

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

КУЖЕЛЬ ЛІЛЯ МИКОЛАЇВНА

УДК 536.24 : 536.33 : 697.133

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ
ВІКОННІ КОНСТРУКЦІЇ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

Дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики НАН України у відділі теплофізичних основ енергоощадних технологій.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
член-кореспондент НАН України
Басок Борис Іванович
Інститут технічної теплофізики НАН України
завідувач відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Приймак Олександр Вікторович
Київський національний університет будівництва та архітектури МОН України, декан факультету інженерних систем та екології

кандидат технічних наук
Фаренюк Єгор Геннадійович
Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (ДП НДІБК), Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, завідувач відділу будівельної фізики та енергоефективності

Захист відбудеться « 4 » жовтня 2017р. о 13 годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Булаховського, 2.

Автореферат розісланий « ___ » _____ 2017р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук



Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Проблеми ефективного використання енергоресурсів і енергозаощадження в сучасних умовах є головним завданням забезпечення енергетичної безпеки, а тому відносяться до найважливіших стратегічних задач України. Житлові та громадські будівлі залишаються головним пріоритетом державної політики в сфері енергоефективності. Адже саме ця сфера є однією з найбільш енергоємних в країні і водночас має найбільший потенціал підвищення енергоефективності. Технічний стан більшості існуючих будівель та енергетичних систем не дозволяє забезпечувати необхідний рівень їх енергетичних характеристик. Одним з варіантів вирішення проблеми енергозбереження є підвищення енергоефективності будівель та споруд, а саме: застосування комплексу заходів для покращення теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій будівель, а також проведення модернізації існуючих інженерних систем, що забезпечують необхідний тепловий комфорт. Питомі теплозахисні характеристики віконних конструкцій (ВК) в декілька разів нижчі, ніж фасадних стін, що призводить до підвищених тепловтрат через вікна в зимовий період року і додаткових витрат на кондиціонування в літній період. У холодний період року через низьку температуру внутрішнього скління істотно знижується комфортність приміщень. Крім того, світлопрозорі конструкції є малоінерційними в тепловому відношенні, а тому у них досить швидко змінюються теплові параметри внутрішніх поверхонь при зміні погодних умов. Тому актуальною є задача проведення комплексних досліджень теплопередачі через ВК з використанням енергоефективних склопакетів та віконних профілів, особливо в реальних кліматичних умовах їх довготривалої експлуатації.

Вз'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України та виконувалась за державними тематиками: «Теплофізичні основи підвищення енергоефективності будівель» (2012-2016 рр., 0112U000296); «Аеродинамічна та теплова взаємодія будівлі з зовнішнім середовищем» (2011-2012, 0111U000350); «Енергомоделювання будівлі з врахуванням її конструктивних особливостей, системи енергозабезпечення, зовнішнього середовища та клімату» (2015-2019, 0115U003364); «Розробка і оптимізація низькотемпературних систем теплозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії» (2015-2019, 0115U003363); «Аеродинаміка та теплообмін в світлопрозорих конструкціях при їх взаємодії з тепловим випромінюванням» (2017-2021, 0117U000832), «Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу» (2011, 0111U008782); «Створення комбінованої системи енергоресурсозабезпечення типу «нуль енергії» для експериментального пасивного будинку» (2013, 0113U008041).

Мета та завдання дослідження. Мета роботи – теоретичні та експериментальні дослідження аеродинаміки і теплопередачі через віконні конструкції (склопакети та профілі) в реальних кліматичних умовах їх експлуатації та на основі встановлених закономірностей розробка і реалізація рекомендацій практичних заходів щодо зменшення тепловтрат будівлі через світлопрозорі елементи фасадів.

Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні задачі:

- створити експериментальний вимірювальний комплекс для дослідження теплоізоляційних властивостей світлопрозорих огорожувальних конструкцій (СОК) будівлі при їх реальній експлуатації;
- провести експериментальні дослідження полів температури та густини теплового потоку на поверхнях склопакетів та на віконних профілях;
- розробити теплофізичні моделі (в одно-, дво- та в тривимірній нестационарній постановці) аеродинаміки і теплопередачі та проведення їх експериментальної верифікації (валідації);
- дослідити вплив зовнішніх кліматичних факторів на тепловтрати через ВК та на повітряно-температурний внутрішній стан будівлі;
- розробити інженерну методику розрахунку річних тепловтрат через склопакети;
- розробити рекомендації щодо проведення термомодернізації адміністративних будівель в частині світлопрозорих конструкцій (СК) та формування рекомендацій для створення СК будівель високої енергоефективності;
- провести моніторинг теплового стану ВК термомодернізованої будівлі за умов реального клімату їх тривалої експлуатації;
- створити банк експериментальних даних по опору теплопередачі склопакетів та віконних профілів різних СК, особливо для тих, дані для яких наразі відсутні в ДБН України.

Об'єкт дослідження – склопакети різного типу і профілі віконних рам, які встановлені в триповерховій будівлі каркасно-панельного типу та в будинку пасивного типу “нуль енергії”.

Предмет дослідження – процеси теплопередачі та аеродинаміки в віконних конструкціях та в віконних профілях.

Методи дослідження - аналітичні; експериментальні (лабораторні та промислові в умовах реального клімату); числове теплофізичне моделювання; комп'ютерне моделювання (власними пакетами та CFD-пакетами).

Наукова новизна отриманих результатів.

- вперше експериментально виявлено теплофізичний ефект, що спостерігається в полудень в зимовий період і полягає в оберненні напрямку теплового потоку на зовнішній поверхні склопакету і віконного профілю, що пов'язано з нестационарністю процесу теплопередачі та з впливом денного розсіяного сонячного випромінювання;
- вперше в двовимірній теплофізичній моделі теплопередачі через двокамерний склопакет враховано вплив ефекту низькоемісійного і-покриття (одного та двох);
- вперше оцінено розподіл теплопровідно-конвективних та радіаційних вкладів теплового потоку на зовнішній та внутрішній поверхнях склопакету;
- вперше досліджено вплив інсоляції на теплопередачу через склопакети;
- вперше в теплофізичній моделі теплопередачі через двокамерний вентиляований склопакет враховано вплив ефекту інсоляції;
- вперше запропонована тривимірна теплофізична модель аеродинаміки повітря та теплообміну в системі довкілля – двокамерний склопакет – приміщення будівлі;

- вперше експериментально досліджені профілі віконні в реальних умовах експлуатації;

- отримано великий масив експериментальних даних по температурних полях, полях теплового потоку та по опору теплопередачі 8 віконних склопакетів і 3 типів віконних профілів рам при їх довготривалій експлуатації в умовах реального клімату.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані варіанти розрахунку тепловтрат дозволяють значно вдосконалити існуючі методики у будівельній теплотехніці. Запропоновано заходи із зменшення теплоспоживання досліджуваної адміністративної будівлі в частині встановлення енергоефективних вікон. Заходи увійшли до проекту термомодернізації корпусів № 1, 2 по вул. Булаховського, 2 ІТТФ НАН України. Проведено ряд експериментальних та теоретичних досліджень і встановлено найбільш оптимальний тип склопакетів для заміни старих вікон, а також для будинків пасивного типу. Також встановлені теплоізоляційні характеристики для віконних профілів. Проведено комп'ютерне моделювання в тривимірній постановці типового склопакету ВК, що встановлений в адміністративній будівлі № 1 ІТТФ НАН України, вул. Булаховського, 2. Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується включенням отриманих результатів в звіт відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій ІТТФ НАН України та підтверджені актом впровадження на ТОВ «ЕНЕРГО ТЕПЛО ІНЖИНІРИНГ» шляхом застосування методики розрахунку тепловтрат через ВК.

Особистий внесок добувача. Здобувачем було проведено експериментальні дослідження теплопередачі через ВК та обробка отриманих результатів. Було вдосконалено існуючу теплофізичну модель розрахунку теплопередачі через двокамерний склопакет зі звичайним склопакетом для розрахунку склопакету з низькоемісійними покриттями нанесеними на поверхню склопакету, а також було вирішено цю задачу в нестационарній постановці. Також було вдосконалено інженерну модель розрахунку тепловтрат через віконні склопакети. Здобувачем була запропонована тривимірна нестационарна теплофізична модель аеродинаміки повітря та теплообміну в системі довкілля – двокамерний склопакет – приміщення будівлі. На основі інженерної методики, було складено теплофізичну модель для вентилязованого двокамерного склопакету і вирішено для нестационарних умов.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи обговорювалися і отримали схвалення на: II міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біохімічних системах АПК» (м. Київ, 16–17 жовтня 2014 р.); IX Міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, 20–23 жовтня 2015 р.); XV Мінському міжнародному форумі по тепло- і масообміну (м. Мінськ, 23-26 травня 2016 р.); VI і VII міжнародних науково-практичних конференціях «Енергоінтеграція» (м. Київ, 2016–2017 рр.); III і IV міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи - PEMS» (м. Київ, 2016–2017 рр.); XVII міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 29–30 вересня 2016 р.); XVI всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики

та екології» (м. Одеса, 5-8 жовтня 2016 р.); X міжнародній конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (м. Київ, 23–26 травня 2017 р.).

Публікації. Основні результати та положення дисертаційної роботи опубліковано у 25 друкованих роботах, з яких 7 статей - у фахових виданнях, перелік яких затверджено МОН України, 4 – у журналах, що належать до міжнародних наукометричних баз даних, в 11 тезах міжнародних наукових конференцій та додатково відображено в 1 патенті України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг роботи складає 190 сторінок, у тому числі 122 ілюстрації, 6 таблиць, список літератури, що включає в себе 85 найменувань, 3 додатки на 12 сторінках. Об'єм основного тексту дисертації – 140 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, вказано особистий внесок здобувача та відомості щодо апробації результатів дисертації.

У першому розділі розглянуто типи склопакетів і віконні профілі рам та стан теоретичних і експериментальних досліджень, приведені основні поняття згідно діючих ДБН України. Проведено літературний огляд експериментальних та теоретичних досліджень теплопереносу через ВК Нізовцева М.І., Терехова В.І., Терехова В.В., Гнирі А.І., Петрова Є.В., Качаєвої С.Г., Алексєєва О.А., Грищенко В.В., Терехова В.В., Дюмідова М.В., Мальцева А.В., Корепанова Є.В., Харламова Д.О., Кривошеїна О.А., Бушо А.В., Фаренюка Г.Г. Фундаментальний вклад у вивченні питання конструкцій з газовими прошарками зроблено G. K. Batchelor, які корелюються з експериментами R.G. Eckert, W.O. Carlson, та науковими працями Міхєєва М.О., Гершуні Г.З., Жуховицького Є.М., Таруніна Є.Л., Богословського В.М., Фокіна К.Ф. Аналіз проведених досліджень показав, що в запропонованих розрахункових моделях не було враховано впливу інсоляції та не розглядалась тривимірна модель для розрахунку склопакетів, також малочисельні дослідження віконних профілів в реальних умовах. В результаті проведеного аналізу літературних джерел сформульовано напрямок, мету та задачі роботи.

У другому розділі приведено експериментальні дослідження теплопередачі через віконні склопакети. В рамках проведення заходів по зменшенню теплоспоживання в існуючих будівлях, в ІТТФ НАН України проведено часткову термомодернізацію адміністративної будівлі корпусу № 1. Об'єкт досліджень - теплоізоляційна спроможність ВК досліджуваної будівлі, в якій проведено заміну 20 старих вікон (з терміном експлуатації 44 роки) на сучасні склопакети та профілі віконних рам. Всі вони були встановлені на північній стороні фасаду адміністративного корпусу № 1 по вул. Булаховського, 2 куди не потраплятиме пряме сонячне випромінювання. Були проведені дослідження температурних характеристик та густини теплового потоку на поверхнях склопакетів всередині приміщення та ззовні, також вимірювалась температура зовнішнього повітря і температура всередині приміщення. На рис. 1 на фото (а) і (б) показано розміщення

датчиків. Для вимірювання температури застосовувалися платинові (похибка вимірювання 0,1 °С), і мідні (похибка - 0,2-0,3 °С) термометри опору з робочим діапазоном зміни температури -40 .. +100 °С. Сигнали із заданим часовим кроком (10 хвилин) від датчиків записувалися переносним 96-ти каналним блоком теплової реєстрації (БТР), який дозволяє в умовах реальної експлуатації будівлі досліджувати температурний стан будь-якої віконної конструкції (декларована похибка вимірювання до 4%), рис. 1 (в). Головним блоком БТР є комплектація 6 восьмиканальних приладів вимірювання та контролю температури УКТ-38 для датчиків температури та 6 восьмиканальних аналого-цифрових перетворювачів «Експерт» для датчиків теплових потоків. Датчики з розмірами 40×80×2 мм були встановлені на склопакети, а з розмірами 20×80×2 мм – на віконний профіль, рис. 1 (г). Для вимірювання тепловтрат через склопакети використовувалися датчики форми круга з діаметром 100 мм, рис. 1 (г).

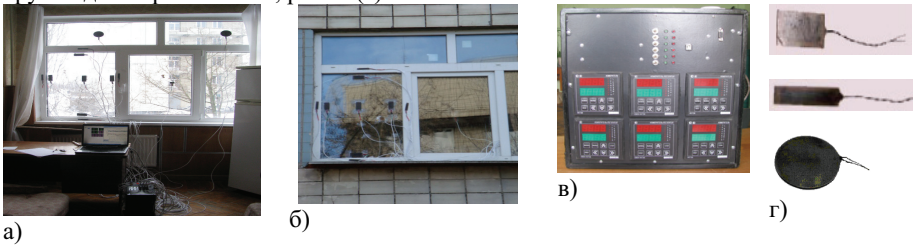


Рис. 1. Дослідження теплоізоляційних характеристик ВК в реальних умовах, а) – розміщення датчиків всередині приміщення; б) – розміщення датчиків на зовнішній поверхні ВК; в) блок теплової реєстрації; г) – датчики

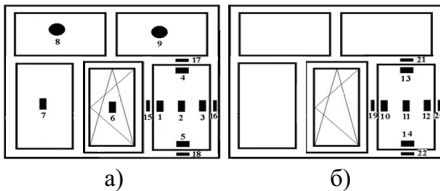


Рис. 2. Схема розміщення датчиків на ВК, вигляд зсередини приміщення; а) датчики розміщені на склопакеті і віконному профілі всередині приміщення; б) датчики розміщені на зовнішній поверхні ВК.

Схема розміщення датчиків та їх нумерація, показані на рис. 2. Всі експериментальні дослідження були проведені відповідно до ДСТУ Б В.2.6-101: 2010 «Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій» та ДБН В.2.6-31:2016. Обробка результатів та визначення термічного опору проводилися згідно до ДБН В.2.6-31:2006.

Протягом 3 опалювальних сезонів проводилися експериментальні дослідження теплопередачі різних склопакетів. Досліджувалися: двокамерний склопакет; одно- і двокамерний склопакет з низькоемісійним покриттям (або і-покриттям), нанесеним на поверхню одного із стекел, також із двома такими покриттями та з різною відстанню між розміщенням стекел; одно- і двокамерний склопакет з аргоновим заповненням між склом; двокамерний склопакет з енергозберігаючою плівкою, нанесеною на одне із стекел. Провівши серію

експериментальних досліджень та проаналізувавши всі отримані результати, прийшли до висновку, що оптимальним варіантом для заміни старих ВК являються склопакети з і-покриттям. Воно нанесене шляхом вакуумного напылення напівпровідникових оксидів металів, при цьому його товщина складає 0,08–0,12 мікрон і покриття практично не видно людським оком.

Було проведено дослідження теплопередачі через однокамерний склопакет з і-покриттям - 6M₁-12-i6. З'ясовано, що значення опору теплопередачі для нього становить $R_{0,експ} = 0,52 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. В діючих ДБН для такого типу склопакету значення R не приведено, але є значення для схожих варіантів 4M₁-12-4i – $R = 0,56 \text{ м}^2\text{К/Вт}$; 4M₁-16-4i – $R = 0,59 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Порівнявши із задекларованим в ДБН значенням $R = 0,47 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ для двокамерного склопакету, можна зробити висновок, що навіть однокамерний склопакет з одним і-покриттям має кращі теплотехнічні характеристики ніж двокамерний без покриття.

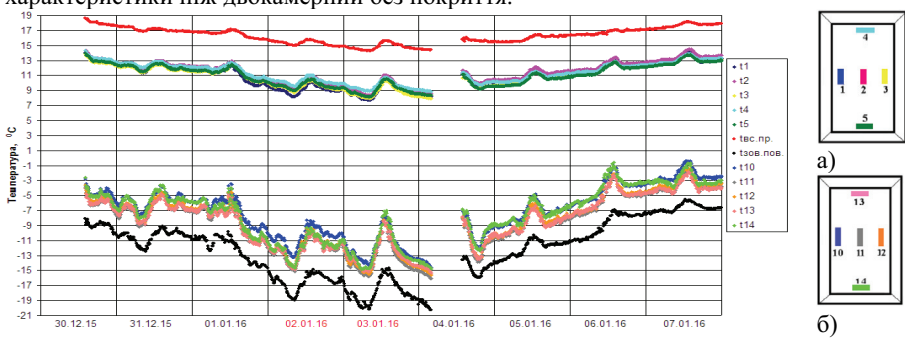


Рис. 3. Зміна у часі температури на внутрішній та зовнішній поверхні двокамерного склопакету 4M₁-10-4M₁-10-i4 з одним і-покриттям та температури внутрішнього і зовнішнього повітря. Електропостачання в будівлі було відсутнє 04.01 з 03:50 до 04.01 – 13:40. Справа схематично приведено розміщення датчиків в кольорах, що відповідають даним на графіках, а) всередині приміщення, б) ззовні.

Наступним етапом були дослідження двокамерного склопакету з і-покриттям 4M₁-10-4M₁-10-i4, з відстанню між склом 10 мм, товщина скла – 4 мм. На рис. 3, верхні криві це значення температури на склопакеті всередині приміщенні, а нижні - на зовнішній поверхні склопакету. Експеримент був проведений при погодних умовах, що відповідають вимогам стандарту. Значення датчиків № 1, що розташований біля стіни всередині приміщення та №5 показують значення температури найнижчі, а в точці № 4, яка знаходиться у верхній частині склопакета, значення найвищі. Це пояснюється опускною течією повітря поблизу склопакету та впливом стіни. Дані, що отримані з центрального датчику № 2 мають плавно виражений характер без різких підйомів і знижень густини теплового потоку (рис. 4) та температури, на відміну від решти датчиків. Можна зробити висновок про те, що має місце відтік теплоти від центру склопакету до бокових поверхонь, а також є вплив того фактору, що профіль та склопакет виготовлені з різних матеріалів і мають різні теплофізичні властивості.

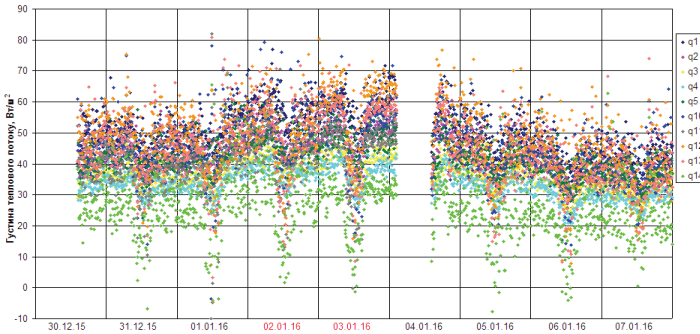


Рис. 4. Значення густин теплого потоку на внутрішній і зовнішній поверхнях двокамерного склопакету 4М₁-10-4М₁-10-і4 з одним і-покриттям.

Суттєві коливання теплового потоку, особливо зовнішнього, зумовлені пульсаціями швидкості вітрового потоку.

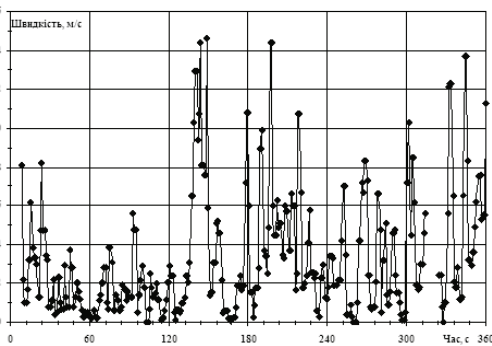


Рис. 5. Значення швидкості повітря на зовнішній поверхні фасадної стіни адміністративного корпусу №1.

Їх характер ілюструє рис. 5, на якому наведені експериментальні дані локальної швидкості повітря на зовнішній поверхні фасадної стіни, отримані кожну секунду за допомогою термоанемометра Testo 405, встановленого своїм сенсором врівень з площиною поверхні фасаду. При середній швидкості вітру в 3,0 м/с значення її пульсацій досягало до 1,5 м/с, що відповідно до формули В.М. Богословського призводило до зміни коефіцієнту тепловіддачі майже на порядок.

Зазначимо, що відповідні експериментальні пульсації температури мали менший масштаб і сягали до 0,4 °С.

Для розрахунку опору теплопередачі склопакета обиралися експериментальні дані, що одержані в нічні години (з 19:00 31.12.15 по 06:00 01.01.16). В цей період відсутнє сонячне випромінювання та вплив людей в приміщенні, тому процес теплопередачі в цей період можна вважати практично квазістаціонарним. Опір теплопередачі визначався

$$R = \frac{1}{\alpha_{\text{внутр.}}} + \frac{\bar{t}_{\text{скл. внутр.}} - \bar{t}_{\text{скл. зовн.}}}{\bar{q}_{\text{скл. внутр.}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{зовн.}}}$$

$R_{0, \text{експ.}} = 0,61 \text{ м}^2\text{К/Вт}$, в діючому ДБН вказано значення - $R = 0,64 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Аналогічні експериментальні дослідження були проведені і в літній період року. Як і для зимового періоду, всередині дня також спостерігалось обернення густини теплового потоку, а це призводить до інверсії температур скляних поверхонь. Для цього періоду вимірювань було визначено значення опору теплопередачі, $R_{0, \text{експ.}} = 0,66 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

Також було проведено дослідження двокамерного склопакету з і-покриттям з відстанню між склом 20 мм, 4M₁-20-4M₁-20-i4. Із збільшенням ширини дистанційної рамки і відстані між склом, теплоізоляційні характеристики підвищуються та покращується шумоізоляція. В діючому стандарті ДБН для такого типу склопакету значення опору теплопередачі не наведено, є значення опору для склопакета, з формулою 4M₁-16-4M₁-16-i4. Відстань між склом у цьому склопакеті становить 16 мм, а величина опору теплопередачі R=0,72 м²К/Вт. Для досліджуваного склопакета з формулою 4M₁-20-4M₁-20-i4 експериментально визначена величина опору становить R_{о,експ.}=0,96 м²К/Вт, що на 20% перевищує нині діючі нормативи для СК. Отже, шляхом збільшення ширини камер склопакета, що заповнені повітрям з низькою теплопровідністю, досягається таке високе значення опору теплопередачі. Тому можна рекомендувати віконні конструкції типу 4M₁-20-4M₁-20-i4 для встановлення в енергоефективних будинках, наприклад в будинках пасивного типу. Проведені дослідження показали, що за рахунок нанесеного покриття на поверхню скла зменшується радіаційна складова теплового потоку, що сприяє збільшенню значення термічного опору, а відповідно і зменшенню тепловтрат через СК.

В третьому розділі наведено результати чисельного дослідження теплопередачі через віконні склопакети. Розроблена інженерна методика розрахунку тепловтрат через віконні конструкції в одновимірній постановці. Вона дозволяє врахувати вплив радіаційної складової сонячного випромінювання на теплопередачу через склопакет.

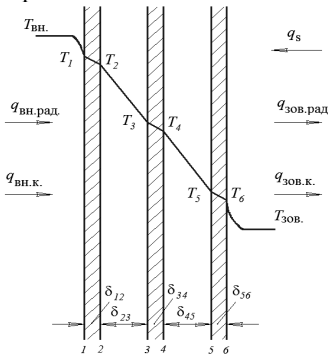


Рис. 6. Схема перерізу склопакету

На склопакет діють всередині приміщення та зовні конвективна і радіаційна складові теплового потоку, а також теплопровідність. Густина інсоляції, що закладена в системі рівнянь (4)-(5), позначена q_s . Повітряний прошарок товщиною $\delta_{2,3} = \delta_{4,5} = 0,010$ м і $\lambda_{\text{пов}} = 0,025$ Вт/(м·К). Віконне скло з $\delta_{1,2} = \delta_{3,4} = \delta_{5,6} = 0,003$ м і $\lambda_{\text{ск}} = 0,75$ Вт/(м·К). Температура всередині приміщення $T_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C} = \text{const}$. Річні дані про зміну температури зовнішнього повітря $T_{\text{зов}}(t)$ і швидкості вітру $v(t)$, час сходу сонця $t_{\text{cx}}(t)$ і його заходу $t_{\text{zx}}(t)$, добові значення прямої сонячної радіації на вертикальну стінку $U_{s1}(t)$, на горизонтальну поверхню $U_{s\leftarrow}(t)$ і розсіяну радіацію $U_{d\leftarrow}$ встановлюються згідно до даних гідрометеослужби.

Система рівнянь в одновимірній системі координат для розрахунку тепловтрат:

$$\alpha_{\text{вн}} = 1,663\sqrt{(T_{\text{вн}} - T_1)}, \quad \alpha_{\text{зов}} = 1,163\sqrt{(6,31v_{\text{зов}}^{0,656} + 3,25e^{-1,91v_{\text{зов}}})} \quad (1)$$

$$C_{\text{вн},1}^+ = \frac{C_0}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)(T_{\text{вн}} - T_1)} \left[\left(\frac{T_{\text{вн}} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1 + 273}{100}\right)^4 \right],$$

$$C_{23(45)}^+ = \frac{C_0}{\left(\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)(T_{2(4)} - T_{3(5)})} \left[\left(\frac{T_{2(4)} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{3(5)} + 273}{100}\right)^4 \right], \quad (2)$$

$$C_{6,306}^+ = \frac{C_0}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)(T_6 - T_{306})} \left[\left(\frac{T_6 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{306} + 273}{100}\right)^4 \right]$$

$$q_{\text{вн},1} = (\alpha_{\text{вн}} + C_{\text{вн},1}^+)(T_{\text{вн}} - T_1), \quad q_{12} = \frac{\lambda_{12}}{\delta_{12}}(T_1 - T_2), \quad q_{23} = \left(\frac{\lambda_{23}}{\delta_{23}} + C_{23}^+\right)(T_2 - T_3), \quad (3)$$

$$q_{34} = \left(\frac{\lambda_{34}}{\delta_{34}} + C_{34}^+\right)(T_3 - T_4), \quad q_{56} = \frac{\lambda_{56}}{\delta_{56}}(T_5 - T_6), \quad q_{6,306} = (\alpha_{306} + C_{6,306}^+)(T_6 - T_{306}) - q_s, \quad (4)$$

$$q_{\text{вн},1} = q_{12} = q_{23} = q_{34} = q_{45} = q_{56} = q_{6,306} = q,$$

$$T_{\text{вн}} - T_{306} = q \left(\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} + C_{\text{вн},1}^+} + \frac{\delta_{12}}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{23}}{\delta_{23}} + C_{23}^+} + \frac{1}{\frac{\lambda_{34}}{\delta_{34}} + C_{34}^+} + \frac{\delta_{56}}{\lambda_{56}} + \frac{1}{\alpha_{306} + C_{6,306}^+} \right) + \frac{q_s}{\alpha_{306} + C_{6,306}^+}. \quad (5)$$

В (1) розмірність швидкості – м/с; коефіцієнта тепловіддачі – Вт/м²/К, $C_0=5,67$ Вт/м²·К⁴; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – ступінь чорноти поверхонь стін і скла відповідно.

В результаті вирішення системи рівнянь (1)-(5) отримано результати для однокамерного склопакету (рис. 7), розміщеного на південній і на північній стороні фасаду за обрану добу – середину зими. Де $F = T_{\text{вн}}, T_{306}, T_i, 0,1q_s, q$. Такі ж розрахунки були проведені і для двокамерного склопакету. Розглядалися такі періоди: середина зими (15 січня), середина весни (15 квітня), середина літа (15 липня), середина осені (15 жовтня), результати представлені на рис. 8.

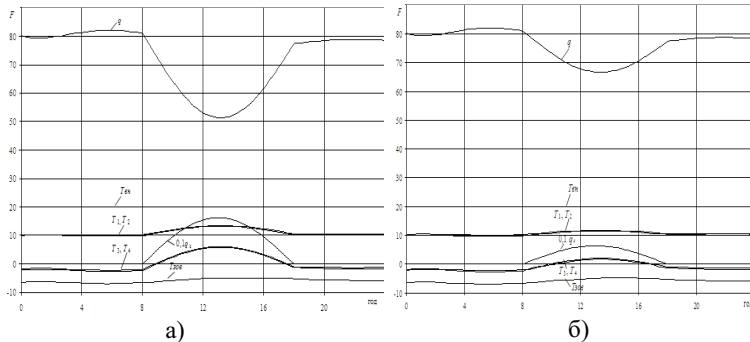


Рис. 7. Зміна теплових характеристик однокамерного склопакету в середині зими: а) південної орієнтації; б) північної орієнтації.

З трьох основних кліматичних факторів - температури зовнішнього повітря, швидкості вітру, сонячної радіації - найбільш впливовим виявився останній фактор. Чітко видно на рис. 7 і 8, що починаючи зі сходу Сонця, незалежно від пори року, різко змінюється поведінка всіх характеристик протягом усього світлового дня. Особливо виражено цей вплив позначається на густині теплового потоку на

внутрішній і зовнішній поверхнях вікна. Що стосується температур $T_{is}(i = 1, 2, \dots, 6)$, то їх значення попарно близькі. Аналогічні розрахунки були проведені і для трикамерного склопакету, та було встановлено - тепловтрати менші, але всього на 3-5%, ніж в двокамерного склопакету. Порівняльний енергетичний аналіз для одно-, дво- та трикамерних склопакетів показав, що із збільшенням числа камер склопакета тепла ефективність подальших камер знижується, тобто оптимальним варіантом є встановлення двокамерного склопакету.

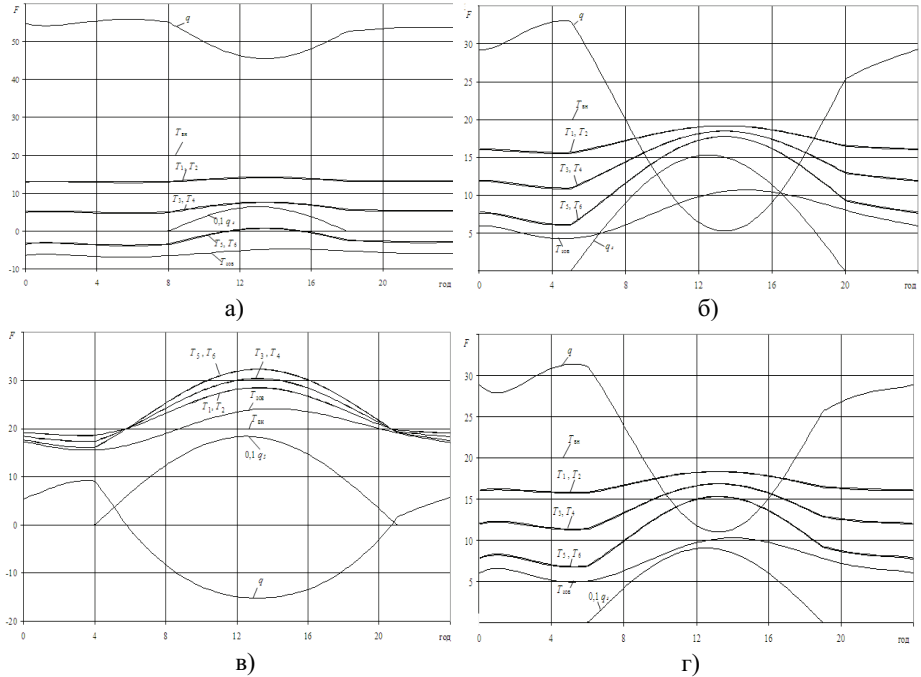


Рис. 8. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету на північній орієнтації фасаду для дня середини: а) зими, б) весни, в) літа, г) осені. Де $F = T_{вн}$, $T_{зовн}$, T_{is} , $0.1 q_s$, q .

Для детального встановлення характеристик теплопередачі через двокамерний склопакет, а також встановлення ефектів, що впливають на збільшення опору теплопередачі, проводилися його чисельні дослідження в двовимірній моделі:

$$\frac{\partial(\rho_r u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_r v)}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho_r v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_r v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) - \rho_r g, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho_r u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_r uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial(C_{p,r} \rho_r u T)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{p,r} \rho_r v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_r \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (10) \quad \rho_r = \rho_r(p, T) \quad (11)$$

$$x = 0 : T = t_{\text{зовн}}; x = B : T = t_{\text{внутр}}, \quad (12) \quad y = 0; H : \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (13)$$

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{jL}-0} = -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{jL}+0} - q_{r,L}, \quad (14) \quad -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{jL}-0} - q_{r,L} = -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{jL}+0}, \quad (15)$$

$$-\lambda_c \frac{T_{i,jL+1/2} - T_{i,jL}}{0,5\Delta x_{jL}} = -\lambda_r \frac{T_{i,jL+1} - T_{i,jL+1/2}}{0,5\Delta x_{jL+1}} - \frac{\varepsilon_{np} c_0}{\Delta y_i L} \sum_{i_1=1}^m F_{i,i_1} \left[\left(\frac{T_{i_1,jL-1/2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,jL+1/2}}{100} \right)^4 \right], \quad (16)$$

$$-\lambda_r \frac{T_{i,jL-1/2} - T_{i,jL-1}}{0,5\Delta x_{jL-1}} - \frac{\varepsilon_{np} c_0}{\Delta y_i L} \sum_{i_1=1}^m F_{i,i_1} \left[\left(\frac{T_{i_1,jL-1/2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,jL+1/2}}{100} \right)^4 \right] = -\lambda_c \frac{T_{i,jL} - T_{i,jL-1/2}}{0,5\Delta x_{jL}}, \quad (17)$$

$$F_{i,i_1} = \frac{dy_i dy_{i_1} b_2^2}{\pi} \iint_{0^L}^{L^L} \frac{dz_1 dz_2}{\left[b_2^2 + \left(\sum_{k=1}^i dy_k - \sum_{k=1}^{i_1} dy_k \right)^2 + (z_2 - z_1)^2 \right]^2}. \quad (18)$$

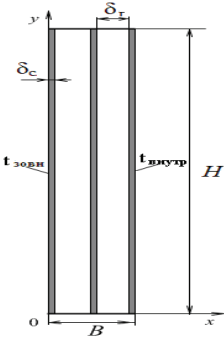


Рис. 9. Схема розрахункової області.

Чисельне моделювання виконано на основі теплофізичної моделі, що включає рівняння: Нав'є-Стокса, енергії та теплопровідності, які доповнювалися рівняннями стану газового середовища (11). Теплофізичні властивості скла приймаються постійними, а теплопровідність і в'язкість газового середовища вважаються залежними від температури по лінійному закону. На поверхнях скла, що звернуті всередину склопакета, задаються умови четвертого роду (14), (15), де $q_{r,L}$ - густина променевого теплового потоку, що падає на внутрішню поверхню лівої (більш холодної) поверхні газового прошарку між склом, а $q_{r,R}$ - густина променевого теплового потоку на правій (більш нагрітій) поверхні газового прошарку. В різницевій формі ці умови мають вигляд (16)-(18).

Дробові індекси означають, що розглянута величина відноситься до точки простору, яка розташована між розрахунковими вузлами, в яких задаються основні сіткові функції. В (16), (17) T_{ij} - сіткові функції температури, зв'язані з вузлами сітки, що розташовані в центрах контрольних об'ємів; F_{i,j_1} - площі взаємних поверхонь опромінення елементів з номерами i та i_1 , що розташовані на протилежних внутрішніх поверхнях скла; $\varepsilon_{прив}$ - приведений коефіцієнт чорноти

поверхонь скла. Індеси j_L, j_P використовуються для граничних контрольних об'ємів лівого і правого скла, що прилягають до газового прошарку. Об'єми з номерами j_{L+1} та j_{P-1} відносяться до граничних контрольних об'ємів з боку газового прошарку, а дробові індеси $j_{L+1/2}$ і $j_{P-1/2}$ позначають ліву та праву поверхні скла.

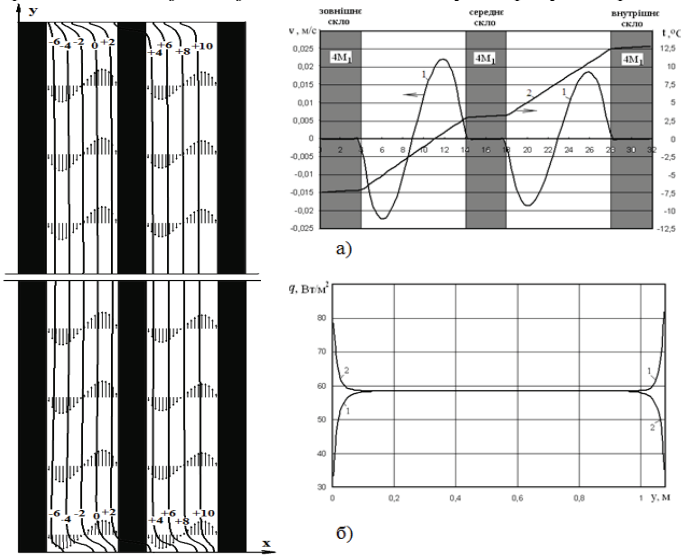


Рис. 10. Поле температури ($^{\circ}\text{C}$) і векторів швидкості в повітряному прошарку у вертикальному розрізі двокамерного склопакету; а) розподіл вертикальної швидкості (1) в газовому прошарку і температури (2); б) – розподіл густин теплового потоку по зовнішній (1) і внутрішній (2) поверхні двокамерного склопакету.

Для типового склопакету приймаємо: $H=1,08$ м; $L=0,75$ м; $B=0,032$ м, $\delta_c=4$ мм; $\delta_r=10$ мм; $\tau_{\text{вн}} = 12,7$ $^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{зов}} = -7,5$ $^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon=0,86$. В обох камерах склопакета відбувається підйомно-опускна вільно-конвективна течія повітряного середовища. Розподіл температури по товщині газового прошарку близький до лінійного, що свідчить про перенос теплоти переважно теплопровідністю. Особливістю такого теплопереносу є ізотерми у вертикальному перерізі двокамерного склопакета, що практично паралельні (рис. 10). Відхилення від паралельності ізотерм спостерігається лише у верхній і нижній частинах склопакета, де відбувається розворот потоку газового середовища, а напрямок течії змінюється від підйомного до опускного. Як видно з рис. 10 (б), відмінність значень густини теплового потоку проявляється лише на верхній і нижній ділянках поверхонь. Максимальні значення спостерігаються на зовнішній поверхні склопакета (крива 1) на її верхній ділянці, а максимальні теплові потоки - на внутрішній поверхні в нижній її частині (крива 2). Ця особливість теплопереносу пояснюється наявністю підйомних і опускних течій газового середовища всередині камер. Біля верхнього і нижнього торців склопакета відбувається зміна напрямків течії середовища. Внаслідок цього, біля однієї поверхні камери склопакета градієнти температури по горизонтальній координаті зменшуються, а біля протилежної – збільшуються. В середній частині склопакета градієнти температури практично не змінюються по товщині газового прошарку (рис. 10), а градієнти температури по вертикальній координаті практично нульові.

Тому теплові потоки в середній частині двокамерного склопакета однакові на зовнішній та внутрішній поверхнях.

Результати чисельного моделювання теплопереносу через двокамерний склопакет з одним та з двома і-покриттями, відстань між склом 10 мм. Вихідні умови були такі ж, як у попередньому варіанті розрахунку, але ступінь чорноти було задано для скла з і-покриттям. Порівнявши рисунки 10 і 11 можна побачити відмінність значень швидкості в камерах склопакету – максимальне значення в двокамерного склопакету з одним і-покриттям становить не в камері біля зовнішнього скла, як у випадку двокамерного склопакету без покриття, а навпаки – біля внутрішнього скла. Це свідчить про те, що і-покриття знижує рівень радіаційного теплопереносу і збільшує опір теплопередачі через внутрішню камеру. Внаслідок цього збільшується різниця між температурами протилежних поверхонь внутрішньої камери склопакета. У випадку з двома і-покриттями, зменшення швидкості відбувається в обох камерах.

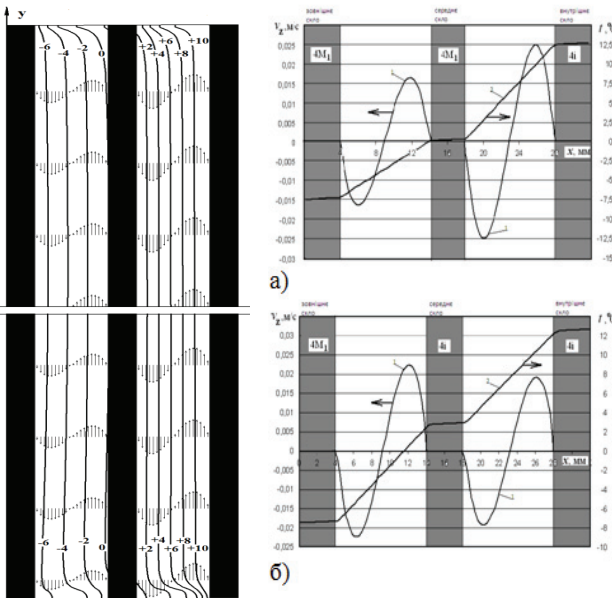


Рис. 11. Поле температури ($^{\circ}\text{C}$) і векторів швидкості в повітряному прошарку у вертикальному розрізі двокамерного склопакету з одним низькоемісійним покриттям; а) розподіл вертикальної швидкості (1) в газовому прошарку і температури у склопакеті з одним низькоемісійним покриттям (2); б) – розподіл вертикальної швидкості (1) в газовому прошарку і температури у склопакеті з двома низькоемісійними покриттями (2).

За допомогою цієї теплофізичної моделі визначено закономірності радіаційно-конвективних складових теплового потоку, що проходять через склопакет (табл.1). Чисельні дослідження показали, що центральне скло в двокамерному склопакеті сприяє зменшенню конвективного теплопереносу через газове середовище за рахунок зниження швидкості вільноконвективних течій в камерах. Але більш впливово зменшенню радіаційного теплопереносу сприяє центральне скло, виконуючи функцію термозахисного екрану. Завдяки нанесенню низькоемісійних покриттів на поверхні склопакету зменшується радіаційна складова теплопереносу. Внаслідок цього збільшується значення опору теплопередачі. Конвективний

теплоперенос зменшується за рахунок збільшення кількості камер в склопакеті, а теплопровідність – за рахунок заповнення камер аргоном або криптоном.

Таблиця 1. Закономірності радіаційно-конвективних складових теплового потоку.

Тип склопакету	$q, \text{Вт}$	$R_{\text{ск}}, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}, \text{теор. визн.}$	Частка радіаційного потоку від загального теплового потоку, у внутрішній камері, %	Частка радіаційного потоку від загального теплового потоку, у зовнішній камері, %
Двокамерний, 4M ₁ -10-4M ₁ -10-4M ₁	47,22	0,35	60	58
Двокамерний з одним і-покриттям, 4M ₁ -10-4M ₁ -10-4i	33,86	0,48	27	58
Двокамерний з двома і-покриттями 4M ₁ -10-4i-10-4i	26,47	0,61	27	26
Двокамерний з двома і-покриттями 4M ₁ -8-4i-8-4i	31,6	0,52	24	23

Значення $R_{\text{ск}}$ наведено без врахування коефіцієнтів тепловіддачі.

Отримані розрахункові результати щодо теплопередачі через двокамерний склопакет повністю відповідають власним експериментальним даним. Наразі найбільш ефективним по співвідношенню якості (енергоефективність) – ціна є склопакет типу 4M₁-8-4i-8-4i та 4M₁-10-4i-10-4i.

Для визначення впливу профілю рами на теплопередачу виконано CFD моделювання радіаційно-конвективного теплообміну двокамерного склопакету, встановленого в корпусі №1 ІТТФ НАН України по вул. Булаховського, 2, в тривимірній постановці.

На рис. 12: 1 - двокамерний склопакет 4M₁-10-4M₁-10-4M₁ з розмірами 1,06x0,642 м, що встановлений в трикамерний профіль 0,04x0,06 м і шар монтажної піни 0,01 м; 2 – зовнішнє середовище з $T_{\text{зов.пов.}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 - «сандвіч» панель, що включає в себе - бетон 7 см, за ним шар мінеральної вати – 10 см, а за ним ще шар бетону - 7 см; 4 – приміщення кімнати з $T_{\text{вс.пр.}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Розрахункова сітка містить 3707694 елементів. Повітря вважається ідеальним газом. Течія в умовах природної конвекції – ламінарна. На поверхнях розрахунку «тверде тіло - повітря» або «тверде тіло» – «тверде тіло» застосовуються умови спряження (умови 4 роду).

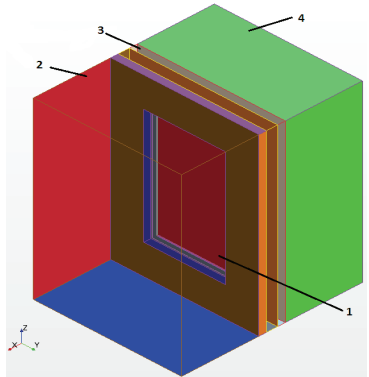


Рис. 12. Розрахункова область.

Теплообмін на внутрішній поверхні вікна більшою мірою визначається видом течії повітряних мас і різницею температур між внутрішнім повітрям $T_{\text{вн}}$ і на поверхні скла $T_{\text{ск}}$. Як видно з рис. 13, на фрагменті 1 і 2 спостерігається підйомно-опускна течія повітря та досить значний тепловий відтік в зоні віконного профілю, що свідчить про тепловтрати і про те, що потрібно застосовувати профілі з більшою

товщиною і кількістю камер. Рис. 14 теж явно вказує на значні тепловтрати в зоні профілю, які обумовлюють зниження температури на внутрішніх поверхнях в цих місцях та можливість конденсації вологи з повітря.

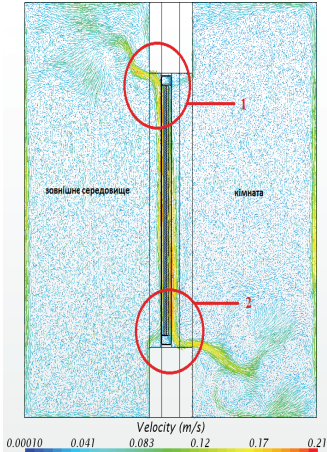


Рис. 13. Поля швидкостей у вертикальному перерізі.

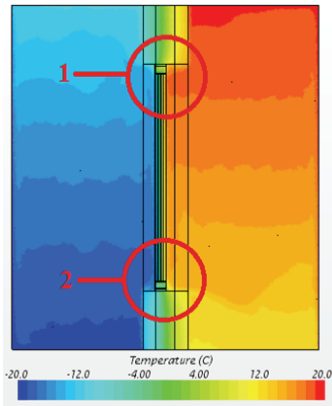
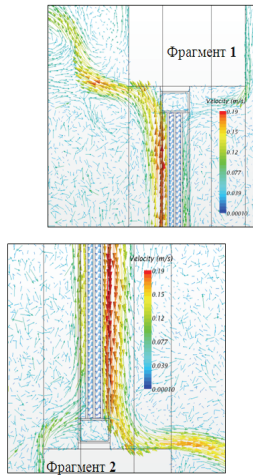


Рис. 14. Поля температур у вертикальному перерізі.

Формування прилежових шарів в умовах природної конвекції обумовлено силами гравітації, за рахунок яких повітря біля теплої вертикальної поверхні починає спливати, а біля холодної – занурюватися, рис. 15. Чим вища швидкість руху повітря, що обумовлена природною конвекцією, тим тонший прилежовий шар, рис. 15. При цьому, в повітряних прошарках між скляними поверхнями виникають циркуляційні потоки, які беруть участь у перенесенні теплоти спільно з кондуктивними потоками. При малих товщинах цих повітряних прошарків, зустрічні потоки повітря біля



Спостерігаються коливання температури на поверхні скла, що зумовлені нерівномірністю поля швидкості, відривом і присіднанням повітряного потоку на поверхні скла в умовах природної конвекції. Пристінкові зони повітря, де спостерігаються перепади температур, є прилежовими шарами. Так як в склопакеті є два пустотних проміжки між скляними поверхнями, можна говорити про 6 прилежових шарів.

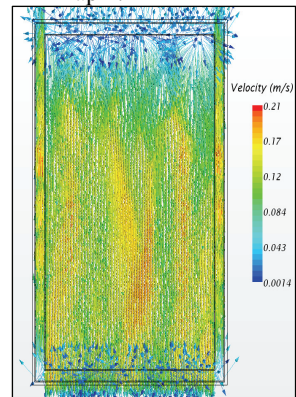


Рис.15. Значення швидкості руху повітря біля поверхні склопакету.

протилежних стінок прошарку починають «напливати» один на одного, змішуючись. При цьому товщина повітряного прошарку стає менше двох незбурених примежових шарів, внаслідок чого коефіцієнт теплопередачі збільшується, а опір теплопередачі відповідно зменшується.

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень теплотехнічних характеристик віконних профілів – трикамерного, п'ятикамерного та шестикамерного. Так як у ВК площа віконних рам займає до 20%, то відповідно через них теж відбувається значна частина тепловтрат. Як було показано за результатами CFD моделювання, є значні тепловтрати через трикамерний віконний профіль, а особливо через красві зони, а це призводить до утворення «місточків холоду». Температурний режим в зоні примикання склопакету і профілю визначається спільним протіканням декількох взаємопов'язаних процесів: передачею теплоти теплопровідністю, конвективним теплопереносом в прошарку між стеклами і радіаційним випромінюванням. Передача теплоти теплопровідністю відбувається через дистанційні рамки, герметики та частково через повітря або газ, який заповнює прошарок між стеклами у склопакеті. Тому велику увагу було приділено дослідженню теплотехнічних характеристик віконного профілю. Схема розміщення датчиків показана на рис. 2. В ході проведення експерименту було отримано значення температури на зовнішній і внутрішній поверхнях профілю, температури зовнішнього і внутрішнього повітря, а також густину теплового потоку. На рис. 16 і 17 приведені типові графічні залежності.

Як і для склопакетів, на основі отриманих даних, було пороховано значення опору теплопередачі. На рис. 18 представлено їх значення. В діючих ДБН значення опору теплопередачі для профілів не приведено. Тому значення, отримані експериментальним шляхом, порівнювалися із значеннями, зазначеними виробником в паспорті, рис. 18.

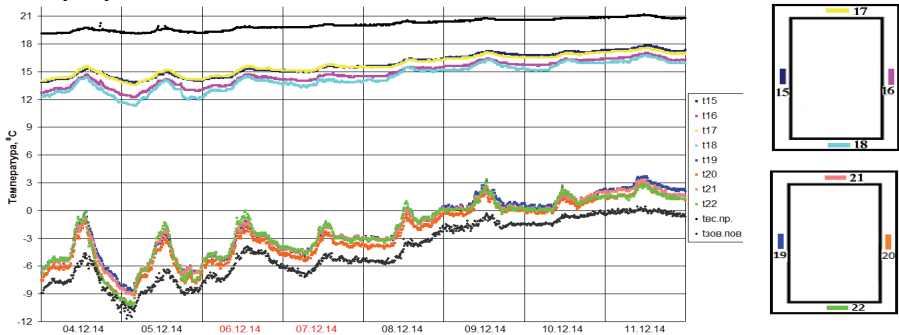


Рис. 16. Зміна у часі температури на внутрішній та зовнішній поверхні п'ятикамерного профілю та температури внутрішнього і зовнішнього повітря.

Шляхом збільшення кількості камер у профілі, що заповнені повітрям з його низькою теплопровідністю, досягається високе значення опору теплопередачі. А чим вище значення опору теплопередачі, тим менші тепловтрати через профіль та склопакет в цілому. З ціллю зменшення радіаційного випромінювання можливий варіант заповнення камер профілю запіненим полівінілхлоридом.

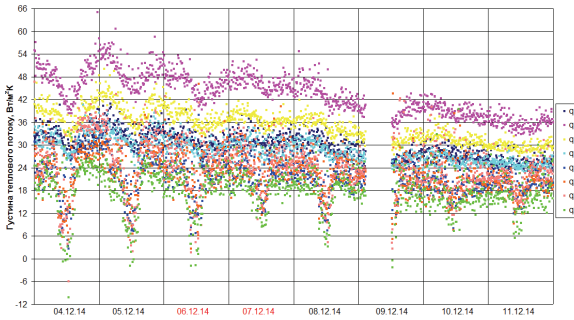


Рис. 17. Зміна у часі густини теплового потоку на внутрішній та зовнішній поверхні п'ятикамерного профілю.

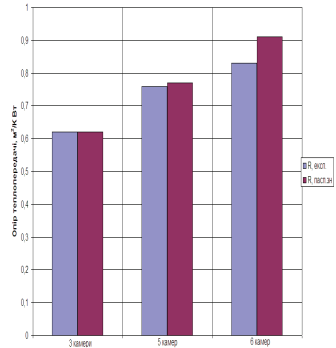


Рис. 18. Залежність опору теплопередачі від кількості камер у віконному профілі.

В п'ятому розділі наведено результати теплофізичного розрахунку тепловтрат через СК з врахуванням всіх кліматичних факторів, верифікація розрахункової моделі, а також модель для розрахунку двокамерного вентиляваного склопакету. Верифікація моделі (1)–(5) виконувалась шляхом порівняння розрахунків за цією моделлю з даними експерименту. Результати верифікації представлені на рис. 19. Точками позначені експериментальні дані, а суцільними лініями – отримані за допомогою моделювання. Зіставлення розрахункових і експериментальних значень визначає міру коректності використання залежностей для конвективного і радіаційного теплообміну. Це зіставлення свідчить про їх задовільне узгодження.

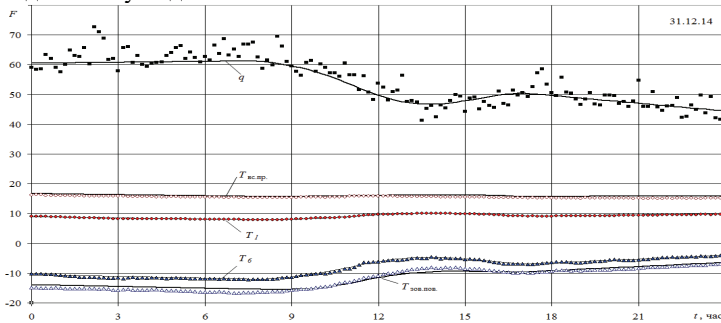


Рис. 19. Результати порівняння розрахункових даних з експериментальними

На наступному етапі було розглянуто двокамерний вентиляований склопакет. Теплову модель було складено на основі рівнянь (1)–(5) для нестационарних умов вентиляваного двокамерного склопакету, коли в прошарок між внутрішнім і середнім склом знизу направляється вільноконвективний потік теплого повітря з приміщення. На двокамерний склопакет з приміщення діють радіаційний та конвективний теплові потоки і теплопровідність. Із зовнішнього боку - такого ж роду тепловий вплив, до яких додається сонячна радіація. Теплота сонячної інсоляції сприймається зовнішнім заскленням і передається всередину приміщення теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням.

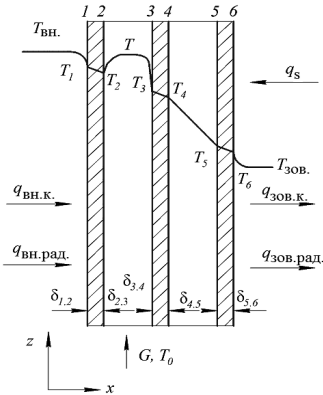


Рис. 20. Схема перерізу вентиляваного двокамерного склопакету

Таким чином для внутрішньої частини вікна (рис. 20):

$$\begin{aligned} q_1 &= (\alpha_{\text{вн.к}} + C_{\text{вн.1}}^+) (T_{\text{вн}} - T_1), \\ q_{1,2} &= \frac{\lambda_{1,2}}{\delta_{1,2}} (T_1 - T_2), \\ q_2 &= C_{2,3}^+ (T_2 - T_3) - \alpha_2 (T - T_2), \\ q_1 &= q_{1,2} = q_2. \end{aligned} \quad (19)$$

На іншу частину вікна діють тепловитокки:

$$\begin{aligned} q_3 &= C_{2,3}^+ (T_2 - T_3) + \alpha_3 (T - T_3), \quad q_{3,4} = \frac{\lambda_{3,4}}{\delta_{3,4}} (T_3 - T_4), \quad q_{4,5} = \left(\frac{\lambda_{4,5}}{\delta_{4,5}} + C_{4,5}^+ \right) (T_4 - T_5), \\ q_{5,6} &= \frac{\lambda_{5,6}}{\delta_{5,6}} (T_5 - T_6), \quad q_6 = (\alpha_{\text{зов.к}} + C_{6,\text{зов}}^+) (T_6 - T_{\text{зов}}) - q_s, \quad q_3 = q_{3,4} = q_{4,5} = q_{5,6} = q_6. \end{aligned} \quad (20)$$

Рівняння для середньої температури повітря T , яке продувається крізь внутрішню камеру, що працює в режимі близькому до «повного змішування», буде:

$$\rho_{2,3} c_{2,3} \delta_{2,3} \frac{dT}{dt} = \frac{G}{H \cdot B} c_{2,3} (T_0 - T) - \alpha_2 (T - T_2) - \alpha_3 (T - T_3), \quad (21)$$

де, T_0 - температура на вході в камеру. Співвідношення в (19) і (20) при заданих $T_{\text{вн}}(t)$, $T_{\text{зов}}(t)$, $q_s(t)$, відомих $\alpha_{\text{вн.к}}$, $\alpha_{\text{зов.к}}$, α_2 , α_3 дозволяють скласти незалежні рівняння і спільно з (21) знайти зміни в часі температур T_1, \dots, T_6, T . Для конкретизації виразів для коефіцієнтів $\alpha_{\text{вн.к}}$, $\alpha_{\text{зов.к}}$, $C_{\text{вн.1}}^+$, $C_{2,3}^+$, $C_{4,5}^+$, $C_{6,\text{зов}}^+$ та скориставшись залежностями (1)–(5) проводилися наступні розрахунки. Зміна густини потоку сонячної радіації протягом світлового дня ($t_{\text{зх}} - t_{\text{цх}}$) задовільно описується синусоїдою:

$$q_s = \frac{\pi U_{\pi/2}}{2(t_{\text{зх}} - t_{\text{цх}})} \sin \left(\pi \frac{t - t_{\text{цх}}}{t_{\text{зх}} - t_{\text{цх}}} \right), \quad t \in [t_{\text{цх}}, t_{\text{зх}}]. \quad (22)$$

Дані для добових значень U_{β} в залежності від кута нахилу поверхні β (в нашому випадку $\beta = \pi/2$), її орієнтації щодо сторін світу, про часи сходу $t_{\text{зх}}$ і заходу $t_{\text{цх}}$ Сонця, швидкості вітру $v_{\text{пов}}$, температурі зовнішнього повітря $T_{\text{зов}}$, альbedo навколишньої поверхні взяті із кліматичних довідників і посібників. В разі припинення продувки рівняння для q_2 і q_3 , а також ланцюжок рівностей густини теплових потоків (19) і (20) трансформуються у вирази:

$$q_{2,3} = \left(\frac{\lambda_{2,3}}{\delta_{2,3}} + C_{2,3}^+ \right) (T_2 - T_3), \quad q_1 = q_{1,2} = q_{2,3} = q_{3,4} = q_{4,5} = q_{5,6} = q_6. \quad (23)$$

Було розглянуто двокамерне вікно з розмірами $H \times B = 1,5 \times 1,8 \text{ м}^2$, $\delta_{1,2} = \delta_{3,4} = \delta_{5,6} = 0,003 \text{ м}$, $\delta_{2,3} = \delta_{4,5} = 0,01 \text{ м}$, що встановлене в стінову панель шириною 3 м і висотою 3 м, в приміщенні $6 \times 3 \times 3 \text{ м}^3$, яке знаходиться в місцевості $50,5^\circ \text{ п. ш. (м. Київ)}$.

У приміщенні підтримується температура $T_{вс}=20^{\circ}\text{C}=\text{const}$. При кратності повітрообміну близько 1,5 витрата повітря складе $G = 0,027 \text{ кг/с}$, що визначає його швидкість у внутрішній камері вікна 1,25 м/с і ламінарний режим течії ($\text{Re}=1,7 \cdot 10^3$, $\text{Re}=1,2 \cdot 10^3$). Тоді для щільності, що обігривається з двох сторін, число $\text{Nu}=7,5$, що дає $\alpha_2=\alpha_3= 9,38 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$. Інтегральні значення енергій $e_i = \int q_i dt$ ($i=1,6$), $t \in [0, t^*]$.

На рис. 21 показана зміна теплових характеристик.

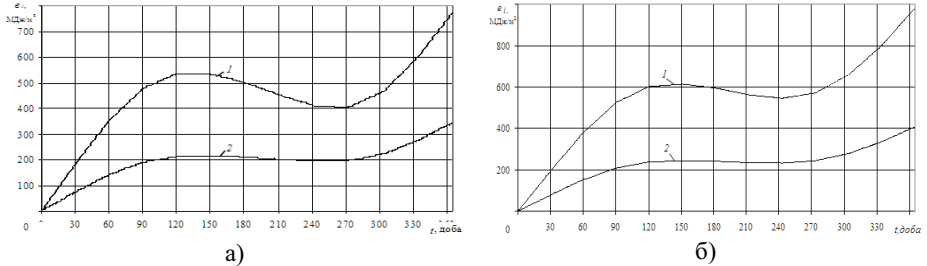


Рис. 21. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається – а) склопакет на південній орієнтації будівлі; б) склопакет на північній орієнтації. Числа відповідають: 1 – q_6 , 2 – $T_{\text{пов}}$, 3 – q_1 , 4 – T , 5 – T_1 , 6 – T_2 , 7 – T_3 , 8 – T_4 , 9 – T_5 , 10 – T_6 , 11 – $0.1 q_s$, 12 – $T_{\text{пов}}$.

Температура повітря T , яке продувається, мало відрізняється від T_1 і T_2 . На відміну від стінової частини огороження, невелика енергоємність всіх елементів вікна призводить до дуже швидкого реагування на зміну зовнішніх кліматичних умов. Вплив продувки внутрішньої камери склопакета можна оцінити, порівнюючи значення $q_1(t)$ і $q_6(t)$, рис. 22.

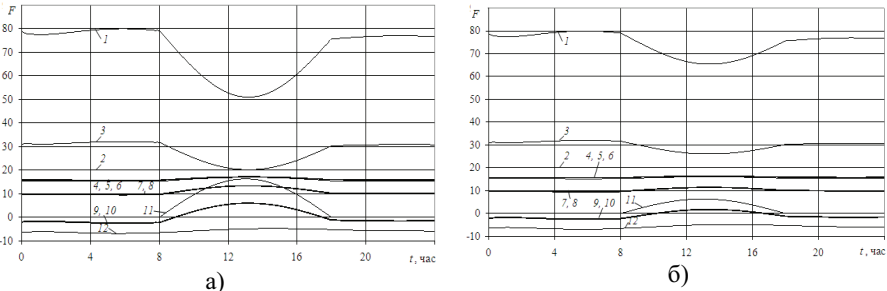


Рис. 22. Інтегральні енергетичні характеристики двокамерного склопакета, що продувається, (а) південної та (б) північної орієнтації, де 1 – e_6 , 2 – e_1 .

Для середніх широт північної півкулі Землі під час продування через трансформований склопакет повітря, що видаляється з приміщення, можна орієнтуватися на річні втрати через ВК порядку $(344 + 408)/2 = 376 \text{ МДж/м}^2$. Це значення майже в 2 рази більше бажаного (198 МДж/м^2), але в 2 рази менше, ніж при відсутності продувки (660 МДж/м^2). Можливим є підігрів відведеного з приміщення повітря, що приведе до зниження значень $q_1(t)$. Однак при цьому збільшаться $q_i(t)$ ($i = 3, \dots, 6$) і зростуть річні витрати теплоти на опалення. Тому, навіть у разі появи

додаткового нетрадиційного джерела енергії, його нерационально використовувати таким чином і слід обмежитися випадком $T_0 = T_{\text{пов.}}$. Запропонована методика безперервного обліку сукупності кліматичних факторів, що діють на двокамерний склопакет, внутрішня камера якого продувається вилученим з приміщення повітрям, дозволяє безперервно відстежувати теплові процеси через подібні пристрої і встановлювати ефективність прийнятих рішень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі здійснено чисельні і експериментальні дослідження аеродинаміки та теплопередачі через віконні склопакети та профілі в реальних умовах їх експлуатації. Встановлені закономірності теплопередачі та розроблені рекомендації щодо зменшення тепловтрат будівлі через світлопрозорі елементи фасадів. Основні наукові результати полягають у наступному:

1. Розроблено теплофізичні (одно- та двовимірну) моделі для дослідження теплопередачі через одно- та двокамерний склопакет, з використанням яких визначено закономірності радіаційно-конвективних складових теплового потоку, що проходять через склопакет. Теоретично встановлено, що радіаційний тепловий потік складає до 70% в однокамерному та до 65% в двокамерному склопакеті. Центральне скло в двокамерному склопакеті сприяє зменшенню конвективного теплопереносу через газове середовище за рахунок зниження швидкості вільноконвективних течій в камерах. Більш впливово центральне скло сприяє зменшенню радіаційного теплопереносу, виконуючи функцію термозахисного екрану. Завдяки нанесенню низькоемісійних покриттів на поверхні склопакету зменшується радіаційна складова теплопереносу. Конвективний теплоперенос зменшується за рахунок збільшення кількості камер в склопакеті, а теплопровідність – за рахунок заповнення камер інертним газом.

2. Розроблено теплофізичну модель для розрахунку теплопередачі через вентиляований двокамерний склопакет, яка включає в себе всі кліматичні фактори, такі як – інсоляцію, альbedo земної поверхні, час сходу і заходу сонця, швидкість вітру, добову густину енергії, коефіцієнт тепловіддачі, температурний коефіцієнт об'ємного розширення, коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості, коефіцієнт температуропровідності і променевої тепловіддачі. Розрахунками підтверджено, що для двокамерного вентиляованого склопакету, при 1,5 кратному повітрообміні в приміщенні, продування повітря, яке видаляється через внутрішню камеру двокамерного склопакета, призводить до зниження річних тепловтрат через подібну конструкцію в 2 рази.

3. Отримані розрахункові результати щодо теплопередачі через одно- чи двокамерний склопакет в межах випадкової похибки співпадають з експериментальними даними, що незалежно отримані із застосуванням розробленого переносного блоку теплової реєстрації.

4. Запропоновано заходи із зменшення теплоспоживання досліджуваної адміністративної будівлі в частині встановлення енергоефективних вікон. Заходи увійшли до проекту термомодернізації корпусів №1 і 2 по вул. Булаховського, 2.

5. Розроблені рекомендації стосовно ефективного застосування енергоефективних віконних конструкцій. В результаті запропонованих інноваційних заходів можна досягти значення опору теплопередачі через одинарні віконні конструкції $1 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Басок Б.И., Накорчевский А.И., Гончарук С.М., Кужель Л.Н. Экспериментальные исследования теплопередачи через оконные стеклопакеты с учетом действия внешних факторов. *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т.90. №1. С. 94-101. (SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Cjmpendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest). *Проведення експериментальних досліджень теплопередачі через ВК, обробка експериментальних даних, участь в розробці теплофізичної моделі, робота над основною частиною статті.*
 2. Basok B., Davydenko B., Zhelykh V., Goncharuk S., Kugel L. Influence of low-emissivity coating on heat transfer through the double-glazing windows. *Building physics in theory and practice. Scientific Journal*. Vol. VIII. No. 4. 2016. P. 5–8. (ISSN 1734-4891. *Проведення експериментальних досліджень теплопередачі через ВК, обробка експериментальних даних, участь в розробці теплофізичної моделі.*
 3. Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.А. Исаев, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель. Численное моделирование теплопереноса через двухкамерный стеклопакет. *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т.89. №5. С. 1288–1295, г. Минск. (SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Cjmpendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest). *Участь в обробці експериментальних даних, проведення аналізу літературних джерел.*
 4. О.М. Лисенко, Л.М. Кужель, І.К. Божко. Управління тепlopостачанням будівлі на основі використання індивідуального теплового пункту оригінальної конструкції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. Т. 1, N 8(73). С. 61-67. – Режим доступу: DOI : 10.15587/1729-4061.2015.37917 (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus*). *Участь у проведенні літературного огляду, аналіз теплового стану приміщень.*
- Статті у наукових фахових виданнях:
5. Басок Б. И., Давиденко Б. В., Кужель Л. М., Гончарук С. М., Беляева Т. Г. Экспериментальні дослідження теплопередачі через енергоефективні склопакети з низькоемісійним м'ягким покриттям. *Пром. Теплотехніка*. 2017, Т. 39. №1. С.41–48. *Проведення експериментальних досліджень теплопередачі через ВК, обробка експериментальних даних, робота над основною частиною статті.*
 6. Басок Б.И., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г., Калініна М.Ф. Чисельні дослідження впливу радіаційного та конвективного теплопереносу на теплоізоляційну спроможність двокамерних склопакетів. *Пром. Теплотехніка*. 2017, Т.39 №3. С.60-65. *Проведення експериментальних досліджень теплопередачі через ВК, обробка експериментальних даних, робота над основною частиною статті, робота над теплофізичним моделюванням.*
 7. Гончарук С.М., Калініна М.Ф., Божко І.К., Кужель Л.М., Лисенко О.М. Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу «нуль енергії». *Пром. Теплотехніка*. 2014, Т. 36, №3. С.88–95. *Підготовлений матеріал про повітряно-теплову зв'язь.*
 8. А.Н. Недбайло, М.Ф. Калинина, И.К. Божко, М.П. Новицкая, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель, О.Н. Лысенко. Математическая модель нестационарного процесса теплопереноса в многослойной ограждающей конструкции. *Керамика: наука и жизнь*. 2014. № 2 (23). С. 14–29. *Проведений літературний огляд, участь в складанні математичних залежностей.*

9. Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Новицька М.П., Кужель Л.М., Красота Д.О. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах експлуатації. *Енергоефективність у будівництві та архітектурі*. 2015, №7, С. 65–71. *Проведений літературний огляд, обробка експериментальних даних*.

10. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах їх експлуатації. *Оконные технологии*. 2015. №60(2), С. 24–26. URL: http://wt.com.ua/wt_60_2015_online/Pippingbook.swf

Проведення експериментальних досліджень теплопередачі через ВК, обробка експериментальних даних.

11. Б.І. Басок, А.І. Накорчевський, Л.М. Кужель, С.М. Гончарук, М.П. Новицька. Експериментальні дослідження теплопередачі через склопакети з врахуванням зовнішніх кліматичних факторів. Методика опрацювання даних. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2016. Вип. 8. С. 15-20. *Проведення літературного огляду джерел і експериментальних досліджень теплопередачі через ВК, обробка експериментальних даних*.

Додатково відображає наукові результати дисертації патент України на винахід:

Спосіб забезпечення повітряно-теплової завіси теплотою ґрунту: пат. № 88791 Україна: № у 201314599; заявл. 25.03.2014, Бюл.№ 6. 4 с. *Проведений пошук аналогу (прототипу) повітряної завіси із забезпеченням теплотою ґрунту, робота над складанням формули корисної моделі*.

Апробація матеріалів дисертації:

1. Л.М. Кужель. Енергоефективні світлопрозорі конструкції. *II Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених. Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: тези доповідей.* (м. Київ, 16 - 17 жовтня 2014). Київ. 2014. С. 38–40.

2. Басок Б.І., Накорчевський А.І., Гончарук С.М., Кужель Л.М., Нежута В.П. Експериментальні дослідження теплопередачі через склопакети з врахуванням зовнішніх кліматичних факторів. *IX Міжнародна конференція “Проблеми промислової теплотехніки”*: тези доповідей. (м. Київ, 20 – 23 жовтня 2015). м. Київ. 2015. С. 105.

3. Басок Б.І., Новицька М.П., Кужель Л.М. Теплофізичне моделювання експериментального енергоефективного будинку, обладнаного тепловою завісою фасадних стін. *IX Міжнародна конференція “Проблеми промислової теплотехніки”*: тези доповідей. (м. Київ, 20 – 23 жовтня 2015). м. Київ. 2015. С. 107.

4. Vasok B., Nakorchevskiy A., Kuzhel L., Goncharuk S., Novitska M. Experimental study heat transfer through glass with including external climatic factors. Method of data processing. *Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «ЕНЕРГО-ІНТЕГРАЦІЯ-2016»*: матеріали робочої програми та тези доповідей шостої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Київ 13 - 15 квітня 2016). Київ. 2016. С. 20-21.

5. Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко, Л.Н. Кужель. Экспериментальные и теоретические исследования теплопереноса через двухкамерный стеклопакет оконной конструкции. *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену*: тезисы докладов и сообщений. (г. Минск 23 - 26 мая 2016). Минск, ИТМ им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. 2016. Том 3. С. 269-273.

6. Б.И. Басок, А.И. Накорчевский, Л.Н. Кужель, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко. Экспериментальные исследования теплопередачи через стеклопакеты с учетом климатических факторов. *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену*: тезисы докладов и сообщений (г. Минск 23 - 26 мая 2016) г. Минск, ИТМ им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Том 3. С. 280-283.

7 Л.М. Кужель. Підвищення енергоефективності будівель шляхом зменшення тепловтрат через світлопрозорі віконні конструкції. *Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – Ретс'2016*: збірник матеріалів конфер. (м. Київ 30 травня - 01 червня 2016). Київ, НТУУ «КПІ». 2016. С. 40.

8. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М. Енергоефективні віконні конструкції – запорука підвищення енергоефективності будівель. *XVII міжнародна науково-практичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”*: матеріали конф. (Київ 29 – 30 вересня 2016). Київ. НТУУ «КПІ». 2016. С. 349–352.

9 Басок Б.І., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Покращення енергетичної ефективності будівель шляхом застосування сучасних енергоефективних віконних конструкцій. *XVI Всеукраїнська науково-технічна конференція “Актуальні проблеми енергетики та екології”*: матеріали науково-практичної конференції ОНАХТ, (Одеса, 5 - 8 жовтня 2016). Одеса. 2016. С. 148-149.

10. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г. Експериментальні та чисельні дослідження радіаційно-конвективного теплопереносу через віконні конструкції. *Міжнародна науково-практична та навчально-методична конференція Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – Ретс'2017*: збірник матеріалів конфер. (м. Київ 25 – 27 квітня 2017). м. Київ, НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського. 2017. С. 16.

11. Басок Б., Давиденко Б., Кужель Л., Новіков В. Вплив радіаційного та конвективного теплопереносу на теплоізоляційну спроможність двокамерних склопакетів. *Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «ЕНЕРГОІНТЕГРАЦІЯ-2017»*: матеріали робочої програми та тези доповідей сьомої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Київ 26 - 28 квітня 2017). Київ. 2017. С. 37-38.

АНОТАЦІЯ

Кужель Л.М. Закономірності теплопередачі через віконні конструкції. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена теоретичним та експериментальним дослідженням процесів аеродинаміки і теплопередачі через віконні конструкції.

Теоретично досліджено теплотехнічні особливості теплопередачі через віконні конструкції. Вдосконалено існуючу теплофізичну модель розрахунку теплопередачі через двокамерний склопакет зі звичайним склопакетом шляхом застосування її в нестационарній постановці для склопакетів з одним та двома низькоемісійними покриттями, нанесеними на поверхню скла.

Проведено експериментальні дослідження теплопередачі через одно- і двокамерні склопакети з різною відстанню між склом та з нанесеними на них низькоемісійними покриттями. Виконані експериментальні дослідження теплопередачі через віконні профілі. Проведена верифікація розрахункової моделі по експериментальним даним. В результаті встановлено частку радіаційного та конвективного теплопереносу через склопакет і визначено тип склопакету та віконного профілю, оптимальний для встановлення у віконний проріз.

За допомогою CFD-пакету проведено, в тривимірній постановці, комп'ютерне моделювання радіаційно-конвективного теплообміну двокамерного склопакету.

Розроблена інженерна методика розрахунку тепловтрат через віконні конструкції, яка дозволяє врахувати вплив радіаційної складової сонячного випромінювання на теплопередачу через віконний склопакет.

В нестационарній постановці розроблену теплофізичну модель теплопередачі для вентиляваного двокамерного склопакету.

Ключові слова: однокамерний, двокамерний склопакет, вентиляований склопакет, енергозберігаючий склопакет, віконний профіль, теплофізичне моделювання, комп'ютерне моделювання, тепловтрати, віконний проріз, опір теплопередачі.

ANNOTATION

Kuzhel L.M. Regularities of heat transfer through window constructions. - Should be treated as a manuscript.

Dissertation for candidate of technical sciences scientific degree, specialty 05.14.06 - Technical thermal physics and Industrial Heat power Engineering. - Institute Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

The dissertation is devoted to theoretical and experimental research processes of aerodynamics and heat transfer through window constructions.

The heat-engineering features of heat transfer through window constructions have been theoretically researched. The existing thermophysical model of calculation of heat transfer through the double-glazed unit with ordinary double-glazed windows has been improved by applying it in a non-standard setting with one and two low-emission coatings, applied to the glass surface.

Experimental studies of heat transfer through single- and double-chamber glass units with different distance between glasses and low-emission coatings deposited on them have been conducted. Experimental studies of heat transfer through window profiles have been conducted too. The verification of calculation model has been verified by experimental data. As a result, the proportion of radiation and convective heat transfer through the double-glazed unit have been determined and the type of double-glazed window and window profile have been determined too, which is optimal for installation in the window sill.

Using a CFD-package, a computer simulation of radiation-convective heat exchange of a two-chamber double-glazed window was carried out in three-dimensional formulation.

An engineering methodology for calculation of heat loss through window designs is developed, which allows to take into account the influence of the radiation component of solar radiation on the heat transfer through a window-paneled window.

In the non-stationary formulation a thermophysical model of heat transfer for a ventilated double-glazed double-glazed window is developed.

Keywords: single chamber double-glazed windows, ventilated double-glazed windows, window profile, thermophysical modeling, computer simulation, heat loss, window opening, heat transfer resistance.

**Підписано до друку 29.08.2017 р. Формат 60x90 1/16
Папір офсетний. Умовн. друк арк. 1,9
Друк цифровий. Наклад 100 прим.**

**ТОВ "СІ Принт"
03170, м. Київ, вул. Перемоги, буд. 1
Тел.: 360-24-74**