

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

ДЕКУША Олег Леонідович



УДК 53.08:536.2:536.6:536.629.7

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ЗАСАДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ
ТЕРМОРАДІАЦІЙНИХ ТА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д. 26.223.01
доктор технічних наук, ст. доцент



 Світлана КОВТУН

Науковий консультант: БАБАК Віталій Павлович, академік НАН України,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

Обґрунтування вибору теми дослідження. Оновлена Директива ЄС з енергоефективності «Energy Efficiency Directive» (ЄС/2023/1791) визначає рівень вимог щодо скорочення кінцевого споживання енергії до 2030 року. Вона вперше закріплює принцип "спочатку енергоефективність" як основоположний принцип енергетичної політики, що стимулює підвищення енергоефективності на етапах від виробництва до споживання енергії. Одним з споживачів з високим потенціалом до енергозбереження, а саме, зниження витрат на енергоносії, зменшення викидів парникових газів, підвищення енергобезпеки, є домогосподарства. За оцінками Європейського агентства з навколишнього середовища (ЕЕА), кінцеве енергоспоживання домогосподарств перевищує 25% від загального енергоспоживання всіх секторів економіки країни. Одним з шляхів енергозбереження в домогосподарствах є підвищення теплозахисних характеристик оболонки будівель. Розв'язання цього питання передбачає забезпечення контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів, які використовуються в будівельній галузі як під час виробництва, так і на етапі натурних випробувань. Провідні світові організації у сфері стандартизації і сертифікації та науково-дослідні інститути і університети, такі як Munich University of Applied Sciences, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., International Organization for Standardization, ведуть постійну роботу щодо створення нових методів та стандартів, які б дали змогу підвищити точність вимірювань та достовірність контролю теплоізоляційної оболонки будівлі. Цей процес стимулюється тим, що потреби практики постійно висувають нові, більш жорсткі вимоги до всього ланцюгу контролю: метод – сенсори – вимірювальні підсистеми – опрацювання результатів вимірювання – метрологічне забезпечення.

Кліматичні зміни та підвищення вимог до теплового опору оболонки будівель та споруд, широке застосування нових утеплювачів викликали необхідність у вимірі малих значень густини теплового потоку в натурних умовах, а також терморадіаційних характеристик покриттів матеріалів, що

вимагало створення вимірювальної апаратури та методичних рекомендацій щодо її використання. У зв'язку з тим, що значення параметру контролю - теплового опору теплозахисної оболонки, для нових та модернізованих будівель може перевищувати 4 K/Вт м^2 , а зміна клімату призвела до зменшення перепаду температури між зовнішнім та внутрішнім метеорологічним полем, виникла гостра потреба у вимірюванні значень поверхневої густини теплового потоку зменшених рівнів. Ця задача ускладнюється за рахунок того, що під час натурних і лабораторних випробуваннях теплового опору теплозахисної оболонки будівель спостерігається зміна як внутрішнього так і зовнішнього температурного поля, яка носять коливальний характер, що призводить до необхідності розв'язання задачі вимірювання поверхневої густини теплового потоку в нестационарному режимі.

Тому розроблення концептуального підходу до комплексного контролю основних теплофізичних характеристик матеріалів при проведенні обстеження теплоізоляційної оболонки як складової частини енергоаудиту та створення сучасних засобів їх контролю та відповідних методик є актуальним завданням.

Методи дослідження.

Для вирішення поставлених завдань було використано методи математичного й комп'ютерного моделювання процесів складного теплообміну в об'єктах та системах контролю теплофізичних і терморадіаційних характеристик матеріалів та виробів; математичної статистики, концепції невизначеності, контролю для оцінки отриманих експериментальних даних та валідації запропонованих моделей.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є підвищення достовірності неруйнівного контролю терморадіаційних і теплофізичних характеристик матеріалів та виробів шляхом створення нових та удосконалення існуючих методів, та розроблення відповідних апаратно-програмних засобів.*

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

- розроблено концептуальний підхід до комплексного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, який базується на моделях полів інформативних параметрів та статистичних методах опрацювання експериментальних даних;

- розроблено математичні моделі, алгоритми та методи неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів;

- проведено комп'ютерне моделювання процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну теплозахисної оболонки будівлі;

- запропоновано варіанти конструктивних рішень модулів системи контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів;

- створено систему контролю теплового опору, яка відповідає вимогам діючого стандарту ISO 9869 в частині апаратно-програмного забезпечення і здійснено її випробування в лабораторних та натурних умовах;

- проведено комп'ютерне моделювання та валідацію процесів складного радіаційного і конвективно-кондуктивного теплообміну при контролі коефіцієнту емісії;

- створено прилад неруйнівного контролю коефіцієнту емісії і проведено його натурні випробування;

- вдосконалено метрологічне забезпечення сенсорів теплового потоку, які застосовуються при контролі теплового опору.

Об'єкт дослідження – процеси контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів

Предмет дослідження – методи, математичні та комп'ютерні моделі, методики та засоби контролю терморадіаційних і теплофізичних характеристик матеріалів та виробів

Наукова новизна:

1. Запропоновано новий концептуальний підхід до комплексного неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, який ґрунтується на моделях полів інформативних параметрів та статистичних методах опрацювання експериментальних даних, що дало можливість підвищити достовірність оцінки теплотехнічних показників оболонки будівлі.

2. Вперше запропоновано метод контролю коефіцієнту емісії, в основу якого покладено принципи диференціальної калориметрії, що забезпечує компенсацію конвективно-кондуктивної складової теплообміну і дає змогу проводити експрес-контроль в лабораторних, виробничих та натурних умовах без спеціальної підготовки поверхні об'єкта контролю.

3. Вперше запропоновано метод корекції результатів вимірювання теплового потоку шляхом компенсації температурного дрейфу, що дає змогу зменшити невизначеність результатів вимірювання теплового потоку в натурних умовах.

4. Удосконалено метод контролю теплового опору оболонки будівлі шляхом застосування комп'ютерної Computational Fluid Dynamics моделі об'єкта контролю, що дало можливість знизити вплив інструментальних факторів на процес контролю та прогнозувати стан теплозахисної оболонки будівлі з урахуванням кондуктивного та конвективно-радіаційного теплообміну.

5. Розвинуто науково-практичні засади створення нових сенсорів теплового потоку та удосконалено їхнє метрологічне забезпечення для виконання вимірювань густини теплового потоку в діапазоні $1\text{--}10\text{ Вт/м}^2$ та наявності дрейфу температури, що дало змогу зменшити невизначеність результатів вимірювання густини теплового потоку.

Практична значимість результатів:

Розроблено методику контролю на основі поєднання тепловізійного аналізу огорожувальних конструкцій з контактними вимірюваннями значень

поверхневої густини теплового потоку та температури, що дозволило знизити вплив суб'єктивного фактору на результати випробувань.

Розроблено систему неруйнівного контролю теплового опору зовнішньої оболонки будівлі та програмний пакет реєстрації та опрацювання експериментальних даних. За рахунок модульної побудови системи та використання різних модифікацій сенсорів теплового потоку забезпечена можливість проведення одночасного контролю у великій кількості зон та дослідження характеристик теплозахисної оболонки будівлі складної конструкції та її елементів.

Проведено апробацію методики та системи контролю в лабораторних та натурних умовах, що дало змогу визначити достовірність оцінки теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій оболонки будівлі.

На підставі комп'ютерного моделювання та верифікації процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну при проведенні контролю коефіцієнту емісії розроблено методику проведення досліджень та визначено вимоги до сенсорів й апаратно-програмної частини системи.

Розроблено прилад контролю коефіцієнту емісії та програмний пакет реєстрації і опрацювання інформації, проведено експериментальні дослідження низки енергоефективних матеріалів та покриттів, які застосовуються в будівництві.

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень, що представлені в дисертації, висвітлені на Міжнародних і Всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Львів, Україна, 2019; XIV International Scientific and Technical Conference CSIT'19. Computer Science and Information Technologies Львів, Україна, 2019; IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology "ELNANO-2019" Київ, Україна; IEEE 40th International

Conference on Electronics and Nanotechnology, Київ, Україна, 2020; 3rd International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems CMIS Запоріжжя, Україна 2020; 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ІТТАР Тернопіль, Україна 2021; 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ІТТАР Тернопіль, Україна 2022; International Conference Information Control Systems & Technologies (ICST) Одеса, Україна 2023.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто на основі узагальнення результатів досліджень, проведених як індивідуально так і колективно. В дисертації не використовувались ідеї та розробки, що належать співавторам спільно опублікованих наукових праць. Деякі матеріали спільних робіт використано в дисертації доктора технічних наук Декуши Л.В., 2016 р. (спеціалізована вчена рада Д 35.052.08 Національного університету «Львівська політехніка», 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин); доктора технічних наук Ковтун С.І., 2018 р. (спеціалізована вчена рада Д 26.224.02 Інституту технічної теплофізики НАН України, 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин); доктора технічних наук Воробйова Л.Й., 2018 р. (спеціалізована вчена рада Д 26.224.02 Інституту технічної теплофізики НАН України, 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин); кандидата технічних наук Бурової З.А., 2014 р. (спеціалізована вчена рада К 26.224.02 Інституту технічної теплофізики НАН України, 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин).

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: обґрунтування комплексного підходу до визначення метрологічних характеристик біметалевих та напівпровідникових сенсорів теплового потоку, які використовуються для контролю теплового опору огорожувальних конструкцій, проведення експериментальних досліджень [1, 20, 23]; обґрунтування використання методів опрацювання результатів вимірювання теплового потоку та температури з застосуванням вейвлет-перетворення,

проведення експериментальних досліджень [2, 5]; розроблення апаратно-програмних модулів системи контролю теплового опору оболонки будівель, проведення експериментальних досліджень [6, 21]; обґрунтування та розробка апаратно-програмних модулів систем контролю теплофізичних характеристик матеріалів та виробів [4, 9, 10, 16]; аналіз стану проблеми контролю коефіцієнту емісії та вибір напрямку досліджень [11]; постановка задач і обґрунтування методів тепловізійного контролю з використанням БПЛА [12, 13]; обґрунтування диференціального методу вимірювання коефіцієнту емісії матеріалів та виробів [3, 15, 22]; обґрунтування використання комп'ютерних CFD моделей при контролі теплового опору оболонки будівлі [17, 18]; обґрунтування технічних рішень для корекції вимірювання теплового потоку [14]; розроблення науково-практичних засад створення нових сенсорів теплового потоку для виконання вимірювань густини теплового потоку в нестационарних умовах [7, 24]; обґрунтування калориметричної методики визначення коефіцієнта емісії сенсорів теплового потоку, матеріалів та виробів, проведення експериментальних досліджень [25, 26, 28, 29, 30, 31]; розроблення комбінованої методики контролю теплового опору оболонки будівлі, яка поєднує тепловізійний якісний аналіз температурних полів оболонки будівлі, з кількісними контактними вимірюваннями значень поверхневої густини теплового потоку та температури [8, 19, 27].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відділу моніторингу та діагностики об'єктів енергетики Інституту загальної енергетики НАН України в рамках науково-дослідних робіт: № ТД.15/1.7.1.885 «Створення та впровадження приладів для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів з використанням високочутливих сенсорів інфрачервоного випромінювання» за Цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Напівпровідникові матеріали, технології і датчики для технічних систем діагностики, контролю та управління» на 2018-2020 рр. (№ДР 0221U102774); № 1.7.1.884 «Розроблення

та впровадження системи моніторингу теплового опору огорожувальних конструкцій будівель» за Науково-технічними проектами наукових установ НАН України 2018 р. (№ДР 0218U007846); № 1.7.1.902 «Інформаційно-вимірювальна система теплофізичних характеристик матеріалів та виробів» за Науково-технічними проектами наукових установ НАН України 2021 р. (№ДР 0221U106755); № 2022.01/0048 «Інформаційна технологія енергоаудиту будівель як складова енергетичної безпеки країни» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» (№ДР 0223U005204).

Основний зміст роботи. Дисертаційна робота присвячена розвитку теоретичних засад, розробленню та практичному застосуванню засобів та методів комплексного контролю терморадіаційних й теплофізичних характеристик матеріалів і виробів.

У вступі розкрито актуальність напряму досліджень та обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, вказано зв'язок з науковими програмами, темами, планами, грантами, методи досліджень, стан публікацій та апробацію результатів дисертаційного дослідження, наведено відомості про їхнє впровадження та зазначено структуру роботи.

У першому розділі проведено аналіз наукових публікацій та сучасного стану нормативно-технічних документів щодо теплотехнічного обстеження будівель. Встановлено, що нормування енергоефективності будівель ґрунтується на концепції будівлі як єдиної системи, і складається з взаємопов'язаних елементів: теплоізоляційної оболонки та інженерних систем. Хоча існуючий нормативний базис приділяє значну увагу тепловій надійності огорожувальних конструкцій, системний підхід передбачає комплексну оцінку енергоспоживання будівлі.

Проаналізовано апаратне забезпечення, що застосовується для контролю теплотехнічного стану оболонки будівлі в натурних та лабораторних умовах, визначено вимоги до систем контролю, за допомогою яких проводяться дослідження теплового опору елементів теплозахисної оболонки будівлі. Зокрема відзначено, що при дослідженнях складних об'єктів виникає необхідність у створенні системи контролю, побудованої за модульним принципом.

Проведено аналіз методичного забезпечення досліджень теплового опору, обґрунтовано доцільність вдосконалення методики неруйнівного контролю, яка б поєднувала якісний тепловізійний аналіз оболонки будівлі (ISO 6781) і вимірювання значень поверхневої густини теплового потоку і температури (ISO 9869), що б дозволило підвищити вірогідність виявлення дефектів конструкції та знизити вплив суб'єктивного фактору на результати проведення випробувань.

Проведено аналіз методів визначення коефіцієнту емісії, який є актуальним для всіх випадків дослідження, розрахунку та моделювання радіаційного теплообміну, зокрема при визначенні властивостей енергоефективного скла та вікон, при проведенні пірометричних та тепловізійних вимірювань. Особливу увагу приділено методам та приладам, які можна використати при проведенні неруйнівного контролю. Найбільш поширеними є методи, які базуються на визначенні коефіцієнту емісії шляхом порівняння з випромінюванням робочих еталонів, та методи визначення коефіцієнту відбиття.

Вищевикладене дало змогу сформулювати науково-технічну проблему (рисунок 1), яка полягає у забезпеченні комплексного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів при проведенні обстеження теплоізоляційної оболонки, як складової частини енергоаудиту, що забезпечить підвищення достовірності оцінки теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій.



Рисунок 1. Формулювання науково-технічної проблеми

У другому розділі сформовано концептуальний підхід до комплексного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, який ґрунтується на моделях полів інформативних параметрів та статистичних методах опрацювання даних (рисунок 2).



Рисунок 2. Концептуальний підхід до комплексного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів.

Причино-наслідкова діаграма взаємозв'язків між факторами та наслідками при контролі теплового опору оболонки будівлі представлена на рисунку 3. Основними складовими діаграми визначені такі фактори впливу: вимірювальна система, методи вимірювань та контролю, зовнішнє середовище, матеріали, суб'єктивний фактор.



Рисунок 3. Причино-наслідкова діаграма контролю теплового опору

Розглянуто математичну модель кліматичної компоненти метеорологічного поля при контролі теплового опору, з метою оцінювання впливу динаміку зміни температури та інших метеорологічних параметрів, що впливають на теплообмін в будівлях, визначення задач математичного, комп'ютерного моделювання, та експериментальних досліджень.

На рисунку 4 наведена схематична ілюстрація взаємозв'язку теплозахисної оболонки будівлі, зовнішнього і внутрішнього полів та сенсора теплового потоку при проведенні комп'ютерного моделюючого експерименту. Теплофізичні властивості оболонки будівлі пов'язанні з зовнішнім кліматичним та внутрішнім тепловим полями, процесом теплопередавання.

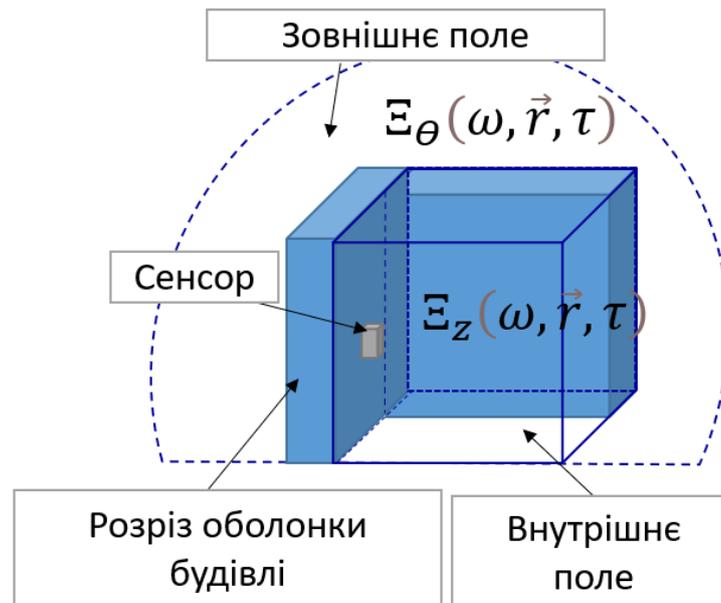


Рисунок 4. Схематична ілюстрація взаємозв'язку досліджуваного об'єкта, зовнішнього і внутрішнього полів інформативних параметрів та сенсора теплового потоку при проведенні комп'ютерного моделюючого експерименту

Зовнішнє метеорологічне поле має складну фізичну структуру, яка динамічно змінюється у просторі і часі. Характер змін такого поля є стохастичним і залежить від значної кількості параметрів. Тому математична і фізична моделі метеорологічного поля є стохастичними і параметричними.

Модель зовнішнього метеорологічного поля є векторним випадковим полем виду:

$$\Xi_\theta(\omega, \vec{r}, \tau) = [\xi_T(\omega, \vec{r}, \tau), \xi_p(\omega, \vec{r}, \tau), \xi_v(\omega, \vec{r}, \tau), \xi_{RH}(\omega, \vec{r}, \tau)] \quad (1)$$

$$\omega \in \Omega, \quad \vec{r} = (x, y, z) \in G \subset R^3, \tau \in T.$$

В моделі (1) прийняті такі позначення основних компонент:

- компонента температурного поля (поля параметра T) $\xi_T(\omega, \vec{r}, \tau)$;
- компонента поля тиску (поля параметра p) $\xi_p(\omega, \vec{r}, \tau)$;
- компонента поля швидкості вітру (поля параметра V) $\xi_v(\omega, \vec{r}, \tau)$;
- компонента поля вологості (поля параметра RH) $\xi_{RH}(\omega, \vec{r}, \tau)$;
- обмежена просторова область декартової системи координат $\vec{r} = (x, y, z) \in G \subset R^3$;
- обмежений часовий інтервал спостережень $\tau \in T$;

- простір Ω випадкових елементарних подій ω .

Сукупність основних параметрів компонент векторного випадкового поля (1) є відповідним кортежем

$$\theta = \langle T, P, V, RH \rangle, \quad (2)$$

де кожний елемент має характерний конкретний фізичний зміст, тобто являється фізичною величиною.

Зовнішнє метеорологічне поле діє на оболонку будівлі і формує в закритих приміщеннях внутрішнє поле. При цьому таке поле є відгуком відповідного функціонального оператора перетворень $L_z[]$, який описує характерні перетворення вхідної дії зовнішнього метеорологічного поля в залежності від видів і властивостей матеріалів, виробів, конструкцій оболонки будівель.

Використано загальний підхід і наведено математичну модель внутрішнього атмосферного поля у виді

$$\Xi_z(\omega, \vec{r}, \tau) = L_z[\Xi_\theta(\omega, \vec{r}, \tau)] \quad (3)$$

Результати проведених досліджень підтвердили статистичну гіпотезу про характер моделі (1) на річному часовому інтервалі спостереження. Модель (1) допускає розкладання на такі три адитивні компоненти

$$\Xi_\theta(\omega, \vec{r}, \tau) = A_\theta(\vec{r}, \tau) + B_\theta(\vec{r}, \tau) + \zeta_\theta(\omega, \vec{r}, \tau) \quad (4)$$

де $A_\theta(\vec{r}, \tau)$ - детермінована складова кліматичної компоненти метеорологічного поля, отримана статистичним усередненням по ансамблю реалізацій, яка характеризується сезонними змінами клімату (зима, весна, літо, осінь); $B_\theta(\vec{r}, \tau)$ - детермінована гармонічна складова кліматичної компоненти, яка також отримана по ансамблю реалізацій і зумовлена добовим циклом (день, ніч); $\zeta_\theta(\omega, \vec{r}, \tau)$ - стохастична складова кліматичної компоненти метеорологічного поля, що характеризує відповідні її флуктуації.

Такий розклад моделі дає можливість використати широке коло методів математичного, комп'ютерного моделювання, експериментальних досліджень з метою конкретизації фізичної структури метеорологічного поля. В свою

чергу формування фізичного механізму перетворень визначають властивості матеріалів і огорожувальних конструкцій оболонки будівлі. При цьому визначається кортеж параметрів об'єкту при комп'ютерному моделюванні виду:

$$Z = \langle \lambda; RH; \varepsilon \rangle \quad (5)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалів і елементів конструкцій оболонки будівлі, RH – відносна вологість, ε – коефіцієнт емісії.

Для отримання результатів комп'ютерного експерименту з метою верифікації математичної моделі внутрішнього теплового поля за даними вимірювань використано такі припущення.

На основі гіпотези зафіксованого стану атмосфери при проведенні комп'ютерного експерименту вказані параметри кліматичної компоненти конкретизуються обґрунтованими числовими величинами. Оболонку будівлі розкладено на характерні зони вимірювань для проведення більш детального аналізу з використанням комп'ютерних моделей. Одною з таких характерних зон є утеплена ділянка теплозахисної оболонки будівлі. Моделювання проведено за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX. Модель включає рідинну (fluid) та тверду розрахункові області. Шар повітря розглядався як рідинна область.

З метою оцінювання впливу сенсорів на розподіл теплового поля на внутрішній поверхні характерної зони теплозахисної оболонки будівлі під час випробувань з контролю теплового опору, до моделі було додано як окремі елементи сенсори теплового потоку. Також для узгодження розрахункової сітки сформовано окремі зони в твердій області, що співпадають за розмірами з сенсорами теплового потоку.

Для проведення валідації даної моделі використані геометричні параметри та експериментальні дослідження наведенні в розділі 6 для п'яти поверхового будинку з утепленням виконаним пінополіуретаном (ППУ). При цьому, з метою визначення теплозахисних властивостей оболонки будівлі, проведено вимірювання теплопровідності зразку ППУ, відібраному в

досліджуваному елементі теплозахисної оболонки стандарту, за допомогою інформаційно-виміральної системи теплопровідності, яка відповідає вимогам ISO 8301. У використаній моделі тверді розрахункові області є шарами ППУ, бетонних блоків та сенсорами теплового потоку, характеристики яких наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 Матеріали, використані в моделі зовнішньої оболонки будівлі

Матеріал	Товщина шару, м	Теплопровідність, Вт/(м К)	Густина, кг/ м ³	Питома теплоємність, Дж/кг·К
ППУ	0,030	0,0346	30	1340
Бетонні блоки	0,400	0,5200	1200	837
Сенсори теплового потоку	0,002	1,01	2000	850

За допомогою моделі досліджено складний теплообмін, а також вплив гравітації, що дає можливість детально проаналізувати фактори впливу на результати контролю теплофізичних характеристик зовнішньої оболонки будівлі (рисунок 5).

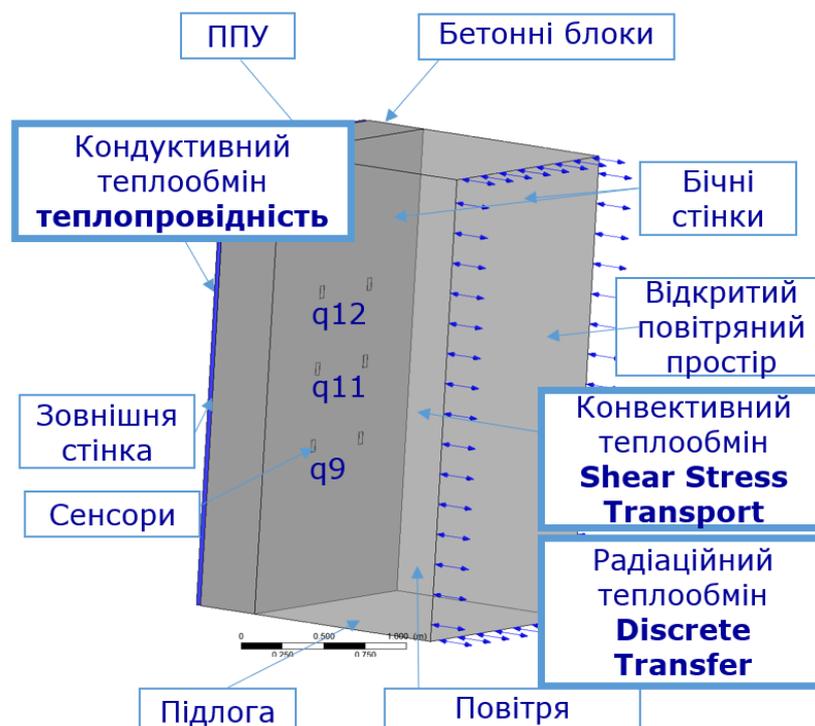


Рисунок 5. Комп'ютерна CFD модель характерної зони оболонки будівлі

Кондуктивний теплообмін між твердими розрахунковими областями описано за допомогою рівняння теплопровідності.

Радіаційний теплообмін описано за допомогою моделі дискретного переносу (Discrete Transfer), реалізованої в ANSYS CFX. При цьому, для кожної області задано коефіцієнти емісії. Поглинання теплового випромінювання враховувалось введенням коефіцієнту поглинання повітря, значення якого прийнято 0,01.

Для опису конвективного теплообміну в рідинній розрахунковій області використано вбудовану в ANSYS CFX модель турбулентності Shear Stress Transport.

Граничні умови задано таким чином:

- бічні стінки розглянуто в режимі адіабатизації $\lambda \frac{dT}{dx} = 0$;
- нижня і верхня границя розглянуто як стінки з температурою 17,5 °С та 18,5 °С та коефіцієнтами конвективного теплообміну 1,66 Вт /м²К та 2,1 Вт/м²К відповідно;
- дальня стінка задана як відкритий повітряний простір з розподілом температури від 17,5 °С до 18,5 °С по висоті.
- площа контакту з зовнішнім полем задана як температура з розподілом по висоті від 2,70 °С до 2,88 °С.

На рисунку 6 наведено поля швидкості у перерізах конструкції оболонки будівлі, отримані за результатами моделювання. Для вертикального положення показано поля у площині «XZ», які проходять через сенсори теплового потоку q₉- q₁₂.

У наведених на рисунку 6 полях швидкості повітря в перерізах конструкції теплозахисної оболонки будівлі в пристінковому шарі присутнє збільшення швидкості руху в зоні верхнього (q₁₂) та середнього сенсору (q₁₁), але при цьому швидкість повітря не перевищує 0,2 м/с.

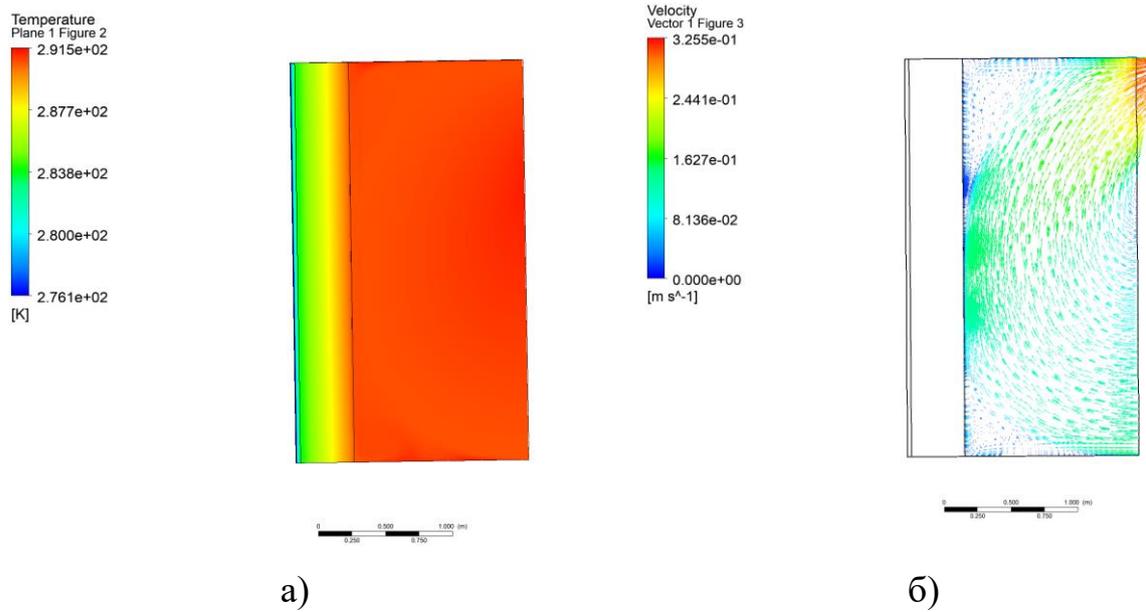


Рисунок 6. Поле температури у площині «XZ» (а) та векторне поле швидкості повітря у площині «XZ» (б), які проходять через сенсори теплового потоку q_9 - q_{12} .

Для валідації моделі були проведені розрахунки теплового опору з використанням формул (6) та (7):

$$R_C = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i}, \quad (6)$$

де l_i – товщина i -го шару теплозахисної оболонки будівлі, м; λ_i – теплопровідність i -го шару теплозахисної оболонки будівлі, Вт/(м К).

$$R = \frac{T_{si} - T_{se}}{q}, \quad (7)$$

де T_{si} -температура внутрішньої поверхні теплозахисної оболонки будівлі, $^{\circ}\text{C}$; T_{se} -температура зовнішньої поверхні теплозахисної оболонки будівлі, $^{\circ}\text{C}$; q – густина теплового потоку крізь теплозахисну оболонку будівлі, Вт/м 2 .

Порівняння отриманих результатів проведено шляхом розрахунку відносного відхилення теплового опору за виразом:

$$DEV = \left| \frac{R - R_C}{R_C} \right| \cdot 100 \%, \quad (8)$$

де R_C – теоретична величина теплового опору, розрахована згідно (6).

Розраховане за формулою (6) значення теплового опору становило $R_C=1,64$ (м 2 К) /Вт, що лише на 0,6% відрізняється від $R_{CFD} = 1,65$ (м 2 К) /Вт , отриманого за формулою (7) в CFD моделі.

На прикладі сенсора q_9 наведено використання моделі для аналізу параметрів сенсорів теплового потоку.

Вплив зміни коефіцієнта емісії сенсора на результат вимірювання теплового потоку було показано шляхом зміни коефіцієнта емісії сенсора q_9 на 0,71, при цьому всі інші параметри CFD-моделі залишилися незмінними. Розрахунок теплових потоків показав, що при коефіцієнті емісії сенсора 0,88 густина теплового потоку становила $8,77 \text{ Вт/м}^2$, а при коефіцієнті емісії 0,71 - $7,6 \text{ Вт/м}^2$. Це призвело до різниці в результатах моделювання для цих випадків на $1,17 \text{ Вт/м}^2$

Виконано оцінювання впливу значення коефіцієнті емісії сенсору на результат визначення теплового опору огорожувальної конструкції шляхом проведення розрахунків за формулами (6-8). Результати порівняння даних експериментальних та модельних досліджень наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння результатів моделювання при різних значеннях коефіцієнта емісії.

Показник	R_C	R_{CFD}	$R_{9CFD}, \epsilon=0,88$	$R_{9CFD}, \epsilon=0,71$
Значення, ($\text{м}^2\text{К}$)/Вт	1,64	1,65	1,67	1,95
Відхилення, %		0,6	1,79	17,51

За даними таблиці встановлено, що відхилення для цього випадку складає $\sim 17.5\%$.

При натурних і лабораторних вимірюваннях поверхневої густини теплового потоку огорожувальних конструкцій спостерігались зміни температури поверхні огорожувальних конструкцій, які носять коливальний характер. Причому, на великих проміжках часу зміна температури мала близький до лінійного характер, а температура поверхні змінювалась з постійною швидкістю. При цьому потоки, які необхідно вимірювати, найчастіше можна порівняти з потоком теплоти, який підводиться до сенсора теплового потоку при підвищенні температури поверхні теплообміну або

відводиться від сенсора теплового потоку при зниженні температури поверхні теплообміну.

Для вдосконалення методу вимірювання теплового потоку запропоновано використати коригування результату його вимірювання, яке реалізується за рахунок введення в структуру системи контролю теплового опору коригуючого блоку, що складається з двох ідентичних за геометричними параметрами, розташованих один над одним і включених диференційно сенсорів теплового потоку, причому сенсор, який має більшу чутливість, забезпечений шунтувальним змінним електричним опором. Останній дає можливість вирівняти чутливість включених диференційно сенсорів теплового потоку. Відповідно для визначення поверхневої густини теплового потоку до значення вимірної сенсором величини додається сигнал пропорційний теплоті, яка йде на нагрів самого сенсора теплового потоку в процесі вимірювань, що визначається корегувальним блоком:

$$q = q_{\text{сенсора}} + q_{\text{КОР}} \quad (9)$$

$$q_{\text{КОР}} = E_{\text{КОР}} \cdot K_{\text{КОР}} \cdot A \quad (10)$$

де $K_{\text{КОР}}$ – коефіцієнт перетворення коригуючого блоку; A – поправка, що враховує різницю теплофізичних властивостей сенсорів теплового потоку, який визначається при проведенні калібрування.

Для аналізу впливу нестационарності процесу розглянуто задачу вимірювання густини теплового потоку на об'єкті, температура поверхні якого змінюється за лінійним законом (Рисунок 7). Крайові умови: $T(x = 0, \tau) = T_0$; $T(x = h, \tau) = T_0 + bT \cdot \tau$; $-\lambda \frac{\partial T(x=h, \tau)}{\partial x} = q_0$ – постійна теплова дія, bT – швидкість зміни температури.

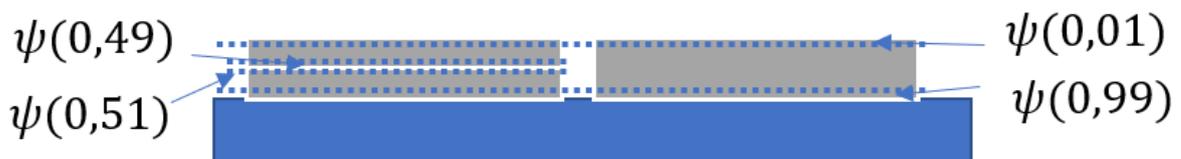


Рисунок 7. Теплова схема задачі вимірювання густини теплового потоку на об'єкті зі змінною температурою

Рішення задачі знаходиться як:

$$T(\eta, \tau) = T_0 + q_0 \cdot (h/\lambda) \cdot \psi_1(\eta, \tau) + \psi_2(\eta; \tau) \cdot bT \cdot \frac{h^2}{a} \quad (11)$$

Для надлишкової температури в безрозмірних координатах у часовій області рівняння (11) може бути представлено таким чином:

$$\psi(\eta; Fo) = \psi_1(\eta; Fo) + \psi_2(\eta; Fo) \cdot \phi \quad (12)$$

де $\psi_1(\eta; Fo) = \eta - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(\mu_k \eta) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo)$,

$$\psi_2(\eta; Fo) = Fo - \eta - 0,5\eta^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_k}{\mu_k^2} \cdot \cos(\mu_k(1 - \eta)) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo), \quad (13)$$

$$A_k = (-1)^{k+1} \cdot \frac{2}{\mu_k^2}, B_k = (-1)^{k+1} \cdot 2/\mu_k, \mu_k = (2k - 1)\pi/2,$$

$$\phi = bT \cdot \frac{c\rho \cdot h}{q_0}, \quad (14) - \text{комплекс враховуючий нестационарність процесу,}$$

пов'язаний з швидкістю зміни температури, густиною теплового потоку і геометричними розмірами та теплофізичними властивостями сенсора;

$Fo = \frac{\alpha\tau}{h^2}$ – безрозмірна координата у часовій області, число Фур'є;

$c\rho$ – питома теплоємність сенсору;

$\eta = \frac{x}{h}$ – безрозмірна координата у просторовій області.

Для сенсору теплового потоку відповідно рівнянню (11) можна записати:

$$\frac{q_{\text{сенсора}}(1; Fo)}{q_0} = \psi(0,01; Fo) - \psi(0,99; Fo). \quad (15)$$

При цьому для коригувального блоку маємо:

$$\frac{q_{\text{блок}}(1; Fo)}{q_0} = (\psi(0,01; Fo) - \psi(0,49; Fo)) - (\psi(0,51; Fo) - \psi(0,99; Fo)) \quad (16)$$

Результати розрахунку за формулою (14), представлені на рисунку 8, свідчать, що при вимірюванні теплового потоку за допомогою сенсорів, значення динамічної компоненти невизначеності залежить не тільки від безрозмірної координати у часовій області, але і від комплексу ϕ . Найбільші значення комплексу ϕ спостерігаються при значеннях густини теплового потоку в зоні від 1 Вт/м² до 10 Вт/м², що відповідає випадкам дослідження елементів оболонки будівлі та матеріалів з високим значенням теплового опору при перепадах температури в околі 15°C. При значеннях комплексу $\phi > 0,1$

відносний тепловий потік від сенсору, розрахований за формулою (15), не досягає рівня 0,9 (рисунок 9 а), що призводить до заниження значень теплового потоку і вимагає додаткової корекції. З іншого боку, у випадку теплових потоків густиною від 10 Вт/м^2 при варіації швидкості зміни температури значення комплексу $\phi < 0,1$, що дає змогу використовувати сенсори без застосування корекції.

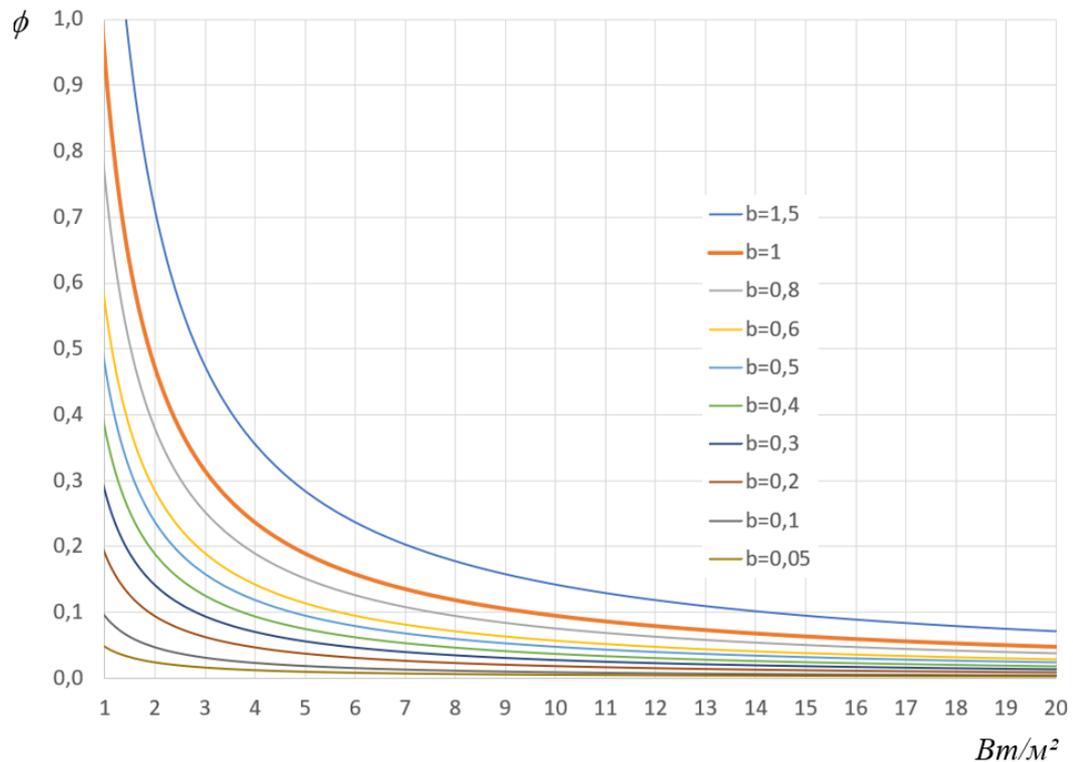
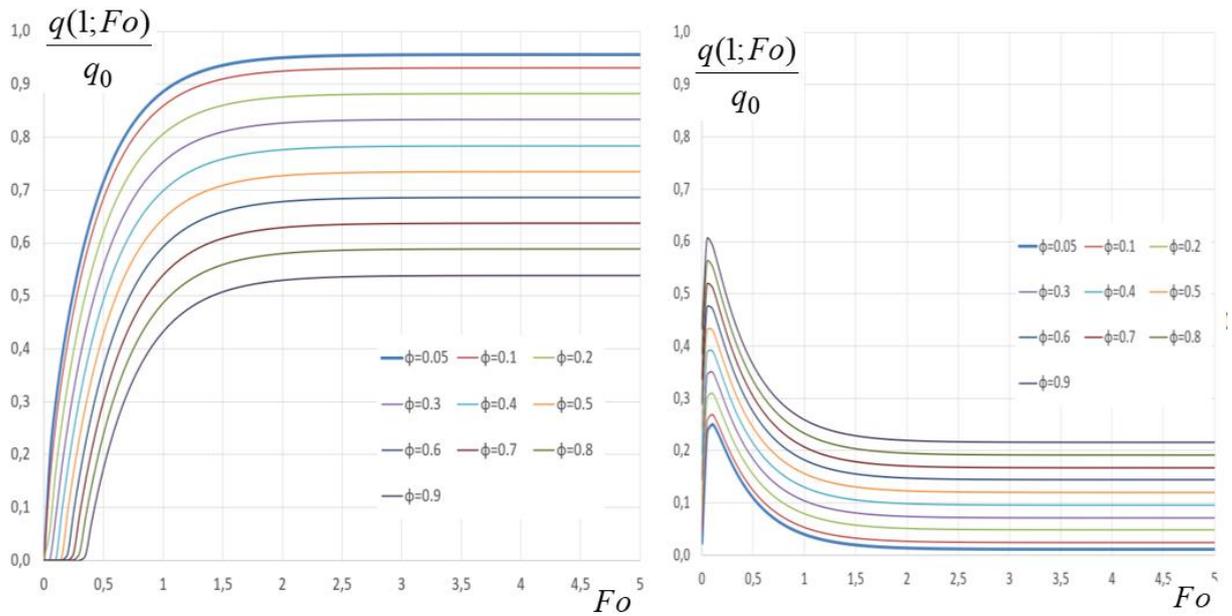


Рисунок 8. Залежність комплексу ϕ від густини теплового потоку, при варіації швидкості зміни температури bT

Сигнали коригуючого блоку, розраховані за формулою (16), наведені на рисунку 9 б, дають можливість ввести відповідні коригування, бо вони залежать від комплексу ϕ і мають значно менший час відгуку.

Результатом введення коригуючого блоку до структури системи контролю теплового опору є зниження невизначеності вимірювання поверхневої густини теплового потоку та забезпечення можливості проведення вимірювань за нестационарних умов.



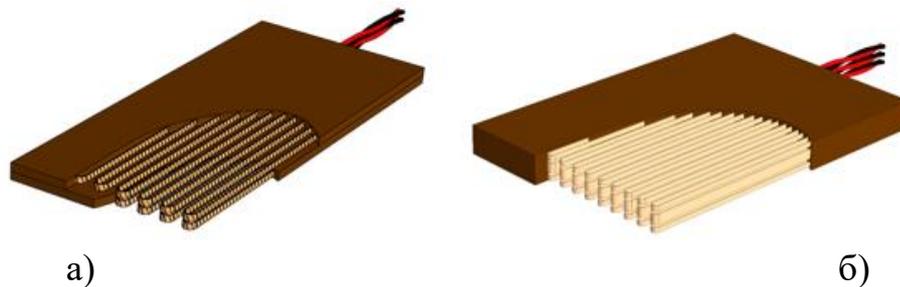
а)

б)

Рисунок 9. Залежність відносного теплового потоку від безрозмірного часу при варіації комплексу ϕ для сенсору теплового потоку (а) та для коригувальної термобатареї (б)

Для застосування запропонованої системи корекції необхідно задіяти два вимірювальних канали системи контролю та проводити додаткове опрацювання сигналів сенсорів.

Іншим можливим шляхом є створення спеціалізованих сенсорів, які вже будуть включати в себе коригуючу термобатарею, конструкції яких наведені на рисунку 10.



а)

б)

Рисунок 10. Варіанти конструкції сенсорів теплового потоку при використанні однієї (а) та двох (б) коригуючих термобатарей

Для цього розглянуто рішення задачі (11) з лінійною зміною температури, при зміні кількості термобатарей в сенсорі. Для випадку використання однієї коригуючої термобатарей (кількість перерізів $n=3$)

$$\frac{q_{\text{сенсора}}(1;Fo)}{q_0} = \frac{3}{2}(\psi(0,99; Fo) - \psi(0,61; Fo)) - (\psi(0,59; Fo) - \psi(0,01; Fo)) \quad (17)$$

У випадку асиметричного сенсору з двома коригуючими термобатарейми (кількість перерізів $n=4$) маємо

$$\frac{q_{\text{сенсора}}(1;Fo)}{q_0} = \frac{1}{12} \left(87(\psi(0,99; Fo) - \psi(0,81; Fo)) - 13(\psi(0,79; Fo) - \psi(0,21; Fo)) + 12(\psi(0,19; Fo) - \psi(0,01; Fo)) \right) \quad (18)$$

Результати розрахунку за формулами (15, 17,18) наведені на графіках, представлених на рисунку 11. З аналізу наведеного на рисунку графіку видно, що для випадку використання однієї коригуючої термобатарейми ($n=3$) сенсор досягає рівня сигналу 0,9 при значеннях числа Фур'є 0,2, але внаслідок залежності від комплексу ϕ присутнє не співпадіння кривих відносного теплового потоку. Для досягнення співпадіння кривих відносного теплового потоку значення числа Фур'є має бути більше 0,8.

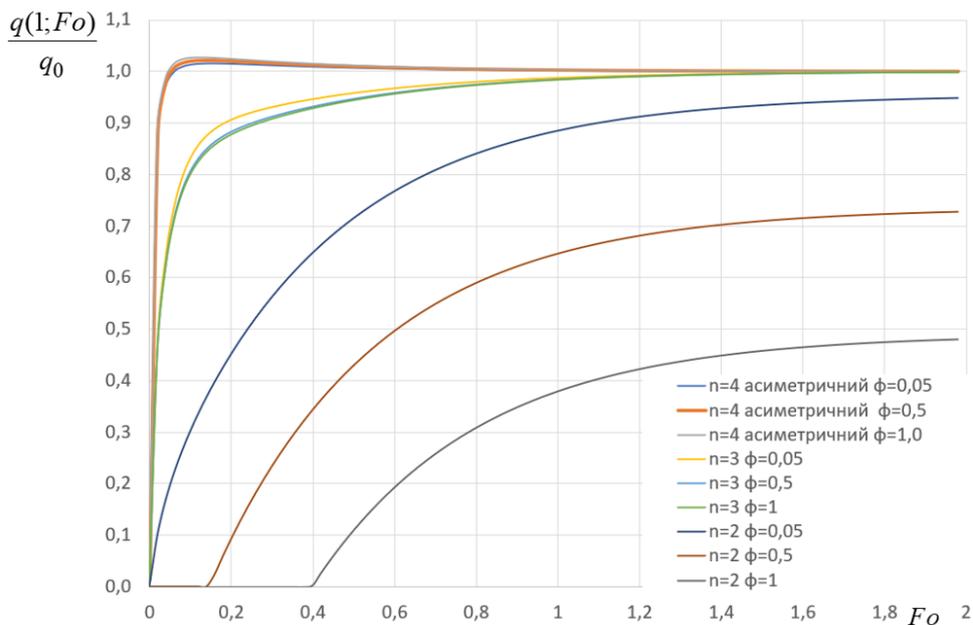


Рисунок 11. Залежність відносного теплового потоку від безрозмірного часу при варіації комплексу ϕ для трьох конструкцій сенсорів

Для асиметричного сенсору теплового потоку з двома коригуючими термобатарейми рівень сигналу сягає значення 0,9 при значеннях числа Фур'є 0,02, але співпадіння кривих відносного теплового потоку відбувається на рівні числа Фур'є 0.4.

В третьому розділі розглянуто диференційний калориметричний метод експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів.

Цей метод може бути застосований для вимірювання інтегрального напівсферичного коефіцієнту емісії (коефіцієнту теплового випромінення, коефіцієнту емісії, випромінювальної здатності) поверхні матеріалів та покриттів і може знайти застосування у виробництві будівельних матеріалів і конструкцій, аерокосмічній та інших галузях промисловості.

Суть методу полягає у порівнянні теплових потоків, що визначаються у двох вимірювальних комірках сенсорами теплового потоку, поверхні яких мають різні коефіцієнти емісії, та за постійної температури T_K обох комірок, що забезпечується за допомогою нагрівного елемента. Схема методу наведена на рисунку 12.

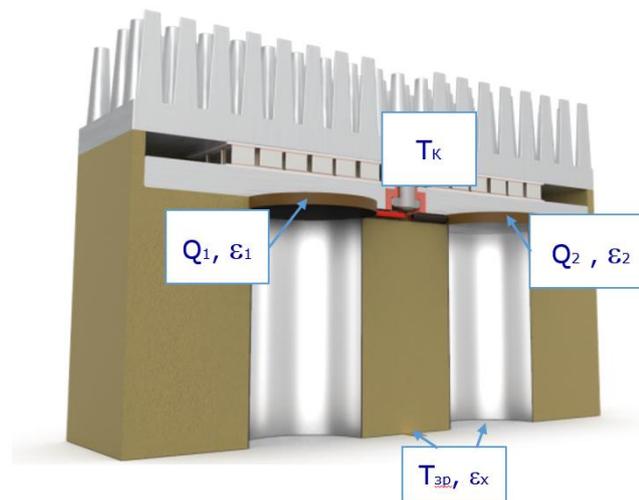


Рисунок 12. Схема методу для вимірювання коефіцієнту емісії матеріалів

Метод реалізовано шляхом розташування в комірках сенсорів теплового потоку, що мають покриття з коефіцієнтом емісії 0,95 («dark») та 0,1 («light»). Виконання цих умов забезпечує компенсацію конвективно-кондуктивної складової теплообміну і дає змогу проводити контроль без вакуумування

комірок, зберегти точність при спрощені структури та забезпечити компактність приладу.

Метод передбачає проведення вимірювань за усталених значень температур нагрівного елемента T_K і поверхні зразка T_{3P} та теплових потоків у каналах Q_1 та Q_2 . Ці теплові потоки розкладаються на дві компоненти - радіаційну та конвективно-кондуктивну. Оскільки сенсори теплового потоку комірок мають різні коефіцієнти емісії ε_1 та ε_2 , то теплові потоки у комірках визначаються співвідношеннями (19) та (20):

$$Q_1 = \varphi \cdot \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_x \cdot (T_K^4 - T_{3P}^4) + K \cdot (T_K - T_{3P}), \quad (19)$$

$$Q_2 = \varphi \cdot \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_x \cdot (T_K^4 - T_{3P}^4) + K \cdot (T_K - T_{3P}), \quad (20)$$

де Q_1, Q_2 - значення теплових потоків, що виміряні сенсорами теплового потоку; K - коефіцієнт конвективно-кондуктивного теплообміну; ε_x - коефіцієнт емісії досліджуваного зразка; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - коефіцієнти емісії поверхонь сенсорів теплового потоку; σ - стала Стефана - Больцмана; φ - ефективний кутовий коефіцієнт радіаційного теплообміну в комірках, який враховує як пряме опромінення торцевих елементів каналів, так і відбиття від бокових дзеркальних стінок.

З наведеної системи рівнянь (19) та (20) визначається співвідношення для коефіцієнту емісії зразка:

$$\varepsilon_x = \frac{Q_1 - Q_2}{\varphi \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (T_K^4 - T_{3P}^4)} = \frac{\gamma \cdot (Q_1 - Q_2)}{T_K^4 - T_{3P}^4}, \quad (21)$$

$$\text{або } \varepsilon_x = \gamma \cdot K_T \cdot \frac{(Q_1 - Q_2)}{\Delta T}, \quad (22)$$

де $\gamma = [\varphi \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)]^{-1}$ - сталий коефіцієнт, який залежить лише від сталої Стефана-Больцмана та параметрів комірок і може бути визначений при калібруванні; $\Delta T = T_K - T_{3P}$ - різниця температур між колектором та зразком;

$K_T = \frac{1}{(T_K + T_{3P}) \cdot (T_K^2 + T_{3P}^2)}$ - температурний коефіцієнт.

Для аналізу факторів впливу при реалізації диференційного калориметричного методу контролю коефіцієнту емісії було проведено комп'ютерне CFD моделювання процесів складного радіаційного та

конвективно-кондуктивного теплообміну як в кожній окремій вимірювальній комірці, так і в прототипу приладу.

Об'єкт дослідження представляє собою модель вимірювального блоку, що розміщений на дослідному зразку, та складається з прямокутного корпусу, що виготовлений з теплоізоляційного матеріалу, в який вбудовано дві замкнені циліндричні порожнини (вимірювальні комірки), які оснащені сенсорами теплового потоку. Порожнини заповнені атмосферним повітрям. Радіус циліндрів складає $r = 10$ мм, висота $H = 30$ мм. Верхні торцеві поверхні (сенсори) нагріваються, а нижні (зразок) сприймають теплоту (радіаційну, кондуктивну та конвективну). Один з вимірювальних сенсорів має коефіцієнт емісії поверхні $\varepsilon_1 = 0,95$ (позначено «dark»), а інший сенсор має коефіцієнт емісії $\varepsilon_1 = 0,1$ (позначено «light»).

Для проведення дослідження побудовано комп'ютерну модель приладу, яка складалася з двох рідинних та трьох твердих розрахункових областей. Рідинні розрахункові області мають циліндричну форму з розмірами: діаметр 20 мм висота 30 мм. Кожна рідинна розрахункова область зверху мала тверду підобласть діаметром 20 мм та висотою 2 мм, що є моделлю сенсора, з іншого боку розташована тверда прямокутна підобласть 360x300 мм, що виконує роль дослідного зразка зі скла. Товщина скла дорівнює 4 мм. Усі підобласті з'єднані інтерфейсними зв'язками для забезпечення умови сталості теплових потоків на межі кожної підобласті «рідина-тверде тіло».

Граничні умови. На зовнішній поверхні сенсора задано сталу температуру 30 °С, на зовнішніх поверхнях зразка та приладу задано граничні умови 3-го роду: температура зовнішнього середовища 20 °С, коефіцієнт теплообміну 6 Вт/(м²К). На торцевих поверхнях зразка задані адіабатичні умови.

Модель ґрунтується на повному рівнянні збереження енергії. Потік повітря вважався ламінарним, враховано в'язкість та теплопровідність повітря. Вплив гравітації враховано шляхом завдання відповідного значення в напрямку протилежному напрямку осі Z. Радіаційний теплообмін моделювався за допомогою моделі Дискретного Переносу.

Вплив температурних полів вимірювальних комірок на поле швидкості для коефіцієнту емісії зразка 0.6 наведено на рисунку 13.

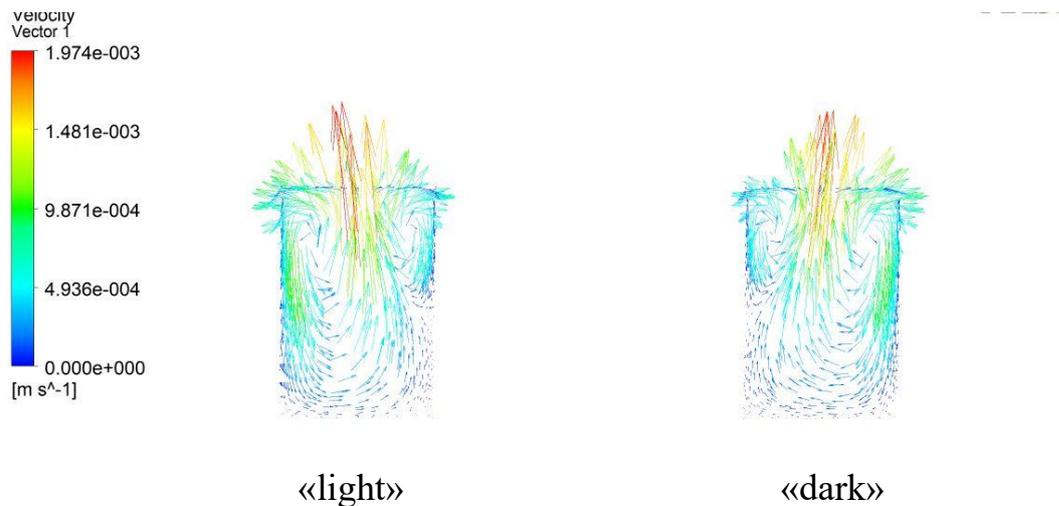


Рисунок 13. Векторне поле повної швидкості повітря у вимірювальних комірках при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0.6$.

Розподіл векторного поля швидкості, який обумовлений вільною конвекцією в середині вимірювальних комірок наведений на рисунку 13. Для обох комірок характерно утворення двох зворотних зон: однієї невеликої в кутку з внутрішньої сторони, та однієї в пристінній області з зовнішньої сторони. Як результат утворюється підйомна течія в середині комірок з напрямком результуючого потоку в сторону зовнішньої сторони комірок, при цьому спостерігається дзеркальне відображення векторних полів швидкостей в комірках.

Для виявлення закономірностей у зміні радіаційного Q_R та конвективного Q_C інтегральних теплових потоків від двох комірок, в залежності від коефіцієнта емісії дослідного зразка, проведені розрахунки для стаціонарної постановки задачі. Коефіцієнт емісії зразка варіювався в діапазоні від 0,1 до 0,9. Визначено інтегральні теплові потоки з поверхні сенсора: загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний:

$$Q_{\Sigma} = Q_C + Q_R . \quad (23)$$

Результати моделювання наведені на рисунках 14 та 15 свідчать, що зі зростанням коефіцієнту емісії зразка зростають і інтегральні теплові потоки з поверхні сенсорів. У випадку використання «dark» сенсору, радіаційна

складова значно більша за конвективну, та із зростанням коефіцієнта емісії зразка спостерігається зростання теплового потоку з поверхні сенсору майже у двічі. При цьому зростання конвективної складової теплового потоку становить всього 1,8 % при зміні коефіцієнт емісії зразка від 0,1 до 0,9.

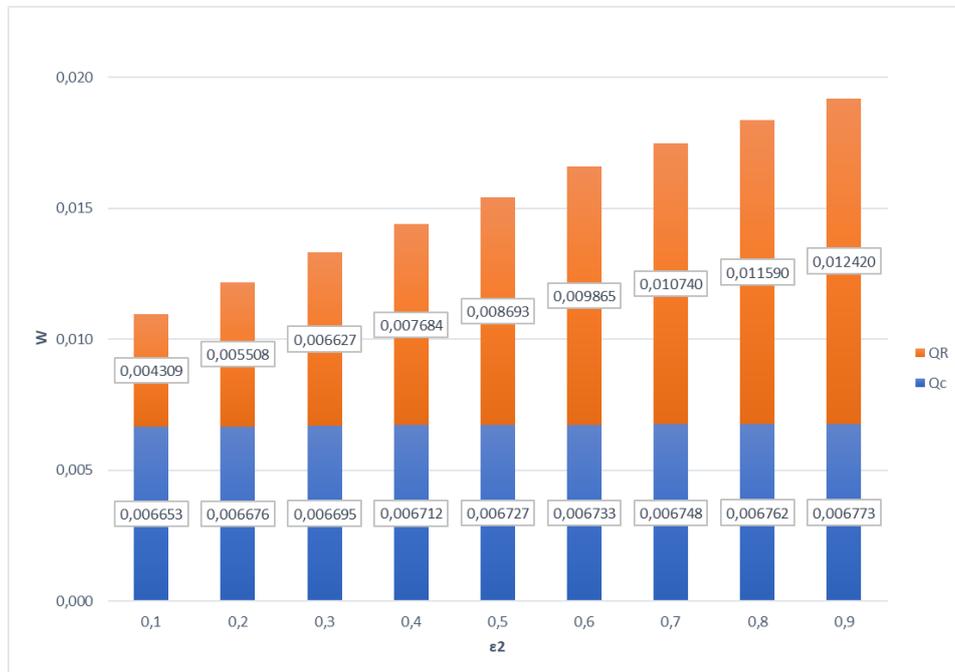


Рисунок 14. Розрахункові значення інтегральних теплових потоків для комірки «dark» ($\epsilon_{ID} = 0.95$)

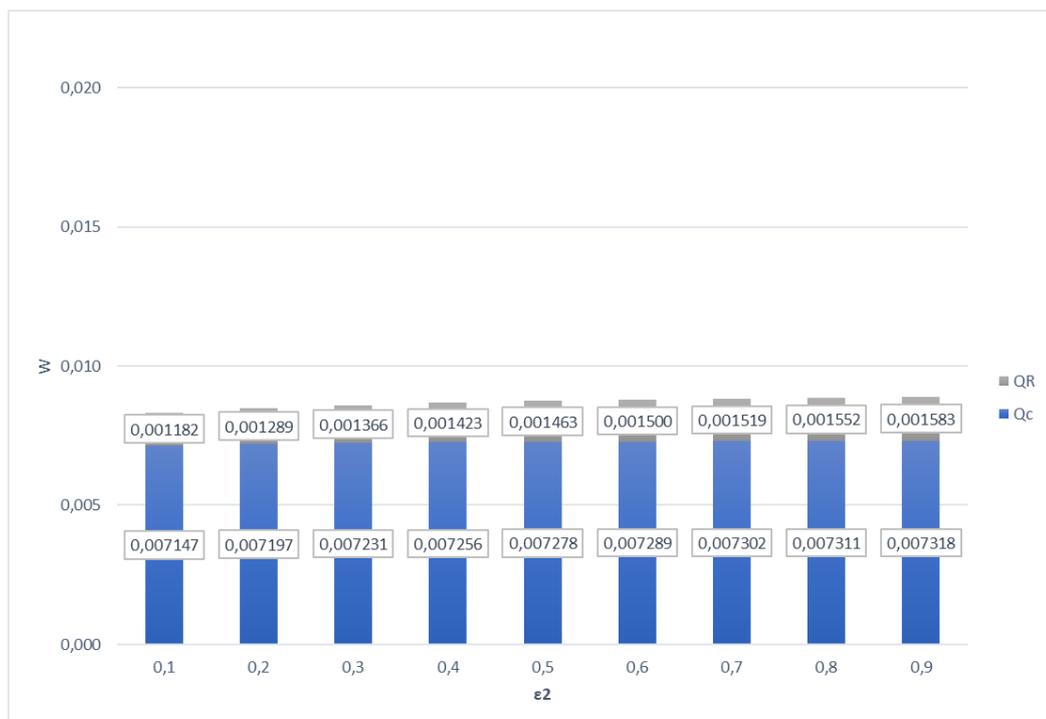


Рисунок 15. Розраховані значення інтегральних теплових потоків для комірки «light» ($\epsilon_{IL} = 0.1$)

Порівнюючи конвективні теплові потоки для вимірювальних комірок з «dark» та «light» сенсорами, слід відзначити, що конвективний тепловий потік у комірці зі «light» сенсором більший за конвективний потік у комірці з «dark» сенсором. Так для малих емісійних характеристик зразка ($\epsilon = 0,1$), ця різниця становить до 7%, а при високих значеннях коефіцієнта емісії зразка ($\epsilon = 0,9$) – 2%, тобто зі збільшенням коефіцієнта емісії значення конвективних потоків для різних сенсорів наближаються один до одного.

Для визначення режиму роботи приладу після встановлення на зразок проведені розрахунки температури поверхні зразка в нестационарній постановці моделі. При цьому розглянуто випадок, коли прилад встановлено на зразок з температурою 293,1 К (початкові умови). Фіксувалися зміни температури зразка в точках на поверхні зразка проти центру сенсорів. Результати розрахунків наведені на рисунку 16.

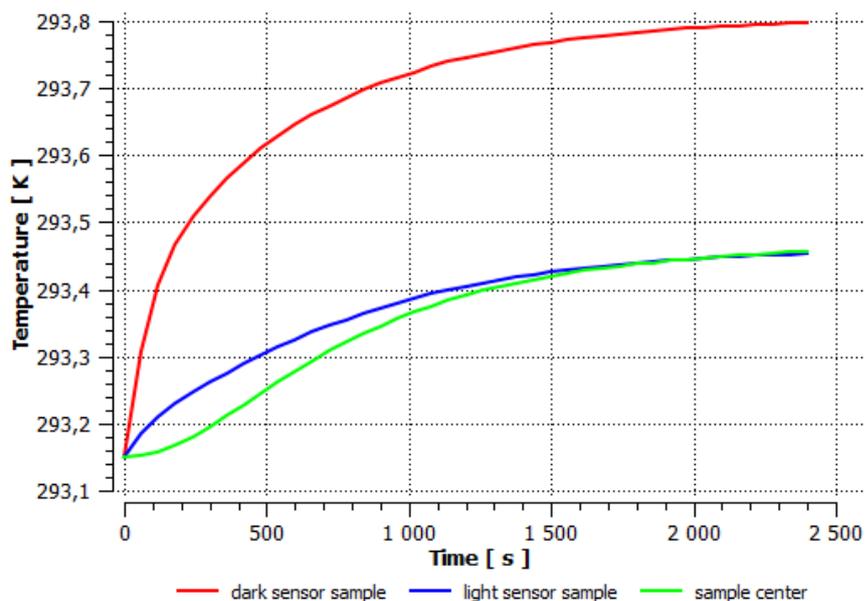


Рисунок 16. Вплив приладу на температурний режим поверхні зразка після початку нагріву: червона лінія – зона напроти центру «dark» сенсора; синя лінія – зона напроти центру «світлого» сенсора; зелена лінія – зона посередині центрів сенсорів.

Виходячи з отриманих результатів, приведених на рисунку 16 стабілізація температури зразка відбувається після 2000 секунди, що в подальшому дає

змогу розглядати режим як допустимий для проведення контролю коефіцієнта емісії.

В четвертому розділі наведено комбіновану методику контролю теплового опору оболонки будівлі (рисунок 17). Методика поєднує в собі тепловізійний якісний аналіз температурних полів оболонки будівлі, з кількісними контактними вимірюваннями значень поверхневої густини теплового потоку та температури у визначених зонах оболонки будівлі.



Рисунок 17. Схема проведення досліджень за комбінованою методикою неруйнівного контролю теплового опору

На першому етапі проводиться аналіз проектних теплофізичних характеристик та визначення геометричних параметрів приміщення, які необхідні для проведення експерименту та моделювання.

На другому етапі проводиться термографування приміщення відповідно до ISO 6781 для знаходження місць раціонального розташування сенсорів, щоб уникнути місць пошкоджень огорожувальної конструкції.

На третьому етапі проводиться монтаж сенсорів теплового потоку та температури відповідно до рекомендацій ISO 9869 з врахуванням результатів тепловізійної зйомки та випробування перших 6 – 24 годин.

Вхідними для CFD моделі є результати за перші 6 - 24 годин експерименту, або дані, отримані методом відбору зразків згідно з ISO 9869

для подальшого дослідження коефіцієнту теплопровідності. Після цього експеримент продовжується відповідно до рекомендацій стандарту ISO 9869.

На основі побудованої CFD моделі, визначається розподіл температури та теплових потоків і уточнюються параметри, що впливають на експеримент.

На наступному етапі проводиться валідація CFD моделі за результатами вимірювань відповідних значень температури і теплового потоку.

Оцінювання невизначеності вимірювань теплового опору виконувалось за наведеним нижче алгоритмом.

Стандартні складових невизначеності за типом В для блоків, які вимірюють сигнали сенсорів температури ($u_B(Ts)$) та теплових потоків ($u_B(qs)$), визначались за формулою:

$$u_B(\epsilon_i) = \frac{U(\epsilon_i)}{k} \cdot 100\%, \quad (24)$$

де $U(\epsilon_i)$ – розширена невизначеність відповідного приладу, зазначена в свідоцтві про калібрування; k – коефіцієнт охоплення.

Складова відносної стандартної невизначеності за типом В для блоків вимірювання сигналів сенсорів температури та теплових потоків визначалась як:

$$u_B(S) = \sqrt{u_B(Ts)^2 + u_B(qs)^2} \quad (25)$$

Складова невизначеності, викликана дрейфом температури, оцінювалась за формулою:

$$u_B(q_\tau) = \frac{c \cdot \rho \cdot h}{q} \cdot \frac{dT}{d\tau} \cdot 100, \% \quad (26)$$

Складова стандартної невизначеності вимірювань різниці температури, оцінювалась за формулою:

$$u_B(T_\Delta) = \frac{U(T)}{\Delta T} \cdot 100, \% \quad (27)$$

Складова стандартної невизначеності вимірювань теплового потоку, за типом В, з урахуванням різниці коефіцієнтів емісії сенсора та поверхні досліджуваного об'єкта, оцінювалась за формулою:

$$u_B(q_{\Delta+\epsilon}) = \frac{U(q)}{k} + \left(\frac{\epsilon_{sens}}{\epsilon_{surf}} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (28)$$

Стандартна складова невизначеності вимірювань теплового потоку, яка враховує теплообмін з навколишнім середовищем, розмір чутливого елемента, та контактний тепловий опір:

$$u_B(\alpha, R_K, S_{sens}) = \left(\frac{\frac{1}{\alpha}}{\frac{1}{\alpha} + R_{sens} + R_K} - 1 \right) \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda} \cdot \frac{\frac{1}{\alpha}}{\frac{1}{\alpha} + R_{sens} + R_K} \cdot \gamma \left(S_{sens}, \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda} \right) \right) \cdot 100, \% \quad (29)$$

$$\text{де } \gamma \left(S_{sens}, \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda} \right) = \frac{\int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot S_{sens})}{x \left(x + \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda} \right)} dx}{\int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot S_{sens})}{x + \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda}} dx}; R_K - \text{ контактний тепловий опір між}$$

поверхнею оболонки будівлі та сенсором; α - коефіцієнт теплообміну з оточуючим середовищем; S_{sens} - відносне значення площі сенсору; r_{sens} - приведений радіус сенсору; λ - коефіцієнт теплопровідності досліджуваної зони оболонки будівлі.

Сумарну стандартну невизначеність вимірювань теплового опору за типом В визначається за формулою:

$$u_B(R_T) = \sqrt{u_B(S)^2 + u_B(q_T)^2 + u_B(T_\Delta)^2 + u_B(\alpha, R_K, S_{sens})^2 + u_B(q_{\Delta+\varepsilon})^2} \quad (29)$$

Стандартні невизначеності типу А, при при багатократних вимірюваннях вхідних величин температури $u_A(\Delta T)$ та теплового потоку $u_A(q)$ визначались за формулою:

$$u_A(E) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (E_n - \bar{E})^2}{N(N-1)}} \quad (30)$$

де E_n - значення вхідної величини при n -му вимірюванні, \bar{E} - усереднене значення вхідної величини, N - кількість багатократних вимірювань

Невизначеність типу А вимірювань теплового опору оболонки будівлі визначається за формулою:

$$u_A(R_T) = \frac{1}{R_T} \sqrt{\left(\left(\frac{1}{q} \right) \cdot u_A(\Delta T) \right)^2 + \left(\left(- \left(\frac{\Delta T}{q^2} \right) \right) \cdot u_A(q) \right)^2} \cdot 100\% \quad (31)$$

Сумарну стандартну невизначеність вимірювання теплового опору оболонки будівлі визначається за формулою:

$$u_C(R_T) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (32)$$

Розширена стандартна невизначеність результатів вимірювання теплового опору оболонки будівлі при коефіцієнті охоплення $k = 2$ визначається за формулою:

$$U(R_T) = k \cdot u_C(R_T) \quad (33)$$

Для оцінки достовірності контролю теплового опору була використана формула:

$$D'(R_T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_{ST}} \int_{\delta_{RT}}^{\delta_{ST}} \exp\left(\frac{(R_T-x)^2}{-2(\delta_{ST})^2}\right) dx - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_{RT}} \int_{\delta_{RT}}^{\delta_{ST}} \exp\left(\frac{(R_T-x)^2}{-2(\delta_{RT})^2}\right) dx \quad (34)$$

де $\delta_{RT} = \frac{U(R_T)}{2} \cdot \frac{R_T}{100}$; $\delta_{ST} = \frac{U_{ST}(R_T)}{2} \cdot \frac{R_T}{100}$; $U_{ST}(R_T)$ - розширена невизначеність результатів вимірювання теплового опору згідно стандарту ISO 9869.

Для забезпечення контролю теплового опору огорожувальних конструкцій будівель створена інформаційно-вимірювальна підсистема, важливою особливістю якої є модульний принцип побудови з використання стандартних компонентів та приладів, поєднаних шиною інформаційного інтерфейсу (рисунок 18). Відповідно до цієї схеми враховуються особливості елементів оболонки будівлі та з'являється можливість проведення досліджень одночасно у великій кількості зон.

В першому варіанті модуля сенсорного блоку передбачається використання сенсорів теплового потоку з теплометричною корекцією інерційності, що дає можливість знизити невизначеність вимірювань, яка викликана дрейфом температури огорожувальної конструкції. Це особливо важливо при проведенні досліджень в натурних умовах, а також при випробуваннях огорожувальних конструкцій з великим тепловим опором. Для цього варіанту модуля пропонується використовувати сенсори температури з індивідуальним калібруванням.

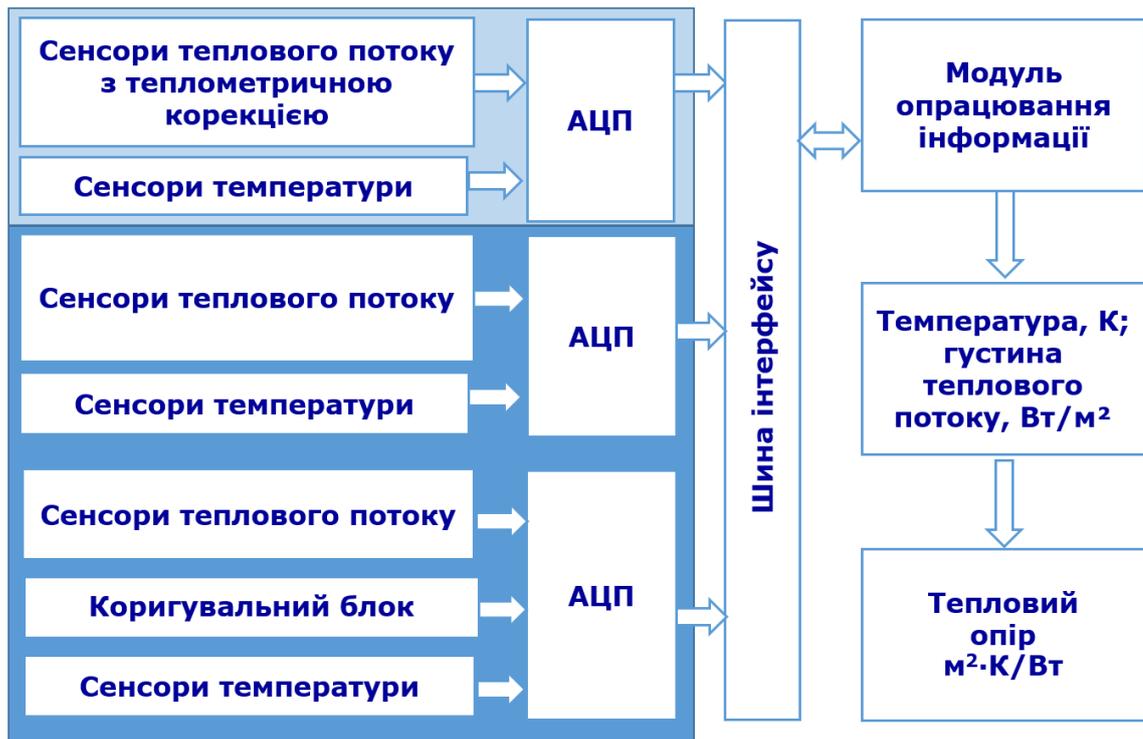


Рисунок 18. Схема побудови вимірювальної підсистеми, складена за модульним принципом

В другому варіанті модуля сенсорного блоку передбачається використання сенсорів теплового потоку різного розміру та коригувального блоку, який дає змогу враховувати складову пропорційну теплоті, що витрачається на нагрівання самого сенсору теплового потоку протягом вимірювання, знизити похибку вимірювання теплового опору огорожувальних конструкцій. Таке рішення рекомендується застосовувати для дослідження елементів оболонки будівлі складної форми.

Реєстрацію температури та густини теплового потоку, передавання, опрацювання та архівування вимірювальної інформації здійснюють за допомогою апаратно-програмного модуля системи, структуру якого представлено на рисунку 19.



Рисунок 19. Структура апаратно-програмного модуля системи

На рисунку 20 представлено апаратний модуль системи контролю теплового опору елементів оболонки будівлі, технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.

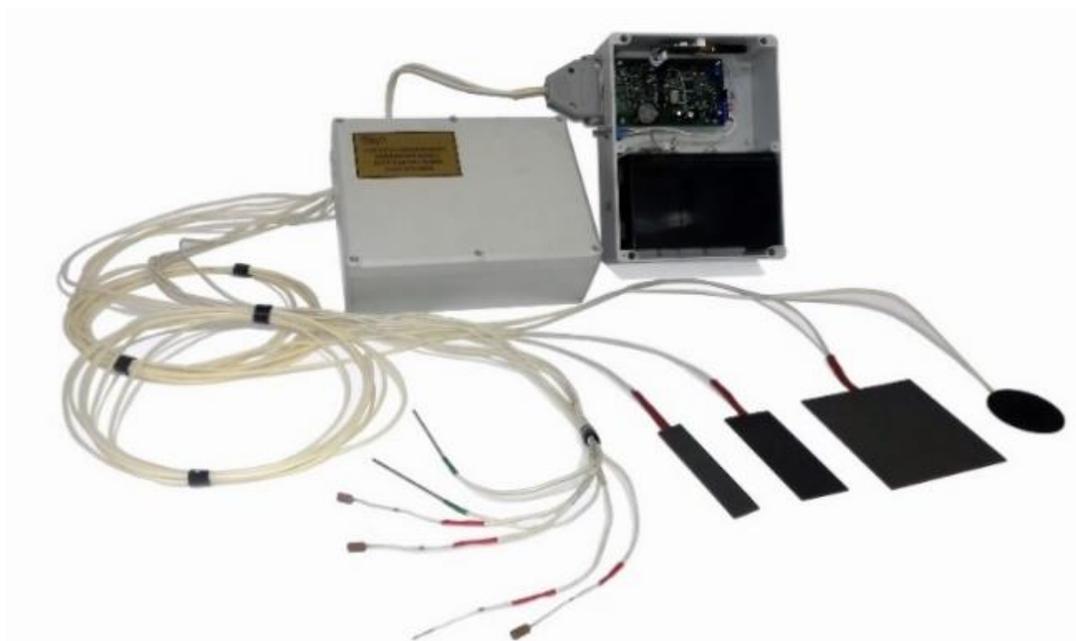


Рисунок 20. Модуль системи контролю теплового опору

Таблиця 3 Технічні характеристики системи контролю теплового опору

Кількість каналів	8 ... 160
Зони контролю	2 ... 40
Сенсори теплового потоку	біметалічні сенсори різних геометричних розмірів та сенсори з теплотричною корекцією
Діапазон значень поверхневої густини теплового потоку, Вт/м ²	1 ... 2000
Невизначеність контролю густини теплового потоку, %	В залежності від типу сенсору від $\pm 1,5$ до ± 3 %
Сенсори температури	Термоелектричний сенсор типу ХК, ХА з індивідуальним калібруванням, термометри опору Pt100
Діапазон значень температури, °С	-30 ... +100
Невизначеність вимірювання температури, К	$\pm 0,5$

Запропонована, розроблена і випробувана апаратно-програмна реалізація приладу для визначення коефіцієнту емісії. Його технічні характеристики наведено в таблиці 4. Прилад відповідає технічному рішенню, що обґрунтовано у розділі 3. На рисунку 21 представлено загальний вигляд переносного приладу для визначення коефіцієнту емісії в процесі проведення досліджень терморадіаційних характеристик (на дисплеї відображена температура нагрівача платформи сенсорів).



Рисунок 21. Загальний вигляд переносного приладу для визначення коефіцієнту емісії в процесі проведення досліджень

Таблиця 4 Технічні характеристики приладу для визначення коефіцієнту емісії

Діапазон контролю коефіцієнту емісії	від 0,05 до 1,0
Невизначеність (коефіцієнт охоплення 2)	0,02

В *п'ятому розділі* розглянуто метрологічне забезпечення вимірювання теплового потоку при контролі теплового стану оболонки будівлі. Для цього проведено моделювання процесів теплообміну в установці для радіаційного калібрування сенсорів теплового потоку та визначення терморадіаційних характеристик.

Схему досліджуваного об'єкту показано на рисунку 22. Він представляє собою замкнену циліндричну порожнину, яка імітує радіаційну систему калібрування сенсорів теплового потоку. Порожнина заповнена атмосферним повітрям. Радіус циліндру складає $r = 95$ мм, висота $H = 260$ мм. Верхня торцева поверхня нагрівається, а нижня сприймає теплоту (радіаційну, кондуктивну та конвективну). Матеріал бічної поверхні – полірований алюміній.

Розрахунки проведено за допомогою програмного комплексу *ANSYS CFX*. Для опису стаціонарної течії в'язкого теплопровідного газу використано осереднені по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса. Теплообмін моделювався за допомогою повного рівняння збереження енергії. Вплив гравітації враховувався в напрямку осі *Z*. Для моделювання радіаційного теплообміну використовувалась модель дискретного переносу. Для бокової поверхні (з алюмінію) коефіцієнт дифузного віддзеркалення прийнятий рівним 0,1. Граничні умови моделі наведено у Таблиці 5.

Таблиця 5 - Граничні умови

Границя	Температура, К	Коефіцієнт емісії поверхні
Верхня торцева поверхня, що нагрівається	393 ... 1000	0,95
Бокова поверхня	300	0,1 ... 0,2
Нижня торцева поверхня	300	0,95

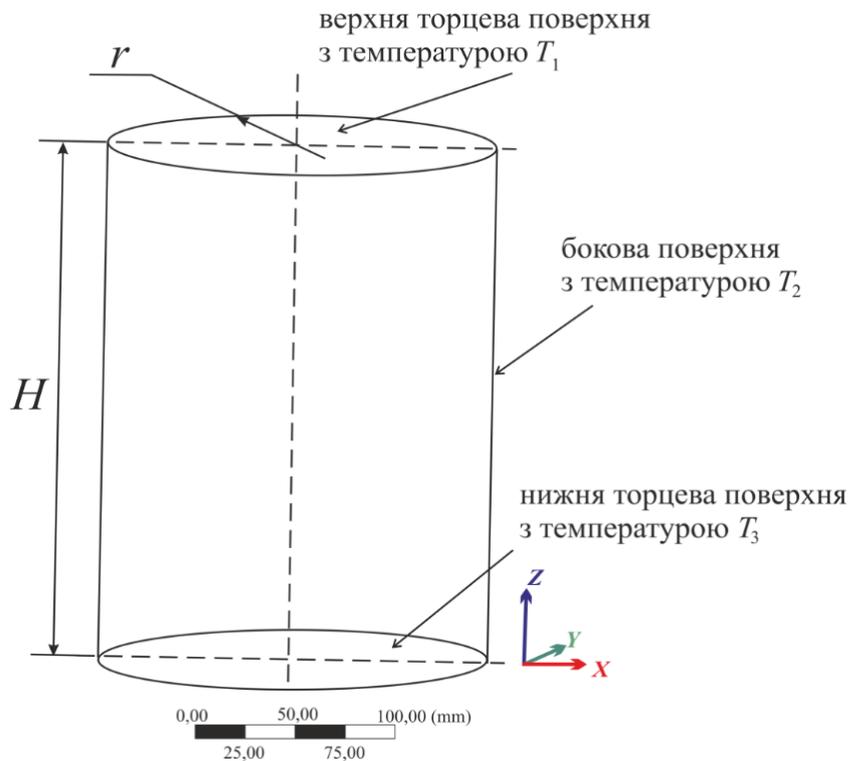


Рисунок 22 – Схематичне зображення дослідженого об'єкту

На рисунку 23 (а) показано поле температури повітряного середовища у центральній перетині циліндричної порожнини за температури верхньої торцевої поверхні $T_1 = 175^\circ\text{C}$. Як видно із рисунка, основний поздовжній градієнт температур має місце поблизу верхньої торцевої поверхні, а при віддаленні від неї температура повітря змінюється незначним чином.

За результатами моделювання, які наведені на рисунку 23 (б), побудовано векторне поле швидкостей повітря у центральній перетині циліндру. Поблизу бічної поверхні має місце опускна течія, а у центральній зоні – підйомна. Поблизу нижньої торцевої поверхні поле швидкості по поздовжній осі є досить рівномірним, при цьому значення швидкості повітря складає $1,5 \text{ мм/с}$.

Встановлено, що вплив конвекції на загальний тепловий потік є досить незначним. Загалом сумарний внесок у загальний теплообмін конвекції та теплопровідності не перевищує $0,1\%$, тобто можна вважати, що весь тепловий потік переноситься випромінюванням. В умовах калібрування сенсору він лише частково перекриває нижню торцеву поверхню циліндру. При цьому, значення коефіцієнту емісії поверхонь суттєво різняться: для поверхні сенсора

$\varepsilon = 0,95$, а для решти поверхні $\varepsilon = 0,2$. Незважаючи на низьку температуру нижньої торцевої поверхні (300 К), ця різниця, тим не менш, може вплинути на складний теплообмін у порожнині циліндру за рахунок перерозподілення теплових потоків. Для розрахунку цього випадку було проведено модифікацію комп'ютерної моделі – з виділенням на нижній поверхні розрахункової області розмірами 0.19×0.03 м.

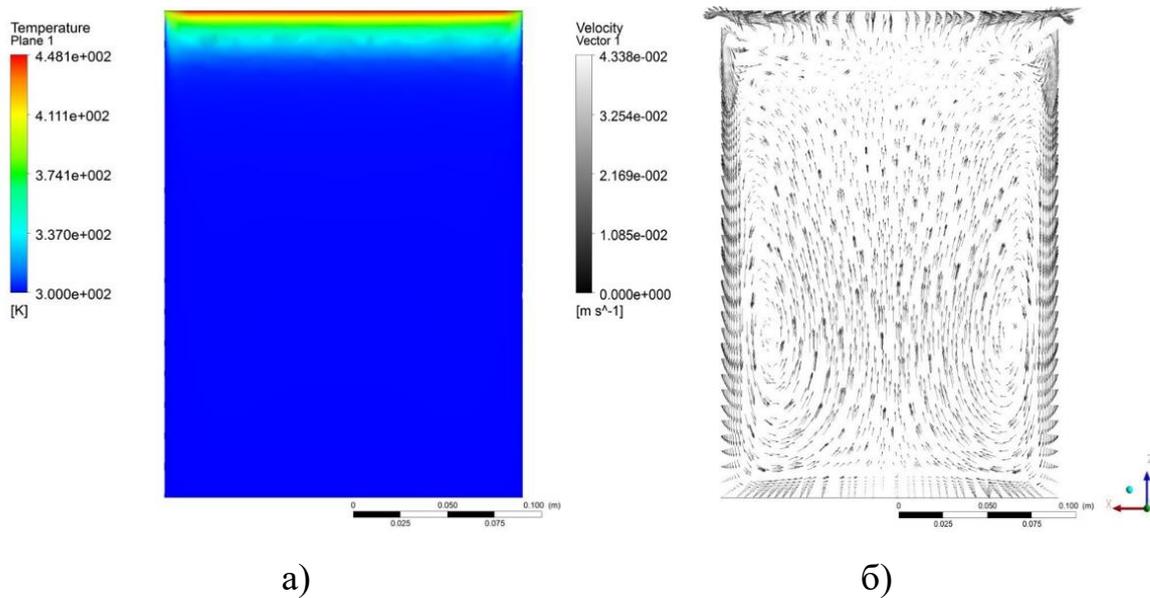


Рисунок 23. Поле температур (а) та векторне поле швидкостей (б) у центральному перетині циліндру

Результати розрахунків та їх порівняння з результатами експериментів і попередніх розрахунків (для випадку коли модель сенсора займає всю нижню поверхню) для різних температурних режимів, наведено на рисунку 24.

Врахування різниці коефіцієнтів емісії сенсора та нижньої поверхні системи дозволяє відтворити умови при яких проводяться калібрування сенсорів теплового потоку різної форми та визначити відхилення в розрахунках, яке становить 3,8-3,9%. Проте, це не призводить до суттєвого спотворення розподілу теплових потоків, які наведені на графіках представлених на рисунку 24.

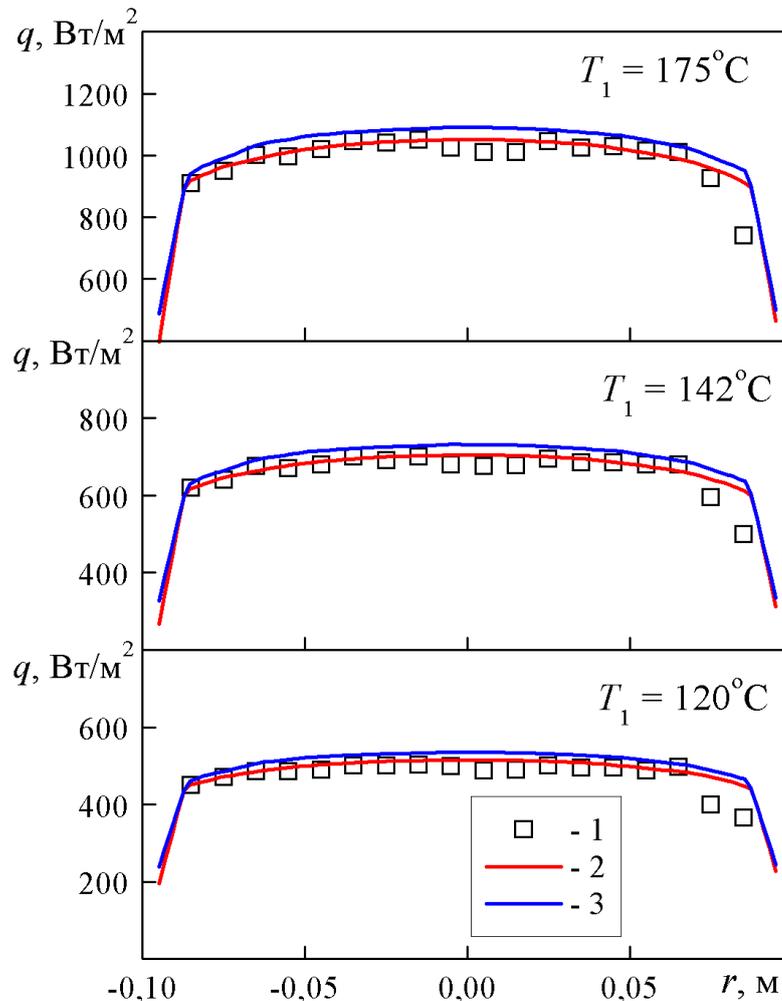


Рисунок 24. Радіальне розподілення питомого теплового потоку на нижній торцевій поверхні циліндру при коефіцієнті емісії бокової поверхні $\varepsilon_2 = 0,2$ для різних значень температури верхньої торцевої поверхні T_1 . 1 – експеримент; 2 – розрахунок при значенні коефіцієнт емісії всієї нижньої поверхні $\varepsilon_3 = 0,95$; 3 – розрахунок для значення коефіцієнту емісії поверхні сенсора $\varepsilon = 0,95$, а решти поверхні $\varepsilon = 0,2$

Проведено експериментальні дослідження різних типів сенсорів для використання при контролі теплового опору оболонки будівлі.

Для вимірювання поверхневої густини теплового потоку для сенсорів необхідно визначити наступні метрологічні та експлуатаційні характеристики: коефіцієнт перетворення, залежність коефіцієнта перетворення від температури, інерційність сенсора, коефіцієнт емісії поверхні сенсора.

Коефіцієнт перетворення сенсора визначається шляхом пропускання теплової енергії фіксованого значення через термочутливу поверхню

досліджуваного сенсора та вимірювання вихідного сигналу. Дослідження проведено з використанням кондукційного та радіаційного методів підведення теплової енергії, які відповідають різним умовам теплообміну під час роботи сенсорів.

Для визначення коефіцієнта випромінювання поверхні сенсора використано теплотричний метод розрахунку випромінювальних характеристик поверхні. Цей метод полягає у визначенні відношення потужності інфрачервоного випромінювання, поглиненого поверхнею, до потужності падаючого випромінювання від джерела тепла.

В роботі досліджено напівпровідникові сенсори в режимі сенсорів теплового потоку та біметалічні сенсори, технічні характеристики яких наведені в таблиці 5

Таблиця 5. Технічні характеристики сенсорів.

Модель сенсора	PGM-15 250 “а”	TES1- 12703 “б”	TES1- 12706 “с”	Біметалічний сенсор “d”	Біметалічний сенсор “e”	PU 22 “f”
Термоелементи	200 BiTe	127 BiSn	127 BiSn	Ni-Const	Ni-Const	н.д.
Товщина, мм	3,4	3,5	3,8	2	2	3
Розміри, мм	40x40	30x30	40x40	30	20x80	50
Компаунд	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	epoxy resin	epoxy resin	PU
Діапазон вимірюваних значень густини теплового потоку, В/м ²	±2000	±2000	±2000	±2000	±2000	±2000
Діапазон робочих температур °С:	-20... +230	-20... +138	-20... +138	-20... +200	-20... +200	-20... +90
Невизначеність, %	н.д.	н.д.	н.д.	± 3	± 3	± 5

При проведенні досліджень у радіаційному компараторі забезпечується однакова випромінювальна здатність теплочутливих поверхонь досліджуваного та еталонного сенсорів. Після цього сенсори розміщують на радіаторі водоохолоджуваної плити з термостатичним керуванням. Результати отримані шляхом порівняння вихідних сигналів досліджуваних сенсорів із сигналом еталонного сенсору, відносна невизначеність якого не перевищувала ±1,5%, з допустимою ймовірністю 0,95. Температура випромінювача

встановлювалась на рівні 120 °С, а температура водоохолоджуваної плити змінювалась в діапазоні від кімнатної температури до 50 °С. Тепловий потік випромінювання становив від 420 до 530 Вт/м².

Результати експериментальних досліджень коефіцієнта емісії поверхні сенсора ε та динамічні характеристики τ , яка визначається як час досягнення сигналу на рівні 0,63 ($\tau_{0,63}$) та 0,95 ($\tau_{0,95}$) при ступінчастій зміні температури, наведені в таблиці 6.

Таблиця 6. Експериментальні результати досліджень коефіцієнта емісії поверхні сенсора ε та динамічні характеристики сенсорів

	PGM-15-250 «а»	TES1-12703 «b»	TES1-12706 «c»	Біметалічний сенсор «d»	Біметалічний сенсор «e»	PU 22 «f»
ε	0,71	0,71	0,71	0,88	0,89	0,91
$\tau_{0,63}$ [с]	15	16	20	8	8	8
$\tau_{0,95}$ [с]	44	47	57	27	27	27

На рисунку 25 наведені результати дослідження чутливості сенсорів теплового потоку PGM-15-250 «а», TES1-12703 «b» і TES1-12706 «с» (три лінії на графіку «с» відповідають трьом сенсорам) показані як температурна залежність їхніх коефіцієнтів перетворення, отриманих у п'яти точках із діапазону значень температур. Кожна точка на графіку залежності є усередненим результатом серії вимірювань при даній температурі. Розрахункова відносна невизначеність коефіцієнтів перетворення сенсорів з довірчим рівнем 0,95 не перевищує $\pm 3\%$.

Аналіз отриманих характеристик сенсорів показує, що кожен з них має свої переваги та недоліки. Наприклад, перевагами модуля TES1-12706 «с» є низька вартість і висока чутливість (найнижче значення коефіцієнта перетворення), а біметалічних сенсорів «d» і «e» — їх відносно мала постійна часу, найменша товщина і термостійкість, а також можливість виготовлення потрібної форми і розміру.

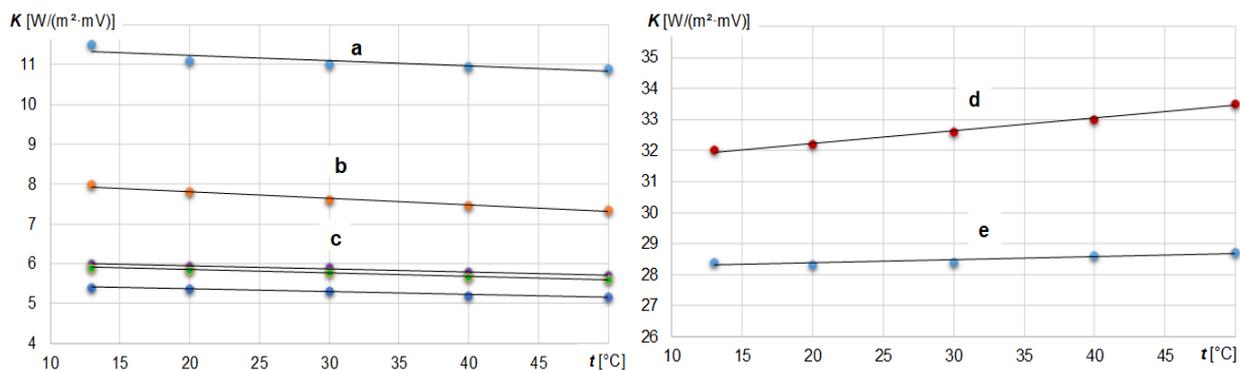


Рисунок 25. Температурні залежності коефіцієнта перетворення: PGM -15-250 «а», ТЕС1-12703 «б», ТЕС1-12706 «с» та біметалічних сенсорів «d» і «e»

З метою проведення порівняльного аналізу для визначення коефіцієнта перетворення сенсорів залежно від способу підведення теплової енергії проведені дослідження при кондуктивному підведенні тепла. У зв'язку з тим, що в такому разі важливим фактором, що впливає на точність результатів вимірювання, є відповідність діаметрів сенсора та робочої поверхні кондуктивної системи, тільки сенсор PU22 був досліджений як радіаційним так і кондуктивним методом.

На рисунку 26 наведено результати дослідження коефіцієнта перетворення сенсора PU 22 «f» при підведенні теплової енергії кондуктивним та радіаційним методом.

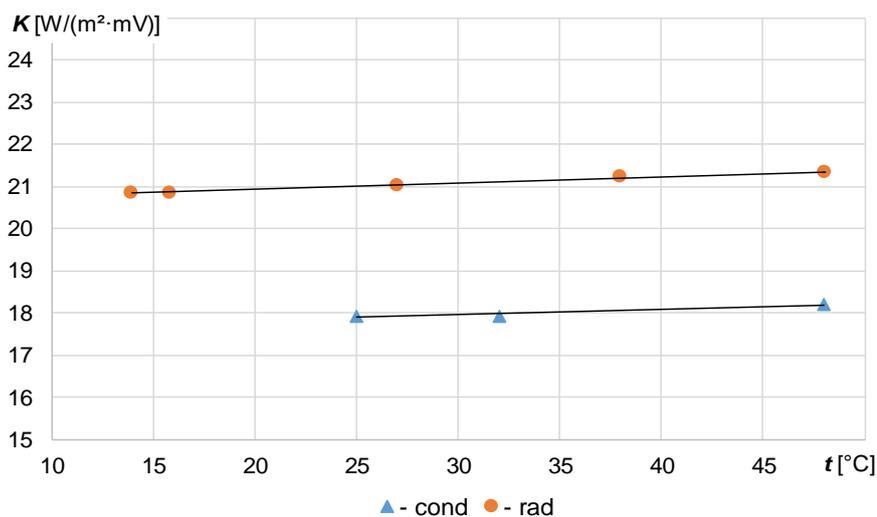


Рисунок 26. Температурні залежності коефіцієнта перетворення для сенсора PU 22 «f»

Різниця в значеннях коефіцієнта перетворення складає більше 14%. Це свідчить про те, що умови теплообміну можуть суттєво впливати на результати вимірювання теплового потоку.

В шостому розділі наведено експериментальні дослідження розробленої системи контролю теплового опору огорожувальних конструкцій будівель та приладу для визначення коефіцієнту емісії.

Лабораторні випробування системи контролю теплового опору разом з лабораторією будівельних огорожувальних конструкцій та матеріалів ДП „УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ” проводились на фрагменті конструкції з тришарових стінових панелей з утеплювачем із пінополіуретану з зазначенням однорідних зон (Рисунок 27) в кліматичній камері. При температурі повітряного середовища в холодній та теплій камерах на відстані 0,15 м від поверхонь зразка відповідно в межах мінус - 22,79°C...- 21,75°C; середнє значення температури внутрішнього повітря 23,60°C.

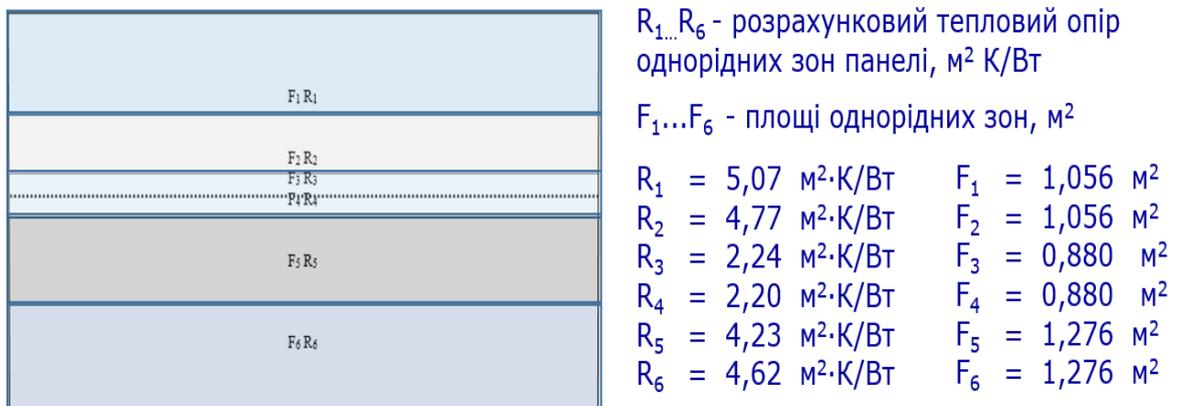


Рисунок 27. Схема розміщення однорідних температурних зон фрагменту конструкції

Результати отримані на системі ДП „УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ” та системи контролю теплового опору наведені в таблицях 7 та 8.

Таблиця 7. Результати теплотехнічних випробувань отриманих на системі ДП „УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ”

Найменування однорідних зон	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
Загальна площа виробу F, м ²	4,84					
Загальна площа вимірювальних однорідних зон F, м ²	1,056	1,056	0,088	0,088	1,276	1,276
Середня температура внутрішньої поверхні однорідних зон t _{вн} , °С	21,34	21,68	20,06	19,28	21,37	21,17
Середня температура зовнішньої поверхні однорідних зон t _з , °С	-21,96	-21,09	-21,88	-21,74	-21,40	-21,36
Середня щільність теплового потоку однорідних зон q, Вт/м ²	8,82	9,28	20,13	20,09	10,49	9,53
Термічний опір однорідних зон, R _к ^{0.3} ; м ² К/Вт	4,91	4,61	2,08	2,04	4,08	4,46

Таблиця 8. Результати теплотехнічних випробувань отриманих на системі контролю теплового опору

Найменування однорідних зон	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
Загальна площа виробу F, м ²	4,84					
Загальна площа вимірювальних однорідних зон F, м ²	1,056	1,056	0,088	0,088	1,276	1,276
Середня температура внутрішньої поверхні однорідних зон t _{вн} , °С	21,01	21,26	20,34	19,43	20,95	21,01
Середня температура зовнішньої поверхні однорідних зон t _з , °С	-22,01	-21,30	-21,65	-21,62	-21,65	-21,2
Середня щільність теплового потоку однорідних зон q, Вт/м ²	8,60	9,10	19,65	19,71	10,21	9,63
Термічний опір однорідних зон, R _к ^{0.3} ; м ² ·К /Вт	5,00	4,68	2,14	2,08	4,17	4,38

В результаті порівняльних випробувань встановлено, що відхилення результатів вимірювання температури не перевищувало $\pm 0,5^\circ\text{C}$, а густини теплового потоку – $\pm 0,75 \text{ Вт/м}^2$.

Для натурних випробувань створеної системи та апробації методики обрано ряд об'єктів, серед яких окремо розташований житловий 5-ти поверховий односекційний будинок. CFD модель характерної зони теплозахисної оболонки якого наведений в розділі 2. Теплові зображення

зовнішньої сторони будівлі та внутрішньої зони, де були розміщені сенсори, наведено на рисунку 28.

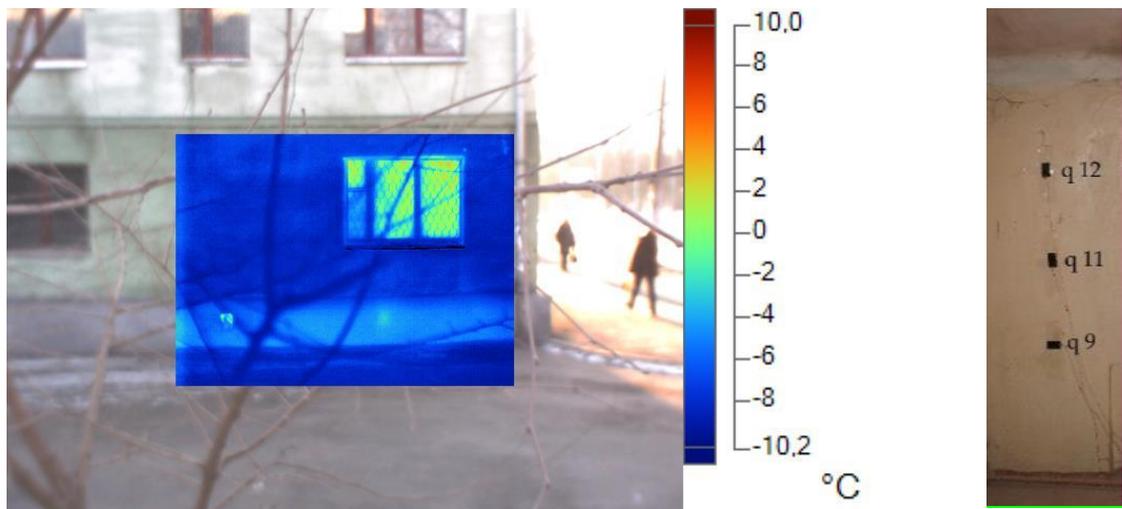


Рисунок 28. Термограма зовнішньої оболонки та місця встановлення сенсорів на внутрішній поверхні стіни будівлі

Для проведення валідації обрано величини температури та теплового потоку виміряні сенсорами в характерних зонах при проведенні експерименту з визначення теплового опору, які наведені в таблиці 9.

Таблиця 9. Порівняння результатів експериментальних досліджень та CFD моделі характерної зони теплозахисної оболонки

	q_9 , Вт/м ²	T_{si9} , °C	T_{se9} , °C	q_{11} , Вт/м ²	T_{si11} , °C	T_{se11} , °C	q_{12} , Вт/м ²	T_{si12} , °C	T_{se12} , °C
Експеримент	9,02	17,4	2,87	9,87	17,57	2,71	9,85	17,79	2,88
CFD	8,77	17,44	2,70	9,5	17,48	2,78	9,66	17,49	2,88
Відхилення,%	2,77	0,229	5,92	3,75	0,51	2,58	1,93	1,68	0

З аналізу таблиці 9, встановлено, що відхилення між результатами CFD моделювання та експериментальними даними не перевищує 5,92% для температури та 3,75% для теплового потоку, що свідчить про прийнятну збіжність отриманих результатів та адекватність створеної CFD моделі.

Проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання теплового опору оболонки будівлі (таблиця 10) для даного експерименту, за методикою заборонованною в розділі 4 за формулами (24) – (34).

Таблиця 10. Оцінка невизначеності результатів експериментального дослідження теплового опору оболонки будівлі

Невизначеність	Тип оцінки	%
Складова невизначеності системи вимірювання $u_B(S)$	B	0,3
Складова невизначеність, викликана дрейфом температури $u_B(q_\tau)$	B	2,122
складова невизначеності вимірювань різниці температури $u_B(T_\Delta)$	B	1,75
складова невизначеності вимірювань теплового потоку, за типом B, з урахуванням різниці коефіцієнтів емісії $u_B(q_{\Delta+\varepsilon})$	B	1,83
Стандартна складова невизначеності теплообмін з навколишнім середовищем, розмір чутливого елементу, та контактний тепловий опір $u_B(\alpha, R_K, S_{sens})$	B	2,34
Невизначеність типу A вимірювань теплового опору, $u_A(R_T)$	A	3,135
Розширена невизначеність результатів вимірювання теплового опору оболонки будівлі при коефіцієнті охоплення $k=2$, $U(R_T)$	A, B	10,258

Проведено порівняння отриманої оцінки невизначеності з стандартом ISO 9869, відповідно до якого розширена невизначеність лежить в межах від 14% до 28%, шляхом оцінки достовірності за формулою (34). При цьому встановлено підвищення достовірності для даного експерименту 2,67%, порівняно з нижньою межею, та 18,32%, при порівнянні з верхньою межею.

Проведено експериментальні дослідження терморадіаційних характеристик покриттів та матеріалів для віконних конструкцій з використанням створеного приладу для визначення коефіцієнту емісії.

Енергозберігаюче віконне скло повинне, з одного боку, мати високий коефіцієнт пропускання у видимій частині спектру, а з іншого боку, мати мінімальне значення випромінювальної здатності (коефіцієнта емісії) в інфрачервоній області спектра, характерній для теплообміну випромінюванням при температурі, близької до кімнатної. Також для підвищення енергоефективності вікон випускають полімерні плівки, що відбивають інфрачервоне випромінювання. Результати вимірювань з

використанням створеного приладу для визначення коефіцієнту емісії наведені у таблиці 11.

Таблиця 11. Результати вимірювань терморадіаційних матеріалів для віконних конструкцій

Матеріал	Коефіцієнт емісії ε
Скло віконне	0,90
Скло матове	0,93
k - скло	0,23
i - скло	0,11
Плівка "Solis-85"	0,38
Плівка "Solar-guard 35"	0,31
Плівка "Solar-guard 50"	0,35
Плівка "Heat mirror 77"	0,071
Плівка "HPR"	0,045

Висновки

Отримані в дисертаційній роботі результати в сукупності є вирішенням науково-практичної проблеми, що полягає у створенні теоретичних засад, розробленні та практичному застосуванні засобів та методів комплексного контролю терморадіаційних й теплофізичних характеристик матеріалів і виробів шляхом впровадження їх при проведенні обстеження теплоізоляційної оболонки, як складової частини енергоаудита, що забезпечує підвищення достовірності оцінювання теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій.

1. Розроблено новий концептуальний підхід до комплексного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, який базується на моделях інформативних параметрів полів та статистичних методах опрацювання даних. Використання розробленого концептуального підходу дозволяє вирішити ряд важливих задач неруйнівного контролю зовнішньої оболонки будівель: врахування факторів впливу на процес контролю, обґрунтування вимог до реалізації сенсорної підсистеми, розробка рекомендацій щодо зменшення суб'єктивного фактору впливу, розроблення

метрологічного забезпечення системи, узгодження з існуючими стандартами в галузі, що дало можливість забезпечити достовірність оцінки теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій.

2. На основі концептуального підходу розроблено методикку неруйнівного контролю використовуючи тепловізійний аналіз огорожувальних конструкцій та контроль значень поверхневої густини теплового потоку і температури, що дозволило знизити вплив суб'єктивного фактору на проведення випробувань.

3. На основі проведеного комп'ютерного моделювання процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну зовнішньої оболонки будівлі визначено вимоги до сенсорів теплового потоку при контролі теплового опору, а також обґрунтовано доцільність використання корекції результатів визначення теплового потоку

4. Розроблено систему контролю теплового опору та програмний пакет реєстрації та опрацювання інформації. За рахунок модульної побудови системи і використання різних модифікацій сенсорів теплового потоку та методу корекції результатів визначення теплового потоку забезпечено можливість проведення контролю одночасно в 40 зонах та на об'єктах, що мають складну форму.

5. Створено новий метод контролю коефіцієнту емісії, в основу якого покладено принципи диференціальної калориметрії, що забезпечує компенсацію конвективно-кондуктивної складової теплообміну і дозволяє проводити експрес-контроль в лабораторних, виробничих та натурних умовах без спеціальної підготовки поверхні об'єкта контролю.

6. На основі проведеного комп'ютерного моделювання та верифікації процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну в приладі експрес-контролю коефіцієнту емісії встановлено, що конвективний теплообмін в комірці є співрозмірним з радіаційним теплообміном, причому конвективний теплообмін призводить до нерівномірного розподілу теплового потоку на поверхні сенсора. В результаті аналізу динаміки виходу на режим

контролю встановлено, що режим можна розглядати як стаціонарний вже через 30 хвилин.

7. Створено прилад для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів, в основу якого покладено розроблений диференціальний метод. Прилад дозволяє проводити дослідження енергоефективних матеріалів та покриттів з коефіцієнтом емісії в діапазоні від 0,05 до 1,0 з розширеною невизначеністю 0,02.

8. За результатами комп'ютерного моделювання процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну в калібрувальній системі встановлено границі робочої зони із рівномірним розподілом густини теплового потоку, що дало можливість знизити невизначеність результатів калібрування.

9. Результати виконаних досліджень впроваджено: в навчальному процесі кафедри інженерії енергосистем Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України (акт впровадження від 05.03.2024); в навчальному процесі кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (акт впровадження від 21.03.2024); в ТОВ НВП «Машинобудування» (акт впровадження від 20.12.2018), Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (акт впровадження від 11.11.2019), ТОВ «Буд-Буд» (акт впровадження від 1.12.2023), ТОВ „МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ” (акт впровадження від 9.12.2021), ДП «НТЦ НТ НАН України» (акт впровадження від 18.12.2018), ІТТФ НАН України (акт впровадження від 18.12.2018 та 07.12.2021) та ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (акт впровадження від 11.12.2018) .

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Notra, O., Kovtun, S., **Dekusha, O.** (2021). Analysis of the characteristics of bimetallic and semiconductor heat flux sensors for in-situ measurements of envelope

- element thermal resistance. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 182, 109713
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109713> (*Scopus, Q1*).
2. Hotra, O., Kovtun, S., **Dekusha, O.**, Grądz, Ż., Babak, V., Styczeń, J. (2023). Analysis of Low-Density Heat Flux Data by the Wavelet Method. *Energies*, 16 (1), 430. <https://doi.org/10.3390/en16010430> (*Scopus, Q2*).
 3. Воробйов, Л. Й., Декуша, Л. В., **Декуша О. Л.**, Ковтун, С. І., Іванов, С. О. (2020). Диференціальний прилад для вимірювання коефіцієнту емісії поверхні. *Український метрологічний журнал*, № 3А, 153-159. ISSN (Online) 2522-1345 (*фахове видання Кат. А*)
 4. Zaporozhets, A., Burova, Z., **Dekusha, O.**, Kovtun, S., Dekusha, L., Vorobiov, L., Ivanov, S. (2022). Information Measurement System for Thermal Conductivity Studying. *Studies in Systems, Decision and Control*, 395, 1-19. Springer, Cham. ISSN 21984182 https://doi.org/10.1007/978-3-030-85746-2_1 (*Scopus*).
 5. Hotra, O., Kovtun, S., **Dekusha, O.**, Grądz, Ż. (2021). Prospects for the Application of Wavelet Analysis to the Results of Thermal Conductivity Express Control of Thermal Insulation Materials. *Energies*, 14(17), 5223 <https://doi.org/10.3390/en14175223> (*Scopus, Q2*).
 6. Babak, V., **Dekusha, O.**, Dekusha, L., Vorobiov, L., Ivanov, S. (2018). System for Monitoring Thermal Resistance of Building Constructions. *International Journal “NDT Days”*, 1(2), 178-185. (*фахове іноземне видання, ISSN 2603-4018*).
 7. Грищенко, Т.Г., Декуша, Л.В., Воробьев, Л.И., Бурова, З.А., Ковтун, С.І., **Декуша, О.Л.** (2017). Теплометрия: теория, метрология, практика. Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока: Монография. Київ: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 438 с. ISBN: 978-966-02-8199-8
 8. Грищенко, Т.Г., Декуша, Л.В., Воробйов, Л.Й., **Декуша, О.Л.**, Бурова, З.А., Ковтун, С.І. (2018) Теплометрия: теория, метрология, практика. Кн. 3: Теплометрическая аппаратура для решения прикладных задач: в 2 томах. Том 1 Монография в трех книгах. – К.: Институт технической теплофизики НАН Украины. Кн. 3.– 433 с. ISBN 978-966-02-8639-9 (Т.1).
 9. **Dekusha, O.**, Burova, Z., Kovtun, S., Dekusha, H., Ivanov, S. (2020). Information-Measuring Technologies in the Metrological Support of Thermal Conductivity Determination by Heat Flow Meter Apparatus. *Studies in Systems, Decision and Control* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_14 (*Scopus, ISSN 21984182*)
 10. **Декуша, О.Л.**, Воробйов, Л.Й.. (2016). Вимірювання теплоємності методом покрокового сканування при одночасному порівнянні з еталонним

- зразком. *Український метрологічний журнал*, 4, 48-51. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2016.112784> (фахове видання, ISSN 2522-1345).
11. **Dekusha, O.**, Kovtun, S., Burova, Z. (2022). Overview of materials and coatings emission coefficient control methods. *System Research in Energy*, 2(71) 53-63. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.02.053> (фахове видання, ISSN 2786-7102).
 12. Babak, V., **Dekusha, O.**, Zaporozhets, A., Vorobiov, L., Kovtun. S. (2023). Methods for Diagnosing the Technical Condition of Heating Networks Pipelines. *Studies in Systems, Decision and Control*, 454, 267-277. DOI: 10.1007/978-3-031-22464-5_15 (Scopus, ISSN: 21984182).
 13. Zaporozhets, A., **Dekusha O.**, Kovtun, S. (2020). System for monitoring the technical state of heating networks based on UAVs. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 1080, AISC, 935-950. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_61 (Scopus, ISSN: 21945357).
 14. **Декуша, О.Л.**, Іванов, С.О., Воробйов, Л.Й., Бабак, В.П., Декуша, Л.В. Патент на винахід №121075, Україна, МПК G01K17/20, G01N25/20. Прилад для вимірювання теплового опору огорожувальних конструкцій; заявл. 26.12.2018, опубл. 25.03.2020. Бюл. №6/2020. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1421066/>
 15. **Декуша, О.Л.**, Іванов, С.О., Воробйов, Л.Й., Бабак, В.П., Декуша, Л.В., Кобзар, С.Г., Ковтун, С.І. Патент на винахід №123484, Україна, МПК G01J5/12 Прилад для вимірювання ступеня чорноти матеріалів; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 20.09.2019, опубл. 08.04.2021. Бюл. № 14/2021. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1587048/>
 16. Babak, V., **Dekusha, O.**, Burova, Z. (2021). Hardware-software system for measuring thermophysical characteristics of the materials and products. *CEUR Workshop Proceedings*, 3039, 255-266. <https://ceur-ws.org/Vol-3039/paper15.pdf> (Scopus, ISSN 16130073).
 17. Babak, V., **Dekusha, O.**, Kovtun, S., Shcherbak, L., Kobzar, S. (2023). Computer Model of the Building Envelope the Thermophysical Characteristics Determining Process. *CEUR Workshop Proceedings*, 3628, 236-251. <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper24.pdf> (Scopus, ISSN 16130073).
 18. Babak, V., **Dekusha, O.**, Kovtun, S., Burova, Z., Parkhomenko, G. (2023). Computational Fluid Dynamics Model of the Heat Transfer at Thermal Resistance control of Building envelope. *CEUR Workshop Proceedings*, 3513, 363-373. <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper24.pdf> (Scopus, ISSN 16130073).

19. **Dekusha, O.**, Kovtun, S., Romanenko, V., Sozonov, S. (2022). Information-measuring Technology for Buildings Enclosing Structures Thermal Resistance Control. <https://ceur-ws.org/Vol-3309/paper19.pdf> *CEUR Workshop Proceedings*, 3309, 301-313. (**Scopus**, ISSN 16130073).
20. Babak, V., Kovtun, S., **Dekusha, O.** (2020). Information-measuring technologies in the metrological support of heat flux measurements. *CEUR Workshop Proceedings*, 2608, 379-393. <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper29.pdf> (**Scopus**, ISSN 16130073).
21. Babak, V., **Dekusha, O.**, Kovtun, S., Ivanov, S. (2019). Information-measuring system for monitoring thermal resistance. *CEUR Workshop Proceedings*, 2387, 102-110. <https://ceur-ws.org/Vol-2387/20190102.pdf> (**Scopus**, ISSN 16130073).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

22. **Dekusha, O.**, Vorobiov, L., Dekusha, L., Babak, V., Ivanov, S., Kobzar, S., Kovtun, S., Dekusha, H. (2020). Heat Exchange Simulation of The Method And Portable Device For Measuring The Emissivity. *ELNANO 2020 – Proceedings*, 9088837, 450-455. <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088837> (**Scopus**, ISBN 978-172819713-5).
23. Kovtun, S., Dekusha, O., Dekusha, L., Vorobiev, L., (2020), Simulation of system for reproduction of high intensity heat flux: Reports of the XII International Scientific and Technical Conference "Metrology and Measuring Techniques", 145-152, <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3A.2020.218713> (**Web of Science**).
24. Dekusha, L., Kovtun, S., **Dekusha, O.** (2019). Heat flux control in non-stationary conditions for industry applications. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings*, 8879847, 601-605, DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879847 (**Scopus**, ISBN 978-1-7281-3882-4).
25. Babak, V., **Dekusha, O.**, Vorobiov, L., Dekusha, L., Kobzar, S., Ivanov, S. (2019). The Heat Exchange Simulation in the Device for Measuring the Emissivity of Coatings and Material Surfaces. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019 - Proceedings*, 8783537, 301-304. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783537 (**Scopus**, ISBN:978-1-7281-2065-2).
26. **Dekusha, O.**, Kobzar, S., Ivanov, S., Kovtun, S. (2019). Calorimetric method for measuring the emissivity of coatings and material surfaces. *Technologie, procesy i systemy produkcyjne. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Bialej*, 3(05) 47-58.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

27. Бабак, В.П., Берегун, В.С., Бурова, З.А., Воробйов, Л.Й., Декуша, Л.В., **Декуша, О.Л.**, Запорожець, А.О., Ковтун, С.І., Красильніков, О.І., Назаренко, О.О., Полобюк, Т.А. (2016). Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії. *Монографія (В.П. Бабак, Ред.)*. Київ: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 298 с. ISBN: 978-966-02-7967-4
28. Грищенко, Т.Г., Декуша, Л.В., Воробйов, Л.Й., **Декуша, О.Л.**, Бурова, З.А., Ковтун, С.І. (2018). Теплометрия: теория, метрология, практика. Кн. 3: Теплометрическая аппаратура для решения прикладных задач : в 2 томах. Том 2 Монография в трех книгах. Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2018. Кн. 3. 433 с. ISBN 978-966-02-8639-9 (Т.2).
29. Ковтун, С.І., Іванов, С.О., Декуша, Л.В., **Декуша, О.Л.**, & Воробйов, Л.Й. (2018). Засоби вимірювання радіаційного теплообміну та інсоляції. *World Science*, 7(35), V.5, 31-38. DOI: [10.31435/rsglobal_ws/12072018/6038](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/12072018/6038) ISSN 2413-1032
30. Бабак, В., Воробйов, Л., Декуша, Л., Волков, В., Бурова, З., **Декуша, О.**, Ковтун, С. (2018). Вимірювання терморадіаційних характеристик спектрально-селективних матеріалів для космічних конструкцій. *Traektoriâ Nauki*, 4(6), 1009-1019. doi: 10.22178/pos.35-2. ISSN 2413-9009.
31. Ковтун, С.І., Воробъев, Л.И., Декуша, Л.В., **Декуша, О.Л.**, Бурова, З.А. (2018). Теплометрическая методика измерения коэффициента эмиссии материалов и покрытий. *World Science*, 6(34), V.2, 21-26. DOI: [10.31435/rsglobal_ws/12062018/5815](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/12062018/5815) ISSN 2413-1032