.М. Гончарук¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID: 0000-0002-5609-7337

Д.Б. Давиденко¹, аспірант, ORCID: 0009-0003-5791-1980

О.М. Лисенко^{1,2}, канд. техн. наук, доцент, ORCID: 0000-0003-3981-9796

¹Інститут технічної теплофізики НАН України

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОТИ ЧЕРЕЗ ВАКУУМНИЙ СКЛОПАКЕТ

Наведено результати чисельних досліджень перенесення теплоти через вакуумний однокамерний склопакет. Задачі конвекційної течії повітря в камері склопакета в умовах вакуумування і перенесення теплоти розв'язуються в двовимірній постановці у вертикальному перерізі склопакета. На поверхнях скла в умовах вакууму задаються граничні умови проковзування. За результатами досліджень визначено вплив тиску в камері склопакета на його опір теплопередачі. Показано, що опір теплопередачі вакуумного склопакета з відстанню між поверхням скла в камері 10 мм відчутно збільшується після того, як тиск в камері такого склопакета стає меншим ніж 10 Па. При більших тисках вакуумування практично не впливає на опір теплопередачі, або впливає несуттєво. Чутливому збільшенню опору теплопередачі при вакуумуванні камери склопакета сприяє низькоемісійне покриття внутрішніх поверхонь скла камери.

Ключові слова: вакуумний склопакет, опір теплопередачі, радіаційний тепловий потік, вільна конвекція, низькоемісійне покриття, чисельне моделювання.

Вступ. Однією з найсуттєвіших причин втрат теплоти з приміщення в зимовий період року є низький опір теплопередачі віконних конструкцій. У більшості будівель цей коефіцієнт менший, ніж коефіцієнт опору теплопередачі стінових конструкцій, який можна підвищити шляхом встановлення шару теплоізоляційного матеріалу на зовнішній поверхні стіни. Заходи з підвищення коефіцієнту опору віконних конструкцій передбачають збільшення камер у вікні, нанесення низькоемісійного покриття на внутрішню поверхню скла з метою зниження радіаційного теплового потоку з приміщення, заміну повітряного середовища камер склопакета на інертні гази, що мають менший коефіцієнт теплопровідності, ніж повітря.

Коефіцієнт теплопровідності газового середовища в камерах склопакета можливо також зменшити шляхом його вакуумування. З цією метою можна вакуумувати камери склопакета, або застосовувати для вікон вакуумне скло. Але при цьому обов'язковим є також застосування опорних вставок між листами скла для запобігання їх суттєвих деформацій внаслідок перепаду тиску і можливого руйнування. В найпростішому варіанті такий склопакет представляє собою герметичну вакуумну камеру, що містить два скла, які розташовані на малій відстані одне від одного і розподілені маленькими розпірками.

Отже, розробку і створення вакуумних склопакетів можна вважати перспективним напрямком у розвитку енергоефективних віконних конструкцій. Головною перевагою таких вікон вважається високі енергозберігаючі характеристики. Інша перевага полягає в ізоляції приміщення від шуму, що надходить ззовні.

Результатам підвищення опору теплопередачі вікон шляхом застосування вакуумного скління приділяється в літературі значна увага. Аналіз особливостей передачі теплоти через вакуумне скління наведено в [1]. Розглядається вакуумне скло, що складається з двох скляних листів товщиною 4 мм або 5 мм. Відстань між листами дорівнює 0,5 мм. Між ними в певному порядку розташовані кульки з нержавіючої сталі. У герметичному просторі між листами скла створюється вакуум (тиск нижче 0,01 Па). На внутрішній поверхні одного скла нанесено низькоемісійне покриття. Для аналізу теплопровідності через опорну кулю з нержавіючої сталі і визначення її опору теплопередачі застосовується контактна модель Герца. За результатами досліджень встановлено, що коефіцієнт теплопередачі центральної комірочки, що утворена кульками, становить 0,26 Вт/(м² К), а отримані з чисельної моделі значення

коефіцієнта теплопередачі всього вакуумного скла (без теплової ізоляції рами) становлять $0,84 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, що є достатньо задовільним результатом щодо зниження теплових втрат через таке скло.

В [2] досліджується теплопередача через потрійне вакуумне скління. Проаналізовано вплив випромінювання поверхонь скляних листів всередині порожнини між листами, радіуса опорних стійок, що вставлені між склом, та теплопровідності матеріалу опорних стійок на коефіцієнт теплопередачі. Результати цих досліджень показали, що використання потрійного вакуумного скління може значно знизити коефіцієнт теплопередачі. Так при застосуванні вакуумного скла, що складається з трьох листів товщиною 6 мм; 4 мм та 6 мм і містить чотири низькоемісійні покриття ($\epsilon=0,03$) можна одержати коефіцієнт теплопередачі центральної ділянки скління менше, ніж $0,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

В [3] запропоновано метод прогнозування коефіцієнта теплопередачі через композитне вакуумне скління. Шляхом аналізу процесу перенесення теплоти через цю систему визначалася теоретична формула для розрахунку коефіцієнта теплопередачі. Було проаналізовано вплив різних положень низькоемісійних покриттів на скляних поверхнях на характеристики теплопередачі через композитне вакуумне скління. Результати показали, що найкращі теплоізоляційні характеристики забезпечували низькоемісійні покриття, що розташовані з обох боків вакуумного шару.

В [4] зазначається, що вакуумне скління, як спосіб зменшення втрат теплоти через вікно, забезпечує при цьому здатність вікна максимально пропускати світло, сприяє звукоізоляції, та запобігає конденсації на внутрішніх поверхнях скла. В даній роботі наведено системний огляд вакуумного скління та його конструкцій, включаючи вибір матеріалів, методи виготовлення, методи досліджень та оцінку експлуатаційних характеристик. Узагальнено аналітичні, чисельні та експериментальні методи оцінки теплових характеристик вакуумного скління. Наведені також коефіцієнти теплопередачі для різних конструкцій вакуумного скління. Досліджено вплив різних параметрів на ці коефіцієнти та оцінено їх потенціал для енергозбереження у різних кліматичних зонах.

Основні концепції вакуумного скління, а також результати дослідження, що проведені при розробці технологій високотемпературної та низькотемпературної герметизації вакуумного скління, наведені в [5]. Розглядаються теплові характеристики різних систем вакуумного скління. Наводяться дані про теплоізоляційну ефективність таких вікон, яка може бути досягнута завдяки використанню низькоемісійних покриттів на склі. Описуються результати дослідження віконних систем, в яких використовується вакуумне скління, і показано вплив їх застосування для підвищення енергетичних характеристик вікон.

Вакуумне ізоляційне скління є дієвим способом підвищення енергетичної ефективної огорождувальних конструкцій будівель завдяки його високим теплоізоляційним характеристикам. Таке скління є також одним зі шляхів термомодернізації будівель. Воно є ефективним як для зменшення втрат теплоти з приміщення в регіонах з холодним кліматом, так і для зменшення зовнішніх теплонадходжень в регіонах з тропічним кліматом [6]. Застосування вакуумного скління сприяє зменшенню енергетичних витрат на кондиціонування та охолодження повітря в літній період року.

В [7] було застосовано чисельне моделювання для визначення принципів конструювання вікон з використанням вакуумного скла. В цій роботі зазначається, що в простішому варіанті вакуумне скління створюється з двох скляних панелей з вакуумним проміжним простором між листами скла. Для збереження функціональності скління необхідне вакуумне ущільнення країв та сітка дистанційних стійок. Переваги вакуумного скління в порівнянні з багатокамерними склопакетами, що мають ті ж самі теплоізоляційні характеристики, полягають в тому, що вакуумні скляні вироби мають меншу вагу та габарити конструкції. Але при цьому вакуумне скління вимагає більш ретельного ущільнення країв скла, яке можна вважати слабким місцем вакуумного скла з точки зору теплопередачі.

В [8] розглядається варіант потрійного вакуумного ізоляційного скління, що складається з трьох скляних панелей, розділених двома зміщеними сітками. Сітки виготовлені з волокон, які сплавляються зі скляними панелями у вакуумі для створення багатьох незалежних комірок. На відміну від традиційних потрійних вакуумних ізоляційних склопакетів, які розділені опорними стовпчиками, ці комірки значно збільшують надійність герметизації порожнини між склом, а додаткові з'єднання, що утворені лініями сітки, зменшують напруження на крайових з'єднаннях, тим самим підвищуючи надійність такої конструкції. Було проведено чисельні дослідження теплових характеристик зазначеної конструкції вакуумного скління, за результатами якого отримано коефіцієнти теплопередачі нижче, ніж $0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Експериментальне значення коефіцієнта теплопередачі в центрі скла для вікна з подвійним склопакетом, заповненого аргоном, з низькоемісійним покриттям на двох скляних поверхнях становило $0,42 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Це значення коефіцієнта теплопередачі приблизно в чотири рази нижче, ніж у типового однокамерного склопакета, заповненого аргоном.

Мета цього дослідження полягає у визначенні впливу вакуумування склопакета на його теплоізоляційні характеристики, а також визначення величини тиску в камері склопакета, при якому вплив вакуумування на опір теплопередачі стає достатньо суттєвим. З цією метою проводяться відповідні чисельні дослідження.

Постановка задачі чисельного моделювання. Згідно з молекулярно-кінетичною теорією, при зниженні тиску в газовому середовищі коефіцієнт теплопровідності газів майже не змінюється (тобто, не залежить від тиску) до тих пір, поки довжина вільного пробігу його молекул L не стає такого ж порядку, що і визначальний лінійний розмір порожнини, що вміщує газ. Для однокамерних склопакетів за такий розмір варто прийняти відстань між поверхнями скла в камері склопакета δ_n , яка є товщиною газового прошарку в склопакеті. Залежність теплопровідності повітря від тиску можна розраховувати за формулою [9]

$$\lambda = \frac{\lambda_0(T)}{1 + 2\beta \cdot \text{Kn}} \quad (1)$$

де $\lambda_0(T)$ – теплопровідність повітря при тиску 100000 Па, яка залежить від температури; $\text{Kn} = L / \delta_n$ - число Кнудсена; L - довжина вільного пробігу молекул; $\beta \approx 1,5 \dots 2$ - експериментальний коефіцієнт. Довжина вільного пробігу молекул повітря визначається за відомою з молекулярно - кінетичної теорії формулою:

$$L = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}, \quad (2)$$

де k - постійна Больцмана; p - тиск в газі; d - діаметр молекул газу; T - абсолютна температура газу. Тоді вираз для числа Кнудсена матиме вигляд

$$\text{Kn} = \frac{kT}{\delta_n \sqrt{2}\pi d^2 p} \quad (3)$$

З врахуванням рівності (3), вираз (1) матиме вигляд

$$\lambda = \frac{\lambda_0(T)}{1 + C_\lambda \frac{T}{p\delta_n}} \quad (4)$$

де $C_\lambda = \frac{2\beta \cdot k}{\sqrt{2}\pi d^2}$

Залежність відносного коефіцієнту теплопровідності повітря λ / λ_0 від тиску при $T=278$ К та $\delta_n=0,01$ м представлено на рис. 1. Коефіцієнт λ_0 приймається рівним 0,0247 Вт/(м·К).

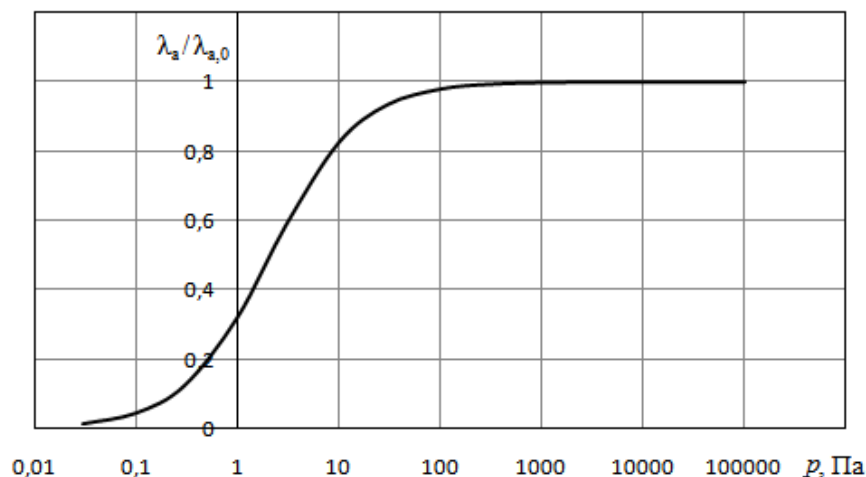


Рисунок 1 – Залежність відносного коефіцієнта теплопровідності повітря від тиску при $T=278$ К та $\delta_n=0,01$ м

Задача перенесення теплоти через вакуумний склопакет розв'язується у двовимірній постановці у вертикальному перерізі склопакета і описується системою рівнянь, що включає:

- рівняння нерозривності

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

- рівняння перенесення імпульсу вздовж вертикальної осі OY :

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - \rho g; \quad (6)$$

- рівняння перенесення імпульсу вздовж горизонтальної осі OX:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]; \quad (7)$$

- рівняння енергії для газового середовища:

$$\frac{\partial(C_{p,g} \rho T)}{\partial \tau} + \frac{\partial(C_{p,g} \rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{p,g} \rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\tau} \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\tau} \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad (8)$$

де x - горизонтальна координата; y - вертикальна координата; u ; v - горизонтальна і вертикальна проекції швидкості газового середовища; p - тиск; g - прискорення сили тяжіння; T - температура; ρ - густина газового середовища; $C_{p,g}$ - теплоємність газу; μ - динамічний коефіцієнт в'язкості; λ_{τ} - коефіцієнт теплопровідності газу; τ - час. Течія газу в камері склопакета вважається ламінарною.

До системи рівнянь (5) - (8) додається також рівняння стану ідеального газу.

$$p = \rho R T \quad (9)$$

Перенесення теплоти в склі описується рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial(C_c \rho_c T)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (10)$$

де C_c - теплоємність скла; λ_c - коефіцієнт теплопровідності скла; ρ_c - густина матеріалу скла.

Систему рівнянь (5-10) складено в системі координат, в якій горизонтальна вісь OX спрямована від зовнішньої поверхні склопакета ($x=0$) у бік приміщення, а вісь OY спрямована вертикально вгору. Значення $y=0$ відповідає нижньому краю склопакета. Теплофізичні властивості скла приймаються постійними, а теплопровідність газового середовища вважаються залежними від температури і тиску відповідно до рівняння (4).

Граничні умови на зовнішніх поверхнях скла записуються у вигляді умов першого роду:

$$x = 0: T = T_{\text{зовн}}; \quad x = B: T = T_{\text{внутр}}; \quad (T_{\text{внутр}} > T_{\text{зовн}}), \quad (11)$$

де $T_{\text{зовн}}$ - температура поверхні скла з боку зовнішнього оточуючого середовища; $T_{\text{внутр}}$ - температура поверхні скла з боку приміщення. На верхній та нижній поверхнях склопакету приймаються умови теплоізоляції

$$y = 0; \quad H: \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (12)$$

Між протилежними поверхнями скла в камері склопакету теплота переноситься теплопровідністю, природною конвекцією і випромінюванням. Виходячи з цього, умови спряження на внутрішніх поверхнях скла записуються у вигляді:

$$-\lambda_c \frac{\partial T_c(y, x)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_c-0} = -\lambda_{\tau} \frac{\partial T_{\tau}(y, x)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_c+0} - q_{\text{п}} \Big|_{x=\delta_c} \quad (13)$$

$$-\lambda_{\tau} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta_c+b-0} - q_{\text{п}} \Big|_{x=\delta_c+b} = -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta_c+b+0} \quad (14)$$

де $q_{\text{п}}$ - густини променевого теплового потоку, що визначаються за законом Стефана - Больцмана; δ_c - товщина скла; b - відстань між внутрішніми поверхнями скла в склопакеті. Променивий потік $q_{\text{п}} \Big|_{x=\delta_c}$ на лівій внутрішній поверхні зовнішньої камери склопакета розраховується за формулою

$$q_{\text{п}} \Big|_{x=\delta_c} = \frac{c_0}{\frac{1}{\epsilon_{\text{п1}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{п1}}} - 1} \int_0^H \left[\left(\frac{T_c(y', \delta_c + b)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c(y, \delta_c)}{100} \right)^4 \right] \int_{-0,5L}^{+0,5L} \frac{\cos(r, n_1) \cos(r, n_2)}{\pi^2} dz dy'$$

де $\epsilon_{\text{п1}}$; $\epsilon_{\text{п1}}$ - степені чорноти лівої та правої поверхонь камери склопакета відповідно; n_1 - зовнішня нормаль до лівої внутрішньої поверхні камери, на яку падає даний променивий потік; n_2 - зовнішня нормаль до протилежної правої внутрішньої поверхні камери; r - довжина відрізка прямої, що з'єднує точку на лівій поверхні камери склопакета с координатами y ($0 \leq y \leq H$), $x = \delta_c$; $z=0$, для якій записується дана

гранична умова, з точками на правій поверхні камери склопакета, що мають координати y' ($0 \leq y' \leq H$), $x = \delta + b$; z ($-0,5L \leq z \leq +0,5L$). Вираз для густини променевого теплового потоку на правій внутрішній поверхні камери склопакета $q_{\text{п}}|_{x=\delta_c+b}$ складається аналогічно.

Вирази (13), (14) описують умови четвертого роду, або умови спряження. Вони доповнюються також умовами, що визначають співвідношення між температурами скла і повітря на внутрішніх поверхнях скла в склопакеті. При атмосферному тиску температури газу і скла на скляній поверхні вважаються однаковими. При зниженому тиску повітря в камері склопакета на внутрішній поверхні скла доцільно застосовувати умови проковзування, згідно з якими має місце різниця між температурою поверхні скла і повітря біля цієї поверхні [10]:

$$T_{\Gamma}|_{x=\delta_c+0} = T_c|_{x=\delta_c-0} + \frac{L}{Pr} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\Gamma}|_{x=\delta_c+0}$$

$$T_c|_{x=\delta_c+b+0} = T_{\Gamma}|_{x=\delta_c+b-0} + \frac{L}{Pr} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\Gamma}|_{x=\delta_c+b-0}$$

Крім того, замість умови, що вертикальна швидкість v на поверхні скла дорівнює нулю, в умовах зниженого тиску доцільно задавати для швидкості умови проковзування течії, згідно з якими в газі вертикальна швидкість на поверхні скла не дорівнює нулю. Швидкість повітря на внутрішній поверхні скла за цих умов дорівнює $v_w = L \left(\frac{dv}{dx} \right)_w$. При значеннях тиску, близьких до атмосферного, величина довжини вільного пробігу молекул L надто мала. Тому швидкість v_w в умовах атмосферного тиску близька до нуля.

За цих умов виконується моделювання полів швидкості і температури в однокамерному склопакеті для $\delta_{\text{п}} = 0,01$ м; $t_3 = -10,0$ °С, $t_6 = +20,0$ °С; $\varepsilon = 0,89$ при різних значеннях тиску в склопакеті. Наявність опорних стійок в першому наближенні не враховується.

Результати. Результати розрахунку полів швидкості і температури наведено на рис. 2.

З цього рисунку видно, що зі зниженням тиску температурне поле в камері склопакета стає більш однорідним. При $p = 1,0$ Па температура всередині склопакета складає приблизно 5 °С і практично не змінюється по товщині газового прошарку камери. На поверхнях же скла температура стрибкоподібно змінюється. На відміну від цього випадку, при $p = 100000$ Па; та $p = 10$ Па температура всередині газового прошарку майже монотонно зростає від поверхні зовнішнього скла до поверхні внутрішнього скла. З цих рисунків також видно, що при $p = 100000$ Па вертикальна швидкість повітря на поверхнях скла дорівнює нулю, а мінімальні швидкості опускання повітря спостерігаються приблизно на відстані $0,22 \delta_{\text{п}}$ від поверхні холодного скла. Максимальні швидкості підйомного руху відповідають відстані $0,78 \delta_{\text{п}}$ від поверхні холодного скла (або $0,22 \delta_{\text{п}}$ від поверхні теплого скла).

При зниженні тиску швидкості повітря на поверхнях скла приймають кінцеві (відмінні від нуля) значення. При цьому максимуми функції розподілу швидкості переміщуються ближче до поверхні теплого скла, а мінімуми переміщуються ближче до поверхні холодного скла. При $p = 1,0$ Па максимуми і мінімуми вже знаходяться практично біля поверхонь теплого і холодного скла.

Описані характери розподілу вертикальної швидкості газу в камері склопакета при зниженні тиску в камерах видно також з рис. 3. З цих рисунків видно, що зі зменшенням тиску абсолютні значення максимумів і мінімумів функції розподілу швидкості руху газу, який виникає внаслідок природної термогравітаційної конвекції, суттєво зменшуються.

Якщо при $p = 100000$ Па максимальна швидкість в камері складає $v_{\text{max}} = 0,0579$ м/с, то при $p = 10$ Па швидкість $v_{\text{max}} = 0,82 \cdot 10^{-6}$ м/с, а при $p = 0,1$ Па $-v_{\text{max}} = 0,23 \cdot 10^{-6}$ м/с. Це викликано зменшенням густини повітря при зниженні тиску в камерах, а також зменшенням різниці у значеннях максимальної і мінімальної густини повітря, що саме і є рушійною силою природної конвекції. Такі значення швидкості практично унеможливають перенесення теплоти вільною конвекцією від теплого скла до холодного.

Зміна температури по товщині склопакета представлена на рис. 4. З рисунку видно, що при тиску $p = 100000$ Па (рис. 4 а) температури повітря і скла на поверхні скла практично однакові. Але зі зменшенням тиску, у зв'язку з проковзуванням потоку газу біля поверхні скла, різниця між температурами газу і скла на його поверхні збільшується. Біля внутрішніх поверхонь скла спостерігаються стрибки між температурами скла і газу, який збільшується зі зменшенням тиску. Видно також, що градієнт температури газу в склопакеті в напрямку осі Ox при зменшенні тиску також зменшується.

За рахунок суттєвого зменшення градієнта температури в газі, а також суттєвого зменшення коефіцієнта теплопровідності (рис. 1) і швидкості течії в газі зі зменшенням тиску (рис. 3), суттєво зменшується кондуктивно-конвекційний тепловий потік через вакуумний склопакет. Розподіли густин

теплого потоку по внутрішній і зовнішній поверхнях склопакета при різних значеннях тиску в камері представлено на рис. 5. З цього рисунку видно, що при тиску $p=100000$ Па розподіли густини теплового потоку по зовнішній і внутрішній поверхнях камери склопакету практично збігаються в середніх частинах поверхонь і відрізняються у нижній та верхній ділянках внутрішнього і зовнішнього скла. Ця відмінність густин теплового потоку в нижній і верхній частинах склопакета від густин теплового потоку в середній частині поверхонь пояснюється зміною напрямків вільноконвекційного руху газу з підйомного напрямку на опускний.

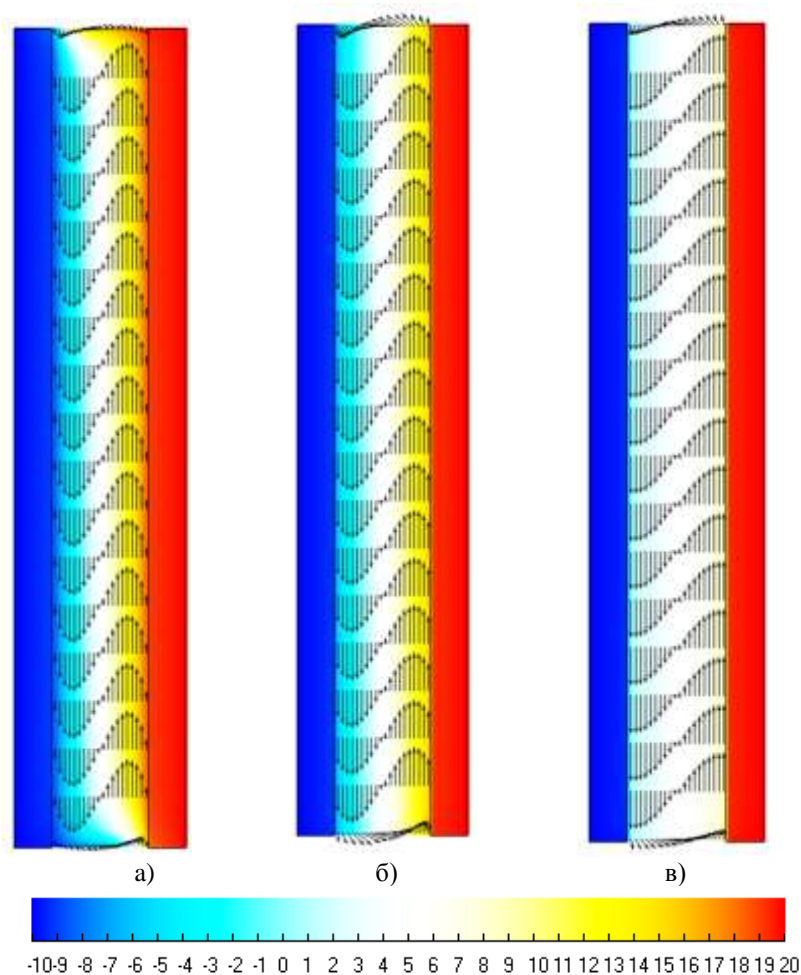


Рисунок 2 – Поле швидкості і температури в однокамерному склопакеті:
а) - $p=100000$ Па; б) - $p=10$ Па; в) - $p=1$ Па

Якщо при $p=100000$ Па конвекційний рух повітря в камерах навіть при достатньо малих швидкостях певним чином впливає на розподіл густин теплового потоку, то при зменшенні тиску через зменшення швидкості руху повітря конвекція практично перестає впливати на розподіл густин теплового потоку. Це виражається в тому, що при зниженні тиску в склопакеті розподіли густин теплового потоку по зовнішній і внутрішній поверхнях практично збігаються по всій поверхні. В середніх частинах поверхонь розподіл густини теплового потоку практично рівномірний. У верхній і нижній частинах поверхонь густини теплових потоків зменшуються, але не надто суттєво. Зменшення густин теплового потоку в нижній і верхній частинах поверхонь пов'язано зі зменшенням густин радіаційного потоку на периферійних частинах поверхонь в порівнянні з радіаційним потоком в середній частині.

З порівняння графіків на рис. 5 видно, що зі зменшенням тиску густини теплового потоку зменшуються. При $p=100000$ Па густина теплового потоку в середній частині поверхонь склопакета складає $q=179$ Вт/м², при $p=10$ Па - $q=156$ Вт/м² та при $p=0,1$ Па - $q=112$ Вт/м². Зменшення густини теплового потоку зі зменшенням тиску пов'язано з тим, що зі зменшенням тиску зменшується кондуктивно-конвекційна складова сумарного теплового потоку. Залишається лише радіаційна складова, яка практично не змінюється зі зменшенням тиску. Несуттєва зміна радіаційної складової пов'язана зі зміною температур внутрішніх поверхонь камери при зміні тиску.

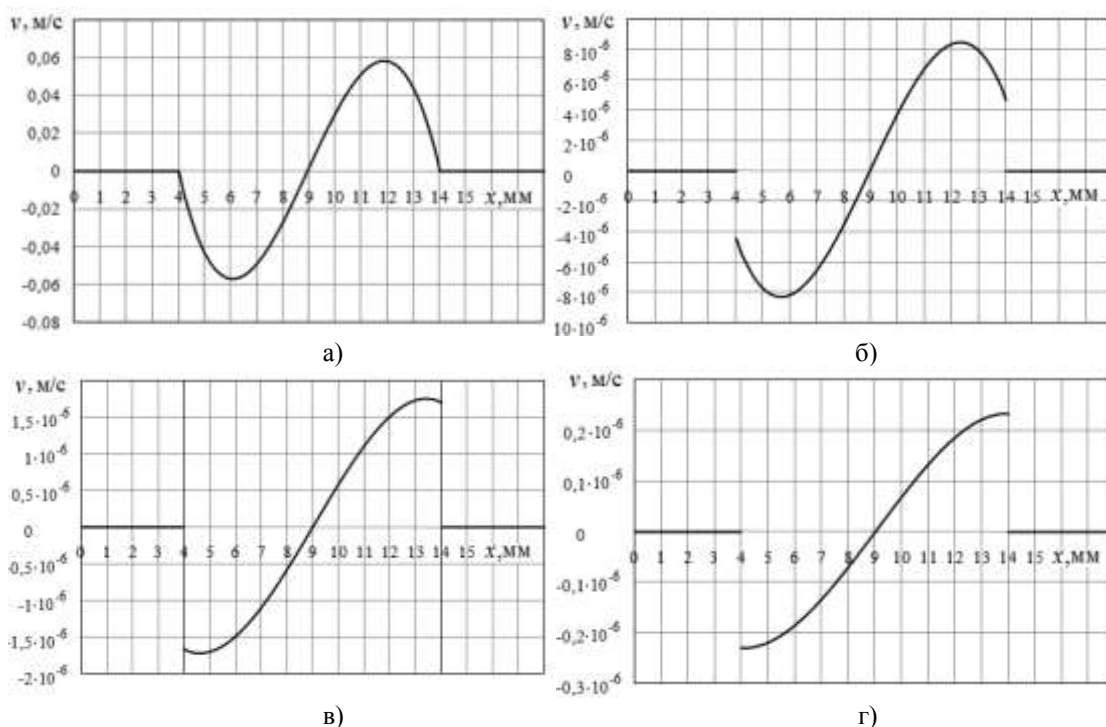


Рисунок 3 – Розподіл вертикальної швидкості в газових прошарках по товщині однокамерного склопакета: а) - $p=100000$ Па; б) - $p=10$ Па; в) - $p=1,0$ Па; г) - $p=0,1$ Па

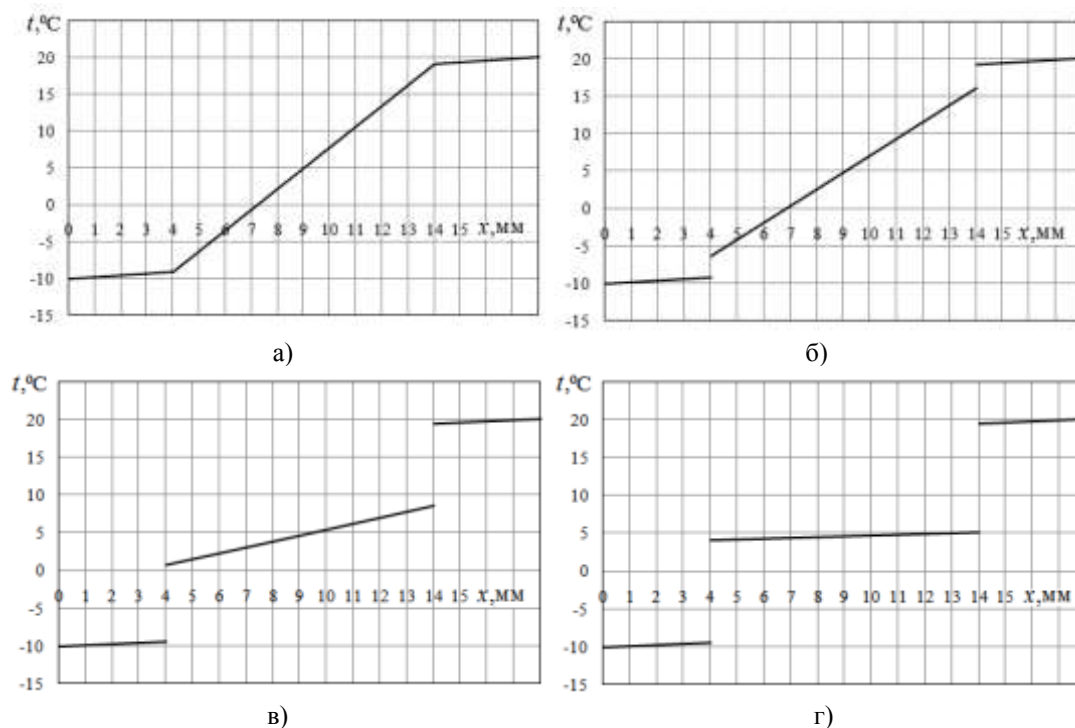


Рисунок 4 – Розподіл температури по товщині однокамерного склопакета: а) - $p=100000$ Па; б) - $p=10$ Па; в) - $p=1,0$ Па. г) - $p=0,1$ Па

Оцінка сумарного по всій поверхні вікна кондуктивно-конвекційного і радіаційного теплового потоку через вікно показує, що якщо при тиску $p=100000$ Па всередині камери склопакета сумарний тепловий потік складає $Q_{sum}=44,246$ Вт, то при $p=1$ Па сумарний потік зменшується до $Q_{sum}=28,58$ Вт, а при $p=0,1$ Па - зменшується до $Q_{sum}=27,148$ Вт. Завдяки такому зниженню сумарного теплового потоку збільшується опір теплопередачі склопакета при зниженні тиску в його камері (рис. 6). Якщо при тиску $p=100000$ Па опір теплопередачі складає $R=0,166$ К·м²/Вт, то при $p=1,0$ Па опір теплопередачі збільшується до $R=0,257$ К·м²/Вт, а при $p=0,1$ Па - зростає до $Q_{sum}=0,271$ К·м²/Вт.

Як видно з рис. 6, опір теплопередачі при зменшенні тиску нижче $p=1$ Па збільшується вже несуттєво. Це пов'язано з тим, що при практичній відсутності кондуктивно-конвекційної складової теплового потоку, радіаційна складова залишається і навіть трохи збільшується зі зменшенням тиску. Тому можливим шляхом подальшого збільшення опору теплопередачі склопакета є зменшення радіаційної складової теплового потоку.

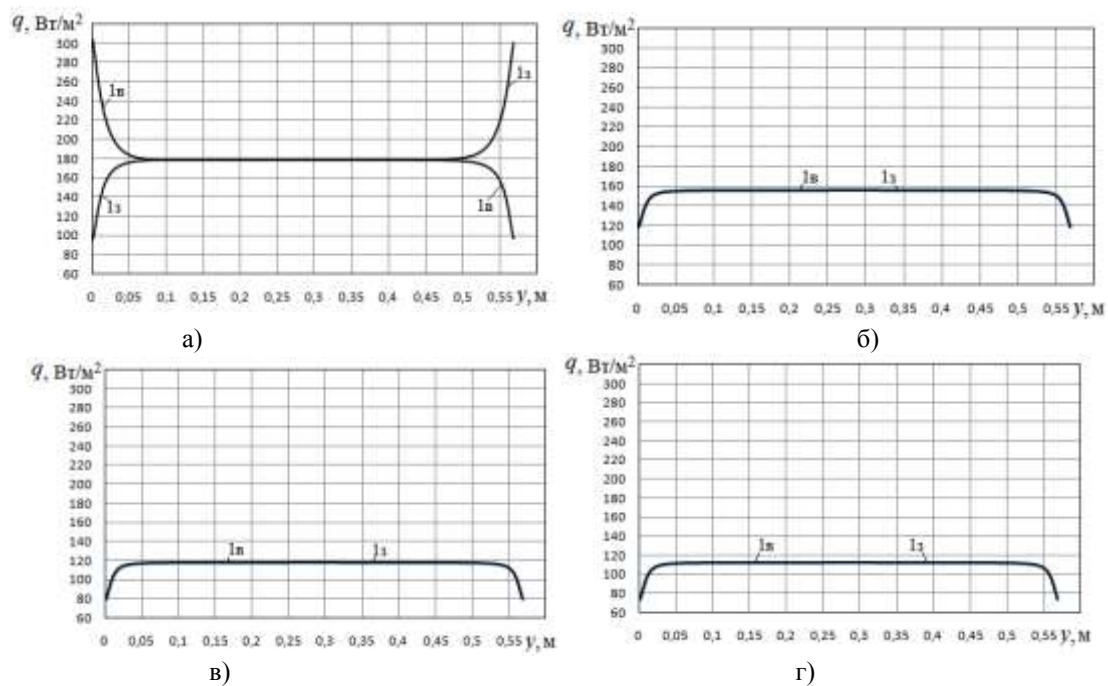


Рисунок 5 – Розподіли густин теплових потоків по зовнішній (з) і внутрішній (в) поверхнях однокамерного склопакета: а) - $p=100000$ Па; б) - $p=10$ Па; в) - $p=1,0$ Па; г) - $p=0,1$ Па

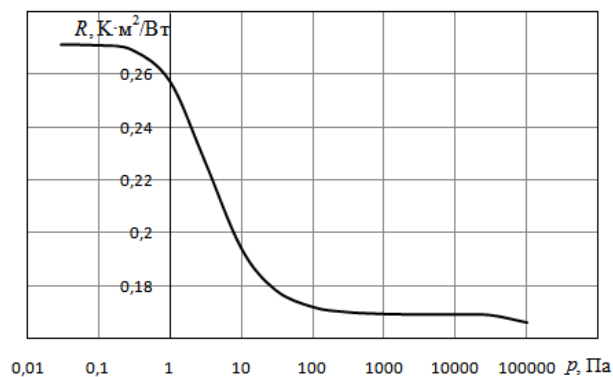


Рисунок 6 – Залежність опору теплопередачі однокамерного склопакета без низькоемісійних покриттів від тиску повітря всередині склопакета

Обговорення результатів. Для визначення впливу низькоемісійних покриттів на теплообмінні характеристики вакуумних склопакетів, описані вище чисельні дослідження виконуються також для варіанту нанесення низькоемісійного покриття на внутрішню поверхню теплового скла, а також для варіанту нанесення низькоемісійного покриття на обидві внутрішні поверхні камери склопакета. На поверхнях з низькоемісійним покриттям степінь чорноти складає $\epsilon=0,2$, а на поверхні без покриття $\epsilon=0,89$.

Як показують результати чисельних досліджень, наявність низькоемісійних покриттів на внутрішніх поверхнях камери склопакета дещо підвищує кондуктивно- конвекційну складову теплового потоку, але не надто суттєво. Найбільш суттєво низькоемісійні покриття впливають на радіаційну складову теплового потоку. Якщо при відсутності низькоемісійного покриття радіаційний тепловий потік при зменшенні тиску від $p=100000$ Па до $p=0,1$ Па змінюється від $Q_r=26,4$ Вт до $Q_r=27,12$ Вт, то при наявності одного покриття радіаційний тепловий потік значно зменшується і змінюється в межах від $Q_r=6,62$ Вт до $Q_r=6,6$ Вт. При наявності двох покриттів радіаційний потік знижується ще суттєвіше і змінюється при зменшенні тиску від $p=100000$ Па до $p=0,1$ Па в межах від $Q_r=3,79$ Вт до $3,89$ Вт. В результаті, сумарний тепловий потік при

відсутності покриттів змінюється від $Q_{sum}=44,246$ Вт до $Q_{sum}=27,148$ Вт при зменшенні тиску в камері від 100000 Па до 0,1 Па (крива 1, рис. 7). При наявності одного покриття сумарний тепловий потік при зменшенні тиску від 100000 Па до 0,1 Па змінюється в діапазоні від $Q_{sum}=25,02$ Вт до 6,81 Вт (крива 2, рис. 7). Тобто, при наявності одного покриття сумарний тепловий потік виявляється при $p=100000$ Па навіть меншим, ніж тепловий потік при тиску 0,1 Па, але при відсутності покриттів. При наявності двох покриттів сумарний тепловий потік зменшується ще суттєвіше. При зменшенні тиску від 100000 Па до 0,1 Па сумарний тепловий потік зменшується від 22,26 Вт до 3,896 Вт (крива 3, рис. 7).

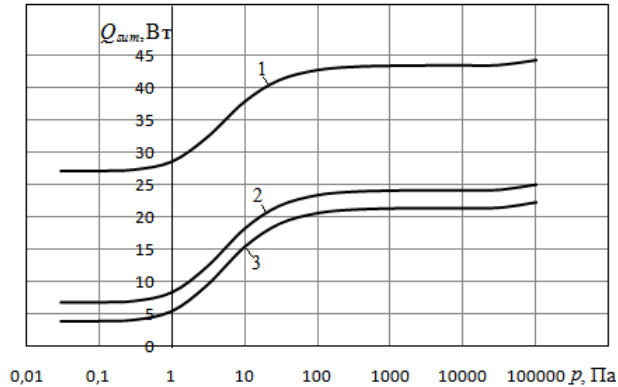


Рисунок 7 – Вплив низькоемісійних покриттів на сумарний тепловий потік через однокамерний склопакет при різних значеннях тиску повітря всередині склопакета:
1- без низькоемісійних покриттів; 2 - одне низькоемісійне покриття; 3-два покриття

Суттєве зменшення сумарного теплового потоку при встановленні низькоемісійних покриттів сприяє збільшенню опору теплопередачі вікна. Якщо при відсутності низькоемісійного покриття опір теплопередачі при зменшенні тиску від $p=100000$ Па до $p=0,1$ Па збільшувався від $R=0,166$ К·м²/Вт до $R=0,271$ К·м²/Вт (крива 1, рис. 8), то при наявності одного покриття опір теплопередачі збільшується від $R=0,294$ К·м²/Вт до $R=1,075$ К·м²/Вт при зменшенні тиску від $p=100000$ Па до $p=0,1$ Па (крива 2, рис. 8), а при наявності двох покриттів - відповідно від $R=0,33$ К·м²/Вт до $R=1,87$ К·м²/Вт (крива 3, рис. 8).

Загалом зазначимо, що отримані результати цілком кореспондують із матеріалами монографії [11] і змістом звіту по проекту Національного фонду досліджень України №2022.01/0172 «Аеродинаміка, теплообмін та інновації для підвищення енергоефективності віконних конструкцій та їх використання для відновлення зруйнованих війною будівель в Україні», конкурс «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

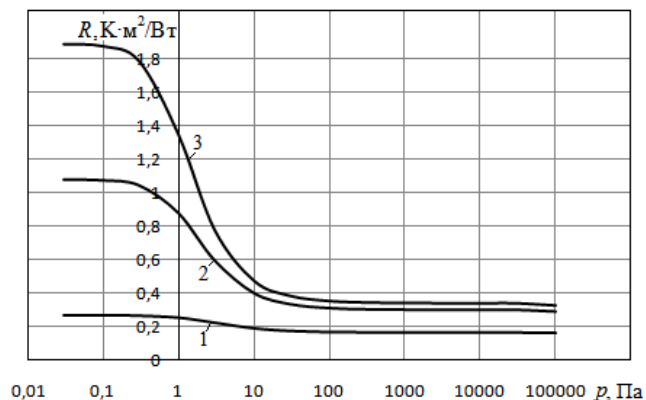


Рисунок 8 – Вплив низькоемісійних покриттів на опір теплопередачі через однокамерний склопакет при різних значеннях тиску повітря всередині склопакета: 1- без низькоемісійних покриттів; 2 - одне низькоемісійне покриття; 3-два покриття

Висновки. Зниження тиску (вакуумування) однокамерного склопакета без низькоемісійних покриттів підвищує його опір теплопередачі. Для однокамерного склопакета з відстанню між поверхнями скла 0,01 м це підвищення відчутно проявляється після того, як тиск в камері склопакета стає нижчим за 10 Па. При більших тисках вакуумування практично не впливає на опір теплопередачі, або впливає не надто суттєво. Підвищення опору теплопередачі при тиску нижче 10 Па пояснюється збільшенням числа Кнудсена та зменшенням коефіцієнту теплопровідності повітря при тисках менших ніж 10 Па, а також

суттєвою різницею температури повітря і скла на поверхні скла за рахунок ефекту проковзування при низьких тисках повітря. Це, в свою чергу, зменшує градієнт температури повітря в газовому середовищі склопакета, що суттєво знижує рівень перенесення теплоти теплопровідністю. Але максимальне значення опору теплопередачі при цьому не перевищує $R=0,271 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ при тиску 1,0 Па (при тиску 100000 Па опір теплопередачі складає $R=0,166 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$), тому що лишається суттєвим перенесення теплоти випромінюванням між бічними поверхнями скла.

Суттєвішому збільшенню опору теплопередачі при вакуумуванні камери склопакета сприяє низькоемісійне покриття внутрішніх поверхонь скла камери. При наявності одного покриття опір теплопередачі при зменшенні тиску від $p=100000 \text{ Па}$ до $p=0,1 \text{ Па}$ збільшується від $R=0,294 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ до $R=1,075 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$, а при наявності двох покриттів - відповідно від $R=0,33 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ до $R=1,87 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$.

Додаткове застосування. Отримані результати в частині розрахунку радіаційного теплообміну при різних варіантах облаштування поверхні і варіаціях коефіцієнта її випромінювальної здатності широко використовуються для виконання проєкту №2025.06/0054 «Поглинання та запобігання поширенню електромагнітного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та створення засобів теплового маскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».

Список використаної літератури

1. Dongfang Hu, Yichen Li, Chang Liu, Yanbing Li. Analysis for the heat transfer of fully tempered vacuum glazing based on the thermal resistance model and finite element model. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, Vol.10(9), P.1–11:168781401879598. DOI:10.1177/1687814018795985
2. Manz H., Brunner S., Wullschlegel L. Triple vacuum glazing: Heat transfer and basic mechanical design constraints. *Solar Energy*. 2006, Vol. 80 (12), P. 1632-1642. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.003>
3. Shi Y., Xi X., Zhang Y., Xu H., Zhang J., Zhang R. Prediction and Analysis of the Thermal Performance of Composite Vacuum Glazing. *Energies* 2021, 14, 5769. <https://doi.org/10.3390/en14185769>.
4. Jinqing Penga, Yutong Tan, Yueping Fangc, Hongxing Yangd, Aotian Songe, Charlie Curcijaf, Stephen Selkowitz. Excellent Insulation Vacuum Glazing for Low-Carbon Buildings: Fabrication, Modeling, and Evaluation. *Engineering*. 2025. Vol. 53. P. 18–39.
5. Eames P C. Vacuum glazing: current performance and future prospects *Vacuum*. 2008; Vol. 82, Issue 7, P. 717-722
6. Changyu Qiu, Hongxing Yang, Kaijun Dong. Energy and Thermal Comfort Performance of Vacuum Glazing-Based Building Envelope Retrofit in Subtropical Climate: A Case Study. *Buildings*. 2025, vol. 15, 2038. <https://doi.org/10.3390/buildings15122038>.
7. Ulrich Pont, Magdalena Wölzl, Peter Schober, Shiva Najaf Khosravi, Matthias Schuss, Ardeshir Mahdavi. Recent progress in the development of windows with vacuum glass. *MATEC Web of Conference*. 2019. Vol. 282. 02020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928>
8. Ratnesh Tiwari, Jungho Kim. Multi-Cell, Triple Pane, Vacuum Insulated Glazing. *Solar Energy*. 2022. Vol. 245, P. 340-352. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.008>
9. Erlend Wegger, Bjørn Petter Jelle, Erland Sveipe, Steinar Grynning, Arild Gustavsen, Ruben Baetens, Jan Vincent Thue. Aging effects on thermal properties and service life of vacuum insulation panels. *Journal of Building Physics*. 2011. 35 (2). P. 128–167.
10. Авраменко А.А., Ковецкая Ю.Ю. Теплообмен и гидродинамика при смешанной конвекции в пористом микроканале. *Пром. теплотехника*. 2017. т.39, №4. С. 33-38.
11. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г., Гончарук С.М. Теплопередача через віконні конструкції. Київ. Наукова думка. 2024. 208 с. ISBN 978-966-00-1887-7

B. Basok^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID: 0000-0002-8935-4248

S. Goncharuk¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID: 0000-0002-5609-7337

D. Davydenko¹, PhD student, ORCID: 0009-0003-5791-1980

O. Lysenko^{1,2}, Cand. Sc. (Eng.), ORCID: 0000-0003-3981-9796

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

FEATURES OF HEAT TRANSFER THROUGH VACUUM GLASS UNIT

The results of numerical studies of heat transfer through a vacuum double-glazed window are presented. The problems of convection air flow in the double-glazed window chamber under vacuum conditions and heat transfer are solved in a two-dimensional formulation in a vertical section of the double-glazed window. The boundary conditions for slipping are set on the glass surfaces under vacuum conditions. According to the results of the studies, the influence of the pressure in the double-glazed window chamber on its heat transfer resistance is determined. It is shown that the heat transfer resistance of a vacuum double-glazed window with a distance between the glass surfaces in the chamber of 10 mm increases significantly after the pressure in the chamber of such a double-glazed window becomes less than 10 Pa. At higher pressures, vacuuming has practically no effect on the heat transfer resistance, or has a very insignificant effect. A more significant increase in the heat transfer resistance when vacuuming the double-glazed window chamber is facilitated by the low-emissivity coating of the inner surfaces of the glass of the chamber.

Keywords: vacuum glass unit, heat transfer resistance, radiation heat flux, free convection, low-emission coating, numerical modeling.

References

1. Dongfang Hu, Yichen Li, Chang Liu, Yanbing Li. Analysis for the heat transfer of fully tempered vacuum glazing based on the thermal resistance model and finite element model. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, Vol.10(9), P.1–11:168781401879598. DOI:10.1177/1687814018795985
2. Manz H., Brunner S., Wullschleger L. Triple vacuum glazing: Heat transfer and basic mechanical design constraints. *Solar Energy*. 2006, Vol. 80 (12), P. 1632-1642. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.003>
3. Shi Y., Xi X., Zhang Y., Xu H., Zhang J., Zhang R. Prediction and Analysis of the Thermal Performance of Composite Vacuum Glazing. *Energies* 2021, 14, 5769. <https://doi.org/10.3390/en14185769>.
4. Jinqing Penga, Yutong Tan, Yueping Fangc, Hongxing Yangd, Aotian Songe, Charlie Curcijaf, Stephen Selkowitz. Excellent Insulation Vacuum Glazing for Low-Carbon Buildings: Fabrication, Modeling, and Evaluation. *Engineering*. 2025. Vol. 53. P. 18–39.
5. Eames P C. Vacuum glazing: current performance and future prospects *Vacuum*. 2008; Vol. 82, Issue 7, P. 717-722
6. Changyu Qiu, Hongxing Yang, Kaijun Dong. Energy and Thermal Comfort Performance of Vacuum Glazing-Based Building Envelope Retrofit in Subtropical Climate: A Case Study. *Buildings*. 2025, vol. 15, 2038. <https://doi.org/10.3390/buildings15122038>.
7. Ulrich Pont, Magdalena Wölzl, Peter Schober, Shiva Najaf Khosravi, Matthias Schuss, Ardeshir Mahdavi. Recent progress in the development of windows with vacuum glass. *MATEC Web of Conference*. 2019. Vol. 282. 02020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928>
8. Ratnesh Tiwari, Jungho Kim. Multi-Cell, Triple Pane, Vacuum Insulated Glazing. *Solar Energy*. 2022. Vol. 245, P. 340-352. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.008>
9. Erlend Wegger, Bjørn Petter Jelle, Erland Sveipe, Steinar Grynning, Arild Gustavsen, Ruben Baetens, Jan Vincent Thue. Aging effects on thermal properties and service life of vacuum insulation panels. *Journal of Building Physics*. 2011. 35 (2). P. 128–167.
10. Avramenko A.A., Kovetskaya Yu.Yu. Heat transfer and hydrodynamics at mixed convection in a porous microchannel. *Industrial heat engineering*. 2017. vol.39, №4. P. 33-38.
11. Basok B.I., Davydenko B.V., Kuzhel L.M., Novikov V.G., Goncharuk S.M. Heat transfer through window structures. Kyiv. Naukova Dumka. 2024. 208 p. ISBN 978-966-00-1887-7

Надійшла: 25.02.2026

Received: 25.02.2026

Прийнята: 21.03.2026

Accepted: 21.03.2026